

Fugenabdichtungen

Langzeitverhalten von Fugenvergussmassen aus Polymerbitumen auf einer Versuchsstrecke

Joint d'étanchéité

Comportement à long terme des joints à base de
bitume-polymère sur un tronçon de route témoin

Joint sealing

Long-term behaviour of polymer bitumen joint sealants
on a trial road section

EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf
Abteilung Strassenbau/Abdichtungen

S. Hean, dipl. Chem. HTL

M. N. Partl, Dr. sc. techn., dipl. Ing. ETH/SIA

Forschungsauftrag VSS 1991/003 (22/91) auf Antrag des
Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Februar 2003

1052

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassenbeauftragten Autor(en).
Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes.
Diffusion: Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall' Ufficio federale delle strade.
Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) appointed by the Swiss federal roads authority.
Supply: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Fugenabdichtungen

Langzeitverhalten von Fugenvergussmassen aus Polymerbitumen auf einer Versuchsstrecke

Joint d'étanchéité

Comportement à long terme des joints à base de bitume-polymère sur un tronçon de route témoin

Joint sealing

Long-term behaviour of polymer bitumen joint sealants on a trial road section

Forschungsauftrag VSS1991/003 auf Antrag des VSS;
Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation; UVEK
Bundesamt für Strassen; ASTRA

Forschungsstelle:
Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt; EMPA Dübendorf

Autoren:
S. Hean, dipl. Chem. HTL
M.N. Partl, Dr. sc. techn., dipl. Ing ETH, SIA

ZUSAMMENFASSUNG

A. Gegenstand/Ziele

Heiss eingefüllte Fugenvergussmassen aus Polymerbitumen dienen hauptsächlich dem Abdichten und Füllen von Fugen bei Betonbelägen, Belagsanschlüssen auf Brücken, Flugplätzen sowie Parkflächen im Hoch- und Tiefbau. In letzter Zeit werden solche Fugenvergussmassen zudem auch als Tränkmassen für Fahrbahnübergänge aus Polymerbitumen eingesetzt. Um ihrer vielseitigen Funktion gerecht zu werden, müssen die Fugenvergussmassen im System hohe Anforderungen erfüllen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war einerseits die Untersuchung der Dauerhaftigkeit von Fugenvergussmassen in Abhängigkeit der Materialeigenschaften im Anlieferungszustand, der Einbaumethode sowie der einbau- und betriebsbedingten Alterung; andererseits die Untersuchung der Aussagekraft von Laboruntersuchungen hinsichtlich Praxisverhalten am Objekt während fünf Jahren. Zusammen mit den Erkenntnissen aus einer vorangegangenen Forschungsarbeit [L2] sollten damit fundierte Grundlagen geschaffen werden, um nicht nur die Dauerhaftigkeit der Fugenvergussmassen sicherzustellen, sondern auch die Revision und Ausarbeitung von Schweizer und europäischen Normen zu unterstützen.

B. Vorgehen

Die vorliegende Arbeit umfasst die Ermittlung objektspezifischer Daten während des Einbaus der Fugenvergussmassen einschliesslich Lanzeitbeobachtung von Zustandsveränderungen mittels Laboruntersuchungen und visueller Beurteilung vor Ort.

Für das Projekt stellte das Tiefbauamt des Kantons Uri eine etwa 600m lange Autobahnstrecke der Nationalstrasse A2 bei Altdorf zur Verfügung. Auf dieser extrem befahrenen und klimatisch stark beanspruchten Strecke aus Beton wurden von unterschiedlichen Unternehmungen sieben verschiedene Fugensysteme eingebaut. Gleichzeitig wurden je vier Fugenmodellkörper vergossen und als zusätzliche Bewitterungsprüfkörper zwecks späterer Laboruntersuchungen am Strassenrand platziert. Während des Einbaus wurden die Bedingungen genau erfasst und protokolliert. Die Untersuchung der technologischen Eigenschaften der Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand erfolgte nach SN 671610 und wurde durch Zusatzprüfungen, wie Gelpermeationschromatografie (GPC), Dynamic Shear Rheometer (DSR) etc. ergänzt. Entsprechende Untersuchungen dienten auch der Erfassung des Alterungseinflusses infolge Einbau und Witterung nach 2.5 und 5 Betriebsjahren. Zudem wurde der Zustand der Fugen hinsichtlich allfälliger Schäden, wie Flankenablösungen, Rissbildungen, Wegfliessen der Fugenvergussmassen etc., nach dem Einbau sowie nach 1, 2.5 und 5 Jahren durch Experten visuell beurteilt.

Um Auskünfte über die Grössenordnung der Bewegungen und Temperaturen der Betonplatten im Fugenbereich zu erhalten, wurde die Versuchstrecke überdies mit speziellen Messeinrichtungen bestückt.

C. Ergebnisse und Folgerungen

In dieser Arbeit konnten wichtige Informationen über den Einfluss

- der Materialzusammensetzung und der Materialeigenschaft im Anlieferungszustand,
- des Systemaufbaus (mit oder ohne Voranstrich; mit oder ohne Oberflächenabdeckung mit Feinsplitt oder Sand),
- der Eigenschaftsveränderung durch den Einbau und im Betrieb,
- der Beschaffenheit der Betonfugenflanken,
- der Einbaugerätschaften und der Einbaumethoden

auf die Dauerhaftigkeit der Fugen in der Praxis während des untersuchten Zeitraumes von fünf Jahren gewonnen werden. Durch Langzeitmessungen der statischen Fugenbewegungen und der Temperaturen der Fugen und Betonplatten, ergänzt durch Messung dynamischer Bewegungen infolge Verkehr, resultierten ausserdem wertvolle Hinweise, die für ingenieurmässige Berechnung und Planung sowie prüftechnisch für die Alterungssimulation und Festlegung von Prüfbedingungen nützlich sein können.

Hinsichtlich Aussagekraft bestehender, normierter Laboruntersuchungen konnten Änderungsvorschläge für Prüfverfahren und Anforderungswerte unterbreitet werden. Gleichzeitig wurden Erkenntnisse über die Eignung von neuen, performanceorientierten Prüfungen für die Zustandcharakterisierung von Fugenvergussmassen erarbeitet. Damit wurden zusammen mit den Ergebnissen der früheren Forschungsarbeit [L2] fundierte Grundlagen geschaffen, die bereits seit 1999 in die Revision der Schweizer Normen und in die CEN-Normierung für Fugenvergussmassen einfließen.

Die Untersuchung der Eignung der Laboralterung mittels RTFOT bei 180°C im Vergleich zum Zustand nach dem Einbau zeigte, dass sowohl die Ergebnisse des Polymerabbaus als auch zahlreiche Eigenschaften der Proben nach dem Einbau und nach der Alterung im Labor stark unterschiedlich waren. Der Grund dafür liegt in der Luftzufuhr beim RTFOT bei 180°C wodurch die Elastomere in der Polymerbitumen-Mischung, wie Styrol-Butadiene-Styrol Copolymere (SBS), stärker oxidiert und abgebaut wurden. Die Simulation der Einbaualterung für Fugenvergussmassen sollte daher mit Methoden ohne intensive Luftzufuhr simuliert und untersucht werden (z.B. die Fugenvergussmasse in einem geschlossenen Rundkolben bei 180°C während 6 Stunden rühren).

Die Arbeit hat klar verdeutlicht, dass der Zustand der Fugenvergussmasse nach dem Einbau für die Lebensdauer der Fuge massgebend ist und einer einwandfreien Ausführung des Einbaus eine zentrale Bedeutung zukommt. Tatsächlich konnten nach fünf Jahren im Betrieb nur drei von sieben der untersuchten Fugensysteme noch als praxistauglich bewertet werden.

Bemerkenswerterweise konnten nur weniger als die Hälfte der untersuchten Fugenvergussmassen die Anforderungen der bestehenden Schweizer Norm SN 671'625 erfüllen. Die ermittelten Werte standen teilweise in Widerspruch zur Deklaration im technischen Blatt, wie dies bereits auch in einer früheren Arbeit [L2] festgestellt wurde. Ausserdem zeigte es sich, dass teilweise weder Arbeitsanweisung noch Einbauprotokolle vorlagen. Diese Dokumente sind aber wichtige Qualitätsmanagement-Instrumente, um Fehlern beim Einbau entgegen zu wirken. Aus diesem Grund muss ein Qualitätssicherungssystem für Fugenvergussmassen geschaffen werden, welches die Qualität der auf dem Markt angebotenen Produkte garantiert. Hierzu gehören eine Systemzulassung, eine Fremdüberwachung sowie eine Kontrollprüfung beim Einbau.

RESUME

A. Objet/Buts

Les produits à couler pour joints posés à chaud en bitume-polymère servent principalement à l'étanchéification et au remplissage des joints dans les revêtements de routes en béton et sur les raccords de joints sur les ponts, les aéroports ainsi sur les parkings couverts ou souterrains. De plus, ces produits à couler pour joints sont actuellement aussi utilisés comme masse d'imprégnation sur les joints de chaussée en bitume polymère. Pour remplir leur fonction dans les systèmes où ils sont utilisés, ces produits à couler pour joints doivent satisfaire des exigences élevées.

Le présent travail avait pour buts d'une part d'étudier l'influence des caractéristiques du matériau à l'état de livraison ainsi que du vieillissement provoqué par la méthode de pose et l'exploitation sur la durabilité et d'autre part d'évaluer la fiabilité des essais de laboratoire en relation avec le comportement réel des produits à couler pour joints sur l'objet pendant cinq ans. Avec les connaissances acquises dans un programme de recherche précédent [L2], cette étude devait fournir des bases fondées permettant non seulement de garantir une durabilité suffisante des produits à couler pour joints mais aussi de fournir une contribution en vue de la révision des normes suisses et européennes.

B. Exécution

Le présent travail est consacré à la saisie des données sur les objets durant la pose ainsi qu'à l'observation à long terme des modifications de l'état des produits à couler pour joints à l'aide d'essais de laboratoire et d'observations sur place.

Pour ce projet, le Service des ponts et chaussées du canton d'Uri avait mis à disposition un tronçon d'autoroute en béton d'une longueur d'environ 600 m sur la route nationale A2 près d'Altdorf. Ce tronçon d'autoroute supporte un trafic très intense et est soumis à de fortes sollicitations climatiques. Sept systèmes de joints différents ont été mis en place par différentes entreprises. Simultanément, on a réalisé en bordure de ce tronçon d'autoroute quatre éprouvettes modèles pour chaque systèmes de joints comme éprouvettes de résistance aux intempéries pour des essais de laboratoire. Les conditions de mise en place ont été relevées et enregistrées. Les caractéristiques technologiques des produits à couler pour joints à l'état de livraison ont été déterminées selon la norme SN 671610 ainsi qu'à l'aide d'essais supplémentaires tels que la chromatographie par perméation de gel (GPC), et leurs propriétés à l'aide, entre autres, du rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR). Les résultats ont servi à déterminer l'influence du vieillissement dû à la pose et aux influences climatiques après 2.5 et 5 ans. L'évaluation de l'état des joints quant à la présence de dommages éventuels tels que le décollement des flancs, la fissuration, le fluage, etc. a été effectuée par examen visuel après la pose ainsi qu'après 1, 2.5 et 5 ans.

Afin d'obtenir des informations sur l'ampleur des mouvements des dalles de béton au voisinage des joints, des dispositifs de mesure ont de plus été installés pour enregistrer les mouvements des joints ainsi que la température des joints et du béton.

C. Résultats et conclusions

Ce travail a permis de recueillir des informations importantes sur l'influence de

- la composition et des caractéristiques du matériau à l'état de livraison,
- la structure du système (avec ou sans enduit d'apprêt; avec ou sans saupoudrage superficiel de gravillon fin ou de sable),
- la modification des caractéristiques provoquées par la pose ou en service,

- la conformation des flancs du béton des joints,
- l'appareillage et la méthode de pose

sur la durabilité des joints dans la pratique sur une période de cinq ans. Les mesures à long terme des mouvements statiques des joints et de la température du béton et des joints, complétées par la mesure des mouvements dynamiques provoqués par le trafic, ont elles aussi fourni des informations précieuses et utiles pour le calcul, la planification, la simulation du vieillissement et la fixation des conditions d'essai.

En outre, la fiabilité de l'information fournie par les essais de laboratoire actuels a été discutée et des propositions ont été émises pour l'amélioration de ces méthodes d'essai et la modification des performances requises. L'adéquation de nouveaux essais de performances pour la caractérisation des produits à couler pour joints a été étudiée et discutée. Avec les résultats du travail de recherche antérieur [L2], les résultats de cette étude fournissent des bases fondées dont il a déjà été tenu compte dans la révision des normes suisses et CEN sur les masses à couler pour joints.

On a encore procédé à une étude comparative du vieillissement artificiel en laboratoire par RTFOT à 180°C et du vieillissement provoqué par la pose. Les différences constatées entre le RTFOT à 180°C et le vieillissement dû à la pose étaient importantes et cela aussi bien pour ce qui est de la dégradation des polymères que pour de nombreuses autres caractéristiques. Avec le RTFOT, du fait de l'apport d'air, les élastomères du mélange de bitume-polymère, tels que le copolymère styrène-butadiène-styrène (SBS), s'oxydent et se dégradent plus rapidement. C'est la raison pour laquelle la simulation et l'étude du vieillissement des masses à couler pour joints provoqué par la pose devrait s'effectuer avec des méthodes sans apport d'air important (p. ex. agitation de la masse à couler pour joints durant 6 heures dans un cylindre fermé).

Ce travail a montré clairement que l'état de la masse à couler pour joint immédiatement après sa mise en place est déterminant pour la durée de vie du joint. L'exécution parfaite de la pose a ainsi une importance capitale. Après une durée de service de 5 ans, seuls trois des sept systèmes de joints examinés pouvaient en effet encore être considérés comme aptes à remplir leur fonction.

Il est étonnant de constater que moins de la moitié des masses à couler pour joints examinées dans ce travail étaient conformes à la norme suisse SN 671'625. Les valeurs déterminées des caractéristiques étaient parfois même en contradiction avec celles déclarées sur les fiches techniques, comme cela avait déjà été constaté lors d'une étude antérieure [L2]. En outre, il est apparu que, dans certains cas, les directives de pose et les formulaires de procès-verbal de pose manquaient. Ces documents sont des instruments de gestion de la qualité importants pour éviter des erreurs lors de la pose. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de créer un système d'assurance de qualité pour les masses à couler pour joints garantissant la qualité des produits. Un tel système devrait comprendre une procédure d'homologation, un contrôle externe de la production ainsi qu'un contrôle lors de la pose.

SUMMARY

A. Purpose/objectives

Hot applied joint sealants made of polymer bitumen are used primarily for the sealing and filling of joints in concrete roads, joining pavements on bridges, at airports and for car parking areas in construction and civil engineering projects. Recently joint sealants of this type have also been used for polymer modified asphaltic plug joints. To fulfil their function properly, the joint sealants used in the system must meet high standards.

The objectives of this study were twofold, firstly to investigate the influence of the material properties in the as-delivered condition, the installation method and ageing due to the installation process as well as the durability of the joint during use, and secondly to examine the relevance of laboratory studies with regard to the behaviour of joint sealants in practice by monitoring the object over a period of five years. Together with the findings from a previous research study [L2] the objective was to create a sound basis not only for ensuring the durability of joint sealants but also to provide useful material for the revision of the Swiss standards and for the European standardization procedure.

B. Procedure

This study comprises the compilation of data relating to the objects during installation of the hot applied joint sealants and the long-term observation of changes in the condition of the compounds over a period of time by means of laboratory studies including visual assessment on the spot.

The Civil Engineering Department of the canton of Uri made an approximately 600m long section of concrete motorway on the A2 near Altdorf available for the project. This motorway section carries extremely heavy traffic and is exposed to severe climatic conditions. Seven different joint systems were installed on the trial section by different companies. At the same time four models of each joint were poured and placed at the side of the road as additional weathering samples for the laboratory tests. The installation conditions were recorded and documented. The technical properties of the joint sealants were investigated on delivery in accordance with SN 671610. Additional tests were carried out using methods such as gel permeation chromatography (GPC), and key parameters were determined by means of a dynamic shear rheometer (DSR), etc. The influence of ageing resulting from the installation process and the effects of weather in service after 2.5 and 5 years were recorded. The condition of the joints was assessed visually by experts after periods of 1, 2.5 and 5 years after installation in order to determine any damage such as separation at the edges, formation of cracks, effluence of the joint sealants, and so forth.

Measuring devices for recording joint movements and the temperatures of the joints and the concrete surfacings were installed in order to obtain information about the order of magnitude of the movement of the concrete surfacing slabs in the joint area.

C. Results and conclusions

Important information was gained in this project about the influence of

- the composition of the material and the material properties in the as-delivered condition,
- the system structure (with or without primer; with or without surface covering, with fine chippings or sand),
- change of properties due to the installation process and during use,
- the composition of the concrete joint edges,
- the equipment and methods used for installing the joint sealants

on the durability of the joints in real-life conditions during the five-year investigation period. Long-term measurements of the static joint movements and the temperatures of the joints and concrete slabs and measurements of the dynamic movements due to traffic provide valuable information that could be useful for engineering calculations, for planning, for simulating ageing and the definition of test conditions.

As for existing, standardized laboratory test procedures, proposals were submitted for changes in the test methods and the required values. Furthermore, the suitability of new, performance-oriented tests for categorizing the condition of joint sealants was examined and discussed. The results, together with those of the earlier research study [L2], provide sound basic information which since 1999 has been incorporated in the revised Swiss standards and the CEN standards for joint sealants.

The suitability of laboratory ageing at 180°C by means of RTFOT was investigated by comparison with the condition after installation. The results for polymer degradation and numerous other sample properties varied widely after installation and after ageing in the laboratory. The elastomers in the polymer bitumen mix, such as styrene-butadiene styrol copolymers (SBS), were oxidized and degraded to a greater extent due to the supply of 180°C air in the RTFOT process. The ageing of joint sealants during their installation should therefore be simulated and studied using methods that do not involve an intense supply of air (for example, stirring the joint sealants in a closed round flask at 180°C for 6 hours).

The study revealed that the key factor affecting the durability of the joint is the condition of the joint sealants after it has been installed. It is therefore of prime importance that the joint sealants should be installed properly. After five years in service, only three of the seven joint systems investigated could be rated as still usable.

In this study fewer than half the joint sealants examined complied with the requirements of the existing Swiss standard SN 671625. The values determined were in some cases contrary to those declared in the technical specification, as had already been found in an earlier study [L2]. It also emerged that in some cases there were no working instructions or installation records, although these documents are important quality management instruments for effectively preventing incorrect installation. For this reason a quality assurance system for joint sealants must be set up to guarantee the quality of the products available on the market. This should include a system certification procedure, monitoring by an external agency and control checks during installation.

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	2
RÉSUMÉ	4
SUMMARY	6
1. EINLEITUNG	11
2. ZIELSETZUNG	11
3. GRUNDLAGEN	12
3.1 Fugenvergussmasse	12
3.2 Funktionen der Fugenvergussmasse	13
4. UNTERSUCHUNGSPROGRAMM UND –METHODIK	14
4.1 Untersuchungsprogramm	14
4.2 Untersuchungsmethodik	16
4.2.1 Gelpermeationschromatografie (GPC)	16
4.2.2 EMPA-Test "Ko-Axial Schubtest" (KAST)	18
4.2.3 Dynamik Shear Rheometer (DSR)	21
4.2.4 Haftzugprüfung der Fugen	22
5. UNTERSUCHTE MATERIALIEN	23
6. FUGENEINBAU/EINBAUDATEN	24
6.1 Versuchsstrecke	24
6.2 Einbaumethoden	26
6.3 Einbaudaten	29
6.4 Kommentar zum Einbau	31
7. FUGENBEWEGUNGEN UND –TEMPERATUREN	33
7.1 Allgemeines	33
7.2 Langzeitmessung der statischen Fugenbewegungen und Temperaturen	34
7.2.1 Messprinzip und -einrichtungen	34
7.2.2 Ergebnisse der Messungen	35
7.2.3 Erkenntnisse aus den Messungen	41
7.3 Kurzzeitmessung der dynamischen Bewegungen der Betonfahrbahnplatten im Fugenbereich	42
7.3.1 Messprinzip und -einrichtungen	43
7.3.2 Ergebnisse der Messungen	46
7.3.3 Interpretation der Bewegungskurven	50
7.3.4 Erkenntnisse aus den Messungen	53
8. BEGLEITENDE LABORUNTERSUCHUNGEN	53
8.1 Eigenschaft der Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand	53
8.1.1 Prüfungen	54
8.1.2 Ergebnisse und Diskussionen	55
8.2 Zustandsänderung durch den Einbau	61
8.2.1 Fugenvergussmasse FM1	61
8.2.2 Fugenvergussmasse FM2	64
8.2.3 Fugenvergussmasse FM3	68

8.2.4	Fugenvergussmasse FM4	71
8.2.5	Fugenvergussmasse FM5	74
8.2.6	Fugenvergussmasse FM6	77
8.2.7	Fugenvergussmasse FM7	80
8.2.8	Diskussionen und Folgerungen	83
8.3	Zustandsänderung der Fugenvergussmassen im Betrieb	88
8.3.1	Zustandsänderung von FM1 im Betrieb	88
8.3.2	Zustandsänderung von FM2 im Betrieb	92
8.3.3	Zustandsänderung von FM3 im Betrieb	95
8.3.4	Zustandsänderung von FM4 im Betrieb	97
8.3.5	Zustandsänderung von FM5 im Betrieb	101
8.3.6	Zustandsänderung von FM6 im Betrieb	104
8.3.7	Zustandsänderung von FM7 im Betrieb	107
8.3.8	Diskussionen und Folgerungen	110
9.	ZUSAMMENFASSENDER DISKUSSION	116
9.1	Praxisrelevanz der normierten Laborprüfungen	116
9.2	Allgemeine Erkenntnisse zum Materialverhalten	118
9.2.1	Materialqualität	118
9.2.2	Materialzusammensetzung	119
9.2.3	Fugenvergussmasse-Systeme mit oder ohne Haftvermittler	119
9.3	Zustand der Fugenvergussmassen nach dem Einbau	120
9.3.1	Schädigung der Fugenvergussmassen beim Einbau	120
9.3.2	Eignung der Prüfverfahren zur Charakterisierung der Alterung von Fugenvergussmasse	120
9.3.3	Praxisrelevanz der künstlichen Alterung im Labor mittels RTFOT	122
9.4	Fugeneinbau	122
9.4.1	Erwärmung der Fugenvergussmassen	122
9.4.2	Fugenflanken und Blasenbildung der Fugenvergussmassen	123
9.4.3	Fugenvorbehandlung	123
9.4.4	Eintragen der Voranstriche	124
9.4.5	Fugenfüllung	124
9.4.6	Oberflächenabschluss	125
9.4.7	Einbauprotokoll	125
9.5	Alterung im Betrieb	125
9.5.1	Polymerersetzung	125
9.5.2	Verhärtung der Fugenvergussmassen	125
9.5.3	Alterung der Fugenvergussmassen auf der Versuchsstrecke und an den Modellkörpern	126
9.6	Erkenntnisse aus den Lang- und Kurzzeitmessungen der Fugenbewegungen und der Temperaturen	126
9.6.1	Temperaturen der Betonplatten und der Luft	126
9.6.2	Statische Fugenbewegungen infolge Temperatureinfluss	127
9.6.3	Dynamische Fugenbewegungen infolge Verkehrseinfluss	127
10.	FOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS	128
10.1	Materialigenschaften	128
10.1.1	Alterung durch den Einbau	128
10.1.2	Alterung im Betrieb	129
10.1.3	Fugenvergussmassen und Dauerhaftigkeit	130
10.2	Praxisrelevanz der Laborprüfungen	130
10.2.1	Schlechte Dauerhaftigkeit trotz Erfüllung der Prüfanforderung	130
10.2.2	Gute Dauerhaftigkeit trotz Nichterfüllung der Prüfanforderung	131

10.2.3	Empfehlungen für die Anforderungswerte	131
10.2.4	Alterung der Fugenvergussmassen im Labor und in der Praxis	132
10.3	Qualitätskontrolle	133
10.4	Einbauausführung	134
10.4.1	Ausführungsanweisungen	134
10.4.2	Einbaugerätschaft	136
10.4.3	Beschaffenheit der Fugenflanken und Vorbehandlung der Fugen	136
10.4.4	Eintrag des Voranstriches	136
10.4.5	Fugenfüllung	137
10.4.6	Eigenüberwachung	137
10.5	Fugenbewegungen und –temperaturen	138
10.6	Empfehlungen für weiteres Vorgehen	139
	Dank	139
11.	LITERATUR- UND NORMENVERZEICHNIS	140
12.	ANHANG	142
	Anhang 1:	
12.1	Ergebnisse der Untersuchungen der Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand	143
12.1.1	Fugenvergussmasse FM1	143
12.1.2	Fugenvergussmasse FM2	149
12.1.3	Fugenvergussmasse FM3	155
12.1.4	Fugenvergussmasse FM4	161
12.1.5	Fugenvergussmasse FM5	167
12.1.6	Fugenvergussmasse FM6	173
12.1.7	Fugenvergussmasse FM7	185
12.1.8	Daten der WLF-Masterkurven gemäss KAST und DSR der Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand	185
	Anhang 2:	
12.2	Fugenabdichtung/Einbauprotokoll gemäss Checkliste der EMPA	187

1 EINLEITUNG

In den letzten Jahrzehnten hat die Bedeutung des Einsatzes von Fugenvergussmassen aus Polymerbitumen ständig zugenommen. Heiss eingefüllte Fugenvergussmassen aus Polymerbitumen, in CEN/TC277 "heiss verarbeitbare Fugenmassen" genannt, dienen hauptsächlich zum Abdichten und Füllen von Fugen in Betonbelägen und bei Belagsanschlüssen auf Brücken, Flugplätzen sowie bei Hoch- und Tiefbauten mit Belag auf Parkflächen. Zudem werden in letzter Zeit solche Fugenvergussmassen auch als Tränkmasse für Fahrbahnübergänge aus Polymerbitumen eingesetzt.

Die wichtigsten Funktionen heiss einzubringender Fugenvergussmassen sind:

- Dauerhaftes Abdichten der Fugen gegenüber Wasser und allfälligen Agenzien
- Haften der Fugenvergussmassen an den Fugenwänden während der gesamten Gebrauchsdauer.
- Verhindern des Eindringens von Feststoffen in die Fugen etc.

Um ihrer Funktion gerecht zu werden, müssen Fugenvergussmassen hohe Anforderungen erfüllen. Dies gilt sowohl für die Qualität der Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand als auch für die Stabilitätseigenschaften bei der Verarbeitung und im Betrieb.

In der Schweiz sind die Qualitätsvorschriften von heiss eingebauten Fugenvergussmassen in der Norm SN 671'625a [N3] festgelegt. Die entsprechenden Prüfvorschriften für die Fugenvergussmassen sind in der Norm SN 671'610 [N4] aufgeführt. Die beiden Normen sind seit 1974 und 1975 in Kraft und bedürfen einer Revision, da sie dem heutigen Stand der Technik nicht mehr entsprechen. Um die Aussagekraft der Laboruntersuchungen in bezug auf das Praxisverhalten von Fugenvergussmassen am Objekt (Querfugen von Betonstrassen) nachzuweisen, wurden von 1994 bis 1999 durch die EMPA systematische Langzeitbeobachtungen durchgeführt. Zusammen mit den Erkenntnissen aus einer vorangegangenen Forschungsarbeit [L2] sollten damit fundierte Grundlagen geschaffen werden, um nicht nur die Dauerhaftigkeit der Fugenvergussmassen zu fördern, sondern auch die Revision der erwähnten Schweizer Normen sowie die europäische Normierung zu unterstützen.

2 ZIELSETZUNG

Die Ziele dieses Forschungsvorhabens umfassen:

- Visuelle Feststellung und Protokollierung des Praxisverhaltens von Fugenvergussmassen beim Einbau sowie nach Witterungs- und Verkehrsbeanspruchung im Betrieb.
- Verfolgen des Zustandes der Fugenvergussmassen durch begleitende Laboruntersuchungen (Fingerprint der Materialien bei Anlieferung, nach dem Einbau und nach 2.5 bzw. 5 Jahren).
- Langzeiterfassung der Fugenbewegungen und -temperaturen.
- Untersuchen der Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit der Fugenvergussmassen.
- Überprüfen der Praxisrelevanz von Laborprüfungen durch den Vergleich von Ergebnissen der Laborprüfungen mit dem Praxisverhalten der Fugenvergussmassen als Basis allfälliger Änderungen der bestehenden Anforderungen.

3 GRUNDLAGEN

3.1 Fugenvergussmasse

Fugenvergussmassen vom Typ KBH (Kautschuk-Bitumen-Massen zur Heissanwendung) bestehen hauptsächlich aus einer Mischung von Bitumen, Polymer und Füllstoffen. Als Polymer werden meistens Elastomere wie SBS (Styrol-Butadien-Styrol Block-Copolymer) oder auch eine Mischung aus SBS und SIS (Styrol-Isopren-Styrol Block-Copolymer) von etwa 10 bis 15 Massen-% verwendet. Die guten, elastischen Eigenschaften der SBS-Copolymere liegen in ihrem Aufbau begründet. In SBS-Molekülen bilden sich Butadiene-Ketten, eine Art Feder, die sich mit Styrol-Blöcken verknüpfen. Es gibt drei verschiedene Typen von SBS-Molekülen: linear, verzweigt oder sternförmig. Die Verknüpfung der Moleküle zu einem Elastomer erfolgt über die Polystyrolblöcke [L1] (siehe *Abbildung 3.1.1*).

Der einzige Nachteil von SBS-Elastomer liegt in den Doppelbindungen der Kohlenstoffe der Butadienketten. Diese Doppelbindungen können durch Wärme ab etwa 200°C kombiniert mit Luftsauerstoff aufgespalten werden. Die Polymerketten werden dabei in kleinere Stücke getrennt und die Vernetzungsfähigkeit sowie die Viskoelastizität bei Gebrauchstemperatur gehen immer mehr verloren. Eine weitere Zerstückelung der SBS-Moleküle bewirkt eine Erniedrigung der Viskosität der Fugenvergussmassen [L15]. Aus diesem Grund ist der Anteil der intakten, ungespaltenen SBS-Moleküle für die Dauerhaftigkeit der Fugenabdichtung ausschlaggebend. Eine solche Zersetzung der SBS-Moleküle kommt meistens während der Herstellung und während des Einbaus vor.

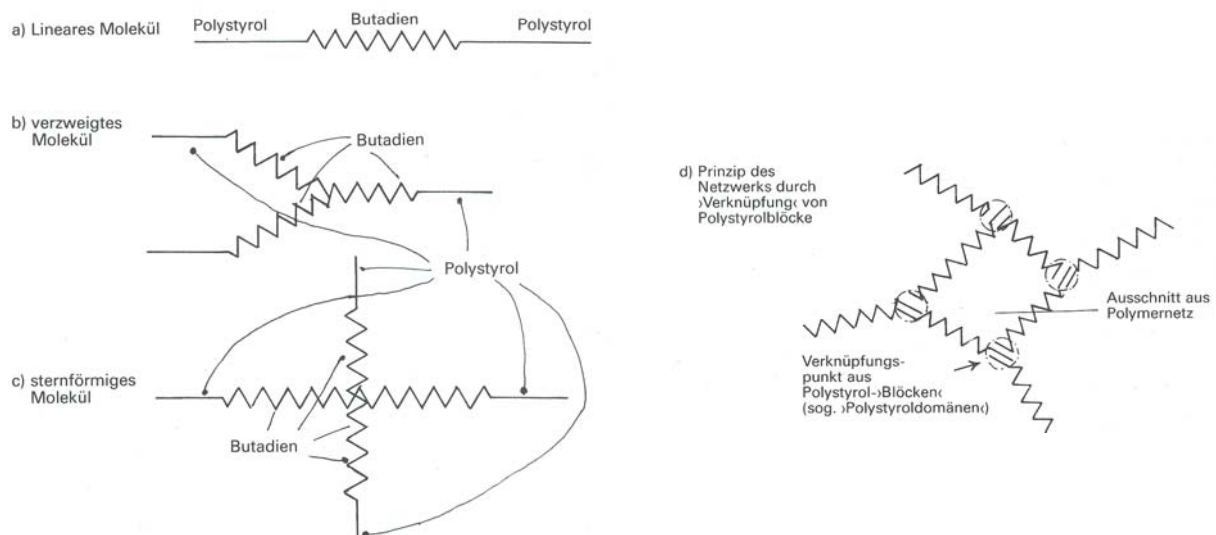


Abbildung 3.1.1: Schematische Darstellung der SBS Molekülstrukturen [L1]

3.2 Funktionen der Fugenvergussmasse

Zu den wichtigsten, dauernden Funktionen der Fugenvergussmassen während der vorgesehenen Nutzungsphase gehören:

• **Abdichten**

Abdichten der Fugen gegenüber Flüssigkeiten, wie Wasser und allfällige Agenzien. Erforderlich sind dichte, nicht versprödennde Massen mit gutem, chemischem Widerstand gegenüber den während der Nutzung einwirkenden Stoffen (z.B. Mineralöle, Benzin, Salzwasser).

• **Dehnen**

Aufnahme und Überbrückung von Bauwerksbewegungen infolge Klimaschwankungen (z.B. Temperaturänderungen), Verkehrsbeanspruchungen (Vibrationen von Betonfahrbahnplatten) und Setzungen. Dies setzt eine hohe Dehnbarkeit bei gleichzeitig guter Formstabilität und Festigkeit in einem weiten Temperaturbereich voraus.

• **Haften**

Haften der Fugenvergussmassen an den Fugenwänden (Fugenflanken) während der gesamten Gebrauchsdauer und während den durch Verkehr und Witterung auftretenden Beanspruchungen. Daraus resultieren spezielle Anforderungen an die Adhäsion und die Verträglichkeit mit den angrenzenden Materialien sowie an die Vorbehandlung und den Zustand der Fugenwände beim Einbau auf der Baustelle.

• **Tragen**

Aufnahme von Gebrauchslasten (z.B. Verkehrseinwirkung) und Verhindern des Eindringens von Feststoffen in die Fugen. Dies setzt eine ausreichende Tragfähigkeit und Steifigkeit des Materials voraus.

• **Ausgleichen**

Bei befahrbaren Fugen (z.B. bei Betonfahrbahnplatten) Ausgleichen von Unebenheiten zur Erhöhung des Fahrkomforts und zur Lärminderung.

In Anbetracht der Vielzahl der Funktionen, die Fugen aus Polymerbitumen Fugenvergussmassen zu erfüllen haben, erweist sich der Einsatz dieser Materialien in der Praxis nicht immer als ganz unproblematisch. Entsprechend treten immer wieder Schäden auf, die auf ungenügende Produktqualität, ungeeignete Materialien, mangelhafte Konzeption des Fugensystems, unsachgemässe Ausführung sowie Einbaufehler zurückzuführen sind. Schadhafte Fugen sind gekennzeichnet durch:

- *Materialverschiebungen*, d.h. aus der Fuge mechanisch herausgelöste Fugenvergussmasse (z.B. infolge Haften an Fahrzeugrädern), aus der Fuge in Gefällerrichtung weggeflossenes Material, ausgepresste Fugenvergussmasse sowie durch falsch konzipierte und falsch ausgeführte Fugenkonstruktion (z.B. zu schmal und im maximalen Dilatationszustand überfüllte Fuge). Materialverschiebungen treten meist im Sommer auf.
- *Blasenbildungen*, z.B. hervorgerufen durch zu rasches Einfüllen oder ungenügend vorge-trockneten Fugenspalt.
- *Mechanische Beschädigungen*, z.B. durch Winterdienst und Schneeketten, spitze Schuhabsätze.
- *Verfärbungen*, z.B. verursacht durch ungenügende chemische Stabilität und Verträglichkeit der Komponenten der Fugenvergussmassen sowie durch Witterungseinflüsse oder spezielle Einwirkungen wie Brand etc.

4 UNTERSUCHUNGSPROGRAMM UND –METHODIK

In dieser Arbeit wurden die Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit der Fugenvergussmassen sowie die Aussagekraft der Laboruntersuchungen in bezug auf das Praxisverhalten am Objekt untersucht.

Diese Langzeitbeobachtung beruht auf dem Erfassen der Daten während des Einbaus und auf der Ermittlung von Veränderungen des Zustandes der Fugenvergussmassen in Funktion der Zeit mittels visueller Beurteilung sowie bestimmter Laboruntersuchungen.

Zur Realisierung des Projektes wurde eine Versuchsstrecke in verschiedenen Kantonen in der Schweiz gesucht. Das Tiefbauamt des Kantons Uri stellte im Jahr 1994 eine Autobahnstrecke aus Beton von etwa 600m auf der Nationalstrasse A2 bei Altdorf zur Verfügung. Diese Autobahnstrecke ist extrem befahren und klimatisch stark beansprucht. Sieben verschiedene Fugenvergussmassen wurden auf der Versuchsstrecke durch unterschiedliche Unternehmungen eingebaut. Gleichzeitig wurden je vier Fugenmodellkörper hergestellt, die als zusätzliche Bewitterungsmuster am Strassenrand plaziert wurden und zur leichten Prüfkörperentnahme für die Laboruntersuchungen dienten. Die Einbaubedingungen wurden erfasst und protokolliert. Zusätzlich wurden die technologischen Eigenschaften der Fugenvergussmassen bei Anlieferung untersucht. Die Ergebnisse dienten als Fingerprint zur Bestimmung der Alterung durch den Einbau und durch die Witterung im Betrieb. Um Auskünfte über die Grössenordnung der Dilatation der Betonplatten im Fugenbereich zu erhalten, wurden die Fugenbewegungen und Temperaturen der Fugen sowie der Betonbeläge kontinuierlich vor Ort gemessen.

4.1 Untersuchungsprogramm

Folgende Arbeiten wurden ausgeführt:

• **Objekteinbau**

7 Fugenvergussmassen-Systeme (Fugenvergussmassen und dazugehörige Voranstriche) wurden im Massstab 1:1 durch 7 Bauunternehmungen bei gleichen Witterungsbedingungen auf der Versuchsstrecke eingebaut. Jede Bauunternehmung baute nach eigener Einbaumethode zehn Fugen (Fugenbreite: 12mm, Fugentiefe: 20mm, Fugenlänge: 7.5m) ein.

• **Einbaudaten**

Während des Einbaus wurden alle Einbauabläufe und Einbaubedingungen gemäss Einbau-Protokoll (siehe Anhang 3) erfasst und registriert.

• **Herstellen von Fugenmodellkörpern**

Jede Unternehmung produzierte vier Fugenmodellkörper (Fugenbreite: 12mm, Fugentiefe: 20mm, Fugenlänge: 1m) parallel zum Objekt nach genau gleicher Einbaumethode und mit gleichen Einbaueinrichtungen. Diese Fugenmodellkörper wurden am Rande der Versuchsstrecke als zusätzliche Bewitterungsmuster für die Laboruntersuchungen gelagert (*Abbildungen 8.1.1 und 8.1.2*).

• **Einbau von Messeinrichtungen**

Zur Beurteilung des Praxisverhaltens der Fugen wurden Messeinrichtungen zur Langzeiterfassung der horizontalen Fugenbewegungen (sechs Fugen) sowie der Fugen- und Lufttemperaturen installiert.

• Visuelle Beurteilung des Fugenzustandes

Der Zustand der Fugen, insbesondere deren Schäden, wie Flankenablösungen, Rissbildungen, Wegfliessen der Fugenvergussmassen etc., wurde sowohl nach dem Einbau als auch nach 1, 2.5 und 5 Jahren visuell durch Experten beurteilt.

• Probenentnahme

Beim Einbau wurden folgende Proben entnommen: Fugenvergussmasse und dazugehöriger Voranstrich bei Anlieferung und die vergossenen Fugenvergussmassen-Proben bei Einbau-Anfang und -Ende. Im Betrieb wurden Fugenvergussmassen und Fugenmodellkörper nach 1, 2.5 und 5 Jahren für die Laboruntersuchungen entnommen.

• Laboruntersuchungen

Mit den Laboruntersuchungen die Eigenschaften der Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand sowie die Zustandsänderung durch Einbau, Witterung und Verkehr erfasst. Die angewendeten Untersuchungen und deren Zweck sind in *Tabelle 4.1* ersichtlich.

Prüfungen	Normen (siehe Normverzeichnis im Kapitel 11)	Prüfkörper und Zwecke der Untersuchungen			
		Im Anlieferungszustand	Vergossene FM nach Einbaubeginn und -ende	Nach Alterung im Labor (RTFOT*)	Aus Versuchsstrecke nach 1, 2.5, 5 Jahren
Penetration (Nadel), 25°C	SN 671'740a	(1)	(2)	(4)	–
Penetration (Konus), 25°C	TL bitFug 82	(1)	(2)	(4)	–
Erweichungspunkt Ring und Kugel (mit Schulterring)	SN 671'743	(1)	(2)		–
Kugelfallprobe	SN 671'917	(1)	(2)	(4)	–
Fliesslänge	SN 671'916	(1)	(2)	–	–
Dehnbarkeit bei –20°C	SN 671'920	(1)	–	–	–
Gelpermeationschromatografie (GPC) (6)	ASTRA [N1] TP Kap. 2.1.1.11	(1)	(2)	(4)	(5)
Kennwerte mittels EMPA-Test "Ko-Axial Schubtest" (KAST) (6)	ASTRA [N1] TP Kap. 2.1.1.9	(1)	–	–	–
Kennwerte mittels Dynamic Shear Rheometer (DSR) (6)	SHRP-Methode EMPA-SOP 2926	(1)	(2)	(4)	(5)
Haftzugprüfung der Fugen (6)	EMPA Methode (siehe Kap. 8.3)	–	(3)	–	(5)

Tabelle 4.1: Durchgeführte Laboruntersuchungen und deren Zweck

Legende:

- nicht ausgeführt
- FM Fugenvergussmasse
- (1) Bestimmen spezifischer Eigenschaften der Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand zur Beurteilung der Erfüllung der Anforderungswerte. Die Werte dienen auch als Fingerprint zur Beurteilung der Zustandsänderung durch Einbau und Betrieb.
- (2) Bestimmen der Zustandsänderung der Fugenvergussmassen durch den Einbau. Die Ergebnisse dienen auch dem Vergleich der Eigenschaften nach der Alterung im Betrieb.
- (3) Bestimmen der Hafteigenschaft nach dem Einbau und Vergleich der Proben nach der Alterung im Betrieb.
- (4) Vergleich zwischen Eigenschaftsänderung durch die Alterung im Labor und beim Einbau.
- (5) Verfolgen der Eigenschaftsänderung im Betrieb. Korrelation zwischen Eigenschaften und Praxisverhalten bezüglich Schäden am Objekt.
- (6) Siehe Kapitel 4.2 (Untersuchungsmethodik).
- *) RTFOT steht für **R**olling **T**hin **F**ilm **O**ven **T**est gemäss SN EN 12607-1 "Bestimmen der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft"

4.2 Untersuchungsmethodik

Die Durchführung und Analyse der Prüfergebnisse gemäss *Tabelle 4.1* erfolgte nach den jeweiligen nationalen und internationalen Normen sowie Richtlinien unter Einhaltung der vorgegebenen Genauigkeit. Nachfolgend wird das Prinzip der in den Schweizer Normen nicht normierten Prüfungen, wie Gelpermeationschromatografie (GPC), EMPA Ko-Axial Schubtest (KAST), Dynamic Shear Rheometer (DSR) Test und Haftzugprüfung an Fugen (EMPA-Methode) kurz erläutert.

4.2.1 Gelpermeationschromatografie (GPC)

Die GPC Prüfmethode ist in den ASTRA-Richtlinien für Fahrbahnübergänge aus Polymerbitumen [N1] und im Bericht SHRP-A-663 [L16] ausführlich beschrieben.

Zweck der Prüfung

Die Eigenschaft des Polymerbitumens in der Fugenvergussmasse hängt wesentlich vom Zustand der Polymere (Struktur, Molekulargrösse und Anteil) ab. Bei Überhitzung der Fugenvergussmasse, z.B. während der Herstellung und des Einbaus, wird ein Teil der ursprünglichen Polymerkomponenten zersetzt. Dabei entstehen kleinere Polymermoleküle, da die Butadien-Ketten (bei Styrol-Butadien-Styrol Co-Polymer) durch die Wärme aufgespalten und zersetzt werden. Durch die Zersetzung der grossen Polymere gehen die funktionellen Eigenschaften der Fugenvergussmassen (Elastizität, Haftfestigkeit etc.) teilweise verloren.

Aufgrund der Grösse und des Anteils der Moleküle in der Fugenvergussmasse kann der Zustand der Polymere mittels GPC charakterisiert und bestimmt werden.

Prüfprinzip

Das Prinzip der GPC beruht auf der Trennung der Substanzen in Trennsäulen aus gequollenem Gel aufgrund der Molekulargrössen bzw. Molekularmassen. Kleine Moleküle dringen tiefer in die Poren des Gels ein und werden bei der Chromatografie länger im Gel zurückgehalten als grössere Moleküle. Nach dem Verlassen der Trennsäulen werden die getrennten Komponenten mittels eines Detektors als Peaks erfasst (siehe *Abbildung 4.2.1*). Die Grösse der Peakfläche oder -höhe dient als Grundlage zur Bestimmung der Menge der Komponenten. Durch eine Vergleichschromatografie zur Kalibrierung mit Standard-Substanzen, deren Molekulargrössen bekannt sind, können die Molekulargrössen der zu bestimmenden Komponenten charakterisiert werden.

Interpretation der Chromatogramme

Berechnung des Polymeranteils:

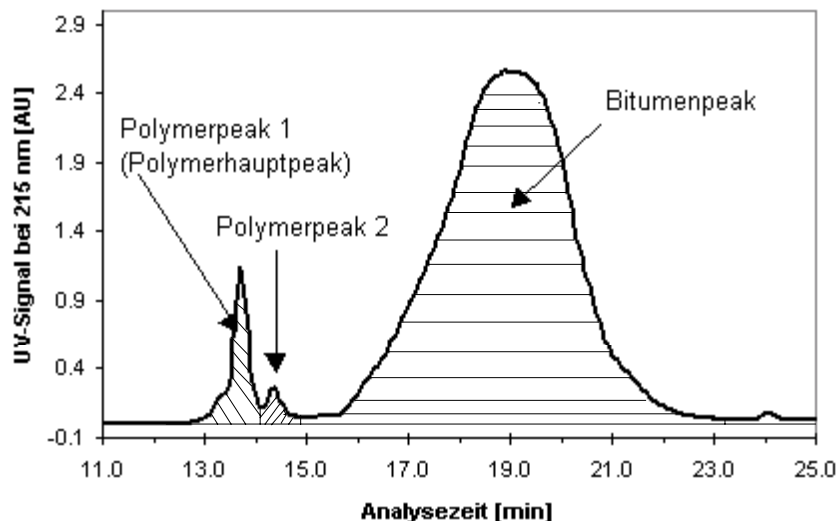
Als Ergebnis der GPC-Analyse erhält man ein sogenanntes Chromatogramm (siehe *Abbildung 4.2.1*). Die Y-Achse stellt die Signalintensität dar, die proportional zur Konzentration der entsprechenden Verbindung ist. Je grösser und breiter der Peak einer Komponente wird, desto grösser ist deren Anteil in der Mischung. Die X-Achse repräsentiert die Analysezeit, welche eine Funktion der Molekulargrösse darstellt. Die Molekularmassen der Polymere in den Fugenvergussmassen wurden aufgrund der Kalibrierung mit Polystyrol-Standards und Toluol bestimmt und sind neben den zugehörigen aus den Chromatogrammen ermittelten Flächenanteilen aufgeführt. Die Flächenanteile in Flächen-% sind auf die Fläche unter dem Bitumen- und Polymerpeak (nicht auf die Masse der Fugenvergussmasse) bezogen. Die Berechnung der Peakflächenanteile in Flächen-% erfolgt gemäss:

$$F = F_n \times 100 / (P+B) \quad [\text{Flächen-\%}]$$

- F_n : Fläche des einzelnen Peaks
 P: Peakfläche Polymer = Summe der Polymer-Peakflächen
 B: Peakfläche Bitumen

Abbildung 4.2.1 zeigt beispielhaft das Resultat der GPC-Untersuchung von FM4 (vgl. Tabelle 5.1) im Anlieferungszustand. Die Polymer-Moleküle sind grösser als die Bitumenmoleküle und erscheinen deswegen auf der linken Seite des Bitumenpeaks. Im Chromatogramm ist zu erkennen, dass die Polymere der FM4 aus zwei Polymerkomponenten bestehen (2 Peaks). Der Peak Nr. 1 ist am grössten und kann deshalb als Hauptbestandteil der Polymerkomponenten bezeichnet werden. Bitumen, das vor allem aus kleineren Molekülen besteht, ist als grosser Peak bei ca. 18 Minuten zu sehen. Im konkreten Fall ergab die Untersuchung 4.9 Flächen-% bei Polymerpeak 1, 1.3 Flächen-% bei Polymerpeak 2 und 93.8 Flächen-% bei Bitumen.

Bemerkung: Die effektiven Anteile der Polymere in den Fugenvergussmassen konnten quantitativ nicht bestimmt werden, da die verwendeten Polymere von den entsprechenden Liefere-



ranten und Herstellern der untersuchten Fugenvergussmassen nicht einzeln erhältlich waren.

Abbildung 4.2.1: Chromatogramm der GPC-Untersuchung einer Fugenvergussmasse
 [AU]: Signalempfindlichkeit

Berechnung der Zersetzung der Polymere:

Durch eine Überhitzung oder eine zu lange Erwärmung der Tränkmass im Kocher, bzw. durch die Alterung im Labor oder Betrieb zersetzen sich die Polymere. Die Berechnungen des Ausmasses der Polymerzerstörung basieren auf dem Polymergehalt bezogen auf den Anlieferungszustand, d.h.

$$\text{Polymergehalt bezogen auf den Anlieferungszustand} = P_E \times 100 / P_A \quad [\%]$$

P_E : Höhe des Polymerhauptpeaks der Probe nach dem Einbau bzw. nach der Alterung im Labor oder nach der Alterung im Betrieb

P_A : Höhe des Polymerhauptpeaks der Probe im Anlieferungszustand

Als Beispiel der Zersetzung der Polymere sind in Abbildung 4.2.2 die überlagerten Chromatogramm-Ausschnitte der Polymere in der Fugenvergussmasse FM4 im Anlieferungszustand und nach dem Einbau dargestellt. Durch die Überhitzung beim Einbau waren nur noch 17% der Polymerhauptkomponente (Polymerpeak 1) vorhanden. Somit wurden 83% des ursprünglichen Polymers (Polymerhauptpeak) zersetzt (vgl. Tabelle 8.2.8). Dafür nimmt der Bitumen-

peak im Bereich nach ca. 14.5 Minuten zu, da die gespaltenen Polymere kleinere Molekularmassen aufweisen und nach entsprechen grösserer Analysezeit erscheinen.

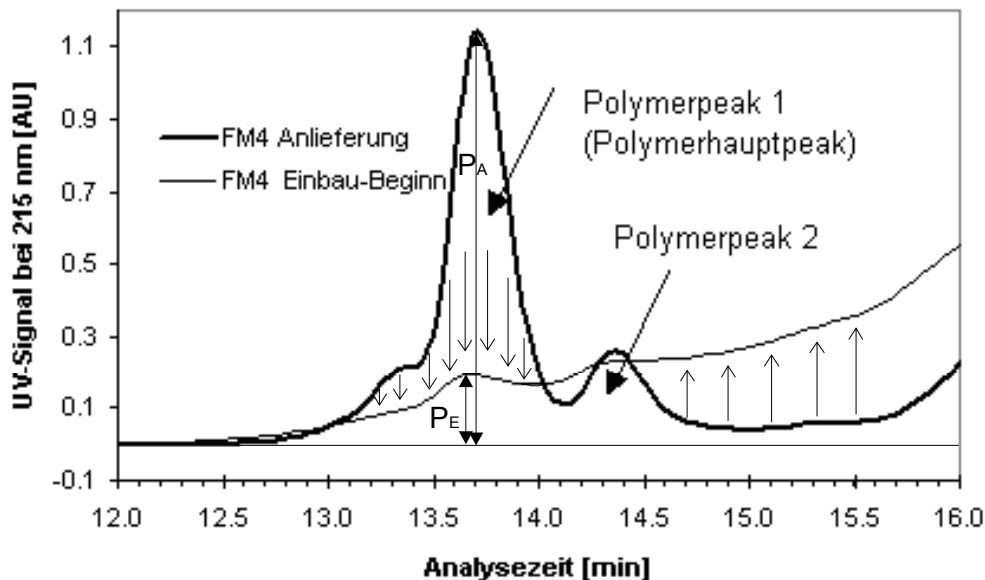


Abbildung 4.2.2: Überlagerte Chromatogramm-Ausschnitte der Polymere in der FM4 im Anlieferungszustand und nach Einbau-Beginn [AU]: Signalempfindlichkeit

4.2.2 EMPA-Test "Ko-Axial Schubtest" (KAST)

Die von der EMPA entwickelte Prüfmethode Ko-Axial-Schubtest (KAST) ist in der ASTRA-Richtlinie für Fahrbahnübergänge aus Polymerbitumen [N1] ausführlich beschrieben. Hier folgt eine kurze Zusammenfassung, entnommen aus [L2].

Zweck der Prüfung

Die Prüfmethode Ko-Axial-Schubtest (KAST) dient der Bestimmung von dynamischem komplexen Schubmodul G^* , Speichermodul G' , Verlustmodul G'' , Phasenwinkel ϕ im Temperaturbereich zwischen -10 und $+40^\circ\text{C}$ mit einer Stufe von 5°C und mit den Frequenzen (8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25 und 0.125Hz).

Prüfprinzip

Das Prinzip der EMPA-Methode Ko-Axial Schub Test (KAST) beruht darauf, dass das zwischen der inneren und äusseren Zylinderfläche befindliche Prüfmaterial (z.B. Fugenvergussmasse) parallel zur Zylinderachse entweder kraft- oder weggesteuert sinusförmig beansprucht wird, um anschliessend aus der zugehörigen, gemessenen Verformung bzw. Kraft für verschiedene Temperaturen und Frequenzen f die Phasenverschiebung ϕ (auch Phasenwinkel genannt), den komplexen Schubmodul G^* , den Verlustmodul G'' und den Speichermodul G' zu berechnen (siehe Schema der Prüfanordnung in *Abbildung 4.2.3*).

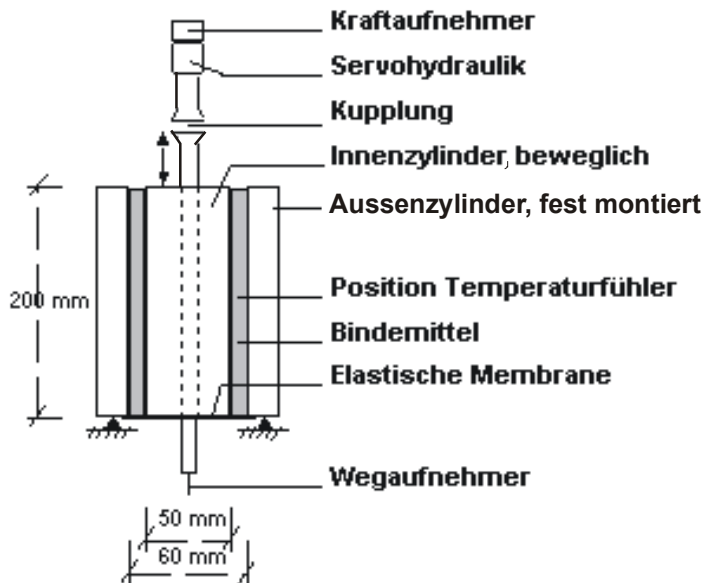


Abbildung 4.2.3: Schema der Prüfapparatur der Prüfmethode KAST

Auswertung

Die Vorgabe eines sinusförmigen Sollwertes für die Kraft führt bei linear viskoelastischem Verhalten der geprüften Fugendichtungsmasse (Wegamplitude proportional zur Kraftamplitude) zu einer sinusförmigen Respons. Die Kurven für Kraft und Weg werden auf die Sinus- und Cosinusanteile hin untersucht. Aus diesen Anteilen können Amplituden für Weg x und Kraft F sowie die Phasenverschiebung zwischen den beiden Kurven berechnet werden (Abbildung 4.2.4). Das Verhältnis von Kraftamplitude F_0 und Wegamplitude X_0 ergibt, mit einem entsprechenden Faktor K (aus Geometrie durch Integration über den Messspalt berechnet), den komplexen Schubmodul G^* . Aus diesem und der Phasenverschiebung ϕ können der Verlustmodul G'' (viskoser Anteil) und der Speichermodul G' (elastischer Anteil) berechnet werden. Abbildung 4.2.4 fasst die mathematischen Beziehungen in vektorieller Darstellung zusammen.

Schubmodul G^*

$$G^* = F_0 / X_0 \cdot K$$

(F_0 : Kraftamplitude; X_0 : Wegamplitude)

Faktor K :

$$K = \ln(R_2/R_1) / (2\pi \cdot H)$$

(R_1 : Aussenradius des Innenzylinders; R_2 : Innenradius des Aussenzylinders; H : Höhe des Prüfkörpers), vgl. Abbildung 4.2.3

Elastischer Anteil des Moduls G' : $G' = G^* \cdot \cos(\phi)$

Viskoser Anteil des Moduls G'' : $G'' = G^* \cdot \sin(\phi)$

Phasenwinkel ϕ : $\phi = \arctan(G''/G')$

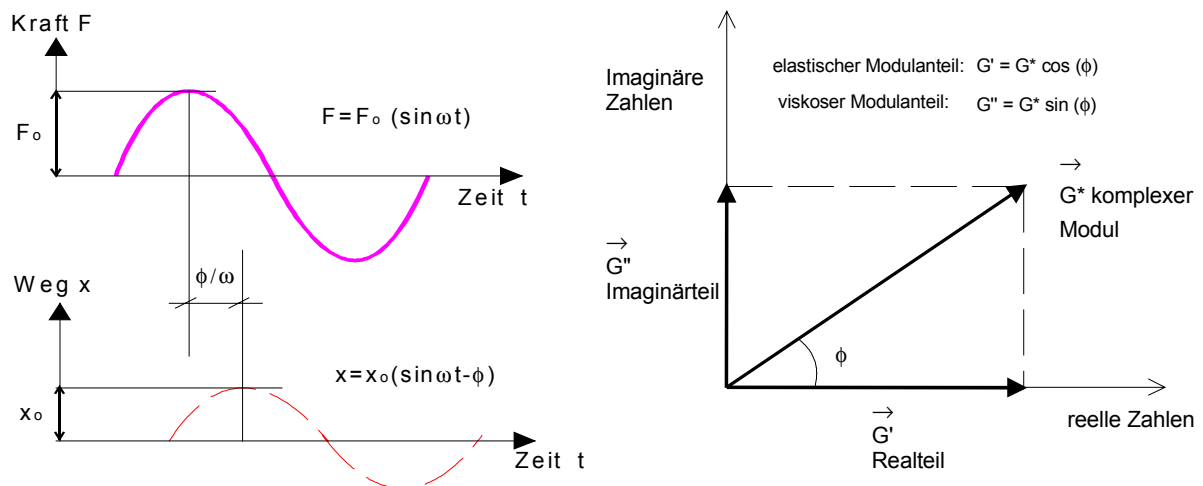


Abbildung 4.2.4: Links: Gesteuerter Weg x , gemessene Kraft F und berechneter Phasenwinkel ϕ (auch Phasenverschiebung genannt) mit Kreisfrequenz ω
Rechts: Vektorielle Darstellung des komplexen Moduls

Aus den berechneten Kennwerten werden durch horizontale Verschiebung der einzelnen, bei verschiedenen Temperaturen bestimmten G^* - f -Kurven mittels WLF-Gleichungen unter Verwendung eines sinusoidalen Ansatzes [L18] Masterkurven berechnet, welche die charakteristischen Eigenschaften der Fugenvergussmasse darstellen. Die Daten der WLF-Masterkurven werden mit folgenden Formeln berechnet.

Sinusoidaler Ansatz:

$$\text{Log} G^* = d + \frac{a}{1 + e^{+b - c \log(f_R)}} \quad (1)$$

Horizontalverschiebung entlang der Frequenzachse:

$$\text{Log} f_R = \text{Log}(\alpha_T) + \text{Log} f \quad (2)$$

Verschiebungsfaktor gemäss WLF-Gleichung:

$$\text{Log}(\alpha_T) = \frac{-p(T - T_R)}{q + T - T_R} \quad (3) \text{ und}$$

Durch Einsetzen von (2), (3) in (1) wird:

$$\text{Log} G^* = d + \frac{a}{1 + e^{+b - c \left[\frac{-p(T - T_R)}{q + T - T_R} + \log f \right]}} \quad (4)$$

Mit

G^* : Komplexer Modul (berechnet)

a, b, d : Konstanten

p, q : WLF-Konstanten

$\text{Log}(\alpha_T)$: Verschiebungsfaktor

f : Frequenz

T : Prüftemperatur

T_R : Referenztemperatur (15°C)

f_R : Frequenz bei Referenztemperatur

4.2.3 Dynamic Shear Rheometer (DSR)

Die Prüfmethode DSR ist im Bericht SHRP-A-410 [L17] ausführlich beschrieben. Hier folgt eine kurze Zusammenfassung, entnommen aus [L2].

Zweck der Prüfung

Das DSR dient der Bestimmung von dynamischem, komplexem Schubmodul G^* , Speichermodul G' , Verlustmodul G'' , Phasenwinkel δ und dynamischer Viskosität im Temperaturbereich zwischen $+10$ und $+70^\circ\text{C}$ mit einer Stufe von 10°C und mit den Frequenzen (30, 10, 3, 1.5, 0.3 und 0.1Hz) untersucht. Diese Methode führt etwa zu den gleichen Aussagen wie das EMPA-Verfahren KAST. Der Vorteil des DSR-Verfahrens liegt darin, dass mit nur etwa 0.5g eine sehr geringe Probemenge benötigt wird. Im Gegensatz zum KAST-Verfahren können jedoch keine Fugenvergussmassen mit groben Füllstoffen geprüft werden.

Prüfprinzip

Eine Bindemittelprobe mit einem Durchmesser d und einer Höhe h von entweder $d=25\text{mm}$ und $h=1\text{mm}$ oder $d=8\text{mm}$ und $h=2\text{mm}$ wird, lastgesteuert sinusförmig, zwischen zwei Platten bei verschiedenen Temperaturen zwischen $+10^\circ\text{C}$ und $+70^\circ\text{C}$ torsionsbeansprucht (Abbildung 4.2.5). Das benötigte Moment zur Erzielung eines definierten Torsionswinkels (Dehnamplitude ca. 1%, Frequenz 10rad/s; 1.59Hz) wird gemessen und dient zur Berechnung der mechanischen Kennwerte.

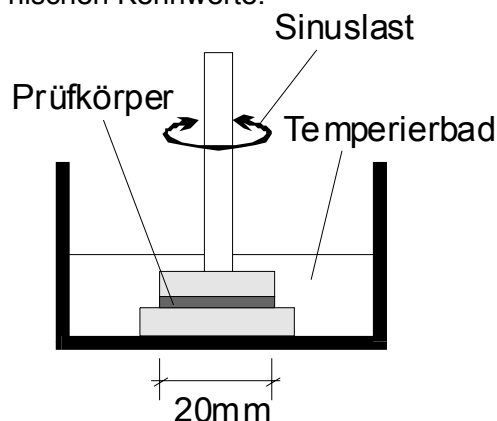


Abbildung 4.2.5: Schema der Prüfeinrichtung DSR

Auswertung

Die Kennwerte werden aus folgenden Formeln berechnet:

$$\tau = 2T/\pi r^3$$

$$\gamma = \theta r/h$$

$$G^* = (\tau_{\max} - \tau_{\min}) / (\gamma_{\max} - \gamma_{\min})$$

Mit

$$G^* = \text{Komplexer Modul [Pa]} \quad \gamma = \text{Shear Strain [\%]} \quad \theta = \text{Dehnwinkel}$$

$$\gamma = \text{Schubdehnung [\%]} \quad \delta = \text{Phasenwinkel [}^\circ\text{]} \quad h = \text{Prüfkörperdicke [mm]}$$

$$\tau = \text{Schubspannung [Pa]} \quad T = \text{Torsionsmoment [Nm]} \quad r = \text{Prüfkörperradius [mm]}$$

Wie bei der Methode KAST werden aus den berechneten Kennwerten WLF-Masterkurven erstellt. Für die Darstellung der WLF-Masterkurven wurden die Formeln (1) bis (4) im Kapitel 4.2.2 verwendet.

Interpretation der Masterkurve

Die *Abbildung 4.2.6* zeigt das Prinzip der Beurteilung von Masterkurven bei Fugenvergussmassen. Je steiler die Masterkurve ist, desto empfindlicher verhält sich die Fugenvergussmasse gegenüber einer Änderung von Temperatur bzw. Frequenz. Somit sind folgende Bedingungen für Fugenvergussmassen ideal:

- möglichst flacher Verlauf, d.h. geringe Moduländerung,
- relativ tiefer Modul bei hoher Frequenz bzw. tiefer Temperatur,
- relativ hoher Modul bei tiefer Frequenz bzw. hoher Temperatur.

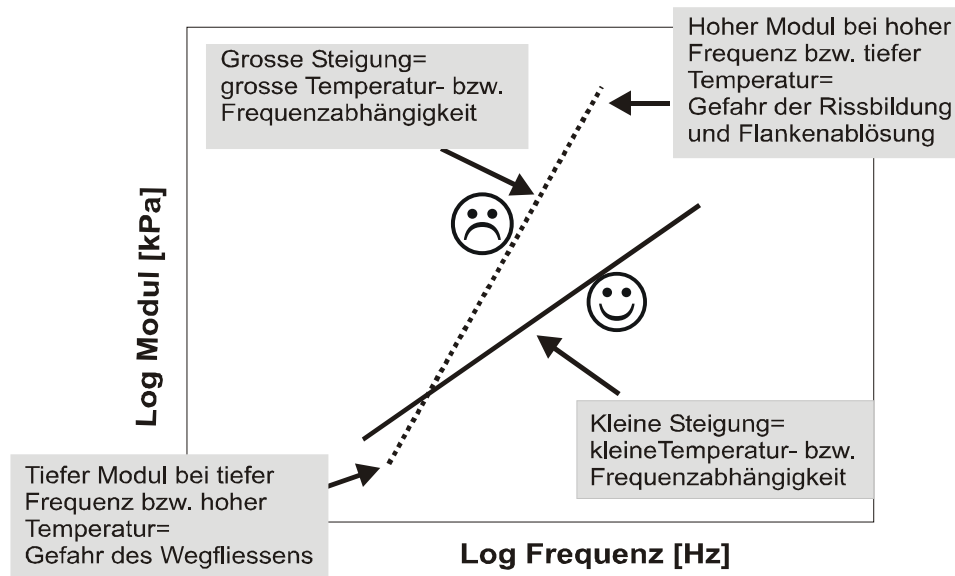


Abbildung 4.2.6: Prinzip der Interpretation der Masterkurve

- ungeeignetes Verhalten
- geeignetes Verhalten

4.2.4 Haftzugprüfung an den Fugen

Zweck der Prüfung

Zur Bestimmung der Änderung der Hafteigenschaften der Fugen im Betrieb wurden an Ausschnitten der Fugenmodellkörper und an Bohrkernen (siehe *Abbildungen 4.2.7* und *4.2.8*) Haftzugprüfungen in der Kälte durchgeführt.

Prüfprinzip

Die Haftzugprüfung erfolgte unter folgenden Bedingungen:

- | | |
|-----------------------------|--|
| Dimension der Prüfkörper: | Fugenmodellkörper: Fugenlänge 150mm; Fugentiefe 20mm; Fugenbreite 10mm (siehe <i>Abbildung 4.2.7</i>)
Bohrkerne aus der Strasse: Durchmesser 150mm (siehe <i>Abbildung 4.2.7</i>) |
| Prüftemperatur: | -20±1°C |
| Verformungsgeschwindigkeit: | 3 mm/h |
| Max. Verformung: | 15 mm |

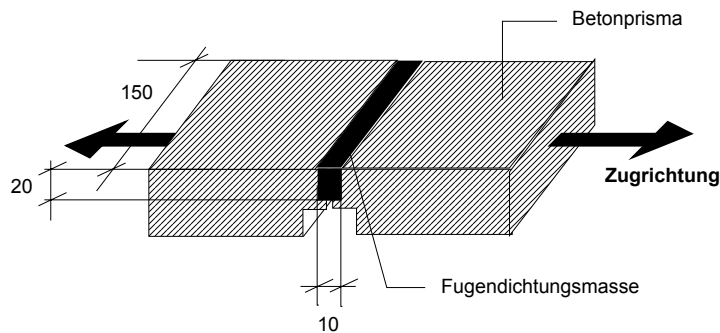


Abbildung 4.2.7: Fugenmodell-Prüfkörper für die Haftzugprüfung (Abmessungen in mm)

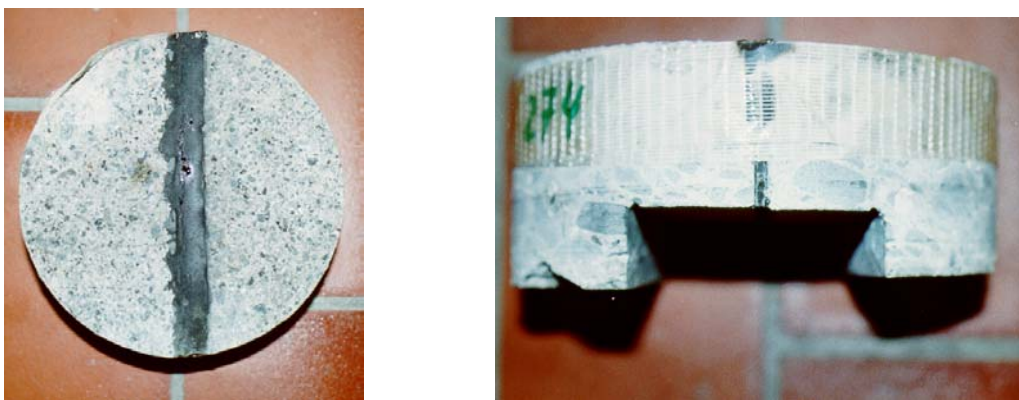


Abbildung 4.2.8: Bohrkern \varnothing 150mm für die Haftzugprüfung.
Links: Sicht von oben; rechts: Sicht seitlich.

Auswertung

Massgebend für die Beurteilung der Prüfergebnisse war die Erfassung des maximalen Dehnweges bis zum Auftreten von Fugenschäden (Flankenablösung oder Rissbildung) und die maximale Dehnkraft.

5 UNTERSUCHTE MATERIALIEN

Für diese Forschungsarbeit wurden im Anschluss an das Forschungsprojekt FA6/90 [L2] die sieben seit 1985 am häufigsten in der Schweiz verwendeten Fugenvergussmassen mit ihren zugehörigen Voranstrichen ausgewählt. Diese Fugenvergussmassen wurden von sieben unterschiedlichen Bauunternehmungen bzw. Systemanbietern im Massstab 1:1 auf der Versuchsstrecke eingebaut. Die verwendeten Fugenvergussmassen sind in *Tabelle 5.1* mit FM1 ... FM7 verschlüsselt aufgeführt. Vier der Fugenvergussmassen wurden bereits in [L2] untersucht: FM7=A, FM6=C, FM2=D und FM5=E (A, C, D, E sind die Bezeichnungen der Fugenvergussmassen in [L2]).

FM-Bezeichnung	Verarbeitungstemperatur	Voranstrich	Deklaration in technischen Blättern	Eingebaut in den Fugen (vgl. Abbildung 6.1.1)
FM1	170 ... 180°C	keiner	erfüllt SN 671'625 und US-Federal spec. SS-S-164	Nr. 274 bis Nr. 265
FM2	190 ... 200°C	Bitumen in organischen Lösungsmitteln	erfüllt NS 671'625 und US-Federal spec. SS-S-164	Nr. 264 bis Nr. 255
FM3	150 ... 180°C	Polymer in organischen Lösungsmitteln	erfüllt SN 671'625, US-Federal spec. SS-S-164 und deutsche TL bitfug 82	Nr. 254 bis Nr. 245
FM4	175°C	Bitumen in organischen Lösungsmitteln	erfüllt SN 671'625, US-Federal spec. SS-S-164 und SS-S-1401b	Nr. 244 bis Nr. 240 und Nr. 238 bis Nr. 234
FM5	160 ... 180°C	Bitumen in organischen Lösungsmitteln	erfüllt SN 671'625 und US-Federal spec. SS-S-164	Nr. 239, Nr. 233 bis Nr. 231 und Nr. 228 bis 222
FM6	150 ... 180°C	Polymer in organischen Lösungsmitteln	erfüllt SN 671'625 und US-Federal spec. SS-S-164	Nr. 229, Nr. 220 bis Nr. 210
FM7	170 ... 190°C	keiner	erfüllt SN 671'625 und US-Federal spec. SS-S-164 & SS-S-1401b	Nr. 230, Nr. 209 bis Nr. 200

Tabelle 5.1: Für die Arbeit ausgewählte Fugenvergussmassen

6. FUGENEINBAU/EINBAUDATEN

6.1 Versuchsstrecke

Zur Realisierung des Projektes wurden nahezu alle Schweizer Kantone im Jahr 1990 von der EMPA angefragt, eine Versuchsstrecke für den Fugeneinbau zur Verfügung zu stellen. Eine positive Antwort kam vom Kanton Uri, da eine Fugensanierung der Autobahnstrecke zwischen Amsteg und Flüelen geplant war. Ursprünglich sollte mit dem EMPA-Projekt im Jahr 1992 begonnen werden. Aus finanziellen Gründen konnte der Kanton Uri allerdings erst im Herbst 1994 mit der Fugensanierung beginnen.

Daten zur Versuchsstrecke:

Autobahn: A2 in Altdorf / Uri

Betonfahrbahn: Baujahr: 1977
Breite: 7.50m; Plattenlänge: 6.0m; Plattendicke: 20cm
Oberbeton: 5cm BS PC350

Unterbeton: 15cm BN PC250
 Fundationsschicht: Kiessand 0-100, gebrochen (Stollenausbruch)
 Armierung: Oberbeton: Stahldrahtnetz Typ N
 Unterbeton: Randarmierung Stahl III $\varnothing 12$
 Anker Stahl III $\varnothing 14$
 Rundstahldübel Stahl III $\varnothing 22$

Abschnitt: zwischen Attinghauser-Viadukt und Seedorfer-Brücke
 (zwischen km 144.370 und km 144.820)

Fahrspur: Lora (Richtung Luzern)

Betonfahrbahnplatten-Nr.: 200 bis 275

Strassen-Fugen: Querfugen: Typ Kf gemäss SN640461a [N11], (Bei der Herstellung wird die Fuge in den erhärteten Beton eingefräst).

Dimension der Fugen: Vor der Sanierung: Breite: 6 mm; Tiefe 20 mm; Länge 7.5 m
 Nach der Sanierung: Breite: 10 mm; Tiefe 20 mm; Länge 7.5 m
 (vgl. *Abbildung 6.1.1*)

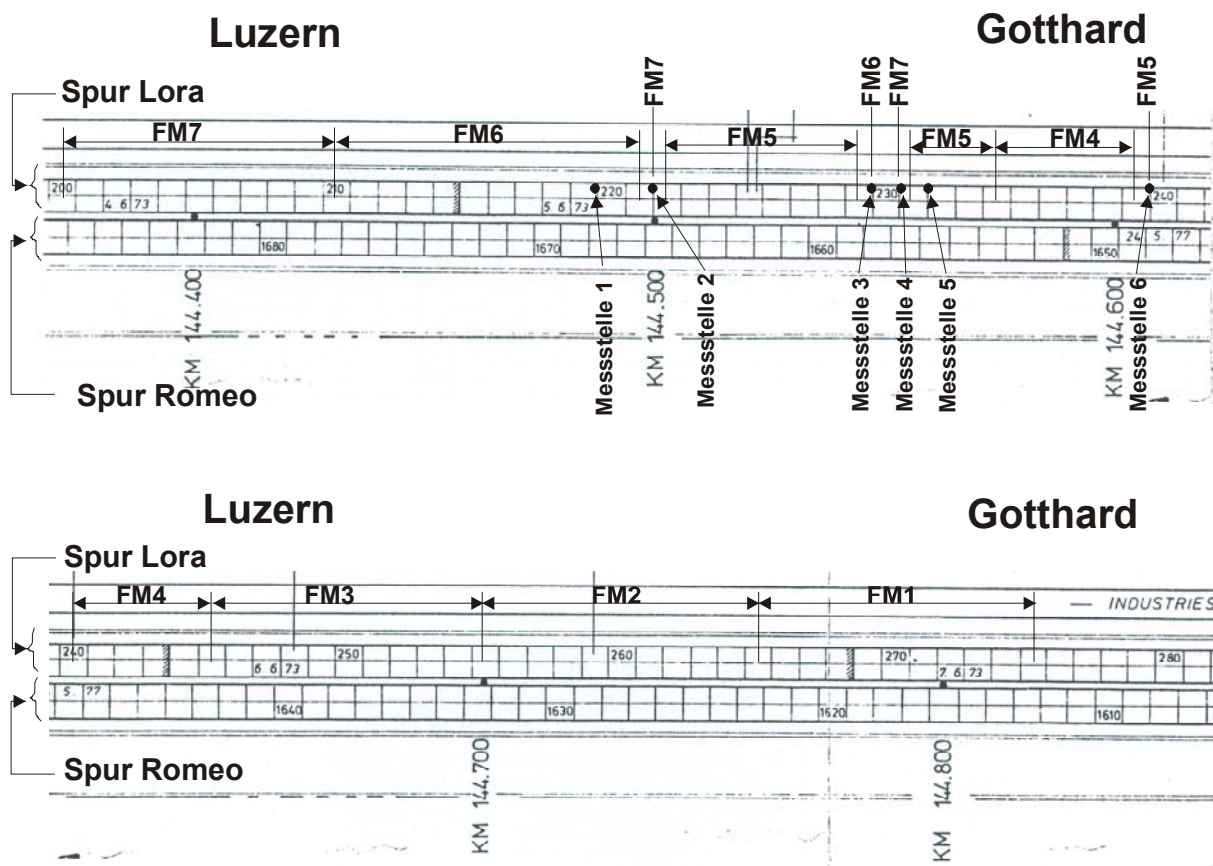


Abbildung 6.1.1: Plan der Versuchsstrecke mit Plattennummern auf der Fahrspur Lora (Richtung Luzern)

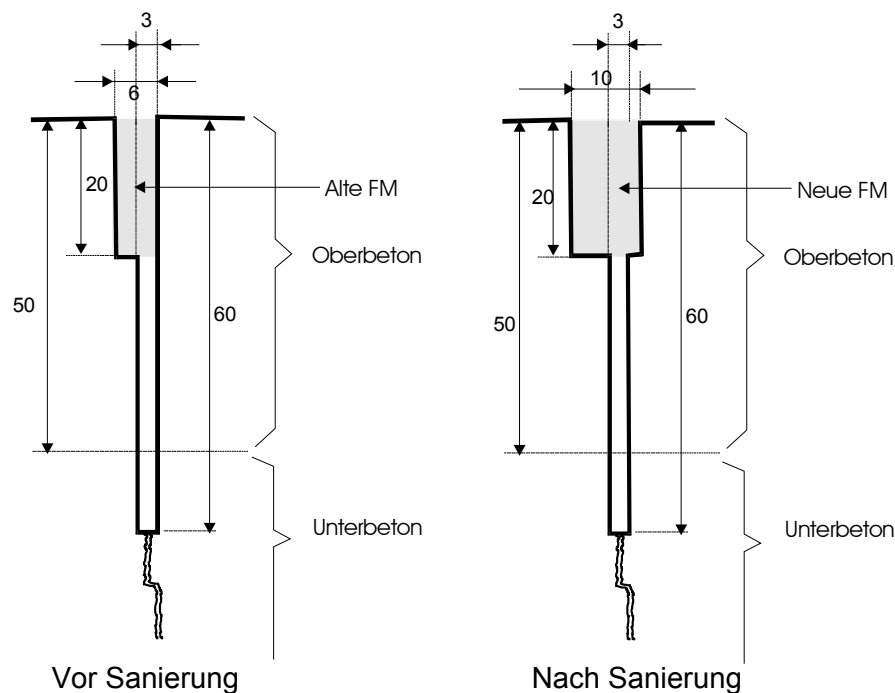


Abbildung 6.1.2: Dimensionen der Fugen (Typ K_f) vor und nach der Sanierung. Masse in mm.

6.2 Einbaumethoden

Die sieben Fugenvergussmassen (FM1 ... FM7) wurden von verschiedenen Firmen bzw. Systemanbietern zwischen 6. und 7. September 1994 bei schönem bzw. stark bewölktem, trockenem Wetter (vgl. *Abbildung 6.2.1* und *Tabelle 6.3.1*) eingebaut. Dabei arbeitete jede Firma nach eigenem Know-how gemäss firmeneigener Erfahrung und mit eigenen Gerätschaften.

Aufwärmen der Fugenvergussmassen

Alle Firmen verwendeten frische Fugenvergussmasse. Die Verweildauer der Fugenvergussmassen im Kocher bis zur Fugenfüllung betrug höchstens 5 Stunden.

Ausser bei FM4 verfügten alle beteiligten Firmen über einen Kocher (siehe Beispiel in *Abbildung 6.2.1*) mit einer Ölummantelung und automatischer Temperaturregelung sowie einem elektrischen Rührwerk. Für den Einbau von FM4 wurde dagegen ein direkt beheizter Gas-Kocher ohne Temperatur- und Rührregelung verwendet (*Abbildung 6.2.2*). Mit diesem Kocher konnte die Fugenvergussmasse kaum schonend erwärmt werden. Entsprechend wurde im Kocher eine thermische Überhitzung der Fugenvergussmasse mit bis zu 285°C festgestellt (*Tabelle 6.3.1*).



Abbildung 6.2.1:
Beispiel eines modernen Kochers mit Ölummantelung, automatischer Temperaturregelung und elektrischem Rührwerk



Abbildung 6.2.2:
Für den Einbau von FM4 verwendeter Kocher

Vorbehandlung der Fugen

Zur Vorbehandlung der Fugen wurden drei unterschiedliche Methoden angewendet: Sandstrahlen, Bürsten und Säubern mit Heisspressluftlanze (*Abbildung 6.2.3 und 6.2.4*).



Abbildung 6.2.3:
Vorbehandlung der Fuge mit Sandstrahlen



Abbildung 6.2.4:
Vorbehandlung der Fuge mit Heisspressluftlanze

Auftragen des Voranstriches

Bei zwei der Fugenvergussmassen (FM1 und FM7) wurde kein Voranstrich verwendet. Bei FM4 und FM5 wurde der Voranstrich gepinselt und bei FM2, FM3 und FM6 gespritzt (*Abbildung 6.2.5 und 6.2.6*). Die Zeitdauer zwischen dem Auftragen des Voranstriches und dem Einfüllen der Fugenvergussmasse war unterschiedlich (*Tabelle 6.3.1*).



Abbildung 6.2.5:
Auftragen des Voranstriches durch Pinseln



Abbildung 6.2.6:
Auftragen des Voranstriches durch
Spritzen mit einer Handpumpe

Fugenfüllung

Das Einfüllen der Fugen erfolgte bei allen sieben Firmen entweder in einem oder zwei Arbeitsgängen (eine oder zwei Schichten). Drei Firmen verwendeten eine Lanze, mit der die heisse Fugenvergussmasse vom Kocher direkt in die Fuge gefördert wurde. Vier Firmen füllten die Fugen mittels eines Giesskübels. Das Füllen mit einem Giesskübel erwies sich bei Wind als relativ unpraktisch. Eine Firma benützte ein Metallblech als Windschutz. Beim Füllen mit einem Giesskübel war die Verwendung eines Gleitschuhs von Vorteil (*Abbildung 6.2.9*).



Abbildung 6.2.8:
Fugenfüllung mit Lanze



Abbildung 6.2.9:
Fugenfüllung mit Giesskübel mit Hilfe
eines Gleitschuhs

Oberflächenbehandlung:

Bei drei Fugenvergussmassen wurde die Oberfläche nach dem Einbau mit Splitt (FM1 und FM7) oder mit Sand (FM3) abgestreut. Die Abstreuerung sollte die Fugenvergussmassen später im Betrieb gegen direkte Sonnenstrahlen schützen.

6.3 Einbaudaten

Einbaucharakteristika

Die wichtigsten Einbaudaten sind in *Tabelle 6.3.1* zusammengefasst.

	Einbaudatum: 6.09.1994 Schön, sonnig, trocken; Lufttemperatur: 21 bis 27°C; Rel. Luftfeuchtigkeit: 45 bis 70%			Einbaudatum: 7.09.1994 Stark bewölkt, teilweise sonnig, trocken; Lufttemperatur: 20 bis 29°C; Rel. Luftfeuchtigkeit: 65 bis 75%			
Charakteristika	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6	FM7
Fugenvorbehandlung	- Sandstrahlen - Heisspressluft	Heisspressluft	- Sandstrahlen - Heisspressluft	- Pressluft - Trocken mit Gasbrenner	Heisspressluft	Bürsten mit Drahtbürste	- Sandstrahlen - Heisspressluft
Auftragen des Voranstriches	kein Vorantrich	Spritzen	Spritzen	Pinseln	Pinseln	Spritzen	kein Vorstrich
Dauer bis zur Fugenfüllung	---	ca. 1h	15min	ca. 1 bis 2h	20min	30min	---
Kocher für FM	moderner Kocher *)	moderner Kocher *)	moderner Kocher *)	Kocher ohne Temper.- & Rührsteuerung	moderner Kocher *)	moderner Kocher *)	moderner Kocher *)
Art der Fugenfüllung	Lanze	Giesskübel & Windschutzblech	Giesskübel & Gleitschuh	Giesskübel	Lanze	Lanze	Giesskübel
Anzahl Fugenschichten	1	1	2	1	2	2	1
Einbautemperatur der FM [°C]	167 ... 184	172 ... 195	162 ... 178	210 ... 285 **)	170 ... 185	160 ... 170	160 ... 184
Oberflächenbehandlung	Abstreuen mit vorumhülltem Splitt	---	Abstreuen mit Sand	---	---	---	Abstreuen mit vorumhülltem Splitt

Tabelle 6.3.1: Zusammenfassung der wichtigsten Einbaucharakteristika

*) Kocher mit Ölummantelung, Temperatur- und Rührwerksregelung (vgl. *Abbildung 6.2.1*)

**) Trotz Warnung der EMPA vor der Gefahr zu hoher Temperaturen

Abkühlverhalten der Fugenvergussmasse

Um das Abkühlverhalten der Fugenvergussmasse zu erfassen, wurden die Temperaturen von FM3 mittels Thermografie gemessen [L12].

Abbildung 6.3.2 zeigt die Oberflächentemperaturverteilung während des ersten Einfüllens der Fugendichtungsmasse gemäss *Abbildung 6.3.1*. Im oberen Bildteil erkennt man den Kübel mit der Fugenvergussmasse und rechts unterhalb den "Gleitschuh", der eine Oberflächentemperatur zwischen 160°C und 210°C aufweist. Der Gleitschuh wurde vor dem neuen

Giessen immer wieder mit einer Gasflamme bis 210°C aufgewärmt. Beim Einfüllen in den Gleitschuh hatte die Fugenvergussmasse eine Temperatur von etwa 160°C bis 150°C. Nach dem Einbau kühlte sich die Masse von den Fugenrändern her sehr schnell ab, so dass die Temperaturen dort schon nach kurzer Zeit nur noch zwischen etwa 140°C und 130°C lagen (rechts von N).



Abbildung 6.3.1:
Fugenfüllung mit Gleitschuh

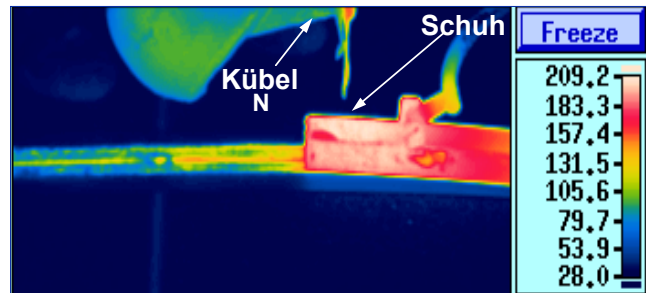


Abbildung 6.3.2:
Thermografieaufnahme beim Fugenfüllen mit
Gleitschuh (Temperaturskala: 28°C ... 209°C)

Abbildung 6.3.3 zeigt eine mit Fugenvergussmasse gefüllte Fuge 2.5 Minuten nach Beendigung des ersten Einfüllvorganges. Auch hier wird deutlich, wie die Fugenvergussmasse von den Rändern her abkühlt. An einigen Stellen beträgt die Oberflächentemperatur an den Fugenrändern bereits weniger als 50°C, während in der Fugenmitte noch Temperaturen bis zu etwa 140°C erreicht wurden. Schwach sichtbar ist ausserdem der Kreuzungspunkt mit einer bereits vorhandenen Längsfuge. Man erkennt, dass diese ältere Fugenvergussmasse infolge der Sonneneinstrahlung (Einbau bei gutem Wetter) an der Oberfläche um mehr als 10°C wärmer ist als die umliegende Betonplatte. Weiter ist zu beobachten, wie die Temperatur rechts und links dieser Kreuzungsstelle infolge des durch die Betonkanten verursachten Abkühlungseffekts stark absinkt. Dadurch können lokale Spannungskonzentrationen und Schwachstellen entstehen.

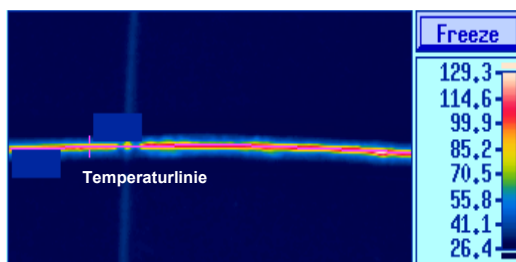


Abbildung 6.3.3:
Oberflächentemperatur 2.5 Minuten
nach der Fugenfüllung mit dem Gleitschuh
(Temperaturskala: 26.4 ... 129.3°C)

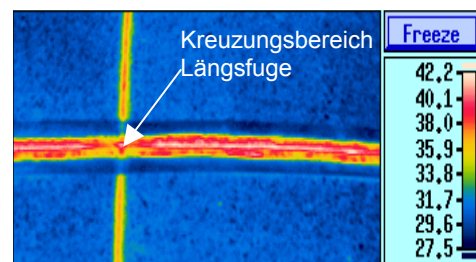


Abbildung 6.3.4:
Oberflächentemperatur 15 Minuten nach
der Fugenfüllung mit dem Gleitschuh
(Temperaturskala: 27.5 ... 42.2°C)

In Abbildung 6.3.4 ist die gleiche Fuge 15 Minuten nach dem zweiten Einfüllvorgang zu sehen. Die Temperatur liegt jetzt an fast allen Stellen schon unter 40°C. Dabei ist der Temperatursprung rechts und links der Fugenkreuzung immer noch vorhanden, allerdings aufgrund der Abkühlung weniger stark ausgeprägt. Die am Fugenrand befestigten Abdeckklebestreifen sind als dunkelblaue Streifen wahrzunehmen.

Die in Abbildung 6.3.5 aufgenommenen Temperaturprofile über die Fugenlänge bestätigen die Beobachtungen der Thermografieaufnahmen. Deutlich sichtbar ist der Oberflächentemperaturanstieg in Richtung des Einbaus nach 2.5 Minuten um ca. 10°C im erfassten Fugenbereich von 50cm Länge. Gut erkennbar ist auch der Kreuzungsbereich der Querfuge mit der Längsfuge, der an der Oberfläche etwa die halbe Temperatur der übrigen Fuge aufweist.

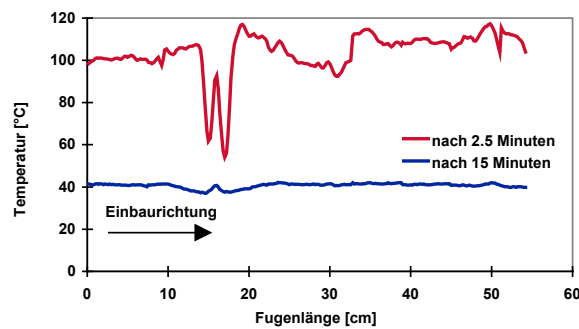


Abbildung 6.3.5:
Oberflächentemperaturverteilung in der Fuge nach 2.5 bzw. 15 Minuten

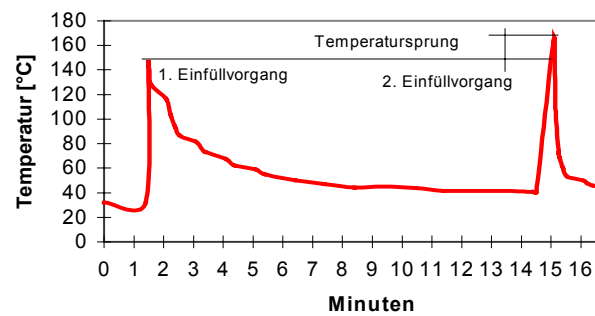


Abbildung 6.3.6:
Temperaturverlauf an einem Punkt der Fuge

Abbildung 6.3.6 veranschaulicht den zeitlichen Temperaturverlauf an einem Punkt der Fuge. Etwa 15 Minuten nach dem Einbau der ersten Schicht war die Fugenvergussmasse an der Oberfläche praktisch wieder abgekühlt. Zwischen dem ersten und zweiten Einfüllvorgang besteht eine Temperaturdifferenz von 20°C. Dies zeigt an, dass der Arbeitsvorgang zwischen der Entnahme der Fugenvergussmasse aus dem Kocher und dem Einfüllen bei der zweiten Schicht etwas zügiger erfolgte. Nach dem zweiten Einfüllvorgang erfolgte die Abkühlung wesentlich rascher, d.h. innerhalb von 2 Minuten. Der Grund für das raschere Abkühlen nach dem zweiten Einfüllvorgang lag darin, dass die Dichtungsmasse jetzt eine mit der Fahrbahnoberfläche bündige Ebene bildete und nicht mehr geschützt im Fugenspalt verborgen war.

6.4 Kommentar zum Einbau

Wetterbedingungen

Die Wetterbedingungen waren an beiden Einbautagen optimal und etwa gleich (vgl. *Tabelle 6.3.1*). Fugenschäden aufgrund von Wetterbedingungen sind bei dieser Versuchsstrecke deswegen auszuschliessen.

Erwärmung der Fugenvergussmasse

Wie in Kap. 3 erläutert, können die elastischen Eigenschaften der Fugenvergussmasse in der Praxis durch eine Zersetzung der Polymerkomponenten in der Fugenvergussmasse verloren gehen. Aus diesem Grund ist eine strikte Einhaltung der von den Herstellern angegebenen Verarbeitungstemperaturen sehr wichtig. Eine Verwendung des Kochers ohne Ölummantelung, Temperatur- und Rührwerksregelung (siehe *Abbildung 6.2.2*) muss vermieden werden, da die Temperatur der Fugenvergussmasse im Kocher nicht genau kontrolliert werden kann und eine lokale Schädigung der Fugenvergussmasse am Rand des Ofens aufgrund der fehlenden Rührmöglichkeit damit vorprogrammiert ist. Die Untersuchung der Alterung durch den Einbau in Kap. 8.2 bestätigt die Problematik dieses Kochers.

Fugenvorbehandlung

Im Normalfall werden die frisch geschnittenen, trockenen Fugen ohne zusätzliche, mechanische Vorbehandlung der Fugenflanken, wie Sandstrahlen oder Bürsten, mit der Fugenvergussmasse gefüllt. Die Auswirkung der hier angewendeten Vorbehandlung der Fugenflanken (FM1, FM3 und FM7) auf die Lebensdauer wurde daher in dieser Arbeit mit besonderer Aufmerksamkeit beobachtet.

Trocknung des Voranstriches

Die Trocknungszeit des Voranstriches variierte bei den verschiedenen Systemen zwischen 10 Minuten und ca. 2 Stunden (siehe *Tabelle 6.3.1*). Normalerweise beträgt die Trocknungszeit etwa 20 Minuten. Bei einer kurzen Trocknungszeit besteht Gefahr, dass das Lösungsmittel des Voranstriches nicht völlig verdunstet und somit Blasenbildung oder eine schwache Haftung der Fugenvergussmasse verursachen kann. Bei einer zu langen Trocknungszeit besteht die Gefahr, dass die Fugenflanken durch Staub etc. verschmutzt werden.

Fugenfüllung

Zur Herstellung einer einwandfreien Fuge muss die Temperatur der Fugenvergussmasse optimal sein. Diese sogenannte Vergiesstemperatur, bei der die Fugenvergussmasse in alle Ecken der Fuge fliesst und die Fugenflanken gut benetzt, kann durch eine Prüfung gemäss SN 671914 bestimmt werden. Die Vergiesstemperaturen betragen meistens zwischen 170°C und 185°C, d.h. etwa soviel wie die vom Hersteller angegebene Temperatur der Fugenvergussmasse im Kocher. Dies bedingt einen zügigen Arbeitsablauf beim Füllen. Eine Fugenfüllung mit Hilfe einer gut isolierten Lanze ist deswegen gut geeignet, da auch unabhängig von der Windlage gearbeitet werden kann. Beim Einfüllen mit einem Giesskübel wurde eine maximale Temperaturabsenkung der Fugenvergussmasse von etwa 120°C gemessen.

Eine Fugenfüllung in zwei Schichten ist zweckmässig, da sich die heisse Fugenvergussmasse beim Abkühlen zusammenzieht und dadurch an Volumen verliert. Eine Festlegung der Dauer zwischen der ersten und zweiten Füllung oder der maximalen Temperatur der Fugenvergussmasse der ersten Schicht vor dem Einbau der zweiten Schicht wäre sinnvoll, damit sich die beiden Schichten gut miteinander verbinden. Das Einbringen der zweiten Fugenschicht auf eine kalte Oberfläche der ersten Schicht kann zu Verbundproblemen führen und Blasenbildungen zwischen den beiden Schichten ermöglichen. *Abbildung 6.4.1* zeigt einen schlechten Verbund zwischen der ersten und zweiten Fugenschicht eines Fugenmodellkörpers bei FM3.



Abbildung 6.4.1: Querschnittsfläche eines Fugenmodellkörpers mit FM3 nach der Zugprüfung gemäss Kap. 8.1. Dieser Fugenmodellkörper wurde parallel zu den Fugen auf der Autobahn unter gleichen Bedingungen eingebaut. Der obere Teil der Fugenvergussmasse zeigt eine Ablösung der zweiten von der ersten Fugenschicht.

Abkühlung der vergossenen Fugenvergussmasse

Nach der Füllung kühlte sich die Fugenvergussmasse von den Fugenrändern her sehr schnell ab, weshalb die Temperatur der Fugenvergussmasse beim Giessen zwingend im Bereich der sogenannten "Vergiesstemperatur" des Herstellers liegen muss. Entsprechend sollte die Temperatur der Fugenvergussmasse im Kocher nicht tiefer als die Verarbeitungstemperatur des Herstellers (meistens zwischen 175°C und 185°C) und die Zeitdauer des Arbeitsvorgangs zwischen dem Auslassen der heissen Fugenvergussmasse aus dem Kocher und der Fugenfüllung möglichst kurz sein. Die Verwendung einer gut isolierten Lanze, wel-

che die Fugenvergussmasse aus dem Kocher direkt in die Fuge fördert, erfüllt sicher diese Bedingung.

Oberflächenschutz der Fugen

Der Schutz der Fugenoberfläche gegen Sonneneinstrahlung ist sinnvoll. Die Auswirkung dieser Schutzmassnahme wird aufgrund der begleitenden Untersuchungen in Kap. 8.3 überprüft.

7. FUGENBEWEGUNGEN UND -TEMPERATUREN

7.1 Allgemeines

Zur Beurteilung des Verhaltens von Fugendichtungsmassen sind Informationen über die zyklischen, statischen Fugenbewegungen (durch die Temperaturveränderung) und die dynamischen Fugenbewegungen (durch den Verkehr) unerlässlich. Zu diesem Zweck wurden auf der Versuchsstrecke im Herbst 1994 an sechs Fugen Bewegungsmesseinrichtungen zur kontinuierlichen Langzeiterfassung der statischen Bewegungen sowie der Temperaturen eingebaut (*Abbildung 7.1.1 und 7.2.1*).



Abbildung 7.1.1:
Eingebaute Messstellen auf der Versuchsstrecke

7.2 Langzeitmessung der statischen Fugenbewegungen und der Temperaturen

7.2.1 Messprinzip und -einrichtungen

Messprinzip:

Sechs Fugen auf der Versuchsstrecke mit teilweise unterschiedlichen Fugenvergussmassen gemäss *Tabelle 7.2.1* wurden für die Messung ausgewählt. Gemäss der dem Tiefbauamt Uri vorliegenden Kollografie-Messungen sollten diese Fugen bezüglich der "Absetzung" unterschiedlich gut sein. Unter Absetzung ist das unterschiedliche Niveau der im Fugenbereich angrenzenden Betonfahrbahnplatten zu verstehen.

Die horizontalen, statischen Bewegungen von sechs Fugen wurden zusammen mit den Temperaturen der Betonfahrbahnplatten sowie der Lufttemperatur im Schatten während 4 Jahren stündlich erfasst und in einem Datalogger gespeichert. Via Modem wurden die Daten von der Messstation an die EMPA transferiert und mit einem Excel-Programm ausgewertet.

Messstellen-Nr.	Fugen-Nr.	FM	Zustand der Fuge	Messung der Fugenbewegungen	Messung der Temperatur
1	zw. 219 u. 220	FM6	schlecht	X	X
2	zw. 221 u.222	FM7	schlecht	X	---
3	zw. 229 u.230	FM6	gut	X	X
4	zw. 230 u.231	FM7	gut	X	---
5	zw. 231 u.232	FM5	gut	X	X
6	zw. 239 u.240	FM5	schlecht	X	X

Tabelle 7.2.1: Sechs ausgewählte Fugen zur Messung der horizontalen, statischen Bewegungen
X ausgeführt --- nicht ausgeführt

Elemente der Messeinrichtung:

Erfassung der Bewegungen und Temperaturen:

- 6 induktive Wegaufnehmer (HBM W5TK 0.2%)
- 5 Temperatur-Messfühler PT100 K für Datalogger
- 1 Hottinger Messverstärker KWS 3072 mit 6 Kanälen
- 1 Datalogger (Squirrel 1254-170K) mit RS232-Anschluss für Datatransfer über Modem
- 2 Modem, CDM25, der Firma Schrack mit Baudrate von 2400 Bit/s
- 1 Software "Sqset" für die Kommunikation zwischen Modem und Datalogger
- 1 Software "Remotwise" für die Datenübertragung und -umwandlung

Witterungsschutz der Messeinrichtungen:

- 1 Wisar-Schrank aus Aluminium zum Installieren der Messeinrichtungen
- 1 Netzanschluss mit Sicherung und FI-Schalter 3x220V/380V, separate Phase 220V/AC für Heizung im Schrank und Messeinrichtung
- 1 Überspannungs- und Störspannungsschutz
- 6 Messinggehäuse (EMPA-Eigenbau) zum Schützen der Wegaufnehmer an den Fugen der Betonfahrbahnplatten (*Abbildung 7.2.1*)
- 1 Digitron R741 Temperatur- und Feuchtemessgerät für die Temperaturregelung im Schrank.

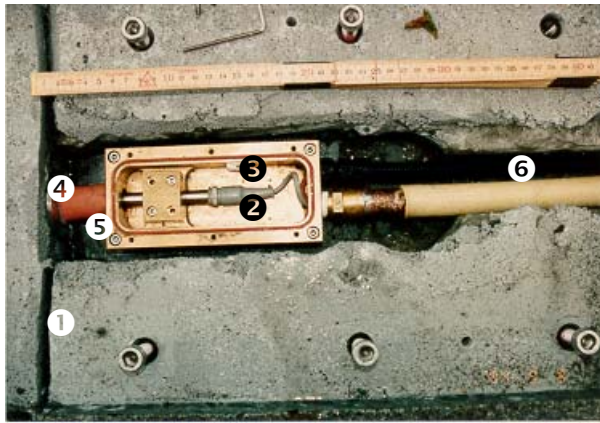


Abbildung 7.2.1 (EMPA Foto-Nr. 101477/14):

In der Betonfahrbahnplatte eingebaute Messeinrichtung zur Erfassung der horizontalen Fugenbewegungen.

- ① Quersfuge der Fahrbahn
- ② Induktiver Wegaufnehmer zur Messung der horizontalen, statischen Fugenbewegungen rund 50mm unterhalb der Fahrbahnoberfläche
- ③ Metallkästchen zum Schutz des Wegaufnehmers
- ④ Metallscheibe als Stützunterlage für den Wegaufnehmer
- ⑤ Gummiabdichtungsrohr zwischen Metallscheibe und Metallkästchen
- ⑥ Thermoelement

7.2.2 Ergebnisse der Messungen

In den *Tabellen 7.2.2 bis 7.2.5* sind Beispiele für die Messwerte der horizontalen Fugenbewegungen und der Temperaturen im Jahr 1995 und 1998 angegeben. Aufgrund der Umstellung und Unterbrechung wegen der Konstruktion einer "Hochwasserschutzwanne entlang der Autobahn" durch das Tiefbauamt Uri im Jahr 1997 wurden die Messungen sehr oft unterbrochen und deshalb für dieses Jahr nicht ausgewertet.

Horizontale, statische Fugenbewegungen / Jahr 1995:

Messstellen	Fuge zwischen den Betonfahrbahnplatten	Maximale Fugenbewegung [mm] im Jahr 1995 infolge $\Delta T_{\text{Betonplatte}}$ von 48°C
1	219-220	1.8
2	221-222	2.2
3	229-230	0.8
4	230-231	2.8
5	231-232	2.0
6	239-240	5.6 *)

Tabelle 7.2.2: Maximale, horizontale Fugenbewegungen im Jahr 1995 (1.1.1995 bis 31.12.1995) bei einer Temperaturspanne für die Betonfahrbahnplatten zwischen Winter und Sommer von 48°C

*) Blockverschiebung, d.h. eine Verschiebung einer Gruppe von Betonfahrbahnplatten (siehe *Abbildung 7.2.4* und *7.2.5*)

Maximale, tägliche Fugenbewegungen [mm] im Jahr 1995				
Messstellen	Januar – März [mm]	April – Juni [mm]	Juli – Sept. [mm]	Okt. – Dez. [mm]
1	1.0	1.1	1.0	1.0
2	0.9	0.9	0.7	0.9
3	0.4	0.4	0.3	0.4
4	1.2	1.2	1.0	1.0
5	0.6	1.2	1.2	0.8
6	0.8	1.4	1.7 *)	0.9

Tabelle 7.2.3: Maximale, tägliche, horizontale Fugenbewegungen im Jahr 1995

*) Blockverschiebung, d.h. eine Verschiebung einer Gruppe von Betonfahrbahnplatten (siehe *Abbildung 7.2.4* und *7.2.5*)

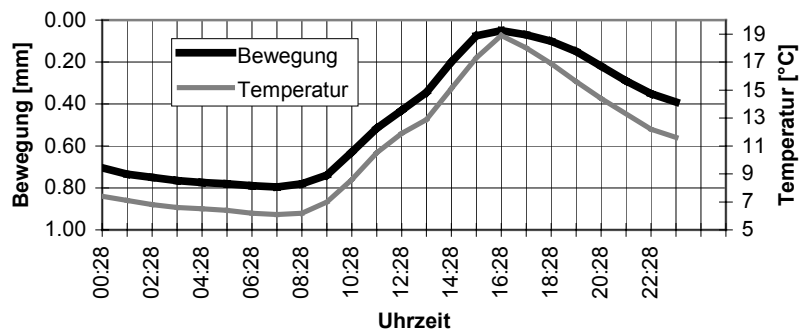


Abbildung 7.2.2: Horizontale Fugenbewegungen und Temperaturverlauf an der Messstelle 2 (vgl. *Abbildung 6.1.1*) vom 17.04.1995

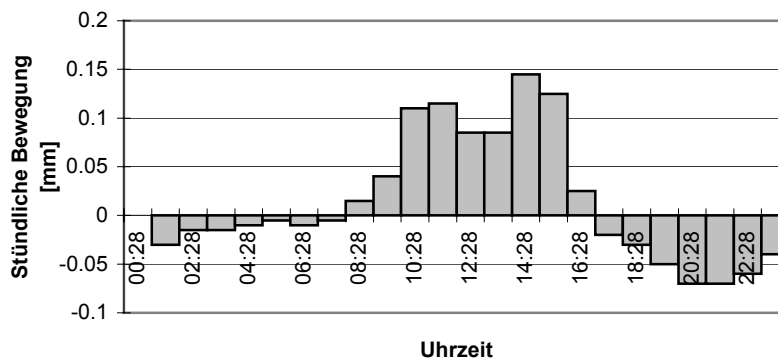


Abbildung 7.2.3: Stündliche, horizontale Fugenbewegungen an der Messstelle 2 vom 17.04.1995

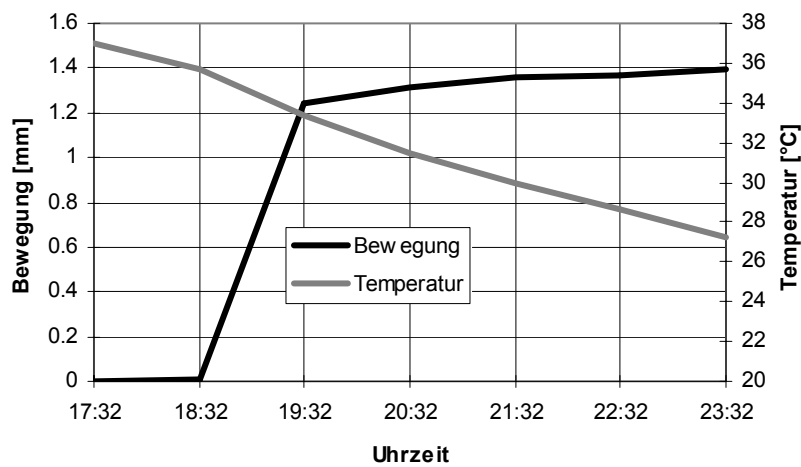


Abbildung 7.2.4: Horizontale Fugenbewegungen und Temperaturverlauf an der Messstelle 6 vom 30.06.1995
Zwischen 18:32Uhr und 19:32Uhr erfolgte eine Blockverschiebung der Betonfahrbahnplatte, d.h. eine Verschiebung einer Gruppe von Betonfahrbahnplatten.

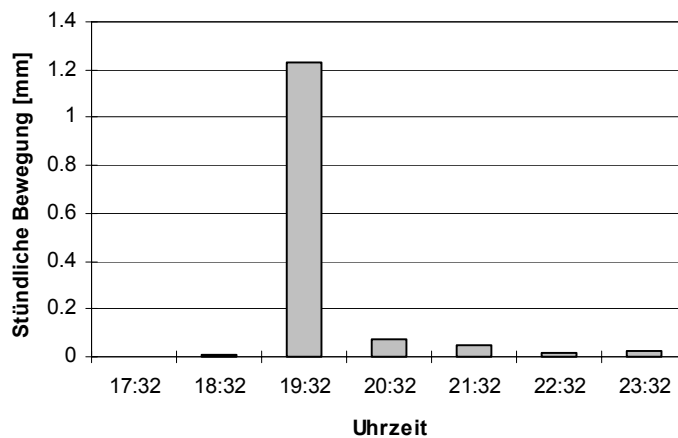


Abbildung 7.2.5: Stündliche, horizontale Fugenbewegungen an der Messstelle 6 vom 30.06.1995
Zwischen 18:32Uhr und 19:32Uhr erfolgte eine Blockverschiebung der Betonfahrbahnplatten.

Horizontale, statische Fugenbewegungen im Jahr 1998:

Messstellen	Fugen zwischen den Betonfahrbahnplatten	Maximale Fugenbewegungen [mm] im Jahr 1998 infolge $\Delta T_{\text{Betonplatte}}$ von 42°C
1	219-220	2.3
2	221-222	2.3
3	229-230	1.1
4	230-231	3.3
5	231-232	1.8
6	239-240	Weggeber defekt

Tabelle 7.2.4: Maximale, horizontale Fugenbewegungen im Jahr 1998 bei einer Temperaturspanne für die Betonfahrbahnplatten zwischen Winter und Sommer von 42°C

Maximale tägliche Fugenbewegungen [mm] im Jahr 1998				
Messstellen	Januar - März	April - Juni	Juli - Sept.	Okt. - Dez.
1	0.9	1.2	1.0	1.0
2	1.0	1.4	1.2	0.9
3	0.5	0.6	0.8	0.5
4	0.9	1.3	1.1	1.2
5	0.4	1.2	1.3	0.6
6	*)	*)	*)	*)

Tabelle 7.2.5: Maximale, tägliche, horizontale Fugenbewegungen im Jahr 1998

*) Wegaufnehmer defekt

Temperaturmessungen im Jahr 1995 und 1998:**Temperaturen der Betonfahrbahnplatten:**

Die Betontemperaturen wurden an vier Messstellen erfasst (*Tabelle 7.2.1*). Die angegebenen Messwerte der Betonplattentemperaturen sind Mittelwerte aus den vier Messstellen (3 Thermoelemente ca. 2cm unterhalb der Fahrbahnoberfläche und ein Thermoelement im Metallkasten des Wegaufnehmers, vgl. *Abbildung 7.2.1*).

In *Tabelle 7.2.6* sind die Temperaturen der Betonfahrbahnplatten und der Luft gegenübergestellt. Der Zusammenhang zwischen den Temperaturen der Betonplatten und der Luft ist in *Tabelle 7.2.7* ersichtlich.

	Temperaturen [°C]			
	1995		1998	
	Betonplatte	Luft	Betonplatte	Luft
Jahrestemperaturen				
- Temperaturspanne	ca. 48 *)	ca. 47 **)	ca. 42 *)	ca. 39 **)
- Maximum	40	35	38	33
- Minimum	- 8	- 12	- 4	- 6
Tagesttemperaturen				
Max. Temperaturspanne:				
- Januar bis März	16	15	13	13
- April bis Juni	18	19	19	14
- Juli bis September	18	16	18	13
- Oktober bis Dezember	11	17	10	8

Tabelle 7.2.6: Temperaturmessungen im Jahr 1995 und 1998

*) Mittelwert aus 4 Messstellen (Streuung $\pm 1^\circ\text{C}$)

***) Einzelmessung

Zusammenhang zwischen den Temperaturen der Betonfahrbahnplatten T_{Beton} und der Luft T_{Luft}		
	1995	1998
Sommer		
- In der Nacht Minimale Temp.	- $T_{\text{Beton}} > T_{\text{Luft}}$ - minimale T_{Beton} ca. 8°C höher als T_{Luft} - minimale T_{Beton} erreicht um 7 - 8Uhr (etwa 2h später als T_{Luft})	- $T_{\text{Beton}} > T_{\text{Luft}}$ - minimale T_{Beton} ca. 5°C höher als T_{Luft} - minimale T_{Beton} erreicht um 7 - 8Uhr (etwa 2h später als T_{Luft})
- Am Tag Maximale Temp.	- $T_{\text{Bet}} > T_{\text{Luft}}$ - maximale T_{Beton} ca. 5°C höher als T_{Luft} - maximale T_{Beton} erreicht um 18 - 19Uhr (etwa 1 bis 2h später als T_{Luft})	- $T_{\text{Bet}} > T_{\text{Luft}}$ - maximale T_{Beton} ca. 4°C höher als T_{Luft} - maximale T_{Beton} erreicht um 17 - 18Uhr (etwa 1 bis 2h später als T_{Luft})
Frühling/Herbst		
- In der Nacht Minimale Temp.	- $T_{\text{Beton}} > T_{\text{Luft}}$ - minimale T_{Beton} ca. 3°C höher als T_{Luft} - minimale T_{Beton} erreicht um 8 - 9Uhr (etwa 2h später als T_{Luft})	- $T_{\text{Beton}} > T_{\text{Luft}}$ - minimale T_{Beton} ca. 4°C höher als T_{Luft} - minimale T_{Beton} erreicht um 8 - 9Uhr (etwa 2h später als T_{Luft})
- Am Tag Maximale Temp.	- in der Regel $T_{\text{Beton}} > T_{\text{Luft}}$; - ab und zu $T_{\text{Beton}} < T_{\text{Luft}}$ wegen Föhneinfluss - maximale T_{Beton} ca. 4°C höher als T_{Luft} - maximale T_{Beton} erreicht um 16 - 17Uhr (etwa 1 bis 2h später als T_{Luft})	- $T_{\text{Beton}} > T_{\text{Luft}}$ - minimale T_{Beton} ca. 4°C höher als T_{Luft} - minimale T_{Beton} erreicht um 16 - 17Uhr (etwa 1 bis 2h später als T_{Luft})
Winter		
- In der Nacht Minimale Temp.	- $T_{\text{Beton}} > T_{\text{Luft}}$ (siehe <i>Abbildung 7.2.6</i>) - minimale T_{Bet} ca. 6°C höher als T_{Luft} - minimale T_{Beton} erreicht etwa 1h später als T_{Luft} (siehe <i>Abbildung 7.2.6</i>)	- $T_{\text{Beton}} > T_{\text{Luft}}$ - minimale T_{Beton} ca. 2°C höher als T_{Luft} - minimale T_{Beton} erreicht etwa 1h später als T_{Luft}
- Am Tag Maximale Temp.	- $T_{\text{Beton}} > T_{\text{Luft}}$ - maximale $T_{\text{Bet.temp}}$ ca. 10°C höher als L_{temp} - maximale T_{Beton} erreicht fast immer um 18Uhr (etwa 1 bis 2h später als T_{Luft})	- $T_{\text{Beton}} > T_{\text{Luft}}$ - maximale $T_{\text{Bet.temp}}$ ca. 10°C höher als L_{temp} - maximale T_{Beton} erreicht fast immer um 18Uhr (etwa 2h später als T_{Luft})

Tabelle 7.2.7: Beziehungen zwischen den Temperaturen der Betonfahrbahnplatten und der Luft

T_{Beton} Temperatur der Betonfahrbahnplatten
 L_{temp} Temperatur der Luft

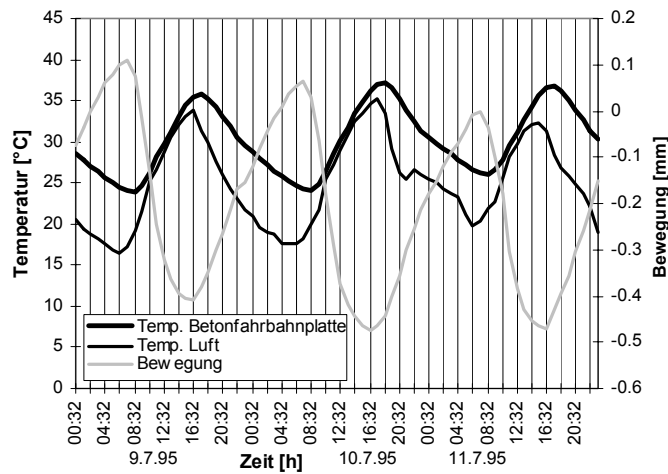


Abbildung 7.2.6: Betonfahrbahnplatten-, Lufttemperaturen und horizontale Fugenbewegungen zwischen 9. und 11. Juli 1995.
Sekundäre Y-Achse: in Minusrichtung: Fugenschliessung; in Plusrichtung: Fugenöffnung

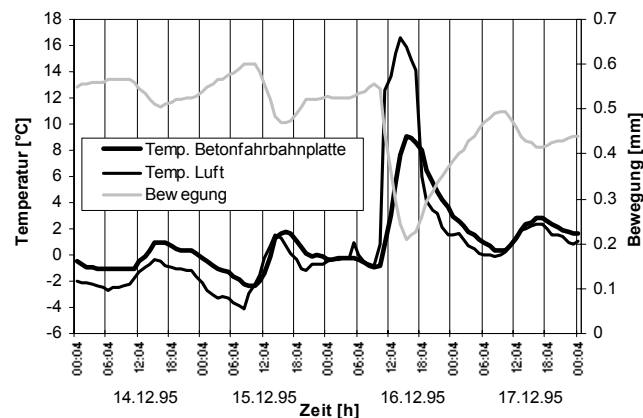


Abbildung 7.2.7: Betonfahrbahnplatten- und Lufttemperaturen zwischen 14. und 17. Dezember 1995. Beispiel eines Spitzenwertes der Lufttemperatur infolge Föhn im Winter
Sekundäre Y-Achse: in Minusrichtung: Fugenschliessung; in Plusrichtung: Fugenöffnung

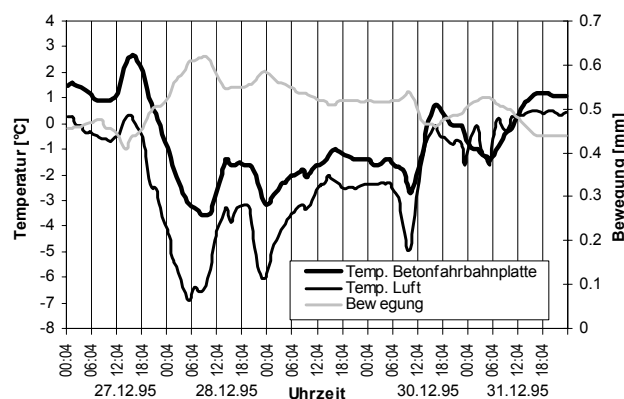


Abbildung 7.2.8: Betonfahrbahnplatten- und Lufttemperaturen zwischen 27. und 31. Dezember 1995. Normaler Temperaturverlauf ohne Föhn einfluss.
Sekundäre Y-Achse: in Minusrichtung: Fugenschliessung; in Plusrichtung: Fugenöffnung

7.2.3 Erkenntnisse aus den Messungen

Statische, horizontale Fugenbewegungen:

Aus den Messungen können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die statischen, horizontalen Fugenbewegungen hängen von den Temperaturen der Betonfahrbahnplatten ab. Die gemessenen Gesamtbewegungen im Jahr 1995 und 1998 sind ähnlich.
- Die Fugen dilatierten jährlich zwischen 0.8mm bis 3.3mm bei einer maximalen Temperaturspanne von 48°C für die Betonfahrbahnplatten. Durch eine Betonplatten-Blockverschiebung (d.h. eine Verschiebung einer Gruppe von Betonfahrbahnplatten) bewegte sich die Fuge an der Messstelle 6.0mm bis 5.6mm pro Jahr.
- Es wurden keine sprunghaften Bewegungen festgestellt. Mehrheitlich bewegten sich die Fugen um <0.1mm pro Stunde (*Abbildung 7.2.2*). Eine Ausnahme bildete die Fuge an der Messstelle 6 mit einer Blockverschiebung von 1.3mm innerhalb einer Stunde (*Abbildung 7.2.4*).
- Pro Tag wurden maximale Fugenbewegungen zwischen 0.4mm und 1.4mm gemessen. Bei der Messstelle 6 wurde eine maximale Bewegung aufgrund der Blockverschiebung von 1.7mm pro Tag gemessen.

Temperaturen der Betonfahrbahnplatten und der Luft:

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Temperaturen der Betonfahrbahnplatten

- Während der gesamten Messperiode von etwa 4.5 Jahren (1995 – 1999) wurde eine Temperaturspanne der Betonfahrbahnplatten von maximal 48°C im Jahr 1995 gemessen. Eine der tiefsten Betonplattentemperatur von -8°C wurde im Januar 1995 und eine maximale Temperatur von 40°C im Juli 1995 festgestellt.
- Die maximalen Tagestemperaturspannen für die Betonfahrbahnplatten lagen zwischen 10°C und 19°C. Mehrheitlich betragen die Tagestemperaturspannen um 18°C.

Beziehungen zwischen den Temperaturen der Betonfahrbahnplatten und der Luft

- *Allgemeines:*

Im ganzen Jahr lagen die Temperaturen der Betonfahrbahnplatten fast immer höher als jene der Luft (siehe Beispiel in *Abbildung 7.2.6*). Ausnahmen ergaben sich während der Winterperioden, bei denen infolge Föhneinfluss die Lufttemperaturen an einigen Tagen höher lagen als die Temperaturen der Betonfahrbahnplatten (*Abbildung 7.2.7*).

- *Sommer:*

Im Sommer erreichten die maximalen Temperaturen der Betonfahrbahnplatten am Tag etwa 5°C und in der Nacht etwa 5°C bis 8°C höhere Werte als jene der Luft. Die maximalen und minimalen Temperaturen der Betonfahrbahnplatten traten etwa ein bis zwei Stunden später auf als jene der Luft. Die Lufttemperaturen erreichten das Maximum mehrheitlich um 16Uhr und das Minimum etwa um 6Uhr.

- *Frühling/Herbst:*

Die maximalen und minimalen Temperaturen der Betonfahrbahnplatten lagen etwa 3°C bis 4°C höher als jene der Luft. Die maximalen und minimalen Temperaturen der Betonfahrbahnplatten wurden etwa ein bis zwei Stunden später beobachtet als jene der Luft. Die Lufttemperaturen erzielten das Maximum mehrheitlich um ca. 15Uhr und das Minimum etwa um 7Uhr.

- *Winter:*

Die maximalen Temperaturen der Betonfahrbahnplatten waren etwa 6°C bis 10°C höher als jene der Luft. Sie traten meisten zwischen 17Uhr und 18Uhr auf (etwa eine bis zwei Stunden später als jene der Luft). Die minimalen Temperaturen der Betonfahrbahnplatten lagen 2°C bis 6°C höher als jene der Luft. Diese minimalen Temperaturen (meistens zwischen 8Uhr und 9Uhr) wurden meistens etwa eine Stunde später als jene der Luft erzielt.

7.3 Kurzzeitmessung der dynamischen Bewegungen der Betonfahrbahnplatten im Fugenbereich

Zur Beurteilung der verkehrsinduzierten, dynamischen Bewegungen der Fugen wurden die relativen Bewegungen der Betonfahrbahnplatten in Horizontal- und Vertikalrichtung im Fugenbereich bei verschiedenen LKW-Überfahrten erfasst.

Für die Messungen wurde ein Lastwagen (LKW-5DM, zweiachsig, Gewicht 15.94t, Vorderachse 5.78t, Hinterachse 10.16t, Achsabstand 4.6m) mit einer Geschwindigkeit von 60km/h und 80km/h verwendet.

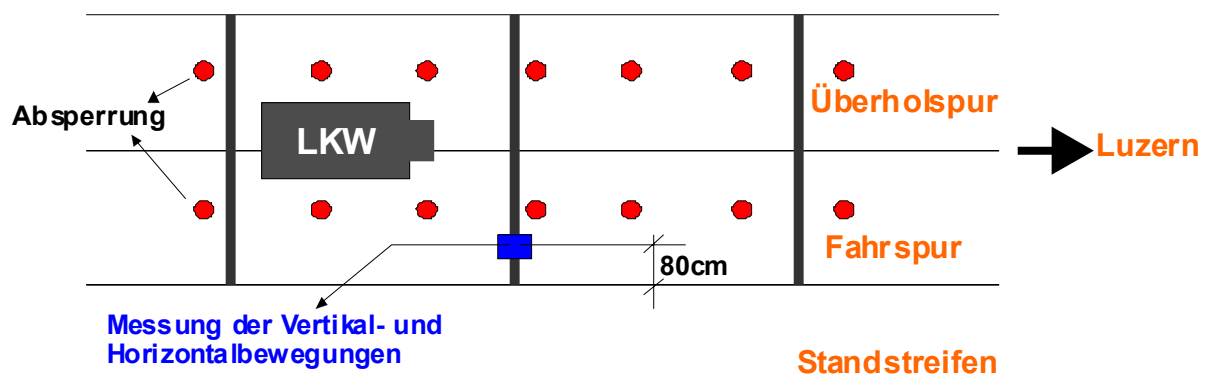


Abbildung 7.3.1: Schematische Darstellung der Messanordnung auf der Autobahn



Abbildung 7.3.2: Anordnung der Messstelle 2 auf der Autobahn
 VHM Messung der relativen Horizontal- und Vertikalbewegungen der Betonfahrbahnplatten

7.3.1 Messprinzip und -einrichtungen

Relative, horizontale, dynamische Fugenbewegungen infolge Verkehr:

Zwei Arten von Messungen wurden durchgeführt:

- Messungen der Horizontalbewegungen der Betonfahrbahnplatten mit dem in Kap. 7.2 beschriebenen und ca. 5cm unterhalb der Fahroberfläche befindlichen induktiven Wegaufnehmern.
- Messungen der Horizontalbewegungen mit induktiven Wegaufnehmern, die auf den Betonfahrbahnplatten fixiert wurden (*Abbildung 7.3.3*).

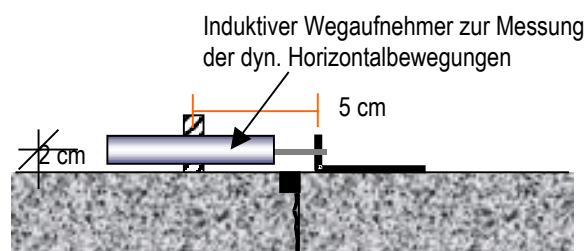


Abbildung 7.3.3: Messeinrichtung zur Messung der relativen Horizontalbewegungen
 MS1h Messstelle 1, horizontal
 P244 und P243 Betonfahrbahnplatten-Nummer

Relative vertikale dynamische Fugenbewegungen infolge Verkehr:

Messungen der relativen, dynamischen, vertikalen Fugenbewegungen zwischen den Betonfahrbahnplatten infolge Verkehr mit induktiven Wegaufnehmern. Die Messeinrichtung ist in *Abbildung 7.3.4* ersichtlich.

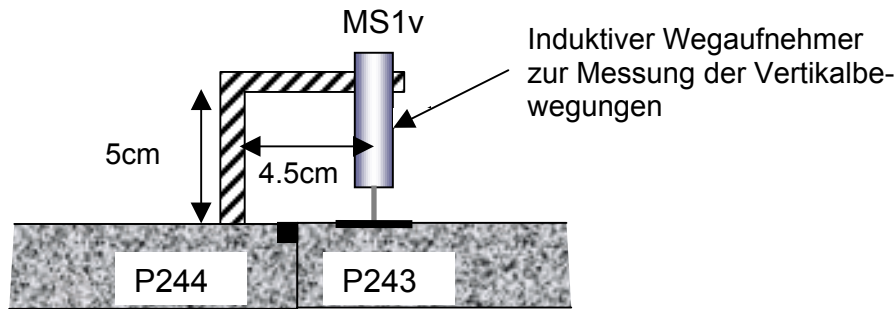


Abbildung 7.3.4: Messeinrichtung zur Messung der relativen Vertikalbewegungen
MS1v Messstelle 1, vertikal
P244 und P243 Betonfahrbahnplatten-Nummer

Messgeräte:

- Dynamisches Messsystem DMC9012A, Nr. D-35'292
- Induktive Wegaufnehmer
- Messrate 300 Hz

Messstellen (vgl. Abbildung 7.3.5 und 7.3.6):

Messstelle 1: Fuge zwischen den Betonfahrbahnplatten P244 und P243:

- Horizontalbewegungen der Betonfahrbahnplatten (Messung an der Oberfläche der Betonfahrbahnplatte)
- Vertikalbewegungen der Betonfahrbahnplatten (Messung an der Oberfläche der Betonfahrbahnplatte)

Messstelle 2 (Fuge zwischen den Betonfahrbahnplatten P222 und P221):

- Horizontalbewegungen der Betonfahrbahnplatten (Messung ca. 5cm unterhalb der Fahrbahnoberfläche)
- Horizontalbewegungen der Betonfahrbahnplatten (Messung an der Oberfläche der Betonfahrbahnplatte)
- Vertikalbewegungen der Betonfahrbahnplatten (Messung an der Oberfläche der Betonfahrbahnplatte)

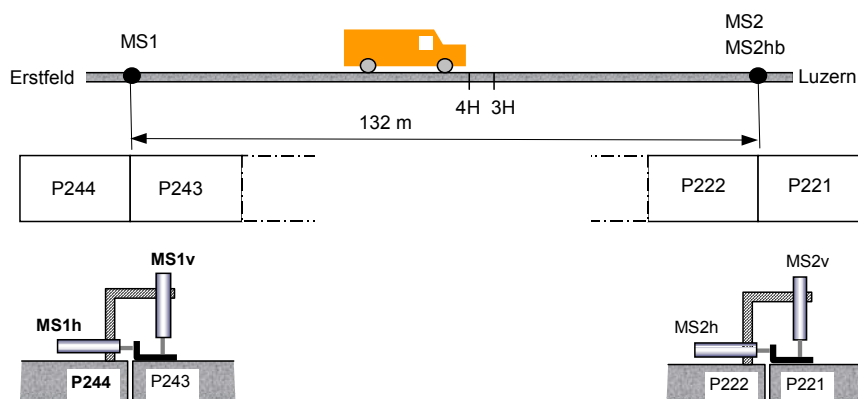


Abbildung 7.3.5: Grafische Darstellung der beiden Messstellen

MS1, MS2 Messstelle 1 bzw. 2

MS1v, MS2v Messstelle 1 bzw. 2, vertikal

MS1h, MS2h Messstelle 1 bzw. 2, horizontal

MS2hb Messung der Horizontalbewegung (ca. 5cm unterhalb der Fahrbahnoberfläche)

P244, P243, P222, P221 Betonfahrbahnplatten-Nummer

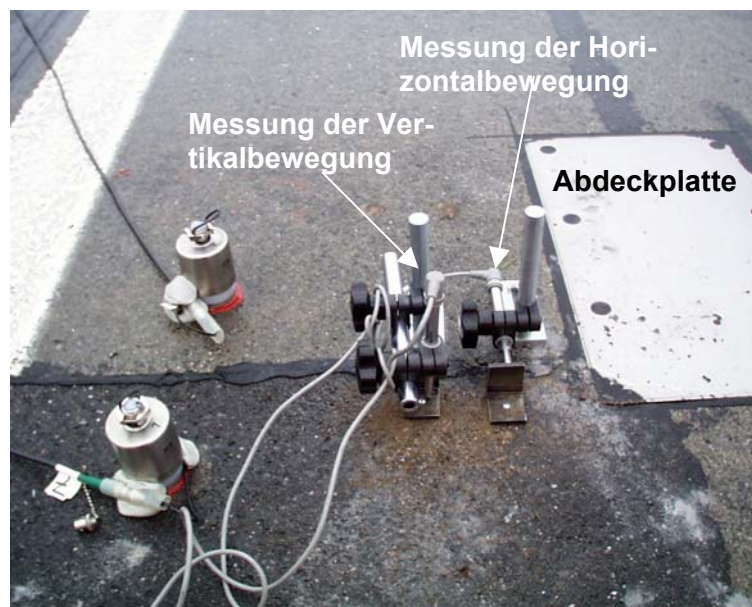


Abbildung 7.3.6: Messeinrichtung an der Messstelle 2 (Fuge zwischen den Betonfahrbahnplatten P221 und P222)
Etwa 5cm unterhalb der Abdeckplatte befindet sich die Messeinrichtung zur Messung der Horizontalbewegungen im Beton (MS2/IB)
(vgl. *Abbildung 7.2.1*)

7.3.2 Ergebnisse der Messungen

Relative Horizontal- und Vertikalbewegungen bei 60km/h:

Die gesamten, relativen Bewegungen der Betonfahrbahnplatten in vertikaler und horizontaler Richtung infolge der LKW-Fahrt mit 60km/h enthält *Tabelle 7.3.1*. Die Messwerte sind in den *Abbildungen 7.3.7 bis 7.3.10* dargestellt.

Messstelle	Maxima (Fugenstauchung) [mm]	Minima (Fugendehnung) [mm]	Maximale Amplitude [mm]
MS1h	0.005	-0.007	0.012
MS1v	0.006	-0.020	0.026
MS2h	0.011	-0.004	0.016
MS2v	0.035	-0.036	0.072
MS2hb	0.010	-0.003	0.013

Tabelle 7.3.1: Ergebnisse der relativen, dynamischen Horizontal- und Vertikalmessungen
MS1v Messstelle 1, Messung der Vertikalverschiebungen
MS1v Messstelle 1, Messung der Vertikalverschiebungen
MS2hb Messstelle 2, Messung der Horizontalverschiebungen im Beton etwa 5cm unterhalb der Betonfahrbahnoberfläche

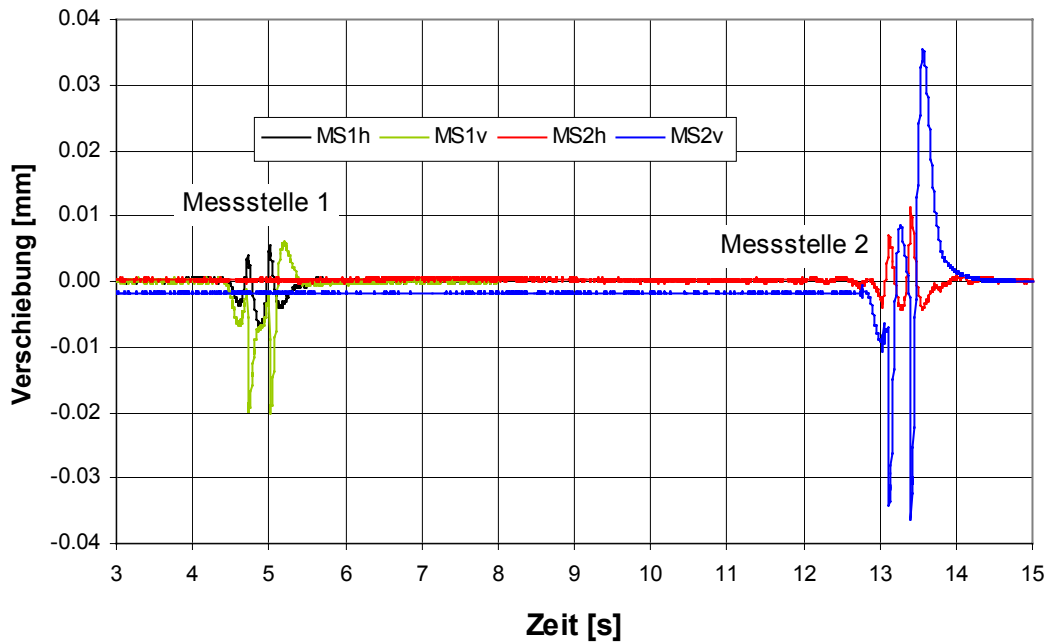


Abbildung 7.3.7: Grafische Darstellung der Horizontal- und Vertikalverschiebungen an den Messstellen 1 und 2 bei Überfahrt mit 60km/h
 MS1h Messstelle 1, Messung der Horizontalverschiebungen
 MS1v Messstelle 1, Messung der Vertikalverschiebungen

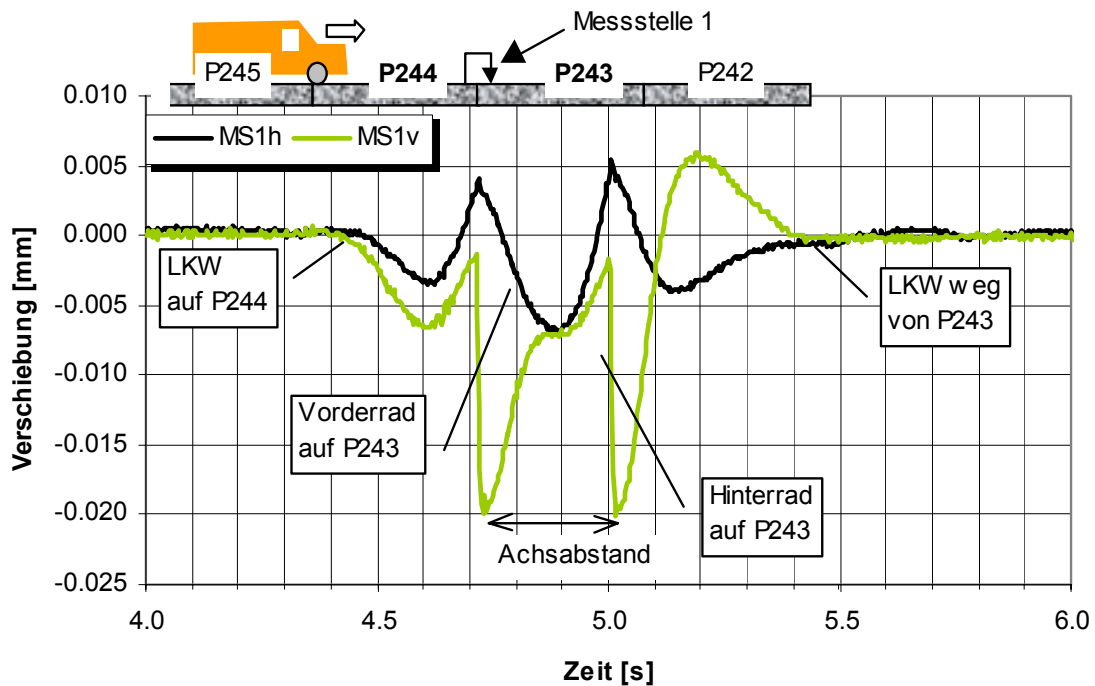


Abbildung 7.3.8: Grafische Darstellung der Horizontal- und Vertikalverschiebungen an der Messstelle 1 bei Überfahrt mit 60km/h
 MS1h Messstelle 1, Messung der Horizontalverschiebungen
 MS1v Messstelle 1, Messung der Vertikalverschiebungen
 P244 Fugenfahrbahnplatte Nr. 244

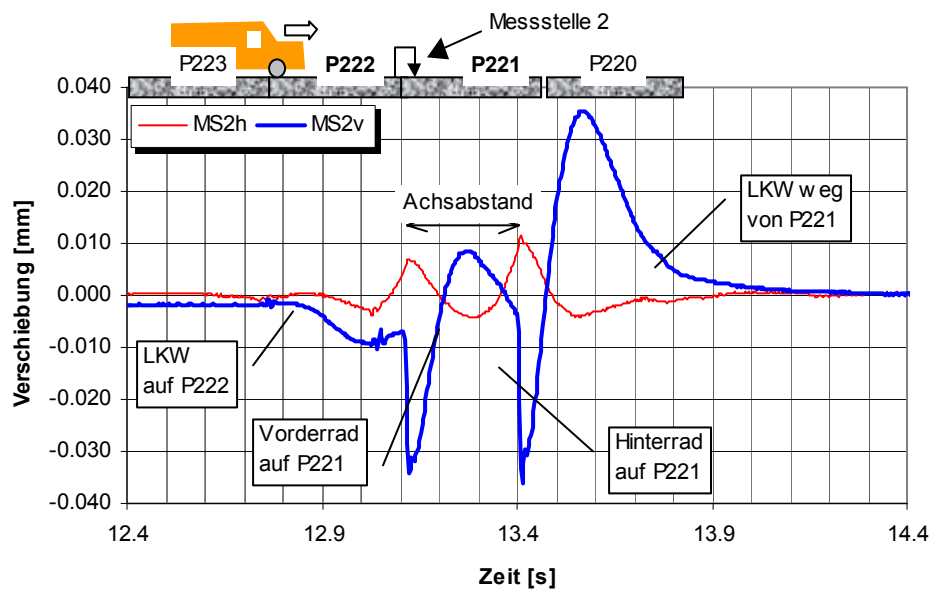


Abbildung 7.3.9: Grafische Darstellung der Horizontal- und Vertikalverschiebungen an der Messstelle 2 bei Überfahrt mit 60km/h
 MS2h Messstelle 2, Messung der Horizontalverschiebungen
 MS2v Messstelle 2, Messung der Vertikalverschiebungen
 P222 Fugenfahrbahnplatte Nr. 222

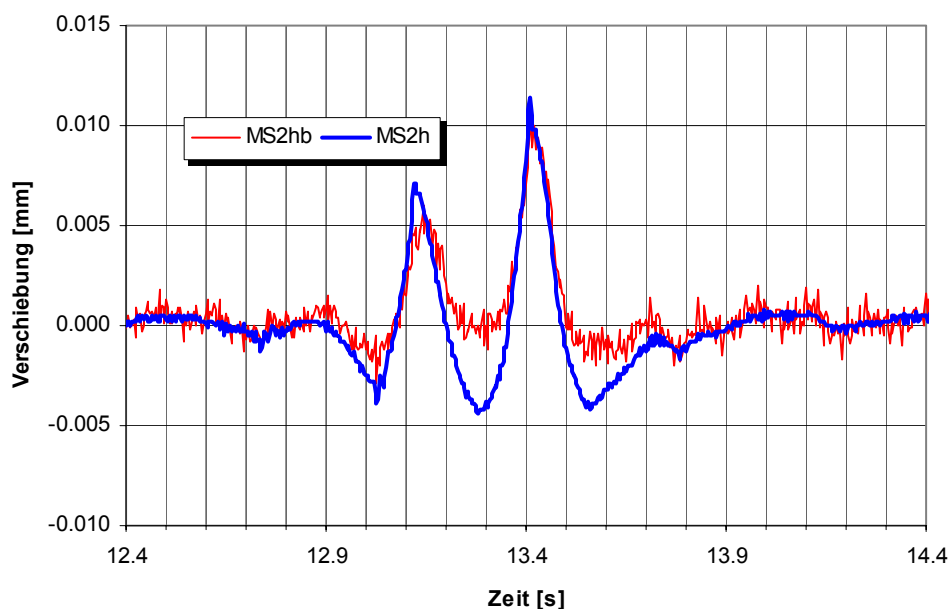


Abbildung 7.3.10: Vergleich der Schubverschiebungen an der Messstelle 2, gemessen an der Betonfahrbahnoberfläche und ca. 5cm unterhalb der Betonfahrbahnoberfläche bei Überfahrt mit 60km/h
 MS2h Messstelle 2, Messung der Horizontalverschiebungen
 MS2hb Messstelle 2, Messung der Horizontalverschiebungen im Beton etwa 5cm unterhalb der Betonfahrbahnoberfläche

Relative Horizontal- und Vertikalverschiebungen mit induktiven Wegaufnehmern bei 80km/h:

Messstelle	Maxima (Fugenstauchung) [mm]	Minima (Fugendehnung) [mm]	Maximale Amplitude [mm]
MS1h	0.004	-0.011	0.015
MS1v	0.006	-0.025	0.031
MS2h	0.009	-0.007	0.016
MS2v	0.039	-0.036	0.075
MS2hb	0.009	-0.003	0.013

Tabelle 7.3.2: Ergebnisse der relativen, dynamischen Horizontal- und Vertikalmessungen

MS1h Messstelle 1, Messung der Horizontalverschiebungen
 MS1v Messstelle 1, Messung der Vertikalverschiebungen
 MS2hb Messstelle 2, Messung der Horizontalverschiebungen im Beton
 etwa 5cm unterhalb der Betonfahrbahnoberfläche

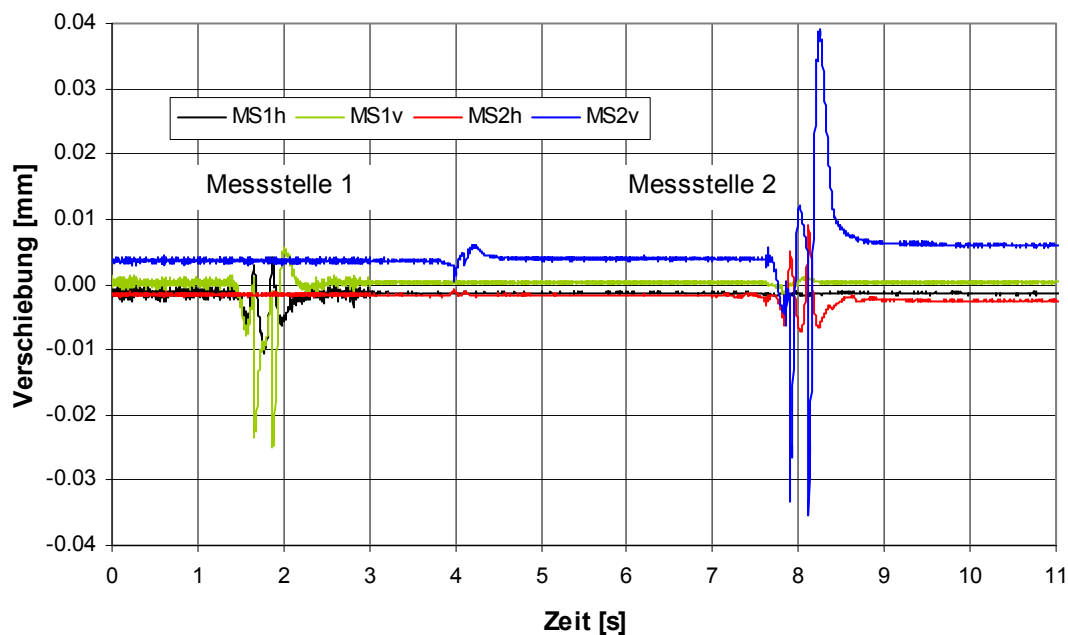


Abbildung 7.3.11: Grafische Darstellung der Horizontal- und Vertikalverschiebungen an den Messstellen 1 und 2 bei Überfahrt mit 80km/h

MS1h Messstelle 1, Messung der Horizontalverschiebungen
 MS1v Messstelle 1, Messung der Vertikalverschiebungen

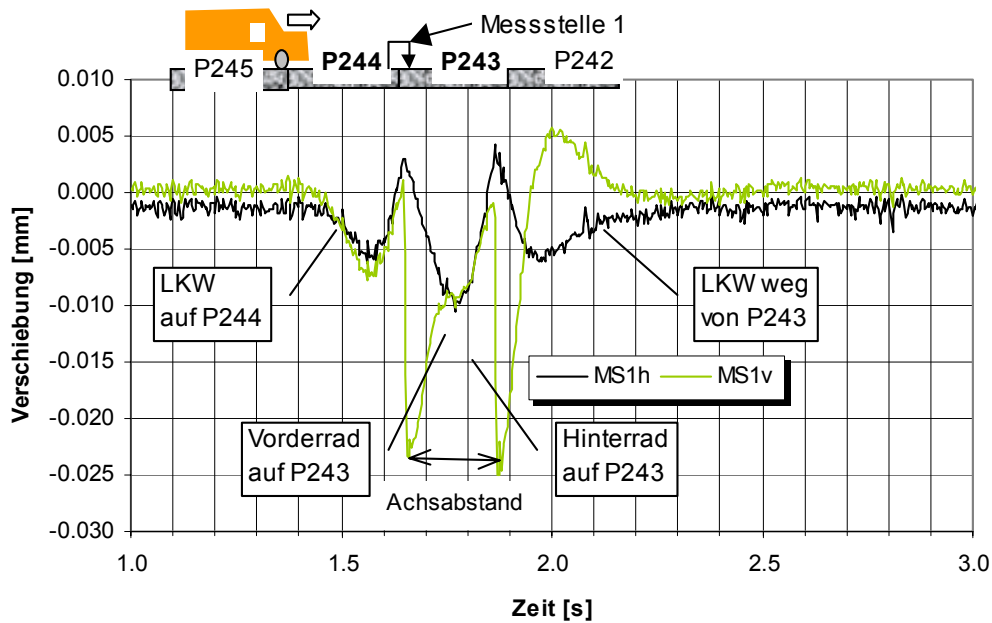


Abbildung 7.3.12: Grafische Darstellung der Horizontal- und Vertikalverschiebungen an der Messstelle 1 (Tagesfuge) bei Überfahrt mit 80km/h
 MS1h Messstelle 1, Messung der horizontalen Verschiebungen
 MS1v Messstelle 1, Messung der vertikalen Verschiebungen
 P245 Fugenplatte Nr. 245

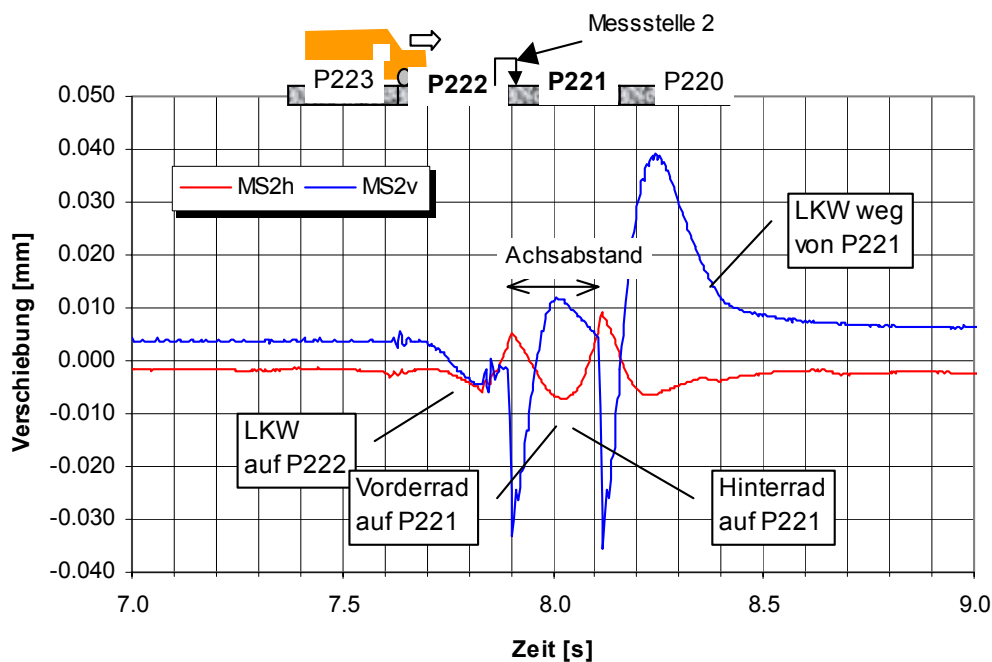


Abbildung 7.3.13: Grafische Darstellung der Horizontal- und Vertikalverschiebungen an der Messstelle 2 (Normalfuge) bei Überfahrt mit 80km/h
 MS2h Messstelle 2, Messung der horizontalen Verschiebungen
 MS2v Messstelle 2, Messung der vertikalen Verschiebungen
 P223 Fugenplatte Nr. 223

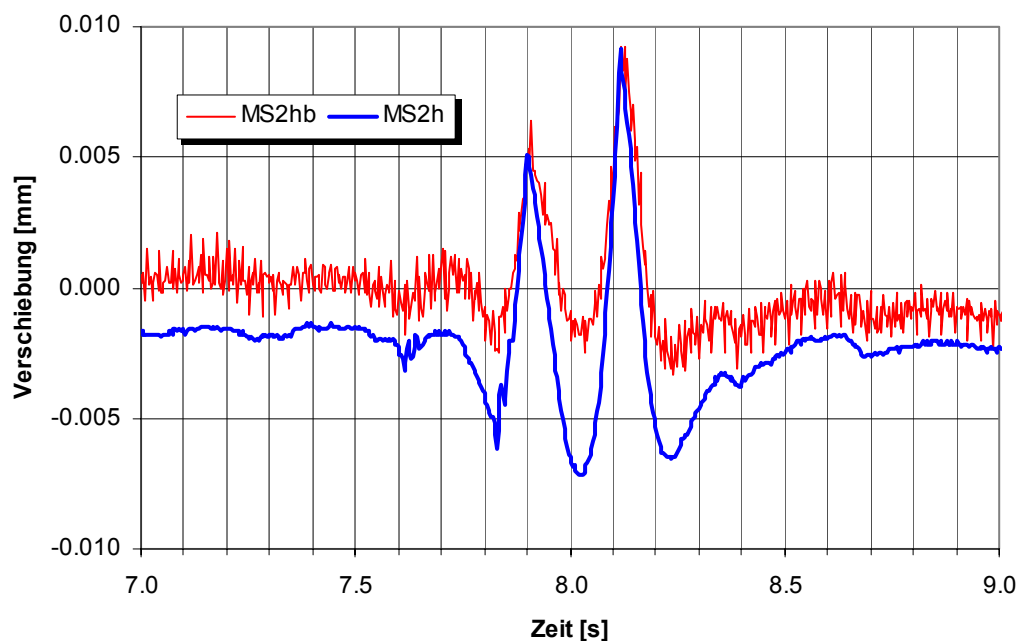


Abbildung 7.3.14: Vergleich der Horizontalbewegungen an der Messstelle 2, gemessen an der Betonfahrbahnoberfläche und ca. 5cm unterhalb der Betonfahrbahnoberfläche bei Überfahrt mit 80km/h
 MS2h Messstelle 2, Messung der Horizontalverschiebungen
 MS2hb Messstelle 2, Messung der Horizontalverschiebungen im Beton etwa 5cm unterhalb der Betonfahrbahnoberfläche

7.3.3 Interpretation der Bewegungskurven

In diesem Teil wird versucht, die gemessenen Horizontal- und Vertikalbewegungen qualitativ zu interpretieren. Basis bildet eine separate Arbeit der EMPA [L13], worin verschiedene Verfahren und Annahmen diskutiert wurden.

Horizontalbewegung:

Die gemessenen Kurven der Horizontalbewegungen lassen sich qualitativ mittels einer Berechnung nach Bleich [L14] aufgrund der Randverdrehung der Betonplatten im Fugenbereich (unverbundene Betonplatten) erklären.

Durch die Last biegt sich die Betonplatte, und es entsteht eine Verdrehung der Plattenränder mit einem Winkel α (Abbildung 7.3.15). Die Abbildung 7.3.16 zeigt die Einflusslinien des theoretischen Messweges aufgrund der Verdrehung der Plattenränder infolge der beiden einwirkenden Achslasten A1 (Vorderachse) und A2 (Hinterachse). Eine Überlagerung der beiden Einflusslinien ist in Abbildung 7.3.17 grafisch dargestellt. Sie ergibt ein qualitativ ähnliches Bild wie die Horizontalbewegungenmessungen (in Abbildungen 7.3.8, 7.3.9, 7.3.10, 7.3.12, 7.3.13 und 7.3.14). Die Berechnung zeigt, dass die Verdübelung zwischen den Betonfahrbahnplatten im vorliegenden Fall Randverdrehungen nicht zu verhindern vermögen.

Somit lassen sich die Messkurven der Horizontalbewegungen aus Fugenöffnung und schliessung infolge der Randverdrehung ungebundener Betonplatten gut erklären. —

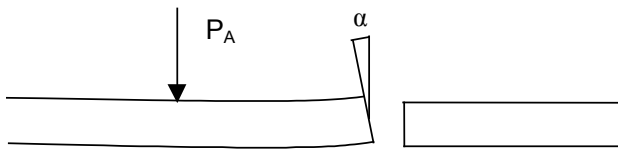


Abbildung 7.3.15: Randverdrehung durch die Last

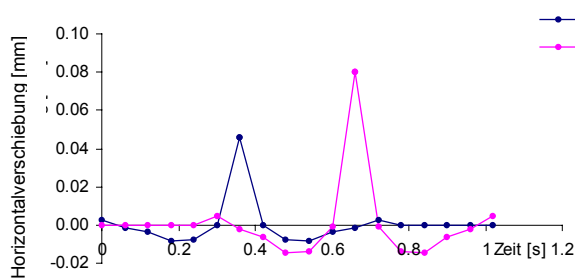


Abbildung 7.3.16:

Einflusslinien der Achslasten A1 und A2 für die Horizontalverschiebung infolge Randverdrehung der Betonfahrbahnplatten

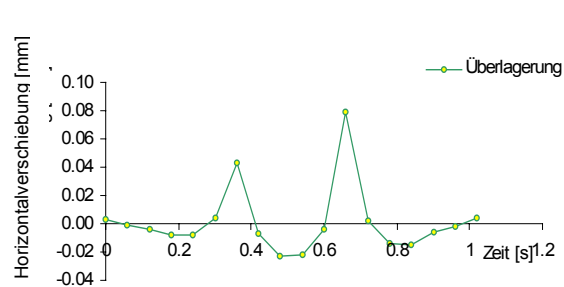


Abbildung 7.3.17:

Überlagerung der Einflusslinien der beiden Achslasten A1 und A2 für die Horizontalverschiebungen

Vertikalbewegungen:

Für die Interpretation der Vertikalbewegungen wurden zwei Berechnungsverfahren mit unterschiedlichen Annahmen evaluiert: unverbundene und gelenkig verbundene Betonplatten.

Das Berechnungsverfahren mit der Annahme "gelenkig verbundene Betonplatten" ergab Einflusslinien, die mit den Messungen unvergleichbar waren.

Hingegen zeigte eine Berechnung nach Bleich [L14] unter der Annahme "unverbundener Betonplatten" mit Berücksichtigung der Verdrehung der Betonplattenränder eine qualitativ zufriedenstellende Übereinstimmung mit den gemessenen Vertikalbewegungen (Abbildung 7.3.18 und 7.3.19). Es ist gut erkennbar, dass beide Achslasten unmittelbar bei Überfahrt der Fugen zu einem starken Signalsprung (Phase 2 der Abbildungen 7.3.20 und 7.3.21) am Messinstrument führten.

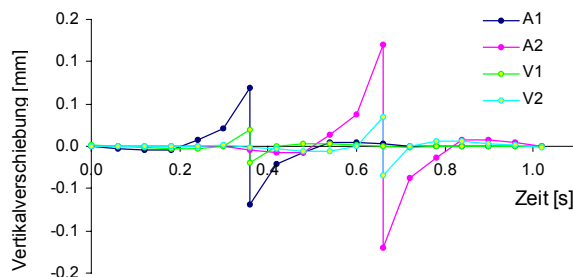


Abbildung 7.3.18:

Einflusslinien der Vertikalverschiebungen, hervorgerufen durch die Achslasten A1 und A2 sowie der Zusatzverschiebungen V1 respektive V2.

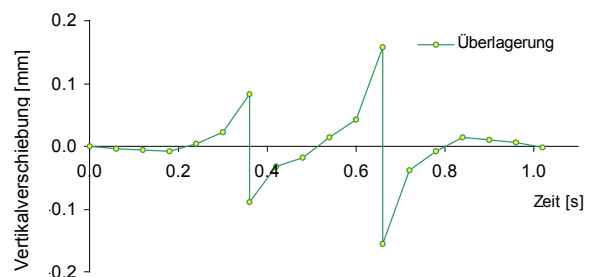


Abbildung 7.3.19:

Überlagerung der Einflusslinien aller Einflussfaktoren, die zu den vertikalen Verschiebungen beitragen.

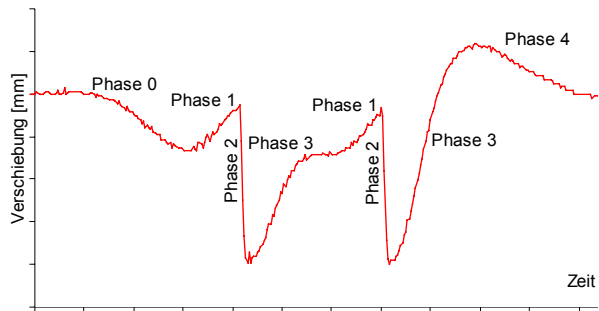


Abbildung 7.3.20:
Kurve der Vertikalbewegungen (gemessen)

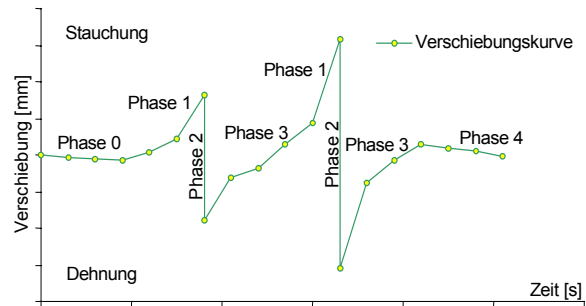


Abbildung 7.3.21:
Kurve der Vertikalbewegungen (berechnet nach Bleich / ohne Gelenk [L14])

Aufgrund der modellierten Vertikalbewegungen im Fugenbereich lassen sich somit bei der Überfahrt eines LKW's folgende Phasen unterscheiden (Abbildungen 7.3.20 und 7.3.21):

Phase 0:

Bei Annäherung der ersten Achslast an die Messstelle kommt es schon im ersten Drittel der Platte (etwa 4m vor der gemessenen Fuge) bis zum Ende des zweiten Drittels (etwa 2m vor der Fuge) zu einer Hebung der Fuge, welche negative Verschiebungen am Messgeber verursacht. Im Berechnungsmodell ist diese Phase aufgrund der getroffenen, vereinfachten Berechnungsannahmen (Bettung, Plattensteifigkeit etc.) nicht sehr stark ausgeprägt.

Phase 1:

Es ist ein positiver Anstieg festzustellen. Das heisst, der Messgeber wird zunehmend gestaucht. Diese Reaktion ist bei beiden Achslasten festzustellen. Je mehr sich die Last der Plattenkante nähert, desto grösser werden auch die Stauchungen (Abbildung 7.3.22).

Phase 2:

Es kommt zu einem schlagartigen Richtungswechsel (siehe Abbildung 7.3.22). Der zuvor stark gestauchte Messgeber wird nun stark gedehnt. Diese Reaktion tritt bei jeder Überfahrt einer Achslast auf.

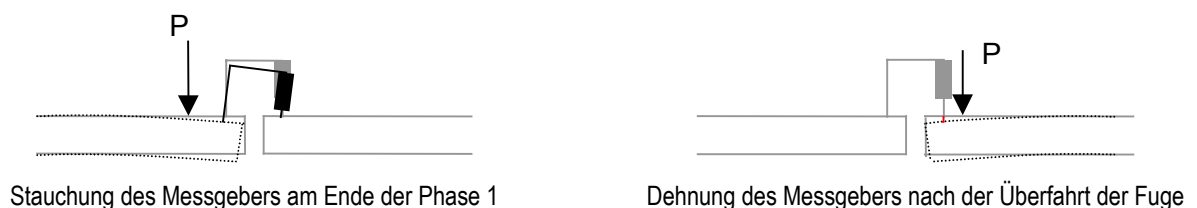


Abbildung 7.3.22: Platterverformung am Betonplattenende bei der Überfahrt der Achslast über die Fuge

Phase 3:

Die Achslast entfernt sich vom Plattenrand und die Dehnung des Messgebers ist rückläufig.

Phase 4:

Diese Phase ist gekennzeichnet durch einen Wechsel von einem gedehnten zu einem gestauchten Messgeber. In der Berechnung ist diese Phase sehr schwach ausgeprägt.

7.2.4 Erkenntnisse aus den Messungen

Durch die Verkehrsbelastung bewegten sich die Betonfahrbahnplatten im Bereich der Fugen sowohl in Horizontal- als auch in Vertikalrichtung. Die Messungen an den Messstellen 1 und 2 ergaben folgende Erkenntnisse:

Dynamische Horizontalverschiebungen:

Aufgrund der grafischen Darstellungen der Messwerte kann gefolgert werden, dass die gemessenen Horizontalbewegungen infolge einer Randverdrehung der Betonplatten entstanden. Plattenschubbewegungen sind im vorliegenden Fall somit vernachlässigbar.

Die maximale, gemessene Horizontalverschiebung bei einer LKW-Geschwindigkeit von 80km/h betrug 0.015mm an der Messstelle 1 und 0.016mm an der Messstelle 2 (*Abbildung 7.3.11*). Die Bewegungen bei einer Fahrgeschwindigkeit von 60km/h waren etwa gleich wie bei 80km/h.

Die Messung an der Oberfläche und in der Betonplatte sind durchaus vergleichbar (*Tabellen 7.3.1, 7.3.2, 7.3.10 und 7.3.14*). Wegen der grösseren Hebelwirkung sind die Werte an der Betonfahrbahnoberfläche etwas höher als im Beton.

Dynamische Vertikalverschiebungen:

Auch die Vertikalbewegungen entstanden durch vertikale Plattenbiegeverformungen und Randverdrehungen.

Die maximale, gemessene Vertikalverschiebung bei einer LKW-Geschwindigkeit von 80km/h betrug 0.031mm an der Messstelle 1 und 0.075mm an der Messstelle 2 (*Abbildung 7.3.11*). Die Bewegungen bei einer Fahrgeschwindigkeit von 60km/h waren etwa gleich wie bei 80km/h (*Abbildung 7.3.7*).

Befestigung zweier Betonplatten an der Fuge:

Der Versuch zur Erklärung der Verläufe der Messkurven ergab, dass nicht von einer gelenkigen Verbindung ausgegangen werden kann und die Verbundfunktion der Dübel an den gemessenen Fugen nicht mehr gewährleistet war. Dies könnte auf Rostbildung der Dübel zurückzuführen sein.

8. BEGLEITENDE LABORUNTERSUCHUNGEN

8.1 Eigenschaften der Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand

Während des Einbaus wurden alle Einbauabläufe und Einbaubedingungen registriert und Fugenvergussmassen sowie Fugenmodellkörper (*Abbildung 8.1.1*) für die Laboruntersuchungen entnommen. Die Fugenmodellkörper (Fugenbreite: 12mm, Fugentiefe: 20mm, Fugenlänge: 1m) wurden am Rande der Versuchsstrecke der gleichen Witterung wie die Strassenbeläge ausgesetzt, jedoch nicht durch Verkehr belastet (*Abbildung 8.1.2*). Für die begleitenden Laboruntersuchungen wurden die Fugenvergussmassen aus den Belagsfugen und Fugenmodellkörper weiterhin periodisch bis zu einer Beobachtungszeit von 5 Jahren entnommen.

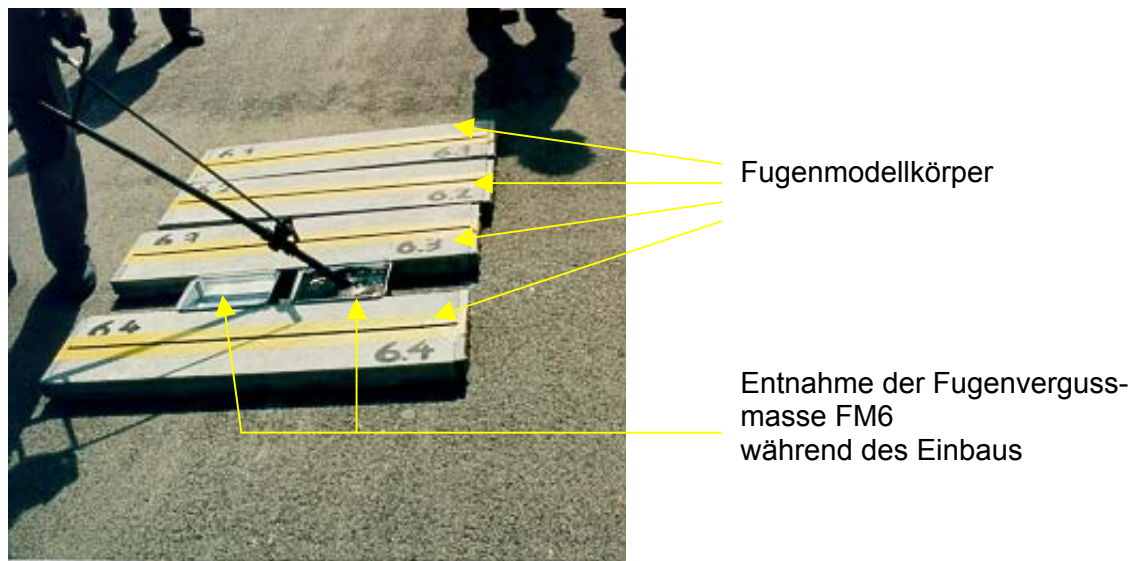


Abbildung 8.1.1: Fugenmodellkörper 6.1 bis 6.4 vom System FM6.

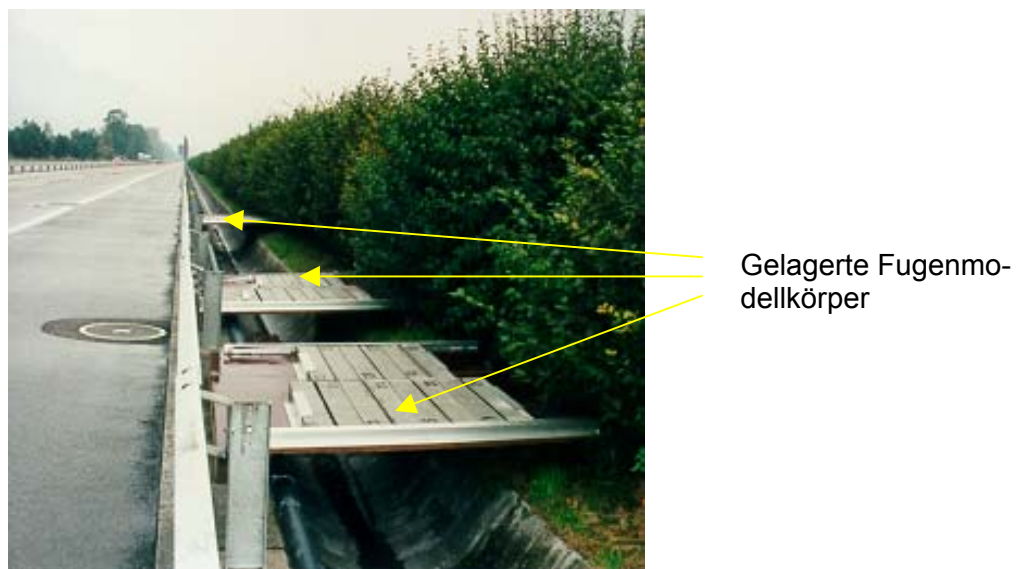


Abbildung 8.1.2: Lagerung der Fugenmodellkörper am Rand der Versuchsstrecke.

8.1.1. Prüfungen

An den entnommenen Fugenvergussmassen (im Anlieferungszustand, bei Einbau-Beginn und bei Einbau-Ende) wurden die in *Tabelle 8.1.1* und *8.1.2* aufgeführten Prüfungen vorgenommen:

Prüfungen	gemäss	Anlieferung	Einbau-Beginn	Einbau-Ende	RTFOT (180°C)
Penetration (Nadel), 25°C	SN 671'740a	x	x	x	x
Penetration (Konus), 25°C	TL bitFug 82	x	x	x	x
Erweichungspunkt Ring und Kugel (mit Schulterring)	SN 671'743	x	x	x	x
Kugelfallprobe	SN 671'917	x	x	x	---
Fliesslänge	SN 671'916	x	x	x	---
Dehnbarkeit bei -20°C	SN 671'920	x	---	---	---

Tabelle 8.1.1: Liste der aufgeführten, normierten Prüfungen gemäss Schweizer Norm SN 671'610 und deutschen technischen Lieferbedingungen TL bitFug 82
 x durchgeführt
 --- nicht durchgeführt

Prüfungen	gemäss	Anlieferung	Einbau-Beginn	Einbau-Ende	RTFOT (180°C)
Gelpermeationschromatografie (GPC)	ASTRA Richtlinie [13] TP Kap. 2.1.1.11	x	x	x	x
Kennwerte mittels EMPA-Test "Ko-Axial Schubtest" (KAST)	ASTRA Richtlinie [13] TP Kap. 2.1.1.9	x	---	---	---
Kennwerte mittels Dynamic Shear Rheometer (DSR)	SHRP-Methode EMPA SOP-Nr. 2926	x	---	x	x

Tabelle 8.1.2: Liste der nicht normierten Prüfungen
 x durchgeführt
 --- nicht durchgeführt

8.1.2. Ergebnisse und Diskussionen

Normierte Prüfungen:

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand vor dem Einbau werden in *Kap. 12.1* eingehend erläutert. Die Beurteilung der Ergebnisse der normierten Prüfungen ist in *Tabelle 8.1.3* angegeben. Nur zwei der Fugenvergussmassen (FM1 und FM7) haben die Anforderungen der durchgeführten normierten Prüfungen vollständig erfüllt, obwohl alle Fugenvergussmassen gemäss technischen Blättern der Hersteller bzw. Lieferanten die Anforderungen der Schweizer Norm SN 671'625a hätten erfüllen sollen. Vier der Fugenvergussmassen (FM2, FM4, FM5, FM6) zeigten Haftprobleme bei -20°C an den Fugenflanken der Prüfkörper.

Prüfungen	Anforderung	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6	FM7
Pen (Nadel)	$\leq 100 \cdot 10^{-1} \text{mm}$	✓	✓	⊗	✓	✓	✓	✓
Ep RuK	$\geq 85^\circ\text{C}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Flieslänge	$\leq 10 \text{mm}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kugelfallprobe	intakt	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Dehnbarkeit bei -20°C - ohne Wasserlagerung - nach Wasserlagerung	weder Risse noch Ablösungen	✓ ✓	⊗ ⊗	✓ ✓	⊗ ⊗	⊗ ⊗	⊗ ⊗	✓ ✓

Tabelle 8.1.3: Prüfungen und Beurteilungen der Fugenvergussmassen bei Anlieferung (vor dem Einbau) aufgrund der normierten Prüfungen (vgl. *Tabelle 4.1*)

- ✓ Anforderung der Norm erfüllt
⊗ Anforderung der Norm nicht erfüllt

Nicht normierte Prüfungen:

Die detaillierten Ergebnisse der nicht normierten Prüfungen sind in Kap. 12.1 zu finden. In den *Tabellen 8.1.4* und *8.1.5* werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Gelpermeationschromatografie

Mittels Gelpermeationschromatografie (vgl. Abschnitt 4.2.1) wurden die Molekularmassen und die Flächen-Anteile der Polymer-Komponenten in den Fugenvergussmassen bezüglich Bitumen bestimmt. Die Ergebnisse sind in der *Tabelle 8.1.4* zusammengefasst. Es ist zu erwähnen, dass lediglich die in Tetrahydrofuran löslichen Polymer-Komponenten erfasst werden konnten, wie Styrol-Butadien-Styrol (SBS), Styrol-Isobuten-Styrol (SIS). Die meisten Fugenvergussmassen enthalten diese Komponenten. Nicht erfasst wurden somit die Polyolefine, die mitunter als Teil der Polymer-Komponenten in den Fugenvergussmassen beige-mischt werden. Die FM1 und FM7 enthalten drei und die anderen nur zwei Polymer-Komponenten. Die Polymeranteile in der Mischung Polymer-Bitumen (Berechnung siehe Kap. 12.1) variierten zwischen 3.7 Flächen-% (bei FM5) und 8.9 Flächen-% (bei FM7).

Fugen- verguss- massen	1. Polymer-Peak		2. Polymer-Peak		3. Polymer-Peak		Total Flä- chen-%
	Mw [10^5g/mol]	Flächen- %	Mw [10^5g/mol]	Flächen- %	Mw [10^5g/mol]	Flächen- %	
FM1	3.8	7.2	1.1	0.6	0.24	0.8	8.6
FM2	4.1	2.3	1.2	2.3	---	---	4.6
FM3	4.5	1.2	1.3	6.7	---	---	7.9
FM4	1.7	4.9	1.2	1.3	---	---	6.2
FM5	4.2	1.9	1.2	1.8	---	---	3.7
FM6	4.3	2.4	1.3	2.4	---	---	4.8
FM7	2.4	3.5	1.4	3.5	1.1	1.9	8.9

Tabelle 8.1.4: Ergebnisse der Gelpermeationschromatografie. Molekularmasse (Mw) mit entsprechendem Flächen-Anteil bestimmt aus den Chromatogrammen für die Polymer-Komponenten in den Fugenvergussmassen FM1 ... FM7

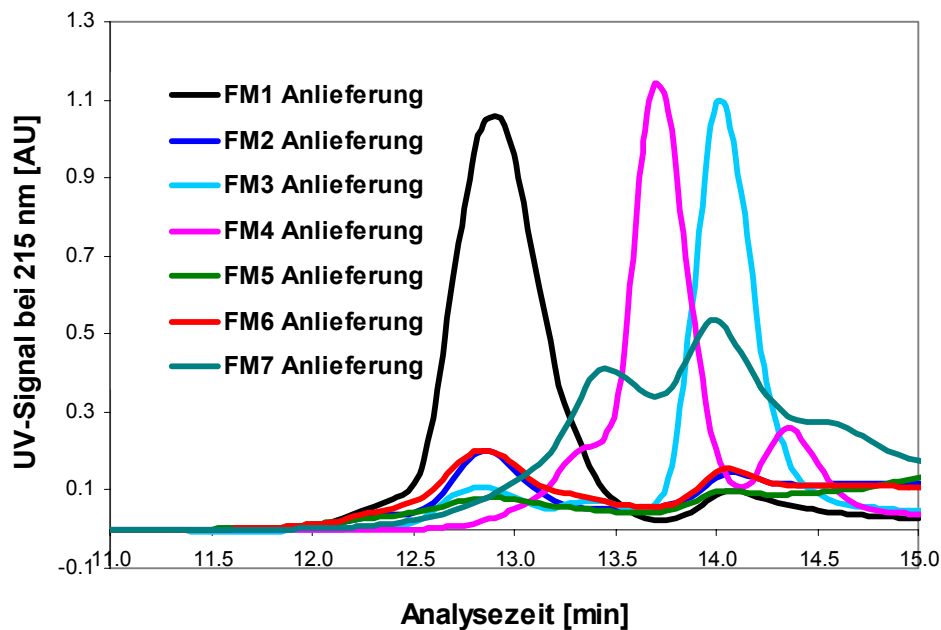


Abbildung 8.1.3: Vergleich der Polymer-Komponenten verschiedener Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand

Kennwerte mittels Ko-Axial Schubtest (KAST)

Die dynamischen Kennwerte der Fugenvergussmassen FM1 ... FM7 für die gesamten untersuchten Temperatur- und Frequenz-Bereiche sind in Anhang 12.2 aufgeführt. Analog zum Bericht [L2] sind bestimmte, extreme, dynamische Kennwerte in der *Tabelle 8.1.5* zusammengefasst.

Aussage	Kennwerte	Einheit	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6	FM7
Temperaturabhängigkeit	$G^{**}_{(-5/1)} / G^{**}_{(+30/1)}$		19	141	72	41	80	87	107
Elastizität in allen Bereichen	Phasenverschiebung ϕ	Winkelgrad	7 ... 48	27 ... 50	19 ... 53	11 ... 53	21 ... 49	19 ... 46	25 ... 45
Verhalten bei erhöhten Temperaturen	$\phi_{(+30/0.125)}$	Winkelgrad	22	44	49	44	43	41	42
	$G^{**}_{(+30/0.125)}$	N/mm ²	0.01	0.02	0.01	0.04	0.16	0.16	0.03
	$G^{**}_{(+30/1)}$	N/mm ²	0.02	0.07	0.03	0.14	0.30	0.07	0.09
Verhalten bei tiefen Temperaturen	$G^{**}_{(-5/1)}$	N/mm ²	0.4	9.3	2.0	5.5	24	24	9
	$G^{**}_{(-10/1)}$	N/mm ²	0.7	19	4.0	9.0	44	13	19
	$G^{**}_{(-10/8)}$	N/mm ²	1.7	37.5	5.8	18.6	91	26	36
	$\phi_{(-5/0.125)}$	Winkelgrad	24	38	40	24	31	37	34

Tabelle 8.1.5: Dynamische Kennwerte der Fugenvergussmassen FM1 ... FM7 im Anlieferungszustand bei tiefen und erhöhten Temperaturen.

$\phi_{(+30/0.125)}$ Phasenverschiebung bei +30°C und 0.125Hz

$G^{**}_{(-5/1)}$, Komplexer Schubmodul bei -5°C und 1Hz

Dynamische Kennwerte mittels Dynamic Shear Rheometer (DSR)

Die dynamischen Kennwerte der Fugenvergussmassen FM1 ... FM7 wurden auch mittels DSR untersucht. Die detaillierten Resultate, inklusive grafische Darstellungen, sind in Anhang 12.1 ersichtlich. Die Schubmodule G^* sind in Funktion der Prüftemperaturen bei einer

Frequenz von 1.5Hz in *Abbildung 8.1.4* grafisch dargestellt. Aufgrund dieser Grafiken können die Eigenschaften der sieben Fugenvergussmassen wie folgt beschrieben werden:

- In der Kälte (bei 10°C) gilt für die Steifigkeit der untersuchten Fugenvergussmassen: $FM5 > FM4 \approx FM7 \approx FM2 > FM6 > FM3 > FM1$. Eine hohe Steifigkeit in der Kälte kann das Verhalten der Fugenvergussmassen negativ beeinflussen, da sie oft auf ein sprödes Verhalten und damit auf ein erhöhtes Risiko zur Rissbildung und Flankenablösung hindeutet.
- Mit der Temperatursteigerung nehmen die Schubmodule G^* der sieben Fugenvergussmassen unterschiedlich ab. Je kleiner der Schubmodul in der Wärme wird, desto weicher wird das Material. Bei Fugenvergussmassen ist es wichtig, dass diese im Sommer bei einer Materialtemperatur oberhalb 60°C standfest bleiben und nicht so weich werden, dass sie unter dem Eigengewicht von der Fuge wegfließen können. Durch Erwärmung oberhalb 40°C findet bei FM1 und FM7 verglichen mit den anderen Fugenvergussmassen der geringste Steifigkeitsverlust statt. Die Steifigkeit der untersuchten FM in der Wärme (bei ca. 60°C) kann wie folgt eingestuft werden: $FM7 > FM5 > FM1 \approx FM4 > FM6 > FM2 > FM3$.

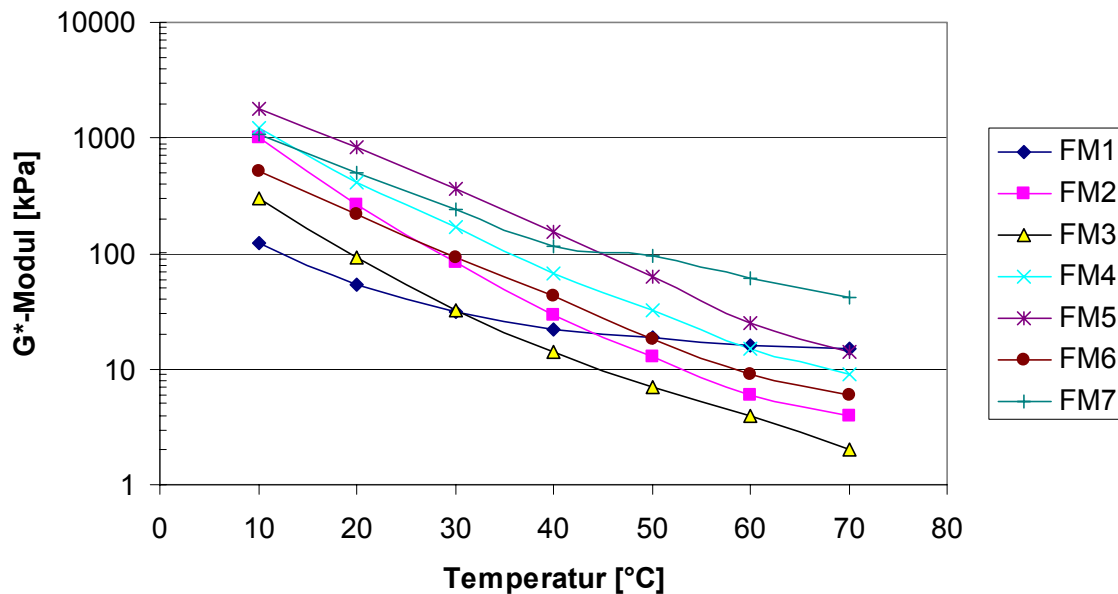


Abbildung 8.1.4: Schubmodule G^* von FM1 ... FM7 bei 1.5Hz im Anlieferungszustand in Funktion der Temperatur. Untersuchung mittels DSR.

In *Abbildung 8.1.5* sind die Masterkurven der sieben Fugenvergussmassen dargestellt. Gemäss Beurteilungsprinzip in *Abbildung 4.2.6* ist zu erwarten, dass FM1 die besten Eigenschaften sowohl in der Wärme als auch in der Kälte besitzt (tiefe Module bei hoher Frequenz bzw. tiefer Temperatur und relativ hohe Module bei hoher Temperatur bzw. tiefer Frequenz).

In allen untersuchten Temperatur- und Frequenzbereichen verhielt sich FM5 am steifsten. Dies könnte auf den kleinen Polymergehalt (ca. 3.6 GPC-Flächen-%) in der FM5 zurückzuführen sein.

Der Versteifigkeitsverlauf von FM7 und FM4 sowie von FM2 und FM6 im Anlieferungszustand ist praktisch identisch.

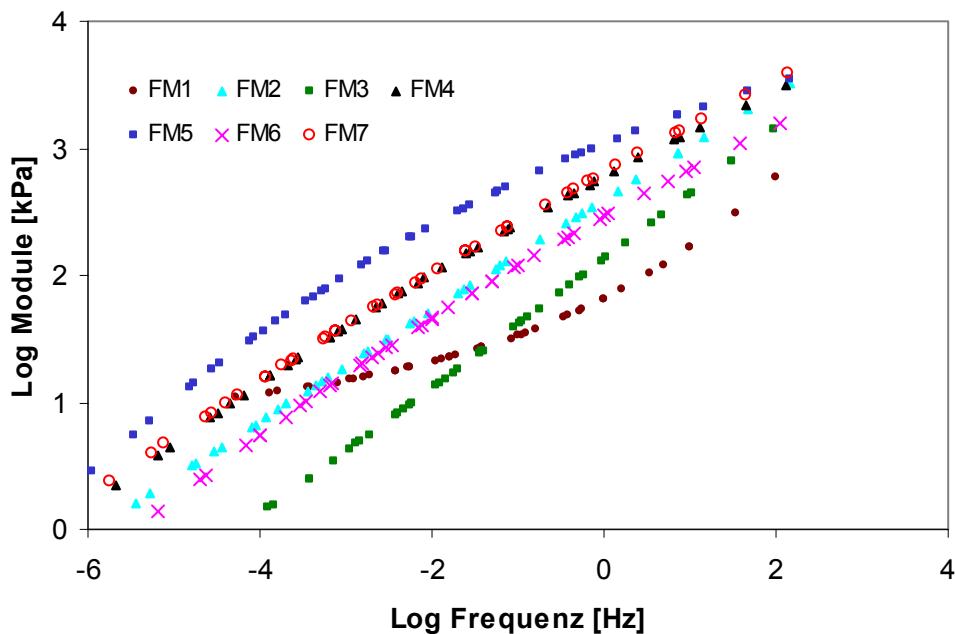


Abbildung 8.1.5: Untersuchung mittels DSR. Masterkurven von FM1 ... FM7 im Anlieferungszustand berechnet gemäss WLF-Gleichung in Kap. 4.2.3

Beziehung zwischen (Ko-Axial Schubtest) KAST und (Dynamic Shear Rheometer) DSR

Mit beiden Prüfmethoden KAST und DSR können die mechanischen Eigenschaften, wie komplexe Module etc. von bituminösen Bindemittel bestimmt werden. Das Prüfprinzip der beiden Methoden unterscheidet sich sehr stark. Die Methode DSR erlaubt, die mechanischen Eigenschaften mit sehr wenig Probenmaterial (ca. 5g) zu untersuchen. Für die Methode KAST ist eine Probe von mindestens 200g notwendig. Der Vorteil vom KAST-Verfahren liegt darin, dass grobe Anteile in der untersuchten Fugenvergussmasse, wie Gummigranulat, wegen des grossen Messspalts die Ergebnisse nicht verfälschen.

Fast bei allen untersuchten Fugenvergussmassen waren die Modulwerte aus beiden Methoden im Bereich der $\text{Log } f_R = -2 \dots +1$ [Hz] praktisch deckungsgleich (siehe Abbildungen 8.1.6 ... 8.1.11). Bei manchen ist der Bereich der Übereinstimmung sogar grösser. Im Extremfall von FM2 besteht eine Übereinstimmung bei $\text{Log } f_R = -4 \dots +2$ Hz (Abbildung 8.1.7). Eine Ausnahme bildet die FM7 (Abbildung 8.1.12), indem fast alle Module mit DSR grösser waren als diejenigen mit KAST. Dies könnte auf den Einfluss des groben Gummigranulats in FM7 zurückzuführen sein.

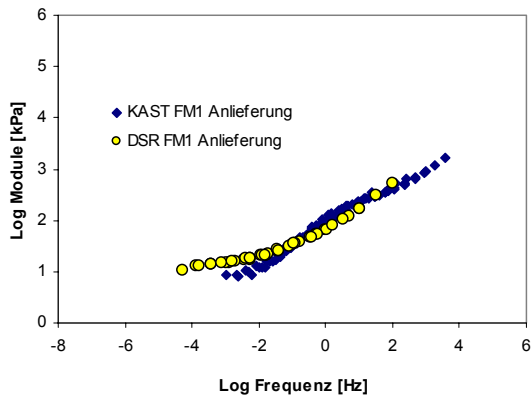


Abbildung 8.1.6:

FM1. Masterkurven aus KAST und DSR (Ref.temperatur 15°C)

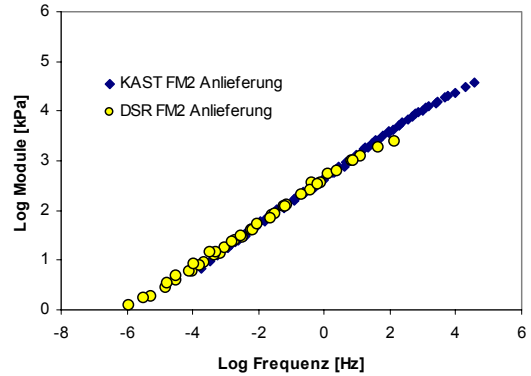


Abbildung 8.1.7:

FM2. Masterkurven aus KAST und DSR (Ref.temperatur 15°C)

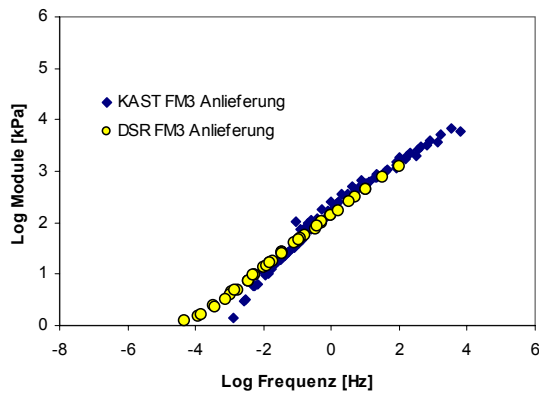


Abbildung 8.1.8:

FM3. Masterkurven aus KAST und DSR (Ref.temperatur 15°C)

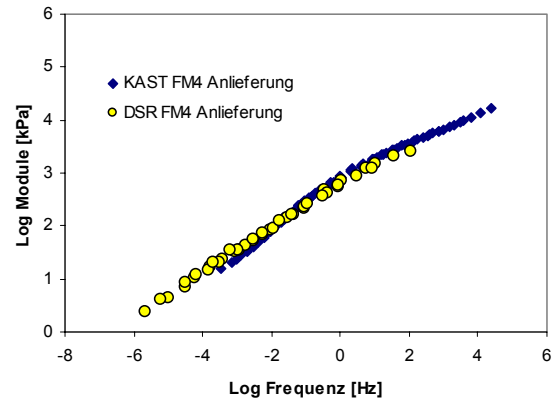


Abbildung 8.1.9:

FM4. Masterkurven aus KAST und DSR (Ref.temperatur 15°C)

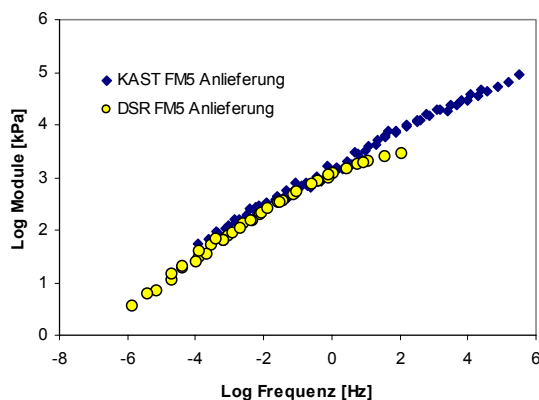


Abbildung 8.1.10:

FM5. Masterkurven aus KAST und DSR (Ref.temperatur 15°C)

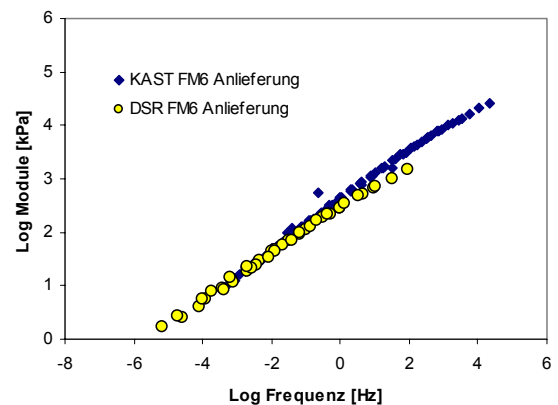


Abbildung 8.1.11:

FM6. Masterkurven aus KAST und DSR (Ref.temperatur 15°C)

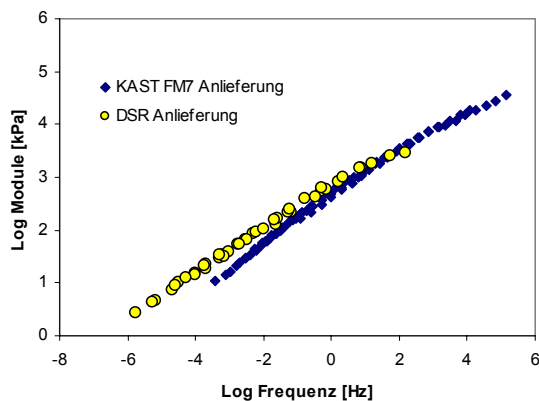


Abbildung 8.1.12:

FM7. Masterkurven aus KAST und DSR
(Ref.temperatur 15°C)

8.2 Zustandsänderung durch den Einbau

8.2.1 Fugenvergussmasse FM1

Normierte Prüfungen:

Die Ergebnisse der normierten Prüfungen der Proben im Anlieferungszustand, nach Einbau-Beginn und -Ende sowie nach RTFOT (*Tabelle 4.1*, Abschnitt 4.1) bei 180°C sind in *Tabelle 8.2.1* zusammengefasst und in den *Abbildungen 8.2.1* bis *8.2.3* grafisch dargestellt.

Durch den Einbau nahm die Pen_{Nadel} um etwa $6 \cdot 10^{-1}$ mm ab. Hingegen wurde kein Unterschied zwischen der Pen_{Nadel} der Probe im Anlieferungszustand und nach RTFOT bei 180°C festgestellt. Durch den Einbau nahm die Pen_{Konus} um etwa $8 \cdot 10^{-1}$ mm und nach RTFOT um etwa $2 \cdot 10^{-1}$ mm ab. Der Trend der Änderung der Penetration war bei beiden Methoden etwa gleich.

Durch den Einbau nahm der Ep RuK um etwa 10°C und nach RTFOT etwa um 14°C ab.

Aufgrund der Prüfung der Fließlänge veränderte sich die Standfestigkeit der FM1 in der Wärme (bei 60°C) nach dem Einbau nicht. In der Kälte bei -20°C wurde FM1 nach dem Einbau aufgrund der Kugelfall-Prüfung ein wenig spröde, erfüllte aber trotzdem noch die Anforderung der Prüfung.

Prüfungen	Einheit	Anlieferung	Einbau-Beginn	Einbau-Ende	RTFOT (180°C)
Penetration (Nadel), 25°C; Pen _{Nadel}	10 ⁻¹ mm	85	78	79	85
Penetration (Konus), 25°C; Pen _{Konus}	10 ⁻¹ mm	80	72	71	78
Erweichungspunkt Ep RuK	°C	113	103	103	99
Fließlänge	mm	0	0	0	---
Kugelfallprobe	keine	alle 4 PK intakt	3 von 4 PK intakt	3 von 4 PK intakt	---

Tabelle 8.2.1: Ergebnisse der normierten Prüfungen von FM1 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und RTFOT (180°C)

--- nicht ausgeführt PK Prüfkörper

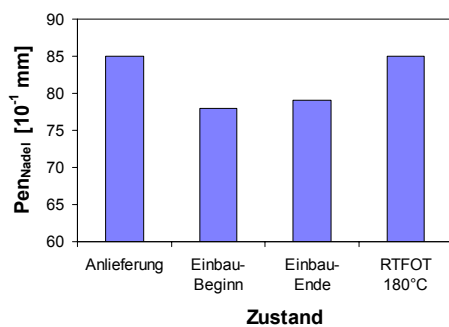


Abbildung 8.2.1:

Ergebnisse der Pen_{Nadel} von FM1 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

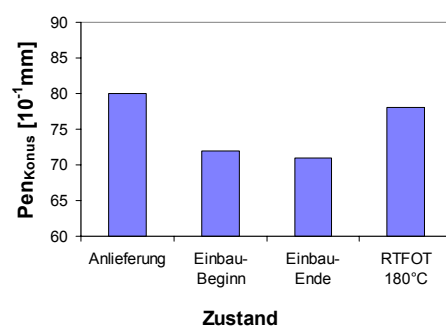


Abbildung 8.2.2:

Ergebnisse der Pen_{Konus} von FM1 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

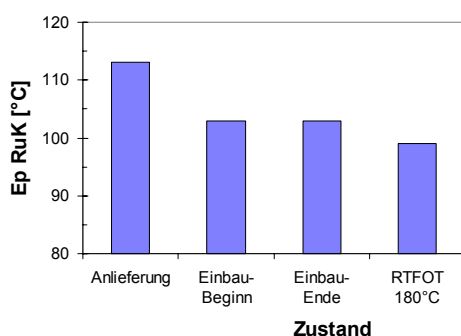


Abbildung 8.2.3:

Ep RuK von FM1 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

Nicht normierte Prüfungen:

Gelpermeationschromatografie (GPC)

Die Polymerkomponenten von FM1 waren gegenüber thermischer Beanspruchung sehr empfindlich. Sowohl bei Einbau-Beginn als auch bei Einbau-Ende wurden gemäss GPC-Untersuchung etwa 74% der Polymere zersetzt. Die Auswirkung der Alterung im RTFOT bei 180°C war mit einem Polymerabbau von etwa 64% weniger stark als beim Einbau (*Tabelle 8.2.2* und *Abbildung 8.2.4*). Vom beobachteten Ausmass des Polymerabbaus war zu erwarten, dass FM1 in der Praxis auf der Versuchsstrecke verspröden würde.

Gegenüber der GPC-Untersuchung wiesen die Werte der Penetrationen nicht darauf hin, dass die Polymere massiv abgebaut werden. Auch zwischen dem Polymerabbau und den Ep RuK Werten gab es keine Zusammenhänge.

Status	Polymergehalt in FM1 bezüglich Anlieferung
Anlieferung	100%
Einbau-Beginn	26%
Einbau-Ende	26%
RTFOT 180°C	36%

Tabelle 8.2.2: Ergebnisse der Gelpermeationschromatografie an FM1

Polymergehalt bezogen auf den Anlieferungszustand = $P_E \cdot 100 / P_A$
 P_E Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe nach dem Einbau bzw. nach RTFOT
 P_A Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe im Anlieferungszustand

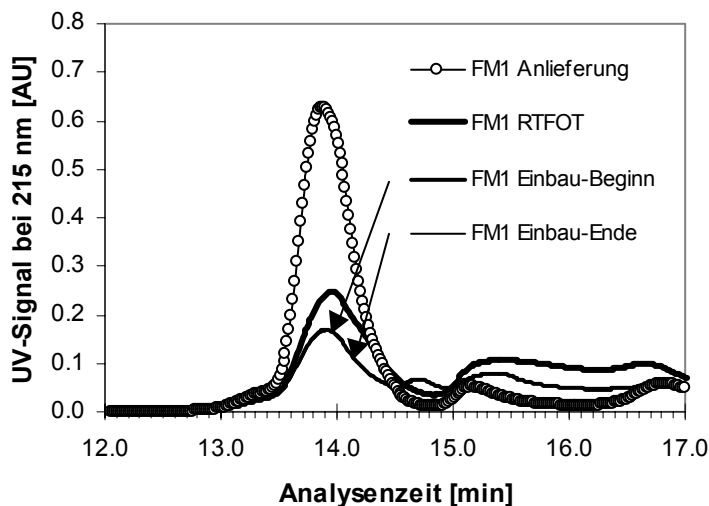


Abbildung 8.2.4: GPC-Chromatogramm-Ausschnitte von FM1 im Anlieferungszustand, nach dem Einbau und nach RTFOT bei 180°C

Dynamische Kennwerte mittels DSR

Die DSR Masterkurven von FM1 im Anlieferungszustand, nach Einbau-Ende und nach Laboralterung (RTFOT bei 180°C) sind in *Abbildung 8.2.5* zusammengestellt. Es bestätigt

sich, dass sich die Eigenschaften der FM1 durch Einbau und Laboralterung (RTFOT bei 180°C) stark verändern. Bei tiefen Frequenzen und hohen Temperaturen ergaben sich etwa 5-fach kleinere Schubmodule. Das bedeutet, dass die eingebaute FM1 in der Wärme infolge Einbau bzw. Laboralterung weicher geworden ist. In der Kälte bzw. bei hoher Frequenz ist die FM1 dagegen härter geworden. Bemerkenswert ist insbesondere, dass sich durch die Alterung die Charakteristik der Masterkurven ändert. Während im Anlieferungszustand im Hochtemperaturbereich, d.h. bei tiefen Frequenzen der Modul relativ wenig variiert, wird die Frequenz- bzw. Temperaturabhängigkeit nach der Alterung bedeutend ausgeprägter. Dies deutet auf den Verlust der stabilisierenden Wirkung des Polymers und auf eine Zersetzung der Polymerstruktur hin. Die Verhärtung der FM1 durch den Einbau war viel höher als diejenige nach der Laboralterung mit RTFOT bei 180°C.

Abbildung 8.2.5 demonstriert die Wichtigkeit, das Verhalten über ein breites Frequenz- bzw. Temperaturspektrum zu beurteilen. Würde man beispielsweise nur die Modulwerte bei $\log f = -2 \pm 0.5$ Hz betrachten, würden sich bei der Bewertung von FM1 bezüglich Alterung kaum Unterschiede ergeben.

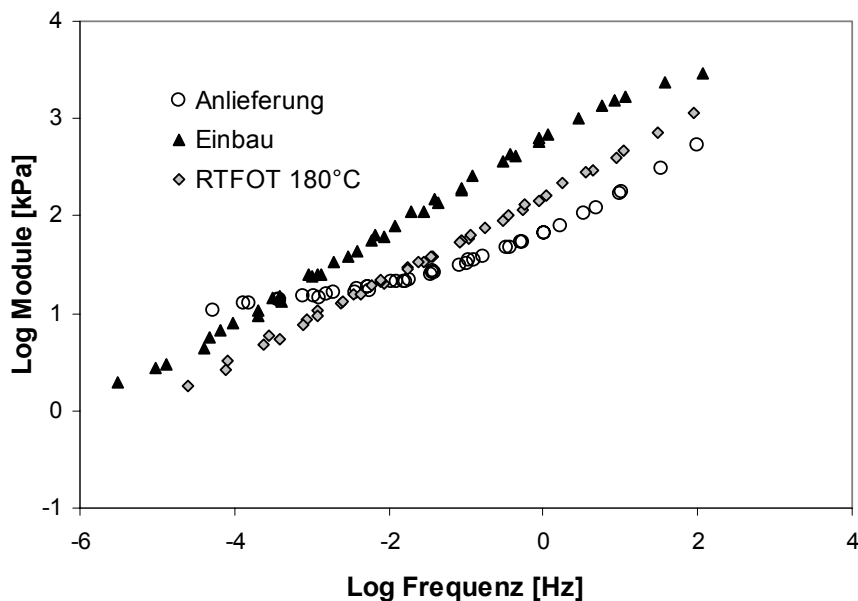


Abbildung 8.2.5: DSR-WLF-Masterkurven von FM1 bei Anlieferung, Einbau-Ende und nach RTFOT bei 180°C. Referenztemperatur: 15°C

8.2.2 Fugenvergussmasse FM2

Normierte Prüfungen:

Die Ergebnisse der normierten Prüfungen der Proben im Anlieferungszustand, nach Einbau-Beginn und -Ende sowie nach RTFOT bei 180°C sind in *Tabelle 8.2.3* zusammengefasst und in den *Abbildungen 8.2.6 bis 8.2.8* grafisch dargestellt.

Durch den Einbau nahm sowohl die Pen_{Nadel} als auch Pen_{Konus} sehr stark zu (ca. $33 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Nadel} und ca. $32 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Konus}). Hingegen nahmen bei beiden Arten der Penetration die Werte nach der thermischen Alterung mit RTFOT bei 180°C ab (um $5 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Nadel} und um $9 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Konus}). Der Trend der Änderung der Penetration war bei beiden Methoden etwa gleich.

Durch den Einbau nahm der Ep RuK um etwa 22°C und nach RTFOT etwa um 4°C ab.

Die Prüfung der Fließlänge ergab eine Zunahme der Fließlänge von 16mm (bei Einbau-Beginn) und 13mm (bei Einbau-Ende).

In der Kälte bei -20°C wurde FM2 nach dem Einbau-Beginn aufgrund der Kugelfall-Prüfung sehr spröde und erfüllte die Anforderung dieser Prüfung nicht mehr. Hingegen wurde keine Veränderung der Sprödigkeit in der Kälte der Probe nach dem Einbau-Ende festgestellt.

Prüfungen	Einheit	Anlieferung	Einbau-Beginn	Einbau-Ende	RTFOT (180°C)
Penetration (Nadel), 25°C; Pen _{Nadel}	10 ⁻¹ mm	60	92	94	55
Penetration (Konus), 25°C; Pen _{Konus}	10 ⁻¹ mm	52	86	82	43
Erweichungspunkt RuK	°C	92	71	68	88
Fließlänge	mm	0	16	13	---
Kugelfallprobe	keine	alle 4 PK intakt	alle 4 PK zersprungen	alle 4 PK intakt	---

Tabelle 8.2.3: Ergebnisse der normierten Prüfungen von FM2 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und RTFOT (180°C)

--- nicht ausgeführt
PK Prüfkörper

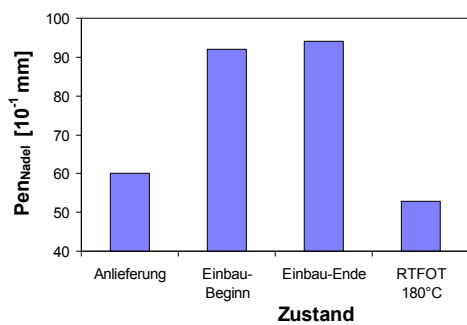


Abbildung 8.2.6:

Ergebnisse der Pen_{Nadel} von FM2 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

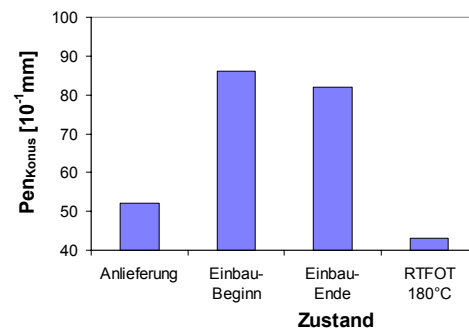


Abbildung 8.2.7:

Ergebnisse der Pen_{Konus} von FM2 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

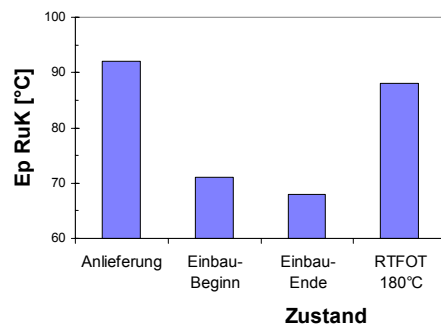


Abbildung 8.2.8:

Ep RuK von FM1 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

Nicht normierte Prüfungen:

Gelpermeationschromatografie (GPC)

Sowohl bei Einbau-Beginn als auch bei Einbau-Ende wurden etwa 63% der Polymere zersetzt. Dies ist auf die Einbautemperatur bis 192°C zurückzuführen. Die Auswirkung der Alterung durch RTFOT bei 180°C war mit einem Polymerabbau von etwa 42% weniger stark als beim Einbau (Tabelle 8.2.4 und Abbildung 8.2.9). Eine Zersetzung der Polymere in der Tränkmass von ca. 40% nach RTFOT bei 180°C kann als normal betrachtet werden.

Status	Polymergehalt in FM2 bezüglich Anlieferung
Anlieferung	100%
Einbau-Beginn	37%
Einbau-Ende	38%
RTFOT 180°C	58%

Tabelle 8.2.4: Ergebnisse der Gelpermeationschromatografie an FM2

Polymergehalt bezogen auf den Anlieferungszustand = $P_E \cdot 100 / P_A$
 P_E Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe nach dem Einbau bzw. nach RTFOT
 P_A Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe im Anlieferungszustand

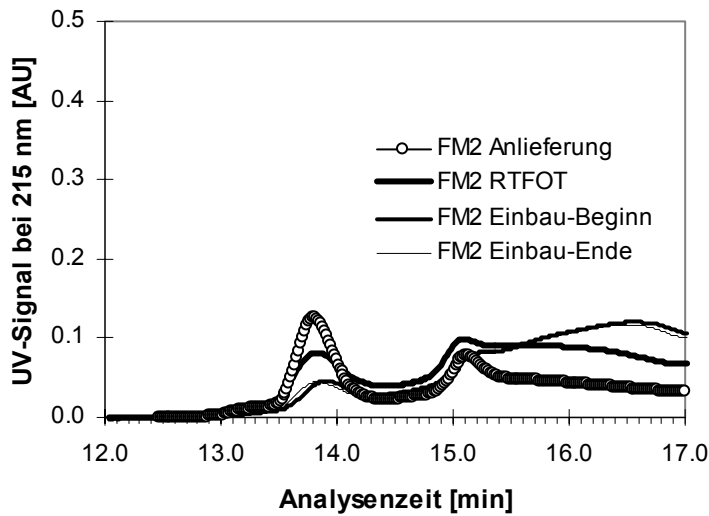


Abbildung 8.2.9: GPC-Chromatogramm-Ausschnitte von FM2 im Anlieferungszustand, nach dem Einbau und nach RTFOT bei 180°C

Dynamische Kennwerte mittels DSR

Die DSR Masterkurven von FM2 im Anlieferungszustand, nach Einbau-Ende und nach Laboralterung (RTFOT bei 180°C) sind in *Abbildung 8.2.10* zusammengestellt. Im Gegensatz zu FM1 ändert sich jedoch die Kurvencharakteristik nach der Laboralterung RTFOT bei 180°C kaum. Hingegen nehmen die Module nach dem Einbau bei zunehmenden Temperaturen bzw. tieferen Frequenzen im Bereich von $\text{Log } f \leq 0$ Hz stark ab. Dies deutet auf den Verlust der stabilisierenden Wirkung bzw. eine Zersetzung des Polymers durch den Einbau hin.

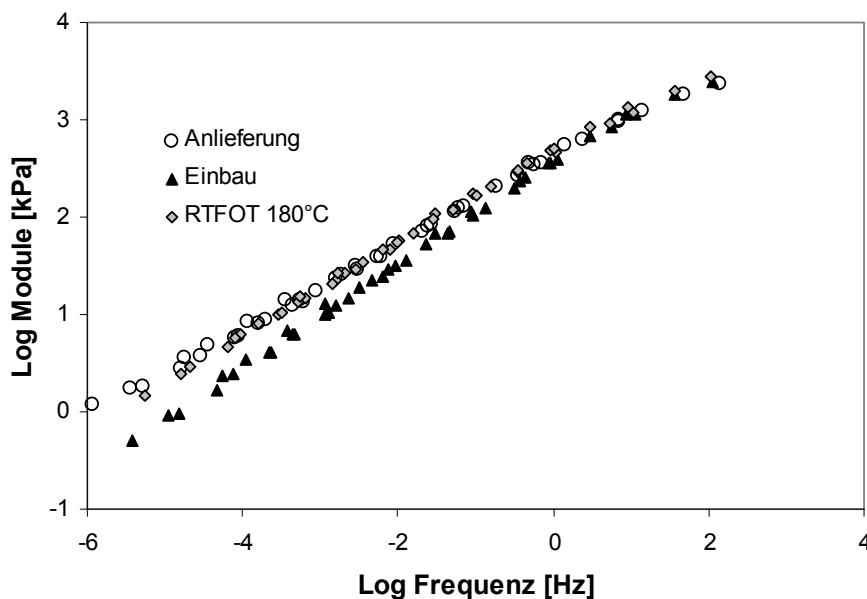


Abbildung 8.2.10: DSR-WLF-Masterkurven von FM2 bei Anlieferung, Einbau-Ende und nach RTFOT bei 180°C. Referenztemperatur: 15°C

8.2.3 Fugenvergussmasse FM3

Normierte Prüfungen:

Die Ergebnisse der normierten Prüfungen der Proben im Anlieferungszustand, nach Einbau-Beginn und -Ende sowie nach RTFOT bei 180°C sind in *Tabelle 8.2.5* zusammengefasst und in den *Abbildungen 8.2.11 bis 8.2.13* grafisch dargestellt.

Durch den Einbau nahmen die Penetrationen der FM3 ab: etwa um $20 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Nadel} und etwa um $12 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Konus} . Hingegen nahmen die Penetrationswerte bei der Probe nach RTFOT bei 180°C zu: etwa um $29 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Nadel} und etwa um $36 \cdot 10^{-1}$ mm. Der Trend der Änderung der Penetration war bei beiden Methoden etwa gleich.

Es war keine deutliche Änderung des Ep RuK der FM3 durch den Einbau und durch die thermische Alterung mit RTFOT bei 180°C festzustellen.

Aufgrund der Prüfung der Fließlänge veränderte sich Standfestigkeit der FM3 in der Wärme (bei 60°C) nach dem Einbau nicht. Auch blieb die elastische Eigenschaft in der Kälte bei -20°C aufgrund der Kugelfall-Prüfung erhalten.

Prüfungen	Einheit	Anlieferung	Einbau-Beginn	Einbau-Ende	RTFOT (180°C)
Penetration (Nadel), 25°C; Pen_{Nadel}	10^{-1} mm	102	82	80	131
Penetration (Konus), 25°C; Pen_{Konus}	10^{-1} mm	83	72	69	119
Erweichungspunkt Ep RuK	°C	90	92	92	89
Fließlänge	mm	<1	<1	<1	---
Kugelfallprobe	keine	alle 4 PK intakt	alle 4 PK intakt	alle 4 PK intakt	---

Tabelle 8.2.5: Ergebnisse der normierten Prüfungen von FM3 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und RTFOT (180°C)

--- nicht ausgeführt
PK Prüfkörper

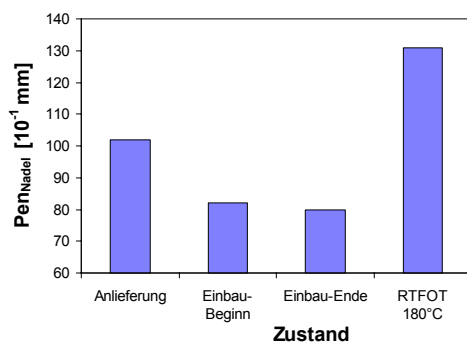


Abbildung 8.2.11:

Ergebnisse der Pen_{Nadel} von FM3 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

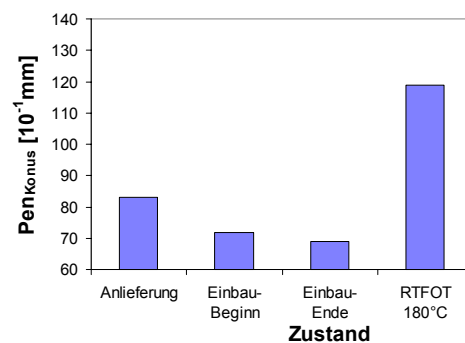


Abbildung 8.2.12:

Ergebnisse der Pen_{Konus} von FM3 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

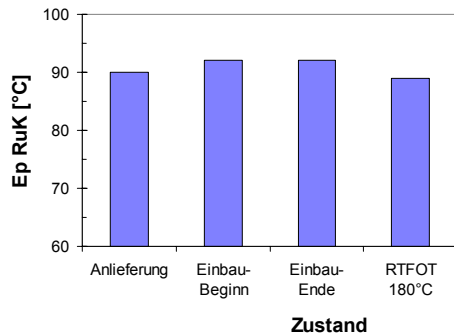


Abbildung 8.2.13:

Ep RuK von FM3 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

Nicht normierte Prüfungen:

Gelpermeationschromatografie (GPC)

Die Polymerkomponenten von FM3 waren gegenüber thermischer Beanspruchung sehr stabil. Sowohl bei Einbau-Beginn als auch bei Einbau-Ende wurden gemäss GPC-Untersuchung nur etwa 23% der Polymere zersetzt. Nach der Alterung durch RTFOT bei 180°C wurden die Polymere nur etwa um 17% abgebaut (*Tabelle 8.2.6* und *Abbildung 8.2.14*). Der Widerstand der FM3 gegenüber der thermischen und oxidativen Beanspruchung kann als sehr gut bezeichnet werden.

Auch zwischen dem Polymerabbau und den Werten der Ep RuK Werten gab es keine Zusammenhänge.

Status	Polymergehalt in FM3 bezüglich Anlieferung
Anlieferung	100%
Einbau-Beginn	77%
Einbau-Ende	77%
RTFOT 180°C	83%

Tabelle 8.2.6: Ergebnisse der Gelpermeationschromatografie an FM3

Polymergehalt bezogen auf den Anlieferungszustand = $P_E \cdot 100 / P_A$
 P_E Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe nach dem Einbau bzw. nach RTFOT
 P_A Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe im Anlieferungszustand

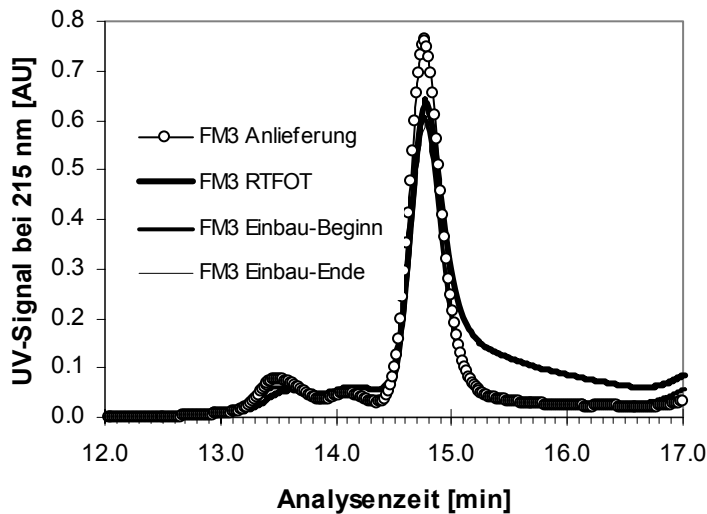


Abbildung 8.2.14: GPC-Chromatogramm-Ausschnitte von FM3 im Anlieferungszustand, nach dem Einbau und nach RTFOT bei 180°C

Dynamische Kennwerte mittels DSR

Die DSR Masterkurven von FM3 im Anlieferungszustand, nach Einbau-Ende und nach Laboralterung (RTFOT bei 180°C) sind in *Abbildung 8.2.15* zusammengestellt. Verglichen mit den anderen Kurven sind die Modulwerte nach dem Einbau nahezu parallel nach oben verschoben. Dies wurde durch eine Versteifung der Fugenvergussmasse bei allen Temperatur- und Frequenzbereichen verursacht.

Zwischen den Modulwerten im Anlieferungszustand und nach der Alterung mit RTFOT bei 180°C wurde kein bedeutender Unterschied festgestellt. Die Alterung mit RTFOT muss daher verglichen mit der Alterung während des Einbaus im Falle von FM3 als wenig effizient bezeichnet werden.

Es ist unklar, warum FM3 nach dem Einbau viel höhere Module als nach RTFOT aufwies, da der Unterschied im Polymerabbau gemäss *Abbildung 8.4.14* sowohl beim Einbau als auch durch RTFOT gering ist.

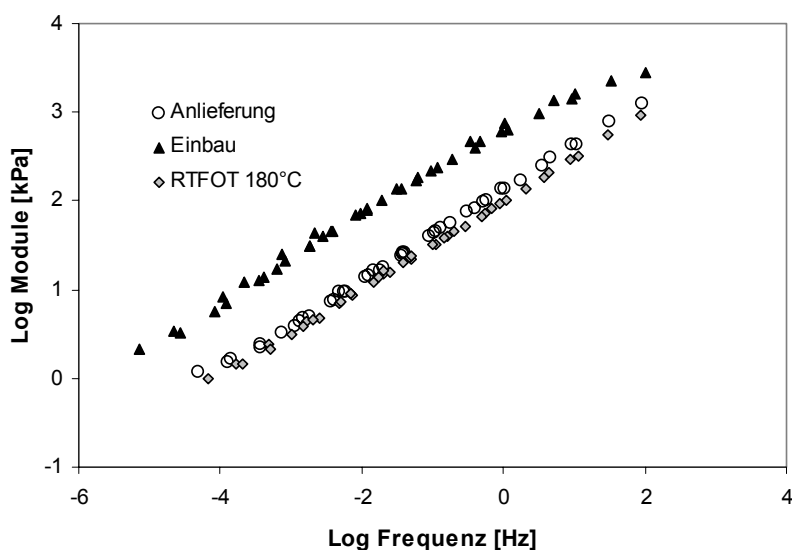


Abbildung 8.2.15: DSR-WLF-Masterkurven von FM3 bei Anlieferung, Einbau-Ende und nach RTFOT bei 180°C. Referenztemperatur: 15°C

8.2.4 Fugenvergussmasse FM4

Normierte Prüfungen:

Die Ergebnisse der normierten Prüfungen der Proben im Anlieferungszustand, nach Einbau-Beginn und -Ende sowie nach RTFOT bei 180°C sind in *Tabelle 8.2.7* zusammengefasst und in den *Abbildungen 8.2.16* bis *8.2.18* grafisch dargestellt.

Die Penetrationen bei Einbau-Beginn nahmen leicht zu (etwa um $4 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Nadel} und etwa um $5 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Konus}). Etwa gleich blieben die beiden Penetrationen bei der Probe nach dem Einbau-Ende. Hingegen nahmen die Penetrationen nach RTFOT bei 180°C leicht ab (etwa um $5 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Nadel} und etwa um $5 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Konus}). Der Trend der Änderung der Penetration war bei beiden Methoden etwa gleich.

Bei Einbau-Beginn lag der Ep RuK etwa um 20°C und nach dem Einbau-Ende sowie nach RTFOT bei 180°C etwa um 10°C unter dem Wert im Anlieferungszustand.

Aufgrund der Prüfung der Fließlänge wurde die FM4 nach dem Einbau-Beginn weniger standfest. Hingegen blieb die Standfestigkeit in der Wärme (bei 60°C) der Probe nach dem Einbau-Ende unverändert.

In der Kälte bei -20°C wurde die FM4 nach dem Einbau aufgrund der Kugelfall-Prüfung sehr spröde, so dass sie die Anforderung der Prüfung nicht mehr erfüllte.

Prüfungen	Einheit	Anlieferung	Einbau-Beginn	Einbau-Ende	RTFOT (180°C)
Penetration (Nadel), 25°C; Pen_{Nadel}	10^{-1} mm	60	64	61	55
Penetration (Konus), 25°C; Pen_{Konus}	10^{-1} mm	53	58	53	49
Erweichungspunkt Ep RuK	°C	105	85	95	94
Fließlänge	mm	<1	4	<1	---
Kugelfallprobe	keine	alle 4 PK intakt	alle 4 PK zersprungen	alle 4 PK zersprungen	---

Tabelle 8.2.7: Ergebnisse der normierten Prüfungen von FM4 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und RTFOT (180°C)

--- nicht ausgeführt

PK Prüfkörper

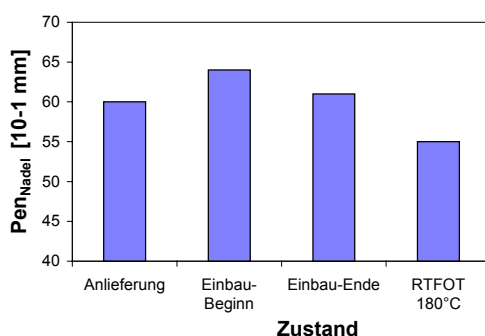


Abbildung 8.2.16:

Ergebnisse der Pen_{Nadel} von FM4 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

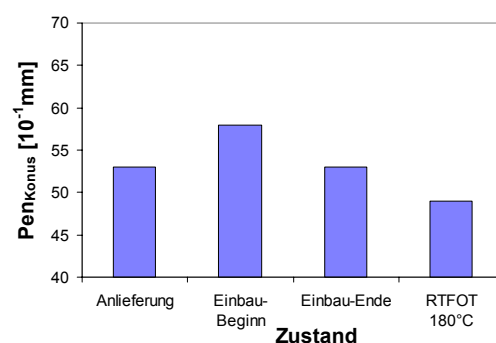


Abbildung 8.2.17:

Ergebnisse der Pen_{Konus} von FM4 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

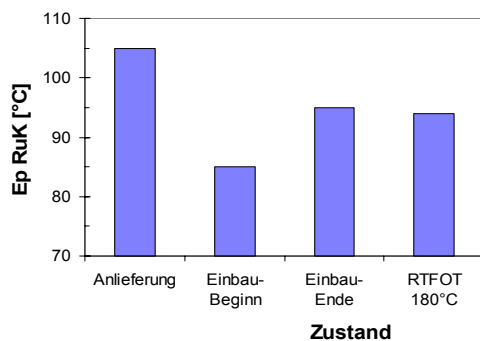


Abbildung 8.2.18:

Ep RuK von FM4 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

Nicht normierte Prüfungen:

Gelpermeationschromatografie (GPC)

Durch die Überhitzung beim Einbau (Einbautemperatur 210 ... 285°C, siehe *Tabelle* 6.3.1 im Kap. 6.3) wurden die Polymerkomponenten von FM4 sehr stark abgebaut. Nur noch 17% des ursprünglichen Polymers bei Einbau-Beginn und ca. 39% nach Einbau-Ende blieben erhalten. Durch die Alterung mit RTFOT bei 180°C wurden die Polymere nur etwa um 39% zersetzt (*Tabelle* 8.2.8 und *Abbildung* 8.2.19).

Status	Polymergehalt in FM4 bezüglich Anlieferung
Anlieferung	100%
Einbau-Beginn	17%
Einbau-Ende	39%
RTFOT 180°C	61%

Tabelle 8.2.8: Ergebnisse der Gelpermeationschromatografie an FM4

Polymergehalt bezogen auf den Anlieferungszustand = $P_E \cdot 100 / P_A$

P_E Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe nach dem Einbau bzw. nach RTFOT

P_A Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe im Anlieferungszustand

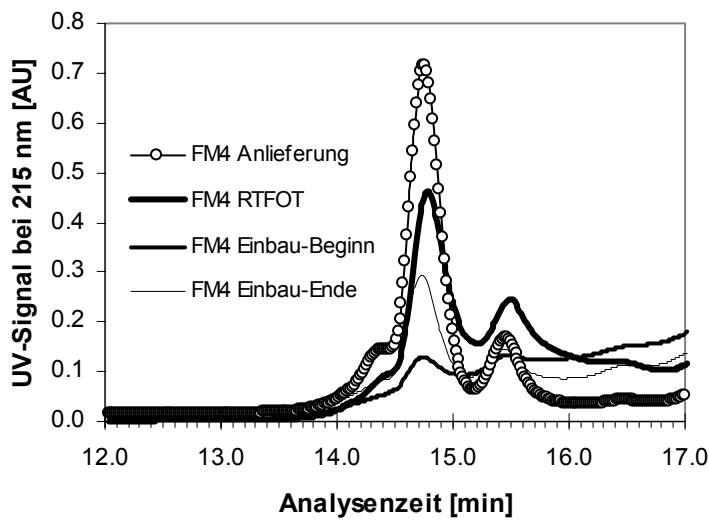


Abbildung 8.2.19: GPC-Chromatogramm-Ausschnitte von FM4 im Anlieferungszustand, nach dem Einbau und nach RTFOT bei 180°C

Dynamische Kennwerte mittels DSR

Die DSR Masterkurven von FM4 im Anlieferungszustand, nach Einbau-Ende und nach Laboralterung (RTFOT bei 180°C) sind in *Abbildung 8.2.20* zusammengestellt.

Die DSR Masterkurven im Bereich $\log f \leq 1$ Hz zeigen eine Abnahme der Module der Proben nach dem Einbau und nach RTFOT. Das Verhalten nach RTFOT und nach dem Einbau ist trotz grossen Unterschieds im Polymergehalt nach der Zersetzung etwa gleich. Die Tatsache, dass die Masterkurven im Hochfrequenzbereich bzw. bei tiefen Temperaturen infolge Alterung nur wenig beeinflusst werden, während sich bei der Kugelfallprobe starke Unterschiede zeigen, belegt, dass die Steifigkeit alleine nur bedingte Aussagen über das Bruchverhalten ermöglicht.

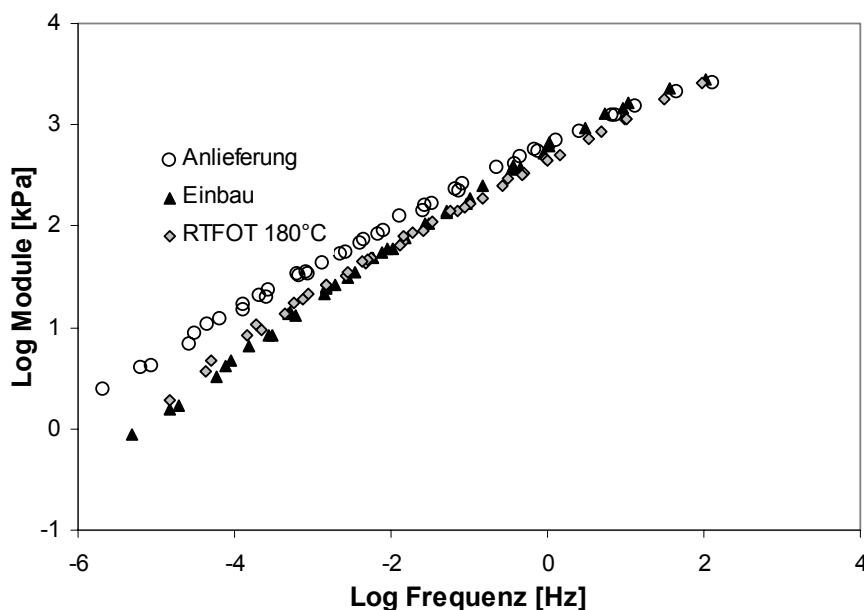


Abbildung 8.2.20: DSR-WLF-Masterkurven von FM4 bei Anlieferung, Einbau-Ende und nach RTFOT bei 180°C. Referenztemperatur: 15°C

8.2.5 Fugenvergussmasse FM5

Normierte Prüfungen:

Die Ergebnisse der normierten Prüfungen der Proben im Anlieferungszustand, nach Einbau-Beginn und -Ende sowie nach RTFOT bei 180°C sind in *Tabelle 8.2.9* zusammengefasst und in den *Abbildungen 8.2.21 bis 8.2.23* grafisch dargestellt.

Durch den Einbau nahmen die Penetrationen ganz leicht zu (um $3 \cdot 10^{-1}$ mm sowohl bei Pen_{Nadel} als auch bei Pen_{Konus}). Hingegen wurde eine Abnahme der Penetrationen nach RTFOT bei 180°C festgestellt. Der Trend der Änderung der Penetration der beiden Methoden Nadel und Konus war etwa gleich: eine Reduktion der Penetration um $7 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Nadel} und um $6 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Konus} .

Die Werte des Ep RuK nach dem Einbau sowie nach RTFOT blieben praktisch gleich.

Auch die Standfestigkeit in der Wärme und die Elastizität in der Kälte (bei -20°C) blieb nach dem Einbau und der Alterung mit RTFOT unverändert.

Prüfungen	Einheit	Anlieferung	Einbau-Beginn	Einbau-Ende	RTFOT (180°C)
Penetration (Nadel), 25°C; Pen_{Nadel}	10^{-1} mm	38	41	41	31
Penetration (Konus), 25°C; Pen_{Konus}	10^{-1} mm	24	27	27	18
Erweichungspunkt Ep RuK	°C	100	99	99	101
Fliesslänge	mm	<1	<1	<1	---
Kugelfallprobe	keine	alle 4 PK intakt	alle 4 PK intakt	alle 4 PK intakt	---

Tabelle 8.2.9: Ergebnisse der normierten Prüfungen von FM5 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und RTFOT (180°C)
 --- nicht ausgeführt PK Prüfkörper

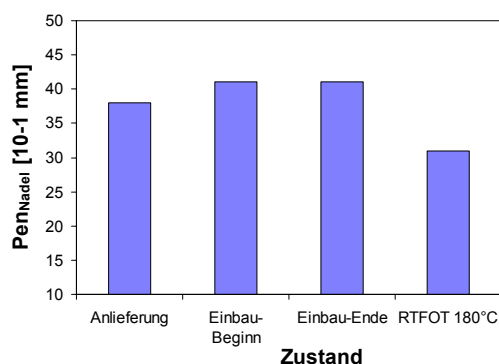


Abbildung 8.2.21:

Ergebnisse der Pen_{Nadel} von FM5 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

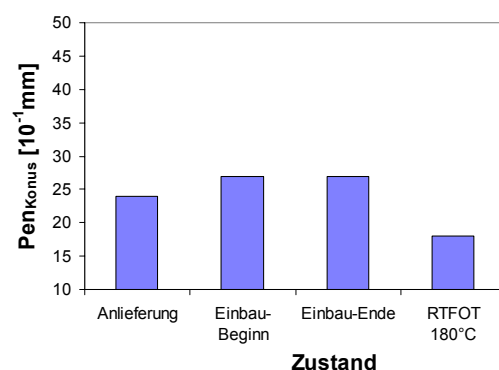


Abbildung 8.2.22:

Ergebnisse der Pen_{Konus} von FM5 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

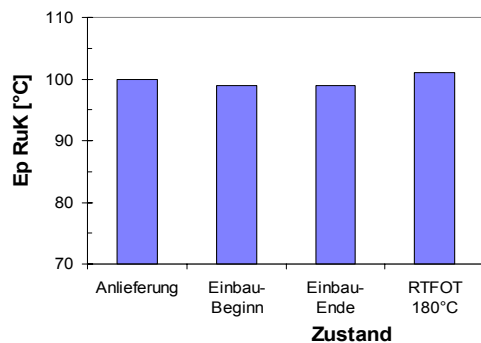


Abbildung 8.2.23:

Ep RuK von FM5 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

Nicht normierte Prüfungen:

Gelpermeationschromatografie (GPC)

Die Polymerkomponenten von FM5 wurden durch den Einbau um 23% nach Einbau-Beginn und nur um 13% nach Einbau-Ende zersetzt. Durch die Alterung mit RTFOT bei 180°C wurden die Polymere ca. um 41% abgebaut (Tabelle 8.2.10 und Abbildung 8.2.24).

Status	Polymergehalt in FM5 bezüglich Anlieferung
Anlieferung	100%
Einbau-Beginn	77%
Einbau-Ende	87%
RTFOT 180°C	59%

Tabelle 8.2.10: Ergebnisse der Gelpermeationschromatografie an FM5

Polymergehalt bezogen auf den Anlieferungszustand = $P_E \cdot 100 / P_A$

P_E Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe nach dem Einbau bzw. nach RTFOT

P_A Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe im Anlieferungszustand

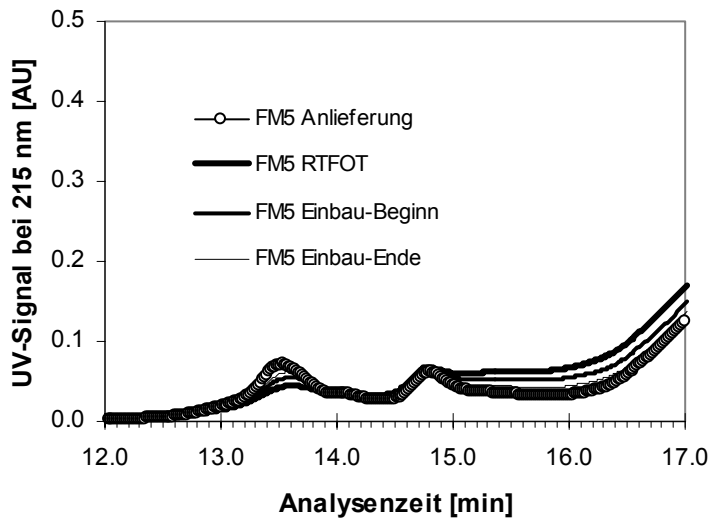


Abbildung 8.2.24: GPC-Chromatogramm-Ausschnitte von FM5 im Anlieferungszustand, nach dem Einbau und nach RTFOT bei 180°C

Dynamische Kennwerte mittels DSR

Die DSR Masterkurven von FM5 im Anlieferungszustand, nach Einbau-Ende und nach Laboralterung (RTFOT bei 180°C) sind in *Abbildung 8.2.25* zusammengestellt. Offenbar fand nach dem Einbau und nach der Alterung mit RTFOT bei 180°C in allen Temperatur- und Frequenzbereichen eine leichte Verhärtung statt, wodurch die Module generell etwas erhöht wurden. Die DSR-Masterkurven bestätigen im wesentlichen die Resultate in *Tabelle 8.2.9*.

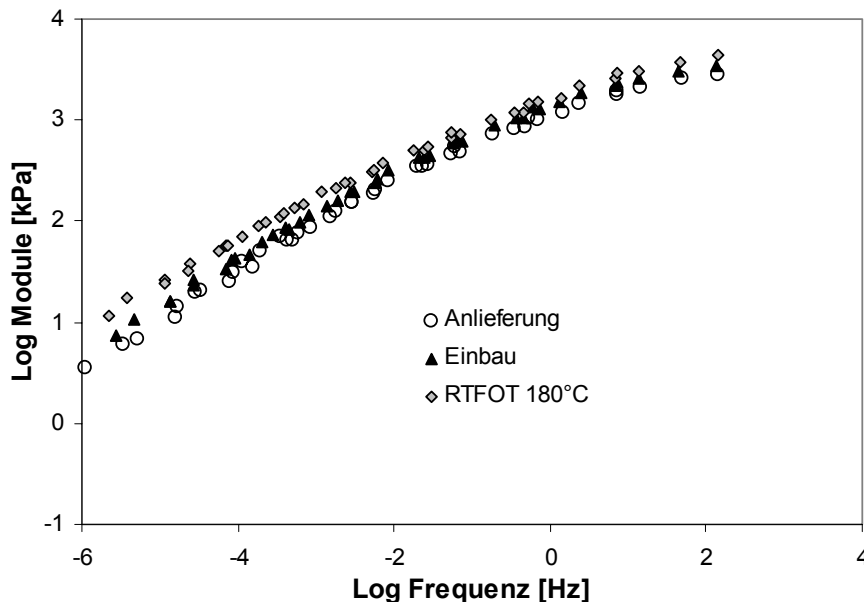


Abbildung 8.2.25: DSR-WLF-Masterkurven von FM5 bei Anlieferung, Einbau-Ende und nach RTFOT bei 180°C. Referenztemperatur: 15°C

8.2.6 Fugenvergussmasse FM6

Normierte Prüfungen:

Die Ergebnisse der normierten Prüfungen der Proben im Anlieferungszustand, nach Einbau-Beginn und -Ende sowie nach RTFOT bei 180°C sind in *Tabelle 8.2.11* zusammengefasst und in den *Abbildungen 8.2.26 bis 8.2.28* grafisch dargestellt.

Durch den Einbau nahmen die Penetrationen zu (ca. um $9 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Nadel} und ca. um $8 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Konus}). Demgegenüber nahmen die Penetrationen der Probe nach der Laboralterung RTFOT bei 180°C ab (ca. $13 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Nadel} und ca. $14 \cdot 10^{-1}$ mm bei Pen_{Konus}). Der Trend der Änderung der Penetration war bei beiden Methoden etwa gleich.

Durch den Einbau nahm der Ep RuK um etwa 5°C und nach RTFOT etwa um 6°C zu.

Aufgrund der Prüfung der Fließlänge veränderte sich die Standfestigkeit der FM6 in der Wärme (bei 60°C) nach dem Einbau nicht. Auch in der Kälte bei -20°C wurde keine Änderung der Eigenschaft der FM6 nach dem Einbau festgestellt.

Prüfungen	Einheit	Anlieferung	Einbau-Beginn	Einbau-Ende	RTFOT (180°C)
Penetration (Nadel), 25°C; Pen_{Nadel}	10^{-1} mm	71	79	80	58
Penetration (Konus), 25°C; Pen_{Konus}	10^{-1} mm	59	68	66	45
Erweichungspunkt Ep RuK	°C	97	102	102	103
Fließlänge	mm	1	<1	1	---
Kugelfallprobe	keine	alle 4 PK intakt	alle 4 PK intakt	alle 4 PK intakt	---

Tabelle 8.2.11: Ergebnisse der normierten Prüfungen von FM6 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und RTFOT (180°C)
 --- nicht ausgeführt
 PK Prüfkörper

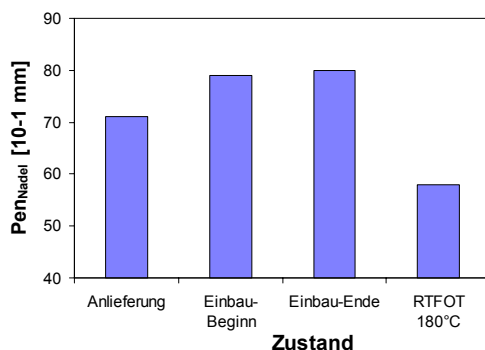


Abbildung 8.2.26:

Ergebnisse der Pen_{Nadel} von FM6 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

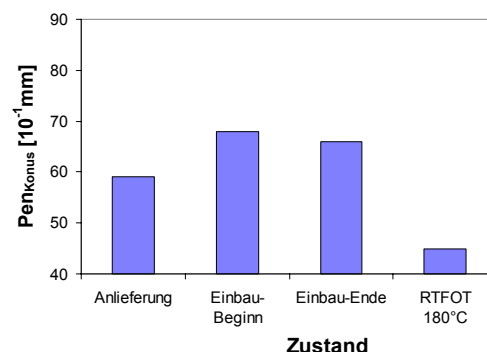


Abbildung 8.2.27:

Ergebnisse der Pen_{Konus} von FM6 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

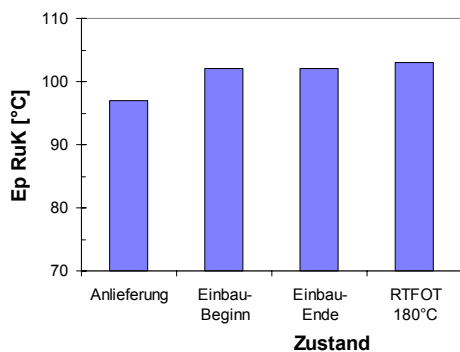


Abbildung 8.2.28:

Ep RuK von FM6 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

Nicht normierte Prüfungen:

Gelpermeationschromatografie (GPC)

Die Polymerkomponenten von FM6 waren gegenüber thermischer Beanspruchung mit Luftzufuhr (RTFOT) sehr oxidationsempfindlich. Nur 23% der Polymerkomponenten konnten nach der Alterung mit RTFOT bei 180°C nachgewiesen werden. Durch den Einbau hingegen wurden die Polymere nur um 14% abgebaut (Tabelle 8.2.12 und Abbildung 8.2.29). Die Alterung im RTFOT ist daher für FM6 wenig aussagekräftig.

Status	Polymergehalt in FM6 bezüglich Anlieferung
Anlieferung	100%
Einbau-Beginn	86%
Einbau-Ende	88%
RTFOT 180°C	23%

Tabelle 8.2.12: Ergebnisse der Gelpermeationschromatografie an FM6

Polymergehalt bezogen auf den Anlieferungszustand = $P_E \cdot 100 / P_A$
 P_E Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe nach dem Einbau bzw. nach RTFOT
 P_A Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe im Anlieferungszustand

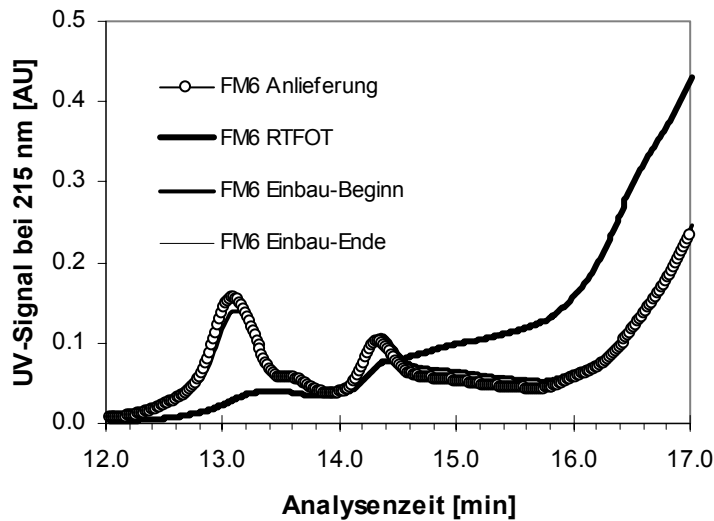


Abbildung 8.2.29: GPC-Chromatogramm-Ausschnitte von FM6 im Anlieferungszustand, nach dem Einbau und nach RTFOT bei 180°C

Dynamische Kennwerte mittels DSR

Die DSR Masterkurven von FM6 im Anlieferungszustand, nach Einbau-Ende und nach Laboralterung (RTFOT bei 180°C) sind in *Abbildung 8.2.30* zusammengestellt. Es konnte keine Veränderung der Eigenschaft der FM6 im geprüften Temperatur- und Frequenzbereich festgestellt werden. Durch die Alterung mit RTFOT nahmen die Module im Bereich höherer Frequenzen ein wenig zu.

Die Resultate zeigen erneut, dass die Alterung im RTFOT nur bedingt die Realität beim Einbau widerspiegelt. Die DSR-Masterkurven bestätigen die Ergebnisse in *Tabelle 8.2.11*.

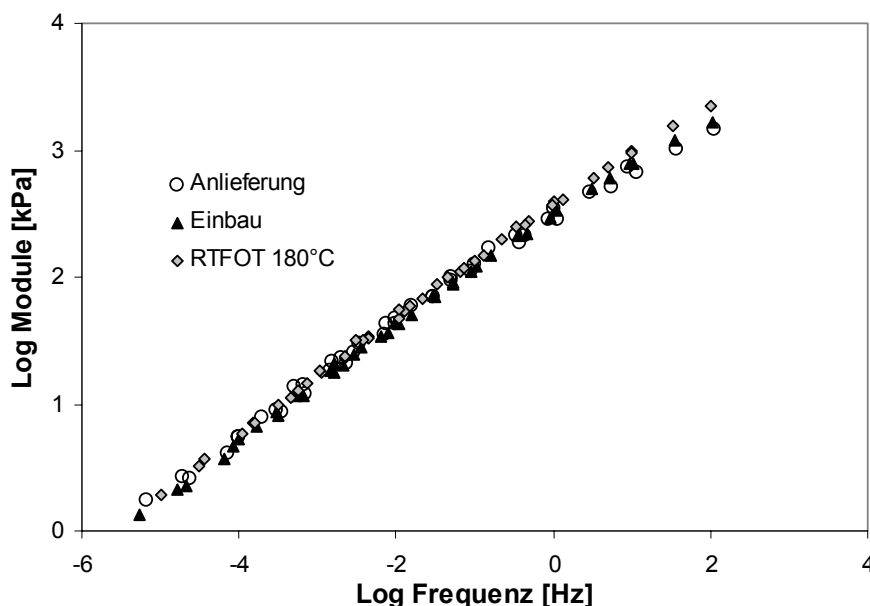


Abbildung 8.2.30: DSR-WLF-Masterkurven von FM6 bei Anlieferung, Einbau-Ende und nach RTFOT bei 180°C. Referenztemperatur: 15°C

8.2.7 Fugenvergussmasse FM7

Normierte Prüfungen:

Die Ergebnisse der normierten Prüfungen der Proben im Anlieferungszustand, nach Einbau-Beginn und -Ende sowie nach RTFOT bei 180°C sind in *Tabelle 8.2.13* zusammengefasst und in den *Abbildungen 8.2.31 bis 8.2.33* grafisch dargestellt.

Der Wert der Pen_{Nadel} der Probe nach Einbau-Beginn änderte sich im Vergleich zum Anlieferungszustand nicht. Hingegen nahm Pen_{Nadel} bei Einbau-Ende um $5 \cdot 10^{-1}$ mm zu. Die Pen_{Konus} nahm beim Einbau-Ende ca. $2 \cdot 10^{-1}$ mm zu. Die Penetrationen der Probe nach der Alterung bei 180°C verhalten sich ähnlich zu den Proben nach dem Einbau.

Durch den Einbau und die Alterung mit RTFOT blieb der Ep RuK der FM7 etwa gleich wie im Anlieferungszustand.

Aufgrund der Prüfung der Fließlänge sowie der Kugelfall-Prüfung blieb die FM7 nach dem Einbau gleich standfest in der Wärme (bei 60°C) wie im Anlieferungszustand und gleich flexibel in der Kälte bei -20°C.

Prüfungen	Einheit	Anlieferung	Einbau-Beginn	Einbau-Ende	RTFOT (180°C)
Penetration (Nadel), 25°C; Pen_{Nadel}	10^{-1} mm	66	67	71	71
Penetration (Konus), 25°C; Pen_{Konus}	10^{-1} mm	57	61	59	62
Erweichungspunkt Ep RuK	°C	86	85	84	84
Fließlänge	mm	<1	<1	1	---
Kugelfallprobe	keine	alle 4 PK intakt	alle 4 PK intakt	alle 4 PK intakt	---

Tabelle 8.2.13: Ergebnisse der normierten Prüfungen von FM7 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und RTFOT (180°C)
 --- nicht ausgeführt PK Prüfkörper

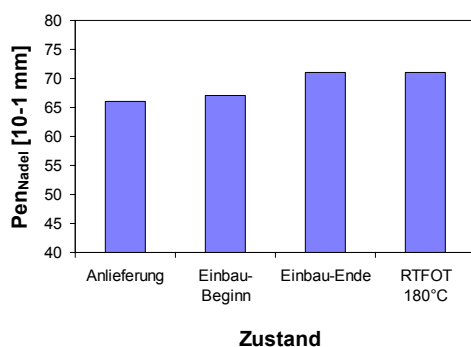


Abbildung 8.2.31:

Ergebnisse der Pen_{Nadel} von FM7 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

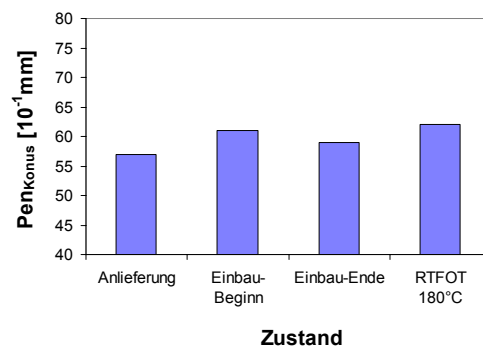


Abbildung 8.2.32:

Ergebnisse der Pen_{Konus} von FM7 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

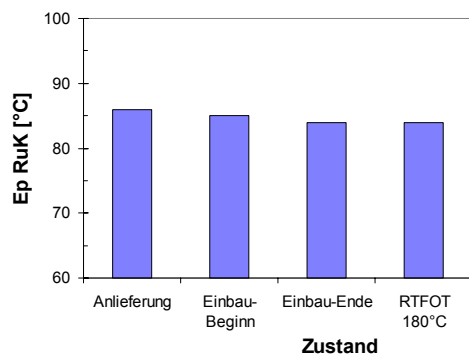


Abbildung 8.2.33:

Ep RuK von FM7 bei Anlieferung, Einbau-Beginn, Einbau-Ende und nach RTFOT (180°C)

Nicht normierte Prüfungen:

Gelpermeationschromatografie (GPC)

Die Polymerkomponenten von FM7 wurden beim Einbau gemäss GPC-Untersuchung etwa um 26% zersetzt. Nach der Alterung mit RTFOT wurde ein Polymerabbau von 44% beobachtet (Tabelle 8.2.14 und Abbildung 8.2.34).

Status	Polymergehalt in FM7 bezüglich Anlieferung
Anlieferung	100%
während Einbau-Beginn	75%
während Einbau-Schluss	73%
RTFOT 180°C	56%

Tabelle 8.2.14: Ergebnisse der Gelpermeationschromatografie an FM7

Polymergehalt bezogen auf den Anlieferungszustand = $P_E \cdot 100 / P_A$

P_E Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe nach dem Einbau bzw. nach RTFOT

P_A Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe im Anlieferungszustand

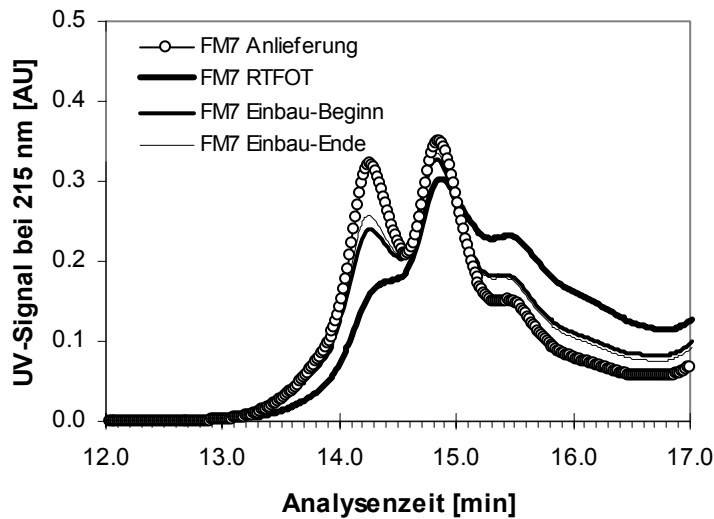


Abbildung 8.2.34: GPC-Chromatogramm-Ausschnitte von FM7 im Anlieferungszustand, nach dem Einbau und nach RTFOT bei 180°C

Dynamische Kennwerte mittels DSR

Die DSR Masterkurven von FM7 im Anlieferungszustand, nach Einbau-Ende und nach Laboralterung (RTFOT bei 180°C) sind in *Abbildung 8.2.35* zusammengestellt. Die DSR Masterkurven im Bereich $\text{Log } f \leq 1 \text{ Hz}$ zeigen eine Abnahme der Module der Proben nach dem Einbau und nach RTFOT. Wie bei FM4 ist das Verhalten nach RTFOT und nach dem Einbau trotz grossen Unterschieds im Polymergehalt nach der Zersetzung etwa gleich. Die DSR-Masterkurven bestätigen die Ergebnisse in *Tabelle 8.2.13*.

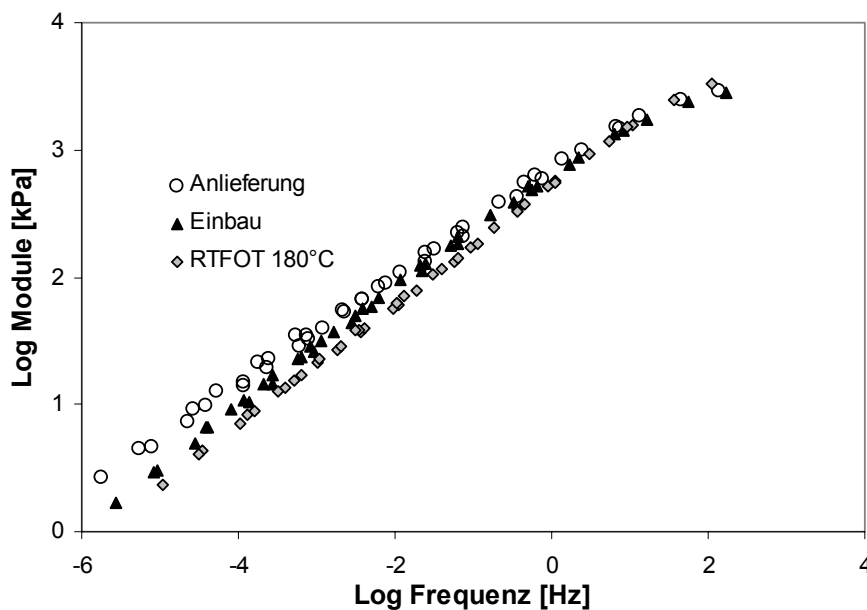


Abbildung 8.2.35: DSR-WLF-Masterkurve von FM7 bei Anlieferung, Einbau-Ende und nach RTFOT bei 180°C. Referenztemperatur: 15°C

8.2.8 Diskussionen und Folgerungen

Einfluss des Einbaus auf die Eigenschaften der Fugenvergussmassen

Die Einflüsse des Einbaus auf die Fugenvergussmassen sowie der künstlichen Alterung mittels RTFOT bei 180°C sind in der *Tabelle 8.2.15* zusammengefasst. Der RTFOT-Test erwies sich als wenig aussagekräftig bezüglich Änderung der Eigenschaften während und nach dem Einbau.

FM	Einbautemperatur [°C]	Zustandsänderung durch den Einbau	Diskussion und Folgerungen
FM1	167 ... 184	<u>Pen_{Nad}</u> : -6 10 ⁻¹ mm; <u>Pen_{Nad}</u> : -8 10 ⁻¹ mm <u>Kugelfall</u> : spröder bei -20°C <u>DSR</u> : bei hoher Temperatur weniger steif und in der Kälte (bis 10°C) härter <u>GPC</u> : Polymerabbau ca. 74%	Die Einbautemperatur von FM1 bis 184°C kann als schonend bewertet werden. Trotzdem waren die Polymere sehr temperaturempfindlich, so dass sie fast vollständig abgebaut wurden. Der Grund lag wahrscheinlich an der sehr grossen Molekülgrösse der Polymerhauptkomponente (siehe <i>Tabelle 8.1.4</i> und <i>Abbildung 8.1.3</i>) <u>Zu erwartende Eigenschaft im Betrieb</u> : Im Sommer weniger standfest und im Winter spröde.
FM2	172 ... 195	<u>Pen_{Nad}</u> : +33 10 ⁻¹ mm; <u>Pen_{Nad}</u> : +32 10 ⁻¹ mm <u>Ep RuK</u> : -22°C <u>Kugelfall</u> : sehr spröde bei -20°C (Einbau-Beginn) <u>Fließlänge</u> : bei 60°C nicht standfest <u>DSR</u> : bei hoher Temperatur (bis 60°) nicht standfest <u>GPC</u> : Polymerabbau ca. 62%	Beim Einbau bis ca. 195°C wurden fast 2/3 der Polymere zersetzt. Aus diesem Grund ist die vom Hersteller zugelassene Einbautemperatur von 190°C ... 200°C (siehe Kap. 5) eindeutig zu hoch. <u>Zu erwartende Eigenschaft im Betrieb</u> : Im Sommer nicht standfest und im Winter spröde.
FM3	162 ... 178	<u>Pen_{Nad}</u> : -20 10 ⁻¹ mm; <u>Pen_{Nad}</u> : -12 10 ⁻¹ mm <u>DSR</u> : härter (grössere Module) in allen Temperatur- und Frequenzbereichen (bis 60°) <u>GPC</u> : Polymerabbau ca. 23%	Gemäss Untersuchungen der Proben bei Anlieferung war die FM3 in allen Temperaturbereichen sehr weich. Durch den Einbau wurde die FM3 härter. Sonst blieb deren Flexibilität erhalten. <u>Zu erwartende Eigenschaft im Betrieb</u> : Im Sommer standfest und im Winter nicht spröde.
FM4	210 ... 285	<u>Beim Einbau-Beginn</u> : <u>Pen_{Nad}</u> : +4 10 ⁻¹ mm; <u>Pen_{Nad}</u> : +5 10 ⁻¹ mm; <u>Ep RuK</u> : -20°C <u>DSR</u> : bei hoher Temperatur weniger standfest <u>GPC</u> : sehr starker Polymerabbau: ca. 83% am Einbau-Beginn und 61% am Einbau-Ende	Durch die enorme Überhitzung beim Einbau, besonders bei Einbau-Beginn (bis 280°C), wurden die Polymere der FM4 fast vollständig zerstört. Die FM4 verlor dadurch ihre Flexibilität sowohl in der Wärme (weich, nicht mehr standfest) als auch in der Kälte (sehr spröde). <u>Zu erwartende Eigenschaft im Betrieb</u> : Im Sommer nicht standfest und im Winter sehr spröde.
FM5	170 ... 185	<u>Pen_{Nad}</u> , <u>Pen_{Nad}</u> , <u>Ep RuK</u> : kaum eine Änderung <u>DSR</u> : leicht härter in allen Temperatur- und Frequenzbereichen <u>GPC</u> : Geringer Polymerabbau: ca. 23% am Einbau-Beginn und 13% am Einbau-Ende	Gemäss Untersuchungen der Proben bei Anlieferung war die FM5 in allen Temperaturbereichen sehr hart. Durch den Einbau wurde FM5 noch ein wenig härter. <u>Zu erwartende Eigenschaft im Betrieb</u> : Aufgrund der Härte ist das Risiko zur Flankenablösung gross.
FM6	160 ... 170	<u>Pen_{Nad}</u> : +9 10 ⁻¹ mm; <u>Pen_{Nad}</u> : +8 10 ⁻¹ mm <u>Ep RuK</u> : +5°C <u>DSR</u> : Keine Veränderung der Eigenschaft <u>GPC</u> : Polymerabbau ca. 33%	Gemäss Untersuchungen der Probe nach der Alterung mit RTFOT wäre FM6 sehr oxidationsempfindlich. Durch den sehr schonenden Einbau wurde kaum eine Änderung der Flexibilität von FM7 festgestellt. <u>Zu erwartende Eigenschaft im Betrieb</u> : Die Eigenschaften der FM6 in Anlieferung bleiben erhalten.
FM7	160 ... 184	<u>Pen_{Nad}</u> , <u>Pen_{Nad}</u> , <u>Ep RuK</u> , <u>Fließlänge</u> , <u>Kugelfallprobe</u> : kaum eine Änderung <u>DSR</u> : Abnahme der Module bei erhöhter Temperatur aber immer noch relativ hoch <u>GPC</u> : Polymerabbau ca. 26%	Gemäss Untersuchungen der Probe nach der Alterung mit RTFOT wären die Polymere in FM7 relativ oxidationsempfindlich. Mit einem Polymerabbau von ca. 26% wurde kaum eine Änderung der Flexibilität von FM7 festgestellt. <u>Zu erwartende Eigenschaft im Betrieb</u> : Die Eigenschaften der FM6 in Anlieferung bleiben erhalten.

Tabelle 8.2.15: Einflüsse des Einbaus auf die Fugenvergussmassen

Einbualterung und Prüfmethode

Penetrationen und Erweichungspunkt Ring und Kugel:

- Tendenziell änderten sich die Werte von Pen_{Nadel} und Pen_{Konus} durch den Einbau etwa in ähnlicher Weise (Abbildung 8.2.36). Eine Ausnahme bildete FM3, wo sich deutliche Unterschiede ergaben.
- Eine Korrelation zwischen Polymerabbau und Änderung der Penetrationswerte kann im allgemeinen nicht festgestellt werden.
- Bei geringem Polymerabbau (FM3, FM5, FM6, FM7) war auch eine geringfügige Änderung der Ep RuK Werte zu beobachten (Abbildung 8.2.37). Bei FM1, FM2 und FM4, wo der Polymerabbau zwischen 62% und 74% betrug, wurde eine Abnahme von Ep RuK zwischen 10°C und 22°C festgestellt. Allerdings konnte keine deutliche Korrelation zwischen dem Polymerabbau durch den Einbau und der Änderung der Werte des Ep RuK nachgewiesen werden (z.B. bei FM1 ergab sich eine Reduktion des Ep RuK um 10°C bei einem Polymerabbau von 74% und bei FM2 eine Reduktion des Ep RuK von 22°C bei einem Polymerabbau von 62%).

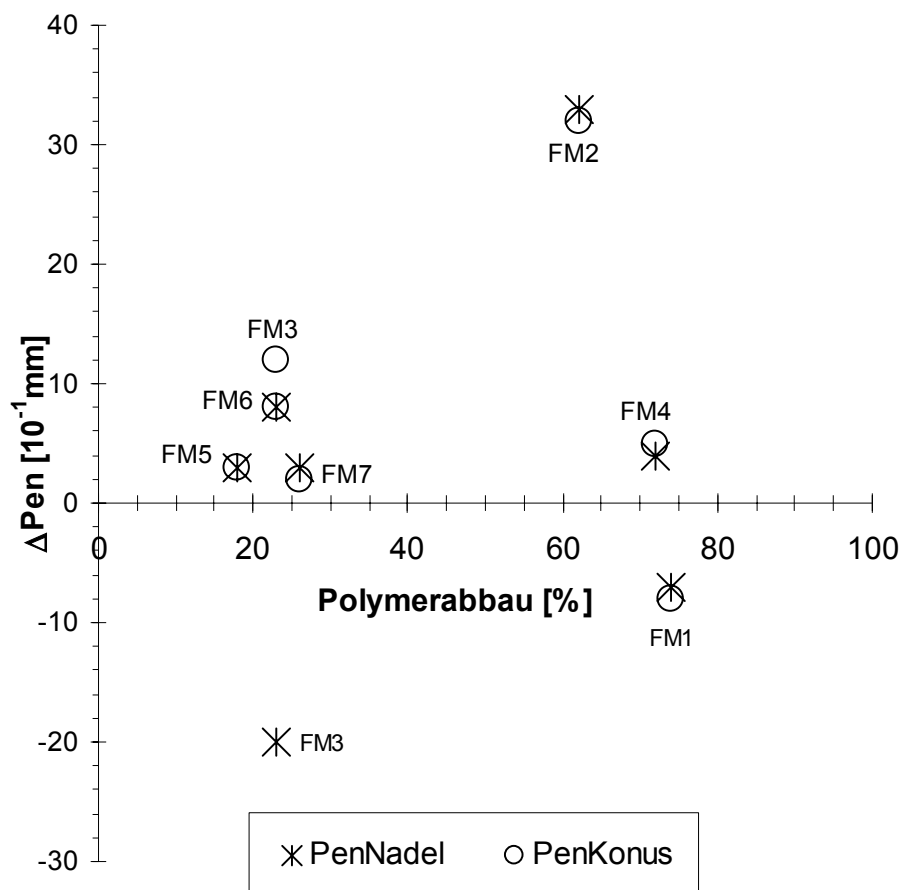


Abbildung 8.2.36: Änderung von Pen_{Nadel} und Pen_{Konus} durch den Einbau (Beginn) im Vergleich zum Polymerabbau mittels GPC

Δ Penetration = Penetration nach Einbau-Beginn – Penetration bei Anlieferung

Polymerabbau = $P_E \times 100 / P_A$ [%]

P_E Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe nach dem Einbau

P_A Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe im Anlieferungszustand

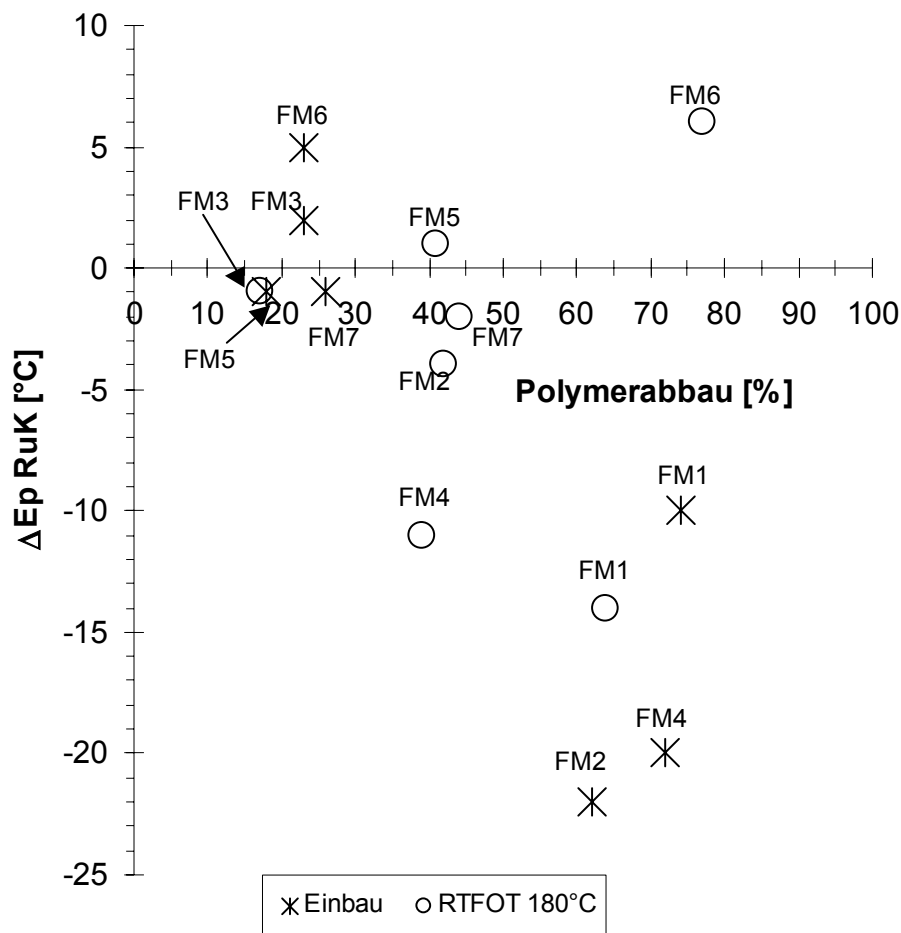


Abbildung 8.2.37: Änderung von Ep RuK durch den Einbau (Beginn) und nach RTFOT 180°C im Vergleich zum Polymerabbau mittels GPC

$$\Delta \text{Ep RuK} = \text{Ep RuK nach Einbau-Beginn} - \text{Ep RuK bei Anlieferung}$$

$$\text{Polymerabbau} = P_E \times 100 / P_A \text{ [%]}$$

P_E Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe nach dem Einbau

P_A Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe im Anlieferungszustand

Fließlänge und Kugelfallprobe:

Bei einem Polymerabbau bis zu 26% (FM3, FM5, FM6 und FM7) wurde keine Änderung der Ergebnisse der Prüfungen Fließlänge und Kugelfallprüfung festgestellt (Tabelle 8.2.16). Bei FM2 (Einbau-Beginn) und FM4 mit einem Polymerabbau zwischen 62% und 74% wurden die Fugenvergussmassen in der Wärme weniger standfest und in der Kälte bei -20°C spröde. Eine Ausnahme bildete FM1, da sie mit einem Polymerabbau von ca. 74% gleich standfest (bei 60°C) blieb und nur ein wenig spröder in der Kälte (bei -20°C) wurde. Der Polymerabbau der Probe FM2 (Einbau-Ende) betrug etwa gleich viel wie bei Einbau-Beginn. Trotzdem blieben alle vier Prüfkörper (Einbau-Ende) intakt und wurden somit nicht spröde.

Fugenvergussmasse	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6	FM7
Fliesslänge ¹⁾	0	15	0	4	0	0	0
Kugelfallprobe ²⁾	1PK	4PK *)	0	4PK	0	0	0
Polymerabbau [%] ³⁾							
Einbau-Beginn	74	63	23	83	23	14	25
Einbau-Ende	74	62	23	61	13	12	27
Legende:							
¹⁾ 0: keine Änderung der Fliesslänge; 15: eine Zunahme der Fliesslänge um 15mm ²⁾ 0: keiner von 4 Prüfkörpern zersprang 1PK: 1 von 4 Prüfkörpern zersprang (Einbau-Beginn und -Ende) 4PK*): Alle 4 Prüfkörper der Probe beim Einbau-Beginn zersprangen. Bei der Probe beim Einbau-Ende blieben alle 4 Prüfkörper intakt 4PK: Alle 4 Prüfkörper der Probe beim Einbau-Beginn und -Ende zersprangen ³⁾ Polymerabbau [%] = $100 - (P_E \cdot 100 / P_A)$ P _E Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe nach dem Einbau bzw. nach RTFOT P _A Höhe des Polymer-Hauptpeaks der Probe im Anlieferungszustand							

Tabelle 8.2.16: Änderung der Ergebnisse der Prüfungen Fliesslänge (Prüfung bei 60°C) und Kugelfallprüfung (Prüfung bei -20°C) im Vergleich zum Polymerabbau durch den Einbau-Beginn

Dynamic Shear Rheometer (DSR):

Aufgrund der thermischen Belastung beim Einbau veränderte sich die Steifigkeit der Fugenvergussmassen in verschiedenen Frequenzen- und Temperaturbereichen. Die Module der sieben Fugenvergussmassen nach dem Einbau sind in *Abbildung 8.2.38* zusammengestellt. Im Vergleich zu den Kennwerten bei der Anlieferung können die Kennwerte nach dem Einbau hinsichtlich Steifigkeit wie folgt interpretiert werden:

- Die Kurven der Schubmodule der untersuchten Fugenvergussmassen liegen, ausser bei FM5, durch den Einbau näher beieinander (vgl. *Abbildungen 8.1.5 und 8.2.38*).
- Auch nach dem Einbau blieb die Steifigkeit bei FM5 in allen Prüfbereichen am grössten.
- Bei zunehmender Temperatur bzw. tiefer Frequenz wird FM2 rascher weich.
- Das Verhalten von FM1 im Anlieferungszustand hat sich durch den Einbau sehr stark verändert (*Abbildung 8.2.5*). Der Verlauf der Masterkurve von FM1 war nach dem Einbau mit demjenigen der FM 3 und FM7 vergleichbar.
- Bei tiefer Temperatur bzw. hoher Frequenz ist die eingebaute FM6 am weichsten.

Somit kann der DSR als sinnvolle Prüfmethode zur Charakterisierung von Fugenvergussmassen im Temperaturbereich zwischen 10°C und 70°C bezeichnet werden.

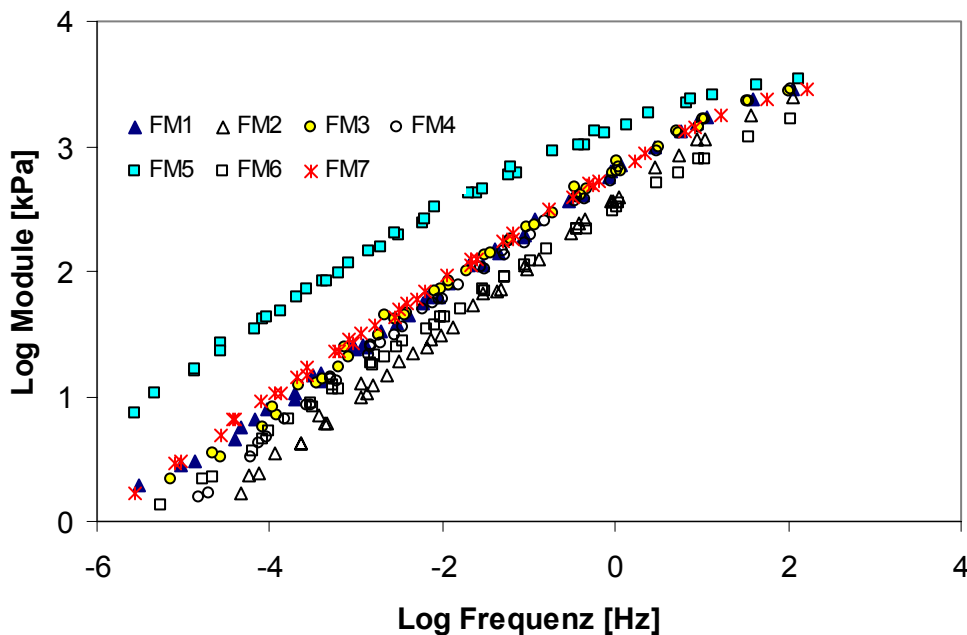


Abbildung 8.2.38: Masterkurven der Fugenvergussmassen nach dem Einbau

Bestimmung des Polymerabbaus mittels Gelpermeationschromatografie (GPC):

Eine Alterung der Fugenvergussmassen durch eine thermische, oxidative Belastung, z.B. durch den Einbau, lässt sich durch eine Bestimmung des Polymerabbaus mittels GPC gut sichtbar machen. Demgegenüber lässt sich ein Polymerabbau mit den verwendeten konventionellen Methoden wie Penetration und Ep RuK nicht nachweisen.

Alterung bei Einbau und Alterung im Labor mit RTFOT

- Aufgrund der GPC-Untersuchung zersetzen sich die Polymere bei schonendem Einbau der Fugenvergussmassen (bis 185°C) höchstens um 25% (Abbildung 8.2.39). FM1 bildet eine Ausnahme und wäre auch aufgrund des Ergebnisses der Probe nach RTFOT sehr oxidationsempfindlich.
- Die Alterung mit RTFOT erfolgt durch eine typische oxidative Beanspruchung der Fugenvergussmasse bei 180°C mit intensiver Luftzufuhr. Aufgrund des Ausmasses des Polymerabbaus können die sieben Produkte in zwei Gruppen klassiert werden. Bei fünf Produkten (FM2, FM3, FM4, FM5 und FM7) war der Polymerabbau nach der Laboralterung RTFOT bei 180°C höchstens 44%. Diese Fugenvergussmassen könnten in die Gruppe "nicht oxidationsempfindlich" eingeordnet werden. Die Produkte FM1 und FM6 sind mit einem Polymerabbau bis 77% sehr oxidationsempfindlich. Bei solchen Produkten kann der Polymerabbau durch häufiges Öffnen des Kocherdeckels beim Einbau begünstigt werden. Aufgrund dieser Untersuchung könnte eine Anforderung der Oxidationsempfindlichkeit des Produktes im Anlieferungszustand festgelegt werden, und zwar in dem Sinne, dass der Polymerabbau nach RTFOT nicht mehr als 45% betragen darf. Die FM6 bildet eine Ausnahme, aber die Gefahr der Polymerzersetzung ist bei einem solchen Produkt gross. Ansonsten eignet sich der RTFOT nicht zur Simulation der Alterung beim Einbau von Polymerbitumen mit einem hohen Anteil an Polymeren, wie bei den Fugenvergussmassen der Fall ist.

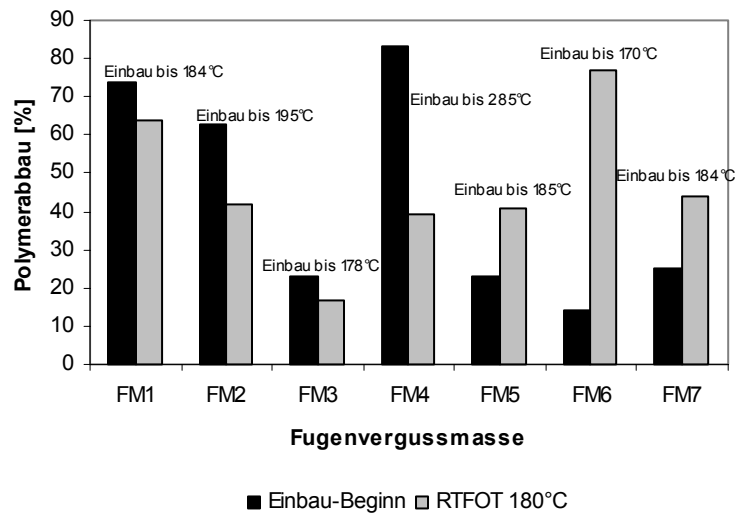


Abbildung 8.2.39: Vergleich zwischen dem Polymerabbau durch den Einbau und durch die Alterung mit RTFOT bei 180°C im Labor

8.3 Zustandsänderung der Fugenvergussmassen im Betrieb

Der Zustand der Fugenvergussmassen am Objekt, insbesondere hinsichtlich Rissbildungen, Flankenablösungen und Blasenbildungen, wurde nach 1, 2.5 und 5 Jahren visuell erfasst und beurteilt (vgl. Kap. 4.1). Für begleitende Laboruntersuchungen wurden zudem parallel zum Einbau unter den gleichen Bedingungen entsprechende Fugenmodellkörper hergestellt und am Autobahnrand den gleichen Witterungseinflüssen ausgesetzt. Mit den begleitenden Laboruntersuchungen, wie Gelpermeationschromatografie (GPC), Haftzugprüfung in der Kälte und Dynamic Shear Rheometer (DSR) wurden der Alterungszustand, die Änderung der Hafteigenschaften und die mechanischen Kennwerte der Fugenvergussmassen erfasst. Die Haftzugprüfung in der Kälte (Kap. 4.2.4) wurde nicht nur an den Ausschnitten der Fugenmodellkörper, sondern auch an den von der Strasse entnommenen Bohrkernen durchgeführt.

8.3.1 Zustandsänderung von FM1 im Betrieb

Praxisverhalten/Visuelle Beurteilung am Objekt:

Bei FM1 entstanden während 2.5 Jahren keine Blasen (*Tabelle 8.3.1, Abbildungen 8.3.1 ... 8.3.3*). Danach traten nur wenige Blasen auf. Nach fünf Jahren waren etwa 15% der Fugen von den Flanken abgelöst.

Die FM1 war somit für die Praxis schlecht tauglich.

Alter	Flankenablösung	Risse	Blasen	Visuelle Gesamtbeurteilung und Bemerkungen
1 Jahr	keine	keine	keine	Dicht, in Ordnung; An zwei Fugen, die beim Einbau mit Mineral abgestreut waren, war nur noch wenig Abstreuerung vorhanden (<i>Abbildung 8.3.1</i>).
2.5 Jahre	ja	keine	keine	Flankenablösung ca. 10 % der Fugen; Die Flankenablösungen befanden sich meistens bei den Fugen mit Stufenbildung *) und am Rand der Strasse.
5 Jahre	ja	keine	wenig	Flankenablösung ca. 15 % der Fugen; Teilweise Flankenablösungen oft auf Fingerdruck.

Tabelle 8.3.1: FM1. Ergebnisse der visuellen Beurteilung des Zustandes der Fugenvergussmasse am Objekt

*) Die in Fahrrichtung vordere Betonplatte war im Fugenbereich ca. 2mm tiefer als die hintere Betonplatte.



Abbildung 8.3.1: FM1. 1 Jahr nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt. Nach einem Jahr war nur wenig Abstreuerung vorhanden



Abbildung 8.3.2: FM1. 2.5 Jahre nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt



Abbildung 8.3.3: FM1. 5 Jahre nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt

Ergebnisse der Laboruntersuchungen:

Zustand der Polymerkomponenten mittels GPC:

Innerhalb von fünf Jahren im Betrieb blieben die Polymerkomponenten von FM1 verglichen mit dem Einbauzustand praktisch unverändert (siehe Chromatogramme in *Abbildung 8.3.4*).

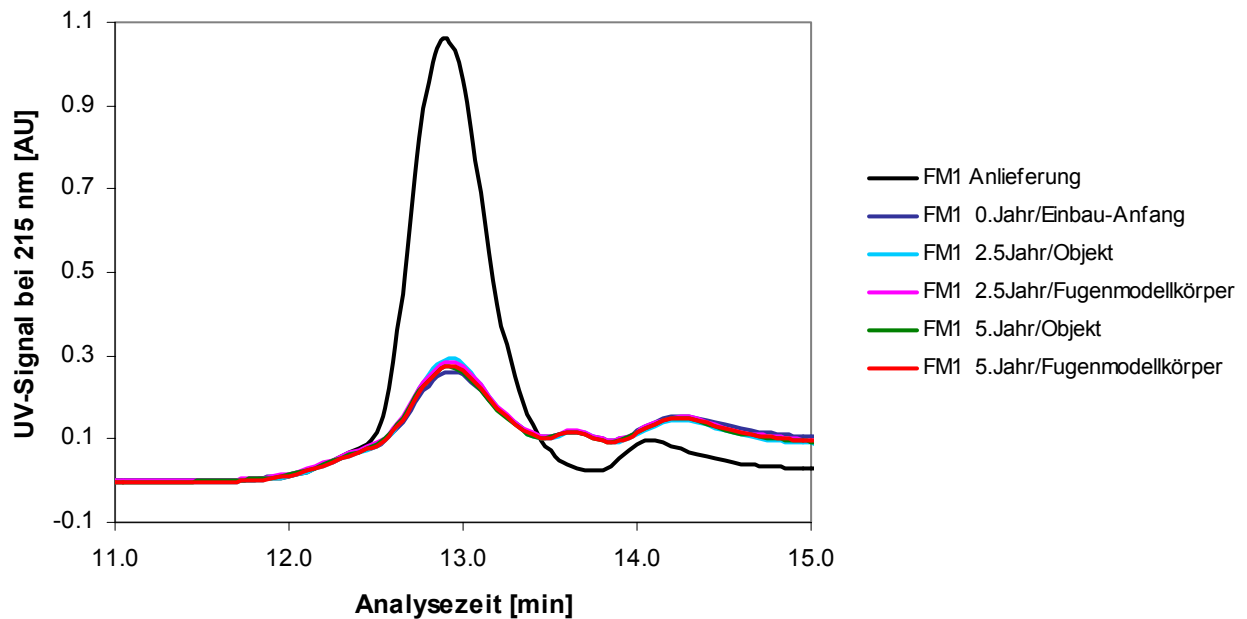


Abbildung 8.3.4: FM1. GPC-Chromatogramme der Proben von der Anlieferung bis zu 5 Jahren im Betrieb

Haftzugprüfung:

Die Ergebnisse der Haftzugprüfung (vgl. Kap. 4.2.4) an den Ausschnitten aus den Fugenmodellkörpern, die am Objekt gelagert wurden, sind in *Tabelle 8.3.2* ersichtlich. Nach dem Einbau (0. Jahr) haftete die FM1 noch relative gut an den Fugenflanken des Fugenmodellkörpers (bis 6mm Dehnweg). Die Flankenhaftung schwächte sich mit der Zeit ab. Nach 5 Jahren löste sich die FM1 von der Flanke bei einem mittleren Dehnweg von 1.2mm. Das Material wurde mit der Zeit härter (maximale Haftzugspannung 0.3N/mm^2 nach dem Einbau und 0.6N/mm^2 nach 5 Jahren). Im Vergleich zu den Bohrkernen lieferten die Fugenmodellkörper nach 2.5 Jahren leicht höhere Spannungen. Dies könnte darauf zurück zu führen sein, dass die Fugenmodellkörper durch den Verkehr nicht beansprucht wurden. Auffallend ist die beträchtliche Streuung insbesondere bei der maximalen Bruchspannung der Bohrkern.

Alter	Maximale Fugendehnung bis zur Schädigung [mm]	Schäden		Maximale Kraft [N]	Maximale Spannung [N/mm ²]
		Flankenablösung	Riss in FM		
0. Jahr (MK)	6.0	ja	ja	900	0.3
1. Jahr (MK)	4.0	ja	ja	900	0.3
2.5. Jahr (MK)	3.5	ja	ja	1521	0.5
2.5. Jahr (BK1)	3.0	ja	keiner	2170	0.7
2.5. Jahr (BK2)	3.3	ja	keiner	1577	0.5
5. Jahr (MK)	1.2	ja	keiner	1903	0.6

Tabelle 8.3.2: FM1. Ergebnisse der Haftzugprüfung bei -20°C vom 0. Jahr bis 5. Jahr im Betrieb

- (MK) Mittelwert aus Doppelbestimmungen an Fugenmodellkörpern
- (BK1) Einzelwert aus Bohrkern mit schlechtem Aussehen der FM (z.B. leichte Flankenablösung oder Blasenbildung)
- (BK2) Einzelwert aus Bohrkern mit gutem Aussehen der FM (weder Flankenablösung noch Blasenbildung)

Mechanische Kennwerte mittels DSR:

Die Ergebnisse der Untersuchungen der mechanischen Kennwerte mittels DRS an FM1 nach 2.5 und 5 Jahren sind im Vergleich zu denjenigen nach dem Einbau in *Abbildungen 8.3.5* und *8.3.6* grafisch dargestellt. Die Masterkurven in *Abbildungen 8.3.5* zeigen eine Verhärtung der Fugenmmasse durch die Witterung im Betrieb in allen Temperatur- und Frequenzbereichen. Nach 5 Jahren wurde FM1 bei tiefen Temperaturen bzw. hohen Frequenzen ein wenig härter nach 2.5 Jahren (*Abbildung 8.3.5*).

Gemäss *Abbildung 8.3.6* erhöhten sich die Module unterhalb von 30°C, was auf eine Verhärtung der Fugenvergussmasse hindeutet. Der Modul bei 10°C und 1.5Hz ist nach einer Betriebsdauer von 5 Jahren um ca. 60% angestiegen.

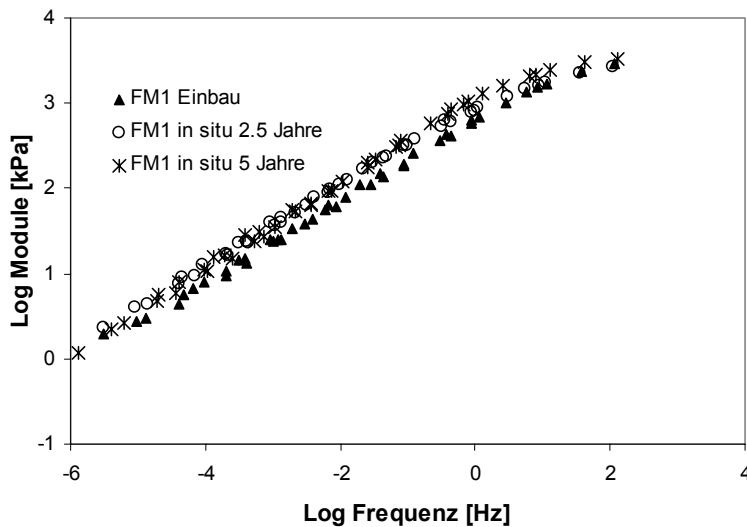


Abbildung 8.3.5: FM1. DSR-WLF-Masterkurven im Vergleich (vom Einbau bis zu 5 Jahren im Betrieb). Referenztemperatur: 15°C

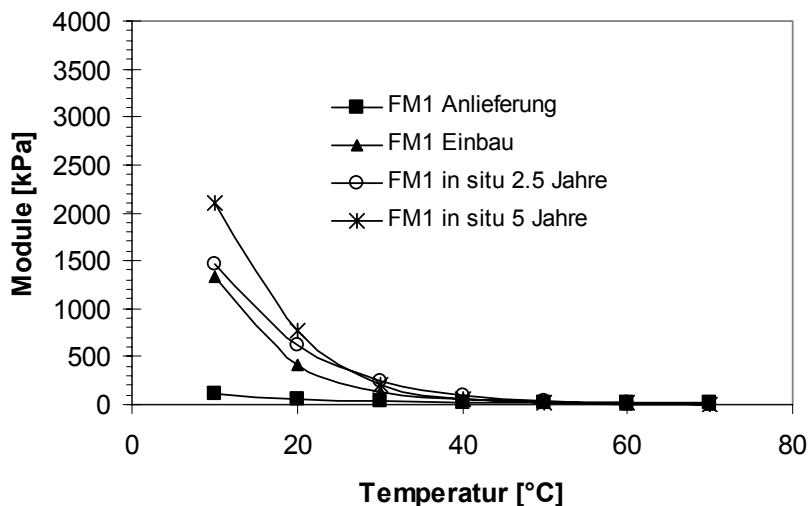


Abbildung 8.3.6: FM1. Temperaturabhängigkeit der Module im DSR bei 1.5Hz von der Anlieferung bis zu 5 Jahren im Betrieb

8.3.2 Zustandsänderung von FM2 im Betrieb

Praxisverhalten/Visuelle Beurteilung am Objekt:

Bei FM2 entstanden viele Blasen und Flankenablösungen (*Tabelle 8.3.3, Abbildungen 8.3.7 ... 8.3.9*). Nach fünf Jahren waren etwa 30% der Fugen von den Flanken abgelöst.

Die FM2 war somit nicht gebrauchstauglich.

Alter	Flankenablösung	Risse	Blasen	Visuelle Gesamtbeurteilung und Bemerkungen
1 Jahr	keine	keine	ja	Dicht, sehr viele Blasen, Schwund durch geplatze Blasen
2.5 Jahre	ja	keine	ja	Flankenablösung ca. 17 % der Fugen; zum Teil bis 2.8m Flankenablösung in einer Fuge
5 Jahre	ja	keine	ja	Flankenablösung ca. 30 % der Fugen; zum Teil lange Flankenablösung in einer Fuge

Tabelle 8.3.3: FM2. Ergebnisse der visuellen Beurteilung des Zustandes der Fugenvergussmasse am Objekt



Abbildung 8.3.7: FM2. 1 Jahr nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt



Abbildung 8.3.8: FM2. 2.5 Jahre nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt

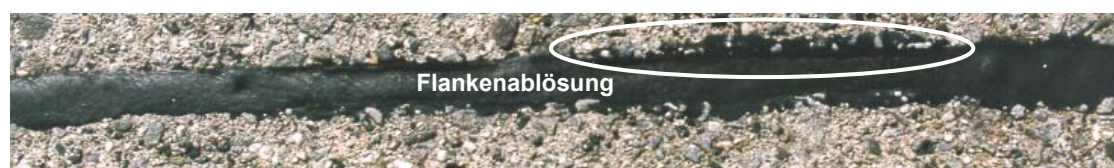


Abbildung 8.3.9: FM2. 5 Jahre nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt

Ergebnisse der Laboruntersuchungen:

Zustand der Polymerkomponenten mittels GPC:

Innerhalb von fünf Jahren im Betrieb blieben die Polymerkomponenten von FM2 verglichen mit dem Einbauzustand praktisch unverändert (siehe Chromatogramme in *Abbildung 8.3.10*).

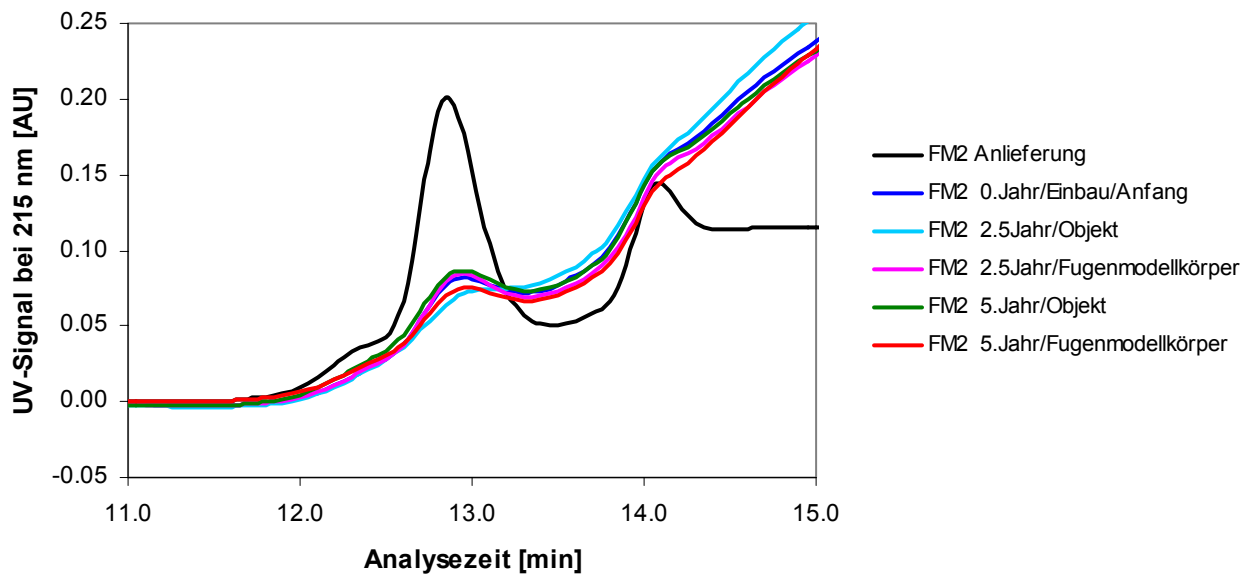


Abbildung 8.3.10: FM2. GPC-Chromatogramme der Proben von der Anlieferung bis zu 5 Jahren im Betrieb

Haftzugprüfung:

Die Ergebnisse der Haftzugprüfung an den Ausschnitten aus den Fugenmodellkörpern, die am Objekt gelagert wurden, sind in *Tabelle 8.3.4* ersichtlich. Bereits nach dem Einbau (0. Jahr) haftete die FM1 relative schlecht an den Fugenflanken des Fugenmodellkörpers (bis 1.3mm Dehnweg). Das Material wurde mit der Zeit härter (maximale Haftzugspannung 0.3N/mm^2 nach dem Einbau und 0.5N/mm^2 nach 5 Jahren). Am Objekt wurden aufgrund der Untersuchung der Bohrkerns sogar Spannungen bis 1.0N/mm^2 erreicht. Der Unterschied zwischen Objekt und Fugenmodellkörpern dürften auf die Verkehrseinwirkung zurückzuführen sein. Durch den Verkehr wird die Fugenvergussmasse permanent in den Fugenspalt hineingepresst, so dass sich hieraus höhere Verbundkräfte ergeben könnten. Beachtenswert ist die erhebliche Streuung bei den maximalen Fugendehnungen der beiden Bohrkerns.

Alter	Maximale Fugendehnung bis zur Schädigung [mm]	Schäden		Maximale Kraft [N]	Maximale Spannung [N/mm^2]
		Flankenablösung	Riss in FM		
0. Jahr (MK)	1.3	ja	keiner	867	0.3
1. Jahr (MK)	0.7	ja	keiner	1733	0.6
2.5. Jahr (MK)	0.6	ja	ja	1444	0.5
2.5. Jahr (BK1)	1.2	ja	keiner	2863	1.0
2.5. Jahr (BK2)	1.7	ja	keiner	2632	0.9
5. Jahr (MK)	0.8	ja	keiner	1458	0.5

Tabelle 8.3.4: FM2. Ergebnisse der Haftzugprüfung bei -20°C vom 0. bis 5. Jahr im Betrieb

(MK) Mittelwert aus Doppelbestimmungen an Fugenmodellkörpern

(BK1) Einzelwert aus Bohrkern mit schlechtem Aussehen der FM (z.B. leichte Flankenablösung oder Blasenbildung)

(BK2) Einzelwert aus Bohrkern mit gutem Aussehen der FM (weder Flankenablösung noch Blasenbildung)

Mechanische Kennwerte mittels DSR:

Die Ergebnisse der Untersuchungen der mechanischen Kennwerte mittels DRS an FM2 nach 2.5 und 5 Jahren sind im Vergleich zu denjenigen nach dem Einbau in *Abbildung 8.3.11* und *8.3.12* grafisch dargestellt. Die Masterkurven in *Abbildung 8.3.11* zeigen eine deutliche sukzessive Verhärtung der FM2 in allen Temperatur- und Frequenzbereichen. Der Modul bei 10°C und 1.5Hz hat sich nach einer Betriebsdauer von 5 Jahren um ca. das Dreifache erhöht (*Abbildung 8.3.12*).

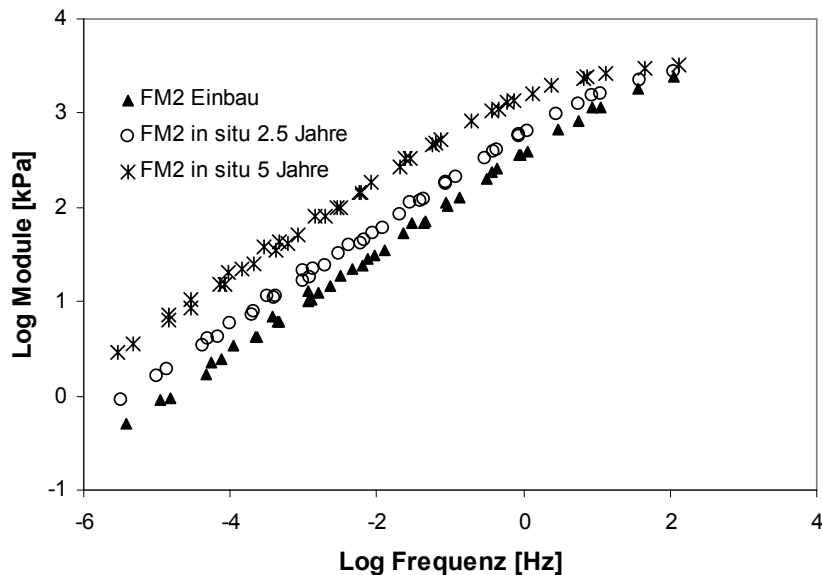


Abbildung 8.3.11: FM2. DSR-WLF-Masterkurven im Vergleich (vom Einbau bis zu 5 Jahren im Betrieb). Referenztemperatur: 15°C

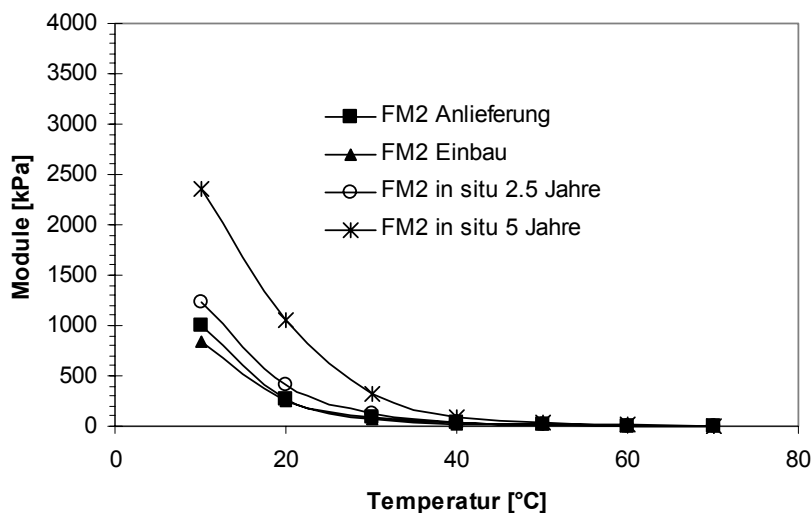


Abbildung 8.3.12: FM2. Temperaturabhängigkeit der Module im DSR bei 1.5Hz von der Anlieferung bis zu 5 Jahren im Betrieb

8.3.3 Zustandsänderung von FM3 im Betrieb

Praxisverhalten/Visuelle Beurteilung am Objekt:

Bei FM3 entstanden sehr wenige Blasen und Flankenablösungen (*Tabelle 8.3.5, Abbildungen 8.3.13 ... 8.3.15*). Nach fünf Jahren waren nur etwa 3% der Fugen von den Flanken abgelöst. Diese Flankenablösungen befanden sich meistens am Fugenrand und bei den Fugen mit Stufenbildung (die in Fahrrichtung vordere Betonplatte war im Fugenbereich ca. 2mm tiefer als die hintere Betonplatte).

Die FM3 konnte nach fünf Jahren Betrieb als bedingt gebrauchstauglich bezeichnet werden.

Alter	Flankenablösung	Risse	Blasen	Visuelle Gesamtbeurteilung und Bemerkungen
1 Jahr	keine	keine	ja	Dicht, teilweise feine Bläschen und geplatze Bläschen
2.5 Jahre	ja	keine	ja	Flankenablösung ca. 2 % der Fugen; Die Flankenablösungen befanden sich meistens bei den Fugen mit Stufenbildung *) und am Rand der Strasse; Wenige feine Bläschen
5 Jahre	ja	keine	ja	Flankenablösung ca. 3 % der Fugen; Die Flankenablösungen befanden sich meistens bei den Fugen mit Stufenbildung *) und am Rand der Strasse; Wenige feine Bläschen

Tabelle 8.3.5: FM3. Ergebnisse der visuellen Beurteilung des Zustandes der Fugenvergussmasse am Objekt

*) Die in Fahrrichtung vordere Betonplatte war im Fugenbereich ca. 2mm tiefer als die hintere Betonplatte.



Abbildung 8.3.13: FM3. 1 Jahr nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt



Abbildung 8.3.14: FM3. 2.5 Jahre nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt



Abbildung 8.3.15: FM3. 5 Jahre nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt

Ergebnisse der Laboruntersuchungen:

Zustand der Polymerkomponenten mittels GPC:

Innerhalb von fünf Jahren im Betrieb blieben die Polymerkomponenten von FM3 verglichen mit dem Einbauzustand praktisch unverändert (siehe Chromatogramme in *Abbildung 8.3.16*).

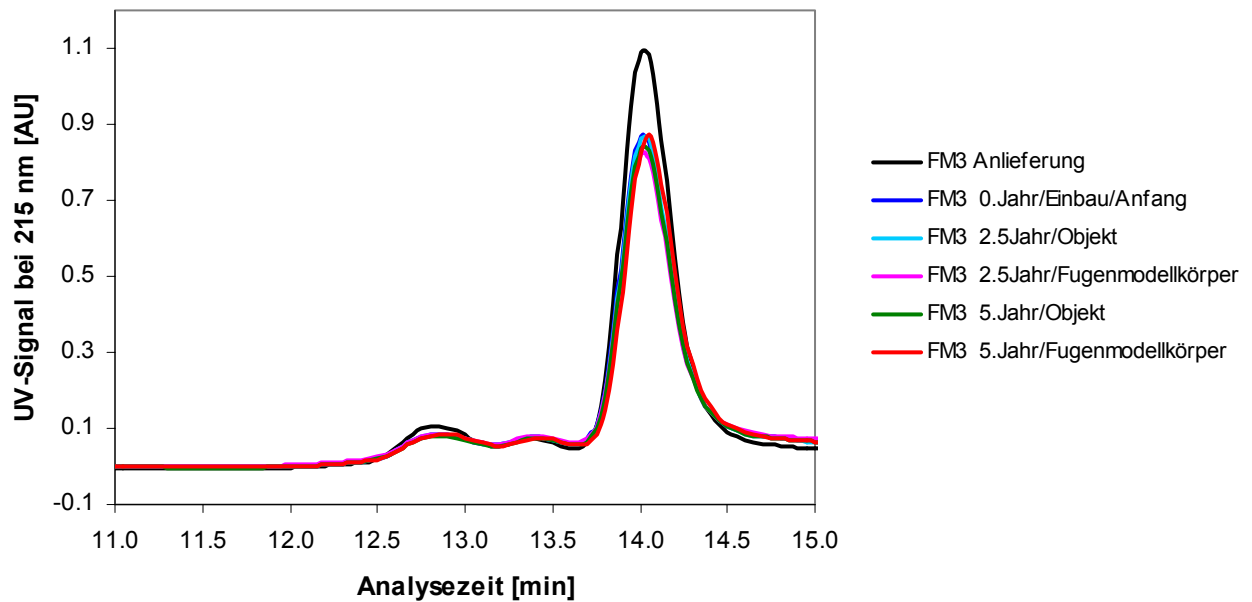


Abbildung 8.3.16: FM3. GPC-Chromatogramme der Proben von der Anlieferung bis zu 5 Jahren im Betrieb

Haftzugprüfung:

Die Ergebnisse der Haftzugprüfung an den Ausschnitten aus den Fugenmodellkörpern, die am Objekt gelagert wurden, sind in *Tabelle 8.3.6* ersichtlich. Nach dem Einbau war die FM3 bei -20°C sehr gut elastisch und haftete sehr gut an den Fugenflanken. Flankenablösung fand erst nach 12mm Dehnweg statt. Nach 5 Jahren trat bereits nach 3.3mm Dehnweg eine Flankenablösung auf. Das Material wurde mit der Zeit härter (maximale Haftzugspannung 0.2N/mm^2 nach dem Einbau und 0.7N/mm^2 nach 5 Jahren). Bei FM3 ist zwischen Bohrkerne und Fugenmodellkörpern eine relativ gute Übereinstimmung festzustellen.

Alter	Maximale Fugendehnung bis zur Schädigung [mm]	Schäden		Maximale Kraft [N]	Maximale Spannung [N/mm^2]
		Flankenablösung	Riss in FM		
0. Jahr (MK)	12.0	ja	keiner	333	0.1
1. Jahr (MK)	10.0	ja	keiner	533	0.2
2.5. Jahr (MK)	3.5	ja	keiner	2238	0.8
2.5. Jahr (BK1)	3.8	ja	keiner	2169	0.7
2.5. Jahr (BK2)	7.4	ja	keiner	2479	0.8
5. Jahr (MK)	3.3	ja	keiner	2185	0.7

Tabelle 8.3.6: FM3. Ergebnisse der Haftzugprüfung bei -20°C vom 0. bis 5. Jahr im Betrieb

- (MK) Mittelwert aus Doppelbestimmungen an Fugenmodellkörpern
- (BK1) Einzelwert aus Bohrkern mit schlechtem Aussehen der FM (z.B. leichte Flankenablösung oder Blasenbildung)
- (BK2) Einzelwert aus Bohrkern mit gutem Aussehen der FM (weder Flankenablösung noch Blasenbildung)

Mechanische Kennwerte mittels DSR:

Die Ergebnisse der Untersuchungen der mechanischen Kennwerte mittels DRS an FM3 nach 2.5 und 5 Jahren sind im Vergleich zu denjenigen nach dem Einbau in *Abbildung 8.3.17* und *8.3.18* grafisch dargestellt. Bei hohen Temperaturen bzw. tiefen Frequenzen wur-

de FM3 nach 5 Jahren viel härter als nach 2.5 Jahren. Bei tiefen Temperaturen bzw. hohen Frequenzen wurde kein bedeutender Unterschied festgestellt.

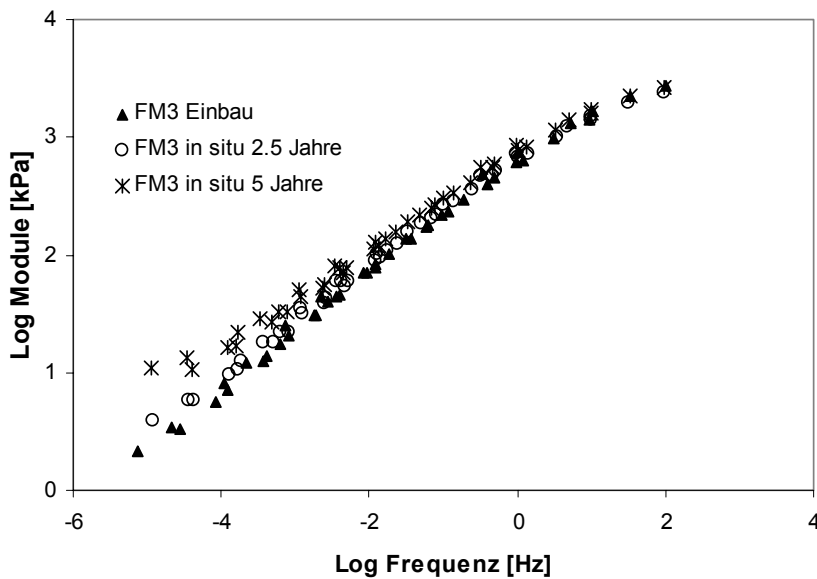


Abbildung 8.3.17: FM3. DSR-WLF-Masterkurven im Vergleich (vom Einbau bis zu 5 Jahren im Betrieb). Referenztemperatur: 15°C

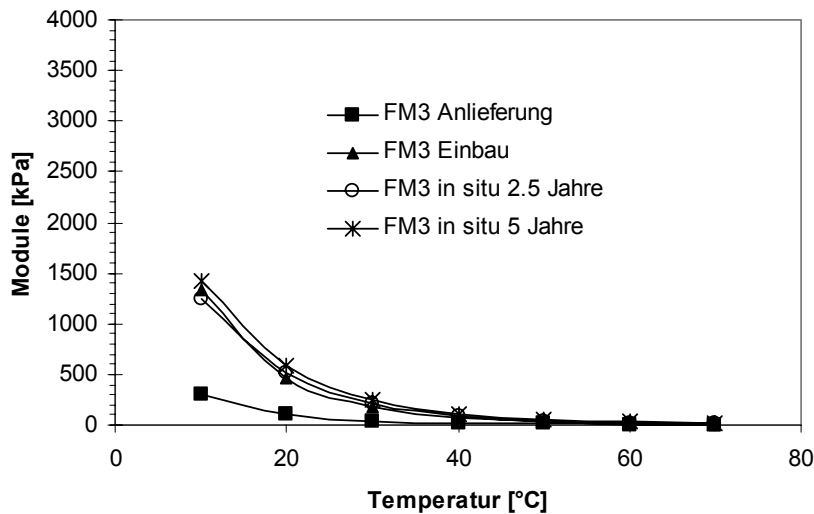


Abbildung 8.3.18: FM3. Temperaturabhängigkeit der Module im DSR bei 1.5Hz von der Anlieferung bis zu 5 Jahren im Betrieb

8.3.4 Zustandsänderung von FM4 im Betrieb

Praxisverhalten/Visuelle Beurteilung am Objekt:

Bei FM4 entstanden im ersten Jahr sehr viele Blasen (*Tabelle 8.3.7* und *Abbildungen 8.3.19* .. *8.3.22*). Bereits ab erstem Jahr wies die Oberfläche von FM4 eine starke Alterung auf (Elefantenhaut auf der Oberfläche). Die Flankenablösungen bei FM4 waren besonders zahlreich (ca. 70% Flankenablösung nach 5 Jahren). Die Fugenvergussmassen konnten zum Teil von Hand aus den Fugen entfernt werden.

Die eingebaute FM4 war nicht gebrauchstauglich.

Alter	Flankenablösung	Risse	Blasen	Visuelle Gesamtbeurteilung und Bemerkungen
1 Jahr	keine	keine	ja	Dicht; Viele Blasen und Schwund durch geplatze Blasen; Elefantenhaut auf Oberfläche der FM
2.5 Jahre	ja	keine	ja	Sehr viele Flankenablösungen (ca. 53 % der Fugen); Die Flankenablösungen waren z.T. durchgehend; Elefantenhaut auf Oberfläche der FM; Wenige Blasen
5 Jahre	ja	keine	ja	Sehr viele Flankenablösungen (ca. 70 % der Fugen); Die Flankenablösungen waren z.T. durchgehend; Elefantenhaut auf Oberfläche der FM; Wenige Blasen

Tabelle 8.3.7: FM4. Ergebnisse der visuellen Beurteilung des Zustandes der Fugenvergussmasse am Objekt



Abbildung 8.3.19: FM4. 1 Jahr nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt

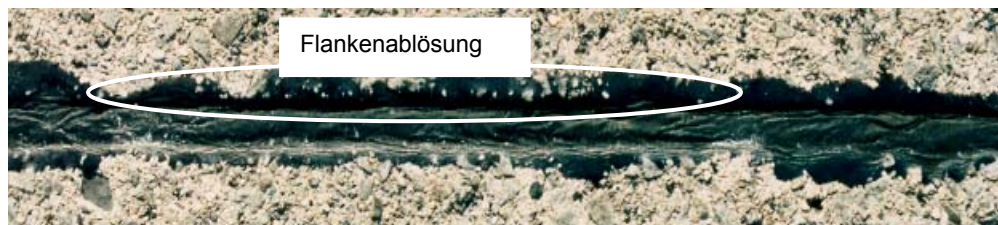


Abbildung 8.3.20: FM4. 2.5 Jahre nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt. Elefantenhautartige Oberfläche der FM4



Abbildung 8.3.21: FM4. 2.5 Jahre nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt. Z.T. durchgehende Flankenablösung



Abbildung 8.3.22: FM4. 5 Jahre nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt

Ergebnisse der Laboruntersuchungen:

Zustand der Polymerkomponenten mittels GPC:

Den Chromatogrammen in *Abbildung 8.3.23* ist zu entnehmen, dass ein Unterschied zwischen dem Polymerzustand der Proben am Objekt und an den Fugenmodellkörpern besteht. Die Polymerkomponenten in den Fugenmodellkörpern wurden durch die Hitze beim Einbau weniger zersetzt, da die Fugenmodellkörper ganz zum Schluss eingebaut wurden, nachdem neue Tränkmass bei Anlieferung zu den restlichen, stark erhitzten Massen im Ofen zugegeben wurde. Der Zustand nach 2.5 und 5 Jahren im Betrieb war etwa gleich.

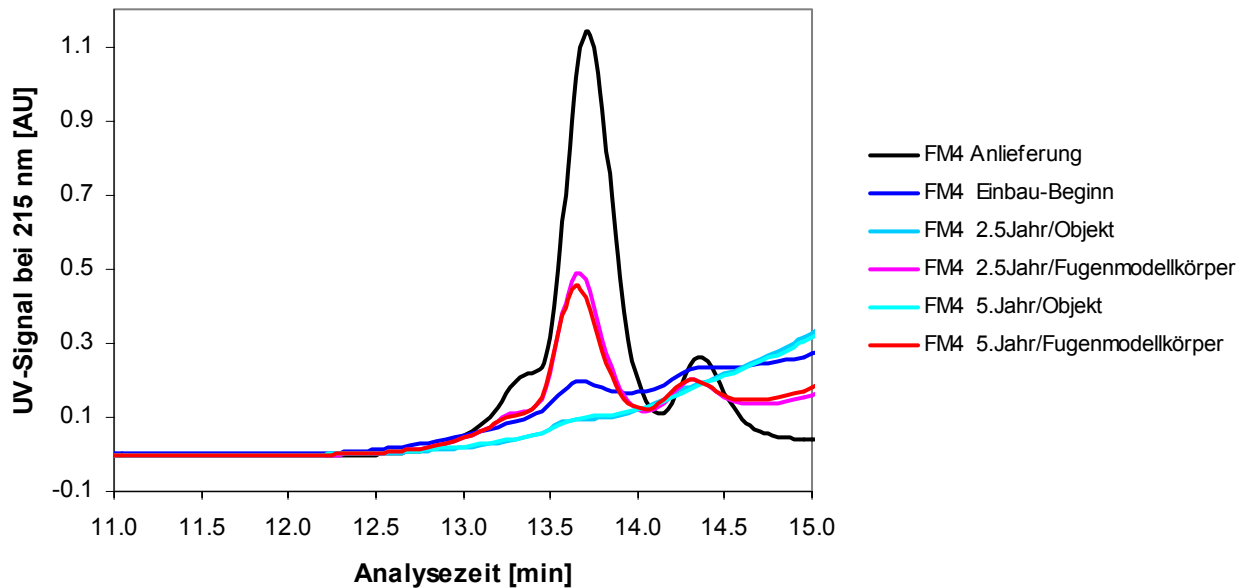


Abbildung 8.3.23: FM4. GPC-Chromatogramme der Proben von der Anlieferung bis zu 5 Jahren im Betrieb

Haftzugprüfung:

Die Ergebnisse der Haftzugprüfung an den Ausschnitten aus den Fugenmodellkörpern, die am Objekt gelagert wurden, sind in *Tabelle 8.3.8* ersichtlich. Bereits nach dem Einbau gab es eine Flankenablösung nach einem kleinen Dehnweg. Einzig der Bohrkern (BK2), aus einer sehr guten Stelle des Objekts, erlitt eine Flankenablösung erst nach 2.0mm Dehnweg. FM4 zeigt verglichen mit FM1, FM2 und FM3 ein atypisches Verhalten, indem mit zunehmendem Alter die maximale Spannung und Dehnung zunimmt. Beachtenswert ist erneut die grosse Streuung der Bohrkern-Werte

Alter	Maximale Fugendehnung bis zur Schädigung [mm]	Schäden		Maximale Kraft [N]	Maximale Spannung [N/mm ²]
		Flankenablösung	Riss in FM		
0. Jahr (MK)	0.1	ja	keiner	<100	<0.1
1. Jahr (MK)	0.1	ja	keiner	200	0.1
2.5. Jahr (MK)	0.4	ja	keiner	1073	0.4
2.5. Jahr (BK1)	0.4	ja	keiner	1367	0.5
2.5. Jahr (BK2)	2.0	ja	keiner	2235	0.8
5. Jahr (MK)	0.4	ja	keiner	1184	0.4

Tabelle 8.3.8: FM4. Ergebnisse der Haftzugprüfung bei -20°C vom 0. bis 5. Jahr im Betrieb

- (MK) Mittelwert aus Doppelbestimmungen an Fugenmodellkörpern
- (BK1) Einzelwert aus Bohrkern mit schlechtem Aussehen der FM (z.B. leichte Flankenablösung oder Blasenbildung)
- (BK2) Einzelwert aus Bohrkern mit gutem Aussehen der FM (weder Flankenablösung noch Blasenbildung)

Mechanische Kennwerte mittels DSR:

Die Ergebnisse der Untersuchungen der mechanischen Kennwerte mittels DSR an FM4 nach 2.5 und 5 Jahren sind im Vergleich zu denjenigen nach dem Einbau in *Abbildung 8.3.24* und *8.3.25* grafisch dargestellt. Die Module nehmen durch die Alterung im Betrieb schon nach 2.5 Jahren fast in allen Temperatur- und Frequenzbereichen rasch zu. Der Modul bei 30°C der Probe nach 5 Jahren stieg um etwa 150%. Nach 5 Jahren hat sich der Modul bei allen Messtemperaturen ausser bei 10°C um das Doppelte erhöht.

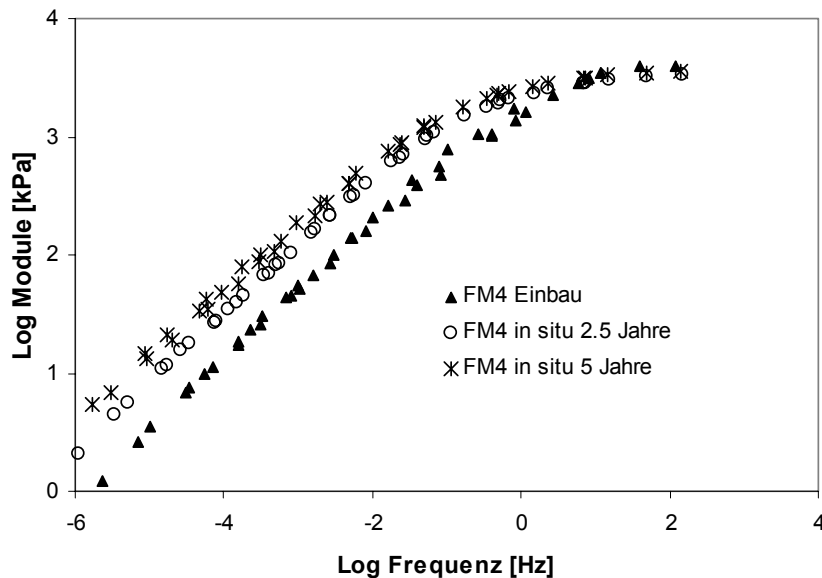


Abbildung 8.3.24: FM4. DSR-WLF-Masterkurven im Vergleich (vom Einbau bis zu 5 Jahren im Betrieb). Referenztemperatur: 15°C

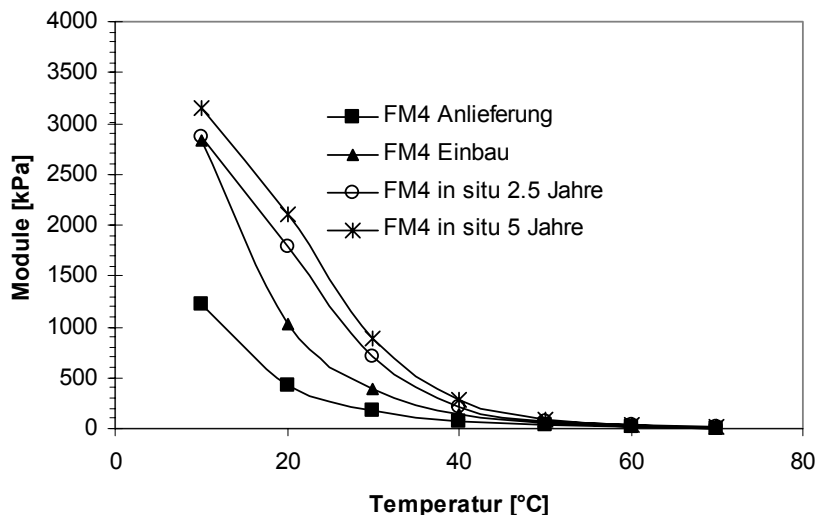


Abbildung 8.3.25: FM4. Temperaturabhängigkeit der G*-Module im DSR bei 1.5Hz von der Anlieferung bis zu 5 Jahren im Betrieb

8.3.5 Zustandsänderung von FM5 im Betrieb

Praxisverhalten/Visuelle Beurteilung am Objekt:

Bei FM5 entstanden im ersten Jahr keine Blasen (*Tabelle 8.3.9* und *Abbildungen 8.3.26 ... 8.3.28*). Undeutliche Flankenablösungen wurden beobachtet. Die Fugenvergussmasse war sehr hart. Nach 2.5 Jahren wurden sehr viele Flankenablösungen (bis ca. 62% der Fugen) festgestellt.

Die FM5 war somit nicht gebrauchstauglich.

Alter	Flankenablösung	Risse	Blasen	Visuelle Gesamtbeurteilung und Bemerkungen
1 Jahr	keine	keine	keine	Dicht; Sehr harte Fugenvergussmasse; wenige undeutliche Flankenablösungen; Sonst in Ordnung
2.5 Jahre	ja	keine	ja	Sehr viele Flankenablösungen (ca. 62 % der Fugen); Die Flankenablösungen waren z.T. durchgehend; Wenige Blasen; Sehr harte Fugenvergussmasse
5 Jahre	ja	keine	ja	Sehr viele Flankenablösungen (ca. 65 % der Fugen); Die Flankenablösungen waren z.T. durchgehend; Wenige Blasen; Sehr harte Fugenvergussmasse

Tabelle 8.3.9: FM5: Ergebnisse der visuellen Beurteilung des Zustandes der Fugenvergussmasse am Objekt

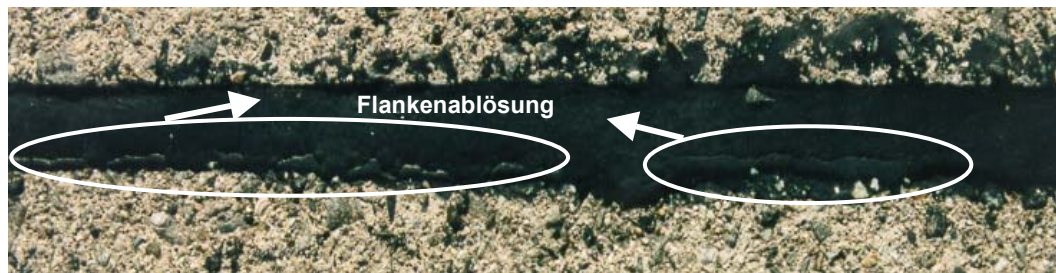


Abbildung 8.3.26: FM5. 1 Jahr nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt

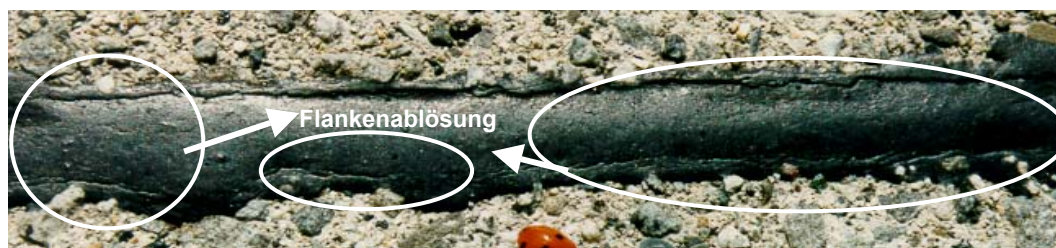


Abbildung 8.3.27: FM5. 2.5 Jahre nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt. Z.T. durchgehende Flankenablösung



Abbildung 8.3.28: FM5. 5 Jahre nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt. Z.T. durchgehende Flankenablösung

Ergebnisse der Laboruntersuchungen:

Zustand der Polymerkomponenten mittels GPC:

Aus den Chromatogrammen in *Abbildung 8.3.29* geht hervor, dass keine bedeutende Zersetzung der Polymerkomponenten von FM5 nach 2.5 und 5 Jahren im Betrieb stattfand.

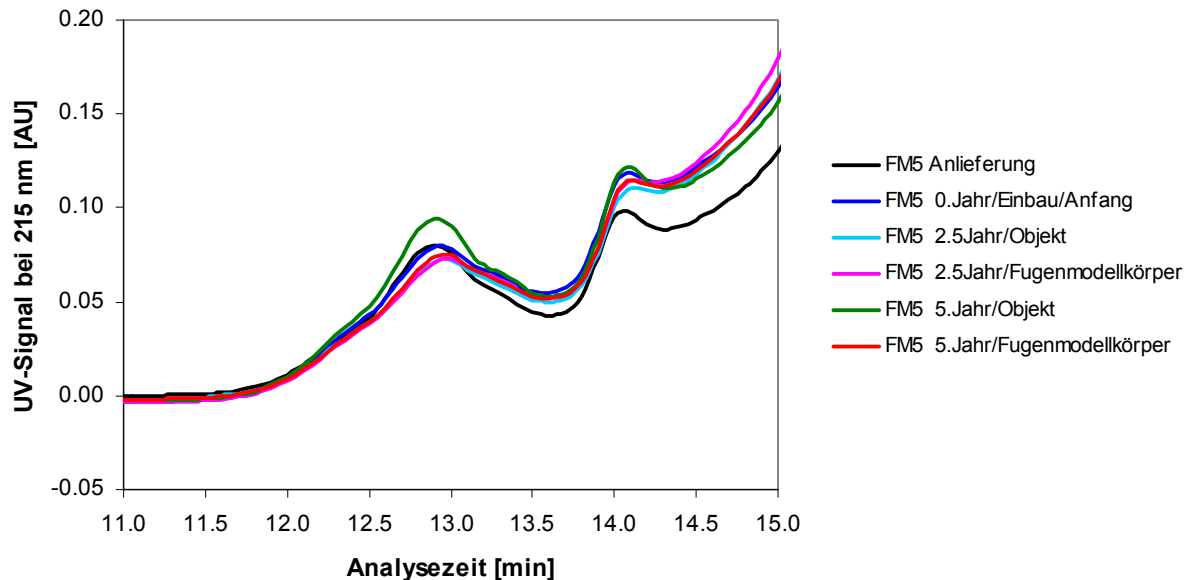


Abbildung 8.3.29: FM5. GPC-Chromatogramme der Proben von der Anlieferung bis zu 5 Jahren im Betrieb

Haftzugprüfung:

Die Ergebnisse der Haftzugprüfung an den Ausschnitten aus den Fugenmodellkörpern, die am Objekt gelagert wurden, sind in *Tabelle 8.3.10* ersichtlich. Bereits nach dem Einbau gab es eine Flankenablösung nach einem kleinen Dehnweg. Einzig der Bohrkern (BK2), entnommen an einer sehr guten Stelle aus dem Objekt, erlitt eine Flankenablösung erst nach 1.8mm Dehnweg. Die Werte nach 1 Jahr müssen als zu tief angesehen werden. Erneut ist die grosse Streuung zwischen Bohrkernen und Fugenmodellkörpern bemerkenswert.

Alter	Maximale Fugendehnung bis zur Schädigung [mm]	Schäden		Maximale Kraft [N]	Maximale Spannung [N/mm ²]
		Flankenablösung	Riss in FM		
0. Jahr (MK)	0.4	ja	keiner	1533	0.5
1. Jahr (MK)	0.1	ja	keiner	267	0.1
2.5. Jahr (MK)	0.7	ja	keiner	1063	0.4
2.5. Jahr (BK1)	1.1	ja	keiner	927	0.3
2.5. Jahr (BK2)	1.8	ja	keiner	1400	0.5
5. Jahr (MK)	0.3	ja	keiner	1789	0.6

Tabelle 8.3.10: FM5. Ergebnisse der Haftzugprüfung bei -20°C vom 0. bis 5. Jahr im Betrieb

- (MK) Mittelwert aus Doppelbestimmungen an Fugenmodellkörpern
- (BK1) Einzelwert aus Bohrkern mit schlechtem Aussehen der FM (z.B. leichte Flankenablösung oder Blasenbildung)
- (BK2) Einzelwert aus Bohrkern mit gutem Aussehen der FM (weder Flankenablösung noch Blasenbildung)

Mechanische Kennwerte mittels DSR:

Die Ergebnisse der Untersuchungen der mechanischen Kennwerte mittels DRS an FM5 nach 2.5 und 5 Jahren sind im Vergleich zu denjenigen nach dem Einbau in *Abbildung 8.3.30* und *8.3.31* grafisch dargestellt. Bei den Proben nach 2.5 und 5 Jahren im Betrieb erhöhten sich die Module gegenüber den Einbauwerten fast in allen Temperatur- und Frequenzbereichen sehr stark (*Abbildung 8.3.30*), was auf eine Verhärtung der Fugenvergussmasse hindeutet. Oberhalb von 30°C wurde der Module nach einer Betriebsdauer von 5 Jahren verdoppelt.

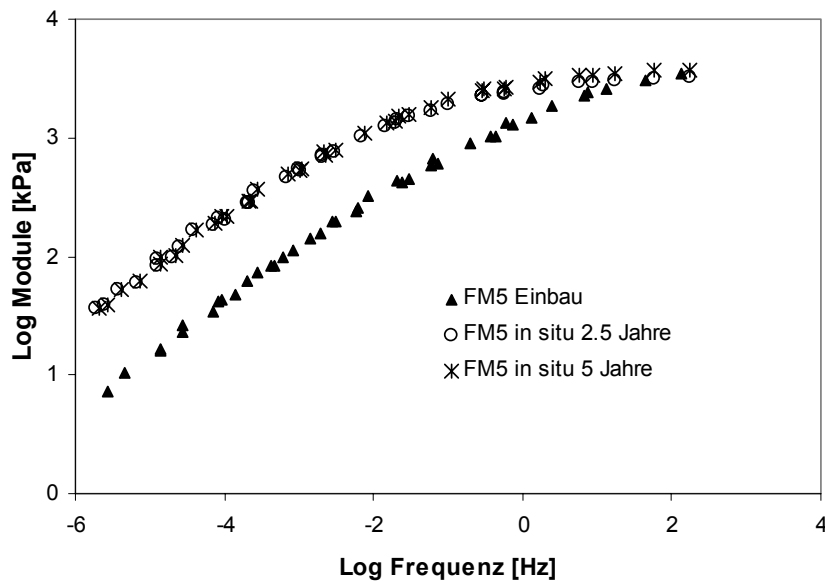


Abbildung 8.3.30: FM5. DSR-WLF-Masterkurven im Vergleich (vom Einbau bis zu 5 Jahren im Betrieb). Referenztemperatur: 15°C

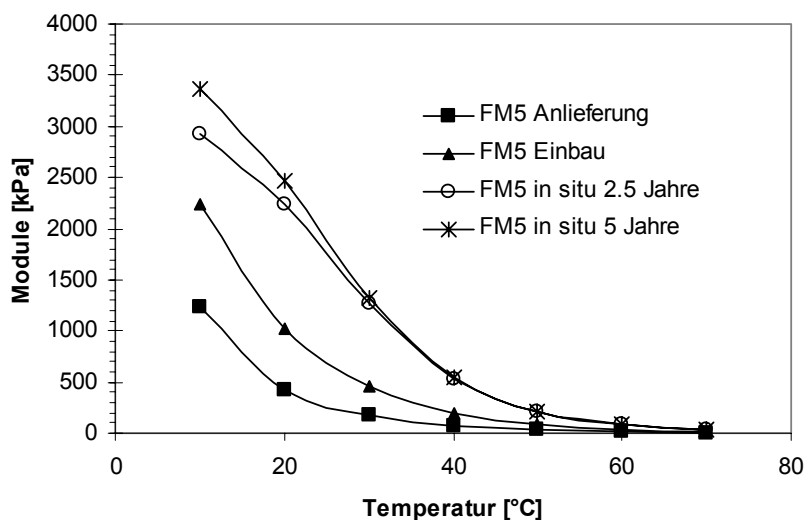


Abbildung 8.3.31: FM5. Temperaturabhängigkeit der Module im DSR bei 1.5Hz von der Anlieferung bis zu 5 Jahren im Betrieb

8.3.6 Zustandsänderung von FM6 im Betrieb

Praxisverhalten/Visuelle Beurteilung am Objekt:

Bei FM6 entstanden sehr wenige Blasen und Flankenablösungen (*Tabelle 8.3.11* und *Abbildungen 8.3.32 ... 8.3.34*). Nach fünf Jahren waren nur etwa 3% der Fugen von den Flanken abgelöst. Diese Flankenablösungen befanden sich meistens am Strassenrand und bei den Fugen mit Stufenbildung (die in Fahrrichtung vordere Betonplatte war im Fugenbereich ca. 1mm ... 2mm tiefer als die hintere Betonplatte).

Entsprechend konnte FM6 nach fünf Jahren Betrieb nur als bedingt gebrauchstauglich bezeichnet werden.

Alter	Flankenablösung	Risse	Blasen	Visuelle Gesamtbeurteilung und Bemerkungen
1 Jahr	keine	keine	keine	Dicht, in Ordnung
2.5 Jahre	ja	keine	ja	Flankenablösung ca. 2 % der Fugen; Die Flankenablösungen befanden sich meistens bei den Fugen mit Stufenbildung *) und am Rand der Strasse; Wenige feine Bläschen
5 Jahre	ja	keine	ja	Flankenablösung ca. 3 % der Fugen; Die Flankenablösungen befanden sich meistens bei den Fugen mit Stufenbildung *) und am Rand der Strasse; Wenige feine Bläschen

Tabelle 8.3.11: FM6. Ergebnisse der visuellen Beurteilung des Zustandes der Fugenvergussmasse am Objekt

*) Die in Fahrrichtung vordere Betonplatte war im Fugenbereich ca. 2mm tiefer als die hintere Betonplatte.



Abbildung 8.3.32: FM6. 1 Jahr nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt



Abbildung 8.3.33: FM6. 2.5 Jahre nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt



Abbildung 8.3.34: FM6. 5 Jahre nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt

Ergebnisse der Laboruntersuchungen:

Zustand der Polymerkomponenten mittels GPC:

Innerhalb von fünf Jahren im Betrieb blieben die Polymerkomponenten von FM6 verglichen mit dem Einbauzustand praktisch unverändert (siehe Chromatogramme in *Abbildung 8.3.35*).

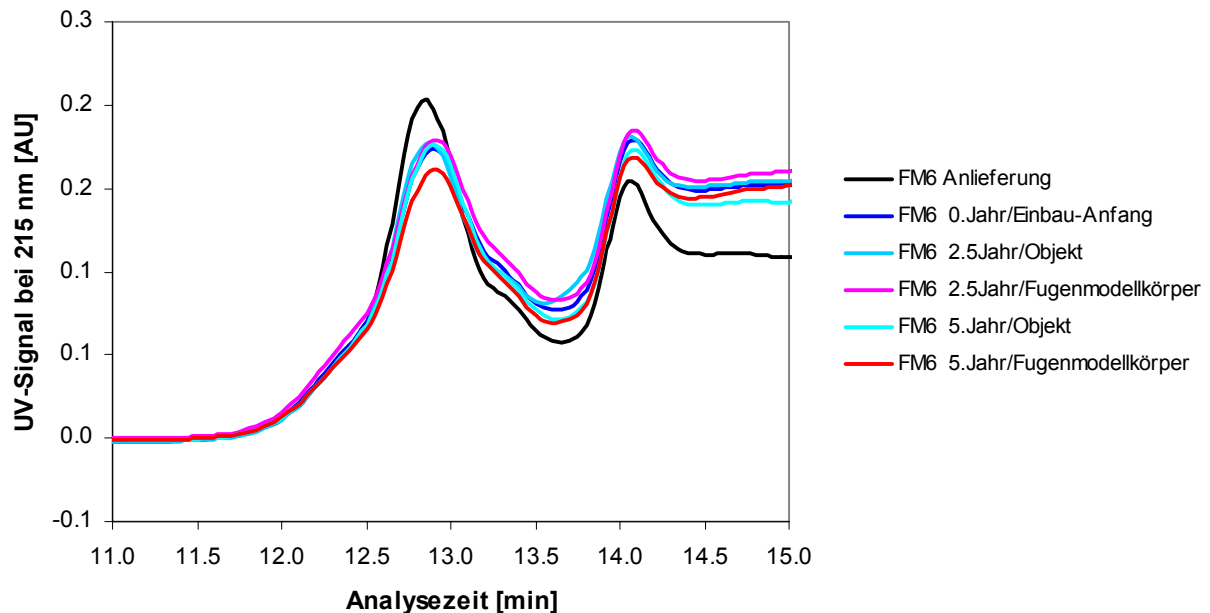


Abbildung 8.3.35: FM6. GPC-Chromatogramme der Proben von der Anlieferung bis zu 5 Jahren im Betrieb

Haftzugprüfung:

Die Ergebnisse der Haftzugprüfung an den Ausschnitten aus den Fugenmodellkörpern, die am Objekt gelagert wurden, sind in *Tabelle 8.3.12* ersichtlich. Nach dem Einbau war die FM6 bei -20°C sehr elastisch und haftete gut an den Fugenflanken. Die Flankenablösung fand erst nach 8mm Dehnweg statt. Nach 5 Jahren entstand nach 4.1mm Dehnweg eine Flankenablösung. Das Material wurde mit der Zeit härter (maximale Haftzugspannung 0.2N/mm^2 nach dem Einbau und 0.7N/mm^2 nach 5 Jahren).

Alter	Maximale Fugendehnung bis zur Schädigung [mm]	Schäden		Maximale Kraft [N]	Maximale Spannung [N/mm ²]
		Flankenablösung	Riss in FM		
0. Jahr (MK)	8.0	ja	keiner	667	0.2
1. Jahr (MK)	8.0	ja	keiner	670	0.2
2.5. Jahr (MK)	2.4	ja	keiner	1612	0.5
2.5. Jahr (BK1)	3.5	ja	keiner	1204	0.4
2.5. Jahr (BK2)	5.4	ja	keiner	2275	0.8
5. Jahr (MK)	4.1	ja	keiner	2115	0.7

Tabelle 8.3.12: FM6. Ergebnisse der Haftzugprüfung bei -20°C vom 0. bis 5. Jahr im Betrieb

(MK) Mittelwert aus Doppelbestimmungen an Fugenmodellkörpern

(BK1) Einzelwert aus Bohrkern mit schlechtem Aussehen der FM (z.B. leichte Flankenablösung oder Blasenbildung)

(BK2) Einzelwert aus dem Bohrkern mit gutem Aussehen der FM (weder Flankenablösung noch Blasenbildung)

Mechanische Kennwerte mittels DSR:

Die Ergebnisse der Untersuchungen der mechanischen Kennwerte mittels DRS an FM6 nach 2.5 und 5 Jahren sind im Vergleich zu denjenigen nach dem Einbau in *Abbildung 8.3.36* und *8.3.37* grafisch dargestellt. Nach 2.5 Jahren nahmen die Module drastisch zu, was auf eine rasche Verhärtung der Fugenvergussmasse hindeutet. Zwischen dem Zustand nach 2.5 und 5 Jahren sind keine bedeutende Moduländerung festgestellt worden (*Abbildung 8.3.36*). Der Modul bei 10°C und 1.5Hz hat sich nach einer Betriebsdauer von 5 Jahren fast um das Dreifache erhöht.

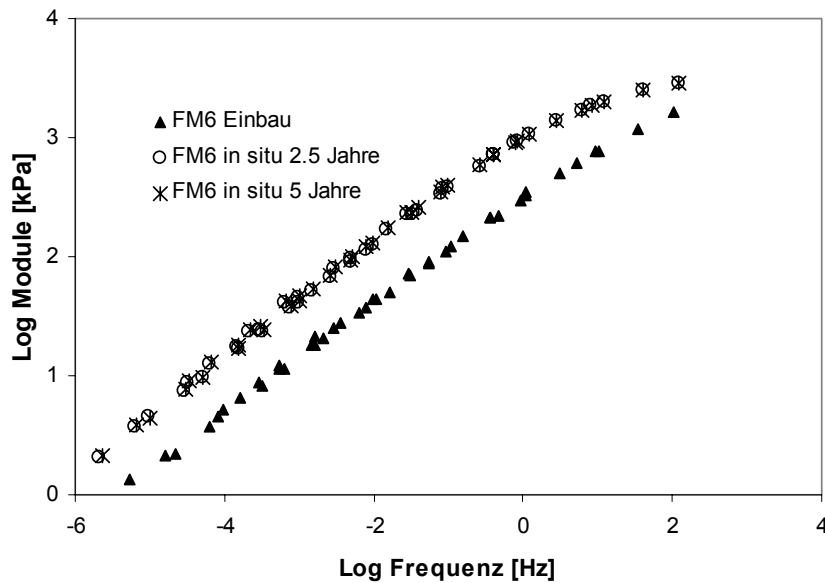


Abbildung 8.3.36: FM6. DSR-WLF-Masterkurven im Vergleich (vom Einbau bis zu 5 Jahren im Betrieb). Referenztemperatur: 15°C

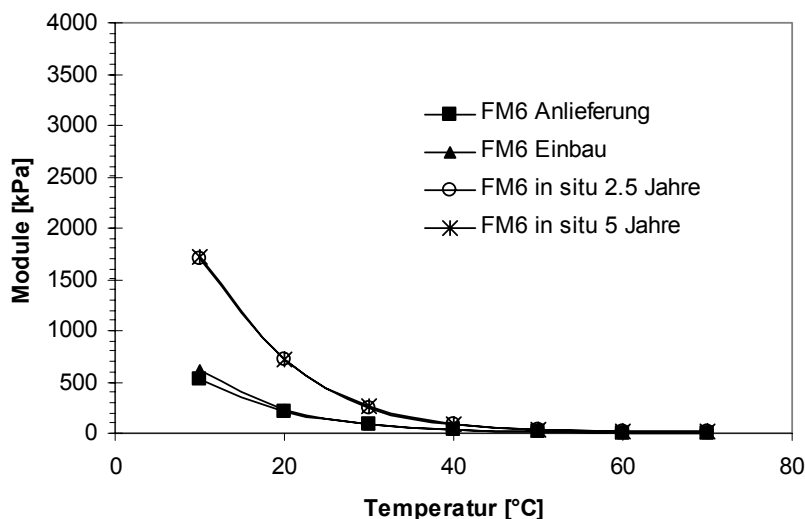


Abbildung 8.3.37: FM6. Beispiele der Module im DSR bei 1.5Hz von der Anlieferung bis zu 5 Jahren im Betrieb

8.3.7 Zustandsänderung von FM7 im Betrieb

Praxisverhalten/Visuelle Beurteilung am Objekt:

Bei FM7 entstanden sehr viele Blasen (*Tabelle 8.3.13, Abbildungen 8.3.38 ... 8.3.40*). Flankenablösungen wurden erst nach 5 Jahren beobachtet. Nach fünf Jahren waren etwa 3% der Fugen von den Flanken abgelöst. Diese Flankenablösungen befanden sich meistens am Strassenrand und bei den Fugen mit Stufenbildung (die in Fahrrichtung vordere Betonplatte war im Fugenbereich ca. 1mm ... 2mm tiefer als die hintere Betonplatte).

Die FM7 konnte nach fünf Jahren Betrieb als bedingt gebrauchstauglich bezeichnet werden.

Alter	Flankenablösung	Risse	Blasen	Visuelle Gesamtbeurteilung und Bemerkungen
1 Jahr	keine	keine	ja	Dicht; Viele lange Blasen mit z.T. feinen Löchern (geplatzte Blasen)
2.5 Jahre	keine	keine	ja	Keine sichtbare Flankenablösung; Viele Blasen; Sehr wenige Abstreung vorhanden
5 Jahre	ja	keine	ja	Flankenablösung ca. 3% der Fugen; Die Flankenablösungen befanden sich meistens bei den Fugen mit Stufenbildung *) und am Rand der Strasse; Viele feine Blasen; Sehr wenige Abstreung vorhanden

Tabelle 8.3.13: FM7. Ergebnisse der visuellen Beurteilung des Zustandes der Fugenvergussmasse am Objekt

*) Die in Fahrrichtung vordere Betonplatte war im Fugenbereich ca. 2mm tiefer als die hintere Betonplatte.



Abbildung 8.3.38: FM7. 1 Jahr nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt



Abbildung 8.3.39: FM7. 2.5 Jahre nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt

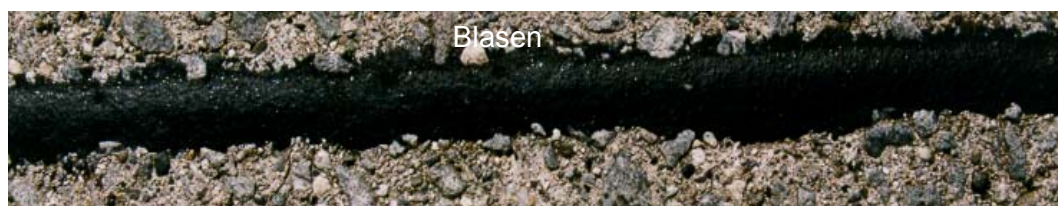


Abbildung 8.3.40: FM7. 5 Jahre nach dem Einbau. Aussehen der Fuge am Objekt. Abstreung kaum noch vorhanden

Ergebnisse der Laboruntersuchungen:

Zustand der Polymerkomponenten mittels GPC:

Innerhalb von fünf Jahren im Betrieb blieben die Polymerkomponenten von FM7 praktisch unverändert (siehe Chromatogramme in *Abbildung 8.3.41*).

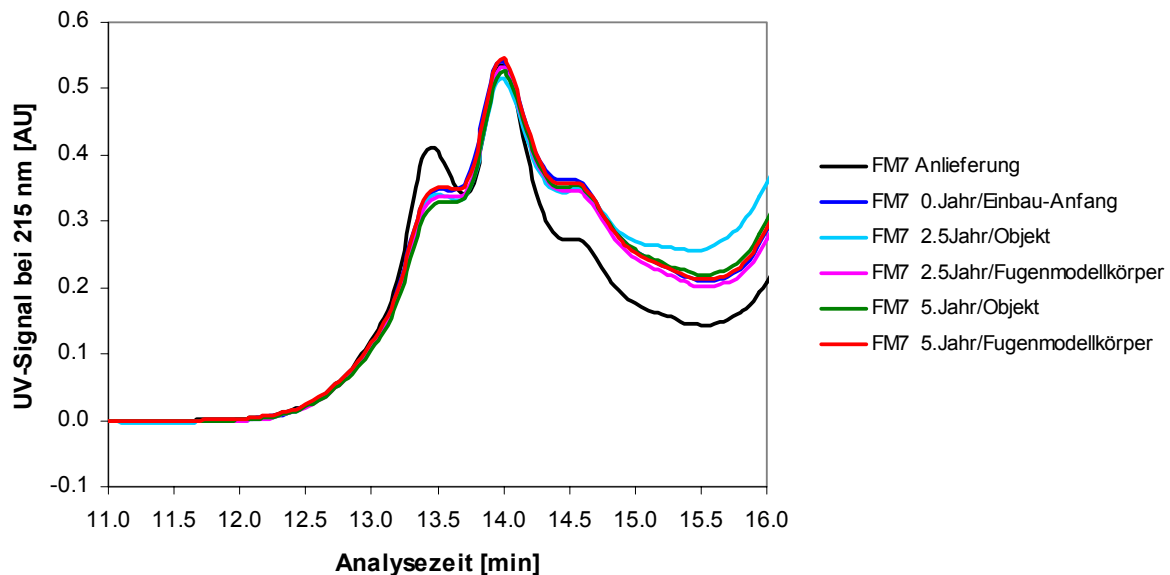


Abbildung 8.3.41: FM7. GPC-Chromatogramme der Proben von der Anlieferung bis zu 5 Jahren im Betrieb

Haftzugprüfung:

Die Ergebnisse der Haftzugprüfung an den Ausschnitten aus den Fugenmodellkörpern, die am Objekt gelagert wurden, sowie an den Bohrkernen aus der Strasse sind in *Tabelle 8.3.14* ersichtlich. Nach dem Einbau war FM7 bei -20°C sehr elastisch und haftete gut an den Fugenflanken. Eine Flankenablösung fand erst nach 9mm Dehnweg statt. Nach 5 Jahren erfolgte nach 4.5mm Dehnweg eine Flankenablösung. Das Material wurde mit der Zeit härter (maximale Haftzugspannung 0.3N/mm^2 nach dem Einbau und 1.0N/mm^2 nach 5 Jahren). Bemerkenswert ist erneut die extrem grosse Streuung der bei Bohrkernen.

Alter	Maximale Fugendehnung bis zur Schädigung [mm]	Schäden		Maximale Kraft [N]	Maximale Spannung [N/mm ²]
		Flankenablösung	Riss in FM		
0. Jahr (MK)	9.0	ja	keiner	833	0.3
1. Jahr (MK)	9.0	ja	keiner	667	0.2
2.5. Jahr (MK)	5.8	ja	keiner	2072	0.7
2.5. Jahr (BK1)	2.2	ja	keiner	722	0.2
2.5. Jahr (BK2)	5.8	ja	keiner	2623	0.9
5. Jahr (MK)	4.5	ja	keiner	3014	1.0

Tabelle 8.3.14: FM7. Ergebnisse der Haftzugprüfung bei -20°C vom 0. bis 5. Jahr im Betrieb

- (MK) Mittelwert aus Doppelbestimmungen an Fugenmodellkörpern
- (BK1) Einzelwert aus Bohrkern mit schlechtem Aussehen der FM (z.B. leichte Flankenablösung oder Blasenbildung)
- (BK2) Einzelwert aus Bohrkern mit gutem Aussehen der FM (weder Flankenablösung noch Blasenbildung)

Mechanische Kennwerte mittels DSR:

Die Ergebnisse der Untersuchungen der mechanischen Kennwerte mittels DRS an FM7 nach 2.5 und 5 Jahren sind im Vergleich zu denjenigen nach dem Einbau in *Abbildung 8.3.42* und *8.3.43* grafisch dargestellt. Durch die Bewitterung erhöhten sich die Module bereits nach 2.5 Jahren, was auf eine rasche jedoch verglichen mit FM6 schwächere Verhärtung der Fugenvergussmasse hindeutet. Der Modul bei 10°C und 1.5Hz hat sich nach einer Betriebsdauer von 5 Jahren um ca. 67% erhöht.

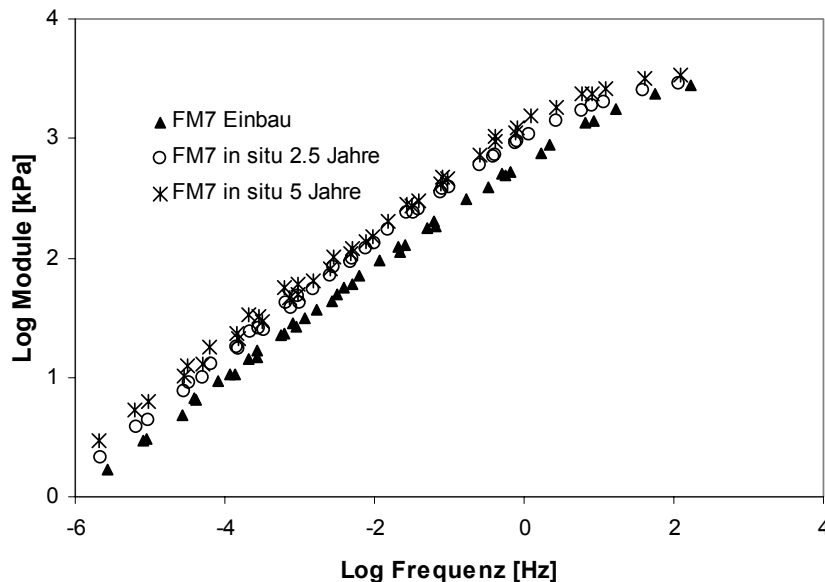


Abbildung 8.3.42: FM7. DSR-WLF-Masterkurven im Vergleich (vom Einbau bis zu 5 Jahren im Betrieb). Referenztemperatur: 15°C

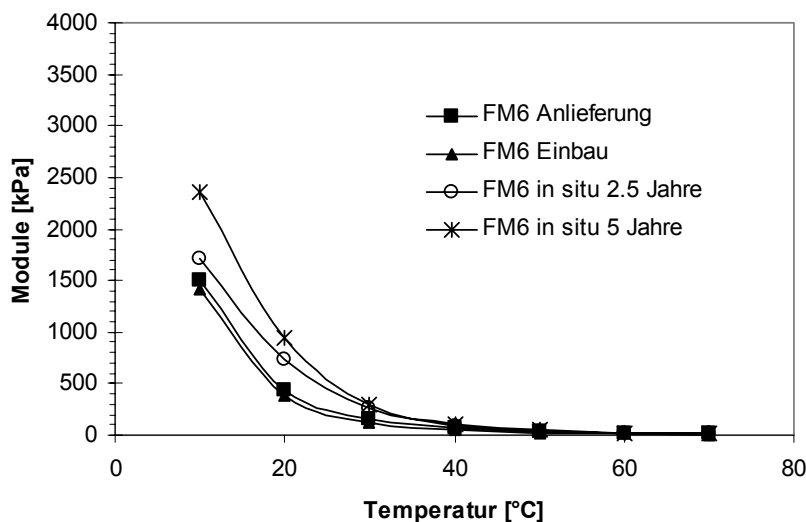


Abbildung 8.3.43: FM7. Temperaturabhängigkeit der Module im DSR bei 1.5Hz von der Anlieferung bis zu 5 Jahren im Betrieb

8.3.8 Diskussionen und Folgerungen

Flankenablösungen:

Nach fünf Jahren konnte keine der untersuchten Fugenvergussmassen als sehr gut bezeichnet werden. Drei der sieben Fugenvergussmassen konnten jedoch als bedingt gebrauchstauglich bewertet werden, namentlich FM3, FM6 und FM7. Bei diesen drei Fugenvergussmassen gab es nach fünf Jahren im Betrieb Flankenablösungen nur etwa bei 3% der Fugen. Es ist zu bemerken, dass diese Flankenablösungen ausschliesslich bei den Fugen mit Stufenbildungen (Höhenunterschied von 2 bis 3mm) auftraten. Bei den Fugenvergussmassen FM1, FM2, FM4 und FM5 entstanden Flankenablösungen bei 15% bis 70% der Fugen. Vermutlich spielten dabei die SBS-Polymeranteile eine bedeutende Rolle.

FM3, FM6 und FM7:

Diese drei besten Fugenvergussmassen enthielten nach dem Einbau am meisten SBS-Polymeranteile und zeigten im Vergleich zur Anlieferung bei GPC-Untersuchung einen geringen Abbau der Polymere (zwischen 4.2 und 6.6 Flächen-% in Bezug auf die Mischung Bitumen-Polymer; *Tabelle 8.3.15*). Die Elastizität sowie die Haftfestigkeit der drei Fugenvergussmassen im Betrieb war auch bedeutend höher im Vergleich zu denjenigen FM1, FM2, FM4 und FM5 (*Tabelle 8.3.16*) und könnten deswegen auf die Polymeranteile nach dem Einbau zurückgeführt werden. Dies könnte der Grund für die wenigen Flankenablösungen sein.

FM1, FM2, FM4 und FM5:

Diese vier langfristig nicht gebrauchstauglichen Fugenvergussmassen enthielten nach dem Einbau nur noch wenige SBS-Polymeranteile (zwischen 1.1 und 3.0 Flächen-% bezogen auf die Mischung Bitumen-Polymer). Dies könnte der Grund für die vielen Flankenablösungen sein. Die FM1 und FM4 hatten im Anlieferungszustand relative hohe Polymeranteile, die aber durch den Einbau sehr stark abgebaut wurden (*Tabelle 8.3.15*). FM5 enthielt bei Anlieferung sehr wenige SBS-Polymere und hatte nach fünf Jahren die meisten Flankenablösungen (bis 70% der Fugen). FM1 hatte vor dem Einbau einen sehr hohen Anteil an SBS-Polymer (8.6 Flächen-%), wovon etwa 74% durch den Einbau abgebaut wurden. Beim Polymerabbau entstanden kleinere Polymermoleküle, die weniger elastisch waren, aber z.T. die Elastizität der Fugenvergussmasse im Betrieb beeinflussten. Deswegen bildeten sich Flankenablösungen nur etwa an 15% der Fugen, obwohl der Anteil der SBS-Polymere nach dem Einbau mit 2.3 Flächen-% geringer war als bei FM5.

FM	Anteile der SBS-Polymere in der Fugenvergussmasse (GPC-Untersuchung) [Flächen-%]		Flankenablösungen am Objekt nach 5 Jahren [% der Fugen]
	bei Anlieferung	nach Einbau-Beginn und -Ende	
FM1	8.6	2.3	ca. 15
FM2	4.6	1.8	ca. 30
FM3	7.9	6.1	ca. 3
FM4	6.2	1.1 (Einbau-Beginn) / 2.4 (-Ende) *)	ca. 70
FM5	3.7	2.9 (Einbau-Beginn) / 3.2 (-Ende) *)	ca. 65
FM6	4.8	4.2	ca. 3
FM7	8.9	6.6	ca. 3

Tabelle 8.3.15: Anteile der SBS-Polymere in den Fugenvergussmassen

*) Durch Zugabe neuen Materials in den Kocher erhöhte sich der Polymeranteil

Alter	Maximale Fugendehnung bis zur Schädigung [mm]	Maximale Spannung [N/mm ²]	Maximale Fugendehnung bis zur Schädigung [mm]	Maximale Spannung [N/mm ²]	Maximale Fugendehnung bis zur Schädigung [mm]	Maximale Spannung [N/mm ²]	Maximale Fugendehnung bis zur Schädigung [mm]	Maximale Spannung [N/mm ²]
	FM1		FM2		FM3		FM4	
0. Jahr (MK)	6.0	0.3	1.3	0.3	12.0	0.1	0.1	<0.1
1. Jahr (MK)	4.0	0.3	0.7	0.6	10.0	0.2	0.1	0.1
2.5. Jahr (MK)	3.5	0.5	0.6	0.5	3.5	0.8	0.4	0.4
2.5. Jahr (BK1)	3.0	0.7	1.2	1.0	3.8	0.7	0.4	0.5
2.5. Jahr (BK2)	3.3	0.5	1.7	0.9	7.4	0.8	2.0	0.8
5. Jahr (MK)	1.2	0.6	0.8	0.5	3.3	0.7	0.4	0.4
	FM5		FM6		FM7			
0. Jahr (MK)	0.4	0.5	8.0	0.2	9.0	0.3		
1. Jahr (MK)	0.1	0.1	8.0	0.2	9.0	0.2		
2.5. Jahr (MK)	0.7	0.4	2.4	0.5	5.8	0.7		
2.5. Jahr (BK1)	1.1	0.3	3.5	0.4	2.2	0.2		
2.5. Jahr (BK2)	1.8	0.5	5.4	0.8	5.8	0.9		
5. Jahr (MK)	0.3	0.6	4.1	0.7	4.5	1.0		

Tabelle 8.3.16: FM1 ... FM7. Ergebnisse der Haftzugprüfung vom Einbau bis 5. Jahr im Betrieb

- (MK) Mittelwert aus Doppelbestimmungen der Fugenmodellkörper
- (BK1) Einzelwert aus Bohrkern mit schlechtem Aussehen der FM (z.B. leichte Flankenablösung oder Blasenbildung)
- (BK2) Einzelwert aus Bohrkern mit gutem Aussehen der FM (weder Flankenablösung noch Blasenbildung)

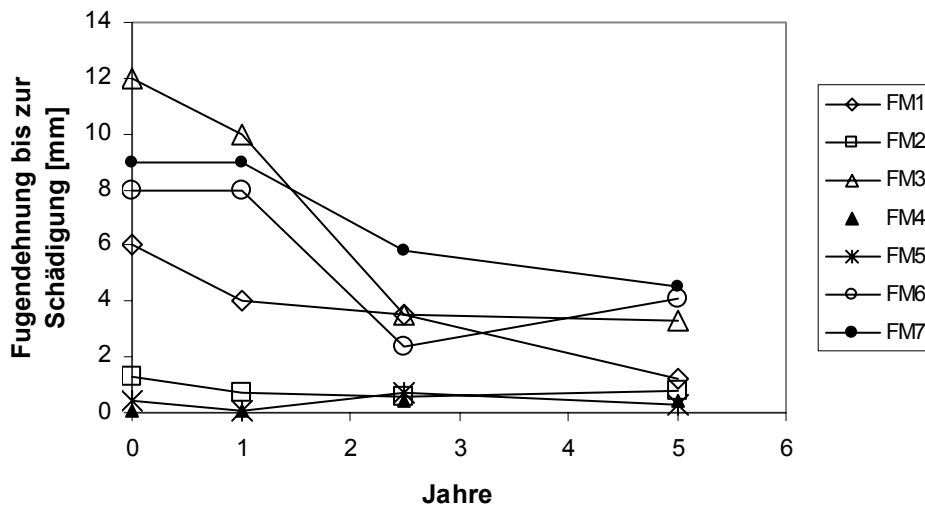


Abbildung 8.3.44: Fugendehnung bis zur Schädigung infolge Haftzugprüfung bei -20°C an den Modellkörpern in Funktion des Alters, d.h. vom Einbau bis zum 5. Jahr Lagerung

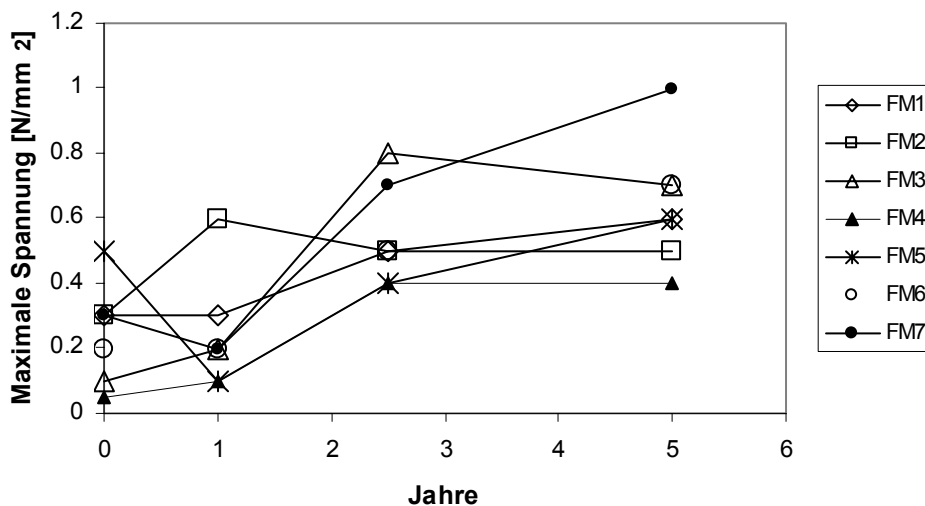


Abbildung 8.3.45: Maximale Spannung infolge Haftzugprüfung bei -20°C an den Modellkörpern in Funktion des Alters, d.h. vom Einbau bis zum 5. Jahr Lagerung

Vergleich zwischen Haftzugfestigkeit am Objekt und am Fugenmodellkörper:

Die Flankenhaftung an den Bohrkernen aus der Strasse und an den Prüfkörperausschnitten der Fugenmodellkörper bewegte sich nach 2.5 Jahren mehrheitlich in der gleichen Grössenordnung (gleich gut oder gleich schlecht).

Quantitativ lagen die Haftzugwerte der Bohrkern aus der Strasse ein wenig höher als bei den Fugenmodellkörpern. Die Prüfkörper FM3 und FM6 bildeten eine Ausnahme (Tabelle 8.3.16), indem die Werte der Bohrkern aus der Strasse etwa doppel so hoch waren wie bei den Fugenmodellkörpern. Die höheren Haftzugwerte der Bohrkern aus der Strasse könnten durch das Walzen des Verkehrs bedingt sein.

Blasenbildungen:

Blasenbildungen in den Fugenvergussmassen sind Schäden, welche die Gebrauchstauglichkeit während der Lebensdauer beeinträchtigen können. Die Blasen platzen z.T. im Sommer und sind mit Schwunderscheinigungen gekoppelt (siehe Beispiele in den *Abbildungen* 8.3.7 und 8.3.8). Wenn sich die Blasen unmittelbar an der Flanke bilden, wird an dieser Stelle der Verbund beeinträchtigt.

Das Blasenbildungsverhalten der untersuchten sieben Fugenvergussmassen erwies sich als sehr unterschiedlich. Die meisten Blasen am Objekt wurden bei den Fugenvergussmassen FM2, FM3 und FM7 beobachtet. An den Fugenmodellkörpern wurden Blasenbildungen bei allen Fugenvergussmassen mit Ausnahme von FM1 festgestellt (siehe *Tabelle 8.3.17*).

Alter [Jahr]	FM1		FM2		FM3		FM4		FM5		FM6		FM7	
	Objekt	MK	Objekt	MK	Objekt	MK	Objekt	MK	Objekt	MK	Objekt	MK	Objekt	MK
1	k	w	v	v	w	v	v	v	k	v	k	k	v	v
2.5	k	w	v	v	w	v	v	v	w	v	w	v	v	v
5	w	w	v	v	w	v	v	v	w	v	w	v	v	v

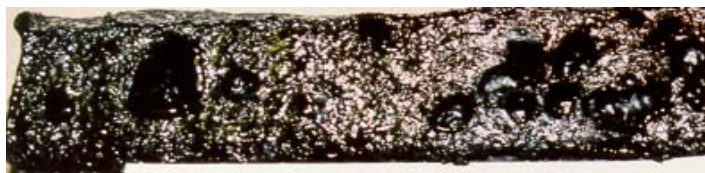
Tabelle 8.3.17: FM1 ... FM7. Blasenbildungen am Objekt und an den Fugenmodellkörpern
k: keine w: wenige v: viele MK: Fugenmodellkörper

Blasenbildungen können entstehen durch:

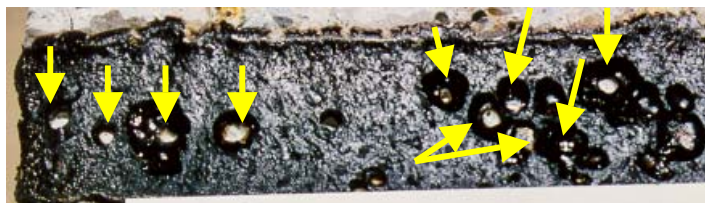
- eine Konzentration von Betonfeuchte an den Fugenflanken,
- Anwesenheit restlichen Lösungsmittels aus dem Voranstrich,
- Vorhandensein gasbildender Komponenten in der Fugenvergussmasse,
- Lufteinschlüsse bzw. Hohlräume in der Fugenvergussmasse.

Blasenbildung durch Konzentration von Betonfeuchte an den Fugenflanken:

Bei den Fugenmodellkörpern war der Zusammenhang zwischen der Flankenbeschaffenheit und der Blasenbildung der Fugenvergussmassen eindeutig. Die Blasen entstanden genau dort, wo sich kleine Löcher an den Fugenflanken des Betons befanden (*Abbildungen* 8.3.46 und 8.3.47). Solche vertikal zur Fuge liegenden Hohlräume im Beton lassen sich nicht vollflächig mit Voranstrich benetzen und beim Fugeneinbau auch nicht vollständig mit Fugenvergussmasse verfüllen. Nach dem Einbau entstanden an solchen Hohlstellen Blasenkeime, die danach im Betrieb durch den Einfluss von Temperatur und Wasserdampfdruck wuchsen und zu Blasen in der Fugenvergussmasse führten.

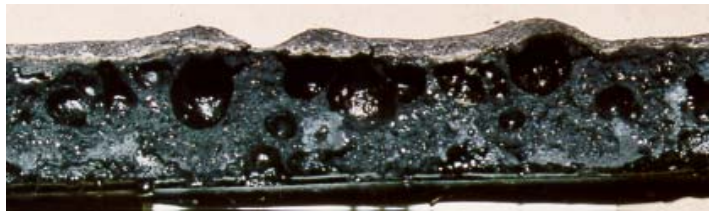


Flanke der Fugevergussmasse



Betonseitige Fugeflanke

Abbildung 8.3.46: FM3. Blasenbildung am Fugenmodellkörper nach 5 Jahren Bewitterung. Gegenüberliegende Kontaktfläche zwischen Fugenvergussmasse und Betonflanke des Fugenmodellkörpers. An der betonseitigen Fuge sind Hohlräume mit weissen Flecken erkennbar, die beim Einbau nicht mit Fugenvergussmasse gefüllt wurden.



Flanke der Fugenvergussmasse



Betonseitige Fugenflanke

Abbildung 8.3.47: FM5. Blasenbildung am Fugenmodellkörper nach 2.5 Jahren Bewitterung. Gegenüberliegende Kontaktfläche zwischen Fugenvergussmasse und Betonflanke des Fugenmodellkörpers. An der betonseitigen Fuge sind Hohlräume mit weissen Flecken erkennbar, die beim Einbau nicht mit Fugenvergussmasse gefüllt wurden.

Blasenbildung durch Lösungsmittel aus dem Voranstrich:

Eine Blasenbildung im Zusammenhang mit dem Lösungsmittel des Voranstriches kann bei dieser Untersuchung ausgeschlossen werden, da etwa gleichviele Blasen auch bei FM7 entstanden, wo kein Voranstrich angewendet wurde.

Die Frage, ob ein Voranstrich gegen Blasenbildung hilft, konnte in dieser Arbeit nicht beantwortet werden, da bei FM1, welche ohne Voranstrich ausgeführt wurde, im Gegensatz zu FM7 erst nach fünf Jahren wenige Blasen festgestellt wurden.

Blasenbildung durch gasbildende Komponenten in der Fugenvergussmasse:

Eine Blasenbildung durch gasbildende Komponenten in den untersuchten Fugenvergussmassen konnte durch Laboruntersuchungen nicht nachgewiesen werden. Es wurden vier Fugenvergussmassen untersucht: FM1 und FM6 (mit sehr wenig Blasen auf der Versuchsstrecke) sowie FM2 und FM7 (am meisten Blasenbildungen auf der Versuchsstrecke). Die Fugenvergussmassen wurden bei 180°C erwärmt, bevor je ca. 80g in einen ca. 100°C warmen Glasbecher gefüllt wurden. Die Oberfläche der Fugenvergussmassen wurde kurz beflammt, um Lufteinschlüsse an der Oberfläche zu entfernen. Eine Serie der Becher wurde in einem Wärmeschrank bei 50°C unter Vakuum (400mPa) während vier Wochen gelagert und die Entstehung der Blasenbildung regelmässig beobachtet. Eine zweite Serie der Becher wurde in einem temperierbaren Druckbehälter (PAV Pressure Aging Vessel-Gerät) bei 70°C und einem Druck von 2.07 MPa während 20h belastet. Bei beiden Methoden konnte keine Blasenbildung festgestellt werden. Deswegen kann die Entstehung von Blasen durch eine gasbildende Komponente in den untersuchten Fugenvergussmassen praktisch ausgeschlossen werden.

Blasenbildung durch Lufteinschlüsse und Hohlräume in der Fugenvergussmassen:

Am Fugenmodellkörper mit FM3 (*Abbildung 6.4.1*) und FM4 (*Abbildung 8.3.48*) wurde Blasenbildung in Form von Hohlräumen zwischen den Schichten der Fugenvergussmassen festgestellt. Solche Schichtverbundprobleme können entstehen, wenn bei der Fugenfüllung die vorherige Schicht der Fugenvergussmasse sehr stark abkühlen konnte.

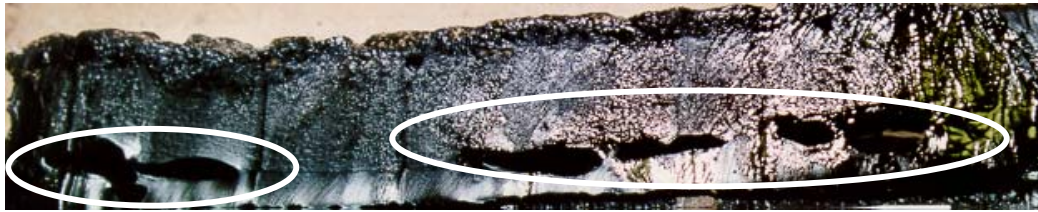


Abbildung 8.3.48: FM4. Hohlräume zwischen den Schichten der Fugenvergussmasse am Fugenmodellkörper nach 5 Jahren Bewitterung

Alterung im Betrieb:

Alterung der Polymerkomponenten in den Fugenvergussmassen:

Die begleitenden Untersuchungen mittels Gelpermeationschromatografie haben gezeigt, dass die Polymerkomponenten in allen Fugenvergussmassen während 5 Jahren Bewitterung praktisch unverändert blieben und dass eine Veränderung der Polymerkomponenten insbesondere während des Einbaus erfolgte. Das bedeutet, dass vor allem der Zustand der Polymerkomponenten der Fugenvergussmassen nach dem Einbau für die Flankenablösung im Betrieb und somit für die Gebrauchstauglichkeit verantwortlich ist.

Verhärtung bzw. Versteifung:

Alle untersuchten sieben Fugenvergussmassen wurden im Betrieb allmählich härter bzw. steifer. Nach 5 Jahren wurden die Haftzugspannungen um mehr als das Dreifache erhöht (Tabelle 8.3.16). Die Untersuchungen mittels DSR haben diese Verhärtung quantitativ bestätigt. Die Abbildungen 8.3.49 und 8.3.50 zeigen Beispiele der Moduländerungen bei 10°C resp. bei 40°C und einer Messfrequenz von 1.5Hz. Wahrscheinlich war eine Alterung des Bitumens für diese Verhärtung verantwortlich. Trotz dieser Verhärtung hat das Polymer dazu beigetragen, die Fugendehnung im Winter zu überbrücken und einer Flankenablösung entgegenzuwirken. Entsprechend waren die Flankenablösungen bei den Fugenvergussmassen FM3, FM6 und FM7, bei denen nach dem Einbau der Anteil an Haupt-Polymerkomponenten mehr als 4.2 GPC-Flächen-% betrug, am geringsten (nur 3%).

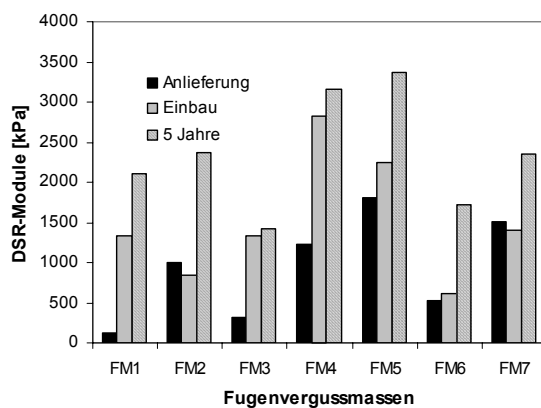


Abbildung 8.3.49:

FM1 ... FM7: DSR G*-Module bei 10°C und 1.5Hz

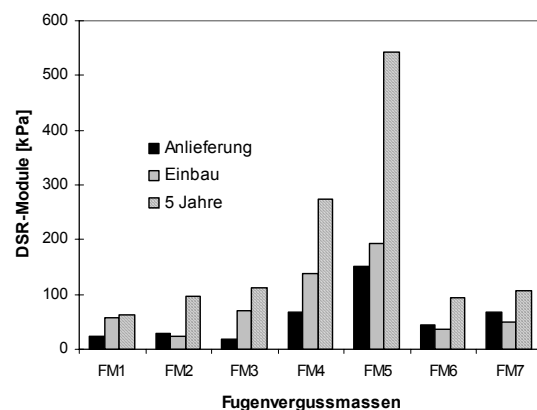


Abbildung 8.3.50:

FM1 ... FM7: DSR G*-Module bei 40°C und 1.5Hz

9 ZUSAMMENFASSENDE DISKUSSION

9.1 Praxisrelevanz der normierten Laborprüfungen

Die Arbeit hat gezeigt, dass primär Qualität und Eigenschaften der Fugenvergussmassen aus Polymerbitumen im Anlieferungszustand für die Dauerhaftigkeit entscheidend sind. Die Qualität der Fugenvergussmassen wird in der Schweiz nach den Prüfvorschriften SN 671'610 [N4] untersucht und muss die Qualitätsvorschriften gemäss Schweizer Norm SN 671 625a [N3] erfüllen. Nur zwei der in dieser Arbeit verwendeten Fugenvergussmassen erfüllten die Anforderungswerte der sieben ausgewählten Prüfungen vollständig (siehe *Tabelle 8.1.3* bzw. *Tabelle 9.1.1*). Damit stellt sich die Frage der Praxisrelevanz der durchgeführten Laborprüfungen.

Prüfungen	Anforderung	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6	FM7
Pen (Nadel)	max. 100. 10 ⁻¹	✓	✓	⊗	✓	✓	✓	✓
Ep RuK	min. 85°C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Fliesslänge	max. 10mm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kugelfallprobe	intakt	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Dehnbarkeit bei -20°C								
- ohne Wasserlagerung	weder Risse	✓	⊗	✓	⊗	⊗	⊗	✓
- mit Wasserlagerung	noch Ablösungen	✓	⊗	✓	⊗	⊗	⊗	✓

Tabelle 9.1.1: Prüfungen der Fugenvergussmassen bei Anlieferung (vor dem Einbau). Beurteilung der Ergebnisse der normierten Prüfungen (Wiederholung der *Tabelle 8.1.3*)

✓: Anforderung der Norm erfüllt

⊗: Anforderung der Norm nicht erfüllt

Grau schattierte Felder: in dieser Arbeit nicht taugliche Fugensysteme

Dehnbarkeit bei -20°C:

Mit der Prüfung "Dehnbarkeit bei -20°C" gemäss SN 691 920 [N5] an den Prüfkörpern ohne und mit Wasserlagerung wird die Hafteigenschaft an Betonprismen sowie die Dehnbarkeit von Fugenvergussmassen in der Kälte (bei -20°C) untersucht. Drei der sieben untersuchten Fugenvergussmassen (FM1, FM3, FM7) erfüllten die Anforderung dieser Prüfung (*Tabelle 9.1.1*). Von diesen drei konnten nur zwei Fugenvergussmassen (FM3 und FM7) nach 5 Jahren im Betrieb als tauglich bewertet werden. Somit erfüllte FM1 zwar die Anforderung im Labor, jedoch nicht jene der Praxis. FM1 hat eine sehr gute Eigenschaft im Anlieferungszustand, aber das Polymer war gegenüber Hitze sehr instabil, so dass es durch den Einbau fast vollständig zersetzt wurde. Das könnte der Grund der ungenügenden Gebrauchstauglichkeit von FM1 sein. Für solche Fugenvergussmassentypen, die beim Einbau sehr unbeständig sind, wäre die Durchführung der Prüfung "Dehnbarkeit bei -20°C" an der gealterten Fugenvergussmasse sinnvoll.

Aufgrund der Praxiserfahrungen wäre es generell zweckmässig, wenn die zu prüfenden Fugenvergussmassen während z.B. 6 Stunden bei 180°C im Ofen (ohne Luftzufuhr) rührend vorgealtert würden, um einen etwa gleichen Alterungseffekt wie durch den Einbau zu erzeugen.

Die FM6 erfüllte die Anforderung im Labor nicht (*Tabelle 9.1.1*), hat sich aber trotzdem auf der Versuchsstrecke auch nach 5 Jahren als ebenfalls tauglich erwiesen (*Tabelle 9.1.2*). Bei der Prüfung "Dehnbarkeit bei -20°C" löste sich die Fugenvergussmasse FM6 nach einem kurzen Dehnweg von den Betonflanken. Die im Labor festgestellte schlechte Haftung am

Beton widersprach aber der Beobachtung in der Praxis. Die Ergebnisse der Haftzugprüfung bei -20°C an den Fugenmodellkörpern, die parallel zu den Fugen der Versuchsstrecke vor Ort hergestellt wurden, waren ausgezeichnet: Eine Flankenablösung trat erst nach 12mm Dehnweg auf. Das Nicht-Erfüllen der Anforderungswerte der Laborprüfung "Dehnbarkeit bei -20°C " ist wahrscheinlich auf die Prüfkörperherstellung im Labor zurückzuführen. Die vom Lieferanten vorgeschriebene Haftvermittlermenge von 0.6 Liter pro Laufmeter war so gross, dass sich eine dicke, glasartige Schicht an den Betonprismen bildete, wodurch vermutlich die Hafteigenschaft der FM6 verschlechtert wurde.

FM	Flankenablösung am Objekt nach 5 Jahren [%]	Anlieferungszustand			GPC (Polymergehalt)	
		Dehnweg bis zur Entstehung der Schädigung (Flankenablösung)			Bei Anlieferung Flächen-%]	Nach Einbau [Flächen-%]
		Dehnbark. o.W. 1) [mm]	Dehnbark. n.W. 2) [mm]	Haftzugversuch -20°C 3) [mm]		
FM1	ca. 15	>8	5.5	6	8.6	2.3
FM2	ca. 30	2.5	1	1.3	4.6	1.8
FM3	ca. 3	>8	>8	12	7.9	6.1
FM4	ca. 70	0.4	0.3	0.1	6.2	1.8
FM5	ca. 65	0.8	0.4	0.4	3.7	3
FM6	ca. 3	0.9 *)	0.8 *)	8	4.8	4.2
FM7	ca. 3	>8	>8	9	8.9	6.6

Tabelle 9.1.2: Prüfungen der Fugenvergussmassen bei Anlieferung. Beurteilung der Ergebnisse der normierten Prüfungen (vgl. auch *Tabelle 8.3.15*)

- 1): Prüfung Dehnbarkeit bei -20°C (SN671'920) an Prüfkörpern ohne Wasserlagerung
 - 2): Prüfung Dehnbarkeit bei -20°C (SN671'920) an Prüfkörpern nach 14 Tagen Wasserlagerung
 - 3): Prüfung Haftzugfestigkeit (EMPA-Methode, siehe Kap. 4.2.4) an Fugenmodellkörpern (nach dem Einbau)
 - *) : Die Herstellung der Prüfkörper war nicht korrekt aufgrund der falschen Angaben vom Lieferanten über die Menge des Voranstriches
 - >8: Die Prüfung wurde nach Erreichen eines Dehnweges von 8mm gestoppt.
- Grau schattierte Felder: in dieser Arbeit nicht taugliche Fugensysteme

Die Prüfung "Dehnbarkeit bei -20°C " ist somit die wichtigste Prüfung für die Aussage der Dauerhaftigkeit der Fugenvergussmasse und ist ähnlich einer Systemprüfung für die Fugenvergussmasse. Wie in dieser Arbeit gezeigt werden konnte, liefert diese Prüfung eine gute Korrelation zum Praxisverhalten auf. Der Hersteller oder Lieferant muss den Sollverbrauch des Haftvermittlers genau angeben. Zu wenig oder zu viel Haftvermittler kann zu einer Flankenablösung der Fugenvergussmasse führen.

Gemäss bestehender Anforderung der Prüfung "Dehnbarkeit bei -20°C " ist ein Dehnweg von 4mm ohne Flankenablösung oder Rissbildung aufzunehmen. Zwei Fugenvergussmassen, die auf der Versuchsstrecke tauglich waren, hatten einen Dehnweg von >8mm sowohl bei den Prüfkörpern ohne als auch mit Wasserlagerung. Eine statistische Berechnung der Korrelation zwischen der Flankenablösung und den Werten des Dehnweges bis zur Entstehung der Ablösung bei der Prüfung "Dehnbarkeit bei -20°C " war wegen der zu geringen Anzahl der bewertbaren Fugenvergussmassen nicht möglich. Im CEN-Normentwurf prEN 14188-1 (Okt. 2001) beträgt die Anforderung für diese Prüfung 5mm. Eine Erhöhung der Anforderung z.B. von 4mm auf 5mm könnte die Aussagekraft der Prüfung verstärken.

Der Anforderungswert an die Maximalspannung von 1000kPa für die Fugenvergussmasse im Anlieferungszustand sollte weiterhin bestehen bleiben, da die maximale Zugspannung in den Fugenmodellkörpern nach der Alterung an der Versuchsstrecke während 5 Jahren um einen Faktor von ca. 3.5 zunahm.

Kugelfallprobe und Fließlänge:

Mit der Prüfung "Kugelfallprobe" gemäss SN 671'917 [N6] wird die Sprödigkeit der Fugenvergussmasse bei schlagartiger Beanspruchung in der Kälte (-20°C) ermittelt. Sie soll eine Beurteilung hinsichtlich Sprödigkeit der Fugenvergussmasse im Winter ermöglichen. Demgegenüber wird mit der Prüfung "Fließlänge" gemäss SN 671'916 [N7] die Tendenz zum Wegfliessen der Fugenvergussmasse im Sommer bewertet.

Alle untersuchten sieben Fugenvergussmassen erfüllten bei der Anlieferung die Anforderungswerte der beiden Prüfungen. Sowohl Rissbildung in den Fugenvergussmassen als auch deren Wegfliessen wurden auf der Versuchsstrecke nach fünf Jahren nicht beobachtet. Beide Prüfungen sind somit weiterhin als wichtig zu bezeichnen. Die jetzige Anforderung der Kugelfallprüfung muss beibehalten bleiben. Hingegen sollte die Anforderung der Prüfung Fließlänge bei 60°C (mit $\leq 10\text{mm}$) verschärft werden. Bei den sieben untersuchten Fugenvergussmassen wurde eine Fließlänge bei 60°C mit einem grössten Wert von 1mm festgestellt. Aufgrund des Verhaltens von FM4 mit einer Fließlänge von 4mm nach starker Zersetzung der Polymere beim Einbau ist die Anforderung für die Prüfung Fließlänge auf $\leq 3\text{mm}$ herabzusetzen.

Penetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel:

Einzig FM3 erfüllte die Anforderung der Prüfung Penetration gemäss SN671'740 [N8] nicht (siehe *Tabelle 9.1.1*). Die Penetration von FM3 lag knapp oberhalb von $100 \cdot 10^{-1}\text{mm}$. Trotzdem war FM3 nach fünf Jahren Betrieb noch gebrauchstauglich. Die Prüfungen Penetration sowie Erweichungspunkt mit Ring und Kugel geben keine Auskunft über die Dauerhaftigkeit der Fugenvergussmassen im Betrieb. Diese Prüfungen können daher höchstens der allgemeinen Charakterisierung und Identifizierung eines Produktes dienen. Eine Festlegung von Anforderungswerten für diese Prüfungen ist somit nicht sinnvoll. In dieser Arbeit widerspricht die Anforderung der Prüfung Penetration der Fugenvergussmassen bei Anlieferung sogar dem Praxisverhalten.

9.2 Allgemeine Erkenntnisse zum Materialverhalten

9.2.1 Materialqualität

Die Eigenschaft der Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand ist hauptverantwortlich für die Dauerhaftigkeit. Die Fugenvergussmassen müssen die Anforderungswerte der Norm SN671625a erfüllen und zudem fachgerecht eingebaut werden. Die Erfahrung hat gezeigt, dass es offenbar bei vielen Produkten recht schwierig ist, eine stabile Fugenvergussmassenqualität zu gewährleisten. Technische Blätter mit den Angaben "Entspricht der Vorschrift SNV etc." nützen nichts. In dieser Arbeit konnte nur weniger als die Hälfte der untersuchten Fugenvergussmassen die Anforderungen der bestehenden Schweizer Norm SN 671'625 trotz guter Deklaration im technischen Blatt erfüllen. Ähnliches wurde auch in einer früheren Arbeit [L2] festgestellt.

Um die Dauerhaftigkeit zu gewährleisten, muss ein Qualitätssicherungssystem für Fugenvergussmassen geschaffen werden, welches die Qualität der anzubietenden Produkte auf dem Markt garantiert. Hierzu gehört eine Systemzulassung, eine Fremdüberwachung sowie eine Kontrollprüfung beim Einbau.

Vor dem Einbau sollte das Verhalten der einzubauenden Fugenvergussmassen bezüglich "Haftung am Beton in der Kälte, Sprödigkeit in der Kälte und Standfestigkeit in der Wärme" mit den Prüfungen "Dehnbarkeit bei -20°C , Kugelfallprobe und Fließlänge bei 60°C " kontrolliert werden.

9.2.2 Materialzusammensetzung

Die Untersuchungen zeigen eindeutig, dass die Polymerkomponenten in den Fugenvergussmassen die Dauerhaftigkeit der Fugen am meisten beeinflussen. Entscheidend sind Art und Menge der Polymere in den Fugenvergussmassen. Der Polymeranteil muss genügend gross und die Polymere sollten bezüglich Alterung und thermischer Beanspruchung stabil sein.

Menge der Polymerkomponenten:

Die untersuchten Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand hatten gemäss Untersuchungen mit Gelpermeationschromatografie einen Polymeranteil zwischen 3.7 und 8.9 GPC-Flächen-% (*Tabelle 9.1.2*). Ein genauer, quantitativer Polymeranteil konnte in dieser Arbeit nicht bestimmt werden, da die Hersteller ihre Polymere für die Untersuchung nicht zur Verfügung stellen konnten. Im Normalfall liegen die tatsächlichen Polymeranteile höher als die ermittelten Anteile in GPC-Flächen-%. In dieser Forschungsarbeit zeigte sich, dass Fugenvergussmassen, die einen hohen Polymeranteil aufwiesen, z.B. FM3 (7.9 GPC-Flächen-%) und FM7 (8.9 GPC-Flächen-%), und deren Polymere sich beim Einbau nicht zersetzten, sich auch in der Praxis bewährten.

Stabilität der Polymerkomponenten:

FM1 enthielt etwa 8.6 Flächen-% Polymere im Anlieferungszustand. Da die Polymerhauptmoleküle zu gross waren (*Tabelle 8.1.4*) und eventuell nicht mit einem Zusatzstoff gegen thermische Zersetzung bei normaler Einbautemperatur von ca. 180°C geschützt waren, wurden die Polymere beim Einbau stark zersetzt (*Tabelle 9.1.2*). Nach fünf Jahren Betrieb hatten sich etwa 15% der Fugen von den Flanken abgelöst.

Deswegen muss der Polymeranteil in den Fugenvergussmassen genügend gross sein und während des Einbaus stabil bleiben. Die Stabilität der Polymere beim Einbau kann mit Hilfe einer Laboralterung und einer GPC-Untersuchung nachgewiesen werden.

Es ist zu bemerken, dass zwei (FM6 und FM7) der drei tauglichen Fugenvergussmassen organische Bestandteile wie Gummimehl und Fasern als Füllstoffe enthielten. Solche Zusatzstoffe könnten sich bei homogener Verteilung positiv auf das Verhalten der Fugenvergussmassen auswirken.

9.2.3 Fugenvergussmassen-Systeme mit oder ohne Haftvermittler

In dieser Untersuchung wurden zwei Fugenvergussmassen (FM1 und FM7) ohne Haftvermittler verwendet. Die Fugenvergussmasse FM7 zeigte nach 5 Jahren Betrieb ein gutes Verhalten. Die Untauglichkeit von FM1 könnte durch die beim Einbau stark zersetzten Polymeranteile verursacht worden sein. Nach fünf Jahren im Betrieb konnte keine positive Auswirkung der Verwendung vom Haftvermittler bezüglich Blasenbildung und Flankenablösung festgestellt werden.

9.3 Zustand der Fugenvergussmassen nach dem Einbau

9.3.1 Schädigung der Fugenvergussmassen beim Einbau

Polymerabbau beim Einbau:

Durch die thermische Belastung beim Aufschmelzen der Fugenvergussmassen wurden die Polymere zersetzt. Der Abbau der Polymerkomponenten in den Fugenvergussmassen konnte mittels Gelpermeationschromatografie (GPC) bestimmt werden. Aufgrund dieser Untersuchung und der Erfahrung der EMPA beträgt der Polymerabbau bei einer schonenden Einbautemperatur bis 185°C maximal 30%. Beim schonenden Einbau bis etwa 185°C zersetzten sich die Polymere von FM3, FM5, FM6 und FM7 höchstens um 26%. Eine Ausnahme war FM1, deren Polymere beim Einbau bis 184°C etwa um 74% abnahmen. Der Grund könnte auf die zu grossen SBS-Moleküle der Polymerhauptkomponenten zurückzuführen sein.

Bei der Überhitzung wurden die Polymere generell drastisch abgebaut: z.B. ein Polymerabbau bei FM2 von ca. 63% bei einer Einbautemperatur bis 195°C und ein Polymerabbau bei FM4 von ca. 72% bei einer Einbautemperatur bis 285°C.

Somit wurden drei der untersuchten Fugenvergussmassen (FM1, FM2 und FM4) durch den Einbau sehr stark strapaziert. Dies könnte einer der Gründe sein, warum diese drei Fugenvergussmassen auf der Versuchsstrecke nach fünf Jahren untauglich waren.

Durch die Überhitzung von FM2 und FM4 und die Unstabilität der Polymere bei FM1 während des Einbaus wurden die Polymere in den Fugenvergussmassen sehr stark zersetzt, so dass nach dem Einbau nur noch eine geringe Menge wirksamer Polymere vorhanden war. Alle vier Fugenvergussmassen, deren Polymeranteil nach dem Einbau unter 4.2 GPC-Flächen-% lagen, versagten nach fünf Jahren Betrieb (*Tabelle 9.1.2*). Somit ist der Rest der Polymeranteile in den Fugenvergussmassen nach dem Einbau ein wesentlicher Faktor für die Lebensdauer der Fugen. Ein Schutz dieser Polymere durch schonenden Einbau, bei einer optimalen Einbautemperatur im allgemeinen von ca. 180±5°C, ist somit unbedingt erforderlich.

9.3.2 Eignung der Prüfverfahren zur Charakterisierung der Alterung von Fugenvergussmassen

Penetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel:

Eine Alterung der Fugenvergussmassen im Sinne eines Polymerabbaus konnte aufgrund der Änderung der Penetrationswerte (SN 671 740) nicht festgestellt werden. Hingegen lassen die Erweichungspunkte Ring und Kugel Ep RuK (SN 671 743) einen gewissen Trend des Polymerabbaus beim Einbau vermuten. Bei geringem Polymerabbau (d.h. FM3, FM5, FM6, FM7) war auch eine geringe Zunahme der Ep RuK Werte zu beobachten (*Abbildung 8.2.37*). Bei FM1, FM2 und FM4, wo der Polymerabbau zwischen 62% und 74% lag, wurde eine Abnahme der Werte des Ep RuK zwischen 10°C und 22°C festgestellt. Eine deutliche Korrelation zwischen dem Polymerabbau durch den Einbau und der Änderung der Werte des Ep RuK konnte aber nicht ermittelt werden. Beispielsweise war bei FM1 eine Reduktion des Ep RuK um -10°C beim Polymerabbau von 74% und bei FM2 eine Reduktion des Ep RuK um -22°C beim Polymerabbau von 62% festzustellen. Die Werte des Erweichungspunktes Ring und Kugel der mit RTFOT gealterten Proben verhielten sich im Vergleich zu denjenigen des Einbaus ganz anders.

Somit geben weder die Penetration noch der Erweichungspunkt Ring und Kugel Auskunft über die Alterung der Fugenvergussmassen im Sinne einer Zersetzung der Polymere.

Fliesslänge:

Die Bestimmung der Fliesslänge bei 60°C gemäss (SN 671 916) der eingebauten Fugenvergussmassen zeigte eine Zunahme der Fliesslänge bei grossem Polymerabbau. Bei FM2 (Einbau-Beginn) und FM4 mit einem Polymerabbau zwischen 62% und 74% wurde eine Zunahme der Fliesslänge von 15mm bzw. 4mm festgestellt. Hingegen war bei FM1 mit einem Polymerabbau von 74% keine Änderung der Fliesslänge zu beobachten (*Tabelle 8.2.16*).

Bei zwei von drei der stark gealterten Fugenvergussmassen war mit der Prüfung Fliesslänge ein Verlust der Standfestigkeit bei 60°C zu verzeichnen. Die Prüfung Fliesslänge ist daher weiterhin zur Beurteilung der Eigenschaften bezüglich Wegfliessen der Fugenvergussmassen als wichtig zu bezeichnen.

Kugelfallprobe:

Die Prüfung Kugelfallprobe bei -20°C (SN 671 917) führte zu ähnlichen Aussagen wie die Prüfung Fliesslänge. Bei FM2 und FM4 mit grossem Polymerabbau (62% und 74%) wurden die Proben so spröde, dass alle vier Prüfkörper zersprangen. Eine Ausnahme bildete die Probe FM2 (bei Einbau-Ende) und FM1 (Polymerabbau bis 74%). Alle Prüfkörper beider Proben blieben intakt.

Die Prüfung Kugelfallprobe kann zwar einen Hinweis geben, ob die Polymere der Fugenvergussmasse beim Einbau stark abgebaut sind; eine Korrelation zwischen den Ergebnissen und dem Abbau der Polymere konnte nicht nachgewiesen werden.

Gelpermeationschromatografie (GPC):

Zur Charakterisierung der Polymere im Anlieferungszustand als Fingerprint und zur Bestimmung des Polymerabbaus, z.B. durch den Einbau, ist die Methode Gelpermeationschromatografie gut geeignet. Diese Prüfmethode erlaubt die Bestimmung der Hitzeempfindlichkeit der Polymere in den Fugenvergussmassen und gibt Auskunft über das Ausmass der Zersetzung durch den Einbau.

Dynamic Shear Rheometer (DSR):

Durch den Einbau stiegen die mit dem DSR bestimmten G^* -Module fast bei allen untersuchten Fugenvergussmassen im Temperaturbereich unter 30°C zum Teil massiv an (siehe Kap. 8). Dies ist gleichbedeutend mit einer Versteifung der Fugenvergussmassen. Im Vergleich zur Anlieferung lagen die G^* -Module aller Fugenvergussmassen durch den Einbau näher beieinander (siehe *Abbildungen 8.2.34* und *8.2.35*).

Die Untersuchung des Alterungsverhaltens von Fugenvergussmassen aufgrund physikalischer Kennwerte, wie G^* -Modul und Phasenwinkel mittels DSR, ist im Vergleich zur Penetrationsbestimmung viel sinnvoller, da es das DSR erlaubt, physikalisch fundierte Kennwerte mit einer kleinen Probenmenge von ca. 0.5g im breiten Temperaturbereich (z.B. 70 ... 10°C) bei verschiedenen Frequenzen (z.B. 0.1 ... 30Hz) zu erfassen.

Fast bei allen untersuchten Fugenvergussmassen waren die Modulwerte aus den Methoden DSR und KAST im Frequenzbereich $\log f_R = -2 \dots +1$ [Hz] praktisch deckungsgleich (siehe *Abbildungen 8.1.6 \dots 8.1.11*). Für die Methode KAST ist eine grössere Probenmenge (ca. 200g) notwendig. Der Vorteil des KAST-Verfahrens liegt darin, dass grobe Anteile in der untersuchten Fugenvergussmasse, wie Gummigranulat, wegen des grossen Messspalts die Ergebnisse nicht verfälschen.

9.3.3 Praxisrelevanz der künstlichen Alterung im Labor mittels RTFOT

Zum Vergleich der Alterung der Fugenvergussmassen im Labor und in der Praxis (nach dem Einbau) wurden verschiedene Eigenschaften der Fugenvergussmassen nach dem Einbau und nach der Alterung im Labor untersucht. In dieser Arbeit wurde die Alterungsmethode RTFOT bei 180°C gewählt, da sie üblicherweise zur Abschätzung des Alterungseinflusses beim Einbauvorgang im Strassenbau angewendet wird.

Sowohl die Ergebnisse des Polymerabbaus als auch zahlreiche Eigenschaften der Proben nach dem Einbau und nach der Alterung im Labor (RTFOT bei 180°C) waren dramatisch unterschiedlich (*Tabelle 9.3.1*). Die Alterung beim Einbau von Fugenvergussmassen mit einem hohen Elastomeranteil (zwischen 10 und 15 GPC-Flächen-%) kann nicht durch eine Laboralterung wie RTFOT simuliert werden, bei der die Fugenvergussmasse durch eine intensive Luftzufuhr bei hoher Temperatur oxidiert wird. Durch die Luftzufuhr werden die Elastomere, wie Styrol-Butadiene-Styrol Copolymere (SBS), in der Polymerbitumen-Mischung stark oxidiert und abgebaut. Der RTFOT gibt Auskunft über die Oxidationsempfindlichkeit, wenn geschmolzene Fugenvergussmassen im Kocher z.B. durch ein langes Öffnen des Kocherdeckels mit frischer Luft in Kontakt kommen.

Deswegen sollte die Simulation der Einbaualterung für Fugenvergussmassen mit Methoden ohne intensive Luftzufuhr simuliert und untersucht werden (z.B. die Fugenvergussmasse in einem geschlossenen Rundkolben bei 180°C während 6 ... 8 Stunden rühren).

Prüfungen	nach Alterung	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6	FM7
Δ Pen _{Nadel} [0.1mm]	Einbau-Beginn	-6	+33	+20	+4	+5	+9	+3
	RTFOT	0	-5	+29	-5	-7	-13	+5
Δ Ep RuK [°C]	Einbau-Beginn	-10	-22	+2	-20	-1	-5	-1
	RTFOT	-14	-4	-1	-11	+1	+6	-2
Polymerabbau [GPC-Flächen-%]	Einbau-Beginn	74 ¹⁾	63 ²⁾	23	83 ³⁾	23	14	25
	RTFOT	64	42	17	39	41	77	44
Δ G*-Module [kPa] ⁴⁾	Einbau-Beginn	+1208	-160	+1034	+1600	+440	+89	+330
	RTFOT	+174	-71	-85	-360	+780	+224	+90

Tabelle 9.3.1: Prüfergebnisse nach der Alterung bei Einbau und nach RTFOT bei 180°C im Vergleich zur Anlieferung

Δ Wert bei Anlieferung minus Wert nach Alterung

- 1) Einbautemperatur bis 184°C; FM1 enthielt zu grosse Polymermoleküle
- 2) Einbautemperatur bis 195°C
- 3) Einbautemperatur bis 285°C
- 4) Die G*-Module sind die DSR-Prüfergebnisse bei 10°C und 1.5Hz

9.4 Fugeneinbau

9.4.1 Erwärmung der Fugenvergussmassen

Zwei der sieben eingebauten Fugenvergussmassen (FM2 und FM4) wurden durch den Einbau überhitzt, so dass die Polymere fast vollständig zersetzt wurden. Das Praxisverhalten der beiden Fugenvergussmassen FM2 und FM4 musste daher nach fünf Jahren im Betrieb

als untauglich eingestuft werden. FM4 wurde beim Einbau in einem Kocher ohne Ölummantelung, Temperatur- und Rührwerksregelung (*Abbildung 6.2.2*) aufgeschmolzen, und die Temperatur erreichte 285°C. Deswegen ist eine Verwendung von einem Aufschmelzofen ohne Ölummantelung, Temperatur- und Rührwerksregelung für den Fugeneinbau zu verbieten.

Je länger die Fugenvergussmassen im Aufschmelzofen bei Einbautemperatur verweilen, desto mehr zersetzen sich die Polymerkomponenten. Um die Fugenvergussmassen zu schonen, sollte der Ofen für den Einbautag nicht auf einmal gefüllt werden. Die Fugenvergussmasse sollte zu Beginn massvoll und später sukzessive portioniert in den Ofen eingebracht werden, um sicherzustellen, dass die gesamte für den Einbautag erwärmte Fugenvergussmasse am gleichen Tag verbraucht wird. Vergussmassenreste vom Vortag sind aus dem Ofen zu entfernen und dürfen nicht für den Fugeneinbau verwendet werden.

9.4.2 Fugenflanken und Blasenbildung der Fugenvergussmassen

Blasenbildungen können die Dauer der Gebrauchstauglichkeit von Fugenvergussmassen verkürzen und insbesondere Flankenablösungen begünstigen. Die Blasen in den Fugenvergussmassen vergrössern sich im Sommer und zerplatzen. Eine Entstehung von Blasen durch eine Selbstbildung von Gasen aus den Fugenvergussmassen konnte in dieser Arbeit nicht nachgewiesen werden. Zudem kann eine Blasenbildung infolge Lösungsmittel des Voranstriches in dieser Arbeit ausgeschlossen werden, da auch beim Fugenvergussmassensystem FM7 ohne Voranstrich ähnlich viele Blasen entstanden.

Hingegen wurde beobachtet, dass die Beschaffenheit der Betonflanken für die Blasenbildung hauptverantwortlich war (siehe Kap. 8.3.8). Die Blasen entstanden genau dort, wo sich kleine Löcher an den Fugenflanken des Betons befanden. Solche vertikal zur Fuge liegenden Hohlräume im Beton lassen sich nicht vollflächig mit einem Voranstrich benetzen und beim Fugeneinbau auch nicht vollständig mit Fugenvergussmasse auffüllen. Nach dem Einbau entstanden an solchen Hohlstellen Blasenkeime, die im Betrieb durch den Einfluss von Temperatur und Wasserdampfdruck zu Blasen in der Fugenvergussmasse führten.

Aus diesem Grund ist die Betonqualität so zu wählen, dass nach dem Fugenschneiden oder -fräsen möglichst keine offenen Luftporen entstehen. Fugenvergussmassen aus Polymerbitumen für Fugenflanken mit Sackporen oder Lunker sind wegen des Risikos der Blasenbildung nicht geeignet.

9.4.3 Fugenvorbehandlung

Im Normalfall werden die frisch geschnittenen, trockenen Fugen mit Pressluft gesäubert und mit Fugenvergussmasse gefüllt, ohne eine zusätzliche mechanische Vorbehandlung der Fugenflanken mittels Sandstrahlen oder Bürsten vorzunehmen. In dieser Arbeit wurden diese mechanischen Vorbehandlungsmethoden bei vier Fugenvergussmassensystemen angewendet, d.h. bei FM1, FM3, FM6 und FM7 (*Tabelle 6.3.1*, Kap. 6.3). Drei davon (FM3, FM6 und FM7) wurden nach fünf Jahren als gebrauchstauglich eingestuft. Die FM1 haftete besser an den Fugenflanken (mit einer Flankenablösung von ca. 15%) als die übrigen Fugenvergussmassen FM2, FM4, FM5. Aufgrund dessen ist zu vermuten, dass die Flankenhaftung verbessert werden könnte, wenn die Flankenflächen mechanisch aufgeraut und die schwachen Stellen lokal entfernt würden. Allerdings konnte dieser Aspekt in dieser Arbeit nicht abgeklärt werden, da nur eine Variante der Vorbehandlungsmethode für eine Fugenvergussmasse angewendet wurde.

9.4.4 Eintragen der Voranstriche

Zum Auftragen der Voranstriche wurden zwei Methoden angewendet: Spritzen und Pinseln. Dabei wurde kein Unterschied bezüglich Einfluss auf die Dauerhaftigkeit festgestellt. Die offenen Luftporen an den Fugenflanken konnten durch beide Methoden nicht vollflächig geschlossen werden (siehe *Abbildungen 8.3.44* und *8.3.45* in Kap.8.3.8).

Die aufgetragene Menge des Vorstriches lag jeweils bei ca. 100g/m². Die Laboruntersuchung hat gezeigt, dass ein übermässiger Auftrag von Voranstrich zu Haftproblemen führen kann. Die Oberfläche der Fugenflanken sollte nur einmal mit Voranstrich behandelt werden. Hersteller bzw. Lieferanten sollen nur die unbedingt erforderliche Gebrauchsmenge auf ihren technischen Blättern angeben und dürfen nicht übertreiben, um grössere Quantitäten ihres Produktes verkaufen zu können.

Die Trocknungszeit des Voranstriches variierte bei den verschiedenen Systemen zwischen 10min und ca. 2h. Normalerweise beträgt die Trocknungszeit zwischen 20min und 30min. Die Fugenvergussmasse darf keinesfalls vor Erreichen der vom Hersteller und Lieferanten angegebenen Trocknungszeiten eingebaut werden. Zu beachten sind insbesondere auch die klimatischen Verhältnisse beim Trocknungsvorgang. Bei einer zu kurz bemessenen Trocknungszeit besteht die Gefahr, dass das Lösungsmittel des Voranstriches nicht völlig verdampfen und damit Blasenbildung oder eine schlechte Haftung der Fugenvergussmasse verursachen kann. Bei einer zu langen Trocknungszeit können die Fugenflanken durch Staub etc. verschmutzt werden.

9.4.5 Fugenfüllung

Zur Herstellung einer guten Fuge muss u.a. die Temperatur der Fugenvergussmasse optimal sein, damit die Fugenvergussmasse in alle Ecken der Fugen fliesst und die Fugenflanken gut benetzt werden. Gemäss Thermografiemessung beim Fugeneinbau auf der Versuchsstrecke kühlte sich die Masse von den Fugenrändern her sehr schnell ab. Es wurde festgestellt, dass die Temperaturen dort unmittelbar nach der Füllung bereits etwa 20°C bis 30°C tiefer liegen können als die Giesstemperatur. Bereits nach 2.5min betrug die Temperatur am Fugenrand schon weniger als 50°C. Dies beweist, dass die Temperatur der Fugenvergussmasse beim Giessen zwingend im Bereich der sogenannten "Vergiesstemperatur" liegen muss. Diese optimale Vergiesstemperatur kann mit der Prüfung Vergiessbarkeit (SN 671914) bestimmt werden. Die Vergiesstemperaturen liegen in der Regel zwischen 170°C und 185°C, d.h. etwa auf dem Niveau der vom Hersteller angegebene Temperatur der Fugenvergussmasse im Kocher.

Ein zügiger Arbeitsablauf beim Füllen ist sicherzustellen. Empfehlenswert ist eine gut isolierte Lanze, da auch unabhängig von der Windsituation gearbeitet werden kann. Beim Einfüllen mit einem Giesskübel wurde eine Temperaturabsenkung in der Fugenvergussmasse während des Füllens bis auf etwa 120°C (knapp oberhalb des Ep RuK) gemessen. Bei dieser Temperatur kann die Fugenvergussmasse in der Regel nicht mehr in alle Ecken der Fugen fließen.

Eine Fugenfüllung in zwei Schichten ist sinnvoll, da sich die heisse Fugenvergussmasse beim Abkühlen stark zusammenzieht und dadurch an Volumen verliert. Das Einbringen der zweiten Fugenschicht auf eine kalte oder schmutzige Oberfläche der ersten Schicht kann zu Verbundproblemen zwischen den beiden Schichten führen und eine Blasenbildung zwischen den beiden Schichten begünstigen (*Abbildung 8.3.46* in Kap. 8.3.8 und *Abbildung 6.4.1* in Kap. 6.4). Eine durch Hersteller oder Lieferanten in den Ausführungsanweisungen fest zu legendende Dauer zwischen der ersten und zweiten Füllung bzw. der minimalen Temperatur der Fugenvergussmasse der ersten Schicht vor Einbau der zweiten Schicht ist notwendig, um sicherzustellen, dass die erste Schicht noch warm genug ist, um einen guten Verbund der beiden Schichten zu gewährleisten.

9.4.6 Oberflächenabschluss

Der Schutz der Fugenoberfläche gegen Sonneneinstrahlung mittels Sand- oder Feinsplitt-Abstreuerung ist theoretisch sinnvoll. Auf der Versuchsstrecke wurden die Oberflächen der Fugen bei den FM1, FM3 und FM7 mit Feinsplitt bzw. Sand abgestreut. Bereits nach einem Jahr war jedoch nur noch wenig Splitt oder Sand vorhanden, da die Abstreuerung durch den Verkehr entfernt wurde oder im Sommer in die Fugenvergussmassen einsank (siehe Beispiele in den *Abbildungen 8.3.1 ... 8.3.3* in Kap. 8.3.1 und *Abbildungen 8.3.38 ... 8.3.40* in Kap. 8.3.7). Somit brachte die Abstreuerung der Fugenoberfläche auf dieser Versuchsstrecke keinen dauerhaften Nutzen. Für Fugen, die nicht unter Verkehr stehen, wie z.B. Randfugen auf Brücken, könnten durchaus solche Abstreuerungen zum Schutz der Fugenvergussmassen gegen Sonneneinwirkung aber nützlich sein.

9.4.7 Einbauprotokoll

Bis heute ist in der Schweiz die Qualitätsüberwachung beim Fugeneinbau nicht geregelt. Da der Einbau einer der entscheidendsten und wichtigsten Faktoren für die Gebrauchstauglichkeit von Fugenvergussmassen darstellt, sollte bei jeder Einbauetappe ein Einbauprotokoll zu Händen der Bauleitung erstellt werden. Im Einbauprotokoll sind alle wichtigen Randbedingungen auf der Baustelle festzuhalten. Es dient auch als Bestandteil des Abnahmeprotokolls und hilft damit der Bauunternehmung und -leitung, die in den Ausführungsanweisungen enthaltenen Anforderungen einzuhalten. *Anhang 2* (Kap. 12.2) enthält als Beispiel ein Einbauprotokoll der EMPA.

9.5 Alterung im Betrieb

9.5.1 Polymerersetzung

Die begleitenden Untersuchungen mittels Gelpermeationschromatografie haben gezeigt, dass die Polymerkomponenten in allen Fugenvergussmassen während 5 Jahren Bewitterung praktisch unverändert blieben (siehe Kap. 8.3). Das bedeutet, dass insbesondere der Zustand der Polymerkomponenten unmittelbar nach dem Einbau der Fugenvergussmassen für die Gebrauchstauglichkeit verantwortlich ist.

9.5.2 Verhärtung der Fugenvergussmassen

Alle untersuchten sieben Fugendichtungsmassen wurden im Betrieb auf der Versuchsstrecke allmählich härter und steifer, und es entstanden Flankenablösungen. Nach 5 Jahren hatten sich die Haftzugspannungen zum Teil um mehr als das Dreifache erhöht (siehe Kap. 8.3). Die Untersuchungen der dynamischen Kennwerte mittels DSR haben diese Verhärtung quantitativ bestätigt. Da sich der Zustand der Polymere praktisch nicht veränderte, war wahrscheinlich eine oxidative Alterung von Bitumen und ein Verdampfen flüchtiger Anteile im Bitumen für diese Verhärtung der Fugenvergussmassen verantwortlich.

Von insgesamt sieben Fugenvergussmassen, verhielten sich bezüglich Flankenablösung jene drei am besten (ca. 3% der Fugenlänge), welche nach dem Einbau einen Anteil an Polymerhauptkomponenten von mehr als 4.2 GPC-Flächen-% aufwiesen. Vermutlich half die elastische Eigenschaft der Polymerkomponenten nach der Verhärtung des Bitumens, weiterhin die Fugendehnung im Winter aufzunehmen und die Haftung am Beton zu ermöglichen. Somit ist der Zustand der Polymere nach dem Einbau als entscheidend für die Lebensdauer der Fugen zu betrachten.

9.5.3 Alterung der Fugenvergussmassen auf der Versuchsstrecke und an den Modellkörpern

Parallel zur Alterung der Fugen auf der Versuchsstrecke wurde die Langzeitalterung anhand von Modellkörpern untersucht (siehe Kap. 5). Diese Modellkörper wurden zusammen mit den Fugen auf der Versuchsstrecke eingebaut und am Rand der Versuchsstrecke gelagert. Sie waren somit den gleichen Wetterbedingungen ausgesetzt. Im Unterschied zu den Fugen auf der Versuchsstrecke wurden die Modellkörper jedoch nicht durch Verkehr, Fugendbewegungen und direkt aufgetragenes Streusalz beansprucht.

Aufgrund der chemischen und physikalischen Untersuchungen war der Zustand der Fugenvergussmassen der Versuchsstrecke und der Modellkörper nach gleicher Bewitterungszeit identisch. Somit ist eine Verfolgung der Langzeitalterung von Fugenvergussmassen aus Polymerbitumen oder ähnlichen Stoffen mit Modellkörpern direkt am Objekt sinnvoll, da auf diese Weise Entnahmen ohne Verkehrsbehinderung leicht vorgenommen werden können.

Unterschiede traten lediglich bezüglich Blasenbildungen auf. Unter Verkehr entstanden weniger Blasen, da das Blasenwachstum durch die Walk-Bewegung des Verkehrs verlangsamt wurde (siehe *Tabelle 8.3.17* in Kap. 8.3.8). Hingegen konnten die Blasen der Modellkörper ohne Behinderung weiter wachsen. Dies verursachte eine unterschiedliche Schwächung der Flankenhaftungseigenschaft zwischen Modellkörpern und Versuchsstrecke (siehe *Tabelle 8.3.16* in Kap. 8.3.8).

9.6 Erkenntnisse aus den Lang- und Kurzzzeitmessungen der Fugendbewegungen und der Temperaturen

9.6.1 Temperaturen der Betonplatten und der Luft

Während der gesamten Messperiode von etwa 4.5 Jahren (1995 – 1999) wurde eine Temperaturspanne in den Betonplatten von maximal 48°C im Jahr 1995 gemessen. Die minimale Betonplattentemperatur von –8°C wurde im Januar 1995 und die maximale Temperatur von 40°C im Juli 1995 registriert. Die grössten täglichen Temperaturspannen in den Betonplatten lagen zwischen 10°C und 19°C. Mehrheitlich betragen die Tagestemperaturspannen um 18°C.

Im ganzen Jahr lagen die Temperaturen der Betonplatten fast immer über denjenigen der Luft. Ausnahmen ergaben sich während der Winterperiode, wo aufgrund des Föhneinflusses die Lufttemperaturen an einigen Tagen höher waren als die Temperatur der Betonplatten.

Im Sommer waren die maximalen Temperaturen der Betonplatten am Tag etwa 5°C und in der Nacht etwa 5°C bis 8°C höher als diejenigen der Luft. Die maximalen und minimalen Temperaturen der Betonplatten stellten sich etwa ein bis zwei Stunden später ein als die Extremwerte der Luft. Die Lufttemperaturen erreichten das Maximum mehrheitlich um 16Uhr und das Minimum etwa um 6Uhr.

Im Frühling und Herbst lagen die maximalen und minimalen Temperaturen der Betonplatten etwa 3°C bis 4°C über denjenigen der Luft. Die maximalen und minimalen Temperaturen der Betonplatten traten etwa ein bis zwei Stunden nach den Luftextremwerten auf. Die Lufttemperaturen erreichten das Maximum mehrheitlich um ca. 15Uhr und das Minimum etwa um 7Uhr.

Im Winter waren die maximalen Temperaturen der Betonplatten etwa 6°C bis 10°C höher als diejenigen der Luft. Sie wurden meistens zwischen 17Uhr und 18Uhr (etwa ein bis zwei Stunden später als an der Luft) erreicht. Die minimalen Temperaturen der Betonplatten lagen zwischen 2°C bis 6°C über jenen der Luft und traten meist etwa eine Stunde später auf (in der Regel zwischen 8Uhr und 9Uhr).

9.6.2 Statische Fugenbewegungen infolge Temperatureinfluss

Die Fugenbewegungen hängen von den Betonplattentemperaturen ab. Die gemessenen Gesamtbewegungen im Jahre 1995 und 1998 waren ähnlich. Die sechs gemessenen Fugen dehnten sich unterschiedlich: zwischen 0.8mm bis 3.3mm pro Jahr bei einer Temperaturspanne der Betonplatten bis 48°C. Durch Verschiebung einer Gruppe von Betonfahrbahnplatten (Blockverschiebung) bewegte sich die Fuge an der Messstelle 6 bis 5.6mm pro Jahr. Es wurden keine sprunghaften Bewegungen festgestellt. Mehrheitlich bewegten sich die Fugen um <0.1mm pro Stunde. Eine Ausnahme bildete die Fuge an der Messstelle 6 mit einer Blockverschiebung von 1.3mm innerhalb einer Stunde (*Abbildung 7.2.4*). Pro Tag wurden maximale Fugenbewegungen zwischen 0.4mm und 1.4mm gemessen. Bei der Messstelle 6 wurde eine maximale Bewegung durch Blockverschiebung von 1.7mm pro Tag gemessen.

Aus diesen Messungen kann gefolgert werden, dass keine der Prüfungen zur Feststellung der Dehnbarkeit und Haftfestigkeit der Fugen den wirklichen Bewegungen am Objekt entsprechen. Die Haft- und Dehneigenschaft der Fugen werden in der Schweizer Norm SN 671920 bei -20°C mit einer Fugendehnung von 1mm pro Stunde bis zu einer Gesamtdehnung von 4.0mm definiert. Die Anforderung ist erfüllt, wenn weder Flankenablösung noch Rissbildung in der Fugenvergussmasse entstehen. Diese Prüfbedingungen sind für Fugenvergussmassen zwar extrem hart, insbesondere wenn die Prüfkörper die Anforderungen nach 14-tägiger Wasserlagerung erfüllen müssen, doch hat die Arbeit gezeigt, dass Fugenvergussmassensysteme, welche die Anforderung dieser Prüfnorm erfüllten, tatsächlich auch in der Praxis tauglich sind. Eine Ausnahme war FM1, bei der die Polymere beim Einbau fast vollständig zersetzt wurden.

9.6.3 Dynamische Fugenbewegungen infolge Verkehrseinfluss

Durch die Verkehrsbelastung bewegten sich die Betonplatten im Bereich der Fugen in Horizontal- und Vertikalrichtung. Die Messungen an zwei Messstellen ergaben folgende Erkenntnisse:

Dynamische Horizontalbewegungen:

Die gemessenen dynamischen Horizontalbewegungen entstanden vor allem aus der Biegung der Betonfahrbahnplatten bei einer Überfahrt. Die Plattenschubbewegungen waren sehr klein und vernachlässigbar. Die Interpretation der grafischen Darstellungen der Messwerte gab den Hinweis, dass die gemessenen Horizontalbewegungen infolge einer Randverdrehung der Betonplatten entstanden. Die maximal gemessene Horizontalbewegung bei einer Geschwindigkeit von 80km/h eines zweiachsigen und 15.94t schweren LKW betrug zwischen 0.015mm und 0.016mm. Etwa gleich gross waren die Bewegungen bei einer Fahrgeschwindigkeit von 60km/h.

Dynamische Vertikalbewegungen:

Die dynamischen Vertikalbewegungen setzen sich zusammen aus der differentiellen Längsneigung und der relativen Vertikalverschiebung durch die Biegung der Betonplatten infolge Last. Die maximal gemessene Vertikalbewegung bei einer LKW-Geschwindigkeit von 80km/h betrug 0.031mm an der Messstelle 1 und 0.075mm an der Messstelle 2. Die Bewegungen bei einer Fahrgeschwindigkeit von 60km/h waren ähnlich wie bei 80km/h.

Befestigung zweier Betonplatten an der Fuge:

Die Interpretation der Kurven der Messsignale ergab, dass von einer gelenkigen Verbindung nicht ausgegangen werden kann. Somit war die Verbundfunktion der Dübel an den gemessenen Fugen vermutlich nicht mehr gewährleistet. Dies könnte auf Rostbildung an den Dübeln zurückzuführen sein.

10 FOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNG FÜR DIE PRAXIS

Diese Arbeit und die Erfahrungen belegen, dass in der Schweiz bezüglich Fugenvergussmassen noch ein grosser Handlungsbedarf besteht. Die Qualität von mehr als der Hälfte der sieben untersuchten Fugenvergussmassensysteme entsprach den Anforderungen der Schweizer Norm nicht. Nur drei von sieben Systemen konnten nach fünf Jahren auf der Versuchsstrecke noch als tauglich bewertet werden. Die Untauglichkeit der vier Fugenvergussmassensysteme war eindeutig in der Materialqualität und der mangelnden Verarbeitung durch die Einbauequipe begründet. Für Fugenabdichtungen mit Fugenvergussmassen ist eine Regelung und eine Kontrolle der Qualität sowohl für die Baustoffe als auch für den Einbau unbedingt notwendig.

10.1 Materialeigenschaften

Fugenvergussmassen müssen dauerhaft im Winter dehnfähig und im Sommer standfest bleiben und zudem an den Betonflanken bei allen Witterungsverhältnissen gut haften. Die Erfüllung dieser Anforderungen hängt primär von der Zusammensetzung der Fugenvergussmassen und in zweiter Linie von einem systemgerechten Einbau ab.

10.1.1 Alterung durch den Einbau

Die Untersuchung der Polymerersetzung mittels Gelpermeationschromatografie (GPC) ergab, dass drei der untersuchten Fugenvergussmassensysteme durch den Einbau sehr stark strapaziert wurden. Bei zwei Produkten wurden bis ca. 80% der SBS-Polymere infolge Einbautemperaturen bis zu 280°C zersetzt. Als Folge wurden diese Fugenvergussmassen sehr spröde in der Kälte (gemäss Prüfung Kugelfallprobe SN 671 917) und weniger standfest in der Wärme (gemäss Prüfung Fließlänge SN 671 916). Auf der Versuchsstrecke waren sie

untauglich. Aufgrund der Untersuchung und der Erfahrung der EMPA beträgt der Abbau von SBS bei einer schonenden, vom Hersteller angegebenen Einbautemperatur maximal 30 GPC-Flächen-%. Aus diesem Grund dürfen die Fugenvergussmassen aus Polymerbitumen mit SBS keinesfalls über diese Temperatur (im Normalfall $180\pm 5^\circ\text{C}$) erwärmt werden.

Bei einem Fugenvergussmassensystem konnte eine Überhitzung nicht vermieden werden, da die Fugenvergussmasse beim Einbau in einem Kocher ohne Ölummantelung, Temperatur- und Rührwerksregelung aufgeschmolzen wurde. Solche Kocher müssen für den Einbau von Fugenvergussmassen unbedingt verboten werden.

Je länger die Fugenvergussmassen im Aufschmelzofen bei Einbautemperatur verweilen, desto mehr zersetzen sich die Polymerkomponenten. Um die Fugenvergussmassen zu schonen, muss die Menge der Fugenvergussmasse so dosiert werden, dass der Ofen sukzessive beschickt werden kann und die erwärmte Masse am gleichen Einbautag verbraucht wird. Die Vergussmassenreste vom Vortag sind aus dem Ofen zu entfernen und dürfen nicht weiter verwendet werden.

Fazit: - Bei schonendem Einbau beträgt der Abbau von SBS-Polymeren maximal 30 GPC-Flächen-%.
- Kocher ohne Ölummantelung sowie Temperatur- und Rührwerksregelung sind zu verbieten.
- Die Fugenvergussmasse muss im Ofen so dosiert werden, dass die erwärmte Masse noch am gleichen Tag verbraucht wird. Fugenvergussmassenreste vom Vortag sind zu entfernen.

10.1.2 Alterung im Betrieb

Zersetzung der Polymere der Fugenvergussmassen:

Die begleitenden Untersuchungen mittels Gelpermeationschromatografie haben gezeigt, dass die Polymerkomponenten in allen Fugenvergussmassen während 5 Jahren Bewitterung praktisch unverändert blieben.

Obwohl nach fünf Jahren Betrieb keine nennenswerte Zersetzung der Polymerhauptkomponenten auftrat, wurden die Fugenvergussmassen allmählich härter. Vermutlich war eine oxidative Alterung von Bitumen und ein Verdampfen flüchtiger Anteile im Bitumen für diese Verhärtung der Fugenvergussmassen verantwortlich. Drei der untersuchten Fugenvergussmassen mit einem minimalen Polymeranteil von 4.2 GPC-Flächen-% nach dem Einbau zeigten eine ziemlich gute Flankenhaftung. Wahrscheinlich half die elastische Eigenschaft der Polymerkomponenten nach der Verhärtung des Bitumens, weiterhin die Fugendehnung im Winter zu überbrücken und die Haftung am Beton zu ermöglichen.

Fazit: Der Zustand der Polymere nach dem Einbau ist entscheidend für die Lebensdauer der Fugen.

Versuchsstrecke und Modellkörper:

Parallel zur Alterung der Fugen auf der Versuchsstrecke wurde die Langzeitalterung anhand von Modellkörpern untersucht, die am Rand der Versuchsstrecke gelagert und somit den gleichen Wetterbedingungen ausgesetzt wurden. Im Unterschied zu den Fugen auf der Versuchsstrecke wurden die Modellkörper jedoch nicht durch Verkehr, Fugenbewegungen und direkt aufgetragenes Streusalz beansprucht. Die chemischen und physikalischen Untersuchungen ergaben, dass der Zustand der Fugenvergussmassen der Versuchsstrecke und der Modellkörper nach gleicher Alterungszeit identisch war.

Fazit: Eine Verfolgung der Langzeitalterung von Fugenvergussmassen aus Polymerbitumen oder ähnlichen Stoffen mit Modellkörpern direkt beim Objekt ist sinnvoll, da auf diese Weise Entnahmen ohne Verkehrsbehinderung vorgenommen werden können.

10.1.3 Fugenvergussmassen und Dauerhaftigkeit

Die Zusammensetzung der Fugenvergussmassen:

Zwei Charakteristika der Zusammensetzung scheinen besonders wichtig für die Dauerhaftigkeit der Fugenvergussmassen zu sein: der Polymeranteil und die Art der organischen Füllstoffe.

Polymeranteil:

Zwei Fugenvergussmassen mit einem hohen Polymeranteil (Styrol-Butadien-Styrol Copolymere SBS) bei Anlieferung von mehr als 7.9 GPC-Fläche-% bewährten sich auf der Versuchsstrecke nach fünf Jahren Betrieb. Eine Ausnahme bildete eine dritte Fugenvergussmasse FM1 mit einem Polymeranteil von 8.6 GPC-Fläche-%. Die grossen Polymermoleküle dieser Vergussmasse FM1 waren trotz einer Einbau-Temperatur von 180°C sehr instabil und zersetzten sich dabei um ca. 74%. Nach fünf Jahren entstand bei dieser Fugenvergussmasse eine Flankenablösung bis etwa 15% der gesamten Fugenlänge.

Fazit: Die SBS-Polymere in den Fugenvergussmassen beeinflussen die Dauerhaftigkeit der Fugen am meisten. Entscheidend sind eine ausreichende Menge und die Stabilität der Polymere bei der vom Hersteller angegebenen Einbautemperatur.

Füllstoffe:

Zwei Fugenvergussmassen (FM6 und FM7) der drei tauglichen Fugenvergussmassen enthielten Gummimehl und Fasern als organische Füllstoffe.

Fazit: Zusatzstoffe, wie Gummimehl und Fasern, könnten bei homogener Verteilung die Eigenschaften von Fugenvergussmassen verbessern.

Fugenvergussmassensystem mit oder ohne Voranstrich:

Die Fugenvergussmasse FM7 wurde in dieser Arbeit ohne Voranstrich eingebaut. Nach 5 Jahren Betrieb zeigte diese Fugenvergussmasse ein gutes Verhalten.

Fazit: Nach fünf Jahren Betrieb konnte keine positive Auswirkung der Verwendung des Voranstrichs bezüglich Blasenbildung und Flankenablösung festgestellt werden.

10.2 Praxisrelevanz der Laborprüfungen

10.2.1 Schlechte Dauerhaftigkeit trotz Erfüllung der Prüfanforderung

Mit einem Polymergehalt von 8.6 GPC-Flächen-% erfüllte die Fugenvergussmasse FM1 im Anlieferungszustand alle untersuchten normierten Laborprüfungen. Trotz fachgerechten Einbaus erwies sich diese Fugenvergussmasse aber auf der Versuchsstrecke als nicht tauglich. Die Untersuchung mittels Gelpermeationschromatografie der Proben nach dem Einbau zeigte, dass deren Polymere gegenüber Hitze sehr instabil waren, so dass die Polymere

durch den Einbau fast vollständig zersetzt wurden. Die Temperaturempfindlichkeit dieser Fugenvergussmasse könnte der Grund der ungenügenden Gebrauchstauglichkeit sein.

Fazit: Die Voraussage der Laboruntersuchungen der Proben im Anlieferungszustand kann verbessert werden, indem die Fugenvergussmassen bei Anlieferung zur Simulation des Einbaus zuerst künstlich gealtert werden (z.B. während 6 Stunden bei 180°C, ohne Luftzufuhr gerührt) bevor sie gemäss Schweizer Norm untersucht werden.

10.2.2 Gute Dauerhaftigkeit trotz Nichterfüllung der Prüfanforderung

Die Fugenvergussmasse FM3 gehörte zu den tauglichen Fugenvergussmassensystemen in dieser Arbeit. Sie erfüllte alle Anforderung ausser jener der Prüfung Penetration. Die Untersuchung hat unterstreicht, dass die Penetration von Fugenvergussmassen nichts über deren Zustand aussagt (siehe Kap. 10.2.3, Penetration).

Fazit: Auf die Anforderung der Prüfung Penetration sollte verzichtet werden.

Dasselbe trat auch bei der FM6 auf. Sie erfüllte zwar die Anforderung "Dehnbarkeit bei –20°C gemäss SN 671 920" nicht, hat sich aber trotzdem auf der Versuchsstrecke auch nach 5 Jahren als tauglich erwiesen. Der Grund der Nichterfüllung der Anforderung der Prüfung "Dehnbarkeit bei –20°C" lag eindeutig in der Prüfkörperherstellung, die aufgrund falscher Angaben des Lieferanten vorgenommen wurde. Der Auftrag des Voranstriches war nach Angabe des Lieferanten so gross, dass sich eine dicke, glasartige Schicht Haftvermittler-Polymer an den Betonprismen bildete, wodurch vermutlich die Hafteigenschaft der Fugenvergussmasse verschlechtert wurde.

Fazit: Die genaue Angabe der Lieferanten über die Verbrauchsmenge des Voranstrichs ist von eminenter Bedeutung.

10.2.3 Empfehlung für die Prüfanforderungswerte

Dehnbarkeit bei –20°C (SN 691 920):

Die Prüfung "Dehnbarkeit bei –20°C" ist eine der wichtigsten Prüfungen zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Fugenvergussmassen. Sie hat den Charakter einer Systemprüfung für die Fugenvergussmasse und weist aufgrund dieser Arbeit eine sehr gute Korrelation zum Praxisverhalten auf.

Die bestehende Anforderung für die Prüfung "Dehnbarkeit bei –20°C" beträgt 4mm Dehnweg ohne Flankenablösung oder Rissbildung. Zwei Fugenvergussmassen, die auf der Versuchsstrecke tauglich waren, hatten einen Dehnweg von >8mm bei den Prüfkörpern sowohl ohne als auch mit Wasserlagerung. Eine Erhöhung der Anforderung z.B. von 4mm auf 5mm kann die Aussagekraft dieser Prüfung verstärken.

Der Anforderungswert der Maximalspannung von 1000kPa in der Fugenvergussmasse im Anlieferungszustand sollte weiterhin bestehen bleiben. Es wurde festgestellt, dass die maximale Kraft in der Fuge aufgrund der Prüfung der Modellkörper nach der Alterung an der Versuchsstrecke während 5 Jahren bis auf das ca. 3-fache zunahm.

Fazit: Die Prüfung "Dehnbarkeit bei –20°C" weist eine sehr gute Korrelation zum Praxisverhalten auf. Eine Erhöhung der Anforderung auf 5mm ist für die Aussagekraft der Prüfung sinnvoll. Der Anforderungswert der Maximalspannung von 1000kPa soll weiterhin bestehen bleiben.

Kugelfallprobe und Fließlänge:

Mit der Prüfung "Kugelfallprobe" gemäss SN 671'917 [N6] soll eine Beurteilung hinsichtlich Sprödigkeit der Fugenvergussmasse in der Kälte ermöglichen. Demgegenüber wird mit der Prüfung "Fließlänge" gemäss SN 671 916 [N7] die Tendenz zum Wegfliessen der Fugenvergussmasse in der Wärme bewertet. Beide Prüfungen sind weiterhin als wichtig zu bezeichnen. Die jetzige Anforderung der Kugelfall-Prüfung muss beibehalten bleiben. Hingegen sollte die Anforderung der Prüfung Fließlänge bei 60°C auf $\leq 3\text{mm}$ verschärft werden.

Fazit: Die bestehende Anforderung der Kugelfall-Prüfung sollte beibehalten bleiben. Hingegen sollte die Anforderung der Prüfung Fließlänge bei 60°C von $\leq 10\text{mm}$ auf $\leq 3\text{mm}$ herabgesetzt werden.

Penetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel:

Die Prüfung Penetration gemäss SN 671'740 [N8] gibt wie bei der Prüfung Erweichungspunkt mit Ring und Kugel SN 671'743 [N9] keine Auskunft über die Dauerhaftigkeit der Fugenvergussmassen im Betrieb. Sie können daher höchstens einer allgemeinen Charakterisierung und Identifizierung eines Produktes dienen. In dieser Arbeit widerspricht die Anforderung der Prüfung Penetration der Fugenvergussmassen bei Anlieferung sogar dem Praxisverhalten. Deswegen wird vorgeschlagen, die Anforderungswerte der beiden Prüfungen für die Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand wegzulassen.

Fazit: Eine Festlegung von Anforderungswerten beider Prüfungen für die Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand ist nicht sinnvoll.

10.2.4 Alterung der Fugenvergussmassen im Labor und in der Praxis**Alterung beim Einbau und künstliche Alterung im Labor mit RTFOT:**

Eine Alterung der Fugenvergussmassen während des Einbaus und nach fünf Jahren im Betrieb kann nicht mit einer RTFOT Laboralterung (180°C, mit intensiver Luftzufuhr) simuliert werden.

Fazit: Die Simulation der Einbaualterung für Fugenvergussmassen muss mit Methoden ohne intensive Luftzufuhr durchgeführt werden (z.B. die Fugenvergussmasse in einem geschlossenen Rundkolben bei 180°C während 6 Stunden rühren).

Aussage der Laborprüfungen über die Alterung der Fugenvergussmasse:*Penetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel:*

Fazit: Die Werte der Prüfungen Penetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel können keine Auskunft über die Alterung der Fugenvergussmassen im Sinne einer Zersetzung der Polymere durch eine Überhitzung geben.

Fließlänge:

Eine Zunahme der Fließlänge von mehr als 3mm kann auf die starke Zersetzung der Polymere in den Fugenvergussmassen hindeuten. Dies wurde bei zwei von drei Fällen der Fugenvergussmassen beobachtet, bei denen eine Zunahme der Fließlänge von 4mm bzw. 15mm mit einem Polymerabbau von 74 resp. 62 GPC-Flächen-% einher ging.

Fazit: Eine starke Zersetzung der Polymere in den Fugenvergussmassen kann mittels Prüfung Fließlänge subjektiv nachgewiesen werden.

Kugelfallprobe:

Fazit: Auch die Prüfung Kugelfallprobe bei -20°C gemäss (SN 671 917) der Proben nach dem Einbau kann auf eine starke Überhitzung der Fugenvergussmasse durch den Einbau hinweisen.

Gelpermeationschromatografie (GPC):

Fazit: Die Gelpermeationschromatografie ist eine gute Prüfmethode zur Charakterisierung des Zustandes der Polymere in den Fugenvergussmassen. Sie gibt Auskunft über das Ausmass des Polymerabbaus durch den Einbau bzw. durch die Bewitterung.

Dynamic Shear Rheometer (DSR):

Die Bestimmung der Verhärtung der Fugenvergussmassen mittels DSR ist im Vergleich zur Penetrationsbestimmung viel sinnvoller, da diese Methode erlaubt, physikalisch fundierte Kennwerte, wie G^* -Module, Phasenwinkel, plastischer und elastischer Anteil, mit einer kleinen Probenmenge von ca. 0.5g im breiten Temperaturbereich (z.B. $70 \dots 10^{\circ}\text{C}$) bei verschiedenen Frequenzen (z.B. $0.1 \dots 30\text{Hz}$) zu erfassen. Die Ergebnisse der Modulwerte der Methoden DSR und KAST waren im Bereich der $\text{Log } f_R = -2 \dots +1$ [Hz] praktisch deckungsgleich (siehe Abbildungen 8.1.6 ... 8.1.11). Trotz einer grösseren, notwendigen Probenmenge (ca. 200g) liegt der Vorteil vom KAST-Verfahren darin, dass grobe Anteile in der untersuchten Fugenvergussmasse, wie Gummigranulat, wegen des grossen Messspalts die Ergebnisse nicht verfälschen.

Fazit: Die Prüfung DSR und KAST sind gut geeignet zur Untersuchung der Versteifung der Fugenvergussmassen infolge Alterung.

10.3 Qualitätskontrolle

Nur Fugenvergussmassensysteme, die der Anforderung der Schweizer Norm entsprechen, sollten angewendet und zugelassen werden.

Zusätzlich müssten die Produkte vor dem Einbau einer regelmässigen Qualitätsüberwachung der Produktion unterzogen werden. Die *Tabelle 10.2.1* gibt Empfehlungen für die entsprechenden Prüfungen.

Prüfungen	gemäss Norm	Volluntersuchungen	Kontrolle vor Einbau	Qualitätsüberwachung
Untersuchungen gemäss Prüfvorschrift in der Schweizer Norm	SN 671'610 (ab 2003 SN 670'280)	x	---	---
Aussehen und Beschaffenheit	SN 671'913 (ab 2003 SN 670'696)	1)	x	x
Fliesslänge	SN 671'916 (ab 2003 SN 670'696)	1)	x	x
Kugelfallprobe	SN 671'917 (ab 2003 SN 670'602)	1)	x	x
Dehnbarkeit bei -20°C (Proben ohne und mit Wasserlagerung)	SN 671'920 (ab 2003 SN 670'697)	1)	x	x
Polymerzustand mittels Gelpermeation-schromatografie	2)	a)	b)	c)

Tabelle 10.2.1: Prüfungen zum Nachweis der Qualität der Fugenvergussmassen

- x erfüllt die entsprechende Prüfung
- 1) in SN 671'610 enthalten
- 2) gemäss technischer Prüfvorschriften Kap. 2.1.1.11 der ASTRA Richtlinie für Fahrbahnübergänge aus Polymerbitumen (Ausgabe 1998)
- a) als Fingerprint (Bestimmung der Polymergrösse und des Polymeranteils)
- b) Identifikation der einzubauenden Fugenvergussmasse; Vergleich mit a)
- c) Bestimmung der Zersetzung der Polymere durch den Einbau; Vergleich mit b)

10.4 Einbauausführung

Neben der Qualität der Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand ist das Vorgehen beim Fugeneinbau für die Lebensdauer der Fugen von entscheidender Bedeutung. Die Eigenschaften der Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand können sich sehr stark durch den Einbau verändern. Die Beschaffenheit der Fugenflanken und die Applikation der Voranstriche beeinflussen die Haftung der Fugenvergussmassen am Beton sowie die Blasenbildung im Betrieb. Aber auch die Fugenfüllung ist für die Verbindung zwischen den Fugenvergussmassen-Schichten und zwischen den Fugenvergussmassen und den Betonflanken sehr wichtig.

10.4.1 Ausführungsanweisungen

In der Norm muss die Erstellung und Anwendung von Ausführungsanweisung für die Fugenabdichtungsarbeiten gefordert werden.

Wie bei der Tränkmasse in [N1] müssen in den Ausführungsanweisungen folgende Informationen enthalten sein:

Allgemeines:

- Bezeichnung des Systems
- Anwendungsbereiche Neubau/Erhaltung/Fugentyp

Fugenvergussmasse und Voranstrich (falls vorhanden):

- Bezeichnung
- Deklaration der Stoffkomponenten
- Farbe
- Lieferform
- Liefermenge
- Lagerungsbedingungen
- Abfallentsorgung flüssig/fest
- Sonstiges

Herstellung der Fugen:

- Fugendimension bei Neubau und Erhaltung
- Schneiden/Fräsen bei Neubau und Erhaltung
- Sauberkeit der Fugen
- Sonstiges

Vorbehandlung der Fugen:

- Vorbereitungsverfahren (z.B. Sandstrahlen, Bürsten etc.)
- Sauberkeit der Fugen
- Zeit bis zum Eintrag des Voranstriches
- Sonstiges

Eintrag des Voranstriches (falls verwendet):

- Vorbereitungsverfahren vor dem Eintragen des Voranstriches (z.B. Heisspressluft)
- Intensität der Erwärmung der Fugen
- Zustand der Fugen vor dem Eintragen des Voranstriches (z.B. Sauberkeit, Feuchtigkeit, Temperatur) mit entsprechendem Ausführungsverfahren (Reinigen und Trocknen etc.)
- Zugelassene Wetterbedingungen für die Arbeit (Wetter, Lufttemperatur, Fugentemperatur, relative Luftfeuchtigkeit etc.)
- Optimale Eintragsmenge des Voranstriches
- Eintragsverfahren (Spritzen, Pinseln etc.)
- Trocknungszeit bis zur Fugenfüllung
- Sonstiges

Fugenfüllung:

- Erwärmungsofen und Giesseinrichtungen
- Einrichtung zur Messung der Temperaturen der Fugenvergussmasse
- Zulässige Erwärmungstemperatur, Verweildauer der Fugenvergussmasse im Ofen
- Maximal zulässige Zeit zwischen der Entnahme der heissen Fugenvergussmasse aus dem Ofen und der Fugenfüllung
- Fugenzustand vor der Füllung (Sauberkeit, Temperatur)
- Anzahl Schichten der Fugenfüllung und Solldicke jeder Schicht
- Beim Einbau von mehreren Schichten müssen die Zeitabstände zwischen zwei Schichten definiert werden. Dafür kann auch die Temperatur der vorherigen Schicht unmittelbar vor der Füllung der folgenden Schicht angegeben werden.
- Zeitangaben bis zur Freigabe für den Verkehr
- Sonstiges

10.4.2 Einbaugerätschaft

- Im Vergleich zu anderen Methoden, wie z.B. Sandstrahlen, ist das Einbürstverfahren (mit rotierenden Stahldrahtbürsten) zur Vorbehandlung der Fugenflanken sehr gut geeignet.
- Eine Verwendung von Heisspressluft zum Entfernen der Staubreste und zum Erwärmen der Fugen bei der Fugenabdichtung ist unumgänglich.
- Für den Eintrag des Voranstriches wird das Spritzverfahren empfohlen, da damit qualitativ genau gleich gut aber doch schneller und speditiver als mit Pinseln gearbeitet werden kann.
- Genauer Thermometer zur Temperaturmessung der Fugenvergussmasse.
- Die Verwendung eines Kochers ohne Ölummantelung, Temperatur- und Rührwerksregelung ist zu verbieten.
- Das Vergiessen der Fugenvergussmasse mit einer Lanze, welche die Fugenvergussmasse vom Ofen direkt in die Fuge fördert, ist die sicherste Fugenfüllmethode, da dabei nur wenig Energie verloren geht. Die Lanze soll gegen einen Temperaturverlust gut isoliert sein.
- Beim Füllen mit einem Giesskübel ist die Verwendung eines heissen Gleitschuhs zweckmässig.
- Durch Verwendung von Klebebändern ergibt sich eine saubere Oberfläche der Fugen.

10.4.3 Beschaffenheit der Fugenflanken und Vorbehandlung der Fugen

- Fugenvergussmassen dürfen wegen der Gefahr von Blasenbildung nicht auf Beton mit Sackporen oder Lunkern aufgebracht werden. Ein Voranstrich kann die Blasenbildung der Fugenvergussmasse an Fugenflanken mit Hohlräumen nicht verhindern.
- Fugenflanken und -boden müssen frei von Öl, Fett, Staub, Sand, Blättern etc. sein.
- Unmittelbar vor dem Eintragen des Voranstriches müssen die Fugen mit Heisspressluft gesäubert und leicht erwärmt werden.
- Eine Vorbehandlung der Fugenflanken durch Sandstrahlen oder Bürsten ist vorteilhaft, da allfällige Verschmutzungen wie Öl oder Fett entfernt werden und die Flankenoberfläche dadurch aufgeraut werden.

10.4.4 Eintrag des Voranstriches

- Der Voranstrich darf nur bei trockenem Wetter ohne Wind aufgebracht werden.
- Der Voranstrich soll nur ausgeführt werden, wenn die Fugenfüllung unmittelbar nach der Trocknungszeit (gemäss Ausführungsanweisungen) ausgeführt werden kann.
- Eine Verschmutzung des aufgetragenen Voranstriches durch Staub, Sand, Blätter etc. ist zu vermeiden.
- Die Fugen müssen vor dem Auftragen des Voranstriches sauber und trocken sein.
- Der Voranstrich muss vor der Applikation homogenisiert werden und eine Temperatur von $\geq 15^{\circ}\text{C}$ haben.
- Die Ausführungsanweisungen (Eintragsmenge, Trocknungszeit etc.) sind einzuhalten.

10.4.5 Fugenfüllung

- Die Fugenfüllung darf nur bei trockenem Wetter ohne starken Wind ausgeführt werden.
- Vor der Fugenfüllung müssen Fugenflanken und -boden sauber und trocken sein.
- Die Verweildauer der Fugenvergussmasse im Kocher darf wegen der Zersetzung der Polymere nicht länger als sechs Stunden betragen. Die Menge der Fugenvergussmasse ist so zu dosieren, dass der Ofen sukzessive beschickt werden kann, um die Verweildauer der Fugenvergussmassen zu verkürzen. Die erwärmte restliche Fugenvergussmasse im Ofen muss am gleichen Arbeitstag ausgeleert und darf nicht für eine Fugenfüllung an einem anderen Tag benutzt werden.
- Die Fugenvergussmasstemperatur im Ofen muss nach den Herstellerangaben eingestellt werden. Bei SBS-Fugenvergussmassen ist eine Erwärmung bei $180\pm 5^{\circ}\text{C}$ empfehlenswert.
- Während des Füllens muss die Fugenvergussmasse eine Temperatur haben, die in der Nähe der Vergiesstemperatur (gemäss SN 671 914) liegt. Deswegen ist die Verwendung einer isolierten Lanze sinnvoll. Bei der Füllung mit einem Giesskübel ist die Menge der Fugenvergussmasse sowie die Zeit zwischen der Entnahme aus dem Ofen und dem Füllen entsprechend zu optimieren. Beim Verwenden eines Gleitschuhs ist dieser immer wieder zu erwärmen.
- Die Fugenfüllung soll in zwei Schichten durchgeführt werden. Der Zeitabstand zwischen der ersten und zweiten Schicht soll so definiert werden, dass sich die beiden Schichten einwandfrei verbinden. Unmittelbar vor der Füllung der zweiten Schicht ist eine leichte, vorsichtige Erwärmung der ersten Schicht angezeigt, da dabei allfällige Lufteinschlüsse in der ersten Schicht entfernt werden und die Oberfläche der ersten Schicht erwärmt wird.

10.4.6 Eigenüberwachung

Der Einbauablauf und die Einbaudaten jeder Etappe sollten protokolliert und der Bauleitung ausgehändigt werden. Das Einbauprotokoll ist Bestandteil des Abnahmeprotokolls. Während des Einbaus sind Rückstellmuster des Voranstriches und der Fugenvergussmasse zu entnehmen.

Einbauprotokoll:

Folgende Informationen sollen im Einbauprotokoll enthalten sein (siehe auch Beispiel im Anhang 2):

- ◆ Angaben über den Auftraggeber
- ◆ Angaben über die Bauleitung
- ◆ Angaben über die Bauunternehmung
- ◆ Angaben über die Einbauequipe
- ◆ Angaben über die Objektdaten und -spezifikation
- ◆ Daten zu den Einbaumaterialien: Voranstrich und Fugenvergussmassen
- ◆ Bezeichnung der Arbeitsetappe
- ◆ Angaben über die Witterung am Ausführungstag
- ◆ Herstellung der Fugen:
 - Herstellungsverfahren

- ◆ Vorbehandlung der Fugen:
 - Vorbehandlungsverfahren
- ◆ Applikation des Voranstriches:
 - Zustand sowie Sauberkeit der Fugenflanken und –boden vor dem Aufbringen des Voranstriches
 - Wetterbedingungen inklusive Lufttemperatur und –feuchtigkeit
 - Temperatur des Voranstriches im Behälter vor der Applikation
 - Fugentemperatur
 - Applikationsverfahren
 - Verbrauchsmenge
 - Windsituation (Intensität und Richtung) bei und nach der Applikation
 - Trocknungszeit und Wetterbedingungen bis zur Fugenfüllung
- ◆ Fugenfüllung:
 - Zustand sowie Sauberkeit von Fugenflanken und –boden vor der Fugenfüllung
 - Wetterbedingungen inklusive Lufttemperatur und –feuchtigkeit
 - Temperatur der Fugenvergussmasse im Ofen, stündlich
 - Fugentemperatur vor der Füllung
 - Vorbehandlung der Fugen vor der Fugenfüllung
 - Füllverfahren
 - Anzahl und Dicke der Schichten
 - Zeitabstand zwischen der ersten und zweiten Schicht
 - Windlage bei und nach der Applikation
 - Wetterbedingungen bei der Abkühlung nach der Füllung
 - Anzahl verwendeter Gebinde bzw. Verbrauchsmenge der Fugenvergussmasse pro Einbaustappe oder –tag.
 - Dauer bis zur Freilassung für den Verkehr

Rückstellmuster:

Es wird empfohlen, folgende Rückstellmuster im Rahmen der Eigenüberwachung zu entnehmen und gemäss QS-Vorschrift der Unternehmung zu lagern:

- Eine Probe des Voranstriches (ca. 0.5l) nach der Homogenisierung vor der Applikation
- Eine Probe der Fugenvergussmasse im Anlieferungszustand (ca. 1/5 des Gebindes)
- Eine Probe der erwärmten Fugenvergussmasse aus dem Ofen (ca. 1kg) bei Einbau-Beginn
- Eine Probe der erwärmten Fugenvergussmasse aus dem Ofen (ca. 1kg) bei Einbau-Ende.

10.5 Fugendbewegungen und -temperaturen

In dieser Arbeit wurde eine Langzeiterfassung der Fugendbewegungen und –temperaturen während 4 Jahren durchgeführt. Dazu wurden dynamische Fugendbewegungen bei definierter Fahrzeuglast und Fahrgeschwindigkeit untersucht (siehe Kap. 7). In Kap. 9.6.1 und 9.6.2 sind die Erkenntnisse aus diesen Messungen zusammengefasst. Diese Daten können zur technischen Anwendung sowohl für die bauliche Konzeptionierung als auch für die Prüftechnik eingesetzt werden. Die Messung hat gezeigt, dass keine der Prüfungen zur Feststellung der Dehnbarkeit und Haftfestigkeit der Fugen den wirklichen Bewegungen am Objekt entsprechen.

10.6 Empfehlung für weiteres Vorgehen

Die Eigenschaften und ein fachgerechter Einbau von Fugenmaterialien sind verantwortlich für die Dauerhaftigkeit der Fugen. Insbesondere sind die Eigenschaften der Materialien nach dem Einbau massgebend für die Betriebstauglichkeit. Bezüglich Eigenschaftsänderung durch den Einbau liessen sich zwei Gruppen von Fugenvergussmassen unterscheiden. Die erste Gruppe verhielt sich nach dem normalen, fachgerechten Einbau stabil. Die zweite Gruppe war so instabil, dass sich deren Polymere trotz normalen Einbaus fast vollständig zersetzten. Für diese zweite Gruppe der Fugenvergussmassen sind die bisherigen Untersuchungen der Qualität der Proben im Anlieferungszustand praktisch sinnlos, da sich diese nach dem Einbau anders verhalten.

Um beide Gruppen von Fugenvergussmassen zu erfassen, wäre die Untersuchung der Qualität der Proben erst nach einer Voralterung sinnvoll. Diese Voralterung sollte so ausgeführt werden, dass die Eigenschaften der Fugenvergussmassen etwa gleich bleiben wie diejenigen nach dem Einbau mit einer Verweildauer der Fugenvergussmasse im Ofen bei etwa $180\pm 5^\circ\text{C}$ von ca. $6\text{h}\pm 10\text{min}$.

Aufgrund dieser Arbeit ist eine Voralterungsmethode mit einer Kombination zwischen Temperatur und Luft, wie bei der Methode RTFOT, nicht geeignet, da dabei die Polymere durch die Luftzufuhr sehr stark oxidiert werden. Die Entwicklung einer Voralterungsmethode der Fugenvergussmasse zur Simulation des Einbaus war nicht Ziel dieser Arbeit, sollte aber in einer nächsten Forschungsarbeit in Angriff genommen werden.

Dübendorf, den 27. Februar 2003

Der Projektleiter:


S. Hean

EMPA Dübendorf
Strassenbau/Abdichtungen
Der Abteilungsleiter:


Dr. M.N. Partl

Dank:

Wir möchten allen Kollegen der Abteilung Strassenbau/Abdichtungen (EMPA) sowie Herrn Ebschner, unserem IASTE-Praktikanten (2002) für die Mitwirkung bei der vorliegenden Forschungsarbeit unseren Dank aussprechen. Weiterhin danken wir der Abteilung Elektronik/Messtechnik (EMPA) für die Durchführung der Messungen von Fugentemperaturen und –bewegungen sowie Herrn Emery für die Übersetzung der Zusammenfassung ins Französische.

Dieser Dank gilt auch dem Tiefbauamt des Kantons Uri, insbesondere den Herren van den Berg und Dewitte für die Bereitstellung der Versuchsstrecke und die gute Zusammenarbeit.

Des weiteren möchten wir folgenden Unternehmungen für den Einbau ihrer Fugenvergussmassen am Objekt danken: Aeschlimann AG, Zofingen; Bimoid AG, Littau; Mageba SA, Bülach; RSAG, Münchenstein; Ertec SA, Mont-Sur-Lausanne; STRAG, Wabern; Tracomme Adliswil.

11. LITERATUR- UND NORMENVERZEICHNIS

Literatur:

- [L1] E. Braun: Bitumen. 1991, ISBN3-481-00274-2
- [L2] Hean, S., Partl M.N.: *Polymerbitumen-Fugendichtungsmassen; Prüfmethoden aufgrund von Laboruntersuchungen*. Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdept. Bericht Nr. 370 (1996)
- [L3] Hean, S: *Ausführung und Langzeitbeobachtung - Die Richtlinie auf dem Felde*. ASTRA/EMPA/VESTRA Tagung über Fahrbahnübergänge aus Polymerbitumen, Dübendorf, 24. Feb. (2000), ISBN 3-905594-13-7
- [L4] Manfred N. Partl: *Prüfen und Überwachung - Die Richtlinie unter Laborbedingungen*. ASTRA/EMPA/VERAS Tagung über Fahrbahnübergänge aus Polymerbitumen, Dübendorf, 24. Feb. (2000), ISBN 3-905594-13-7
- [L5] *Fahrbahnübergänge aus Polymerbitumen*. ASTRA/EMPA/VERAS Tagungsband, Dübendorf, 24. Feb. (2000), ISBN 3-905594-13-7
- [L6] Sivotha Hean; Manfred N. Partl: *Fahrbahnübergänge aus Polymerbitumen; Objektverfolgung und Datenerfassung*. Forschung im Auftrag vom Bundesamt für Strassen (Bericht voraussichtlich 2001)
- [L7] Hermann W. Fritz, Sivotha Hean: *Erfahrungen mit Brückenabdichtungen und Brückenbelägen*; Strasse und Verkehr Nr. 3 (1998)
- [L8] Hermann W. Fritz, Sivotha Hean: *Etanchéité et revêtement des ponts, Expérience en Suisse*; Revue Générale des Routes N° 769 (1999)
- [L9] Sivotha Hean; Manfred N. Partl, Koichi Oba: *Baustoffe und Eigenschaften von Polymerbitumen-Dichtungsbahnen*, SIA-Tagung in Olten (Schweiz) (Mai 1998)
- [L10] Manfred N. Partl: *Polymerbitumen-Brückenabdichtungssysteme in der Schweiz im Spiegel einer Praxisumfrage*. SIA-Tagung in Olten (Schweiz) (Mai 1998)
- [L11] *Brückenabdichtungssysteme mit Polymerbitumen-Dichtungsbahnen*; Referate der Tagung vom 29. April 1998 in Olten; SIA-Dokumentation D0147(1999)
- [L12] Christiane Raab und Manfred N. Partl Anwendung der Thermografiemessung im Strassenbau. Bitumen (1996/Heft 2)
- [L13] Ebschner P., Hean S. Partl M.N., EMPA FE-Bericht 840682/1: Interpretation von Messungen dynamischer Fugenbewegungen an Betonfahrbahnplatten, August 2002
- [L14] Hahn, Durchlaufträger, Rahmen, Platten und Balken auf elastischer Bettung. Aufl.14, überarbeitet, Düsseldorf: Werner; 1985
- [L15] Martin Hugener: Funktionsstabilität von Polymerbitumen. Strasse und Verkehr, 4/1995
- [L16] Size Exclusion Chromatography and Ion Exchange Chromatography; Separations of Asphalts, SHRP-A-663, 8/1993
- [L17] Dynamic Shear Rheometer, SHRP-A-410, 7/1994, ISBN 0-309-05821-X
- [L18] Osvaldo A. Fonseca and Matthew W. Witczak: A Prediction Methodology for the Dynamic Modulus of In-Place Aged Asphalt Mixtures Journal of AAPT Vol 65, (1966)

Normen:

- [N1] ASTRA Richtlinie Bereich Kunstbauten: Fahrbahnübergänge aus Polymerbitumen. Bundesamt für Strassen (1998)
- [N2] TP-BEL-FÜ: *Technische Prüfvorschriften für Fahrbahnübergänge aus Asphalt*. Deutsche Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Asphaltstrassen (1998)
- [N3] Fugenfüllmaterialien, Qualitätsvorschriften, SN 671'625a (1974)
- [N4] Fugenfüllmaterialien, Qualitätsvorschriften, SN 671'610 (1973)
- [N5] Voranstrich- und Vergussmassen, Dehnbarkeit, SN 671'920 (1974)
- [N6] Vergussmassen, Kugelfallprobe, SN 671'917 (1974)
- [N7] Vergussmassen, Fließlänge, SN 671'916 (1974)
- [N8] Bituminöse Bindemittel, Bestimmung der Penetration, SN 671'740 (1968)
- [N9] Bituminöse Bindemittel, Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel, SN 671'743 (1968)
- [10] Rilem Task Group 120-MRS/CIB W.83: Thermal analysis testing of roofing membrane materials. Interim report of Thermal Analysis Test Group, September 1993
- [N11] Betonbeläge, SN 640'461a (1994)

12. ANHANG

12.1 ANHANG 1

Ergebnisse der Untersuchungen der Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand

12.1 Ergebnisse der Untersuchungen der Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand (vor dem Einbau)

12.1.1 Fugenvergussmasse FM1

Normierte Prüfungen

Prüfungen	Prüfergebnisse	Anforderungen gemäss SN671'625a	erfüllt
Aussehen und Beschaffenheit	Schwarz, glänzend, fein griessig, weich, homogen	Homogen	Ja
Penetration (Nadel), 25°C	85·10 ⁻¹ mm	Anlieferungszustand: max. 100·10 ⁻¹ mm	Ja
Penetration (Konus), 25°C	80·10 ⁻¹ mm	Anlieferungszustand: 30·10 ⁻¹ mm bis 90·10 ⁻¹ mm	Ja
Erweichungspunkt RuK	113°C	min. 85°C	Ja
Fliesslänge	0mm	max. 10mm	Ja
Kugelfallprobe	Keine Risse, nicht zersprungen	Kein Zerspringen, keine Anrisse bei 3 von 4 Kugeln	Ja
Dehnbarkeit	Ohne Wasserlagerung:	<ul style="list-style-type: none"> – Bei 4.0mm Fugendehnung keine Risse, keine Ablösung – Maximalspannung: ≤ 1.000N/mm² – Spannung nach Versuchsende: Werte bestimmen und angeben 	Ja
	<ul style="list-style-type: none"> – Keine Risse, keine Ablösung bei Fugendehnung 4mm – Maximalspannung: 0.392N/mm² – Spannung nach Versuchsende: 0.283N/mm² 		
Dehnbarkeit	Mit Wasserlagerung:	<ul style="list-style-type: none"> – Bei 4.0mm Fugendehnung keine Risse, keine Ablösung – Maximalspannung: ≤ 1.000N/mm² – Spannung nach Versuchsende: Werte bestimmen und angeben 	Ja
	<ul style="list-style-type: none"> – Keine Risse, keine Ablösung bei Fugendehnung 4.0mm – Maximalspannung: 0.263N/mm² – Spannung nach Versuchsende: 0.158N/mm² 		

Tabelle 12.1.1: FM1 im Anlieferungszustand. Ergebnisse der Untersuchungen gemäss Norm SN 671'610

Nicht normierte Prüfungen

Gelpermeationschromatografie (GPC):

Der effektive quantitative Anteil des Polymers in der FM konnte nicht bestimmt werden, da die bei der Herstellung der Fugenvergussmasse verwendeten Polymere nicht geliefert wurden.

In *Tabelle 12.1.2* sind Molekulargewicht und Flächenanteil des Polymers ersichtlich. Die *Abbildung 12.1.1* zeigt das GPC-Chromatogramm der FM1.

	Polymerpeaks			
	1. Peak	2. Peak	3. Peak	Total
Molekulargewicht [g/mol]	$3.8 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^5$	$2.4 \cdot 10^4$	
Polymeranteil [Flächen-%]	7.19	0.64	0.78	8.61

Tabelle 12.1.2: FM1 im Anlieferungszustand. Molekulargewicht und Flächenanteil des Polymers

Die Berechnung des Polymeranteils F erfolgte gemäss:

$$F = F_n \times 100 / (P+B) \quad [\text{Flächen-\%}]$$

F_n : Fläche des einzelnen Polymerpeaks

P: Peakfläche Polymer = Summe der Polymer-Peakflächen

B: Peakfläche Bitumen

FM1 / GPC-Chromatogramm

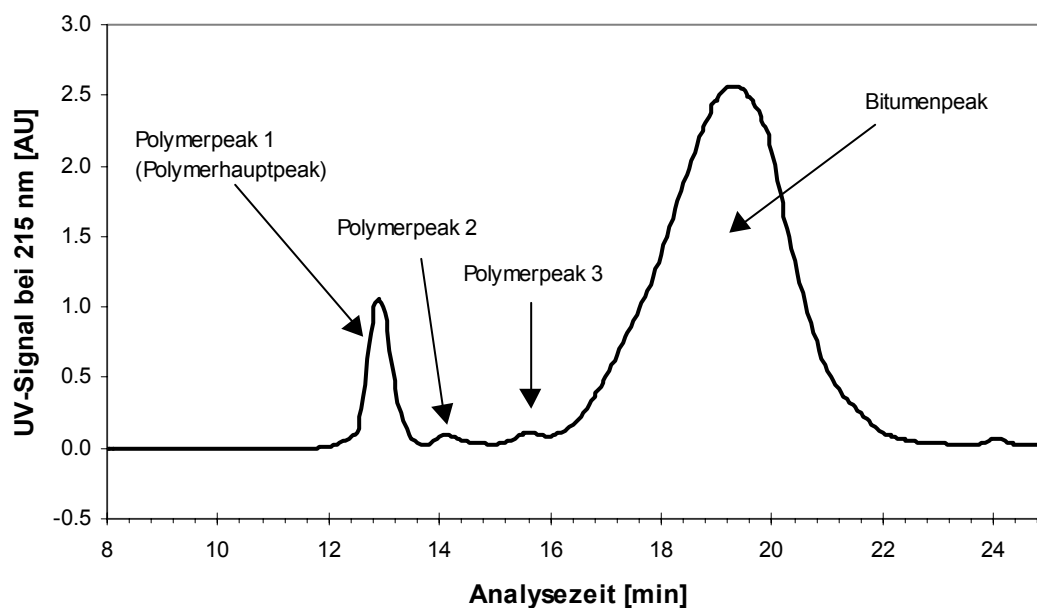


Abbildung 12.1.1: FM1 im Anlieferungszustand. GPC-Chromatogramm

Kennwerte mittels EMPA-Test "Ko-Axial Schubtest" (KAST):

In *Tabelle 12.1.3* sind die detaillierten Kennwerte der Fugenvergussmasse aufgeführt und die WLF-Masterkurven in *Abbildung 12.1.2* grafisch dargestellt.

Temperatur [C]	Frequenz [Hz]	Kompl. Mod. [N*mm ⁻²]	Elast. Mod. [N*mm ⁻²]	Visk. Mod. [N*mm ⁻²]	Phasenwinkel [°]
10	0.125	0.0768	0.0599	0.0481	38.8
10	0.25	0.103	0.0828	0.0611	36.4
10	0.5	0.133	0.111	0.0745	34
10	1	0.169	0.144	0.0886	31.7
10	2	0.205	0.177	0.104	30.4
10	4	0.241	0.208	0.122	30.4
10	8	0.358	0.321	0.157	26.1
5	0.125	0.124	0.104	0.0677	33.1
5	0.25	0.156	0.135	0.0791	30.4
5	0.5	0.192	0.168	0.092	28.7
5	1	0.231	0.204	0.108	27.8
5	2	0.273	0.24	0.13	28.4
5	4	0.317	0.272	0.162	30.8
5	8	0.375	0.308	0.214	34.8
0	0.125	0.187	0.166	0.0854	27.2
0	0.25	0.22	0.198	0.0963	26
0	0.5	0.26	0.234	0.113	25.8
0	1	0.306	0.272	0.14	27.2
0	2	0.366	0.316	0.184	30.2
0	4	0.536	0.441	0.305	34.6
0	8	0.624	0.486	0.39	38.7
-5	0.125	0.26	0.238	0.106	23.9
-5	0.25	0.297	0.27	0.124	24.8
-5	0.5	0.349	0.311	0.158	27
-5	1	0.424	0.364	0.217	30.8
-5	2	0.528	0.428	0.309	35.8
-5	4	0.683	0.511	0.453	41.5
-5	8	0.885	0.606	0.645	46.8
-10	0.125	0.358	0.325	0.15	24.8
-10	0.25	0.412	0.363	0.195	28.2
-10	0.5	0.506	0.425	0.274	32.8
-10	1	0.652	0.512	0.403	38.2
-10	2	0.87	0.628	0.602	43.8
-10	4	1.205	0.796	0.905	48.7
-10	8	1.687	1.141	1.244	47.5
40	0.125	8.82E-03	8.63E-03	1.84E-03	12
40	0.25	8.60E-03	8.30E-03	2.21E-03	14.9
40	0.5	1.08E-02	1.02E-02	3.33E-03	18
40	1	0.013	1.18E-02	0.00556	25.3
40	2	0.0159	0.0136	0.0083	31.3
40	4	0.0218	0.017	0.0136	38.7
40	8	0.0309	0.0227	0.021	42.7
35	0.125	8.15E-03	7.84E-03	2.20E-03	15.7
35	0.25	0.01	9.34E-03	3.66E-03	21.4
35	0.5	0.0119	0.0105	0.00557	27.9
35	1	0.0162	0.0138	0.00843	31.3
35	2	0.0225	0.0175	0.0142	39.1
35	4	0.0318	0.0231	0.0218	43.3
35	8	0.0469	0.0325	0.0339	46.2

Tabelle 12.1.3a: FM1 im Anlieferungszustand. Kennwerte im Gebrauchsbereich mittels Ko-Axial-Schubtest (KAST)

Fortsetzung der *Tabelle 12.1.3a*

Temperatur [C]	Frequenz Hz]	Kompl. Mod. [N*mm ⁻²]	Elast. Mod. [N*mm ⁻²]	Visk. Mod. [N*mm ⁻²]	Phasenwinkel [°]
30	0.125	0.00877	8.11E-03	0.00333	22.3
30	0.25	0.012	0.0106	0.00557	27.7
30	0.5	0.0163	0.0135	0.00922	34.4
30	1	0.0228	0.0172	0.0148	40.7
30	2	0.0323	0.0238	0.0219	42.7
30	4	0.048	0.0344	0.0334	44.1
30	8	0.0681	0.0486	0.0477	44.5
25	0.125	0.0121	0.0099	0.0069	34.9
25	0.25	0.0166	0.0132	0.00998	37
25	0.5	0.0248	0.0185	0.0164	41.6
25	1	0.0356	0.0261	0.0243	42.9
25	2	0.0511	0.0372	0.0351	43.3
25	4	0.0777	0.062	0.0469	37.1
25	8	0.0987	0.0751	0.064	40.4
20	0.125	0.0196	0.015	0.0126	40.1
20	0.25	0.0289	0.0215	0.0193	41.8
20	0.5	0.0417	0.0279	0.0279	42
20	1	0.0603	0.0447	0.0405	42.1
20	2	0.083	0.0636	0.0534	40
20	4	0.111	0.0877	0.0676	37.6
20	8	0.142	0.115	0.0837	36.1
15	0.125	0.0348	0.026	0.0231	41.7
15	0.25	0.0503	0.0378	0.0332	41.3
15	0.5	0.07	0.0543	0.0442	39.2
15	1	0.0943	0.075	0.0572	37.4
15	2	0.123	0.101	0.0701	34.8
15	4	0.155	0.129	0.0848	33.3
15	8	0.188	0.158	0.102	32.7

Tabelle 12.1.3b: FM1 im Anlieferungszustand. Kennwerte im Gebrauchsbereich mittels Ko-Axial-Schubtest (KAST)

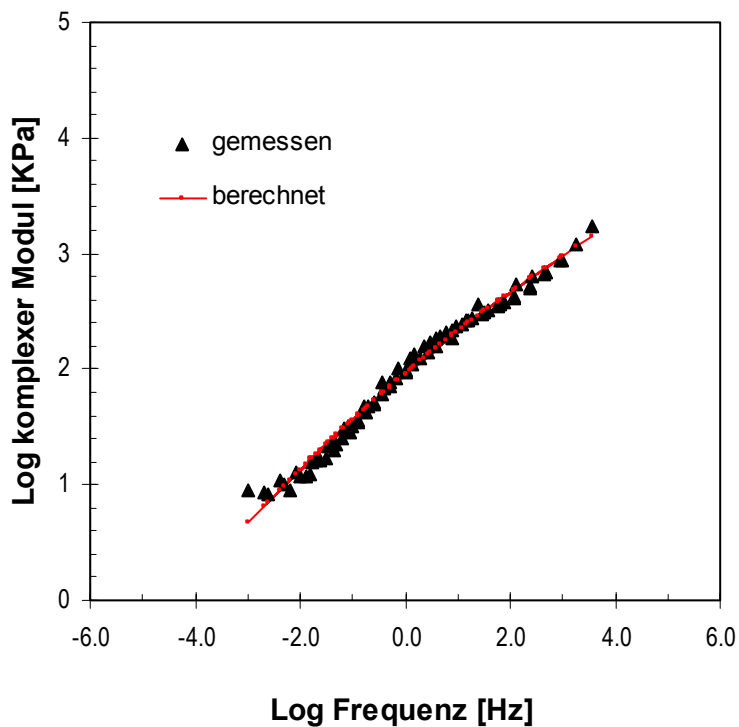


Abbildung 12.1.2: FM1 im Anlieferungszustand. KAST-WLF-Masterkurve.
 Referenztemperatur: 15°C.
 Die Daten der WLF-Masterkurve sind in Kap. 12.1.8 aufgelistet.

Rheologisches Verhalten mittels DSR:

In *Tabelle 12.1.4* sind die detaillierten, rheologischen Kennwerte mittels Dynamic Shear Rheometer (DSR) der Fugenvergussmasse FM1 im Anlieferungszustand aufgeführt und die WLF-Masterkurven in *Abbildung 12.1.3* grafisch dargestellt.

Temperatur [°C]	Viskosität [Pa.s]	Module [kPa]			Phasenwinkel [°]
		G*	G'	G''	
10	8230	122	93.8	77.6	39.60
20	2890	52.9	45.3	27.3	31.03
30	1420	31.3	28.3	13.4	25.38
40	837	22.3	20.8	7.9	20.74
50	537	18.7	18.0	5.1	15.72
60	382	16.3	15.9	3.6	12.75
70	342	14.9	14.5	3.2	12.50

Tabelle 12.1.4: FM1 im Anlieferungszustand. Rheologische Kennwerte mittels DSR
 (Frequenz 1.5Hz; Dehnungsamplitude. 1%)

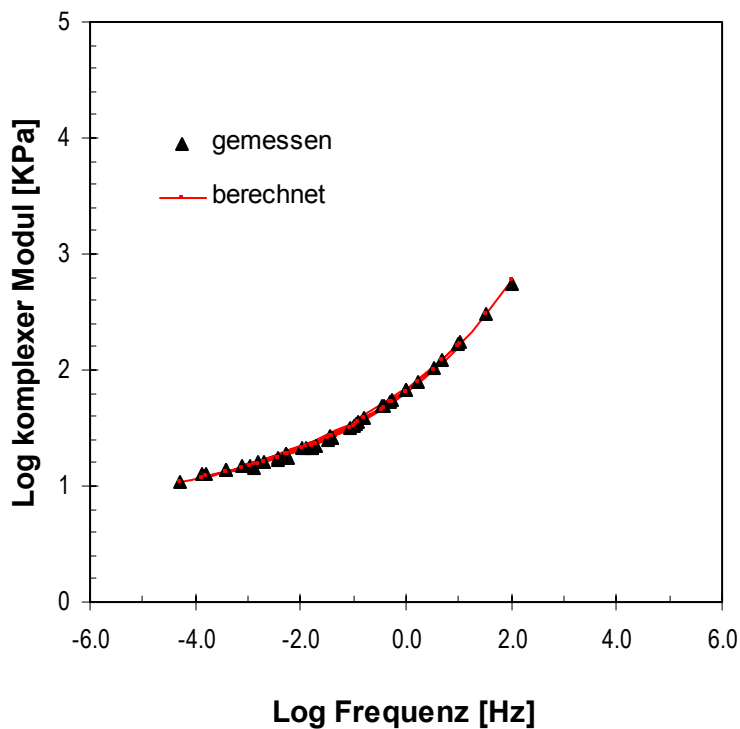


Abbildung 12.1.3: FM1 im Anlieferungszustand. DSR-WLF-Masterkurve.
 Referenztemperatur: 15°C.
 Die Daten der WLF-Masterkurve sind in Kap. 12.1.8 aufgelistet.

Zugprüfung an Fugenmodellkörper nach Einbau

An den Ausschnitten (Fugenlänge von 150mm) der Fugenmodellkörper, die gleichzeitig mit den Fugenobjekten auf der Versuchsstrecke eingebaut wurden, wurden Zugprüfungen bei -10°C und -20°C mit einer Zuggeschwindigkeit von 3mm/h bis 15mm Fugendehnung vorgenommen.

Prüftemperatur	Maximalspannung [N/mm ²]	Zugehörige Fugendehnung [mm]	Risse/Ablösungen bei		Bemerkung zu den Beschädigungen bis 15mm Dehnung
			Spannung [N/mm ²]	Fugendehnung [mm]	
-10°C	0.567	0.5	---	---	Weder Risse noch Ablösungen
-20°C	0.900	0.4	0.900	0.4	Risse und Ablösungen

Tabelle 12.1.5: FM1 im Anlieferungszustand. Ergebnisse der Zugprüfungen bei -10°C und -20°C

12.1.2 Fugenvergussmasse FM2

Normierte Prüfungen

Prüfungen	Prüfergebnisse	Anforderungen gemäss SN671'625a	erfüllt
Aussehen und Beschaffenheit	Schwarz, glänzend, sehr griessig, weich, homogen	Homogen	Ja
Penetration (Nadel), 25°C	60·10 ⁻¹ mm	Anlieferungszustand: max. 100·10 ⁻¹ mm	Ja
Penetration (Konus), 25°C	52·10 ⁻¹ mm	Anlieferungszustand: 30·10 ⁻¹ mm bis 90·10 ⁻¹ mm	Ja
Erweichungspunkt RuK	92°C	min. 85°C	Ja
Fliesslänge	1mm	max. 10mm	Ja
Kugelfallprobe	Keine Risse, nicht zersprungen	Kein Zerspringen, keine Anrisse bei 3 von 4 Kugeln	Ja
Dehnbarkeit	Ohne Wasserlagerung:	<ul style="list-style-type: none"> – Bei 4.0mm Fugendehnung keine Risse, keine Ablösung – Maximalspannung: ≤ 1.000N/mm² – Spannung nach Versuchsende: Werte bestimmen und angeben 	Nein
	<ul style="list-style-type: none"> – Ablösung bei Fugendehnung 2.5mm – Maximalspannung: 0.950N/mm² – Spannung nach Versuchsende: 0.450N/mm² 		
Dehnbarkeit	Mit Wasserlagerung:	<ul style="list-style-type: none"> – Bei 4.0mm Fugendehnung keine Risse, keine Ablösung – Maximalspannung: ≤ 1.000N/mm² – Spannung nach Versuchsende: Werte bestimmen und angeben 	Nein
	<ul style="list-style-type: none"> – Riss und Ablösung bei Fugendehnung 1.0mm – Maximalspannung: 0.383N/mm² – Spannung nach Versuchsende: 0 N/mm² 		

Tabelle 12.1.6: FM2 im Anlieferungszustand. Ergebnisse der Untersuchungen gemäss Norm SN 671'610

Nicht normierte Prüfungen

Gelpermeationschromatografie (GPC):

Der effektive quantitative Anteil des Polymers in der Fugenvergussmasse konnte nicht bestimmt werden, da die bei der Herstellung der Fugenvergussmasse verwendeten Polymere nicht geliefert wurden.

In Tabelle 12.1.7 sind Molekulargewicht und Flächenanteil des Polymers ersichtlich. Die Abbildung 12.1.4 zeigt das GPC-Chromatogramm der FM2.

	Polymerpeaks			
	1. Peak	2. Peak	3. Peak	Total
Molekulargewicht [g/mol]	4.1 10 ⁵	1.2 10 ⁵	---	
Flächenanteil [Flächen-%]	2.32	2.28	---	4.60

Tabelle 12.1.7: FM2 im Anlieferungszustand. Molekulargewicht und Flächenanteil des Polymer

Die Berechnung des Polymeranteils F erfolgte gemäss:

$$F = F_n \times 100 / (P+B) \quad [\text{Flächen-\%}]$$

F_n: Fläche des einzelnen Polymerpeaks

P: Peakfläche Polymer = Summe der Polymer-Peakflächen

B: Peakfläche Bitumen

FM2 / GPC-Chromatogramm

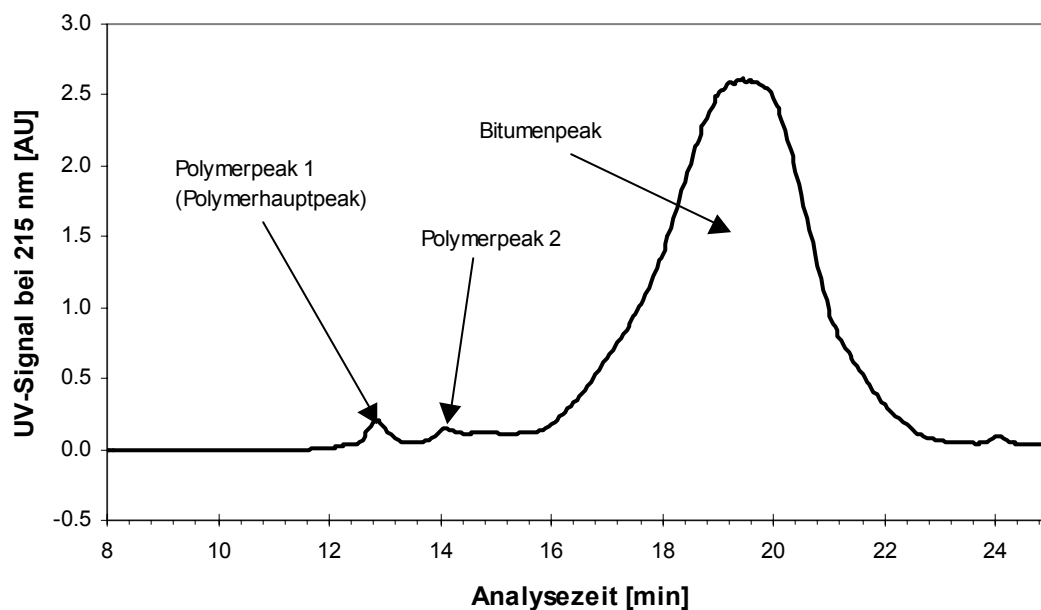


Abbildung 12.1.4: FM2 im Anlieferungszustand. GPC-Chromatogramm

Kennwerte mittels EMPA-Test "Ko-Axial Schubtest" (KAST):

In *Tabelle 12.1.8* sind die detaillierten Kennwerte der Fugenvergussmasse aufgeführt und die WLF-Masterkurven in der *Abbildung 12.1.5* grafisch dargestellt.

Temperatur [C]	Frequenz [Hz]	Kompl. Mod. [N*mm ⁻²]	Elast. Mod. [N*mm ⁻²]	Visk. Mod. [N*mm ⁻²]	Phasenwinkel [°]
10	0.125	0.368	0.255	0.265	46.1
10	0.25	0.489	0.337	0.354	46.4
10	0.5	0.68	0.47	0.491	46.3
10	1	0.942	0.65	0.681	46.4
10	2	1.311	0.909	0.944	46.1
10	4	1.839	1.288	1.313	45.6
10	8	2.554	1.803	1.81	45.1
5	0.125	0.747	0.529	0.528	44.9
5	0.25	0.968	0.682	0.687	45.2
5	0.5	1.352	0.959	0.953	44.8
5	1	1.907	1.365	1.332	44.3
5	2	2.677	1.951	1.833	43.2
5	4	3.721	2.751	2.506	42.3
5	8	5.115	3.824	3.397	41.6
0	0.125	1.738	1.289	1.165	42.1
0	0.25	2.247	1.662	1.512	42.3
0	0.5	3.095	2.323	2.045	41.3
0	1	4.26	3.256	2.747	40.2
0	2	5.799	4.494	3.665	39.2
0	4	7.826	6.141	4.851	38.3
0	8	10.47	8.345	6.331	37.2
-5	0.125	4.014	3.149	2.489	38.3
-5	0.25	5.2	4.094	3.206	38.1
-5	0.5	6.941	5.551	4.166	36.9
-5	1	9.262	7.505	5.427	35.9
-5	2	12.19	10.03	6.936	34.7
-5	4	15.93	13.28	8.791	33.5
-5	8	20.4	17.26	10.89	32.2
10	0.125	8.944	7.395	5.03	34.2
-10	0.25	11.5	9.617	6.299	33.2
-10	0.5	14.86	12.52	8.001	32.6
-10	1	18.97	16.26	9.777	31
-10	2	24.02	20.84	11.95	29.8
-10	4	30	26.35	14.33	28.5
-10	8	37.47	33.41	16.96	26.9
40	0.125	6.66E-03	5.07E-03	4.31E-03	40.3
40	0.25	9.84E-03	7.39E-03	6.49E-03	41.3
40	0.5	1.46E-02	1.03E-02	1.04E-02	45.2
40	1	0.0206	1.46E-02	0.0146	44.9
40	2	0.0311	0.0215	0.0224	46.2
40	4	0.0433	0.0297	0.0315	46.7
40	8	0.0619	0.0411	0.0463	48.4
35	0.125	1.25E-02	9.34E-03	8.24E-03	41.4
35	0.25	0.0176	1.28E-02	1.21E-02	43.3
35	0.5	0.0247	0.0175	0.0174	44.8
35	1	0.0367	0.0258	0.0261	45.3
35	2	0.0519	0.0358	0.0376	46.4
35	4	0.0737	0.0497	0.0545	47.7
35	8	0.105	0.069	0.0797	49.1

Tabelle 12.1.8a: FM2 im Anlieferungszustand. Kennwerte im Gebrauchsbereich mittels Ko-Axial-Schubtest (KAST)

Fortsetzung der *Tabelle 12.1.8a*

Temperatur [C]	Frequenz [Hz]	Kompl. Mod. [N*mm ⁻²]	Elast. Mod. [N*mm ⁻²]	Visk. Mod. [N*mm ⁻²]	Phasenwinkel [°]
30	0.125	0.0229	1.66E-02	0.0157	43.5
30	0.25	0.0315	0.0224	0.0222	44.7
30	0.5	0.0459	0.0325	0.0324	44.9
30	1	0.0657	0.0458	0.0472	45.8
30	2	0.093	0.0624	0.069	47.9
30	4	0.132	0.0879	0.0984	48.2
30	8	0.184	0.119	0.141	49.9
25	0.125	0.0455	0.0333	0.0331	42.9
25	0.25	0.0626	0.0437	0.0448	45.7
25	0.5	0.0859	0.0597	0.0617	46
25	1	0.12	0.0817	0.0884	47.2
25	2	0.17	0.114	0.126	48
25	4	0.239	0.157	0.18	48.9
25	8	0.328	0.212	0.251	49.8
20	0.125	0.0869	0.0615	0.0614	44.9
20	0.25	0.114	0.0796	0.0818	45.8
20	0.5	0.162	0.111	0.117	46.6
20	1	0.224	0.152	0.165	47.3
20	2	0.315	0.209	0.235	48.4
20	4	0.433	0.283	0.327	49.1
20	8	0.582	0.376	0.445	49.8
15	0.125	0.168	0.118	0.12	45.5
15	0.25	0.219	0.15	0.16	46.9
15	0.5	0.302	0.205	0.221	47.1
15	1	0.418	0.279	0.312	48.2
15	2	0.574	0.381	0.429	48.4
15	4	0.769	0.504	0.581	49
15	8	1.021	0.662	0.778	49.6

Tabelle 12.1.8b: FM2 im Anlieferungszustand. Kennwerte im Gebrauchsbereich mittels Ko-Axial-Schubtest (KAST)

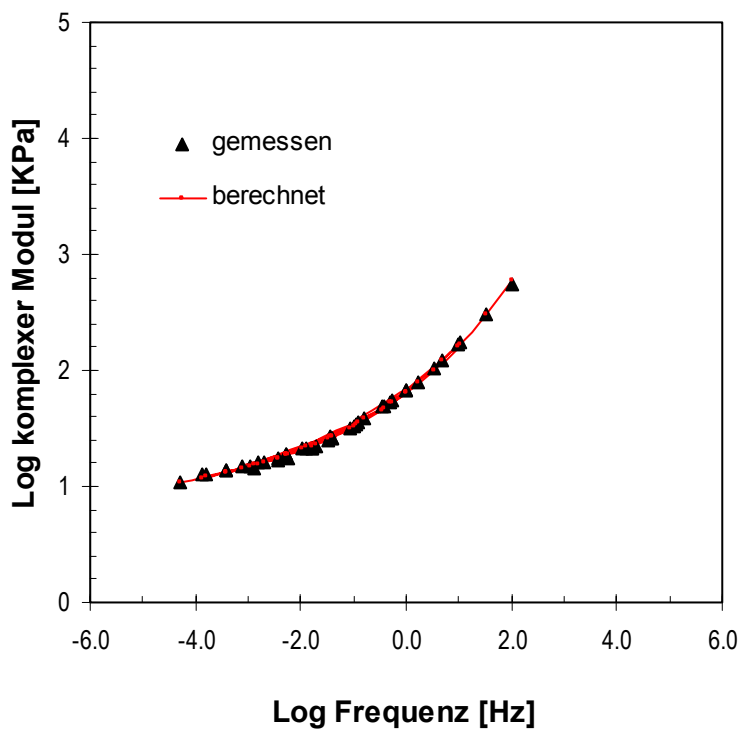


Abbildung 12.1.5: FM2 im Anlieferungszustand. KAST-WLF-Masterkurve.
Referenztemperatur: 15°C.
Die Daten der WLF-Masterkurve sind in Kap. 12.1.8 aufgelistet.

Rheologisches Verhalten mittels DSR:

In *Tabelle 12.1.9* sind die detaillierten, rheologischen Kennwerte mittels Dynamic Shear Rheometer (DSR) der Fugenvergussmasse FM2 im Anlieferungszustand aufgeführt und die WLF-Masterkurven in der *Abbildung 12.1.6* grafisch dargestellt.

Temperatur [°C]	Viskosität [Pa.s]	Module [kPa]			Phasenwinkel [°]
		G*	G'	G''	
10	58600	995	827	552	33.72
20	18700	262	194	176	42.15
30	6120	83.6	60.4	57.7	43.69
40	2080	28.5	20.7	19.6	43.40
50	902	12.6	9.3	8.5	42.61
60	416	5.8	4.2	3.9	42.75
70	248	3.5	2.6	2.3	41.54

Tabelle 12.1.9: FM2 im Anlieferungszustand. Rheologische Kennwerte mittels DSR
(Frequenz 1.5Hz; Dehnungsamplitude. 1%)

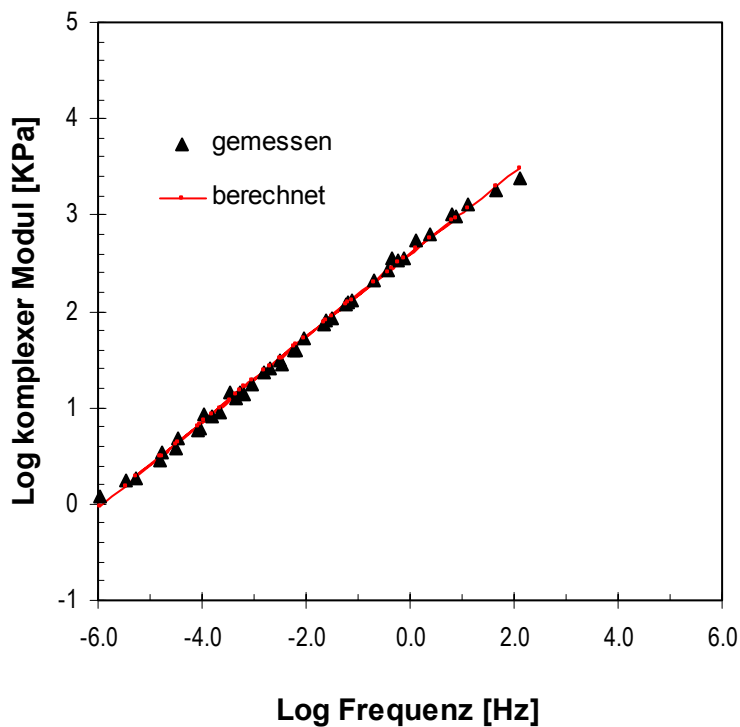


Abbildung 12.1.6: FM2 im Anlieferungszustand. DSR-WLF-Masterkurve.

Referenztemperatur: 15°C.

Die Daten der WLF-Masterkurve sind in Kap. 12.1.8 aufgelistet.

Zugprüfung an Fugenmodellkörper nach Einbau

An den Ausschnitten (Fugenlänge von 150mm) der Fugenmodellkörper, die gleichzeitig mit den Fugenobjekten auf der Versuchsstrecke eingebaut wurden, wurden Zugprüfungen bei -10°C und -20°C mit einer Zuggeschwindigkeit von 3mm/h bis 15mm Fugendehnung vorgenommen.

Prüf-temperatur	Maximal-spannung [N/mm ²]	Zugehörige Fugendehnung [mm]	Risse/Ablösungen bei		Bemerkung zu den Be-schädigungen bis 15mm Dehnung
			Spannung [N/mm ²]	Fugendehnung [mm]	
-10°C	0.533	0.3	---	---	Weder Risse noch Ablö-sungen
-20°C	1.000	1.3	0.867	1.3	Risse und Ablösungen

Tabelle 12.1.10: FM2 im Anlieferungszustand. Ergebnisse der Zugprüfungen bei -10°C und -20°C

12.1.3 Fugenvergussmasse FM3

Normierte Prüfungen

Prüfungen	Prüfergebnisse	Anforderungen gemäss SN671'625a	erfüllt
Aussehen und Beschaffenheit	Schwarz, glänzend, griessig, weich, homogen	Homogen	Ja
Penetration (Nadel), 25°C	$102 \cdot 10^{-1}$ mm	Anlieferungszustand: max. $100 \cdot 10^{-1}$ mm	Nein
Penetration (Konus), 25°C	$83 \cdot 10^{-1}$ mm	Anlieferungszustand: $30 \cdot 10^{-1}$ mm bis $90 \cdot 10^{-1}$ mm	Ja
Erweichungspunkt RuK	90°C	min. 85°C	Ja
Fliesslänge	0mm	max. 10mm	Ja
Kugelfallprobe	Keine Risse, nicht zersprungen	Kein Zerspringen, keine Anrisse bei 3 von 4 Kugeln	Ja
Dehnbarkeit	Ohne Wasserlagerung:	<ul style="list-style-type: none"> – Bei 4.0mm Fugendehnung keine Risse, keine Ablösung – Maximalspannung: $\leq 1.000\text{N/mm}^2$ – Spannung nach Versuchsende: Werte bestimmen und angeben 	Ja
	<ul style="list-style-type: none"> – Keine Risse, keine Ablösung bei Fugendehnung 4.0mm – Maximalspannung: 0.275N/mm^2 – Spannung nach Versuchsende: 0.108N/mm^2 		
Dehnbarkeit	Mit Wasserlagerung:	<ul style="list-style-type: none"> – Bei 4.0mm Fugendehnung keine Risse, keine Ablösung – Maximalspannung: $\leq 1.000\text{N/mm}^2$ – Spannung nach Versuchsende: Werte bestimmen und angeben 	Ja
	<ul style="list-style-type: none"> – Keine Risse und Ablösung bei Fugendehnung 4.0mm – Maximalspannung: 0.208N/mm^2 – Spannung nach Versuchsende: 0.83N/mm^2 		

Tabelle 12.1.11: FM3 im Anlieferungszustand. Ergebnisse der Untersuchungen gemäss Norm SN 671'610

Nicht normierte Prüfungen

Gelpermeationschromatografie (GPC):

Der effektive quantitative Anteil des Polymers in der Fugenvergussmasse konnte nicht bestimmt werden, da die bei der Herstellung der Fugenvergussmasse verwendeten Polymere nicht geliefert wurden.

In Tabelle 12.1.12 sind Molekulargewicht und Flächenanteil des Polymers ersichtlich. Die Abbildung 12.1.7 zeigt das Chromatogramm der FM3 bei Anlieferung.

	Polymerpeaks			
	1. Peak	2. Peak	3. Peak	Total
Molekulargewicht [g/mol]	4.5 · 10 ⁵	1.3 · 10 ⁵	---	
Flächenanteil [Flächen-%]	1.22	6.65	---	7.87

Tabelle 12.1.12: FM3 im Anlieferungszustand. Molekulargewicht und Flächenanteil des Polymeren

Die Berechnung des Polymeranteils F erfolgte gemäss:

$$F = F_n \times 100 / (P+B) \quad [\text{Flächen-\%}]$$

F_n: Fläche des einzelnen Polymerpeaks

P: Peakfläche Polymer = Summe der Polymer-Peakflächen

B: Peakfläche Bitumen

FM3 / GPC-Chromatogramm

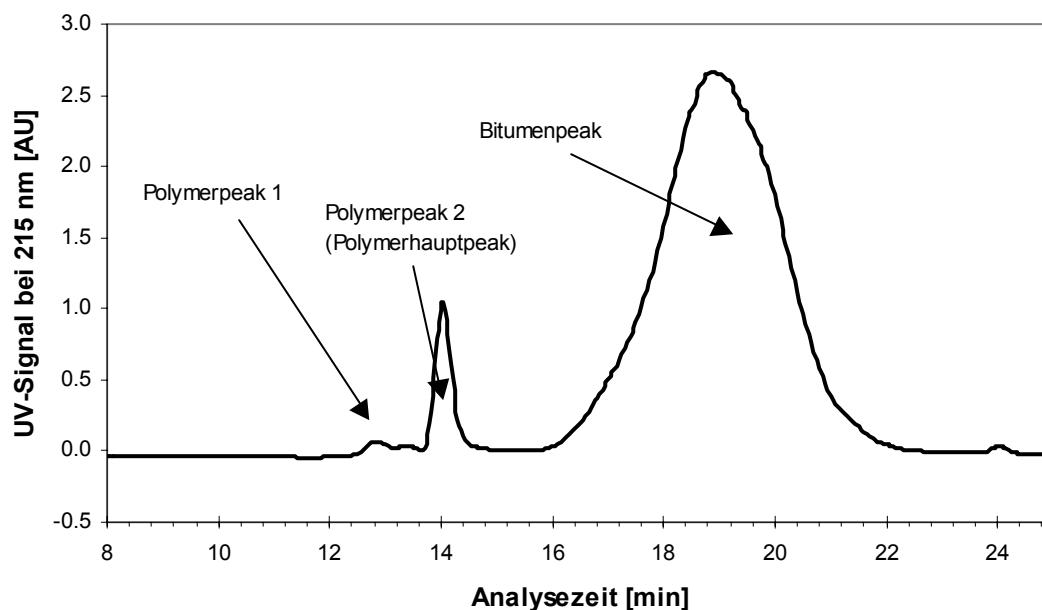


Abbildung 12.1.7: FM3 im Anlieferungszustand. GPC-Chromatogramm

Kennwerte mittels EMPA-Test "Ko-Axial Schubtest" (KAST):

In *Tabelle 12.1.13* sind die detaillierten Kennwerte der Fugenvergussmasse aufgeführt und die WLF-Masterkurven in der *Abbildung 12.1.8* grafisch dargestellt.

Temperatur [C]	Frequenz [Hz]	Kompl. Mod. [N*mm ⁻²]	Elast. Mod. [N*mm ⁻²]	Visk. Mod. [N*mm ⁻²]	Phasenwinkel [°]
10	0.125	0.117	0.0755	0.089	49.7
10	0.25	0.174	0.113	0.132	49.4
10	0.5	0.248	0.168	0.182	47.2
10	1	0.349	0.247	0.247	45
10	2	0.478	0.352	0.324	42.6
10	4	0.635	0.484	0.411	40.4
10	8	0.789	0.615	0.493	38.7
5	0.125	0.217	0.144	0.162	48.2
5	0.25	0.306	0.213	0.22	45.9
5	0.5	0.429	0.31	0.296	43.6
5	1	0.59	0.444	0.389	41.2
5	2	0.784	0.61	0.494	39
5	4	1.003	0.798	0.608	37.3
5	8	1.161	0.943	0.677	35.7
0	0.125	0.407	0.288	0.288	45
0	0.25	0.559	0.414	0.375	42.2
0	0.5	0.76	0.583	0.487	39.9
0	1	1.004	0.794	0.614	37.7
0	2	1.309	1.061	0.767	35.8
0	4	1.689	1.386	0.966	34.9
0	8	2.036	1.793	0.965	28.3
-5	0.125	0.864	0.658	0.56	40.4
-5	0.25	1.104	0.861	0.69	38.7
-5	0.5	1.469	1.174	0.884	37
-5	1	1.947	1.59	1.125	35.3
-5	2	2.541	2.098	1.434	34.3
-5	4	3.283	2.724	1.833	33.9
-5	8	3.791	3.195	2.039	32.5
-10	0.125	1.835	1.463	1.108	37.1
-10	0.25	2.319	1.88	1.357	35.8
-10	0.5	3.063	2.519	1.742	34.7
-10	1	3.993	3.331	2.202	33.5
-10	2	5.168	4.343	2.801	32.8
-10	4	6.641	5.591	3.583	32.7
-10	8	5.79	4.799	3.239	34
40	0.125	1.40E-03	1.20E-03	7.43E-04	31.7
40	0.25	2.92E-03	2.07E-03	2.05E-03	44.7
40	0.5	5.91E-03	4.63E-03	3.68E-03	38.5
40	1	0.0108	7.16E-03	0.00813	48.6
40	2	0.0154	0.0101	0.0116	49.1
40	4	0.0238	0.0154	0.0182	49.8
40	8	0.0337	0.0224	0.0253	48.5
35	0.125	3.17E-03	2.01E-03	2.45E-03	50.6
35	0.25	0.00606	4.04E-03	4.52E-03	48.2
35	0.5	0.00958	0.00599	0.00747	51.2
35	1	0.016	0.01	0.0124	51
35	2	0.0247	0.0161	0.0187	49.2
35	4	0.105	0.0743	0.074	44.9
35	8	0.0871	0.055	0.0675	50.9

Tabelle 12.1.13a: FM3 im Anlieferungszustand. Kennwerte im Gebrauchsbereich mittels Ko-Axial-Schubtest (KAST)

Fortsetzung der *Tabelle 12.1.13a*

Temperatur [C]	Frequenz [Hz]	Kompl. Mod. [N*mm ⁻²]	Elast. Mod. [N*mm ⁻²]	Visk. Mod. [N*mm ⁻²]	Phasenwinkel [°]
30	0.125	0.00624	4.13E-03	0.00467	48.5
30	0.25	0.0104	0.00682	0.00784	49
30	0.5	0.0171	0.0109	0.0132	50.4
30	1	0.0269	0.0171	0.0207	50.5
30	2	0.0414	0.0262	0.032	50.7
30	4	0.1	0.0659	0.0758	49
30	8	0.103	0.0678	0.0776	48.8
25	0.125	0.0124	0.00777	0.00961	51
25	0.25	0.0195	0.0122	0.0152	51.3
25	0.5	0.0313	0.0195	0.0245	51.4
25	1	0.0476	0.0295	0.0373	51.7
25	2	0.072	0.0455	0.0559	50.8
25	4	0.107	0.0695	0.0811	49.4
25	8	0.183	0.125	0.134	46.8
20	0.125	0.0235	0.0135	0.0193	55
20	0.25	0.0377	0.0229	0.0299	52.6
20	0.5	0.0578	0.0358	0.0453	51.7
20	1	0.0864	0.0543	0.0672	51
20	2	0.13	0.0843	0.0985	49.4
20	4	0.238	0.176	0.16	42.2
20	8	0.307	0.229	0.205	41.8
15	0.125	0.0745	0.0452	0.0592	52.6
15	0.25	0.112	0.0714	0.0868	50.6
15	0.5	0.175	0.117	0.131	48.2
15	1	0.257	0.178	0.186	46.3
15	2	0.369	0.268	0.254	43.4
15	4	0.508	0.387	0.329	40.4
15	8	0.676	0.532	0.417	38.1

Tabelle 12.1.13b: FM3 im Anlieferungszustand. Kennwerte im Gebrauchsbereich mittels Ko-Axial-Schubtest (KAST)

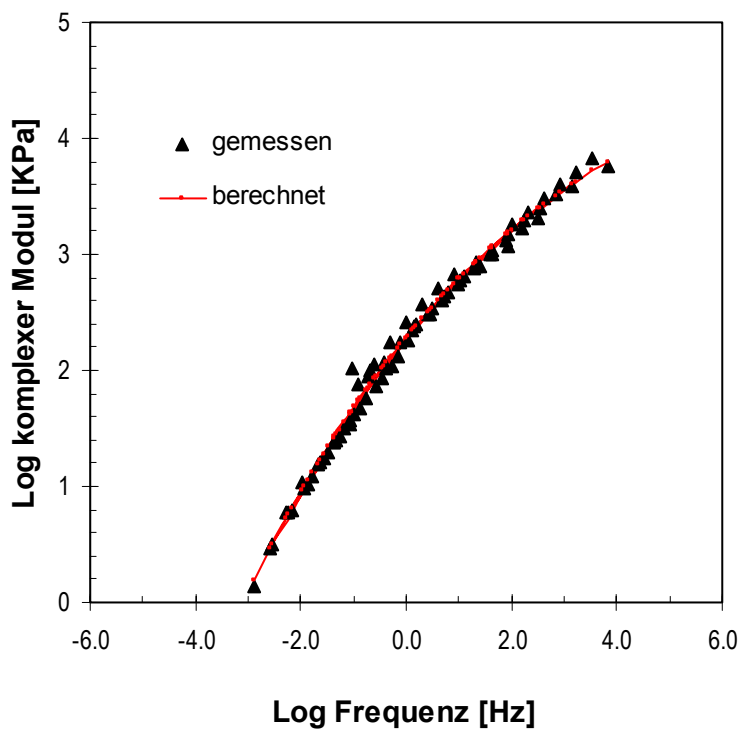


Abbildung 12.1.8: FM3 im Anlieferungszustand. KAST-WLF-Masterkurve.
Referenztemperatur: 15°C.

Die Daten der WLF-Masterkurve sind in Kap. 12.1.8 aufgelistet.

Rheologisches Verhalten mittels DSR:

In *Tabelle 12.1.14* sind die detaillierten, rheologischen Kennwerte mittels Dynamic Shear Rheometer (DSR) der Fugenvergussmasse FM3 im Anlieferungszustand aufgeführt und die WLF-Masterkurven in der *Abbildung 12.1.9* grafisch dargestellt.

Temperatur [°C]	Viskosität [Pa.s]	Module [kPa]			Phasenwinkel [°]
		G*	G'	G''	
10	22500	296	206	212	45.87
20	7100	92.2	63.4	66.9	46.54
30	2540	31.9	21.0	23.9	48.69
40	1160	14.4	9.4	10.9	49.33
50	589	7.3	4.7	5.6	49.84
60	298	3.7	2.3	2.8	50.26
70	194	2.5	1.6	1.8	48.21

Tabelle 12.1.14: FM3 im Anlieferungszustand. Rheologische Kennwerte mittels DSR
(Frequenz 1.5Hz; Dehnungsamplitude. 1%)

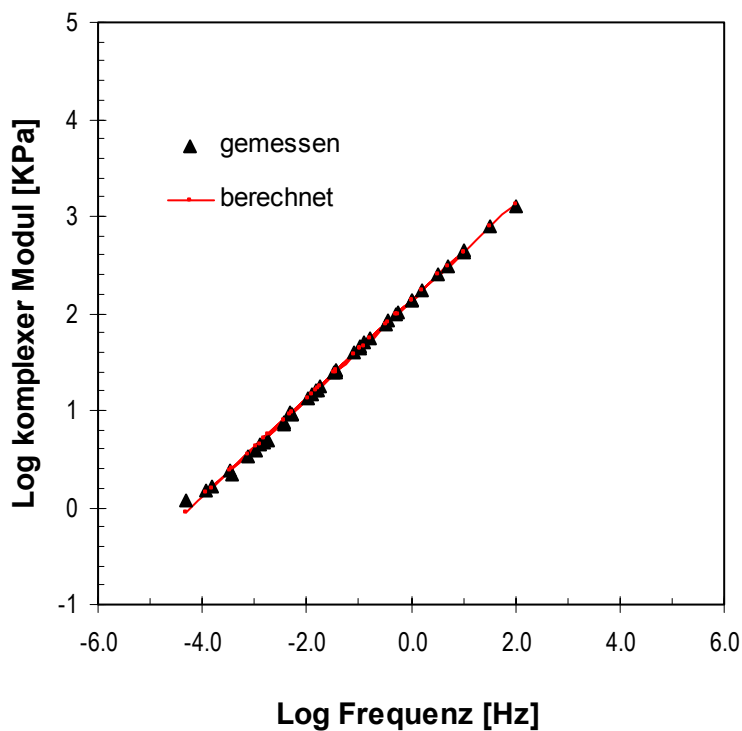


Abbildung 12.1.9: FM3 im Anlieferungszustand. DSR-WLF-Masterkurve.
Referenztemperatur: 15°C.

Die Daten der WLF-Masterkurve sind in Kap. 12.1.8 aufgelistet.

Zugprüfung an Fugenmodellkörper nach Einbau

An den Ausschnitten (Fugenlänge von 150mm) der Fugenmodellkörper, die gleichzeitig mit den Fugenobjekten auf der Versuchsstrecke eingebaut wurden, wurden Zugprüfungen bei -10°C und -20°C mit einer Zuggeschwindigkeit von 3mm/h bis 15mm Fugendehnung vorgenommen.

Prüftemperatur	Maximalspannung [N/mm ²]	Zugehörige Fugendehnung [mm]	Risse/Ablösungen bei		Bemerkung zu den Beschädigungen bis 15mm Dehnung
			Spannung [N/mm ²]	Fugendehnung [mm]	
-10°C	0.533	1.5	---	---	weder Risse noch Ablösungen
-20°C	0.667	0.75	0.333	12.0	Ablösung

Tabelle 12.1.15: FM3 im Anlieferungszustand. Ergebnisse der Zugprüfungen bei -10°C und -20°C

12.1.4 Fugenvergussmasse FM4

Normierte Prüfungen

Prüfungen	Prüfergebnisse	Anforderungen gemäss SN671'625a	erfüllt
Aussehen und Beschaffenheit	Schwarz, matt, ein wenig griessig, mittelhart, homogen	Homogen	Ja
Penetration (Nadel), 25°C	60·10 ⁻¹ mm	Anlieferungszustand: max. 100·10 ⁻¹ mm	Ja
Penetration (Konus), 25°C	53·10 ⁻¹ mm	Anlieferungszustand: 30·10 ⁻¹ mm bis 90·10 ⁻¹ mm	Ja
Erweichungspunkt RuK	105°C	min. 85°C	Ja
Fliesslänge	0mm	max. 10mm	Ja
Kugelfallprobe	Keine Risse, nicht zersprungen	Kein Zerspringen, keine Anrisse bei 3 von 4 Kugeln	Ja
Dehnbarkeit	Ohne Wasserlagerung:	– Bei 4.0mm Fugendehnung keine Risse, keine Ablösung – Maximalspannung: ≤ 1.000N/mm ² – Spannung nach Versuchsende: Werte bestimmen und angeben	Nein
	– Riss und Ablösung bei Fugendehnung 0.2mm – Maximalspannung: 0.670N/mm ² – Spannung nach Versuchsende: 0.920N/mm ²		
	Mit Wasserlagerung:	– Bei 4.0mm Fugendehnung keine Risse, keine Ablösung – Maximalspannung: ≤ 1.000N/mm ² – Spannung nach Versuchsende: Werte bestimmen und angeben	Nein
	– Riss und Ablösung bei Fugendehnung 0.3mm – Maximalspannung: 0.920N/mm ² – Spannung nach Versuchsende: 0 N/mm ²		

Tabelle 12.1.16: FM4 im Anlieferungszustand. Ergebnisse der Untersuchungen gemäss Norm SN 671'610

Nicht normierte Prüfungen

Gelpermeationschromatografie (GPC):

Der effektive quantitative Anteil des Polymers in der Fugenvergussmasse konnte nicht bestimmt werden, da die bei der Herstellung der Fugenvergussmasse verwendeten Polymere nicht geliefert wurden.

In Tabelle 12.1.17 sind Molekulargewicht und Flächenanteil des Polymers ersichtlich. Die Abbildung 12.1.10 zeigt das Chromatogramm der FM4 bei Anlieferung.

	Polymerpeaks			
	1. Peak	2. Peak	3. Peak	Total
Molekulargewicht [g/mol]	1.7 · 10 ⁵	1.2 · 10 ⁵	---	
Flächenanteil [Flächen-%]	4.91	1.30	---	6.21

Tabelle 12.1.17: FM4 im Anlieferungszustand. Molekulargewicht und Flächenanteil des Polymeren

Die Berechnung des Polymeranteils F erfolgte gemäss:

$$F = F_n \times 100 / (P+B) \quad [\text{Flächen-\%}]$$

F_n: Fläche des einzelnen Polymerpeaks

P: Peakfläche Polymer = Summe der Polymer-Peakflächen

B: Peakfläche Bitumen

FM4 / GPC-Chromatogramm

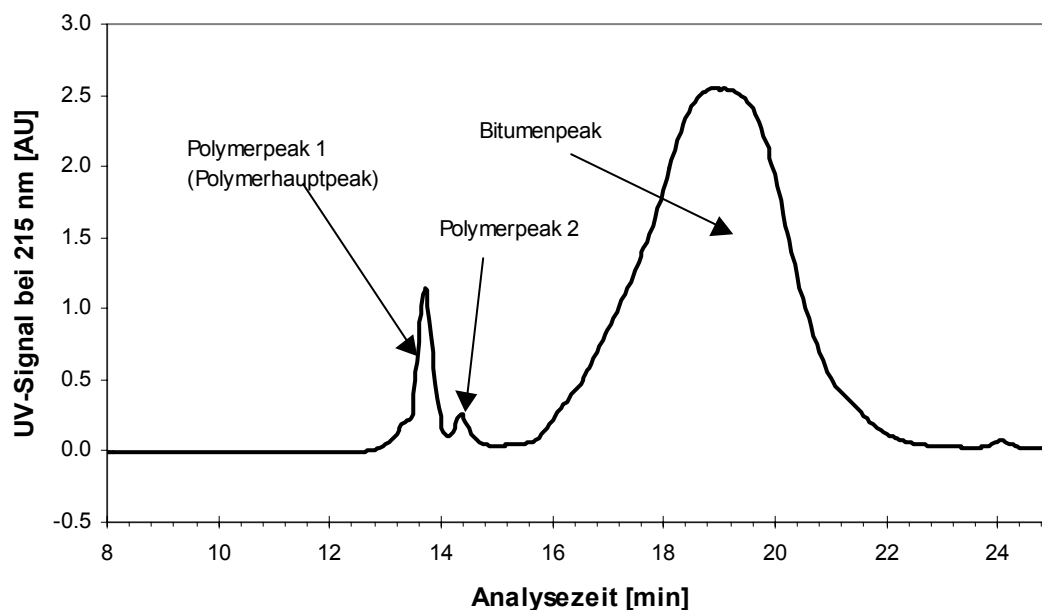


Abbildung 12.1.10: FM4 im Anlieferungszustand. GPC-Chromatogramm

Kennwerte mittels EMPA-Test "Ko-Axial Schubtest" (KAST):

In *Tabelle 12.1.18* sind die detaillierten Kennwerte der Fugenvergussmasse aufgeführt und die WLF-Masterkurven in der *Abbildung 12.1.11* grafisch dargestellt.

Temperatur [C]	Frequenz [Hz]	Kompl. Mod. [N*mm ⁻²]	Elast. Mod. [N*mm ⁻²]	Visk. Mod. [N*mm ⁻²]	Phasenwinkel [°]
10	0.125	0.668	0.531	0.406	37.3
10	0.25	0.883	0.72	0.51	35.3
10	0.5	1.133	0.948	0.621	33.2
10	1	1.443	1.235	0.747	31.2
10	2	1.817	1.577	0.902	29.8
10	4	2.259	1.978	1.09	28.9
10	8	2.777	2.435	1.334	28.7
5	0.125	1.192	1.016	0.623	31.5
5	0.25	1.489	1.293	0.738	29.7
5	0.5	1.839	1.62	0.869	28.2
5	1	2.262	2.011	1.036	27.3
5	2	2.768	2.469	1.25	26.9
5	4	3.372	3.009	1.522	26.8
5	8	4.104	3.635	1.905	27.7
0	0.125	2.012	1.789	0.92	27.2
0	0.25	2.414	2.173	1.052	25.8
0	0.5	2.929	2.647	1.254	25.4
0	1	3.53	3.197	1.497	25.1
0	2	4.248	3.839	1.818	25.3
0	4	5.148	4.617	2.278	26.3
0	8	6.285	5.555	2.941	27.9
-5	0.125	3.35	3.065	1.352	23.8
-5	0.25	3.894	3.564	1.569	23.8
-5	0.5	4.625	4.224	1.884	24
-5	1	5.534	5.045	2.274	24.3
-5	2	6.662	6.02	2.854	25.4
-5	4	8.132	7.259	3.665	26.8
-5	8	10.06	8.845	4.802	28.5
-10	0.125	5.421	4.975	2.154	23.4
-10	0.25	6.288	5.783	2.469	23.1
-10	0.5	7.482	6.831	3.053	24.1
-10	1	9.017	8.187	3.779	24.8
-10	2	10.96	9.82	4.866	26.4
-10	4	13.52	11.98	6.267	27.6
-10	8	17.04	14.89	8.275	29.1
40	0.125	1.60E-02	1.46E-02	6.51E-03	24
40	0.25	2.10E-02	1.73E-02	1.19E-02	34.5
40	0.5	2.91E-02	2.18E-02	1.92E-02	41.3
40	1	0.0427	3.03E-02	0.0302	44.9
40	2	0.0631	0.0416	0.0474	48.8
40	4	0.0964	0.0608	0.0748	50.9
40	8	0.144	0.0888	0.113	51.9
35	0.125	2.38E-02	1.92E-02	1.42E-02	36.5
35	0.25	0.0324	2.47E-02	2.09E-02	40.2
35	0.5	0.0475	0.0328	0.0344	46.4
35	1	0.0722	0.0465	0.0553	49.9
35	2	0.11	0.0694	0.0853	50.9
35	4	0.165	0.105	0.128	50.5
35	8	0.243	0.158	0.184	49.4

Tabelle 12.1.18a: FM4 im Anlieferungszustand. Kennwerte im Gebrauchsbereich mittels Ko-Axial-Schubtest (KAST)

Forsetzung der *Tabelle 12.1.18a*

Temperatur [C]	Frequenz [Hz]	Kompl. Mod. [N*mm ⁻²]	Elast. Mod. [N*mm ⁻²]	Visk. Mod. [N*mm ⁻²]	Phasenwinkel [°]
30	0.125	0.04	2.89E-02	0.0277	43.8
30	0.25	0.0584	0.0403	0.0423	46.3
30	0.5	0.0891	0.0574	0.0682	49.9
30	1	0.135	0.0876	0.103	49.6
30	2	0.201	0.132	0.151	48.8
30	4	0.292	0.198	0.214	47.2
30	8	0.412	0.29	0.292	45.2
25	0.125	0.0802	0.0503	0.0625	51.2
25	0.25	0.12	0.0785	0.0911	49.3
25	0.5	0.179	0.116	0.135	49.3
25	1	0.258	0.175	0.189	47.2
25	2	0.367	0.261	0.258	44.8
25	4	0.506	0.374	0.342	42.4
25	8	0.677	0.519	0.435	40
20	0.125	0.166	0.107	0.127	50
20	0.25	0.242	0.165	0.177	47
20	0.5	0.343	0.244	0.241	44.7
20	1	0.473	0.352	0.316	41.9
20	2	0.64	0.494	0.406	39.4
20	4	0.838	0.67	0.504	37
20	8	1.072	0.88	0.613	34.9
15	0.125	0.342	0.247	0.236	43.7
15	0.25	0.464	0.348	0.307	41.5
15	0.5	0.623	0.486	0.39	38.7
15	1	0.812	0.656	0.479	36.2
15	2	1.048	0.871	0.583	33.8
15	4	1.327	1.126	0.702	31.9
15	8	1.643	1.412	0.84	30.7

Tabelle 12.1.18b: FM4 im Anlieferungszustand. Kennwerte im Gebrauchsbereich mittels Ko-Axial-Schubtest (KAST)

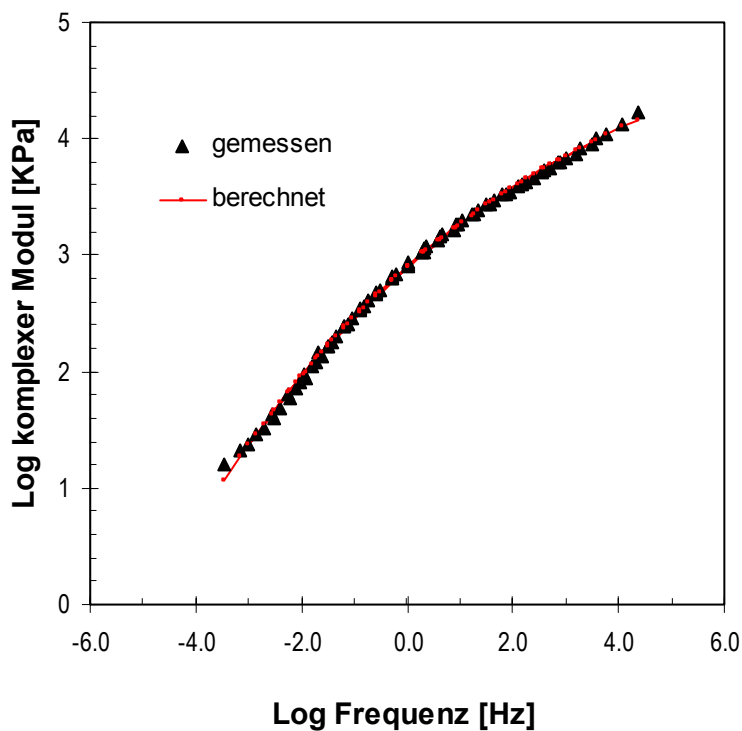


Abbildung 12.1.11: FM4 im Anlieferungszustand. KAST-WLF-Masterkurve.
Referenztemperatur: 15°C.

Die Daten der WLF-Masterkurve sind in Kap. 12.1.8 aufgelistet.

Rheologisches Verhalten mittels DSR:

In *Tabelle 12.1.19* sind die detaillierten, rheologischen Kennwerte mittels Dynamic Shear Rheometer (DSR) der Fugenvergussmasse FM4 im Anlieferungszustand aufgeführt und die WLF-Masterkurven in der *Abbildung 12.1.12* grafisch dargestellt.

Temperatur [°C]	Viskosität [Pa.s]	Module [kPa]			Phasenwinkel [°]
		G*	G'	G''	
10	62600	1230	1080	590	28.70
20	26400	417	334	249	36.68
30	11400	169	130	108	39.66
40	4620	67.1	51.0	43.5	40.47
50	2190	32.4	25.0	20.6	39.50
60	1040	14.7	10.9	9.8	42.05
70	623	8.6	6.2	5.9	43.40

Tabelle 12.1.19: FM4 im Anlieferungszustand. Rheologische Kennwerte mittels DSR
(Frequenz 1.5Hz; Dehnungsamplitude. 1%)

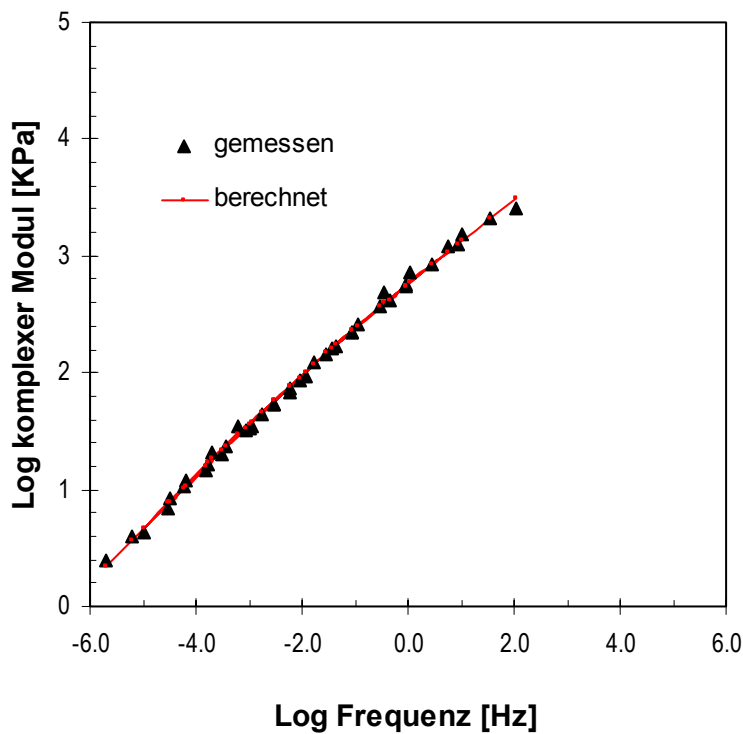


Abbildung 12.1.12: FM4 im Anlieferungszustand. DSR-WLF-Masterkurve.
Referenztemperatur: 15°C.

Die Daten der WLF-Masterkurve sind in Kap. 12.1.8 aufgelistet.

Zugprüfung an Fugenmodellkörper nach Einbau

An den Ausschnitten (Fugenlänge von 150mm) der Fugenmodellkörper, die gleichzeitig mit den Fugenobjekten auf der Versuchsstrecke eingebaut wurden, wurden Zugprüfungen bei -10°C und -20°C mit einer Zuggeschwindigkeit von 3mm/h bis 15mm Fugendehnung vorgenommen.

Prüftemperatur	Maximalspannung [N/mm ²]	Zugehörige Fugendehnung [mm]	Risse/Ablösungen bei		Bemerkung zu den Beschädigungen
			Spannung [N/mm ²]	Fugendehnung [mm]	
-10°C	0.533	0.3	0.533	0.3	Risse und Ablösungen
-20°C	---	---	---	etwa 0.1	Risse und Ablösungen

Tabelle 12.1.20: FM4 im Anlieferungszustand. Ergebnisse der Zugprüfungen bei -10°C und -20°C

12.1.5 Fugenvergussmasse FM5

Normierte Prüfungen

Prüfungen	Prüfergebnisse	Anforderungen gemäss SN671'625a	erfüllt
Aussehen und Beschaffenheit	Schwarz, matt, sehr griessig, weich, homogen	Homogen	Ja
Penetration (Nadel), 25°C	38·10 ⁻¹ mm	Anlieferungszustand: max. 100·10 ⁻¹ mm	Ja
Penetration (Konus), 25°C	24·10 ⁻¹ mm	Anlieferungszustand: 30·10 ⁻¹ mm bis 90·10 ⁻¹ mm	Nein
Erweichungspunkt RuK	100°C	min. 85°C	Ja
Fliesslänge	0mm	max. 10mm	Ja
Kugelfallprobe	Keine Risse, nicht zersprungen	Kein Zerspringen, keine Anrisse bei 3 von 4 Kugeln	Ja
Dehnbarkeit	Ohne Wasserlagerung:	<ul style="list-style-type: none"> – Bei 4.0mm Fugendehnung keine Risse, keine Ablösung – Maximalspannung: ≤ 1.000N/mm² – Spannung nach Versuchsende: Werte bestimmen und angeben 	Nein
	<ul style="list-style-type: none"> – Ablösung bei Fugendehnung 0.8mm – Maximalspannung: 0.433N/mm² – Spannung nach Versuchsende: 0 N/mm² 		
Dehnbarkeit	Mit Wasserlagerung:	<ul style="list-style-type: none"> – Bei 4.0mm Fugendehnung keine Risse, keine Ablösung – Maximalspannung: ≤ 1.000N/mm² – Spannung nach Versuchsende: Werte bestimmen und angeben 	Nein
	<ul style="list-style-type: none"> – Ablösung bei Fugendehnung 0.4mm – Maximalspannung: 0.333N/mm² – Spannung nach Versuchsende: 0 N/mm² 		

Tabelle 12.1.21: FM5 im Anlieferungszustand. Ergebnisse der Untersuchungen gemäss Norm SN 671'610

Nicht normierte Prüfungen

Gelpermeationschromatografie (GPC):

Der effektive quantitative Anteil des Polymers in der Fugenvergussmasse konnte nicht bestimmt werden, da die bei der Herstellung der Fugenvergussmasse verwendeten Polymere nicht geliefert wurden.

In Tabelle 12.1.22 sind Molekulargewicht und Flächenanteil des Polymers ersichtlich. Die Abbildung 12.1.13 zeigt das Chromatogramm der FM5 bei Anlieferung.

	Polymerpeaks			
	1. Peak	2. Peak	3. Peak	Total
Molekulargewicht [g/mol]	4.2 · 10 ⁵	1.2 · 10 ⁵	---	
Flächenanteil [Flächen-%]	1.90	1.77	---	3.67

Tabelle 12.1.22: FM5 im Anlieferungszustand. Molekulargewicht und Flächenanteil des Polymeren

Die Berechnung des Polymeranteils F erfolgte gemäss:

$$F = F_n \times 100 / (P+B) \quad [\text{Flächen-\%}]$$

F_n: Fläche des einzelnen Polymerpeaks

P: Peakfläche Polymer = Summe der Polymer-Peakflächen

B: Peakfläche Bitumen

FM5 / GPC-Chromatogramm

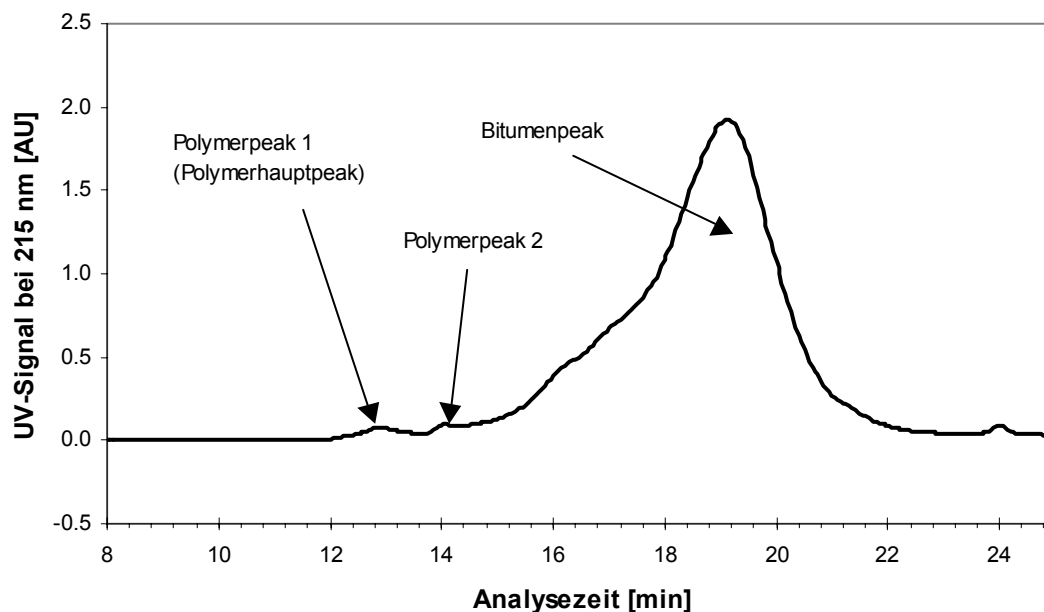


Abbildung 12.1.13: FM5 im Anlieferungszustand. GPC-Chromatogramm

Kennwerte mittels EMPA-Test "Ko-Axial Schubtest" (KAST):

In *Tabelle 12.1.23* sind die detaillierten Kennwerte der Fugenvergussmasse aufgeführt und die WLF-Masterkurven in der *Abbildung 12.1.14* grafisch dargestellt.

Temperatur [C]	Frequenz [Hz]	Kompl. Mod. [N*mm ⁻²]	Elast. Mod. [N*mm ⁻²]	Visk. Mod. [N*mm ⁻²]	Phasenwinkel [°]
10	0.125	1.613	1.227	1.046	40.4
10	0.25	1.572	1.14	1.082	43.5
10	0.5	2.05	1.491	1.406	43.3
10	1	2.811	2.072	1.899	42.5
10	2	3.829	2.864	2.541	41.6
10	4	5.198	3.943	3.388	40.7
10	8	7.599	5.827	4.877	39.9
5	0.125	2.911	2.281	1.808	38.4
5	0.25	3.192	2.447	2.048	39.9
5	0.5	4.207	3.248	2.673	39.5
5	1	5.688	4.457	3.534	38.4
5	2	7.645	6.064	4.654	37.5
5	4	10.16	8.17	6.047	36.5
5	8	11.24	9.315	6.29	34
0	0.125	6.17	5.098	3.477	34.3
0	0.25	7.192	5.875	4.148	35.2
0	0.5	9.308	7.691	5.244	34.3
0	1	12.14	10.14	6.673	33.4
0	2	15.7	13.26	8.41	32.4
0	4	20.13	17.13	10.56	31.6
0	8	17.83	15.63	8.592	28.8
-5	0.125	12.6	10.85	6.408	30.6
-5	0.25	15.19	13.1	7.682	30.4
-5	0.5	19.26	16.71	9.582	29.8
-5	1	24.1	21.11	11.62	28.8
-5	2	29.97	26.42	14.16	28.2
-5	4	37.3	32.92	17.53	28
-5	8	46.12	43.04	16.57	21.1
-10	0.125	24.35	21.68	11.09	27.1
-10	0.25	29.79	26.67	13.28	26.5
-10	0.5	36.6	32.96	15.91	25.8
-10	1	44.43	40.18	18.96	25.3
-10	2	53.73	49.22	21.56	23.7
-10	4	64.27	58.76	26.03	23.9
-10	8	90.66	83.23	35.96	23.4
40	0.125	5.57E-02	4.01E-02	3.87E-02	44
40	0.25	6.80E-02	4.81E-02	4.82E-02	45
40	0.5	9.02E-02	6.31E-02	6.44E-02	45.6
40	1	0.121	8.34E-02	0.0881	46.6
40	2	0.163	0.11	0.12	47.4
40	4	0.248	0.183	0.168	42.5
40	8	0.289	0.189	0.218	49.1
35	0.125	9.47E-02	6.80E-02	6.59E-02	44.1
35	0.25	0.108	7.74E-02	7.56E-02	44.3
35	0.5	0.143	0.0986	0.103	46.3
35	1	0.191	0.131	0.139	46.7
35	2	0.253	0.172	0.186	47.4
35	4	0.334	0.223	0.249	48.3
35	8	0.436	0.285	0.33	49.2

Tabelle 12.1.23a: FM5 im Anlieferungszustand. Kennwerte im Gebrauchsbereich mittels Ko-Axial-Schubtest (KAST)

Fortsetzung der *Tabelle 12.1.23a*

Temperatur [C]	Frequenz [Hz]	Kompl. Mod. [N*mm ⁻²]	Elast. Mod. [N*mm ⁻²]	Visk. Mod. N*mm ⁻²]	Phasenwinkel [°]
30	0.125	0.157	1.15E-01	0.107	43.1
30	0.25	0.171	0.119	0.123	45.9
30	0.5	0.226	0.157	0.163	46
30	1	0.3	0.206	0.218	46.7
30	2	0.391	0.264	0.289	47.6
30	4	0.555	0.401	0.383	43.7
30	8	0.767	0.544	0.54	44.8
25	0.125	0.27	0.195	0.187	43.7
25	0.25	0.276	0.192	0.198	46
25	0.5	0.355	0.245	0.257	46.4
25	1	0.462	0.314	0.339	47.2
25	2	0.601	0.402	0.447	48
25	4	0.775	0.51	0.584	48.8
25	8	1.032	0.691	0.766	47.9
20	0.125	0.437	0.314	0.305	44.1
20	0.25	0.417	0.292	0.298	45.5
20	0.5	0.55	0.375	0.402	47
20	1	0.713	0.478	0.529	47.8
20	2	0.917	0.606	0.688	48.6
20	4	1.186	0.776	0.897	49.1
20	8	1.478	0.961	1.123	49.4
15	0.125	0.703	0.506	0.488	44
15	0.25	0.668	0.451	0.493	47.5
15	0.5	0.84	0.564	0.622	47.8
15	1	1.107	0.737	0.826	48.3
15	2	1.427	0.941	1.073	48.8
15	4	1.787	1.175	1.346	48.9
15	8	2.09	1.867	0.94	26.7

Tabelle 12.1.23b: FM5 im Anlieferungszustand. Kennwerte im Gebrauchsbereich mittels Ko-Axial-Schubtest (KAST)

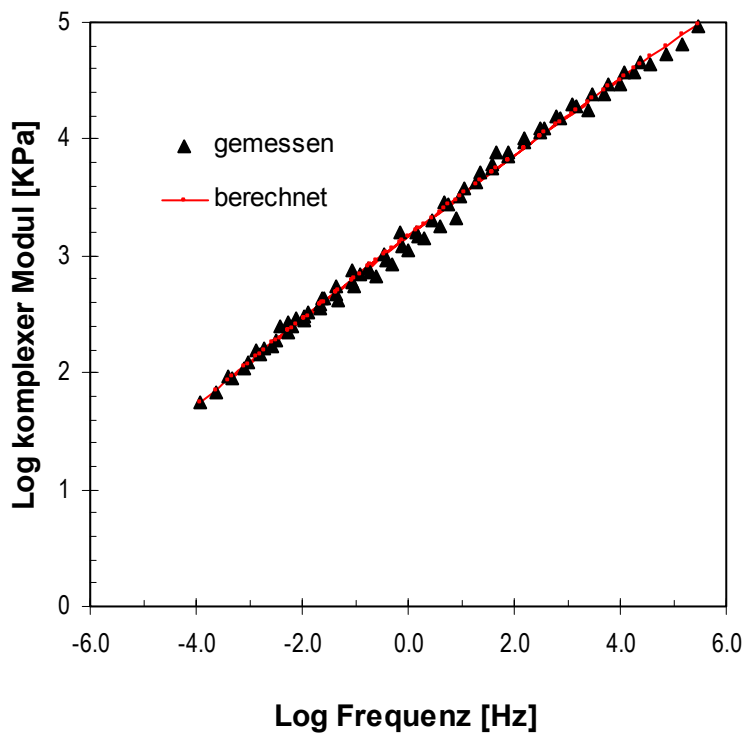


Abbildung 12.1.14: FM5 im Anlieferungszustand. KAST-WLF-Masterkurve.
Referenztemperatur: 15°C.

Die Daten der WLF-Masterkurve sind in Kap. 12.1.8 aufgelistet.

Rheologisches Verhalten mittels DSR:

In *Tabelle 12.1.24* sind die detaillierten, rheologischen Kennwerte mittels Dynamic Shear Rheometer (DSR) der Fugenvergussmasse FM5 im Anlieferungszustand aufgeführt und die WLF-Masterkurven in der *Abbildung 12.1.15* grafisch dargestellt.

Temperatur [°C]	Viskosität [Pa.s]	Module [kPa]			Phasenwinkel [°]
		G*	G'	G''	
10	69800	1800	1670	658	21.46
20	46000	821	698	433	31.83
30	23900	363	285	225	38.32
40	10900	152	113	103	42.33
50	4800	63.8	45	45.3	45.16
60	1980	24.8	16.3	18.7	48.94
70	1170	14.1	8.8	11.0	51.54

Tabelle 12.1.24: FM5 im Anlieferungszustand. Rheologische Kennwerte mittels DSR
(Frequenz 1.5Hz; Dehnungsamplitude. 1%)

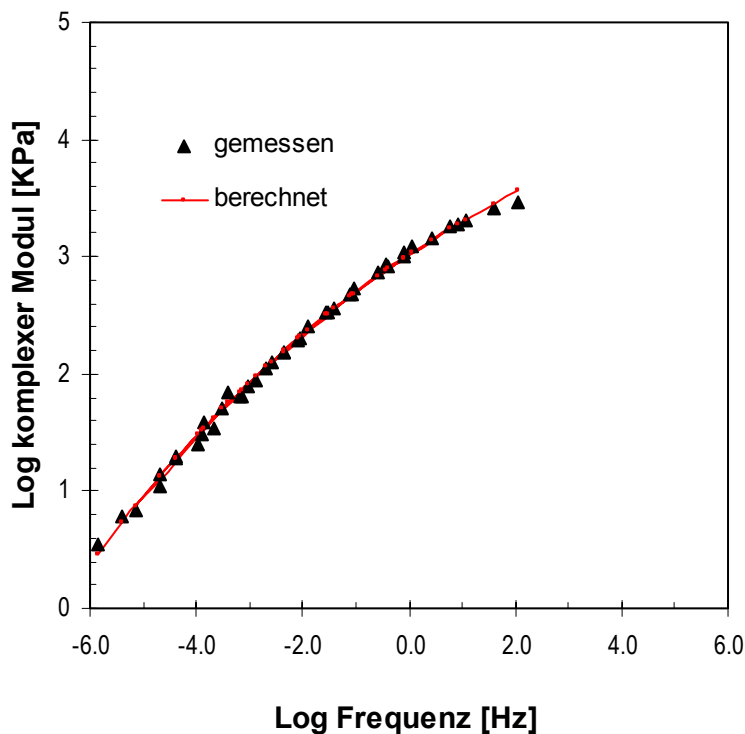


Abbildung 12.1.15: FM5 im Anlieferungszustand. DSR-WLF-Masterkurve.
Referenztemperatur: 15°C.

Die Daten der WLF-Masterkurve sind in Kap. 12.1.8 aufgelistet.

Zugprüfung an Fugenmodellkörper nach Einbau

An den Ausschnitten (Fugenlänge von 150mm) der Fugenmodellkörper, die gleichzeitig mit den Fugenobjekten auf der Versuchsstrecke eingebaut wurden, wurden Zugprüfungen bei -10°C und -20°C mit einer Zuggeschwindigkeit von 3mm/h bis 15mm Fugendehnung vorgenommen.

Prüftemperatur	Maximalspannung [N/mm ²]	Zugehörige Fugendehnung [mm]	Risse/Ablösungen bei		Bemerkung zu den Beschädigungen bis 15mm Dehnung
			Spannung [N/mm ²]	Fugendehnung [mm]	
-10°C	0.967	0.5	0.967	0.5	Risse und Ablösungen
-20°C	1.533	0.4	1.533	0.4	Risse und Ablösungen

Tabelle 12.1.25: FM5 im Anlieferungszustand. Ergebnisse der Zugprüfungen bei -10°C und -20°C

12.1.6 Fugenvergussmasse FM6

Normierte Prüfungen

Prüfungen	Prüfergebnisse	Anforderungen gemäss SN671'625a	erfüllt
Aussehen und Beschaffenheit	Schwarz, glänzend, sehr griessig, homogen	homogen	Ja
Penetration (Nadel), 25°C	71·10 ⁻¹ mm	Anlieferungszustand: max. 100·10 ⁻¹ mm	Ja
Penetration (Konus), 25°C	59·10 ⁻¹ mm	Anlieferungszustand: 30·10 ⁻¹ mm bis 90·10 ⁻¹ mm	Ja
Erweichungspunkt RuK	97°C	min. 85°C	Ja
Fliesslänge	1mm	max. 10mm	Ja
Kugelfallprobe	Keine Risse, nicht zersprungen	Kein Zerspringen, keine Anrisse bei 3 von 4 Kugeln	Ja
Dehnbarkeit	Ohne Wasserlagerung:	<ul style="list-style-type: none"> – Bei 4.0mm Fugendehnung keine Risse, keine Ablösung – Maximalspannung: ≤ 1.000N/mm² – Spannung nach Versuchsende: Werte bestimmen und angeben 	Nein
	<ul style="list-style-type: none"> – Ablösung bei Fugendehnung 0.9mm – Maximalspannung: 0.242N/mm² – Spannung nach Versuchsende: 0 N/mm² 		
Dehnbarkeit	Mit Wasserlagerung:	<ul style="list-style-type: none"> – Bei 4.0mm Fugendehnung keine Risse, keine Ablösung – Maximalspannung: ≤ 1.000N/mm² – Spannung nach Versuchsende: Werte bestimmen und angeben 	Nein
	<ul style="list-style-type: none"> – Ablösung bei Fugendehnung 0.8mm – Maximalspannung: 0.150N/mm² – Spannung nach Versuchsende: 0 N/mm² 		

Tabelle 12.1.26: FM6 im Anlieferungszustand. Ergebnisse der Untersuchungen gemäss Norm SN 671'610

Nicht normierte Prüfungen

Gelpermeationschromatografie (GPC):

Der effektive quantitative Anteil des Polymers in der Fugenvergussmasse konnte nicht bestimmt werden, da die bei der Herstellung der Fugenvergussmasse verwendeten Polymere nicht geliefert wurden.

In Tabelle 12.1.27 sind Molekulargewicht und Flächenanteil des Polymers ersichtlich. Die Abbildung 12.1.16 zeigt das Chromatogramm der FM6 bei Anlieferung.

	Polymerpeaks			
	1. Peak	2. Peak	3. Peak	Total
Molekulargewicht [g/mol]	4.3 · 10 ⁵	1.3 · 10 ⁵	---	
Flächenanteil [Flächen-%]	2.44	2.35	---	4.79

Tabelle 12.1.27: FM6 im Anlieferungszustand. Molekulargewicht und Flächenanteil des Polymeren

Die Berechnung des Polymeranteils F erfolgte gemäss:

$$F = F_n \times 100 / (P+B) \quad [\text{Flächen-\%}]$$

F_n : Fläche des einzelnen Polymerpeaks

P: Peakfläche Polymer = Summe der Polymer-Peakflächen

B: Peakfläche Bitumen

FM6 / GPC-Chromatogramm

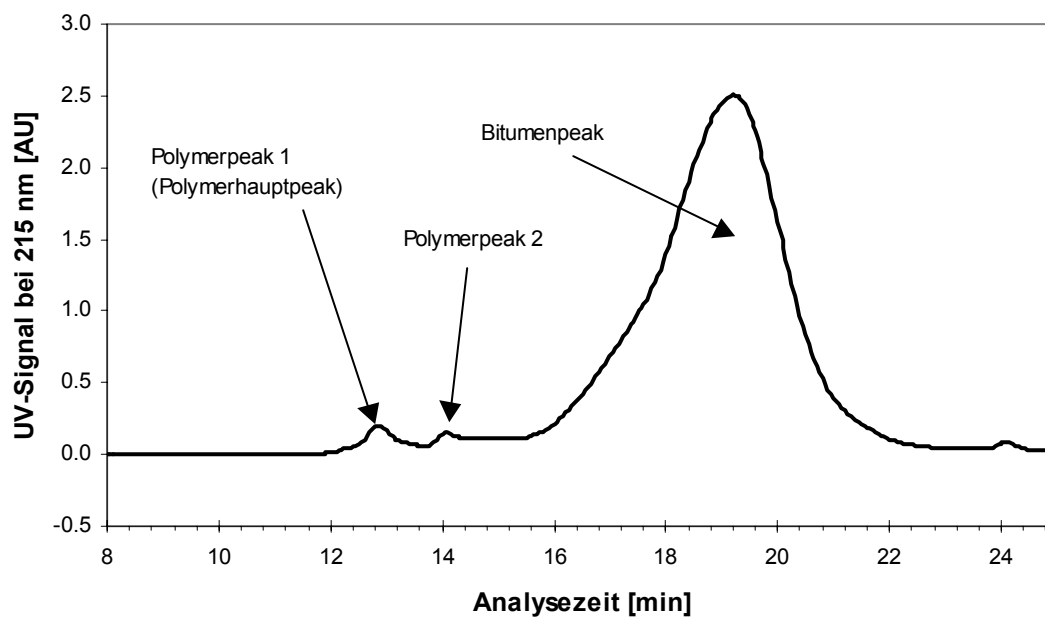


Abbildung 12.1.16: FM6 im Anlieferungszustand. GPC-Chromatogramm

Kennwerte mittels EMPA-Test "Ko-Axial Schubtest" (KAST):

In *Tabelle 12.1.28* sind die detaillierten Kennwerte der Fugenvergussmasse aufgeführt und die WLF-Masterkurven in der *Abbildung 12.1.17* grafisch dargestellt.

Temperatur [C]	Frequenz [Hz]	Kompl. Mod. [N*mm ⁻²]	Elast. Mod. [N*mm ⁻²]	Visk. Mod. [N*mm ⁻²]	Phasenwinkel [°]
10	0.125	1.613	1.227	1.046	40.4
10	0.25	1.572	1.14	1.082	43.5
10	0.5	2.05	1.491	1.406	43.3
10	1	2.811	2.072	1.899	42.5
10	2	3.829	2.864	2.541	41.6
10	4	5.198	3.943	3.388	40.7
10	8	7.599	5.827	4.877	39.9
5	0.125	2.911	2.281	1.808	38.4
5	0.25	3.192	2.447	2.048	39.9
5	0.5	4.207	3.248	2.673	39.5
5	1	5.688	4.457	3.534	38.4
5	2	7.645	6.064	4.654	37.5
5	4	10.16	8.17	6.047	36.5
5	8	11.24	9.315	6.29	34
0	0.125	6.17	5.098	3.477	34.3
0	0.25	7.192	5.875	4.148	35.2
0	0.5	9.308	7.691	5.244	34.3
0	1	12.14	10.14	6.673	33.4
0	2	15.7	13.26	8.41	32.4
0	4	20.13	17.13	10.56	31.6
0	8	17.83	15.63	8.592	28.8
-5	0.125	12.6	10.85	6.408	30.6
-5	0.25	15.19	13.1	7.682	30.4
-5	0.5	19.26	16.71	9.582	29.8
-5	1	24.1	21.11	11.62	28.8
-5	2	29.97	26.42	14.16	28.2
-5	4	37.3	32.92	17.53	28
-5	8	46.12	43.04	16.57	21.1
-10	0.125	24.35	21.68	11.09	27.1
-10	0.25	29.79	26.67	13.28	26.5
-10	0.5	36.6	32.96	15.91	25.8
-10	1	44.43	40.18	18.96	25.3
-10	2	53.73	49.22	21.56	23.7
-10	4	64.27	58.76	26.03	23.9
-10	8	90.66	83.23	35.96	23.4
40	0.125	5.57E-02	4.01E-02	3.87E-02	44
40	0.25	6.80E-02	4.81E-02	4.82E-02	45
40	0.5	9.02E-02	6.31E-02	6.44E-02	45.6
40	1	0.121	8.34E-02	0.0881	46.6
40	2	0.163	0.11	0.12	47.4
40	4	0.248	0.183	0.168	42.5
40	8	0.289	0.189	0.218	49.1
35	0.125	9.47E-02	6.80E-02	6.59E-02	44.1
35	0.25	0.108	7.74E-02	7.56E-02	44.3
35	0.5	0.143	0.0986	0.103	46.3
35	1	0.191	0.131	0.139	46.7
35	2	0.253	0.172	0.186	47.4
35	4	0.334	0.223	0.249	48.3
35	8	0.436	0.285	0.33	49.2

Tabelle 12.1.28a: FM6 im Anlieferungszustand. Kennwerte im Gebrauchsbereich mittels Ko-Axial-Schubtest (KAST)

Fortsetzung der *Tabelle 12.1.28a*

Temperatur [C]	Frequenz [Hz]	Kompl. Mod. [N*mm ⁻²]	Elast. Mod. [N*mm ⁻²]	Visk. Mod. [N*mm ⁻²]	Phasenwinkel [°]
30	0.125	0.157	1.15E-01	0.107	43.1
30	0.25	0.171	0.119	0.123	45.9
30	0.5	0.226	0.157	0.163	46
30	1	0.3	0.206	0.218	46.7
30	2	0.391	0.264	0.289	47.6
30	4	0.555	0.401	0.383	43.7
30	8	0.767	0.544	0.54	44.8
25	0.125	0.27	0.195	0.187	43.7
25	0.25	0.276	0.192	0.198	46
25	0.5	0.355	0.245	0.257	46.4
25	1	0.462	0.314	0.339	47.2
25	2	0.601	0.402	0.447	48
25	4	0.775	0.51	0.584	48.8
25	8	1.032	0.691	0.766	47.9
20	0.125	0.437	0.314	0.305	44.1
20	0.25	0.417	0.292	0.298	45.5
20	0.5	0.55	0.375	0.402	47
20	1	0.713	0.478	0.529	47.8
20	2	0.917	0.606	0.688	48.6
20	4	1.186	0.776	0.897	49.1
20	8	1.478	0.961	1.123	49.4
15	0.125	0.703	0.506	0.488	44
15	0.25	0.668	0.451	0.493	47.5
15	0.5	0.84	0.564	0.622	47.8
15	1	1.107	0.737	0.826	48.3
15	2	1.427	0.941	1.073	48.8
15	4	1.787	1.175	1.346	48.9
15	8	2.09	1.867	0.94	26.7

Tabelle 12.1.28b: FM6 im Anlieferungszustand. Kennwerte im Gebrauchsbereich mittels Ko-Axial-Schubtest (KAST)

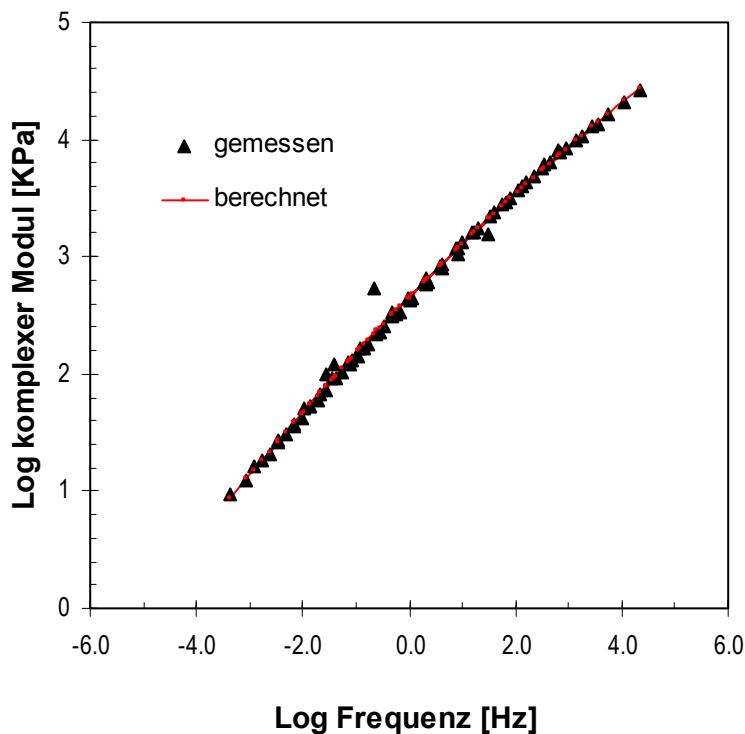


Abbildung 12.1.17: FM6 im Anlieferungszustand. KAST-WLF-Masterkurve.
 Referenztemperatur: 15°C.
 Die Daten der WLF-Masterkurve sind in Kap. 12.1.8 aufgelistet.

Rheologisches Verhalten mittels DSR:

In *Tabelle 12.1.29* sind die detaillierten, rheologischen Kennwerte mittels Dynamic Shear Rheometer (DSR) der Fugenvergussmasse FM6 im Anlieferungszustand aufgeführt und die WLF-Masterkurven in der *Abbildung 12.1.18* grafisch dargestellt.

Temperatur [°C]	Viskosität [Pa.s]	Module [kPa]			Phasenwinkel [°]
		G*	G'	G''	
10	32100	519	422	302	35.57
20	14500	215	166	136	39.33
30	6560	93.1	69.6	61.8	41.62
40	3030	43.1	32.3	28.5	41.48
50	1320	18.4	13.5	12.4	42.63
60	627	8.6	6.2	5.9	43.63
70	410	5.5	4.0	3.9	44.30

Tabelle 12.1.29: FM6 im Anlieferungszustand. Rheologische Kennwerte mittels DSR
 (Frequenz 1.5Hz; Dehnungsamplitude. 1%)

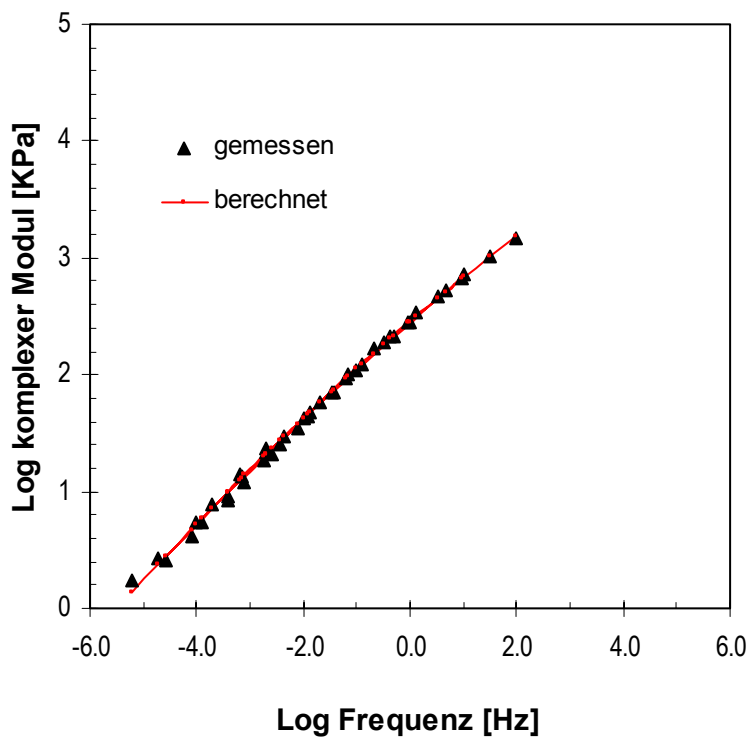


Abbildung 12.1.18: FM6 im Anlieferungszustand. DSR-WLF-Masterkurve.
 Referenztemperatur: 15°C.
 Die Daten der WLF-Masterkurve sind in Kap. 12.1.8 aufgelistet.

Zugprüfung an Fugenmodellkörper nach Einbau

An den Ausschnitten (Fugenlänge von 150mm) der Fugenmodellkörper, die gleichzeitig mit den Fugenobjekten auf der Versuchsstrecke eingebaut wurden, wurden Zugprüfungen bei -10°C und -20°C mit einer Zugeschwindigkeit von 3mm/h bis 15mm Fugendehnung vorgenommen.

Prüftemperatur	Maximalspannung [N/mm ²]	Zugehörige Fugendehnung [mm]	Risse/Ablösungen bei		Bemerkung zu den Beschädigungen bis 15mm Dehnung
			Spannung [N/mm ²]	Fugendehnung [mm]	
-10°C	0.333	0.6	---	---	Weder Risse noch Ablösungen Ablösung
-20°C	0.933	zw. 0.2 und 0.7	0.667	3.0	

Tabelle 12.1.30: FM6 im Anlieferungszustand. Ergebnisse der Zugprüfungen bei -10°C und -20°C

12.1.7 Fugenvergussmasse FM7

Normierte Prüfungen

Prüfungen	Prüfergebnisse	Anforderungen gemäss SN671'625a	erfüllt
Aussehen und Beschaffenheit	Schwarz, matt, sehr griessig, weich, homogen	Homogen	Ja
Penetration (Nadel), 25°C	66·10 ⁻¹ mm	Anlieferungszustand: max. 100·10 ⁻¹ mm	Ja
Penetration (Konus), 25°C	57·10 ⁻¹ mm	Anlieferungszustand: 30·10 ⁻¹ mm bis 90·10 ⁻¹ mm	Ja
Erweichungspunkt RuK	86°C	min. 85°C	Ja
Fliesslänge	0mm	max. 10mm	Ja
Kugelfallprobe	Keine Risse, nicht zersprungen	Kein Zerspringen, keine Anrisse bei 3 von 4 Kugeln	Ja
Dehnbarkeit	Ohne Wasserlagerung:	<ul style="list-style-type: none"> – Bei 4.0mm Fugendehnung keine Risse, keine Ablösung – Maximalspannung: ≤ 1.000N/mm² – Spannung nach Versuchsende: Werte bestimmen und angeben 	Ja
	<ul style="list-style-type: none"> – Keine Risse, keine Ablösung bei Fugendehnung 4.0mm – Maximalspannung: 0.875N/mm² – Spannung nach Versuchsende: 0.350N/mm² 		
Dehnbarkeit	Mit Wasserlagerung:	<ul style="list-style-type: none"> – Bei 4.0mm Fugendehnung keine Risse, keine Ablösung – Maximalspannung: ≤ 1.000N/mm² – Spannung nach Versuchsende: Werte bestimmen und angeben 	Ja
	<ul style="list-style-type: none"> – Keine Risse, keine Ablösung bei Fugendehnung 4.0mm – Maximalspannung: 0.350N/mm² – Spannung nach Versuchsende: 0.333N/mm² 		

Tabelle 12.1.31: FM7 im Anlieferungszustand. Ergebnisse der Untersuchungen gemäss Norm SN 671'610

Nicht normierte Prüfungen

Gelpermeationschromatografie (GPC):

Der effektive quantitative Anteil des Polymers in der Fugenvergussmasse konnte nicht bestimmt werden, da die bei der Herstellung der Fugenvergussmasse verwendeten Polymere nicht geliefert wurden.

In Tabelle 12.1.32 sind Molekulargewicht und Flächenanteil des Polymers ersichtlich. Die Abbildung 12.1.19 zeigt das Chromatogramm der FM7 bei Anlieferung.

	Polymerpeaks			
	1. Peak	2. Peak	3. Peak	Total
Molekulargewicht [g/mol]	2.4 · 10 ⁵	1.4 · 10 ⁵	1.1 · 10 ⁵	
Flächenanteil [Flächen-%]	3.46	3.54	1.86	8.86

Tabelle 12.1.32: FM7 im Anlieferungszustand. Molekulargewicht und Flächenanteil des Polymeren

Die Berechnung des Polymeranteils F erfolgte gemäss:

$$F = F_n \times 100 / (P+B) \quad [\text{Flächen-\%}]$$

F_n : Fläche des einzelnen Polymerpeaks

P: Peakfläche Polymer = Summe der Polymer-Peakflächen

B: Peakfläche Bitumen

FM7 / GPC-Chromatogramm

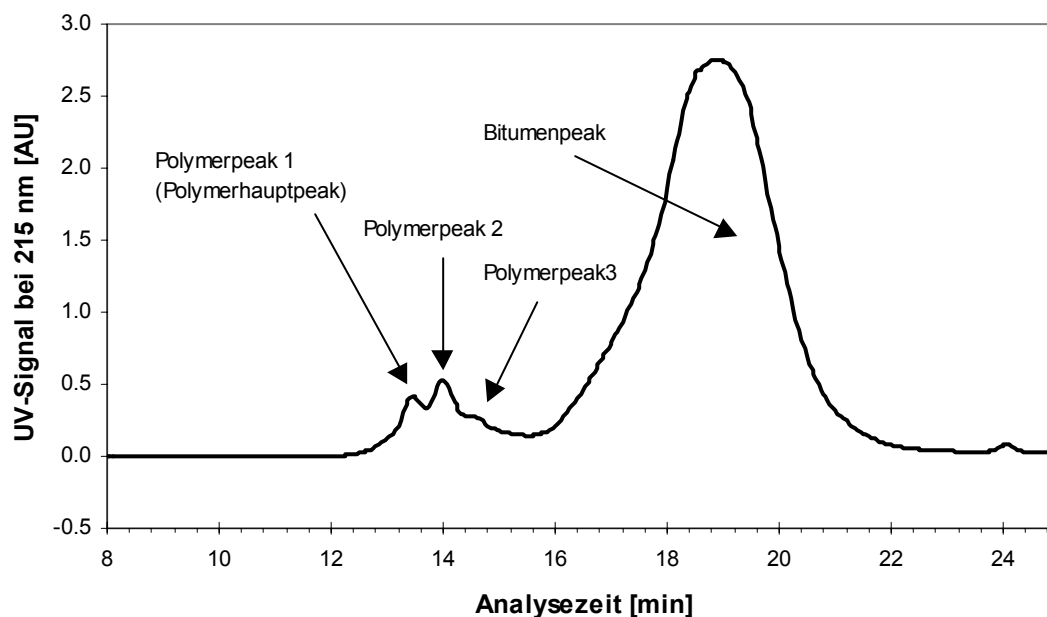


Abbildung 12.1.19: FM7 im Anlieferungszustand. GPC-Chromatogramm

Kennwerte mittels EMPA-Test "Ko-Axial Schubtest" (KAST):

In *Tabelle 12.1.33* sind die detaillierten Kennwerte der Fugenvergussmasse aufgeführt und die WLF-Masterkurven in der *Abbildung 12.1.20* grafisch dargestellt.

Temperatur [C]	Frequenz [Hz]	Kompl. Mod. [N*mm ⁻²]	Elast. Mod. [N*mm ⁻²]	Visk. Mod. [N*mm ⁻²]	Phasenwinkel [°]
10	0.125	0.469	0.353	0.309	41.2
10	0.25	0.591	0.447	0.386	40.8
10	0.5	0.777	0.593	0.501	40.2
10	1	1.016	0.782	0.65	39.7
10	2	1.342	1.034	0.856	39.6
10	4	1.776	1.364	1.137	39.8
10	8	2.362	1.801	1.529	40.3
5	0.125	0.861	0.666	0.545	39.3
5	0.25	1.025	0.793	0.65	39.4
5	0.5	1.363	1.057	0.86	39.1
5	1	1.85	1.438	1.165	39
5	2	2.501	1.947	1.571	38.9
5	4	3.481	2.837	2.017	35.4
5	8	4.309	3.616	2.344	33
0	0.125	1.947	1.544	1.187	37.6
0	0.25	2.354	1.862	1.44	37.7
0	0.5	3.139	2.502	1.896	37.1
0	1	4.194	3.368	2.499	36.6
0	2	5.585	4.524	3.275	35.9
0	4	7.367	6.004	4.27	35.4
0	8	8.772	7.45	4.631	31.9
-5	0.125	4.39	3.624	2.478	34.4
-5	0.25	5.462	4.524	3.06	34.1
-5	0.5	7.128	5.959	3.912	33.3
-5	1	9.233	7.8	4.939	32.3
-5	2	11.82	10.09	6.168	31.4
-5	4	15.11	12.95	7.773	31
-5	8	19.15	16.52	9.682	30.4
-10	0.125	9.678	8.379	4.843	30
-10	0.25	12.03	10.42	6.005	29.9
-10	0.5	15.09	13.17	7.366	29.2
-10	1	18.83	16.61	8.859	28.1
-10	2	23.45	20.76	10.89	27.7
-10	4	28.23	25.24	12.64	26.6
-10	8	35.93	32.11	16.13	26.7
40	0.125	1.09E-02	9.06E-03	5.99E-03	33.5
40	0.25	1.42E-02	1.11E-02	8.89E-03	38.7
40	0.5	2.10E-02	1.61E-02	1.35E-02	40
40	1	0.0295	2.16E-02	0.0201	42.9
40	2	0.0426	0.0304	0.0298	44.5
40	4	0.061	0.0433	0.043	44.8
40	8	0.0863	0.061	0.0611	45
35	0.125	1.68E-02	1.33E-02	1.03E-02	37.8
35	0.25	0.0245	1.79E-02	1.66E-02	42.8
35	0.5	0.0349	0.0255	0.0237	42.9
35	1	0.0495	0.0359	0.0341	43.5
35	2	0.0711	0.051	0.0496	44.2
35	4	0.1	0.0716	0.0699	44.3
35	8	0.197	0.14	0.138	44.5

Tabelle 12.1.33a: FM7 im Anlieferungszustand. Kennwerte im Gebrauchsbereich mittels Ko-Axial-Schubtest (KAST)

Fortsetzung der *Tabelle 12.1.33a*

Temperatur [C]	Frequenz [Hz]	Kompl. Mod. [N*mm ⁻²]	Elast. Mod. [N*mm ⁻²]	Visk. Mod. [N*mm ⁻²]	Phasenwinkel [°]
30	0.125	0.0304	2.26E-02	0.0202	41.8
30	0.25	0.0428	0.0312	0.0293	43.3
30	0.5	0.0604	0.044	0.0414	43.3
30	1	0.0867	0.0625	0.06	43.8
30	2	0.122	0.0879	0.0839	43.7
30	4	0.167	0.122	0.114	43.1
30	8	0.225	0.166	0.152	42.5
25	0.125	0.056	0.0415	0.0377	42.2
25	0.25	0.0806	0.0587	0.0552	43.3
25	0.5	0.111	0.0802	0.0765	43.6
25	1	0.155	0.113	0.106	43.3
25	2	0.212	0.156	0.143	42.6
25	4	0.284	0.211	0.189	41.9
25	8	0.443	0.358	0.261	36.1
20	0.125	0.111	0.0809	0.0765	43.4
20	0.25	0.148	0.109	0.101	42.8
20	0.5	0.205	0.151	0.139	42.5
20	1	0.277	0.207	0.184	41.7
20	2	0.367	0.277	0.241	41.1
20	4	0.478	0.363	0.311	40.7
20	8	0.614	0.476	0.387	39.1

Tabelle 12.1.33b: FM7 im Anlieferungszustand. Kennwerte im Gebrauchsbereich mittels Ko-Axial-Schubtest (KAST)

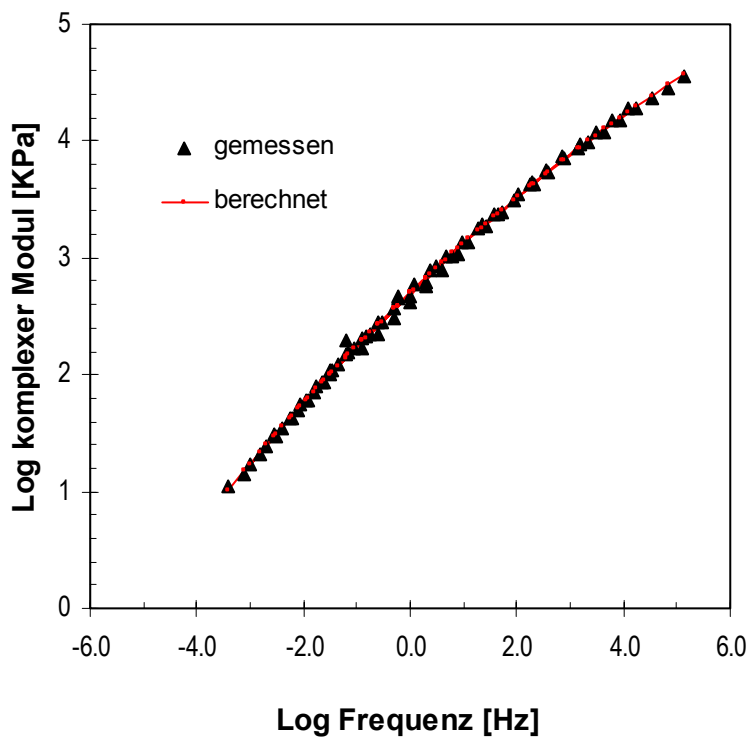


Abbildung 12.1.20: FM7 im Anlieferungszustand. KAST-WLF-Masterkurve.
 Referenztemperatur: 15°C.
 Die Daten der WLF-Masterkurve sind in Kap. 12.1.8 aufgelistet.

Rheologisches Verhalten mittels DSR:

In *Tabelle 12.1.34* sind die detaillierten, rheologischen Kennwerte mittels Dynamic Shear Rheometer (DSR) der Fugenvergussmasse FM7 im Anlieferungszustand aufgeführt und die WLF-Masterkurven in der *Abbildung 12.1.21* grafisch dargestellt.

Temperatur [°C]	Viskosität [Pa.s]	Module [kPa]			Phasenwinkel [°]
		G*	G'	G''	
10	59900	1080	918	565	31.59
20	32300	501	398	304	37.37
30	15200	239	191	143	36.87
40	6730	114	94.6	63.4	33.86
50	5180	94.4	80.8	48.8	31.12
60	3310	60.5	51.8	31.2	31.09
70	2280	41.5	35.5	21.5	31.18

Tabelle 12.1.34: FM7 im Anlieferungszustand. Rheologische Kennwerte mittels DSR
 (Frequenz 1.5Hz; Dehnungsamplitude. 1%)

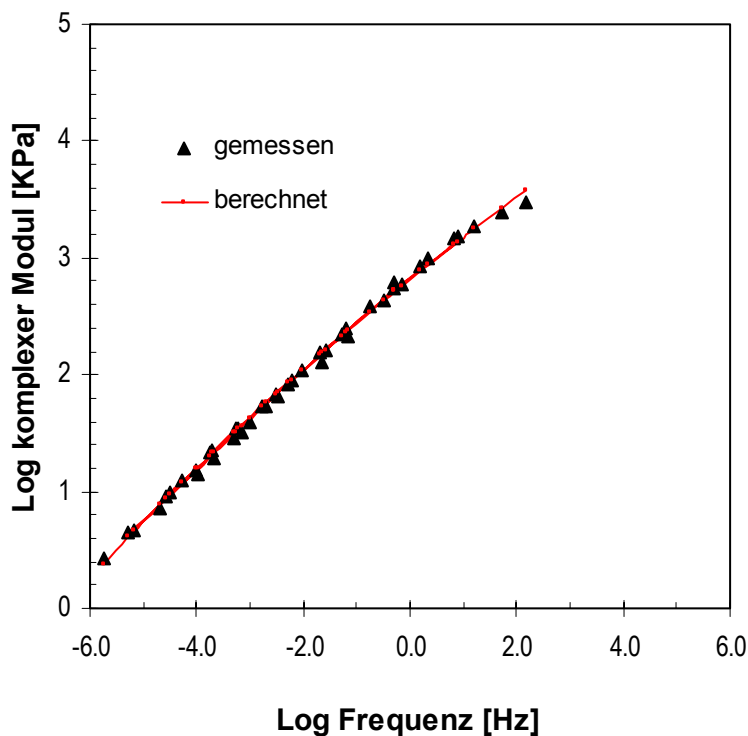


Abbildung 12.1.21: FM7 im Anlieferungszustand. DSR-WLF-Masterkurve.
 Referenztemperatur: 15°C.
 Die Daten der WLF-Masterkurve sind in Kap. 12.1.8 aufgelistet.

Zugprüfung an Fugenmodellkörper nach Einbau

An den Ausschnitten (Fugenlänge von 150mm) der Fugenmodellkörper, die gleichzeitig mit den Fugenobjekten auf der Versuchsstrecke eingebaut wurden, wurden Zugprüfungen bei -10°C und -20°C mit einer Zuggeschwindigkeit von 3mm/h bis 15mm Fugendehnung vorgenommen.

Prüftemperatur	Maximalspannung [N/mm ²]	Zugehörige Fugendehnung [mm]	Risse/Ablösungen bei		Bemerkung zu den Beschädigungen bis 15mm Dehnung
			Spannung [N/mm ²]	Fugendehnung [mm]	
-10°C	0.367	1.2	---	---	Weder Risse noch Ablösungen
-20°C	0.900	1.0	0.833	2.4	Ablösung

Tabelle 12.1.35: FM7 im Anlieferungszustand. Ergebnisse der Zugprüfungen bei -10°C und -20°C

12.1.8 Daten der WLF-Masterkurven gemäss KAST und DRS der Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand

Zur Darstellung WLF-Masterkurven sowohl bei KAST als auch bei DSR wurden die Formeln (3) bis (4) in Kap. 4.2.2 verwendet. Die verwendeten Konstanten bei den Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand sind in den *Tabellen 12.1.36* und *12.1.37* aufgelistet.

	KAST-WLF-Konstanten					
	d	a	b	c	p	q
FM1	-43.59	49.86	-2.36	0.10	18.58	199.37
FM2	-47.38	53.73	-2.42	0.09	18.56	199.39
FM3	-45.92	51.09	-2.81	0.20	12.35	130.88
FM4	-45.81	51.14	-3.00	0.17	19.61	165.88
FM5	-35.12	50.46	-1.15	0.04	17.84	122.40
FM6	-38.20	47.62	-1.80	0.08	16.94	148.03
FM7	-12.07	19.14	-1.22	0.13	12.25	97.16

Tabelle 12.1.36: KAST-WLF-Konstanten bei den Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand

	DSR-WLF-Konstanten					
	d	a	b	c	p	q
FM1	0.80	65.25	4.15	0.34	8.25	83.61
FM2	-28.58	50.16	-0.50	0.04	15.88	122.41
FM3	-17.75	55.49	0.58	0.04	9.22	97.98
FM4	-47.52	55.36	-2.30	0.08	14.93	120.94
FM5	-49.24	54.11	-3.35	0.16	15.89	121.91
FM6	-47.84	55.35	-2.30	0.08	13.46	121.94
FM7	-46.14	57.11	-1.79	0.05	15.15	120.82

Tabelle 12.1.37: DSR-WLF-Konstanten bei den Fugenvergussmassen im Anlieferungszustand

12.2 ANHANG 2

Fugenabdichtung Einbauprotokoll gemäss Checkliste der EMPA

12.2 Fugenabdichtung/Einbauprotokoll gemäss Checkliste der EMPA

1	Baustelle	
1.1	Objektbezeichnung:	.....
1.2	Projekt-Name/-Nr: /
1.3	Strasse/Abschnitt: /
1.4	Fahrriichtung/Spur: /
1.5	Etappen-Nr:	.....
2	Auftraggeber	
2.1	Amt/Abteilung: /
2.2	Kontaktperson:	.....
2.3	Strasse:	.....
2.4	PLZ/Ort:	.....
2.5	Telefon-Nr:	.....
2.6	Natel-Nr:	.....
2.7	Fax-Nr:	.....
3	Bauleitung	
3.1	Amt oder Firma:	.....
3.2	Kontaktperson:	.....
3.3	Strasse:	.....
3.4	PLZ/Ort:	.....
3.5	Telefon-Nr:	.....
3.6	Natel-Nr:	.....
3.7	Fax-Nr:	.....
4	Auftragnehmer	
4.1	Firma:	.....
4.2	Kontaktperson:	.....
4.3	Strasse:	.....
4.4	PLZ/Ort:	.....
4.5	Telefon-Nr:	.....
4.6	Natel-Nr:	.....
4.7	Fax-Nr:	.....
5	Einbau-Equipe	
5.1	Firma:	.....
5.2	Equipenleiter:	.....
5.3	Strasse:	.....
5.4	PLZ/Ort:	.....
5.5	Telefon-Nr:	.....
5.6	Natel-Nr:	.....
5.7	Fax-Nr:	.....

6	Objektspezifikation	
6.1	Standort:	.....
6.2	Grund der Arbeit:	Neubau <input type="checkbox"/> Sanierung <input type="checkbox"/> Unterhalt <input type="checkbox"/>
6.3	Fugen-Typ:	.....
6.4	Fugen-Dimension:	Breite: .....mm / Tiefe: .....mm / Länge: .....m Abphasen der Fugenkanten: Ja <input type="checkbox"/> / Nein <input type="checkbox"/>
		Bemerkungen:
7	Einbaumaterialien	
	Voranstrich	
7.1	Produkt-Name:	.....
7.2	Hersteller / Lieferant:/.....
7.3	Gebinde-Nr / Menge pro Gebinde:/.....
7.4	Herstelldatum / Verfalldatum:/.....
	Fugenvergussmasse	
7.5	Produkt-Name:	.....
7.6	Hersteller / Lieferant:/.....
7.7	Gebinde-Nr / Menge pro Gebinde:/.....
7.8	Herstelldatum / Verfalldatum:/.....
		Bemerkungen:
8	Herstellung der Fugen	
8.1	Firma:	.....
8.2	Kontaktperson:	.....
8.3	Herstelldatum:	.....
8.4	Herstellverfahren:	Fräsen <input type="checkbox"/> / Schneiden <input type="checkbox"/>
		Bemerkungen:
9	Vorbereitung der Fugen	
9.1	Datum und Zeit der Ausführung:	Datum: Zeit am Arbeitsende:
9.2	Vorbereitungsverfahren:	.....Uhr Sandstrahlen <input type="checkbox"/> / Einbürsten <input type="checkbox"/> / Erwärmen mit Heisspressluft <input type="checkbox"/>
		Weiteres: Bemerkungen:

10	Applikation des Voranstriches	
10.1 Datum und Zeit der Ausführung: 10.2 Applikationsverfahren: 10.3 Zustand der Fugen: 10.4 Sauberkeit der Fugen: 10.5 Witterung während der Applikation: 10.6 Temperaturen/rel. Luftfeuchtigkeit 10.7 Temperatur des Voranstriches 10.8 Wirkliche Verbrauchsmenge 10.9 Witterung während der Trocknung: 10.10 Zeitdauer bis zur Fugenfüllung		Datum: Zeit am Arbeitsende: .....Uhr Pinseln <input type="checkbox"/> / Spritzen <input type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> , schlecht <input type="checkbox"/> kleine Löcher an Fugenflanken: keine <input type="checkbox"/> / wenig <input type="checkbox"/> , viel <input type="checkbox"/> feucht <input type="checkbox"/> / trocken <input type="checkbox"/> / sauber <input type="checkbox"/> / verschmutzt <input type="checkbox"/> sonnig <input type="checkbox"/> / bewölkt <input type="checkbox"/> / neblig <input type="checkbox"/> / Windlage: kein Wind <input type="checkbox"/> / starker Wind <input type="checkbox"/> / stürmisch <input type="checkbox"/> Lufttemperatur: Arbeitsbeginn .....°C / Arbeitsende .....°C Betontemperatur: Arbeitsbeginn .....°C / Arbeitsende .....°C Rel. Luftfeuchtigkeit: Arbeitsbeginn% / Arbeitsende% °C ml/Laufmeter sonnig <input type="checkbox"/> / bewölkt <input type="checkbox"/> / neblig <input type="checkbox"/> / Regen <input type="checkbox"/> Windlage: kein Wind <input type="checkbox"/> / starker Wind <input type="checkbox"/> / stürmisch <input type="checkbox"/> h, min Bemerkungen:
11	Fugenfüllung	
11.1 Datum und Zeit der Ausführung: 11.2 Füllungsverfahren: 11.3 Sauberkeit der Fugen: 11.4 Witterung während der Füllung: 11.5 Temperaturen/rel. Luftfeuchtigkeit: 11.6 Entleerung des Ofens: 11.7 Füllen der Fugenvergussmasse in den Ofen: 11.8 Erhitzung der Fugenvergussmasse: 11.9 Temperatur der Fugenvergussmasse im Ofen (alle 2 Stunden messen): 11.10 11.11 Anzahl Schichten: 11.12 Zeit zwischen 1. und 2. Schicht: 11.13 Witterung während der Trocknung: 11.14 Zeitdauer bis zur Verkehrsfreigabe		Datum: / Arbeitsbeginn: Uhr / Arbeitsende: Uhr mit Giesskübel <input type="checkbox"/> / mit Lanze <input type="checkbox"/> feucht <input type="checkbox"/> / trocken <input type="checkbox"/> / sauber <input type="checkbox"/> / verschmutzt <input type="checkbox"/> sonnig <input type="checkbox"/> / bewölkt <input type="checkbox"/> / neblig <input type="checkbox"/> / Windlage: kein Wind <input type="checkbox"/> / starker Wind <input type="checkbox"/> / stürmisch <input type="checkbox"/> Lufttemperatur: Arbeitsbeginn .....°C / Arbeitsende .....°C Betontemperatur: Arbeitsbeginn .....°C / Arbeitsende .....°C Rel. Luftfeuchtigkeit: Arbeitsbeginn% / Arbeitsende% Kein Material im Ofen <input type="checkbox"/> Material im Ofen <input type="checkbox"/> / Material: / Menge: Datum: / Zeit: Uhr / Anzahl Gebinde: Datum: / Zeit: Uhr / Anzahl Gebinde: Datum: / Zeit: Uhr / Anzahl Gebinde: Beginn: Datum: / Zeit: Uhr Ende: Datum: / Zeit: Uhr Uhr °C Uhr °C Uhr °C Uhr °C Anzahl: / Dicke 1. Schicht: .....mm / Dicke 2. Schicht: .....mm h min / oder min sonnig <input type="checkbox"/> / bewölkt <input type="checkbox"/> / neblig <input type="checkbox"/> / Regen <input type="checkbox"/> Windlage: kein Wind <input type="checkbox"/> / starker Wind <input type="checkbox"/> / stürmisch <input type="checkbox"/> h, min Bemerkungen:

12	Materialentnahme für die Rückstellproben	
12.1	Voranstrich:	Datum: / Zeit: .....Uhr Menge: / Probenbezeichnung:
12.2	Fugenvergussmasse bei Anlieferung:	.....
12.3	Fugenvergussmasse Einbaubeginn:	Datum: / Zeit: .....Uhr Menge: / Probenbezeichnung:
12.4	Fugenvergussmasse Einbauende:	Datum: / Zeit: .....Uhr Menge: / Probenbezeichnung: Datum: / Zeit: .....Uhr Menge: / Probenbezeichnung: Bemerkungen:
13	Protokoll-Erstellung und -Einsicht	
13.1	Erstellung (Auftragnehmer)	Ort/Datum:/..... Stempel: Unterschrift:
13.2	Einsicht (Bauleitung)	Ort/Datum:/..... Stempel: Unterschrift:
		Bemerkungen:

