



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Neue Methoden zur Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln**

**Nouvelles méthodes pour évaluer les propriétés des liants bitumineux à basse température**

**New methods for the assessment of the low temperature properties of bituminous binders**

**Empa Materials Science and Technology  
Dr. Martin Hugener**

**UCLM, Universidad de Castilla-La Mancha  
Dr. Moises Bueno**

**Forschungsprojekt VSS 2006/001 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

**November 2014**

**1493**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Neue Methoden zur Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln**

**Nouvelles méthodes pour évaluer les propriétés des liants bitumineux à basse température**

**New methods for the assessment of the low temperature properties of bituminous binders**

**Empa Materials Science and technology  
Dr. Martin Hugener**

**UCLM, Universidad de Castilla-La Mancha  
Dr. Moises Bueno**

**Forschungsauftrag VSS 2006/001 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

**November 2014**

**1493**

## Impressum

### **Forschungsstelle und Projektteam**

#### **Projektleitung**

Dr. Martin Hugener

#### **Mitglieder**

Dr. Moises Bueno  
Prof. Dr. M. N. Partl  
Christian Meierhofer  
Roland Takacs  
Tatiana Martignoni  
Simon Küntzel

### **Federführende Fachkommission**

Fachkommission 3: Baustoffe

### **Begleitkommission**

#### **Präsident**

Dr. Anders Nättorp

#### **Mitglieder**

Blaise Graf  
Tony Bühler  
Peter Sprecher  
Hans-Peter Beyeler

### **Antragsteller**

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

### **Bezugsquelle**

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>8</b>
<b>Summary</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>10</b>
1.1 Ausgangslage.....	10
1.2 Stand der Forschung.....	10
1.2.1 Forschungsziel .....	13
<b>2 Methodik</b> .....	<b>14</b>
2.1 Verwendete Bindemittel .....	14
2.2 Übersicht über die durchgeführten Prüfungen .....	14
2.2.1 Prüfprogramm .....	14
2.2.2 Europäischer Ringversuch .....	15
2.3 Brechpunkt nach Fraass .....	16
2.4 Fracture Toughness Test .....	16
2.4.1 Prüfeinrichtung .....	16
2.4.2 Prüfmethode.....	18
2.5 DSR-Bruchtemperatur.....	21
2.5.1 Prinzip der CSC-Bruchprüfung.....	21
2.5.2 Versagenskriterium .....	22
<b>3 Diskussion und Resultate</b> .....	<b>26</b>
3.1 Zusammenfassung der Prüfergebnisse .....	26
3.2 Brechpunkt nach Fraass .....	26
3.3 Fracture Toughness Test (FTT) .....	27
3.3.1 Parameteroptimierung.....	27
3.3.2 Auswertung der FTT-Messungen.....	33
3.3.3 Bestimmung der Wiederholbarkeit.....	34
3.3.4 Resultate des Europäischen Ringversuches .....	35
3.3.5 Resultate des Hauptversuches .....	36
3.3.6 Schlussfolgerungen.....	39
3.4 CSC-Bruchversuch .....	40
3.4.1 Parameteroptimierung.....	40
3.4.2 Optimierung der Temperaturparameter .....	40
3.4.3 Einfluss der Dehnamplitude .....	42
3.4.4 Einfluss der Frequenz .....	43
3.4.5 Drehmomentbegrenzung .....	44
3.4.6 Erweiterung des Anwendungsbereiches durch Interpolation.....	45
3.4.7 Präzision.....	46
3.4.8 Festlegung der Prüfparameter .....	47
3.4.9 Kriterien für ungültige Messung .....	48
3.4.10 Resultate des Hauptversuches .....	48
3.4.11 Schlussfolgerungen.....	50
<b>4 Schlussfolgerungen</b> .....	<b>52</b>
<b>Anhänge</b> .....	<b>54</b>
<b>Glossar</b> .....	<b>57</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>59</b>
<b>Projektabschluss</b> .....	<b>63</b>
<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen</b> .....	<b>66</b>



## Zusammenfassung

In dieser Forschungsarbeit wurden zwei neue Methoden für die Charakterisierung der Tieftemperatureigenschaften von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln untersucht und weiterentwickelt. Die erste Prüfmethode, der Drei-Punkt-Biegeversuch an einem gekerbten Probekörper (engl. Fracture Toughness Test) gemäss Technischer Spezifikation CEN/TS 15963, ergab nach der Verbesserung der Prüfkörperherstellung konsistente Resultate. Neben der Untersuchung eines möglichst breiten Spektrums an Bitumensorten wurde auch überprüft, ob das Alterungsverhalten adäquat erfasst werden kann. Die Laboralterung mittels RTFOT und PAV ergab für alle Bindemittel eine Erhöhung der Bruchtemperatur, was mit einer Versprödung des Bindemittels erklärt werden kann. Zudem konnte ein deutlicher Unterschied zwischen polymermodifizierten und nicht modifizierten Bindemitteln ähnlicher Viskosität nachgewiesen werden, was mittels Bending Beam Rheometer nicht immer der Fall ist. Ein Ringversuch, an dem im Rahmen dieses Projektes teilgenommen wurde, ergab aber noch ungenügende Vergleichspräzisionen, die in der Grössenordnung der Prüfung Brechpunkt nach Fraass lagen. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass keine einheitlichen Prüfgeräte verwendet wurden, da keine solchen kommerziell erhältlich sind. So wird die Prüfung je nach Prüfgerät in Luft oder in unterschiedlichen Kühlflüssigkeiten durchgeführt. Daraus ist zu schliessen, dass die Verwendung eines einheitlichen Prüfgerätes unabdingbar für eine Verbesserung der Vergleichspräzision zwischen den Prüflaboratorien ist.

Der CSC-Bruchversuch (Cyclic Shear Cooling Failure Test) wurde an der Empa neu entwickelt und wird mit einem kommerziell erhältlichen Scherrheometer (DSR) durchgeführt. Die Wiederholpräzision ist in den meisten Fällen sehr gut, eine Vergleichspräzision ist aber noch nicht vorhanden. Die CSC-Bruchpunkte der polymermodifizierten Bindemittel im Anlieferungszustand liegen deutlich tiefer als jene der nicht modifizierten Bitumen und zeigen damit deutlich den Einfluss der Polymermodifikation auf das Bindemittel auf. Nach der Alterung (RTFOT/PAV) hingegen sind diese Unterschiede teilweise verschwunden. Insbesondere das Alterungsverhalten von nicht modifizierten Bitumen, die nach der PAV-Alterung tiefere CSC-Bruchpunkte aufweisen, kann nicht erklärt werden. Die Resultate sind stark von den gewählten Prüfparametern wie Frequenz, Dehnamplitude und Starttemperatur abhängig. Es war allerdings nicht möglich, alle Bindemittelsorten mit den gleichen Parametern zu messen. Für die Normierung des CSC-Bruchversuches sind daher weitere Verbesserungen und Abklärungen notwendig.

Abschliessend ist festzuhalten, dass die beiden untersuchten Prüfmethoden noch nicht reif sind, um die bestehende Prüfmethode Brechpunkt nach Fraass zu ersetzen, obwohl das verbesserte Tieftemperaturverhalten von polymermodifizierten Bindemitteln im Anlieferungszustand besser reflektiert wird als beim Brechpunkt nach Fraass. Entweder ist die Vergleichspräzision noch ungenügend oder die Prüfbedingungen müssen noch verbessert werden.

## Résumé

Ce travail de recherche était consacré à l'évaluation et au perfectionnement de deux nouvelles méthodes de caractérisation des propriétés à basse température des bitumes et des liants bitumineux. La première de ces méthodes, l'essai de flexion trois points sur un barreau entaillé (en anglais Fracture Toughness Test) selon la spécification technique CEN/TS 15963 a fourni des résultats cohérents après amélioration de la confection des éprouvettes. À côté de l'essai d'une gamme aussi large que possible de sortes de bitume, on a aussi vérifié si cet essai permettait de déterminer le comportement au vieillissement. Le vieillissement en laboratoire avec des essais RTFOT et PAV a conduit pour tous les liants à une élévation de la température de rupture, ce qui peut s'expliquer par une fragilisation du liant. De plus, on a pu mettre en évidence une nette différence entre les liants modifiés et les liants non modifiés aux polymères de viscosité semblable, ce qui n'est pas toujours le cas avec le rhéomètre à flexion de barreau. Des essais interlaboratoires auxquels on a participé dans le cadre de ce projet ont mis en évidence une reproductibilité encore insuffisante qui est de l'ordre de grandeur de celle de l'essai du point de fragilité Fraass. Ceci est dû principalement au fait que l'on a pas utilisé d'appareils d'essai identiques, ceux-ci n'étant pas encore commercialisés. C'est ainsi que suivant l'appareil, l'essai est effectué dans l'air ou dans des différents liquides réfrigérants. L'utilisation d'un appareil d'essai uniformisé est donc une condition indispensable pour l'amélioration de la reproductibilité entre les laboratoires d'essai.

L'essai de rupture CSC (Cyclic Shear Cooling Failure Test) développé par l'Empa s'effectue avec un rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) en vente dans le commerce. La répétabilité est dans la majeure partie des cas très bonne mais on ne dispose pas encore de valeurs de sa reproductibilité. Le point de fragilité CSC des liants bitumineux modifiés aux polymères à l'état de livraison est nettement plus bas que celui des bitumes non modifiés ce qui met en évidence l'influence de la modification apportée au bitume par les polymères. Par contre après vieillissement (RTFOT/PAV), ces différences disparaissent en partie. En particulier le comportement au vieillissement des bitumes non modifiés, qui présentent un point de fragilité CSC plus bas après vieillissement PAV n'est pas explicable. Les résultats dépendent fortement des paramètres choisis tels que la fréquence, l'amplitude de l'allongement et la température initiale. Il n'a toutefois pas été possible de procéder à la mesure de toutes les sortes de bitume avec les mêmes paramètres. Il est ainsi nécessaire de procéder à des améliorations et à des éclaircissements supplémentaires pour parvenir à une normalisation de l'essai de rupture CSC.

Pour conclure, il faut relever que, bien qu'elles reflètent mieux que le point de fragilité Fraass le meilleur comportement en température des liants bitumineux modifiés aux polymères à l'état de livraison, les deux méthodes d'essai examinées n'ont pas atteint un degré de maturité qui leur permette de remplacer le point de fragilité Fraass. Cela parce que pour l'une la reproductibilité est encore insuffisante alors que pour l'autre les conditions d'essai doivent encore être améliorées.



## Summary

This research work focused on studying and further developing two new methods for the characterisation of the low temperature properties of bitumen and bituminous binders. The first test method, a three-point bending test on a notched specimen pursuant to Technical Specification CEN/TS 15963, provided consistent results after improvements had been made to the production of the test specimens. In addition to investigating the broadest possible range of types of bitumen, it was also checked whether ageing behaviour could be identified. The laboratory-induced ageing using RTFOT and PAV resulted in an increase in the fracture temperature of all the binders, which can be explained by an embrittlement of the binder. Furthermore, a significant difference between polymer-modified and unmodified binders of similar viscosity was detected, which is not always the case with the bending beam rheometer. A collaborative study that was participated in as part of this project showed that reproducibility was still inadequate, and had approximately the same magnitude as with the Fraass breaking point test. This was mainly due to the fact that uniform test instruments were not used, as such instruments are not yet commercially available. The tests were performed in air or in different coolants depending on the respective test instrument. As a result of this, it can be concluded that the use of a uniform test instrument is essential in order to improve the reproducibility between laboratories.

The cyclic shear cooling (CSC) failure test has been redeveloped at Empa and is performed with a commercially available shear rheometer (DSR). The repeatability is very good in most cases, but as yet there is no reproducibility. The CSC fracture points of the polymer-modified binders in original state were significantly lower than those of the unmodified bitumen and thus clearly demonstrate the influence of polymer modification on the binder. After ageing (RTFOT/PAV), however, these differences disappeared to some extent. In particular, the ageing behaviour of unmodified bitumen, which had lower CSC fracture points after PAV ageing, cannot be explained. The results are highly dependent on the test parameters selected, such as frequency, stretch amplitude and starting temperature. However, it was not possible to measure all the binder types using the same parameters. Further improvements and clarifications are therefore necessary for the standardisation of the CSC failure test.

In conclusion, it can be noted that the two test methods that were investigated are not yet ready to replace the existing Fraass breaking point test method, although the improved low-temperature behaviour of polymer-modified binders in the condition in which they are delivered is better reflected than with the Fraass breaking point. Either the reproducibility is still inadequate or the test conditions need to be improved.

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Das Schweizer Klima ist geprägt durch ein breites Temperaturspektrum, welches hohe Anforderungen an die richtige Wahl bitumenhaltiger Bindemittel im Strassenbau stellt. Diese müssen den heutigen wie auch den künftigen Beanspruchungen sowohl im Sommer als auch im Winter vollumfänglich genügen. Die globale Erwärmung darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass sporadisch, wie im Jahre 2008/2009, immer wieder extrem harte Winter mit tiefen Temperaturen auftreten können, wodurch die Strassen verspröden und thermisch induzierte Risse erleiden können [1]. Die Rissanfälligkeit wird erhöht durch die zahlreichen kleinen Fehlstellen aufgrund der inhomogenen Struktur des Strassenbelages, die sich durch die Einwirkungen von Klima und Verkehrsbelastung akkumulieren. Bei diesen Defekten konzentrieren sich die thermisch induzierten Kräfte und sind Auslöser für die makroskopische Rissbildung, wenn die Zugfestigkeit des Asphaltens überschritten wird [2]. Dabei weist oft das Bitumen die niedrigste Zugfestigkeit auf, was durch die erfolgte Beobachtung der Rissfortsetzung im Bitumen in der Nähe des Mineralstoffkorns geschlossen werden kann [3]. Kühlt der Belag ab, verändern sich das Bindemittel von einem viskoelastisch, duktilem zu einem elastisch, spröden Material. In der Anfangsphase vermag das Bindemittel die Kräfte, die durch thermische Kontraktion entstehen, über viskoses Fließen abzubauen. Dies wird mit sinkenden Temperaturen zunehmend schwieriger, wobei die Kälteeigenschaften eine Funktion der chemischen Zusammensetzung des Bitumens ist. Es ist nicht möglich Bitumen eindeutig zu charakterisieren, weshalb oft eine semi-quantitative Aufteilung in die vier Fraktionen gesättigte und aromatische Kohlenwasserstoffe, Harze und Asphaltene erfolgt. Asphaltene und Harze, die aus grossen Molekülen bestehen, sind hauptsächlich für das elastische Verhalten verantwortlich, während die kleineren Moleküle mit niedrigerem Molekulargewicht, die gesättigten und aromatischen Kohlenwasserstoffe, das viskose Verhalten des Bitumens bestimmen. Weitere Stoffe wie beispielsweise Polymere beeinflussen das Tieftemperaturverhalten von Bindemitteln zusätzlich [4].

Aufgrund der klimatischen Verhältnisse liegt eine aussagekräftige Prüfung für die Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften sehr im Interesse der Schweiz. Die bisher übliche Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln ist häufig unzutreffend und führt daher immer wieder zu kostspieligen Fehlentscheidungen und Schäden. Die normierte Prüfung "Breachpunkt nach Fraass" weist eine schlechte Reproduzierbarkeit auf, weshalb schon seit längerer Zeit nach einer Alternative gesucht wird [53]. Das vor einigen Jahren als Ersatz vorgeschlagene Biegebalken-Rheometer (BBR) hat die Erwartungen nur teilweise erfüllt, da es sich um eine Kriechprüfung handelt, die zu keiner Rissbildung führt und somit nicht die selben Eigenschaften testet [9]. Bei tiefen Temperaturen treten aber vor allem Risse als Schäden auf, weshalb diese besser mit einer Bruchprüfung simuliert werden sollten. Mögliche Alternativmethoden sollen in diesem Forschungsprojekt gesucht werden.

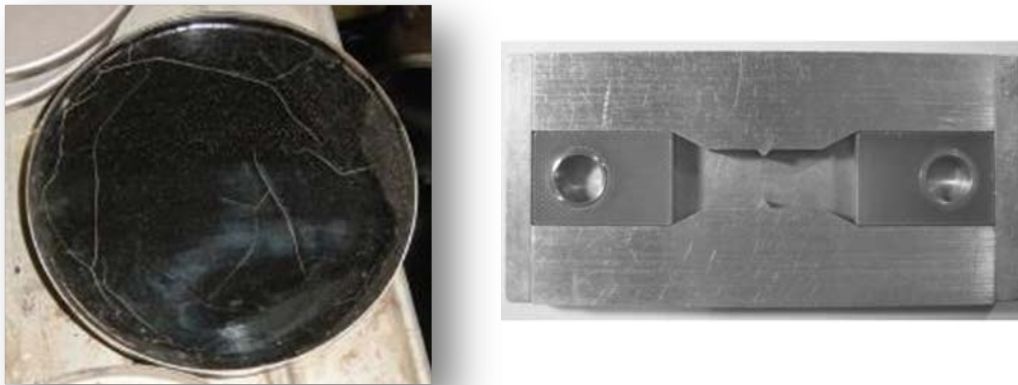
## 1.2 Stand der Forschung

Die Bestimmung der Tieftemperatureigenschaften von Bitumen inklusive polymermodifizierten Bitumen (PmB) führt regelmässig zu hitzigen Diskussionen, denn die normierte Prüfung "Breachpunkt nach Fraass", die seit vielen Jahren für die Bestimmung der Tieftemperatureigenschaften von Bitumen verwendet wird, weist gravierende Mängel auf [5]. Die Wiederholbarkeit innerhalb eines Labors ist genügend, die Reproduzierbarkeit zwischen verschiedenen Laboratorien jedoch ungenügend, insbesondere für PmB [6]. Dies weist auf eine ungenügend definierte Prüfmethode hin, wodurch Abweichungen in der Durchführung oder des Prüfmittels zu den grösseren Abweichungen führen. Modifikationen an der Prüfnorm haben bisher nicht zur gewünschten Verbesserung geführt, wurden

jedoch auch nicht forciert, da keine entsprechenden Mittel für solche Arbeiten vorhanden sind. Deshalb wird seit längerer Zeit auch nach einer alternativen Prüfung für die Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln gesucht [7].

Im amerikanischen Forschungsprojekt SHRP wurde die Prüfung "Biegesteifigkeit mit dem Biegebalken-Rheometer" (BBR) entwickelt, die seit 2005 auch in Europa normiert ist [8, 9]. Das Prinzip der Prüfmethode ist jedoch vollkommen unterschiedlich. Während der Brechpunkt nach Fraass eine Bruchprüfung darstellt, ist die Biegesteifigkeit eine typische Kriechprüfung. Bei tiefen Temperaturen treten aber vor allem Risse als Schäden auf. Deshalb erscheint es besser anstelle einer Kriech- eine Bruchprüfung zur Simulation der Beanspruchung zu verwenden. Die Resultate der Biegesteifigkeit weisen wohl eine bessere Reproduzierbarkeit auf, die Korrelation mit Tieftemperaturschäden ist aber vor allem bei PmB ungenügend und für wachsmodifizierte Bitumen noch nicht bekannt [6].

Alternative Prüfmethode, die die Bindemittleigenschaften im Asphalt bei tiefen Temperaturen besser simulieren können wurden von verschiedenen Forschungsgruppen vorgeschlagen. Aber die vorgestellten Testmethoden wie der Moryoshi breaking test [10], der „Compact Tension test“ (CT) [11] oder der „Double Edge-Notched Tension test“ (DENT) [12, 13] konnten sich bisher nicht durchsetzen, da sie entweder zu wenig selektiv waren oder andere Anforderungen nicht erfüllten (Abb. 1).



**Abb. 1** Moryoshi breaking test (links) und Double Edge-Notched Tension test (Gussform)

Da die Rissbildung auch von der Mikrostruktur des Bindemittels abhängen, können die linear-viskoelastischen Eigenschaften nicht in allen Fällen zwischen reinen und modifizierten Bitumen unterscheiden [44]. Deshalb ist es notwendig, die Prinzipien der Bruchmechanik anzuwenden, um das Phänomen der Rissbildung bei verschiedenen Bindemittelarten verstehen zu können [48]. Aus der Theorie der Bruchmechanik geht hervor, dass vorhandene Risse das Spannungsfeld im Material stark verändert und dadurch lokale Schwachstellen entstehen [14, 15, 16]. Die Bruchzähigkeit oder auch Risszähigkeit ist eine Eigenschaft, welche den Widerstand eines Materials mit einem Riss gegen den Rissfortschritt beschreibt. Sie liefert ein Mass für den Versagenswiderstand von Materialien und ist unabhängig von der Prüfkörpergeometrie und -grösse. Die Bruchzähigkeit wird deshalb für die Erstprüfung und Qualitätskontrolle bei Kunststoffen, Keramik und Metallen schon seit längerem eingesetzt [17, 18]. Für bitumenhaltige Bindemittel ist diese Methode relativ neu und kann nur bei tiefen Temperaturen angewendet werden [43, 45]. Zudem musste die Methode bezüglich Prüfkörperherstellung adaptiert werden [19]. Insbesondere zeigte sich, dass sich die Bruchzähigkeit nicht als charakteristische Grösse eignet, da sie nur im spröden Bereich möglich ist, da sonst anstelle eines Bruches eine plastische Verformung erhalten wird. Ausserdem ist die Berechnung nur gültig, wenn die Prüfung im linear elastischen Bereich durchgeführt wird, was für Bitumen bei tiefen Tempera-

turen nicht immer der Fall ist. Der Temperaturbereich in der ein Bitumen spröde ist hängt aber von seiner Viskosität ab. Deshalb wurde entschieden die Bruchzähigkeitstemperatur kurz Bruchtemperatur  $T_{FTT}$  (Fracture toughness temperature) als charakteristischen Wert zu verwenden, der den Übergang zwischen duktilem und sprödem Verhalten beschreibt. Nach Analysen von Prüfergebnissen wurde dieser Übergang respektive die kritische Verformung bei 0.3 mm festgelegt [20]

Erste Versuche in Kanada zeigten eine schlechte Reproduzierbarkeit zwischen verschiedenen Laboratorien, die auf eine zu ungenaue Beschreibung der Prüfmethode zurückzuführen war [2, 3]. Vor einigen Jahren hat eine Task Group des CEN TC 336 sich der Methode angenommen und verschiedene Verbesserungen vorgeschlagen. In dieser Forschungsarbeit wurden deshalb einige dieser Vorschläge untersucht und zusätzlich einige neue Ideen evaluiert. Insbesondere wurde die Aussagekraft auf im Labor gealterte Bindemittel erweitert. Einige der Resultate sind schon in die überarbeitete Version 2010 der Technischen Spezifikation CEN/TS 15963:2010 eingeflossen [21].

In den letzten Jahren hat sich das DSR zusehends als wertvolles Prüfmittel für die Charakterisierung der rheologischen Eigenschaften von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln profiliert und verschiedene neue Prüfmethode wurden mit diesem Gerät entwickelt [zsv1-4, bc16, msc1-2]. Einige davon, wie beispielsweise die Zero Shear Viscosity, wurden inzwischen schon als Technische Spezifikation ins europäische Normenwerk eingegliedert [ZVV, EVT, MSC]. Mit der zunehmenden Zahl an möglichen Prüfmethode rechtfertigen sich auch die relativ hohen Anschaffungskosten des Prüfgerätes. Während bisher vor allem Methoden für die Beschreibung der Bitumeneigenschaften bei mittleren und hohen Temperaturen entwickelt wurden, lässt die neue Generation von DSR-Geräten Prüfungen bis  $-30^{\circ}$  zu. Dies ist insbesondere für die Charakterisierung von PmB interessant, die auch bei tiefen Temperaturen noch spezielle elastische Eigenschaften aufweisen.

Es ist bekannt und allgemein anerkannt, dass bitumenhaltige Bindemittel unter wiederholter Scherbeanspruchung im DSR ermüden und schliesslich versagen [22, 50-52]. Mit dem Platte-Platte-System wurden nicht nur Ermüdungsversuche an Bitumen durchgeführt, sondern auch Messungen des komplexen Moduls bei Temperaturen unterhalb  $0^{\circ}\text{C}$  [22-28]. Bei tiefen Temperaturen weist Bitumen eine hohe Steifigkeit auf, so dass unter dynamischer Scherbelastung genügend Widerstand vorhanden ist, um viskose Verformungen zu verhindern, wodurch die aufgebaute Spannung nur durch die Bildung von Mikrorissen abgebaut werden kann. Um ein vorzeitiges Versagen der Probe bei tiefen Temperaturen zu verhindern, wurden für dynamisch-mechanische Analysen verschiedene Geometrien vorgeschlagen, wodurch der Temperaturbereich von Modulbestimmungen auch auf tiefe Temperaturen ausgedehnt werden konnte [29, 30].

Basierend auf diesen Vorarbeiten wurde eine neue Prüfmethode entwickelt, um eine Alternative zum Brechpunkt nach Fraass vorzuschlagen. Die Prüfung Brechpunkt nach Fraass ist in gewissem Sinne auch eine Ermüdungsprüfung (wiederholtes Biegen des bitumenbeschichteten Plättchens), deshalb könnte dies analog durch einen Ermüdungsversuch mit dem DSR ersetzt werden, indem eine Probe bei sinkenden Temperaturen dynamisch belastet wird, bis ein Bruch auftritt. Deshalb wird dieser sogenannte CSC-Bruchversuch (englisch Cyclic Shear Cooling Failure Test, CSC-failure test) bei konstanter Dehnamplitude, Frequenz und Kühlrate durchgeführt. Bei einer charakteristischen Temperatur versagt der Prüfkörper durch die wiederholte Scherbelastung. Eine Temperaturrampe ist notwendig, da ein Ermüdungsbruch nur im spröden Bereich erfolgt. Der CSC-Bruchpunkt, das heisst die Temperatur bei welcher der Bruch stattfindet, könnte unter Umständen die Tieftemperatureigenschaften von Bitumen und PmB besser beschreiben. Verschiedene Parameter wie Frequenz, Verformungsamplitude und Temperaturgradient mussten aber ausgetestet und optimiert werden. Im direkten Vergleich zum Fracture Toughness Test sowie zur bisherigen Normprüfung „Brechpunkt nach Fraass“ werden so erste wertvolle Erfahrungen im direkten Vergleich mit gleichen Bindemitteln im Anlieferungszustand und nach Alterung gesammelt.

### 1.2.1 Forschungsziel

Das Forschungsprojekt hat zum Ziel zu prüfen, ob die bisher übliche, für moderne polymermodifizierte Bitumen (PmB) aber schlecht geeignete technologische Prüfung „Brechpunkt nach Fraass“, durch eine neue leistungsorientierte Prüfung ersetzt werden kann, um eine zuverlässigere, aussagekräftigere und universellere Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von Bitumen und polymermodifizierten Bitumen zu ermöglichen. Zwei Prüfverfahren wurden dazu ausgewählt, der Fracture Temperature Test, der noch optimiert werden kann, und eine vollständig neue Prüfung, der CSC-Brechpunkt. Dazu werden verschiedene in der Schweiz verwendete bitumenhaltige Bindemittel getestet und mit den Resultaten Brechpunkt nach Fraass verglichen. Obwohl keine direkte Korrelation erwartet wird, macht dies doch Sinn um vorhandene Erfahrungswerte interpretieren zu können. Insbesondere sollen auch Bindemittel nach einer Alterung mittels RTFOT- und PAV geprüft werden, um zu sehen, ob die thermische Alterung mit diesen Prüfmethode beobachtet und zutreffend beurteilt werden kann [41, 42].

Im Rahmen dieses Projektes ist auch vorgesehen, am europäischen Ringversuch zur FTT-Prüfung teilzunehmen. Ziel ist somit eine neue Prüfmethode für bitumenhaltige Bindemittel (PmB, nicht modifizierte und wachsmofifizierte Bitumen):

- mit erweiterter Anwendbarkeit
- welche massgebende grundlegende mechanisch-physikalische Kennwerte basierend auf einer Bruchprüfung liefert
- und insbesondere eine höhere Vergleichspräzision aufweist.

## 2 Methodik

### 2.1 Verwendete Bindemittel

Bei der Auswahl der Bindemittel sollte darauf geachtet werden, möglichst das ganze Spektrum abzudecken. Deshalb wurden drei nicht modifizierte Bitumen von sehr hart bis sehr weich gewählt sowie drei unterschiedliche PmB (Tab. 1). Ein klassisches PmB 50/70-53 vom Typ C im mittleren Penetrationsbereich sowie je ein hartes PmB 25/55-65 und ein weiches PmB 90/150-60 der Klasse E. Das harte PmB enthielt zudem noch Wachs zur Viskositätsreduktion. Mit diesen sechs Bindemitteln konnte ein grosser Bereich der Bindemitteltypen abgedeckt werden. Im Forschungsantrag war ursprünglich die Untersuchung von neun Bindemitteln geplant. Im Laufe der Forschung hat sich jedoch herausgestellt, dass die Parameterstudie mehr Aufwand benötigte als vorgesehen war. Deshalb wurde gemeinsam mit der Begleitkommission beschlossen, die Anzahl der Bindemittel auf sechs zu reduzieren, zu Gunsten einer breiteren Parameterstudie.

**Tab. 1** Liste der verwendeten Bindemittel

Bezeichnung nach EN	Empa-Code	Bemerkung
Bitumen 10/20	<b>F9</b>	hartes Strassenbaubitumen
Bitumen 35/50	<b>F1</b>	
Bitumen 160/220	<b>F3</b>	weiches Strassenbaubitumen
PmB 50/70-53 (CH-C)	<b>F4</b>	
PmB 25/55-65 (CH-E)	<b>F6</b>	höher modifiziert mit Wachszusatz
PmB 90/150-60 (CH-E)	<b>F15</b>	höher modifiziert

### 2.2 Übersicht über die durchgeführten Prüfungen

#### 2.2.1 Prüfprogramm

Das nachfolgende Prüfprogramm wurde mit der verantwortlichen Begleitkommission erstellt (Tab. 2).

**Tab. 2** Prüfprogramm

Anzahl Bindemittel	Anlieferungs- zustand	nach Alterung RTFOT	innach Alterung im PAV	europäischer Ringversuch
Brechpunkt nach Fraass [5]	6	6	6	
Fracture Toughness Test [21]	6	6	6	3
CSC-Bruchpunkt	6	6	6	
Penetration [46]	6			
Erweichungspunkt ERK [47]	6			
RTFOT-Alterung [41]	6			
PAV-Alterung [42]	6			

Ursprünglich waren 9 verschiedene Bindemittel für das Prüfprogramm vorgesehen, es wurde jedoch festgestellt, dass es notwendig ist einen Teil der Ressourcen in die Parameteroptimierung des Fracture Toughness Tests zu investieren. Deshalb wurde die Anzahl der zu prüfenden Bindemittel von 9 auf 6 reduziert.

Die BK hat vorgeschlagen die folgenden Parameter genauer zu analysieren:

- Giesstemperatur
- Zeitdauer im Kühlbad bei der Prüftemperatur
- Abkühldauer nach dem Giessen
- Zeit zwischen giessen und prüfen
- Ausform-Technik
- Überfüllhöhe
- Trennmaterial für die Kerbe (Teflon oder Stahl)
- Kühlflüssigkeit (Ethanol oder Glykol-Wasser)

Die Resultate dieser Parameterstudie werden in Kapitel 3.3.1 diskutiert.

## 2.2.2 Europäischer Ringversuch

Bei diesem europäischen Ringversuch haben insgesamt 7 Prüfinstitute aus 5 Ländern teilgenommen [20]. Die geringe Zahl begründet sich auf der nicht normierten Prüfeinrichtung, die nicht kommerziell erhältlich ist und von jedem Prüfinstitut selbst entwickelt wurde. Dementsprechend unterschiedlich sind auch die Ausführungen, die sich hauptsächlich in der Grösse der Kraftzelle und der Kühlung unterschieden. Neben luftgekühlten Prüfkammern wurden Kühlbäder mit verschiedenen Kühlmitteln verwendet (Methanol, Äthanol, Äthylenglykol, Kaliumacetatlösung). Der Einfluss dieser Unterschiede konnte nicht erfasst werden.

Drei unterschiedliche Bindemittel, darunter ein PmB, wurden verwendet, die durch Nynas (Schweden) zur Verfügung gestellt wurden (Tab. 3). Die PmB wurden bei Nynas hergestellt mit dem Bitumen 70/100 (PB2) als Basis und linearem SBS als Polymer. PmB-3 wurde nicht von allen Teilnehmern untersucht, auch von der Empa nicht.

**Tab. 3** Liste der Bindemittel des Ringversuches mit ihren Eigenschaften

Bezeichnung	PB1	PB2	PMB-5
Beschreibung	Bitumen 50/70	Bitumen 70/100	Bitumen 70/100 mit 5% lin. SBS
Penetration [0.1 mm]	56	85	54
ERK [°C]	49.2	45.4	89.0
Fraass Br.pt. [°C]	-15	-17	-16
BBR, LST* [°C]	-15.8	-19.3	-22.2
BBR, LmT** [°C]	-19.7	-22.0	-19.5

\* Temperatur bei der die Steifigkeit S 300 MPa beträgt

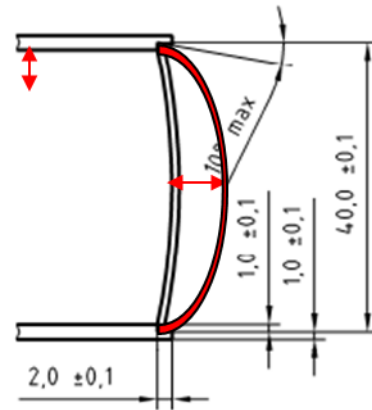
\*\* Temperatur bei der ein Wert von  $m = 0.3$  erhalten wird

## 2.3 Brechpunkt nach Fraass

Die Bestimmung des Brechpunktes nach Fraass wurde gemäss EN 12593:2007 [5] mit einem manuellen Prüfgerät durchgeführt. Die Abkühlung erfolgte durch die Zugabe von Trockeneis mit einer vorgegebenen Kühlrate von  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Die Starttemperatur für die Kühlung ist vom Bindemittel respektive vom zu erwartenden Brechpunkt abhängig. Das Prüfblech mit der zu prüfenden Bitumenschicht wurde einmal pro Minute mit vorgegebener Geschwindigkeit mit einer Handkurbel gebeugt (Abb. 2, Abb. 3). Die Erfassung des Risses erfolgte visuell/akustisch. Die Auswertung der zwei bis vier Einzelresultate gemäss dem in der Norm beschriebenen Verfahren durchgeführt.



**Abb. 2** Biegung des beschichteten Prüfblechs



**Abb. 3** Schematische Darstellung der Biegevorrichtung

## 2.4 Fracture Toughness Test

Die Normierung von Prüfmethoden für die Charakterisierung der Tieftemperatureigenschaften wird in der Arbeitsgruppe CEN TC 226 WG1 TG2 der europäischen Normierungsorganisation CEN bearbeitet. Hier werden auch neue Forschungsergebnisse aus der ganzen Welt diskutiert und Vorschläge für neue verbesserte Prüfmethoden erarbeitet. Basierend auf Forschungsarbeiten in Kanada [3] wurde deshalb die Prüfung „Fracture Toughness Test“ näher geprüft und weiterentwickelt, so dass sie im Jahr 2010 als Technische Spezifikation [21] publiziert werden konnte. Diese Prüfung wurde ursprünglich für Metalle und Kunststoffe entwickelt (Static Fracture Toughness Test SFTT) und nun für Bitumen adaptiert.

### 2.4.1 Prüfeinrichtung

Als Prüfmaschine diente eine modifizierte alte Spindelmaschine (Instron 1122, GB) (Abb. 4). Die ursprüngliche Steuerung diente allein zur Einhaltung der konstanten Geschwindigkeit von  $0.01 \text{ mm/s}$ , während für die Datenerfassung ein Spider 8 System mit Catman® software (HBM, D) eingesetzt wurde. Die Kraftmessung erfolgte mit einer  $0.5 \text{ kN}$  Kraftmessdose (MTS, Schweiz), die Bestimmung der Verformung mit einem induktiven Wegaufnehmer (HBM, D). Die erhaltenen Rohdaten wurden in einer EXCEL-Datei ausgewertet und graphisch dargestellt.

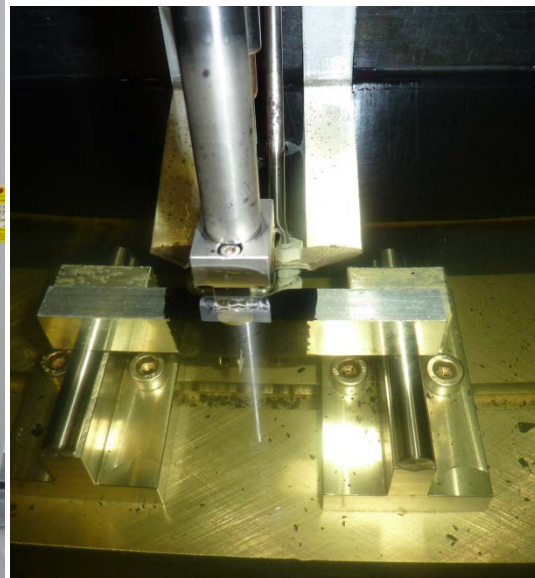




**Abb. 4** Prüfmaschine (rechts) mit altem Steuerschrank und neuer Messsoftware (Laptop)



**Abb. 5** Spindelmaschine mit Kühlbad

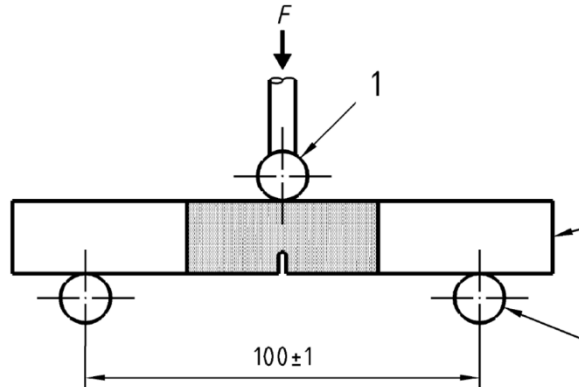


**Abb. 6** Prüfkörper im Kühlbad während der Prüfung

Das Kühlbad wurde aus 2 cm dicken Polypropylenplatten zusammengefügt und abgedichtet (Abb. 5). Als Kühlmittel wurde 99%-iger Alkohol verwendet (Äthanol) verwendet (Abb. 6). Dieser ist wegen der Brandgefahr nicht in allen Ländern erlaubt. Alternativ ist die Prüfung in einer gekühlten Luftkammer oder in einer wässrigen Natriumacetat-Lösung möglich. Diese Lösung ist aber hochkorrosiv und alle Teile der Prüfeinrichtung müssen aus rostfreiem Stahl oder Kunststoff bestehen.

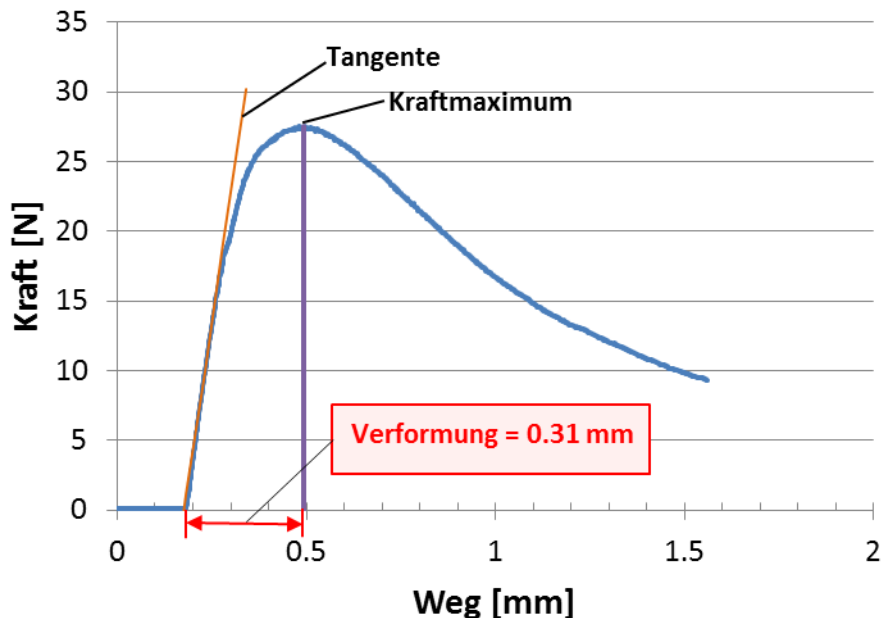
## 2.4.2 Prüfmethode

Die Prüfung Fracture Toughness Test (FTT), in Deutsch Bestimmung der Bruchwiderstandstemperatur, wurde ursprünglich für Kunststoffmaterialien entwickelt und vor einigen Jahren [31] für Bitumen und Polymerbitumen angepasst. Inzwischen wurde sie als Technische Spezifikation TS 15963 ins europäische Normenwerk integriert [21].



**Abb. 7** Prinzip der Prüfung

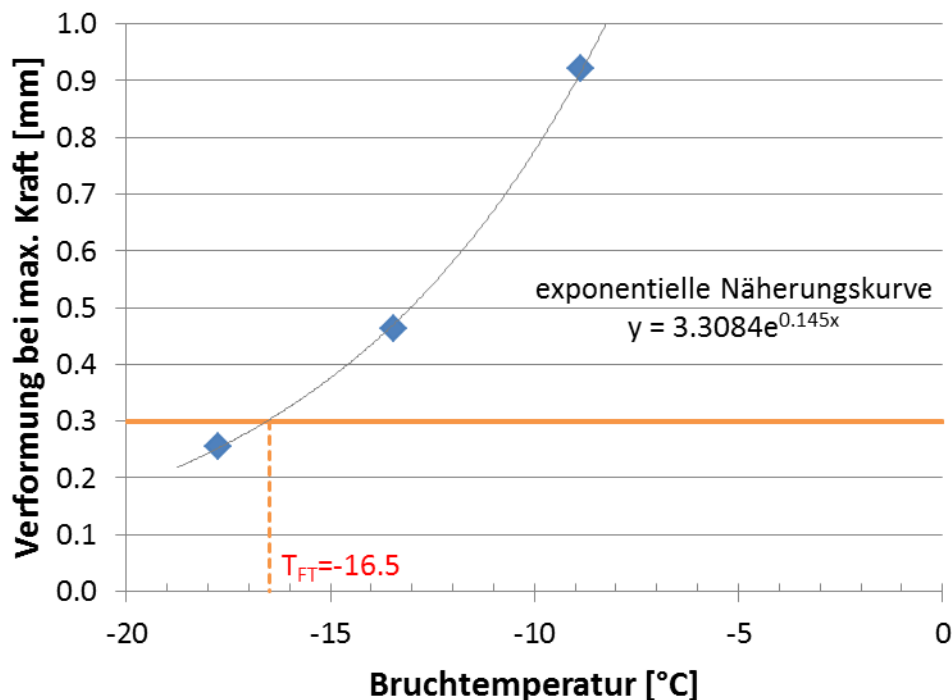
Das Prinzip ist einfach: Ein gekerbter balkenförmiger Prüfkörper wird mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0.01 mm/s mit einer maximalen Abweichung von  $\pm 10\%$  belastet bis er bricht (Abb. 7). Während der Prüfung werden Verformung  $D$  und Kraft  $F$  aufgezeichnet. Die Verformung bei maximaler Kraft wird aus der Differenz zwischen Weg bei maximaler Kraft und dem Schnittpunkt der Tangente an die Kraft-Weg-Kurve, mit der x-Achse bestimmt (Abb. 8).



**Abb. 8** Bestimmung der Verformung bei maximaler Kraft im Kraft-Weg-Diagramm

Es werden jeweils mindestens drei Prüfkörper bei mindestens zwei (in der Regel drei)

verschiedenen Temperaturen geprüft, die so gewählt werden, dass der Bruch bei einer Verformung zwischen 0.1 und 1 mm auftritt. Ausserdem müssen die Prüftemperaturen so gewählt werden, dass mindestens eine Verformung kleiner und eine andere grösser als 0.3 mm resultiert [48]. Es werden Temperaturschritte von maximal 5°C empfohlen. Aus den mindestens drei Einzelwerten einer Prüftemperatur wird der Mittelwert der Verformung berechnet und in Millimeter (mm) auf zwei Stellen angegeben. Die Mittelwerte werden in einem Verformungs-Temperatur-Diagramm aufgezeichnet und durch eine exponentielle Näherungskurve kann die massgebende Bruchwiderstandstemperatur, kurz Bruchtemperatur  $T_{FT}$  berechnet werden, die definiert ist als Bruchtemperatur bei einer Verformung von 0.3 mm (Abb. 9). Sie wird in Grad Celsius und auf die nächste ganze Zahl gerundet angegeben. Bei nur zwei Prüftemperaturen wird eine lineare Interpolation durchgeführt, vorausgesetzt die Differenz der beiden Prüftemperaturen ist kleiner als 5°C. Es können auch noch weitere Eigenschaften aus der Kraft-Verformungskurve abgeleitet werden wie beispielsweise die Anfangssteifigkeit (= Steigung der Tangente) oder die erforderliche Arbeit (Fläche unter der Kurve bis zur Maximalkraft).

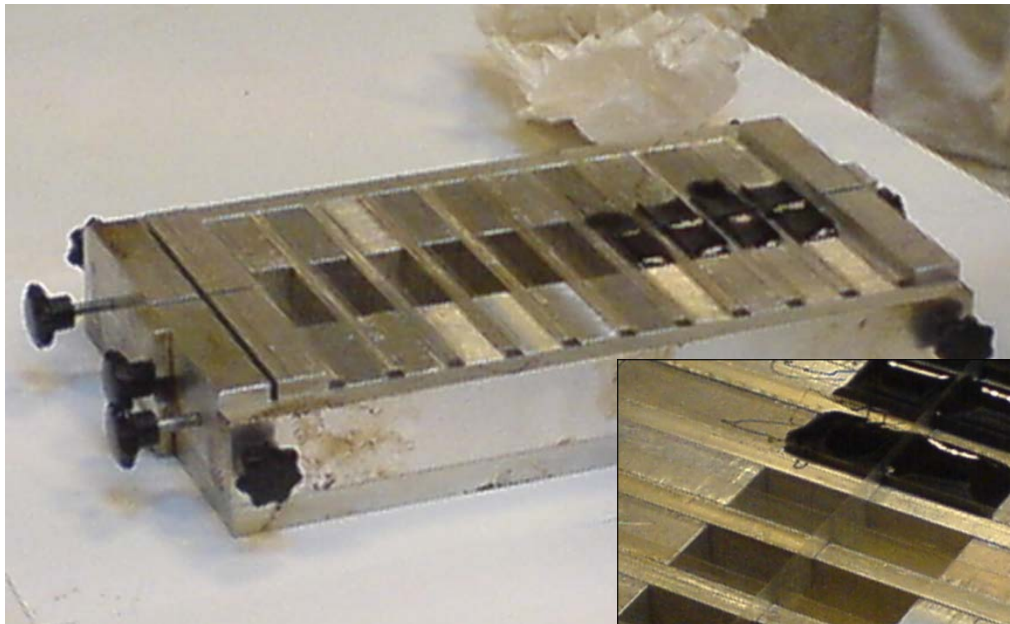


**Abb. 9** Bestimmung der Bruchtemperatur  $T_{FT}$

Die Prüfkörperherstellung ist etwas aufwändig, insbesondere die korrekte Herstellung der Kerbe als Initiator für die Bruchbildung. Dazu werden spezielle Metallformen (IFFSTAR, Frankreich) aus Aluminium verwendet, welche die gleichzeitige Herstellung von 10 Prüfkörpern erlauben (Abb. 10). Boden und Seiten der Aluminiumform werden mit Plastikfolien (Folien für Hellraumprojektoren) ausgekleidet. Damit diese ohne Zwischenraum satt am Aluminium haften, wird die eine Seite mit einer dünnen Schicht Silikonöl besprüht. Liegt die Trennfolie nicht dicht an, wird die Breite des Prüfkörpers reduziert, was zu einem geringeren Bruchwiderstand führt. Die einzigen Metallteile, die mit dem Bitumen in Kontakt kommen, sind die Enden der metallenen Prüfkörperenden. Diese müssen für eine gute Haftung aufgeraut sein (sandgestrahlt), da sonst die Gefahr eines Adhäsionsbruchs an der Übergangsstelle besteht. Etwas schwierig ist das Einspannen des dünnen, doppelten Teflonfolie für die Bildung der Kerbe. Vorgängig werden die beiden Folien mit einem Silikonfett (Molikote® Multilub, Dow Corning, USA) zusammengeklebt, damit kein Bitumen dazwischen laufen kann. Da dieser Film sehr flexibel ist, besteht die Möglichkeit, dass der Film sich verschiebt oder sich krümmt, was zu einer nicht korrekten Kerbe führt, wodurch der Bruch massgeblich beeinflusst wird. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Forschungsprojektes eine Alternative zum Teflonfolie gesucht (siehe 3.3.1). Dabei

hat sich gezeigt, dass sich Silikonpapier (Hexis, Germany) als Kerbmateriale besser eignet, weshalb nun in der neuen Version 2014 der Technischen Spezifikation TS 16593 die Teflonfolie durch Silikonpapier ersetzt worden ist. Ausser den Vorversuchen und dem Ringversuch wurden alle Prüfungen mit Silikonpapier durchgeführt.

Beim Giessen des heissen Bitumens in die vorgewärmte Giessform wird diese wie bei anderen Prüfungen leicht überfüllt. Dies ist nicht kritisch, da der effektive Querschnitt, respektive Höhe durch die Distanz zwischen Kerbe und Bodenplatte bestimmt wird. Die darauffolgende Abkühlphase ist gemäss TS 16593  $24 \pm 1$  h, was aber für den Prüfablauf nicht optimal ist. Damit es möglich war, eine Form mit 10 Prüfkörpern pro Tag herzustellen und zu prüfen, wurde die Abkühlphase auf  $19 \pm 1$  h verkürzt. Es ist möglich dass dies zu leicht unterschiedlichen Resultaten führen kann, da bei der Abkühlung eine Art Aggregation der verschiedenen Bitumenkomponenten stattfindet, entfernt vergleichbar mit einer Kristallisation. Dadurch verändern sich die rheologischen Eigenschaften in der Abkühlphase exponentiell, wie dies aus Penetrationsmessungen bekannt ist. Da für diese Forschungsarbeit jedoch immer die gleichen Abkühlzeiten verwendet wurden, sind die Bedingungen für alle Proben gleich. Wichtig ist jedoch, dass die Proben beim Abkühlen mit einer Plastikbox abgedeckt werden, damit sie nicht durch Zugluft lokal schneller abkühlen. Dies kann zu inneren Spannungen und Fehlstellen führen, was zu höheren Bruchtemperaturen führt. Durch die massive Giessform aus Aluminium ist ein guter Wärmeffluss gewährleistet, was zu einer gleichmässigen Abkühlung des Bitumens führt.



**Abb. 10** Prüfformen für die Herstellung von 10 FTT-Prüfkörper; der dünne doppelte Teflonfilm ist im vergrösserten Ausschnitt sichtbar

Der nächste kritische Arbeitsgang ist das Ausformen der Prüfkörper, da sie dabei leicht beschädigt oder deformiert werden können. Dazu wird die ganze Giessform für 10 bis 20 min in das Tiefkühlfach eines Kühlschranks bei  $-15^{\circ}\text{C}$  abgekühlt. Die technische Spezifikation empfiehlt eine Temperatur von  $-20^{\circ}\text{C}$  während 10 Minuten. Diese hängt jedoch von der Viskosität des Bindemittels ab. Weiche Bindemittel mit Penetrationswerten über 100 [0.1 mm] müssen 20 min und mehr abgekühlt werden, damit sie sich beim Ausformen nicht deformieren. Wird zu lange gekühlt, wird das Bindemittel brüchig und der Prüfkörper kann dadurch zerbrechen. Die Plastikfolien kleben am Metall und müssen durch eine Drehbewegung gelöst vorsichtig gelöst werden. Dabei wird der Prüfkörper zusätzlich durch eine schmale Metallunterlage (z. B. ein Seitenteil) gestützt. Es ist auch möglich diesen Vorgang durch einen leichten Schlag mit einem Kunststoffhammer auszulösen, die Gefahr des vorzeitigen Bruches des Prüfkörpers ist dabei aber grösser. Anschliessend lassen sich die Plastikfolien leicht ablösen, sofern das Bitumen kalt genug ist. Es ist deshalb wichtig, dass die Ausformung speditiv durchgeführt wird, da sich sonst die Prüfkör-

per aufwärmen und deformiert werden können.

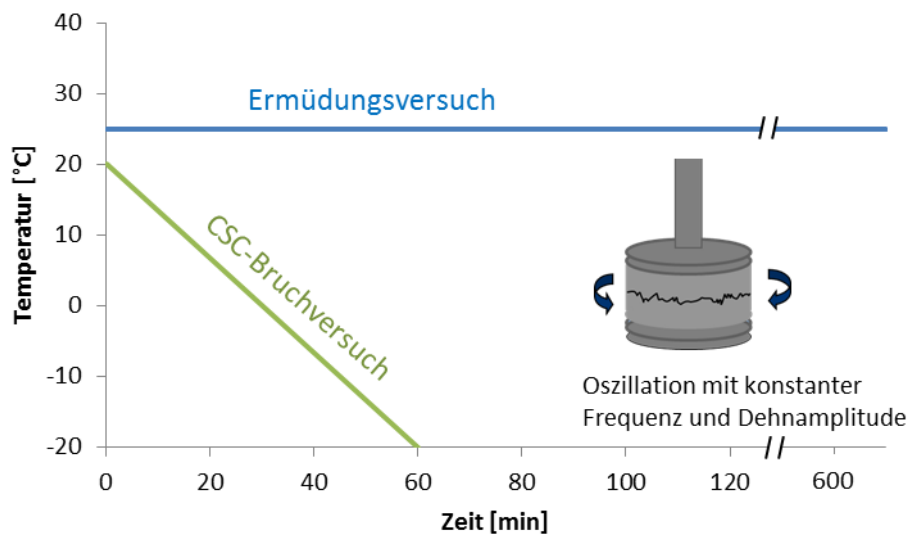
Zu Diskussionen führt immer wieder die Verweilzeit im Kühlbad bei der Testtemperatur, da eine Veränderung der Brucheigenschaften durch physical hardening befürchtet wird, wie dies bei der Prüfung mit dem Bending Beam Rheometer beobachtet wurde [9]. Deshalb wurden zusätzliche Abklärungen zum Einfluss der Temperatur und des zeitlichen Verlaufes auf die Eigenschaften der Prüfkörper durchgeführt (vgl. Kapitel 3.3.1).

Vor der Prüfung wurden die Prüfkörper mindestens eine Stunde bei Prüftemperatur im Alkoholbad der Prüfmaschine äquilibriert. Unmittelbar vor der Prüfung wurde der Prüfkörper auf die Auflager gesetzt und zentriert. Darauf wurde Datenerfassung und die Prüfmaschine gestartet. Die Prüfung dauert etwa drei Minuten, so dass die Prüfung inklusive Äquilibration bei drei Temperaturen rund 3.5 h benötigt.

## 2.5 DSR-Bruchtemperatur

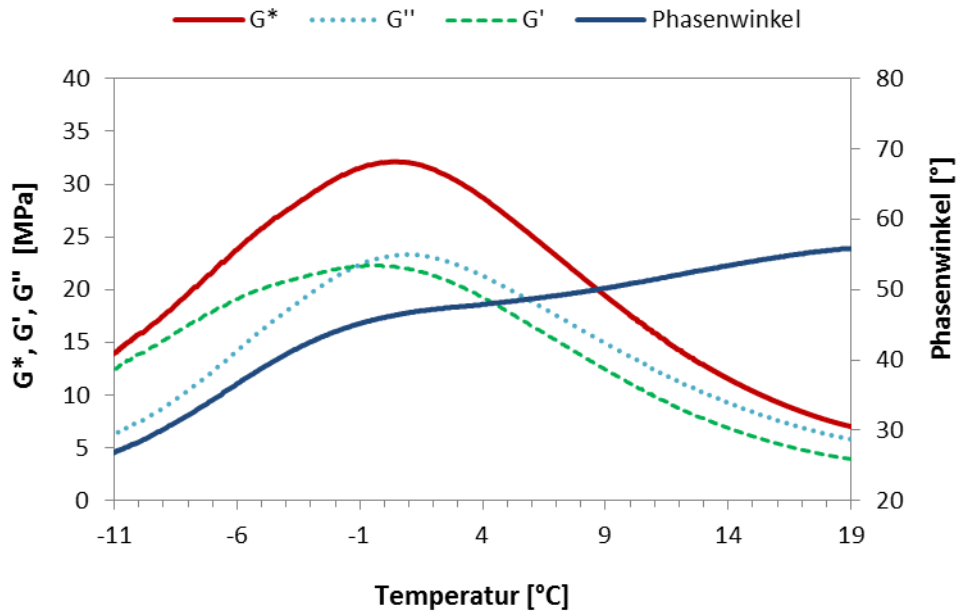
### 2.5.1 Prinzip der CSC-Bruchprüfung

Das Prinzip der CSC-Bruchprüfung ist einfach und beruht auf einer modifizierten Ermüdungsprüfung mit einem überlagerten Temperaturgradienten (Abb. 11) [55]. Eine Bitumenprobe wird mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR) mit einer sinusförmigen Oszillationsbewegung mit konstanter Frequenz und Dehnamplitude belastet, während gleichzeitig die Temperatur kontinuierlich gesenkt wird.



**Abb. 11** Prinzip der CSC-Versuches im Vergleich mit einer klassischen Ermüdungsprüfung

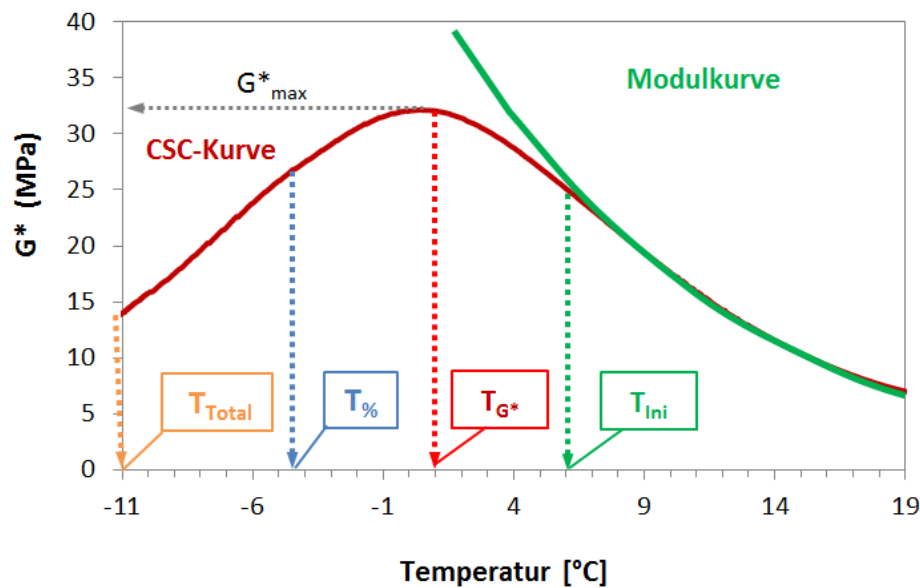
Das Bitumen befindet sich am Anfang der Prüfung in einem duktilen Zustand und geht langsam in einen spröden Zustand über, je mehr das Bindemittel abgekühlt wird. Der Bruch erfolgt immer im spröden Zustand, wobei darauf zu achten ist, dass das Bindemittel in der duktilen Phase nicht schon zu stark belastet und geschädigt wird. In der Ermüdungsprüfung wird die Anzahl Zyklen bis zum Ermüdungskriterium als Resultat erhalten, während beim CSC-Bruchversuch die Temperatur gesucht wird, bei der das Bindemittel bricht respektive versagt. Abb. 12 zeigt ein typisches Diagramm des CSC-Bruchversuches. Der DSR misst während des Versuches das Drehmoment und den Phasenwinkel, woraus weitere Größen wie Betrag des komplexen Schermoduls  $|G^*|$ , Speichermodul  $G' = G^* \cdot \cos(\delta)$  (elastischer Anteil), Verlustmodul  $G'' = G^* \cdot \sin(\delta)$  (viskoser Anteil) und andere abgeleitet werden.



**Abb. 12** Typisches Diagramm einer CSC-Bruchprüfung mit verschiedenen physikalischen Messgrößen

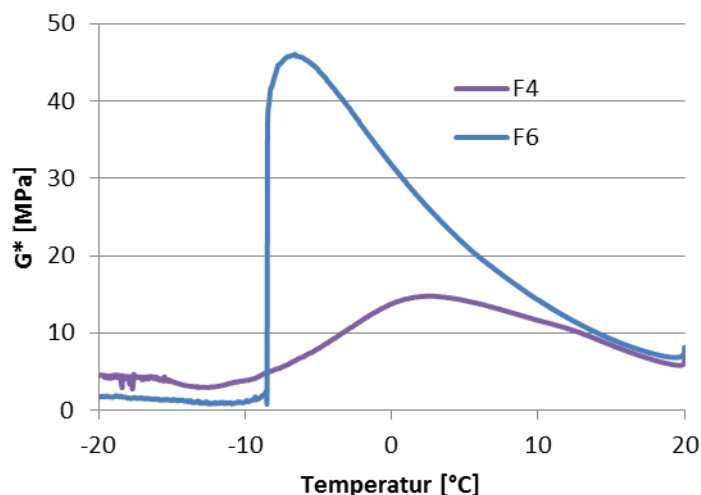
### 2.5.2 Versagenskriterium

Bei der CSC-Prüfung wird das Bindemittel unter stetiger Oszillation mit einer definierten konstanten Amplitude abgekühlt. Die Anfangsphase ist gekennzeichnet durch einen kontinuierlichen Anstieg der Steifigkeit in Form des komplexen Moduls, der am Anfang exponentiell verläuft ohne dass er zu Schädigung des Bindemittels führt. Die Kurve verläuft hier identisch wie bei einer Modulmessung bei kleiner Amplitude. Ab einer bestimmten Temperatur  $T_{ini}$ , respektive einem kritischen Modul, können die aufgebrachten Verformungen nicht mehr aufgefangen werden und kleinere Schäden in Form von Mikrorissen treten in der Probe auf (Abb. 13). In dieser zweiten Phase verläuft die Kurve nicht mehr deckungsgleich mit der Modulmessung, sondern beginnt abzuflachen. Der Beginn der Abweichung der Ermüdungs- von der Modulkurve kann als Initiation der ersten mikroskopischen Schädigungen angesehen werden, die jedoch nicht sichtbar sind.



**Abb. 13** CSC-Kurve mit charakteristischen Punkten

In der folgenden Phase startet die Mikrorissbildung und die Rissfortsetzung, die mit sinkender Temperatur und steigenden Zyklen ansteigen bis ein Maximum erreicht wird ( $G^*_{\max}$ ). Danach fällt der Steifigkeitsmodul wieder allmählich ab. Dieses aufgetretene Maximum ist ein mögliches Versagenskriterium, das einfach zu bestimmen ist. In diesem Punkt sind die angehäuften „Mikroschäden“ verursacht durch eine Kombination von thermischen Effekten und dynamischen Scherkräften, vermutlich so gross, dass das Material nicht mehr zusammenhält und beginnt zu zerbröseln. Je nachdem wie spröde das Bindemittel schon ist (hohes Modul), kann das vollständige Versagen plötzlich auftreten (F6) oder langsam wie beim Bindemittel F4 (Abb. 14).

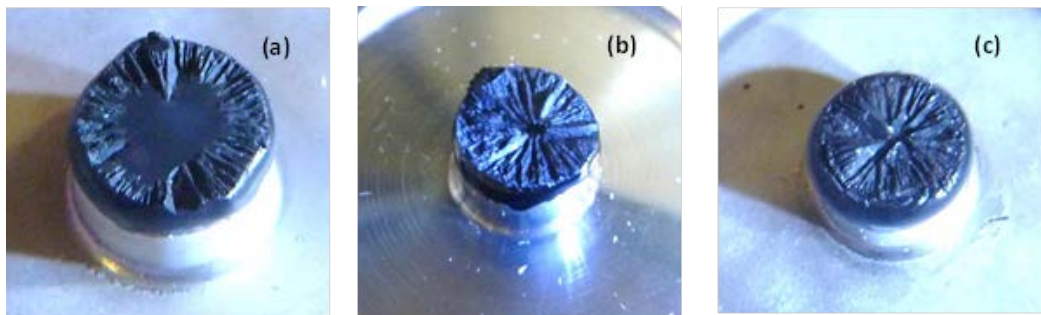


**Abb. 14** Unterschiedliches Versagen von Bindemitteln

Das Versagenskriterium kann nicht anhand von visuellen Beobachtungen an der Probe durchgeführt werden, da die schwarze Farbe des Bitumens und die beiden Metallplatten

des DSR dies verhindern. Das Versagenskriterium muss deshalb anhand der rheologischen Daten des Experimentes abgeleitet werden. Bei einem CSC-Bruchversuch werden Drehmoment und Phasenwinkel in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit gemessen und daraus unter anderem Speichermodul und Verlustmodul abgeleitet, die die Tieftemperatureigenschaften des Bindemittels charakterisieren. In einer kürzlich publizierten Arbeit über die Ermüdungsprüfungen von Bindemitteln mit dem DSR wird die Rissbildung und -fortsetzung in zwei Phasen aufgeteilt [32, 33]. Die Rissbildung beginnt gemäss dieser Theorie am äusseren Rand der Probe, da dort die Spannungen am grössten sind. Anfänglich ist das Risswachstum langsam, nimmt aber mit zunehmender Rissausbreitung radial Richtung Zentrum der Probe proportional zu. Bei einer bestimmten Risslänge nimmt die Geschwindigkeit des Risswachstums wieder ab, was mit dem Versagen der Probe beschrieben wird. Daraus ergibt sich das typische strahlenförmige Schadensbild einer Probe nach vollständiger Schädigung. Dies konnte auch beim CSC-Bruchversuch beobachtet werden, wo beim vollständigen Versagen der Probe bei einer Temperatur ( $T_{\text{Total}}$ ) ein strahlenförmiges Muster erhalten wird. Wird die Prüfung vorzeitig abgebrochen ( $T_{\%}$ ) ist die Rissbildung noch nicht bis ins Zentrum fortgeschritten, was der ebenen Fläche sichtbar ist (Abb. 15a). Daraus lässt sich schliessen, dass bei der Temperatur  $T_{\text{Gmax}}$  die Schäden kaum visuell sichtbar sind und erst aus Mikroschädigungen bestehen, woraus sich aber dann schnell aussen die ersten Makrorisse bilden. Dies ist deshalb auch nicht fotografiert werden, da sich noch keine Bruchfläche gebildet hat.

Ist die Viskosität des Bindemittels zu niedrig erfolgt die Schädigung durch plastische Verformung. Dies ist der Fall wenn das Bindemittel beim Beginn der CSC-Prüfung zu weich ist, wie dies beim weichsten Bindemittel F3 der Fall war. Dies ist in Abb. 15c daran erkennbar, dass die Risse nicht ganz aussen am Rand beginnen. Der Rand wurde zuerst durch plastisches Fliessen verformt wurde und erst später bei tieferen Temperaturen setzte die Rissbildung ein. Dadurch wurde die Ermüdung durch einen zweite Schadensmechanismus überlagert, der unerwünscht ist. Dies bedeutet, dass darauf geachtet werden muss, dass die Starttemperatur der Viskosität des Bindemittels angepasst werden sollte, damit anfängliche plastische Verformungen vermieden werden können.



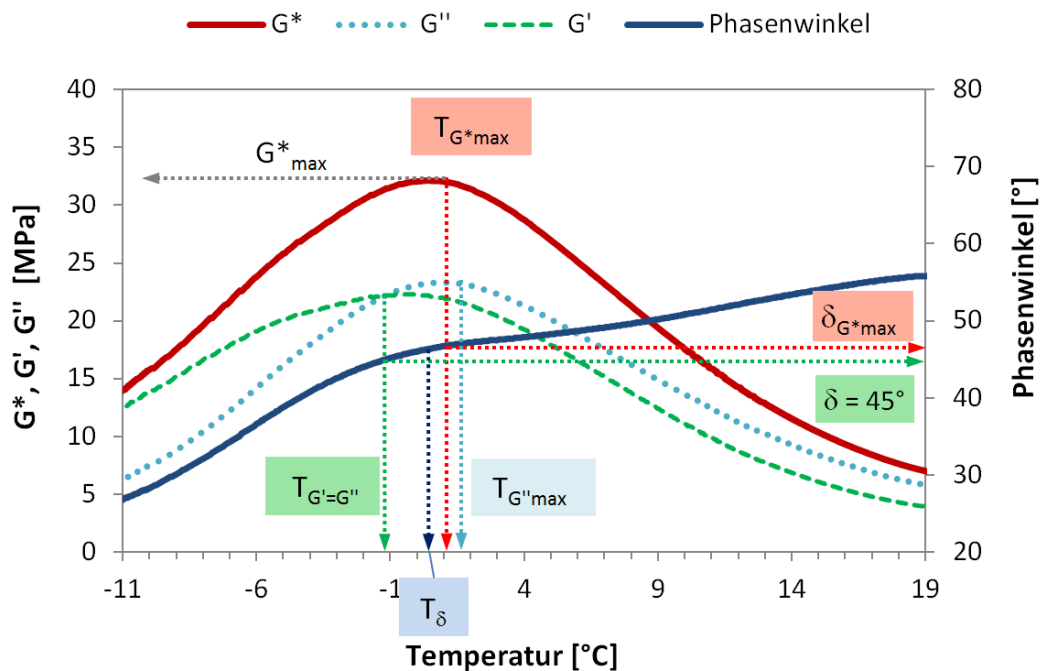
**Abb. 15** Typische strahlenförmige Schadensbilder der CSC-Prüfung

Da es sich bei dieser Prüfung nicht um eine reine Ermüdungsprüfung handelt, können die allgemein verwendeten Versagenskriterien, in der Regel ist dies der Abfall des Moduls auf 50% des Anfangswertes, nicht angewendet werden. Die Aufteilung in einen Abkühlungs- und Ermüdungsanteil ist nur annähernd möglich, da die Veränderung des Moduls mit der Temperatur nicht einer einfachen Funktion folgt. Bei höheren Temperaturen, wo der viskose Anteil überwiegt, verändert sich der Schermodul annähernd exponentiell mit der Temperatur. Dies ist bei tieferen Temperaturen nicht mehr der Fall, da sich hier zusätzliche Einflüsse auf die Grösse des Moduls bemerkbar machen, wie die Reorganisation der Bitumenmoleküle bis zur Bildung von Mikrokristallen, die Energie benötigen und dadurch den Modul erhöhen.

Das Versagen kann ebenfalls in der Änderung des Phasenwinkels beobachtet werden. Durch die Abkühlung sinkt der Phasenwinkel von etwa 60° (viskoelastischer Bereich) bis auf 30° (elastischer Bereich). Am Anfang nimmt der Phasenwinkel kontinuierlich ab oder



bleibt konstant bis zu einer Temperatur  $T_\delta$ , wo er plötzlich steiler abfällt. Dieser Übergang ist allerdings nicht so deutlich sichtbar und deshalb weniger geeignet für die Bestimmung des Versagenskriteriums.



**Abb. 16** CSC-Kurve mit möglichen Versagenskriterien

Aus Abb. 16 können weitere Informationen herausgelesen werden. Bei höheren Temperaturen ist der viskose Anteil grösser als der elastische, was bei einer Temperatur  $T_{G'=G''}$  umkehrt. Bei dieser Temperatur sind Verlust- und der Speichermodul gleich gross und der Phasenwinkel beträgt  $45^\circ$ . Die Temperatur  $T_{G''max}$ , wo der Verlustmodul das Maximum erreicht, wird oft mit der Glasübergangstemperatur in Verbindung gebracht, wo das Bindemittel vom duktilen in den spröden Zustand übergeht [34, 35]. Dieser Übergang ist aber bei Bitumen ebenfalls nicht gut definiert und verläuft nicht abrupt. Alle diese charakteristischen Temperaturen, die als Versagenskriterium in Betracht kommen, liegen relativ eng beieinander, so dass es keinen grossen Unterschied macht, welche nun als CSC-Bruchpunkttemperatur definiert wird. Aus praktischer Sicht hat sich gezeigt, dass  $T_{G*max}$  das ausgeprägteste Maximum zeigt und sich deshalb gut zur Bestimmung des Versagenskriteriums eignet.

In dieser Studie wird deshalb das Maximum des komplexen Schermoduls als Versagenskriterium gewählt und die Temperatur  $T_{G*max}$  bei diesem Maximum als **CSC-Bruchpunkt** bezeichnet. Durch die Überlagerung der Ermüdung mit einer Temperaturrampe kann die sonst übliche Versagenskriterium von 50% des Anfangsmoduls nicht bestimmt werden, da der komplexe Schermodul durch die Abkühlung zu Beginn kontinuierlich ansteigt. Diese Überlagerung müsste mathematisch entkoppelt werden, wofür weitere Experimente für die Bestimmung des Moduls in Abhängigkeit der Temperatur notwendig wäre. Da jedoch für die Ermüdungsversuche die Amplitude höher ist und sich ausserhalb des linear visko-elastischen Bereichs befindet, sind die gemessenen Module nicht direkt übertragbar.

## 3 Diskussion und Resultate

### 3.1 Zusammenfassung der Prüfergebnisse

In Tab. 4 sind alle Resultate des Hautversuches dargestellt.

**Tab. 4** Übersicht über alle Prüfergebnisse (ohne Ringversuch)

		Bitumen 10/20	Bitumen 35/50	Bitumen 160/220	PmB 25/55-65	PmB 50/70-53	PmB 90/150-60
Anlieferung		F9-A	F1-A	F3-A	F6-A	F4-A	F15-A
Penetration [0.1 mm]		16	42	178	48	48	119
ERK	[°C]	62.6	57.2	40.6	92.5	59	73.6
T <sub>Frs</sub>	[°C]	-7	-7	-18	-10	-18	-21
T <sub>FTT</sub>	[°C]	2.4	-6.7	-14.5	-16.8	-7.2	-24.5
T <sub>CSC</sub>	[°C]	15.4	2.5	-0.5	0.2	-6.7	-13.7*
gealtert RTFOT		F9-R	F1-R	F3-R	F6-R	F4-R	F15-R
ERK	[°C]	67.8	65.4	48.6	91.5	64.4	63.8
T <sub>Frs</sub>	[°C]	-5	-11	-16	-15	-15	-18
T <sub>FTT</sub>	[°C]	6.9	-3.5	-13.4	-9.4	-5.6	-17.8
T <sub>CSC</sub>	[°C]	13.9	3.9	1.9	-0.7	-3.1	-10.0
gealtert PAV		F9-P	F1-P	F3-P	F6-P	F4-P	F15-P
ERK	[°C]	75.8	75.4	57.2	93	73.6	67
T <sub>Frs</sub>	[°C]	-6	-10	-14	-12	-13	-20
T <sub>FTT</sub>	[°C]	10.1	3.8	-7.4	-3.8	-1.2	-12.8
T <sub>CSC</sub>	[°C]	-	1.5	-5.0	4.6	2.1	-8.0

\*extrapolierter Wert, T<sub>Frs</sub>= Brechpunkt nach Fraass, T<sub>FTT</sub> = FTT-Bruchpunkt, T<sub>CSC</sub> = CSC-Bruchpunkt

### 3.2 Brechpunkt nach Fraass

Die durch die Alterung verursachte Verhärtung des Bindemittels ist mittels Brechpunkt nach Fraass nur tendenziell ersichtlich, da die Unterschiede oft im Bereich der Messunsicherheit der EN 12593 [5] von  $\pm 3^\circ\text{C}$  liegen, insbesondere bei den harten nicht modifizierten Bitumen (Abb. 17). Beim Bitumen F1 ist der Unterschied im Brechpunkt zwischen Anlieferungszustand und nach Alterung im RTFOT und PAV nur gerade  $1^\circ\text{C}$ .

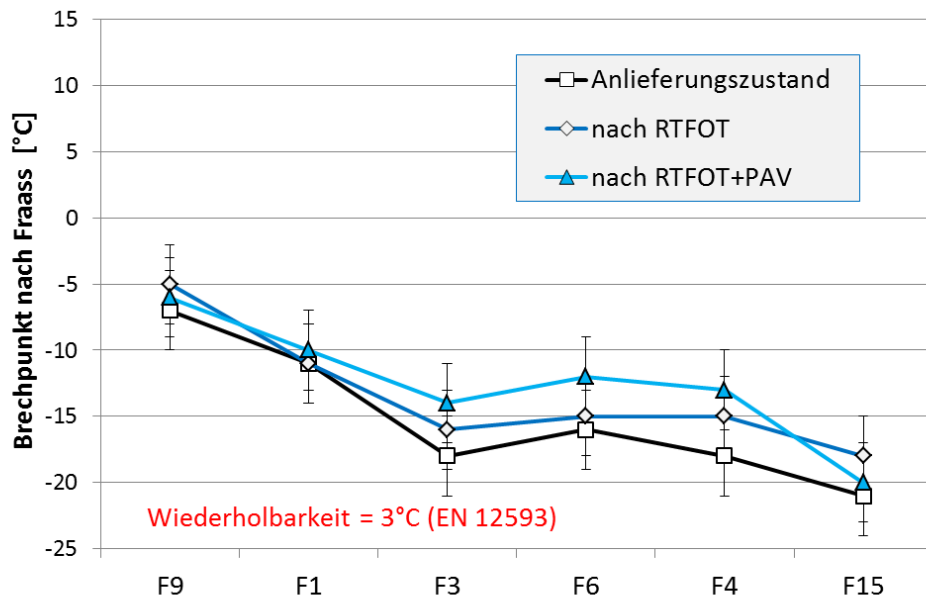


Abb. 17 Vergleich der Resultate Brechpunkt nach Fraass vor und nach der Alterung

### 3.3 Fracture Toughness Test (FTT)

#### 3.3.1 Parameteroptimierung

##### Giesstemperatur

Die Aufwärmtemperatur des Bindemittels, respektive die Giesstemperatur bestimmt die Viskosität des Bindemittels beim Einfüllen in die Probeformen. Ist die Viskosität des Bindemittels zu tief, werden nicht alle Ecken und Kanten vergossen, ist die Viskosität zu tief, ist es möglich, dass das Bindemittel durch Ritzen und kleine Spalten fließen kann. Eine Studie mit dem Bitumen F1 zeigte, dass diese Temperatur nicht so kritisch ist und innerhalb der Messunsicherheit identische Resultate ergab (Abb. 18).

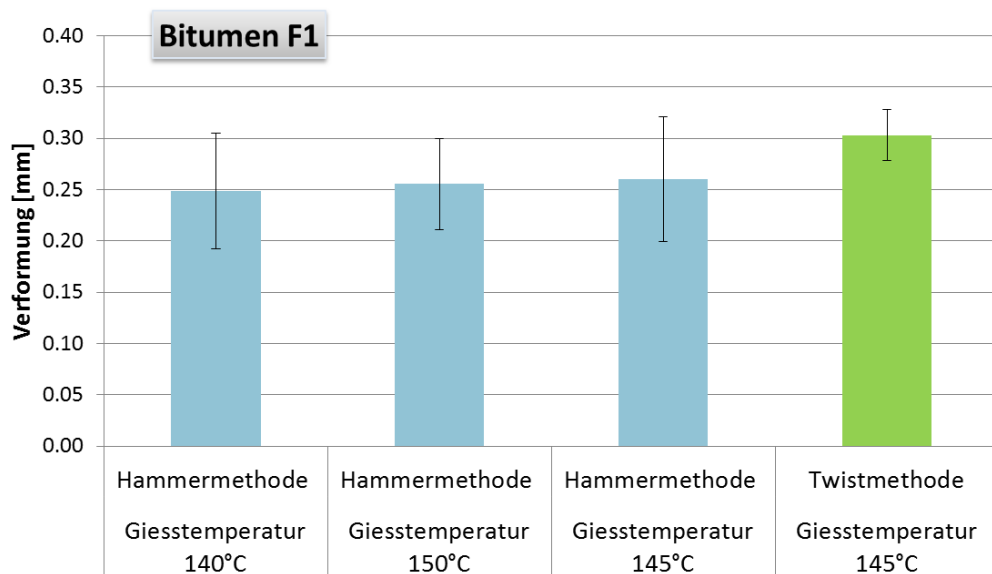


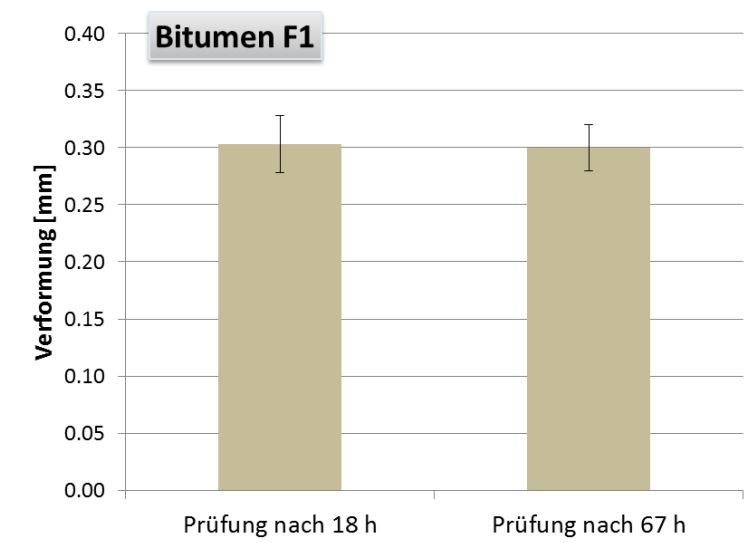
Abb. 18 Einfluss der Giesstemperatur und der Ausformmethode

### Abkühlzeit (Giessen bis Raumtemperatur)

Nachdem die Prüfkörper gegossen sind, lässt man sie gemäss Standardprozedur staubgeschützt unter einem umgestülpten Kunststoffbehälter auf Raumtemperatur abkühlen. Der Kunststoffbehälter schützt deshalb die Prüfkörper vor kalter Zugluft. Eine schnelle Abkühlung muss vermieden werden, damit durch die Volumenkontraktion keine hohen Spannungen innerhalb des Prüfkörpers entstehen können, die die Bruchkraft beeinflussen könnten. Um den Einfluss der Abkühlzeit zu untersuchen wurde in einem Experiment die Abkühlzeit stark erhöht, indem die abgefüllte Form im ausgeschalteten, warmen Trockenschrank, der für die Erwärmung des Bindemittels verwendet wurde, über Nacht abkühlen liess. Dies führte aber dazu, dass das Bindemittel unter die Seitenteile und Spacer fließen konnte und dadurch das Ausformen stark erschwerte.

### Äquilibrierzeit (Giessen bis Testen)

Von der Prüfung „Bestimmung der Nadelpenetration“ ist bekannt, dass die Zeit zwischen dem Giessen des Prüfkörpers und dem Bestimmen der Nadelpenetration einen grossen Einfluss auf das Resultat hat. Beim Abkühlen brauchen die Moleküle im Bitumen (vor allem die Asphaltene) Zeit um sich neu zu orientieren und strukturieren, was mit dem Begriff „Sterische Verhärtung“ umschrieben wird [54]. Dadurch nimmt der Penetrationswert mit der Zeit ab, bis er nach 24 h nur noch langsam abfällt. Dies könnte auch beim FTT einen Einfluss auf das Resultat haben, wobei in der Regel die Prüfung erst nach 16-24 h durchgeführt wird. Für das Bitumen 35/50 konnte jedoch kein Einfluss festgestellt werden, ob die Prüfung 18 oder 67 h nach dem Abfüllen durchgeführt wurde (Abb. 19).



**Abb. 19** Einfluss der Äquilibrierzeit

### Einfluss von Temperatur und Zeit der Äquilibrierung vor der Prüfung

Gemäss TS 15963 [21] wird die Form mit den Prüfkörpern kurz vor der Prüfung in einem Kühlbad oder einer Kühlkammer abgekühlt, um das Ausformen ohne Verformung zu ermöglichen. Es wird eine Abkühlung bei  $-20^{\circ}\text{C}$  während 10 min vorgeschlagen. Die Zeitdauer oder Temperatur ist aber auch abhängig von der Viskosität des Bindemittels. Wenn die Temperatur zu hoch ist besteht die Gefahr, dass die Prüfkörper verbogen werden. Eine Abkühldauer von 10 für harte Bitumen und bis zu 30 min für weiche Bitumen bei  $-15^{\circ}$  im Gefrierfach des Kühlschranks haben sich bewährt.

Danach werden die Prüfkörper auf die verschiedenen Prüftemperaturen abgekühlt. Dabei stellt sich die Frage, ob dies im gleichen Kühlbad möglich wie die Prüfung möglich ist, was dazu führt, dass sich die Prüfkörper unterschiedliche Zeit im Kühlbad befinden. Bei der BBR-Prüfung ist bekannt, dass längere Lagerzeiten bei tiefen Temperaturen zu einer Verhärtung durch sogenanntes „Physical hardening“ führen kann. Andererseits kann ein thermischer Schock durch eine plötzliche starke Abkühlung zu Spannungen und Mikroschädigung im Bindemittel führen, die das Resultat beeinflussen können. Deshalb könnte eine stufenweise Abkühlung trotz längerer Verweilzeit besser sein.

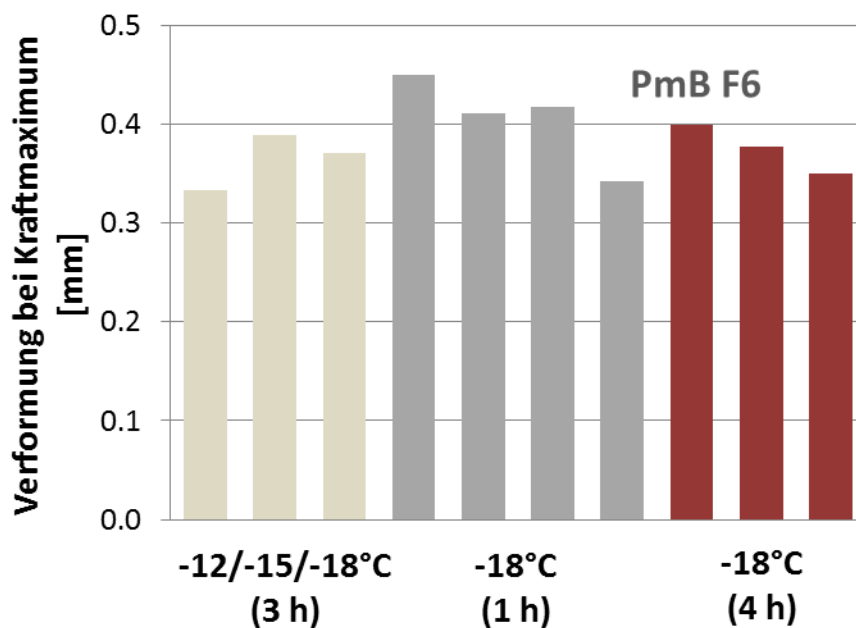
Um das Abkühlverhalten zu untersuchen, wurden Versuche mit dem PmB F6 durchgeführt und bei  $-18^{\circ}\text{C}$  geprüft. Jeweils 3-4 Prüfkörper wurden unterschiedlichen Kühlprozeduren unterworfen:

Szenario 1: Progressive Abkühlung: 1 h bei  $-12^{\circ}\text{C}$ , 1 h bei  $-15^{\circ}\text{C}$ , 1 h bei  $-18^{\circ}\text{C}$ .

Szenario 2: Schockkühlung: 1 h bei  $-18^{\circ}\text{C}$

Szenario 3: lange Schockkühlung: 4 h bei  $-18^{\circ}\text{C}$

Die Abb. 20 zeigt, dass für das untersuchte PmB kein signifikanter Einfluss der Abkühlvariante auf die Resultate beobachtet werden kann. Die stufenweise Abkühlung oder die „Schockkühlung“ zeigen keinen nennenswerten Einfluss auf das Bruchverhalten. Bei der Schockkühlung von einer Stunde sind die Werte leicht erhöht, was darauf hinweist, dass die Zeitdauer von 60 Minuten zu kurz ist. Die Werte liegen jedoch innerhalb der Messunsicherheit und somit relativ klein. Weitere Studien an anderen Bindemitteln wären sinnvoll, da nicht alle Bindemittel die selbe Temperaturempfindlichkeit aufweisen.

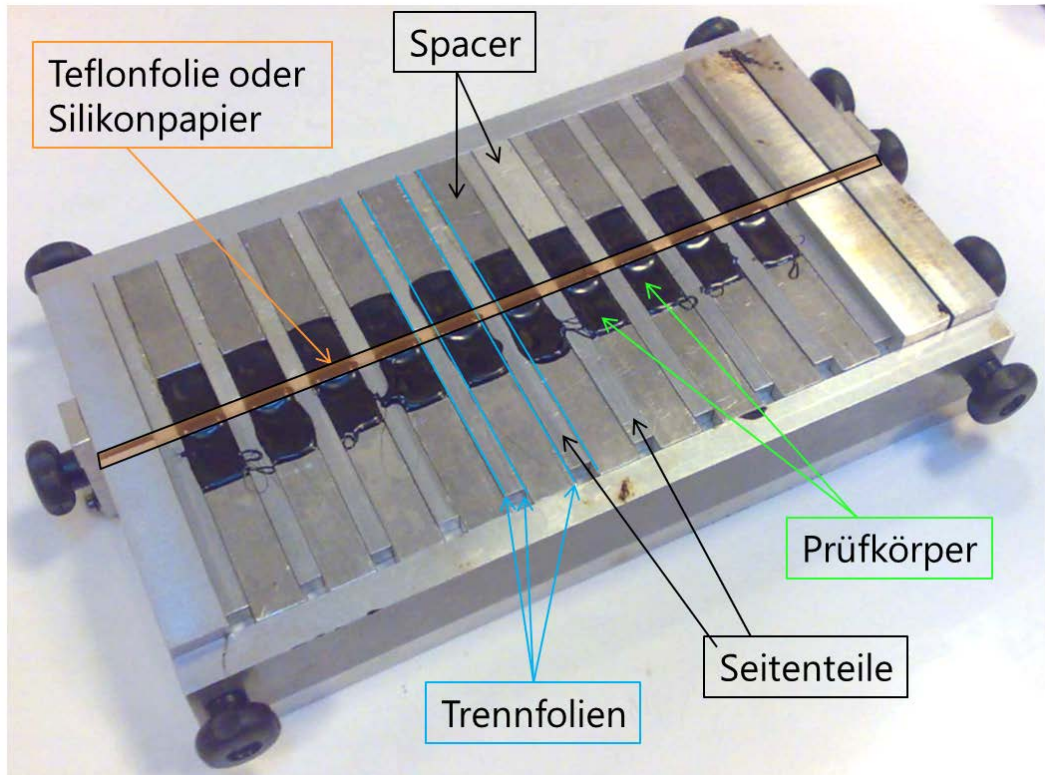


**Abb. 20** Einfluss des der Abkühlprozedur auf die Verformung bei maximaler Kraft

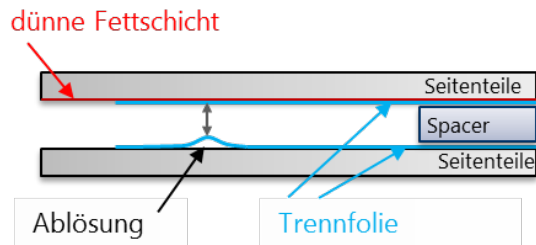
### Ausformtechnik

Nach dem Abkühlen der gegossenen Prüfkörper müssen diese von der Form befreit werden um getestet werden zu können. Bei Raumtemperatur sind die meisten Bitumen zu weich und verformen sich bei Ausformprozedur. Deshalb müssen sie je nach Bindemittelhärtung kürzer oder länger abgekühlt werden. Die Overheadfolien wurden mit Hilfe einer dünnen Schicht Silikonfett an die Spacer aus Metall geklebt, um zu verhindern, dass sich

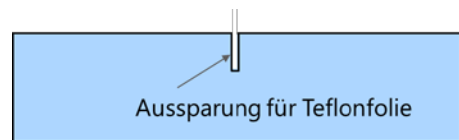
die Folien während dem Giessen ablösen können. Eine lokale Ablösung der Folie führt zu einer reduzierten Dicke des Prüfkörpers und zu einer geringeren Bruchfestigkeit (Abb 22).



**Abb. 21** Gefüllte Giessform zusammengesetzt aus verschiedenen Einzelteilen

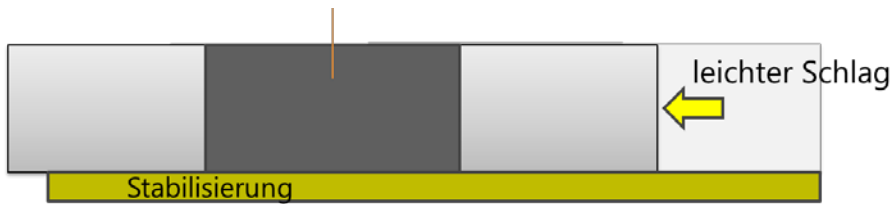


**Abb. 22** Gut anliegende (mit Fett) und abgelöste Trennfolie(ohne Fett)

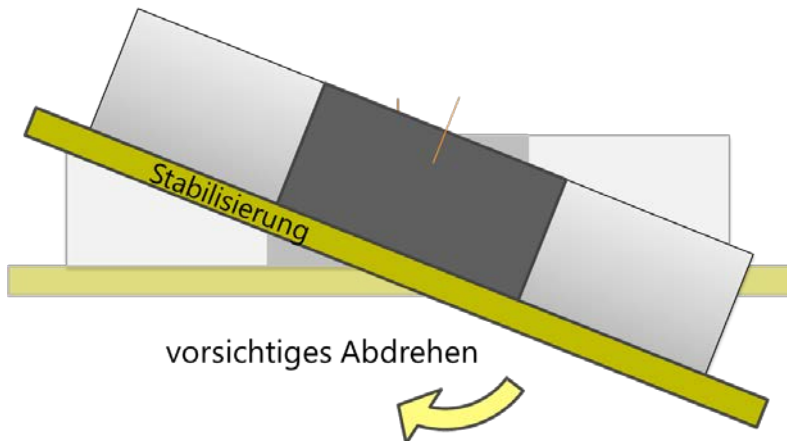


**Abb. 23** Trennfolien mit Aussparung für Teflonfolie, die für die Kerbe benötigt wird

Die Trennfolie, die verhindert, dass der Prüfkörper an die Spacer klebt, hat in der Mitte eine Aussparung für die Teflonfolie resp. Silikonpapier, welche für die benötigte Kerbe verantwortlich ist (Abb. 23). Bei dieser Aussparung klebt Bitumen auf einer kleinen Fläche am Spacer. Dies kann nicht verhindert werden, auch wenn die Aussparung möglichst schmal gehalten wird. Auserdem wird auch etwas Kraft benötigt, um die mit dem dünnen Fettfilm befestigte Trennfolie bei tiefen Temperaturen zu lösen. Dazu wurden zwei unterschiedliche Methoden ausprobiert: die Hammer- und die Twistmethode (Abb. 24).



Methode 1: Hammermethode



Methode 2: Twistmethode

**Abb. 24** Zwei Methoden um die Proben auszuformen

Bei der Hammermethode wurde zuerst das Seitenteil, danach der Spacer mit dem Prüfkörper durch einen leichten seitlichen Schlag mit einem Kunststoffhammer gelöst. Bei der Twistmethode wurde das Seitenteile und danach der Prüfkörper mit den beiden Spacern abgedreht. Dabei ist es wichtig, dass zur Stabilisierung ein flaches Metallteil verwendet wird, da sonst die Gefahr besteht, dass der Prüfkörper verformt wird. Bei der Hammermethode besteht hingegen das Risiko, dass durch den Schlag Mikrorisse entstehen können oder sogar der Prüfkörper zerbricht. Der Vergleich der Resultate zeigt, dass die Ausformmethode einen Einfluss hat. Die Hammermethode zeigt eine höhere Streuung und ergibt einen höheren Bruchpunkt was auf partielle Schädigung des Prüfkörpers hinweist. Aus diesem Grund wurde für das Projekt nur die Twistmethode für das Ausformen verwendet.

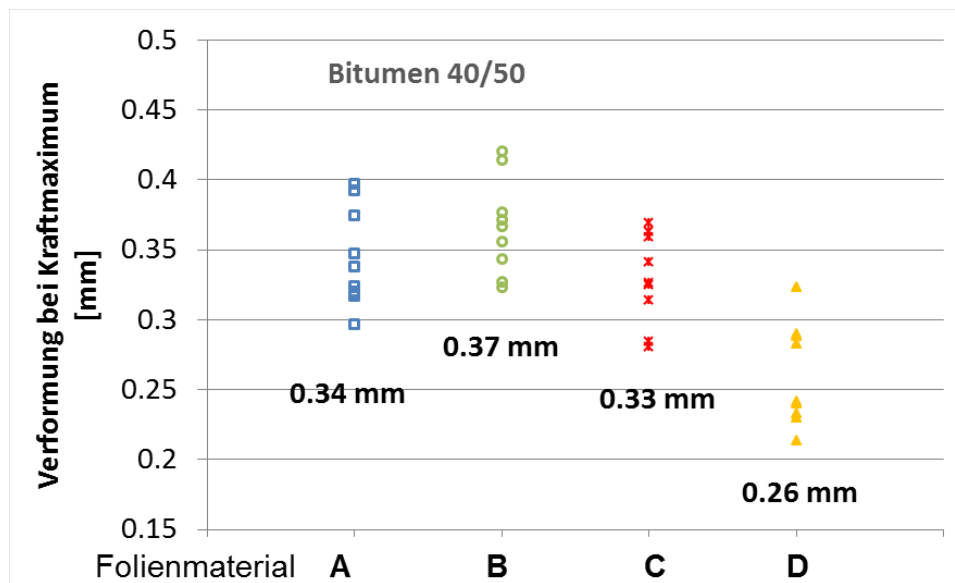
### Folienmaterial

Die Geometrie der Kerbe ist ausschlaggebend für die Bruchbildung. Je dünner die Kerbe, desto konzentrierter ist die Kraft für Bruchinitiierung. In der technischen Spezifikation TS 15963 wird eine doppelte PTFE-Folie mit einer Dicke von je 0.025 mm verwendet. Eine doppelte Folie ist notwendig, um sicher zu stellen, dass kein grösserer Widerstand beim Öffnen der Kerbe auftritt. Bei tiefen Temperaturen wurde jedoch bei nicht modifizierten Bitumen manchmal beobachtet, dass beide PTFE-Folien auf einer Seite des gebrochenen Prüfkörpers waren. Demzufolge ist die Haftung zwischen PTFE-Folie und Bitumen teilweise sehr gering, so dass nicht zwingend zwei Folien nötig wären. Damit kein Bitumen zwischen die beiden Folien gelangt, werden sie mit einer dünnen Schicht Silikonfett (Multilub, Dow Corning, USA) zusammengeklebt. Die doppelte PTFE-Folie ist aber sehr dünn und weich, was ihre Handhabung und insbesondere die exakte Positionierung in der Gussform schwierig macht.

Aus diesem Grund wurden alternative Folienmaterialien untersucht und mit der PTFE-Folie verglichen). Die Studie wurde mit dem Bitumen 35/50 (F1) bei einer einheitlichen Temperatur von -6.5 °C durchgeführt [49].

**Tab. 5** Einfluss des Folienmaterials auf die FTT-Resultate bei -6.5°C

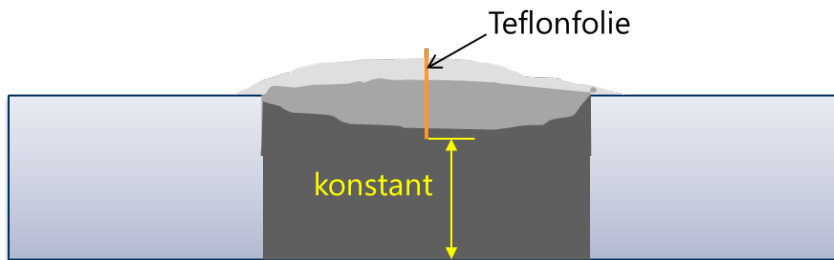
Ref.	Material	Hersteller	Dicke [mm]	Verformung [mm]	Standabw. [mm]
A	PTFE-Folie (Teflonfolie)	Goodfellow (UK)	0.025	0.34	0.03 (10%)
B	Stahlfolie	h+s Präzisionsfolie (D)	0.030	0.37	0.04 (10%)
C	Silikonpapier	Hexis (D)	0.150	0.33	0.03 (10%)
D	Silikonpapier	unbekannt	0.080	0.26	0.04 (14%)

**Abb. 25** Einfluss des Folienmaterials auf das Resultat und die Wiederholbarkeit

Die Resultate in Abb. 25 zeigen den Einfluss des Folienmaterials auf die Resultate. Das dünnere Silikonpapier (0.080 mm) kann aufgrund der niedrigeren Verformungswerte ausgeschieden werden. Dies zeigt einerseits deutlich, dass nicht alle Silikonpapiere (unterschiedliche chemische Beschichtung?) gleich reagieren und dass die Dicke nicht unbedingt der massgebende Einfluss ist. So ergibt das Silikonpapier D, obwohl es mit 0.150 mm deutlich dicker ist, ähnliche Resultate wie die PTFE-Folie (0.025 mm) (Tab. 5). Vergleichbare Resultate werden auch mit der Metallfolie (0.030 mm) erhalten, die aber aufgrund der Schwierigkeiten beim Ausformen der Prüfkörper nicht in Frage kommt. Die Stahlfolie ist viel stärker als Silikonpapier und kann beim Ausformen nicht von Hand getrennt werden sondern muss mit einer Schere angeschnitten und danach mit relativ viel Kraft zerrissen werden, wodurch trotz sorgfältiger Handhabung einige Prüfkörper zerbrochen wurden. Die Streuung der Resultate ist für alle Materialien ähnlich. Als Konsequenz dieser Studie wurde für alle Hauptversuche das Silikonpapier C verwendet, was die Prüfkörperherstellung wesentlich erleichterte.



### Überfüllhöhe des Prüfkörpers



**Abb. 26** Unterschiedliche Füllhöhen haben keinen Einfluss auf den Prüfquerschnitt

Der Einfluss der Überfüllhöhe des Prüfkörpers mit Bitumen wurde nicht untersucht, da er keinen massgebenden Einfluss auf die Prüfung haben kann. Denn der wirksame Querschnitt des Prüfkörpers wird durch die Kerbe, die durch die Teflonfolie resp. Silikonpapier definiert wird bestimmt. Solange die Füllhöhe im Bereich der Teflonfolie liegt, wird der Prüfquerschnitt nicht beeinflusst.

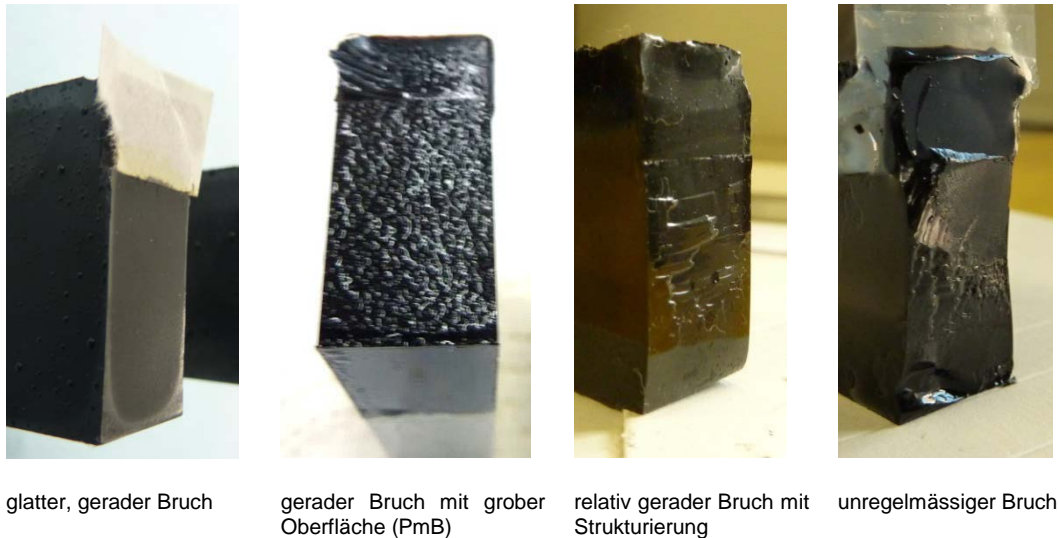
### Kühlflüssigkeit (Ethanol oder Glykol-Wasser)

Die Art der Kühlflüssigkeit kann einen Einfluss auf die Resultate haben. In einigen Laboratorien ist die Verwendung von Ethanol wegen des niedrigen Flammpunktes verboten. Es gibt aber nicht viele geeignete Kühlflüssigkeiten auf Wasserbasis, die Temperaturen von bis zu  $-40^{\circ}\text{C}$  erreichen können und haben oft gewichtige Nachteile. Kaliumacetat-Lösungen sind beispielsweise hoch korrosiv, wodurch nicht korrodierende Metalle für die Prüfeinrichtung im Kühlbad verwendet werden müssen. Wasser-Glykol-Gemische werden bei tiefen Temperaturen sehr viskos und lassen sich nicht mehr gut pumpen. Da mit der Empa-Prüfeinrichtung keine alternativen Kühlflüssigkeiten eingesetzt werden konnten, musste auf diese Parameterstudie verzichtet werden.

## 3.3.2 Auswertung der FTT-Messungen

Bruchprüfungen haben generell eine höhere Streuung verglichen mit Modulmessungen oder Kriechversuchen, da Rissentstehung und -ausbreitung ein schneller Prozess ist und nicht so genau vorausbestimmt werden kann. Durch die Bruchinitierung mittels einer schmalen Kerbe, kann dies verbessert werden, da die Kräfte an der Kerbe konzentriert werden.

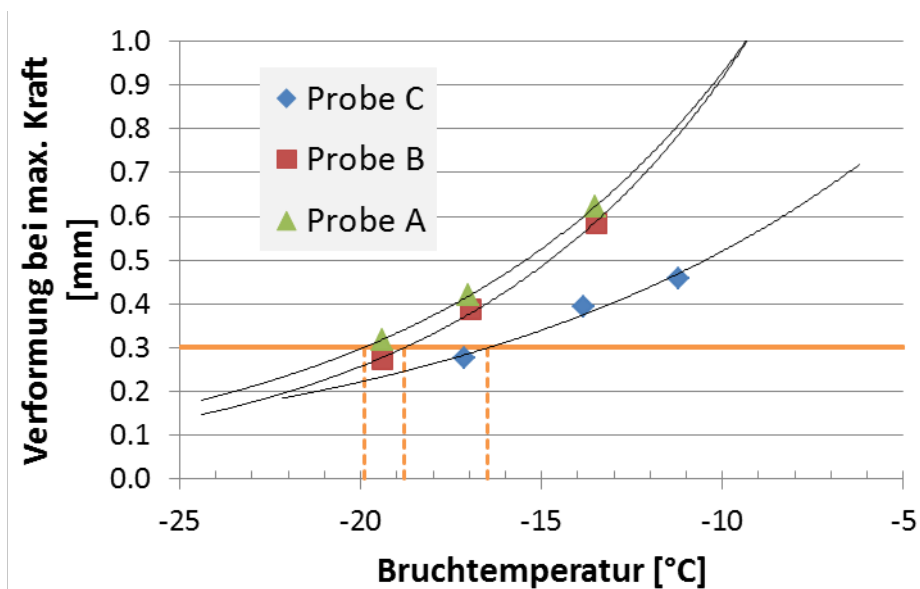
Trotzdem kommt es vor, dass Ausreisser bei den Resultaten auftreten, die teilweise erklärt werden können durch die Struktur des Bruches. Dazu wird die Oberfläche des Bruches visuell beurteilt (Abb. 27). Es hat sich gezeigt, dass bei einem glatten, geraden Bruch die Resultate besser wiederholbar sind als bei gekrümmten Bruch oder Bruchbildern mit unregelmässiger Oberfläche. Allerdings hängt das Bruchbild auch vom Bindemitteltyp ab, so zeigen PmB teilweise eine unregelmässige Oberfläche die bei nicht modifizierten Bitumen in der Regel glatt ist. Aus dem Bruchbild lässt sich nicht immer eindeutig ableiten, ob eine Messung gültig ist oder nicht. Brüche, die stark unregelmässiges Bild zeigen oder nicht in der Kerbe begannen, wurden als ungültig definiert. Für die Beurteilung der Bruchflächen muss die Prüfung auch nach Erreichen des Kraftmaximums weitergelaufen werden bis die Kraft auf einen Wert unter  $0.5^{\circ}\text{C}$  sinkt.



**Abb. 27** Unterschiedliche Bruchflächen nach der FTT-Prüfung

### 3.3.3 Bestimmung der Wiederholbarkeit

Die Bestimmung der Wiederholbarkeit innerhalb des Labors wurde an jeweils 10 Prüfkörpern mit der optimierten Prüfmethode (Silikonpapier für die Kerbe) am polymermodifizierten Bitumen F6 durchgeführt. Die experimentellen Bedingungen entsprachen den Wiederholbedingungen, das heisst gleiche Prüfbedingungen, gleiche Prüfperson, gleiche Probe) mit Ausnahme von Probe C, das aus einem anderen Büchse, jedoch identischer Herkunft und Batch, stammt und drei Monate später geprüft wurde. Abb. 28 zeigt die Verformung bei maximaler Kraft und Tab. 6 die erhaltenen FTT-Bruchtemperaturen inklusive Mittelwert und Standardabweichung.



**Abb. 28** Verformungs-Temperaturkurven für die Wiederholbarkeit (PmB F6)

Aus Abb. 28 ist ersichtlich, dass die Resultate der Proben A und B sehr nahe beieinander liegen, während die Probe C geringere Verformungen bei den entsprechenden Bruchtemperaturen zeigt. Es ist nicht klar ob der Unterschied aufgrund unterschiedlicher Bindemittleigenschaften oder auf leichte Unterschiede in der Probenherstellung kommt. Werden alle drei Proben für die Berechnung der Wiederholbarkeit verwendet, ergibt sich

ein Mittelwert von  $-18.5^{\circ}$  und eine Standardabweichung von  $1.6^{\circ}$  C (Tab. 6). Mit einem Erweiterungsfaktor von 2 für einen Vertrauensbereich 95% wird eine Wiederholbarkeit von  $3.2^{\circ}$ C erhalten, gleich wie für den Brechpunkt nach Fraass. Die Studie zeigt, dass noch nicht alle Einflussfaktoren beherrscht werden und diese nochmals genauer untersucht werden müssen. Ausgehend von den Resultaten der Proben A und B, sollte eine Wiederholbarkeit im Bereich von  $2^{\circ}$ C realistisch sein.

**Tab. 6** Untersuchung der Wiederholbarkeit an PmB F6

Probe	T <sub>FTT</sub> (°C)
Test A	-19.9
Test B	-18.9
Test C	-16.8
Mittelwert T <sub>FTT</sub>	-18.5
Standardabweichung	1.6
Wiederholbarkeit (k=2, 95%)	3.2

### 3.3.4 Resultate des Europäischen Ringversuches

Die Prüfungen für den Ringversuche wurden am Anfang des Projektes, noch vor dem Abschluss der Parameterstudie, mit einer doppelten Teflonfolien für die Herstellung der Kerbe nach der technischen Spezifikation TS 15963 Version 2010 und nicht mit Silikonpapier durchgeführt.

**Tab. 7** Resultate des Ringversuches

Labor		1	2	3	4	5	6	Empa	7	Mittelwert	min.	max.
PB1	T <sub>FTT</sub>	-14.4	-15.3	-9.45	-11.3	-11.4	-7.4	-11.4	-12	-15	-7	
	r	1.6	1.2	2.8	0.9	1.7	1.3	1.7	1.6	0.9	2.8	
PB2	T <sub>FTT</sub>	-15.5	-17	-14	-16.5	-13.5	-13.7	-11.6	-15	-17	-12	
	r	3.2	1.2	1.3	1.3	2.1	0.9	2.5	2.0	0.9	3.2	
PMB-5	T <sub>FTT</sub>	-30.4	-30.9	-27.3	-	-25.9	-27.6	-26*	-29	-31	-27	
	r	1.4	1.4	1.6	-	-	0.1		1.5	0.1	3.0	

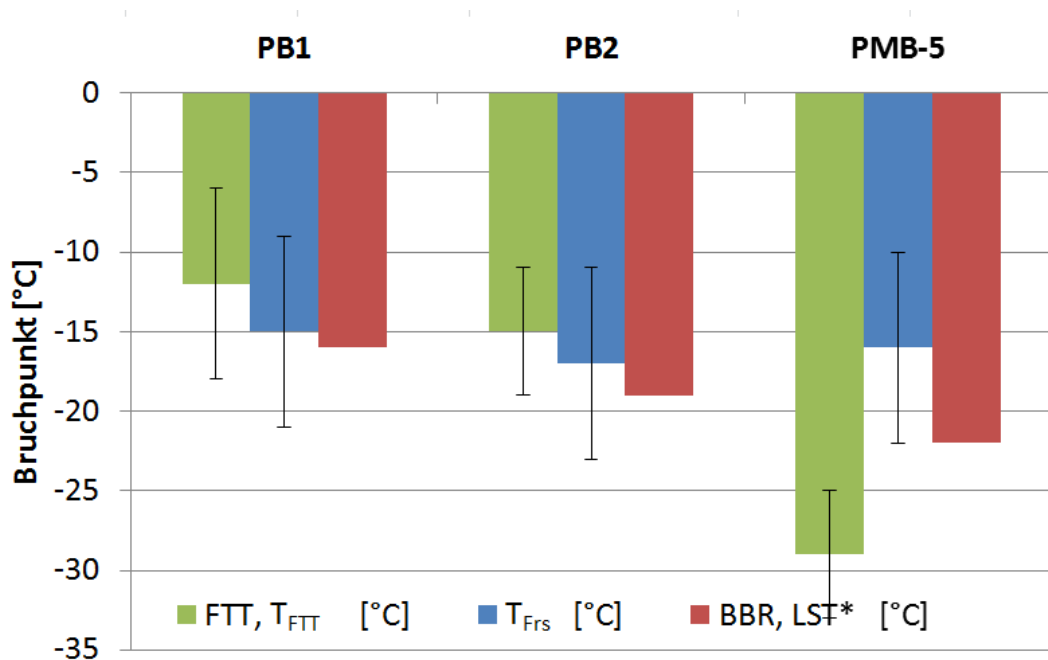
T<sub>FTT</sub> = Bruchzähigkeitstemperatur [°C], r = Wiederholpräzision des Prüflabors [°C], \*korrigierte Werte

Die Resultate des Ringversuches zeigen, dass die Resultate noch stark variieren (Tab. 7). Dies ist einerseits auf die unterschiedlichen Prüfapparaturen, aber auch auf die teils abweichende Durchführung der Prüfung und Prüfkörpervorbereitung zurückzuführen, bedingt durch ungenaue Beschreibung in der technischen Spezifikation oder aus praktischen Gründen.

**Tab. 8** Resultate des Ringversuches im Vergleich mit Werten von BBR und Brechpunkt nach Fraass

Bezeichnung		PB1	PB2	PMB-5
$T_{Frs}$	[°C]	-15	-17	-16
BBR, LST*	[°C]	-15,8	-19,3	-22,2
FTT, $T_{FTT}$	[°C]	-12	-15	-29
FTT, R*	[°C]	6	4	4

\*R=Vergleichspräzision

**Abb. 29** Vergleich der Resultate von Brechpunkt  $T_{FTT}$ , Brechpunkt nach Fraass ( $T_{Frs}$ ) und BBR

Normalbitumen mit unterschiedlicher Penetration werden von allen drei Prüfungen ähnlich gut unterschieden (Abb. 29). Beim Vergleich zwischen PB2 und PMB-5 mit dem gleichen Bitumen BP2 als Basisbitumen kann mittels Brechpunkt nach Fraass kein Unterschied festgestellt werden, mittels BBR ist der Unterschied nur gering (Tab. 8). Beim FTT ist jedoch eine deutliche Senkung des Brechpunktes festzustellen. Dies ist ein sehr positives Resultat, allerdings ist die Präzision des Verfahrens vergleichbar mit jener des Brechpunktes nach Fraass und somit ungenügend.

Dabei spielen die unterschiedlichen Prüfmaschinen und Kühlvarianten sicherlich einen grosse Rolle. Es wäre deshalb wichtig, dass ein kommerziell erhältliches Gerät von allen benutzt wird. Solange aber keine Nachfrage an das Prüfgerät gibt, ist aber auch kein Prüfmittelhersteller bereit, in die Entwicklung eines FTT-Prüfgerätes zu investieren. Dies ist eine schwierige Situation für das vielversprechende Prüfverfahren.

### 3.3.5 Resultate des Hauptversuches

Um zu untersuchen, ob die Bindemittelalterung durch die Prüfmethode nachgewiesen werden kann, wurde der Fracture Toughness Test nicht nur an den Proben im Anlieferungszustand, sondern auch nach der Alterung im RTFOT und nach der kombinierten Alterung RTFOT+PAV durchgeführt [56].

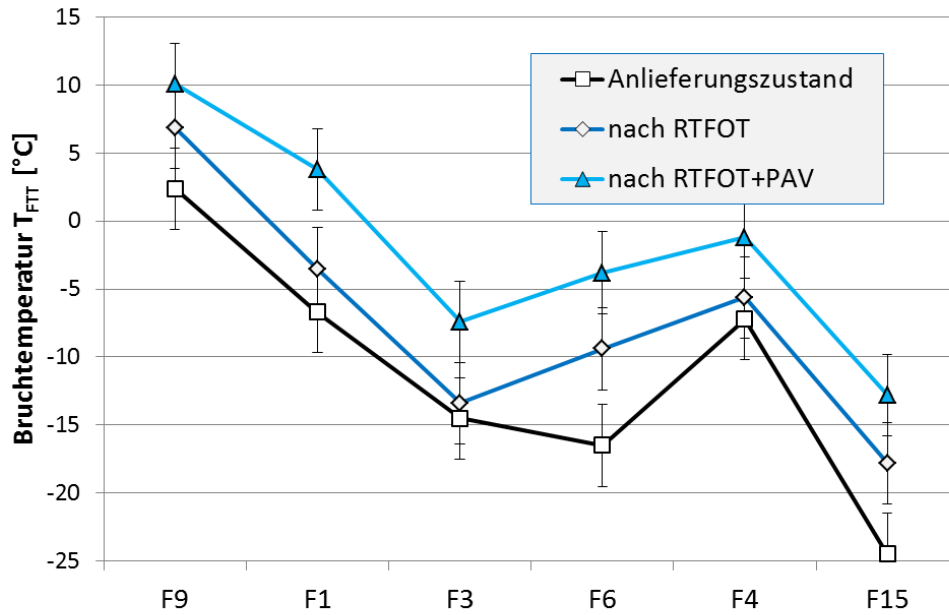


Abb. 30 Vergleich der FTT-Resultate vor und nach Laboralterung

Im Gegensatz zum Brechpunkt nach Fraass (Abb. 17) ist der Einfluss der Alterung in den Resultaten des FTT deutlich ersichtlich (Abb. 30). Zwischen Anlieferungszustand und Alterung nach RTFOT + PAV ist die Differenz zwischen 6 und 12°C verglichen mit 1 bis 4°C beim Brechpunkt nach Fraass. Der Einfluss der Alterung auf die FTT-Resultate ist dabei unabhängig von der Bindemittelhärte und bei der PAV-Alterung mit einer Zunahme von 3 - 6°C recht konstant. Das Verhalten der PmB ist deutlich weniger einheitlich als jenes der nicht modifizierten Bitumen. Jedoch konnte für alle Bindemittel nach jedem Alterungsschritt eine Erhöhung der FTT-Bruchtemperatur beobachtet werden.

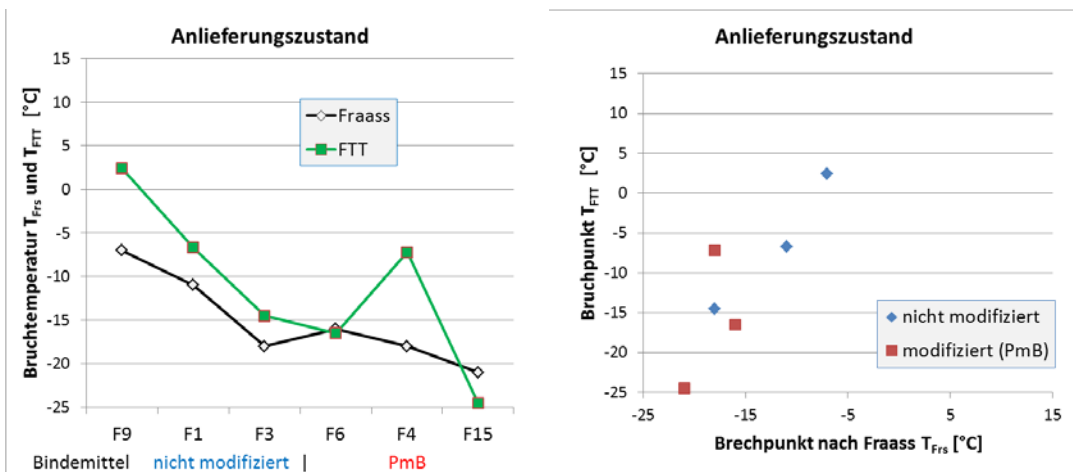


Abb. 31 Resultate von FTT und Brechpunkt nach Fraass im Anlieferungszustand

In Abb. 31 sind die Resultate der Prüfungen im Anlieferungszustand dargestellt, die deutlich machen, dass insgesamt keine gute Korrelation zwischen den Prüfungen FTT und Brechpunkt nach Fraass besteht. Bei genauerer Betrachtung stimmt dies nur für PmB,

während die nicht modifizierten Bitumen eine sehr gute Korrelation zeigen. Allerdings ist die Anzahl der untersuchten Bindemittel zu gering für eine endgültige Aussage. Für einige Proben liegen die Temperaturen der beiden Prüfungen nahe zusammen, für andere gibt es Unterschiede von bis zu 10°C. Tendenziell sind die gemessenen Bruchtemperaturen für FTT höher als beim Brechpunkt nach Fraass.

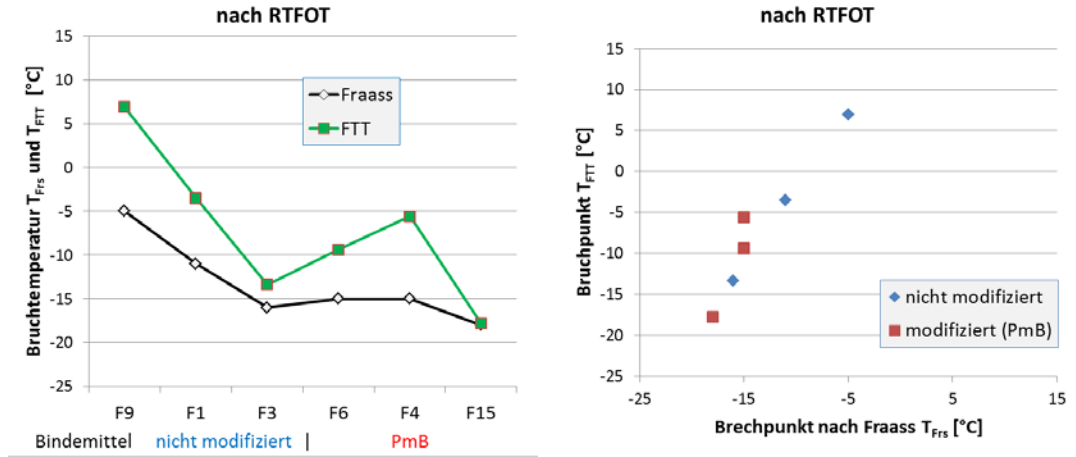


Abb. 32 Resultate von FTT und Brechpunkt nach Fraass nach RTFOT-Alterung

Nach der Alterung mittels RTFOT steigen die Bruchtemperaturen beim FTT stärker an als beim Brechpunkt nach Fraass (Abb. 32). Dies führt zu einer deutlich stärkeren Differenzierung der Resultate im Falle des FTT. Die Differenz zwischen den Maximalwerten beträgt 25°C im Gegensatz zu 13°C beim Brechpunkt nach Fraass. Das Ranking ist hingegen für alle Bindemittel gleich, was zu einer erstaunlich guten Korrelation führt, selbst für die polymermodifizierten Bindemittel. Dies könnte darauf hindeuten, dass der Einfluss der Polymer im Bitumen geringer wird, respektive teilweise abgebaut worden sind, so dass sie sich ähnlicher wie ein nicht modifiziertes Bitumen verhalten.

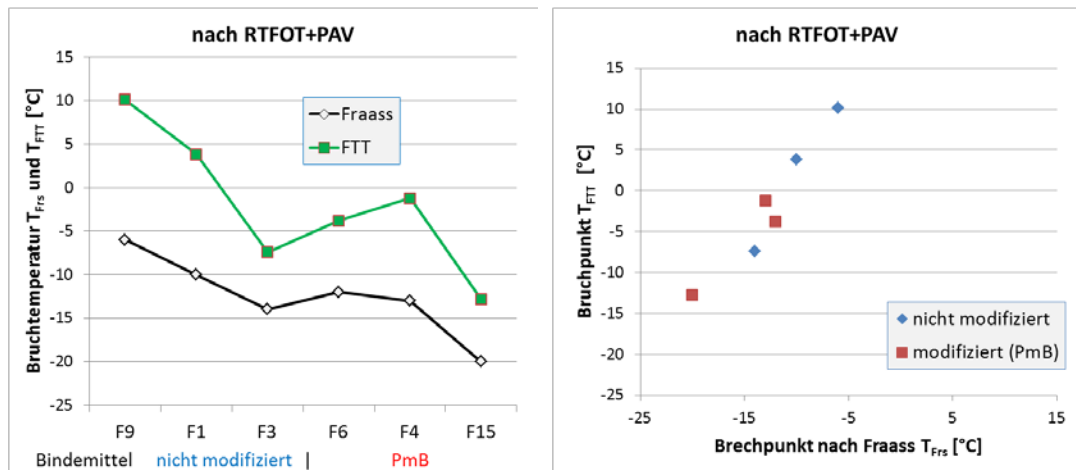


Abb. 33 Resultate von FTT und Brechpunkt nach Fraass nach Alterung in RTFOT+PAV

Nach einer zusätzlichen Alterung im PAV erhöhen sich die Bruchtemperaturen nochmals, die in der Regel grösser sind als nach der RTFOT-Alterung (Abb. 33). Sie sind aber bei den PmB recht unterschiedlich und liegen zwischen 1.4 und 5.6°C

### 3.3.6 Schlussfolgerungen

- Für nicht modifizierte Bindemittel ist eine gute Korrelation zwischen FTT und Brechpunkt nach Fraass vorhanden. Dies wird oft auch bei andern neueren Prüfverfahren (DSR, BBR) beobachtet und bestätigt die These, dass für die konventionellen nicht modifizierten Bindemittel die klassischen Prüfmethode ausreichen.
- Eine Korrelation ist bei den polymermodifizierten Bitumen im Anlieferungszustand nicht vorhanden, was positiv zu bewerten ist, da ja der Brechpunkt nach Fraass für PmB nicht als geeignet betrachtet wird. Interessanterweise ist nach der Alterung aber wieder eine recht gute Korrelation gegeben. Ob dies auf einen teilweisen Abbau der Polymeren im PmB zurückzuführen ist, müsste untersucht werden.
- Die Verwendung von Silikonpapier anstelle der dünnen Teflonfolie bringt praktische Vorteile und hat sich aus praktischer Sicht bewährt. Es ist aber nicht klar, welche Eigenschaften an das silikonbeschichtete Papier zu stellen sind, da ein zweites getestetes Silikonpapier nicht die gleichen Resultate ergab. Insbesondere der Einfluss der Dicke ist unklar, da das verwendete Papier deutlich dicker ist als die Teflonfolie.
- Die Verweilzeit der Prüfkörper im Kühlbad scheint keinen massgebenden Einfluss auf die Resultate zu haben, was erstaunt, da beim BBR das „Physical Hardening“ die Ergebnisse deutlich beeinflusst. Der Unterschied könnte darauf beruhen, dass der BBR den Prüfkörper im duktilen Zustand prüft, während die FTT-Prüfung im spröden elastischen Bereich durchgeführt wird. Die Streuung in der FTT-Prüfung ist allerdings relativ gross, weshalb dieser Punkt mit weiteren Bindemittelsorten nochmals genauer untersucht werden sollte.
- Die Resultate des europäischen Ringversuches zeigen, dass die Vergleichspräzision noch ungenügend ist für die definitive Normierung. Eine Harmonisierung der Prüfeinrichtung scheint unabdingbar zu sein, um die Präzision zu erhöhen.
- Die gemessenen Bruchtemperaturen des FTT sind in der Regel deutlich höher als beim Fraass und stimmen nicht mit den effektiven Temperaturen beim Tieftemperaturversagen von Belägen in der Praxis überein. Dies ist aber auch bei anderen Laborprüfungen der Fall, wo in der Regel die Anwendung eines Korrekturfaktor oder einer Korrekturkonstante zu einer guten Übereinstimmung mit der Praxis führen.
- Die Bestimmung der Bruchtemperatur mittels Interpolation ist nicht einheitlich (linear oder exponentiell). Dies führt zu Abweichungen in der Bestimmung, insbesondere da die Verformungs-Temperaturkurve recht flach verläuft. Insbesondere wurde auch nie überprüft, ob diese tatsächlich am besten durch eine einfache Exponentialkurve angenähert werden soll oder ob eine andere Funktion vorzuziehen ist.

## 3.4 CSC-Bruchversuch

### 3.4.1 Parameteroptimierung

Bei der Entwicklung einer neuen Prüfmethode müssen viele unterschiedliche Einflussparameter optimiert werden, damit sie für verschiedene Bitumentypen anwendbar ist und eindeutige wiederholbare Resultate:

- Geschwindigkeit der Abkühlung (Temperaturgradient)
- Art des Temperaturgradienten (kontinuierlich oder schrittweise)
- Abmessung der Probe
- Starttemperatur
- Frequenz
- Dehnamplitude der Oszillation
- Art der Oszillation: kontinuierlich oder mit Unterbrüchen (vgl. Fraass)
- Wahl des Bruchkriteriums
- Probenvorbehandlung

Es können jedoch nicht alle Parameter gleichzeitig variiert werden, weshalb in einer ersten Optimierungsphase die Frequenz und die Dehnamplitude optimiert wurden, während für die anderen Prüfparameter vernünftige Werte basierend auf durchgeführten Vorversuchen (nicht dokumentiert) festgelegt wurden, die in der Optimierungsphase konstant gehalten wurden.

Für die Optimierung wurde die Standard-Prüfkörperdimension für Modulmessungen bei tieferen Temperaturen gewählt: eine Spalthöhe von 2 mm und ein Durchmesser von 8 mm. Da der Modul von Bitumen bei tiefen Temperaturen rasch ansteigt, ist es wichtig, dass der Durchmesser möglichst klein und der Spaltabstand möglichst gross gewählt wird. Allerdings erschwert dies die Prüfkörperherstellung, weshalb die gewählte Proben-dimension von 8 mm einen guten Kompromiss darstellt.

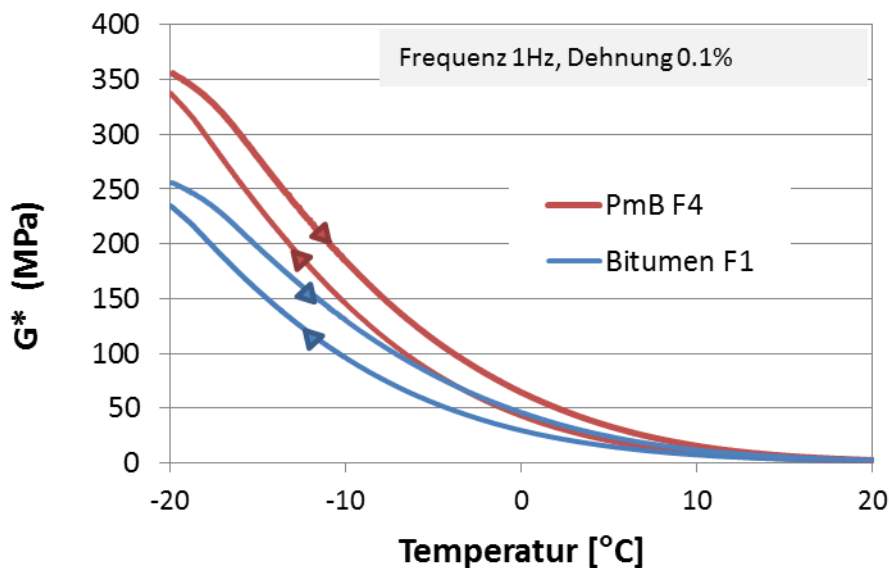
### 3.4.2 Optimierung der Temperaturparameter

Die Wahl des Temperaturgradienten wird eingeschränkt von der maximalen Kühlrate des Rheometers und hat einen direkten Einfluss auf die Prüfdauer. Bedingt durch die Konstruktion der Probenkühlung, die von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich ist, ergibt sich eine Verzögerung bis die Temperatur der Probe die Solltemperatur erreicht. Im Fall von bitumenhaltigen Bindemitteln ist es möglich, die Temperierung über ein Wasserbad durchzuführen. Allerdings ist die Prüftemperatur dann eingeschränkt auf einen Bereich zwischen 10 und etwa 80°C. Da die Bitumenprüfung nur ein Nischenbereich der rheologischen Messungen darstellt, sind die meisten DSR-Geräte mit einer Peltier-Temperierung ausgestattet, die einen grossen Temperaturbereich von -40 bis 200°C abdecken kann. Allerdings ist in der Regel allein die untere feste Platte des Prüfsystems auf diese Weise temperiert, während die bewegliche Prüfplatte nur indirekt über temperierte Luft gekühlt oder geheizt werden kann. Luft ist aber im Vergleich zu Wasser ein schlechter Wärmeträger und die Temperierung geht entsprechend langsamer, abhängig von den zu temperierenden Massen von Prüfsystem und Prüfkörper.

Beim verwendeten DSR der Empa handelt es sich um ein Physica 301 (Anton Paar, Österreich). Während die Bodenplatte direkt mit einem Peltierelement gekühlt wird, erfolgt die Kühlung der oberen Platte indirekt durch gekühlte Luft. Der Temperaturfühler ist beim Peltierelement eingebaut und gibt deshalb nicht die genaue Temperatur des Prüfkörpers wieder, insbesondere bei schnellen Temperaturänderungen. Dies führt zu einer nicht völlig homogenen Temperaturverteilung innerhalb des Prüfkörpers. Obwohl die Kühlrate mit 0.67 °C/min niedriger gewählt wurde als in anderen DSR-Studien [36,37], erfährt der Prüfkörper eine gewisse Temperaturverzögerung im Vergleich zur Bodenplatte. Zur Abschätzung dieser Abweichung wurde bei zwei Bindemitteltypen ein Temperaturgradient von 0.67°C/min von einer Anfangstemperatur +20°C nach -20°C und zurück gefahren,



währenddessen Modulmessungen mit niedriger Dehnamplitude von 0.1% und niedriger Frequenz (1 Hz) durchgeführt wurden, um den Prüfkörper nicht zu schädigen. Zu Beginn der Temperaturrampen wurde für die Äquilibration der Probe bei +20°C und bei -20°C eine Pause von jeweils 20 min eingehalten. Die Abb. 34 zeigt deutlich, dass die Kurven für die Abkühlung und die Aufwärmung nicht identisch sind. Durch die verzögerte Wärme- resp. Kälteübertragung auf die Probe sind die Werte für den komplexen Modul in der Abkühlphase tiefer als in der Aufwärmphase mit einer maximalen Differenz von etwa 3°C. Die Kurven des komplexen Moduls sind nicht für alle Bitumen gleich, was auf die unterschiedliche Viskosität zurückzuführen ist. Unter der Annahme, dass die Temperaturverzögerung in der Abkühl- und Aufwärmphase ähnlich sind, müsste die effektive Temperatur in der Probe etwa in der Mitte der beiden Kurven liegen.



**Abb. 34** Experiment zur Abschätzung der Differenz zwischen Solltemperatur und effektiver Temperatur im Prüfkörper durch einen Temperatursweep von +20°C nach -20°C und zurück mit einer Kühl- resp. Heizrate von 0.67°C/min

Allerdings gibt es vermutlich weitere Effekte, die die Temperatur des Prüfkörpers beeinflussen. Durch die sterische Verhärtung beim Abkühlen könnte der komplexe Modul beim Erwärmen etwas höher sein und zudem könnte die durch die Oszillation erzeugte Reibungswärme zu einer gewissen Erhöhung der Temperatur führen. Die exakte Quantifizierung ist schwierig, da die Differenz nicht für alle Bindemittel identisch ist. Daraus geht hervor, dass der Versuch vom Prüfsystem, respektive vom Rheometertyp abhängig ist. Insbesondere bei unterschiedlichen Kühlsystemen sind abweichende Resultate, oder zumindest ein Verschiebung der CSC-Bruchtemperatur zu erwarten. Ein exakter allgemeingültiger Shiftfaktor für die Temperaturkorrektur ist deshalb schwierig zu ermitteln und muss für jedes Prüfsysteme vorher bestimmt werden.

Die gewählte Starttemperatur hat auch einen Einfluss auf die Form der CSC-Kurve und insbesondere auch auf die CSC-Bruchtemperatur. Die Starttemperatur kann nicht zu hoch gewählt werden, damit bei den höheren Temperaturen keine plastische Verformung der Probe induziert werden. Bei sehr hohen Starttemperaturen kann das Bitumen sogar aus dem Spalt herauslaufen, wodurch der effektive Durchmesser der Probe reduziert wird, was zu einer höheren Bruchtemperatur führt. Je höher die Starttemperatur gewählt wird, desto flacher wird die CSC-Kurve und der Bruch erfolgt bei tieferem Modul und höherer Temperatur (Abb. 35 Auswirkung der Starttemperatur auf die CSC-Prüfung). Andererseits darf die Starttemperatur nicht zu tief sein, da sonst die Schädigung sofort initiiert wird und die Bruchtemperatur praktisch mit der Starttemperatur identisch ist. Die Schwie-

rigkeit besteht darin, eine optimale Starttemperatur Bindemittel mit verschiedenen Viskositäten zu finden.

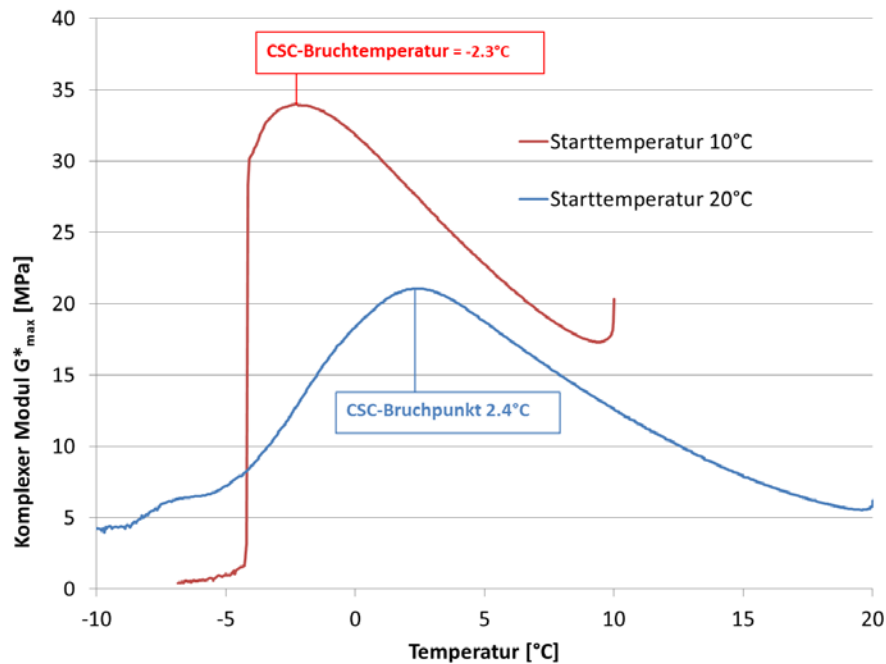


Abb. 35 Auswirkung der Starttemperatur auf die CSC-Prüfung

### 3.4.3 Einfluss der Dehnamplitude

Die Dehnamplitude einen direkten Einfluss auf die Prüfdauer: Je kleiner die Amplitude, desto kleiner ist die Ermüdungsbelastung und je länger ist die Versuchsdauer. Die Amplitude kann nicht zu hoch gewählt werden, da dies im duktilen Bereich zur Deformation des Prüfkörpers führt und bei tiefen Temperaturen ein hohes Drehmoment ergibt.

Bei Versuchen mit dem dynamischen Scherrheometer ist es in der Regel wichtig, dass die Messungen innerhalb des linear-viskoelastischen Bereichs (LVE) erfolgen. In diesem Bereich wird der komplexe Modul nur durch die Temperatur und Frequenz bestimmt, nicht aber durch die Dehnamplitude oder die Spannung. Bei kleinen Dehnamplituden finden die Messungen von Bitumen und Polymerbitumen in der Regel im linear-viskoelastischen Bereich statt. In den durchgeführten Experimenten für die Bestimmung der CSC-Bruchtemperatur wurden die Messungen oft ausserhalb des LVE durchgeführt, da die Dehnamplitude gross genug sein muss, um eine Schädigung der Probe zu initiieren. In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass der komplexe Modul eine mechanische Kenngrösse des Materials ist und deshalb nur innerhalb des LVE gültig ist. Für die Beschreibung der temperaturabhängigen Veränderung des Materials wurde jedoch einfachheitshalber dieser Parameter für die DSR-Versuch in diesem Forschungsprojekt beibehalten, obwohl dies physikalisch nicht vollständig korrekt ist. Diese Vereinfachung hat sich in anderen Forschungsarbeiten bewährt [38].

Die Optimierung der Frequenz und der Dehnamplitude wurde am nicht modifizierten Bitumen 35/50 (F1) und dem PmB 50/70-53 (F4) durchgeführt. Als Versagenskriterium wurde die Temperatur  $T_{G^*_{max}}$  beim Maximum des komplexen Schermoduls  $G^*_{max}$  verwendet. Eine kleinere Dehnamplitude ergibt geringere Belastungen und somit geht es länger bis es zu einer Schädigung im Bindemittel kommt. Diese tritt dann bei höheren Modulwerten ein, wodurch auch der CSC-Bruchpunkt  $T_{G^*_{max}}$  zu tieferen Temperaturen verschoben wird (Abb. 36). Dies entspricht einer kleineren Laststufen in einem konventi-

onellen Ermüdungsversuch, was dort ebenfalls zu höheren Zyklenzahlen bis zum Versagen führt. Eine Verringerung der Dehnamplitude von 7 auf 4% führt beim PmB F4 bei einer Frequenz von 1.6 Hz zu einer Verschiebung des CSC-Bruchpunktes von +2° nach -4°C. Bei anderen Bitumensorten oder Frequenzen ist die Verschiebung noch grösser. Das Maximum des komplexen Moduls nimmt stark zu, was die Bestimmung des Bruchpunktes vereinfacht. Wie Abb. 36 und Abb. 37 zeigen, nimmt die Bruchtemperatur aber nicht linear mit der Dehnamplitude ab. Der Phasenwinkel verschiebt sich mit steigender Dehnamplitude in den viskoelastischen Bereich.

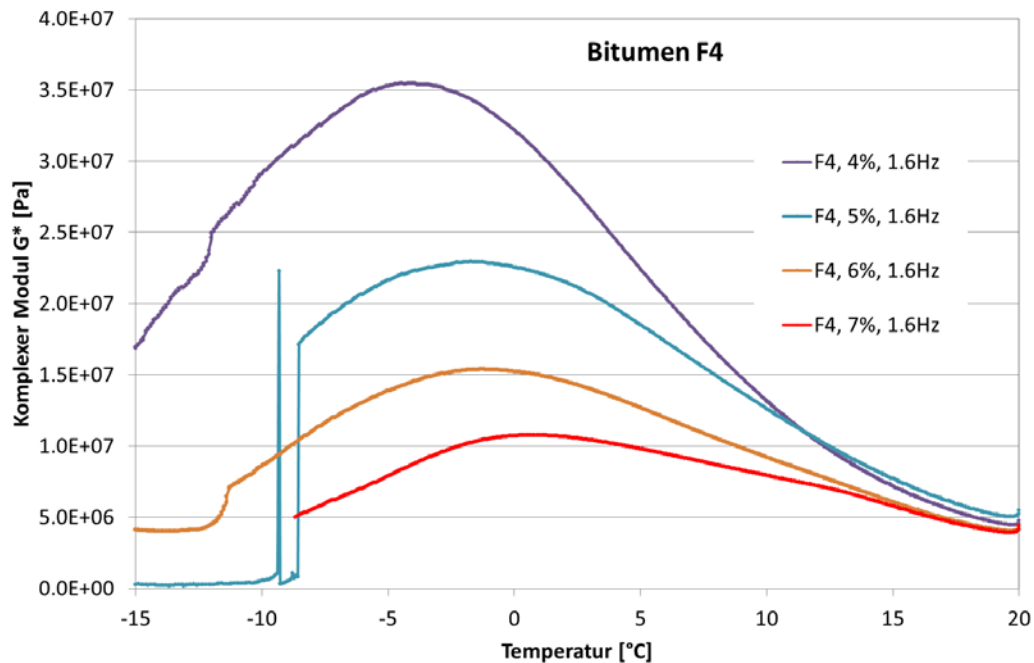


Abb. 36 Einfluss der Dehnamplitude  $\gamma$  auf die CSC-Diagramme des Bitumens

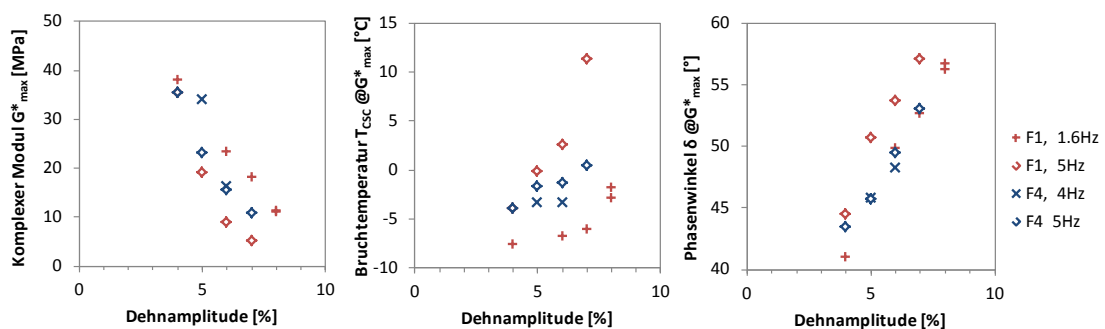


Abb. 37 Einfluss der Dehnamplitude  $\gamma$  auf  $G^*$ ,  $T_{G^*max}$  und  $\delta_{G^*max}$  bei unterschiedlichen Frequenzen und Bindemitteln

### 3.4.4 Einfluss der Frequenz

Die Verringerung der Frequenz hat einen ähnlichen Einfluss wie die Reduktion der Dehnamplitude und führt zu mehr Zyklen bis zum Versagen. Bei einer Reduktion der Frequenz von 6 auf 2 Hz verschiebt sich der CSC-Bruchpunkt bei einer Dehnamplitude von 5% um 8°C von +2°C nach -6°C. Die frequenzbedingte Verschiebung ist aber auch von der Dehnamplitude abhängig und bei niedriger Dehnamplitude beträgt der Unterschied nur noch wenige Grad Celsius. Auch in diesem Fall ist keine direkte Korrelation zwischen Frequenz und Bruchtemperatur vorhanden (Abb. 38).

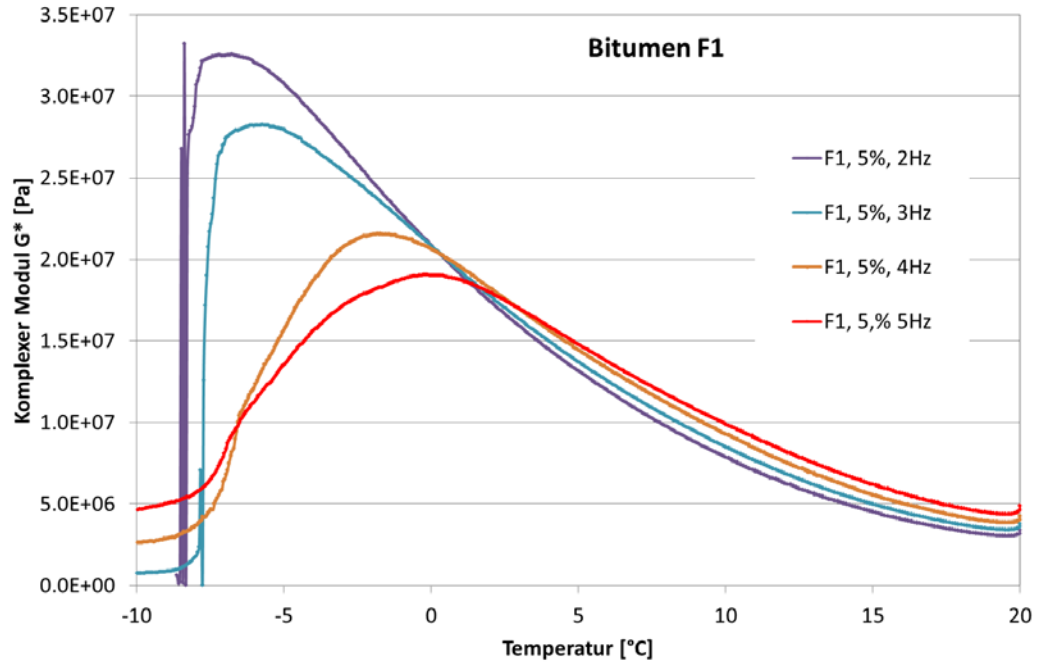


Abb. 38 Einfluss der Frequenz auf die CSC-Diagramme des Bitumens F1

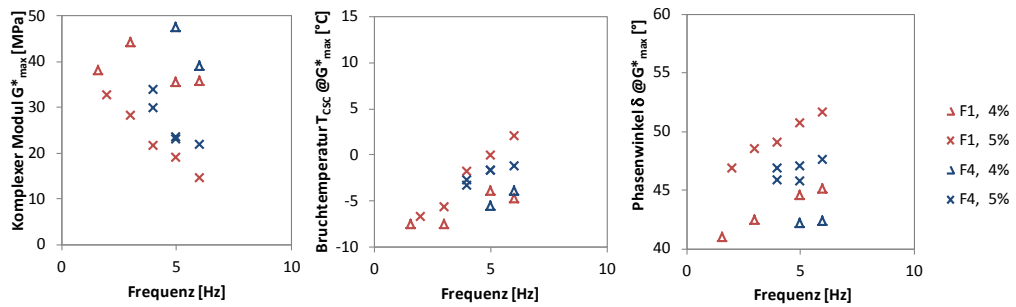


Abb. 39 Einfluss der Frequenz auf  $G^*$ ,  $T_{G^*max}$  und  $\delta_{G^*max}$  bei unterschiedlichen Dehnamplitude und Bindemitteln

### 3.4.5 Drehmomentbegrenzung

Bei allen Versuchen ist es wichtig, dass die DSR-Messungen im korrekten Drehmomentbereich des Prüfgerätes erfolgen. Die modernen DSR-Apparate reduzieren automatisch die Dehnamplitude wenn das gerätespezifische maximale Drehmoment erreicht wird, was jedoch beim CSC-Bruchversuch nicht erwünscht ist. Das Erreichen des maximalen Drehmomentes wird in der CSC-Kurve durch einen Knick sichtbar, falls das Drehmoment oder die Dehnamplitude nicht aufgezeichnet werden (Abb. 39). Daten, die bei konstantem Drehmoment, respektive reduzierten Dehnamplituden erhalten werden, sind deshalb nicht brauchbar.

Aus diesem Grund ist die Wahl einer hohen Frequenz von Vorteil, da dadurch die Dehnamplitude reduziert werden kann, um in einer angemessenen Prüfzeit dieselbe CSC-Bruchtemperatur zu erhalten. Vom Hersteller wird eine maximale Frequenz von 100 Hz angegeben, die jedoch für diese hohen Amplituden und Drehmomente bei tiefen Temperaturen tiefer liegt, da sonst die Gefahr besteht, dass das Rheometer Schaden nehmen kann. Zudem wird das Maximum des Moduls tiefer und somit die Bestimmung ungenauer. Aus diesen Gründen wurde als Kompromiss eine Prüffrequenz von 10 Hz gewählt. Diese liegt auch im Bereich der Frequenz, die bei Ermüdungsprüfungen von Asphaltprüfkörpern oft verwendet wird [39].

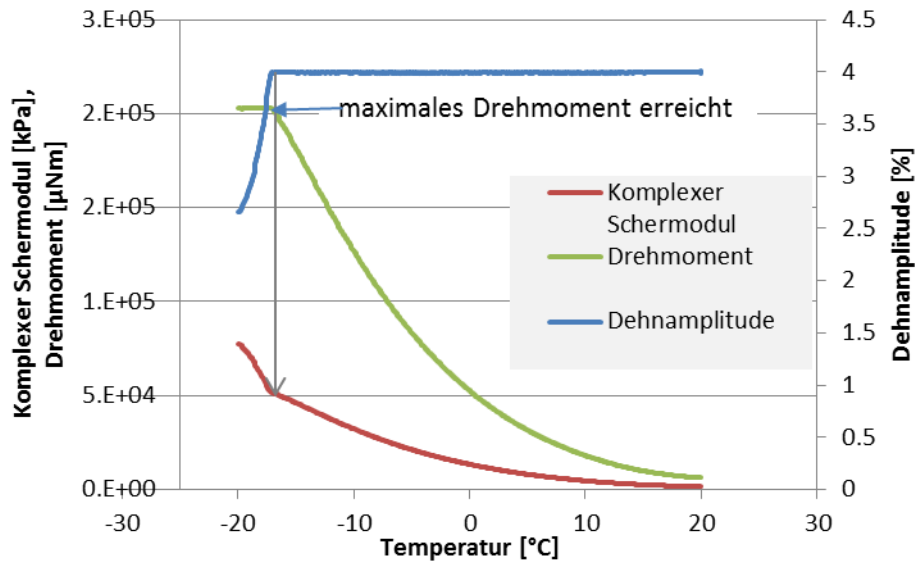


Abb. 40 Überschreitung des maximalen Drehmomentes bei einem weichen Bitumen

### 3.4.6 Erweiterung des Anwendungsbereiches durch Interpolation

Bei sehr weichen oder sehr harten Bindemitteln können die CSC-Bruchpunkte nicht mit den Standardparametern ermittelt werden (Abb. 41).

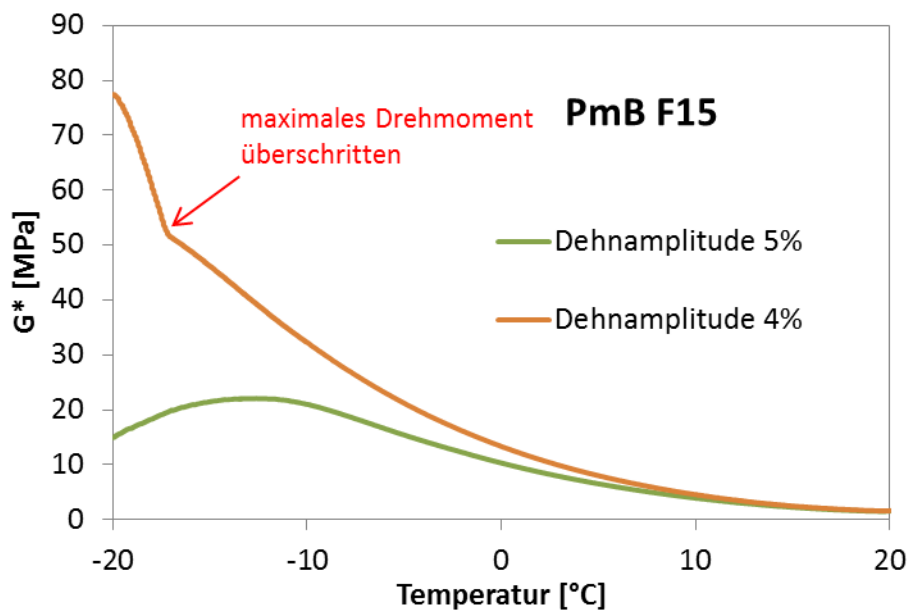
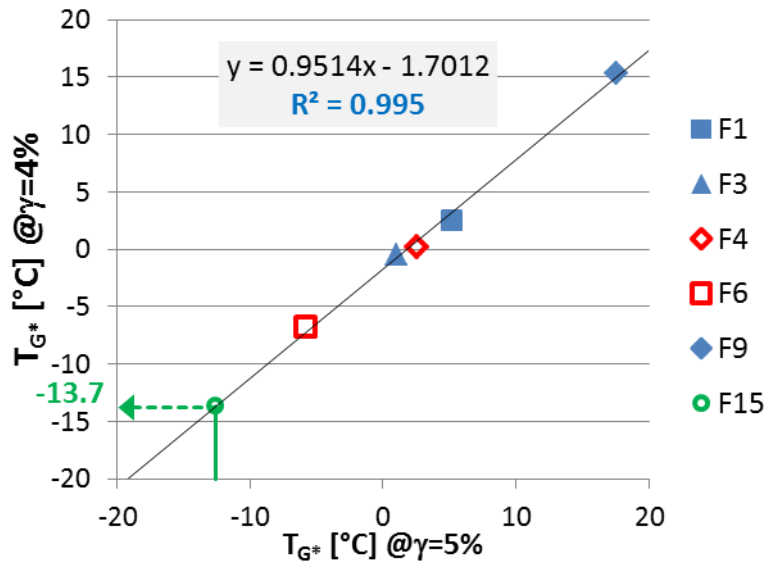


Abb. 41 CSC-Kurven des PmB F15 im Anlieferungszustand bei unterschiedlichen Dehnamplituden

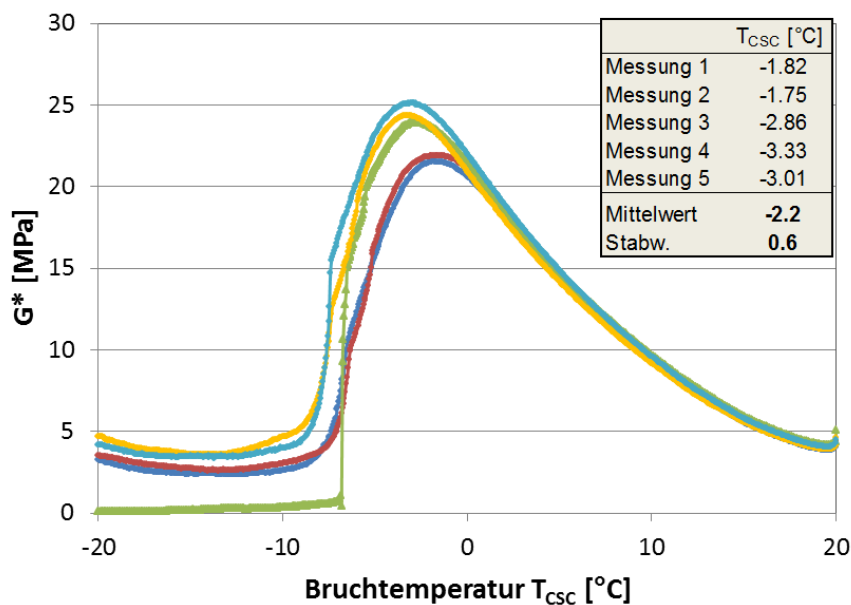


**Abb. 42** Korrelation der CSC-Bruchpunkte mit einer Dehnamplitude  $\gamma$  von 4% und 5%

Messungen mit zwei unterschiedlichen Dehnamplituden der Bindemittel im Anlieferungszustand haben gezeigt, dass eine sehr gute lineare Korrelation zwischen den CSC-Bruchpunkten mit verschiedenen Dehnamplituden besteht (Abb. 41). So konnte durch Extrapolation der CSC-Bruchpunkt des PmB F15 aus dem Bruchpunkt bei der Dehnamplitude 5% der Bruchpunkt bei der Dehnamplitude 4% berechnet werden (Abb. 42). In welchem Bereich diese lineare Korrelation gültig ist, wurde jedoch nicht näher untersucht. Insbesondere bei Bruchpunkten nahe dem Startpunkt, ist die Extrapolationsmethode vermutlich nicht möglich. Bei Messungen, wo das maximale Drehmoment überschritten wird, kann diese Methode aber vermutlich oft angewendet werden.

### 3.4.7 Präzision

Die Präzision der Prüfmethode wurde beim Bindemittel F1 genauer untersucht. Es wurden insgesamt 5 Wiederholversuche durchgeführt, ausgehend von vorbereiteten Proben. Wiederholversuche mit weniger Repetitionen wurden auch an polymermodifizierten und gealterten Proben durchgeführt. Während die modifizierten Bitumen ähnliche Präzisionswerte ergaben, lagen diese nach der Alterung in gewissen Fällen bis zu einem Faktor zwei höher (Abb. 43). Daraus lässt sich eine Wiederholpräzision von 2°C ableiten ( $k=2$ , Vertrauensbereich 95%), die Vergleichspräzision kann nicht angegeben werden, da keine Ringversuche durchgeführt wurden.



**Abb. 43** Präzision des CSC-Bruchversuches für das Bindemittel F1

### 3.4.8 Festlegung der Prüfparameter

Basierend auf den durchgeführten Parameterstudien wurden die folgenden Prüfparameter fixiert:

Dehnamplitude	4%
Frequenz	10 Hz
Starttemperatur	20°C
Endtemperatur	-20°C
Temperaturgradient	0.67°C/ min

Prüfkörperdimensionen: Durchmesser 8 mm, Höhe (Spalt) 2 mm

Versagenskriterium Bruchtemperatur beim Maximum des komplexen Moduls  $G^*$

Mit dem gewählten Temperaturgradient von 0.67°C/min ist es möglich eine Prüfung innerhalb vernünftiger Zeit durchzuführen. Für eine Temperaturdifferenz von 40°C werden 60 Minuten benötigt, inklusive Probenvorbereitung, Temperaturäquilibrierung, Wiedererwärmung und Reinigung sind etwa zwei Stunden notwendig. Dies ist keine schnelle Prüfung, da jedoch die Messung selbst automatisch abläuft, reduziert sich die reine Arbeitszeit auf ca. 15 Minuten pro Probe. Diese Parameterwahl stellt einen Kompromiss dar zwischen praktischen Überlegungen (Prüfzeit) und der Anforderung, möglichst alle Bindemittelsorten mit den gleichen Einstellungen prüfen zu können. Die Standardprozedur für den CSC-Bruchversuch ist im Anhang aufgeführt.

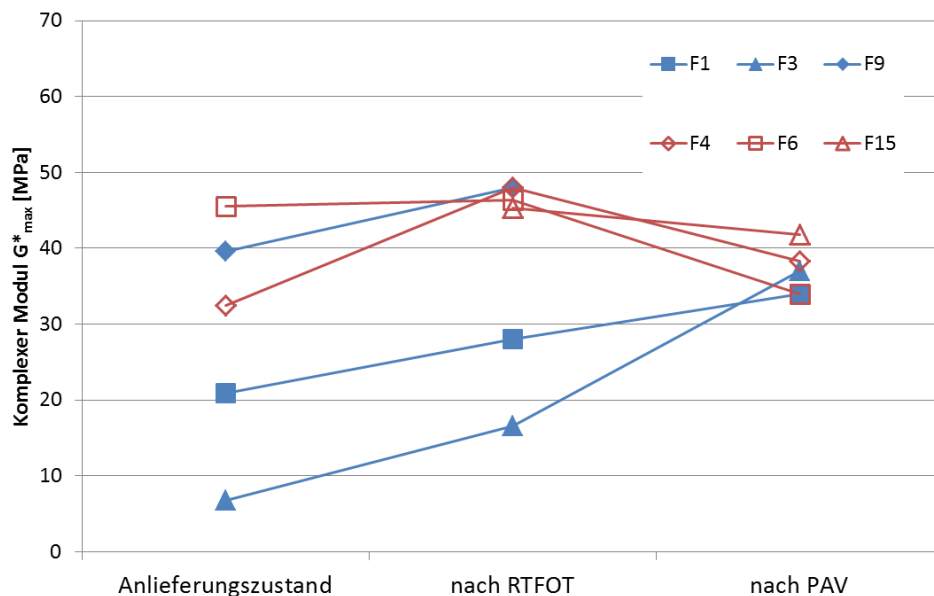
### 3.4.9 Kriterien für ungültige Messung

Jede CSC-Messung muss überprüft werden, ob sie korrekt verlaufen ist und die Resultate sinnvoll sind. Beispielsweise ist sicherzustellen, dass kein Adhäsionsbruch aufgetreten ist, das heisst eine Ablösung zwischen Platte und Bindemittel. Deshalb muss jeder Bruch visuell beurteilt werden. Die folgende Aufzählung enthält die wichtigsten Kriterien für eine ungültige Messung:

- $G^*$  steigt kontinuierlich an ohne ein Maximum zu erreichen: das Bindemittel ist zu weich, entweder muss die Auslenkung erhöht oder die Starttemperatur gesenkt werden.
- das Maximum wird sehr schnell erreicht, das heisst bei einer Temperatur von  $+15^\circ\text{C}$  und höher (bei Starttemperatur  $+20^\circ\text{C}$ ): das Bindemittel ist zu hart: entweder muss die Auslenkung verringert oder die Starttemperatur erhöht werden
- der Bruch findet nicht in der Ebene der Kerbe statt oder die Bruchfläche ist sehr unregelmässig
- das maximale Drehmoment wurde erreicht und die festgelegte Dehnamplitude nicht eingehalten
- die Kurve ist zu flach und das Maximum schwierig zu bestimmen. Entweder muss die Frequenz oder die Amplitude reduziert werden, was aber zu einer Verschiebung der CSC-Bruchtemperatur nach tieferen Temperaturen führt, da die Belastung pro Zeit kleiner ist.

### 3.4.10 Resultate des Hauptversuches

Alle Bindemittel im gealterten und ungealterten Zustand wurden mit den optimierten Prüfparametern geprüft.

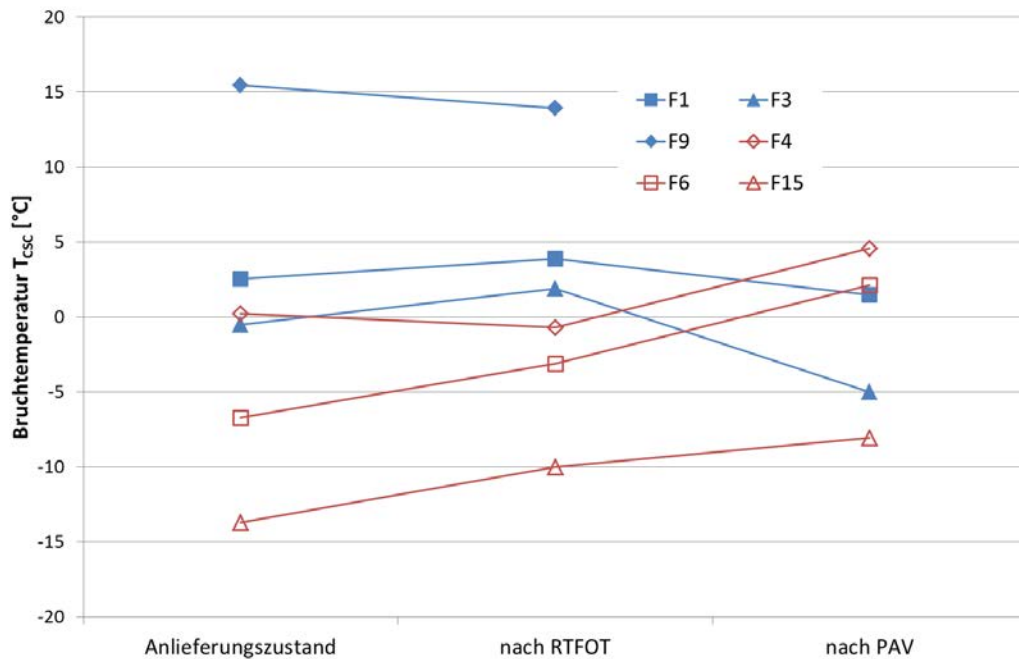


**Abb. 44** Darstellung  $G^*_{max}$  für modifizierte und nicht modifizierte Bitumen

Das Maximum des komplexen Moduls nimmt bei den nicht modifizierten Bitumen mit jedem Alterungsschritt zu (Abb. 44). Die Alterung ist jedoch nicht in allen Stufen und bei jedem Bitumen gleich. Während die Zunahme von  $G^*_{max}$  durch die RTFOT-Alterung ähnlich verläuft, ist sie nach der Alterung im PAV unterschiedlich: Das weiche Bitumen F3



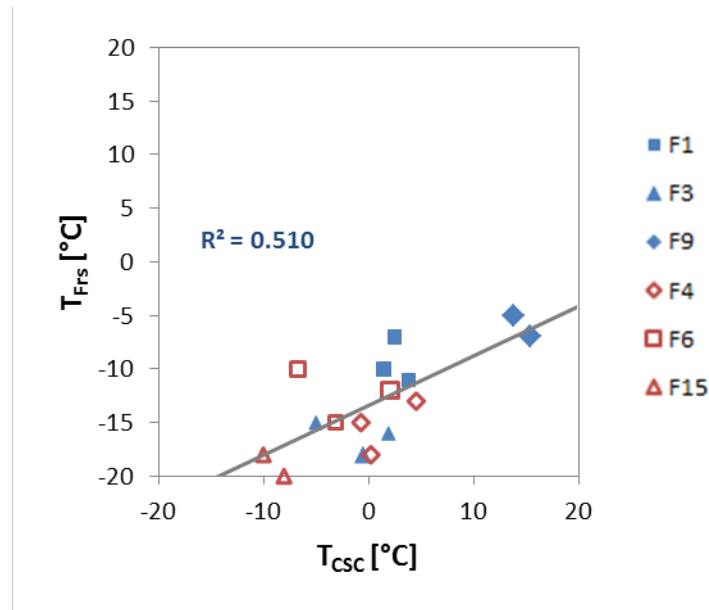
(Bitumen 180/220) zeigt einen deutlich stärkeren Anstieg als Bitumen F1. Das Bitumen F9 (Bitumen 10/20) war nach der Alterung im PAV zu hart um den CSC-Druckpunkt zu bestimmen, da der Bruch schon in der Nähe der Starttemperatur erfolgte. Bei den modifizierten Bitumen nimmt der komplexe Modul nach der Alterung in den meisten Fällen nicht mehr zu. Insbesondere nach der Alterung im PAV nimmt  $G^*$  bei allen drei untersuchten PmB ab. Es ist aber zu beachten, dass diese  $G^*$ -max-Werte keine echten Modulwerte sind sondern eine Art komplexen Modul vor dem Versagen darstellen und deshalb nicht einfach zu interpretieren sind.



**Abb. 45** Darstellung der CSC-Bruchtemperatur für modifizierte und nicht modifizierte Bitumen

Die Abb. 45 zeigt die an den Bindemitteln ermittelten CSC-Bruchpunkte vor und nach der Alterung. Im Vergleich mit dem Brechpunkt nach Fraass zeigen die CSC-Bruchpunkte entgegengesetzt den Erwartungen nur einen sehr geringen Einfluss durch die Laboralterung, andererseits ist im Anlieferungszustand ein deutlicher Einfluss der Viskosität auf die Prüfergebnisse feststellbar. Dies deutet daraufhin, dass nicht allein die Viskosität ausschlaggebend ist, sondern die morphologischen und chemisch-physikalischen Eigenschaften des Bindemittels. So zeigen polymermodifizierte Bindemittel deutlich besseres Verhalten als nicht modifizierte Bitumen. Allerdings ergibt sich nach der Alterung im PAV ein umgekehrtes Bild, wo sich das Verhalten der nicht modifizierten Bitumen gegenüber PmB und gegenüber ihrem Anlieferungszustand selbst überraschend verbessert. Es stellt sich somit die Frage welche Methode anzuzweifeln ist, der CSC-Bruchpunkt oder die Alterung mittels PAV. Auf jeden Fall sollte dieses Phänomen genauer untersucht werden und mit Resultaten von Prüfungen an Asphaltprüfkörpern und Feldversuchen verglichen werden.

Ausserdem ist bekannt, dass die Polymere bei der Alterung geschädigt werden können, indem die Ketten teilweise gespalten werden. Dadurch wird das Polymernetzwerk zerstört, was zu einer Reduktion der Viskosität führt. Einen Polymerabbau kann bei SBS-modifizierten Bitumen mittels Gelpermationschromatografie nachgewiesen werden, indem Veränderungen der Polymerkettenlänge gemessen werden. In dieser Arbeit konnten jedoch keine GPC-Analysen durchgeführt werden, weshalb nicht klar ist, ob die Polymerketten bei den untersuchten Bindemitteln nach der Alterung im PAV teilweise zerstört wurden und dadurch die CSC-Resultate beeinflussten.



**Abb. 46** Zusammenhang zwischen Brechpunkt nach Fraass und CSC-Brechpunkt

Die Korrelation zwischen Brechpunkt nach Fraass und dem CSC-Brechpunkt ist schwach, sowohl für die modifizierten als auch für nicht modifizierten Bitumen (Abb. 46). Auffallend ist, dass der CSC-Brechpunkt deutlich höher ist, dafür über einen grösseren Temperaturbereich verteilt ist. Da der CSC-Brechpunkt stark von den gewählten Parametern abhängt (Frequenz, Amplitude, Starttemperatur) stellt er kein absolutes Versagenskriterium dar. Dies ist für Ermüdungsprüfungen aber charakteristisch, da dort die Dehnamplitude ebenfalls die Anzahl Zyklen bis zum Versagen beeinflusst. Um die Resultate aus dem Labor mit der Wirklichkeit vergleichen zu können, werden Shift-Faktoren bestimmt. Dies müsste bei der CSC-Prüfung in ähnlicher Weise erfolgen. Näherungsweise könnten diese mit Hilfe einer anderen Prüfung im Labor wie beispielsweise am Bitumen mit dem Fracture Toughness Test oder an Mischgut-Prüfkörpern mit Kältezugsprüfungen der EN 12697-46 [40] bestimmt werden, da die Validierung über Feldstudien aufwändig und sehr kostenintensiv ist.

### 3.4.11 Schlussfolgerungen

- Die Prüfergebnisse sind stark von den gewählten Prüfparametern abhängig. Mit dem im Projekt gewählten Parametersatz ist es nicht möglich, alle Bindemittelsorten, respektive den ganzen Viskositätsbereich, zu prüfen. Eine viskositätsabhängige Starttemperatur könnte eine Lösung sein, die jedoch für jedes Bindemittel vorgängig bestimmt werden müsste. Eventuell wäre dies jedoch in der gleichen Messung möglich, wenn die Amplitude entsprechend klein gewählt wird, damit keine Schädigung eintritt.
- Die erzielte Wiederholpräzision ist gut. Für die Bestimmung der Vergleichspräzision müsste das Verfahren aber in einem Ringversuch durch verschiedenen Prüflaboratorien validiert werden.
- Im Rahmen dieser Forschung war es nicht möglich alle Parameter zu optimieren. Eine Optimierung von weiteren Faktoren wie Prüfkörpergeometrie (Dicke, Durchmesser), Temperaturrampe, etc. könnten zu einer Verbesserung der Prüfmethodik führen.
- Der Einfluss der Alterung auf die Resultate ist gering und zum Teil widersprüchlich, insbesondere für PmB. So ist beispielsweise, die Bruchtemperatur nach dem

PAV deutlich tiefer. Auch hier stellt sich wie beim FTT die Frage, ob ein Teil der Polymere zerstört worden sind, wodurch das Tieftemperaturverhalten verändert wird.

## 4 Schlussfolgerungen

Die im Antrag formulierten Ziele konnten nicht vollumfänglich erreicht werden. Die vielversprechendste Methode für einen Ersatz der Normprüfung „Breachpunkt nach Fraass“ ist der Fracture Toughness Test FTT. Allerdings sind die im letzten Ringversuch erzielten Präzisionsdaten nicht besser als beim Brechpunkt nach Fraass. Dies liegt zu einem grossen Teil daran, dass die Prüfung mit unterschiedlichen Prüfgeräten durchgeführt werden mussten, da es noch kein FTT-Prüfgerät auf dem Markt zu kaufen ist. Leider hat bisher noch kein Hersteller von Prüfgeräten Interesse gezeigt ein FTT-Gerät anzubieten. Solange keine einheitlichen Prüfgeräte (insbesondere Kühlbad) verwendet werden, wird es schwierig sein, die Vergleichspräzision zu verbessern. Positiv ist zu bemerken, dass alle Bindemittelsorten vor und nach der Laboralterung geprüft werden konnten.

Der CSC-Bruchpunktversuch zeichnet sich durch eine verbesserte Wiederholpräzision aus. Der Anwendungsbereich ist aber im Moment noch eingeschränkt, da sehr harte und sehr weiche Bindemittel nicht mit den gleichen Prüfparametern geprüft werden konnten. Dies könnte beispielsweise über eine flexible Starttemperatur, ähnlich wie beim Brechpunkt nach Fraass, oder über eine Interpolation mit andern Prüfparametern erreicht werden.

Abschliessend muss festgehalten werden, dass keine der beiden Prüfmethoden im Moment in der Lage ist, die Prüfung Brechpunkt nach Fraass zu ersetzen. Mögliche Lösungsansätze sind aufgezeigt, die durch zusätzliche Forschung oder Entwicklung eines Standardprüfgerätes realisiert werden könnten.

Bei der Auswertung der Prüfergebnisse stellte sich das Problem, dass nicht eindeutig entschieden werden konnte, welche Prüfergebnisse vernünftig sind und welche nicht, da keine Referenzmethode besteht. Aus dieser Sicht wäre es sinnvoll, die Versuche parallel zu Kälteprüfungen an Asphaltprüfkörpern durchzuführen.



## Anhänge

I	<b>Anhänge.....</b>	<b>55</b>
I.1	<b>Standardprozedur für die Durchführung des CSC-Bruchversuches .....</b>	<b>55</b>

# I Anhänge

## I.1 Standardprozedur für die Durchführung des CSC-Bruchversuches

### Prüfeinrichtung

Prüfgerät:	Dynamic Shear Rheometer
Messsystem:	Platte-Platte, 8 mm Durchmesser, Oberfläche aufgeraut
Temperaturbereich:	+ 20 ... - 20 °C
Maximales Drehmoment:	≥ 0.2 Nm

### Prüfparameter

Temperaturrampe	+20 ... -20°C, 0.67 °C/min
Dehnamplitude	4%
Oszillationsfrequenz	10 Hz

Die Prüfkörperherstellung und Einbau ist mit jener für die Messung des komplexen Moduls mit der 8-mm-Platte identisch und ist in der EN14770 beschrieben. Die in Silikonformen vorbereiteten Proben wurden auf die untere Platte des DSR appliziert, die vorgängig auf 60°C erwärmt wurde. Je nach Bindemittelviskosität kann diese etwas ändern. Sie muss hoch genug sein, damit eine gute Haftung zwischen Bindemittel und Bodenplatte erhalten wird, aber nicht so hoch, dass das Bindemittel wegfließen kann. Danach wurde die obere Platte auf die Trimmposition gefahren (Spalt 2.05 mm) und das überschüssige Bindemittel vorsichtig mit einem Metallspatel entfernt. Die Probe wird während 20 min ohne Oszillation bei der Starttemperatur äquilibriert. Danach wird das Prüfprogramm gestartet und die Probe wird mit einer konstanten Temperaturrampe abgekühlt, während sie gleichzeitig mit einer sinusförmigen Oszillation belastet wird.

Nach Ende der Prüfung wird der Stempel angehoben und kontrolliert, ob ein Adhäsionsbruch aufgetreten ist. Dies ist an blanken Stellen an der oberen oder unteren Platte zu erkennen, wo das Bindemittel sich abgelöst hat. Maximal sind 20% Ablösung tolerierbar. Bemerkung: Da die Probe nicht eingekerbt ist, tritt der Bruch nicht immer in der Mitte der Probe auf.





## Glossar

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
BBR	Bending Beam Rheometer Prüfgerät für Tieftemperaturprüfungen an Bitumen
CSC	Cyclic-Shear Cooling Test
DSR	Dynamisches Scherrheometer, Prüfgerät für Bindemittel
ERK	Erweichungspunkt Ring und Kugel, Prüfmethode für Bitumen und PmB
EN	Europäische Norm
FTT	Fracture Toughness Test
LVE	Linear-viskoelastischer Bereich
PAV	Pressure aging vessel, Methode für die Langzeitalterung von Bitumen
PmB	Polymermodifiziertes Bitumen
PTFE	Abkürzung für Teflon (Polytetrafluorethylen)
RTFOT	Rolling thin film oven test, Methode für die Kurzzeitalterung von Bitumen
SBS	Styrol-Butadien-Styrol-Blockpolymere, häufig verwendetes Elastomer für die Produktion von PmB
T <sub>CSC</sub>	Bruchpunkt ermittelt mittels CSC-Bruchversuch
T <sub>Frs</sub>	Brechpunkt nach Fraass
T <sub>FT</sub>	Bruchpunkt ermittelt mittels FTT
TS	Europäische Technische Spezifikation, eine Art Vornorm



## Literaturverzeichnis

- 
- [1] Isacson U, Zeng H (1997) **Relationships between bitumen chemistry and low temperature behavior of asphalt**. *Construct Build Mater* 11(2):83–91
- 
- [2] Li X, Marasteanu MO (2006) **The role of temperature and binder type on the fracture resistance of asphalt mixture at low temperature**. *Road Mat Pavement Design* 7(3):331–348
- 
- [3] Kim KW, Kweon SJ, Doh YS, Park T-S (2003) **Fracture toughness of polymer-modified asphalt concrete at low temperatures**. *Can J Civ Eng* 30:406–413
- 
- [4] Champion L, Gerard J-F, Planche J-P, Martin D, Anderson D (2001) **Low temperature fracture properties of polymermodified asphalts relationships with the morphology**. *J Mat Sci* 36:451–460
- 
- [5] EN 12593:2007 **Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Brechpunktes nach Fraass**, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
- 
- [6] Eckmann B, Mazé M, Le Hir Y, Harders O, Gauthier G (2004) **Checking low temperature properties of polymer modified bitumen. Is there a future for the Fraass breaking point?** In: *Proceedings of 3rd Eurobitume Congress, Vienna, Austria*
- 
- [7] Marasteanu, M., & et.al. (2007). **Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements-A** Transportation Pooled Fund Study (Vol. 43, pp. 338). Minneapolis: Department of Civil Engineering, University of Minnesota.
- 
- [8] Bahia, H. U., & Anderson, D. A. (1995). **Development of the bending beam rheometer; Basics and critical evaluation of the rheometer** ASTM Special Technical Publication (1241., pp. 28-50).
- 
- [9] EN 14771:2005 **Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Biege-kriechsteifigkeit - Biegebalkenrheometer (BBR)**, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
- 
- [10] Moriyoshi A, Shen J, Ezawa K, Tomoto T (2005) **Comparison of various testing methods for low-temperature properties of asphalts**. *J Jpn Pet Inst* 48(6):336–343
- 
- [11] Edwards WA, Hesp SAM (2006) **Compact tension testing of asphalt binders at low temperatures**. *Transp Res Rec* 1962: 36–43
- 
- [12] Marasteanu, M. O., & Zofka, A. (2006). **Development of Double Edge Notched Tension (DENT) Test for Asphalt Binders**. *Journal of Testing and Evaluation*, 35(3). doi: DOI: 10.1520/JTE100678
- 
- [13] Andriescu A, Hesp SAM (2009) **Time-temperature superposition in rheology and ductile failure of asphalt binders**. *Int J Pavement Eng* 10(4):229–240
- 
- [14] Velasquez R, Bahi'a H (2013) **Critical factors affecting thermal cracking of asphalt pavements: towards a comprehensive specification**. *Road Mat Pavement Design* 14: 187–200
- 
- [15] Ritchie RO (2011) **The conflicts between strength and toughness**. *Nat Mat* 10:817–822
- 
- [16] Lee NK, Hesp SAM (1994) **Low-temperature fracture toughness of polyethylene-modified asphalt binders**. *Transp Res Rec* 1436:54–59
- 
- [17] ASTM D 5045-96, **Plane Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials**. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 08.03
- 
- [18] ASTM E 399-90, **Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials**. Annual Book of ASTM Standards Vol. 03.01
- 
- [19] Hesp S (2004) **Development of a fracture mechanics-based asphalt binder test method for low temperature performance prediction**. Final report for Highway IDEA Project 84
- 
- [20] Chailleux E, Scholten E, Blomberg T, Hugener M, Gallet T, Büchler S, Lancaster IM, Jones A, Mouillet V, Lorino T (2012) **Round robin test of the fracture toughness test for the low temperature properties of bituminous binders**. In: *Proceedings of 5th Eurasphalt and Eurobitume Congress, Istanbul*
- 
- [21] CEN/TS 15963:2010 **Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Bruchwiderstandstemperatur mittels eines Drei-Punkt-Biegeversuches an einem gekerbten Probekörper**, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
- 
- [22] Sybilski D, Soenen H, Gajewski M, Chailleux E, Bankowski W. **Binder testing**. In: Partl MN et al., editors. *Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials*. RILEM state-of-the-art report 9; 2013.
-

- [23] Desmazes, C., Lecomte, M., Lesueur, D., & Philips, M. C. (2000). **A protocol for reliable measurement of zero-shear-viscosity in order to evaluate the anti-rutting performance of binders**. Paper presented at the Eurasphalt and Eurobitume Congress, Barcelona.
- [24] Philips, M. C., & Robertus, C. (1996). **Binder Rheology and Asphaltic Pavement permanent deformation; the Zero-Shear-Viscosity**. Paper presented at the Eurasphalt & Eurobitume Congress.
- [25] Sybilski, D. (1996). **Zero-Shear Viscosity: Phenomenons at measurement, interpretation and relation to permanent deformation**. Paper presented at the Eurasphalt and Eurobitume Congress, Strassburg.
- [26] Anderson, D. A., Le Hir, Y., Planche, J. P., Martin, D., & Shenoy, A. (2002). **Zero Shear Viscosity of Asphalt Binders** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1810, 54-62. doi: 10.3141/1810-07
- [27] Soenen, H., Blomberg, T., Pellinen, T., & Laukkanen, O. V. (2013). **The multiple stress creep-recovery test: A detailed analysis of repeatability and reproducibility**. Road Materials and Pavement Design, 14(SUPPL.1), 2-11.
- [28] Wasage, T. L. J., Stastna, J., & Zanzotto, L. (2011). **Rheological analysis of multi-stress creep recovery (MSCR) test**. International Journal of Pavement Engineering, 12(6), 561-568.
- [29] Sybilski D, Vanelstraete A, Partl MN. **Recommendation of RILEM TC 182-PEB on bending beam and rheometer measurements of bituminous binders**. Mater Struct 2004;37(272):539–46.
- [30] Polacco G, Vacin OJ, Biondi D, Stastna J, Zanzotto L. **Dynamic master curves of polymer modified asphalt from three different geometries**. Appl Rheol 2003;13(3):118–24.
- [31] Stroup Gardiner M., Newcomb, D. E., Adedeji, A., Macosko, C. , Bates, F. S. **“Evaluation of low temperature properties of polymer modified asphalts”**, 5th International RILEM Symposium on Mechanical Tests for Bituminous Materials (MTBM LYON 97), Lyon, France, 1997, p. 153-160.
- [32] Hintz C, Bahia H. (2013) **Understanding mechanisms leading to asphalt binder fatigue in dynamic shear rheometer (DSR)**. In: Proc, 88th Annual meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists, Denver, USA, 231-251.
- [33] Hintz, C. (2012). **Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue**. Doctoral Thesis, University of Wisconsin, Madison.
- [34] Kriz P, Stastna J, Zanzotto L. **Glass transition and phase stability in asphalt binders**. Road Mater Pavement Des 2008;9:37–65 (Special Issue).
- [35] Lu X, Isacsson U. **Effect of binder rheology on the low-temperature cracking of asphalt mixtures**. Road Mater Pavement Des 2001;2(1):29–47.
- [36] Edwards Y, Tasdemir Y, Isacsson U. **Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220 – low temperature performance**. Fuel 2006;85(7–8):989–97.
- [37] Cong P, Zhou B, Chen S, Chen H. **Low temperature rheological and mechanistic characteristics of three different types of asphalt binders**. Int J Pavement Res Technol 2011;4(5):307–12.
- [38] Mouillet V, De la Roche C, Chailleux E, Coussot P. **Thixotropic behavior of paving-grade bitumens under dynamic shear**. J Mater Civ Eng 2012;24(1):23–31.
- [39] Arand, W. (2004). **Zur prüftechnischen Ansprache der Ermüdungsbeständigkeit von Asphalten – Teil1**. Bitumen, 66(1), 2-7.
- [40] EN 12697-46:2012 **Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 46: Widerstand gegen Klterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen**, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
- [41] EN 12607-1:2007 **Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft - Teil 1: RTFOT-Verfahren**, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
- [42] EN 14769:2012 **Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehlter (PAV)**, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
- [43] Chailleux, E., Mouillet, V., **Determination of the low temperature bitumen cracking properties: fracture mechanics principle applied to a three point bending test using a non homogeneous geometry**. Proceedings, ICAP, August 2006, Quebec
- [44] Chailleux E., Gaillet, L., Hamon, D. , Mouillet, V. **Development and interpretation of a test to discriminate between the cracking behavior of normal bitumen binders and polymer modified binders**, 10th International Conference on Asphalt Pavements ICAP, 2006, .

- 
- [45] Hoare TR, Hesp SAM (2002) **Low-temperature fracture testing of asphalt binders regular and modified systems**. Transp Res Rec 1728:36-42
- 
- [46] EN 1426:2007 **Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration**, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
- 
- [47] EN 1427:2007 **Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Erweichungspunktes - Ring- und Kugel-Verfahren**, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
- 
- [48] Chailleux E, Hamon H, Mouillet V (2006) **Determination of the low temperature bitumen cracking properties: Fracture mechanics principle applied to a three points bending test using a nonhomogeneous geometry**. In: Proceedings of 10th International conference on Asphalt Pavement, Québec, Canada
- 
- [49] Bueno M, Hugener M, Partl MN (2013) **Fracture toughness aspects for assessing low temperature behaviour of bituminous binders**. In: Proc, Int RILEM Symposium on Multi-Scale Modeling and Characterization of Infrastructure Materials, Stockholm, Sweden
- 
- [50] Bahia HU, Zhai H, Bonnetti K, Kose S. **Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders**. J Assoc Asph Paving Technol 1999;68:1–34.
- 
- [51] Anderson DA, Le Hir YM, Maresteanu MO, Planche J-P, Martin D, Gauthier G. **Evaluation of fatigue criteria for asphalt binders**. Transp Res Rec 2001;1766:48–55.
- 
- [52] Hintz C, Velasquez R, Johnson C, Bahia H. **Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification**. Transp Res Rec 2011;2207: 99–106.
- 
- [53] Gubler R, Partl MN, Riedi M, Angst C (2003) **Test methods for the behavior of bituminous binders at low temperature**. In: Proceedings of 6th RILEM Symposium PTEBM'03, Zurich
- 
- [54] Masson J-F, Collins P, Polomark, G. **Steric Hardening and the Ordering of Asphaltenes in Bitumen**. Energy & Fuels 2005 19 (1), 120-122.
- 
- [55] Bueno, M., Hugener, M., Partl, M.N.: Low Temperature Characterization of Bituminous Binders with a New Cyclic Shear Cooling (CSC) Failure Test. Construction and Building Materials, 58, pp16-24, (2014).
- 
- [56] Bueno, M. Hugener, M., Partl, M.N.: Low temperature behavior of bituminous binders. Fracture toughness test. Materials and Structures Published online (2014). DOI 10.1617/s11527-014-0378-4
-



# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 28.8.2014

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS2006/001

Projekttitel: Neue Methoden zur Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln

Enddatum: 01.08.2014

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

In dieser Forschungsarbeit wurden zwei neue Methoden für die Charakterisierung der Tieftemperatureigenschaften von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln untersucht und weiterentwickelt. Die erste Prüfmethode FTT (Drei-Punkt-Biegeversuch an einem gekerbten Probekörper) ergab nach der Verbesserung der Prüfkörperherstellung konsistente Resultate. Nach der Alterung mittels RTFOT und PAV wurde für alle Bindemittel eine Erhöhung der Bruchtemperatur beobachtet. Dies kann durch eine Versprödung des Bindemittels erklärt werden. Zudem konnte ein deutlicher Unterschied zwischen polymermodifizierten und nicht modifizierten Bindemitteln ähnlicher Viskosität nachgewiesen werden. Ein Ringversuch, an dem im Rahmen dieses Projektes teilgenommen wurde, ergab aber noch ungenügende Vergleichspräzisionen die im Bereich des Brechpunktes nach Fraass lagen. Dies liegt unter anderem daran, dass keine einheitlichen Prüfgeräte existieren, da sie noch nicht kommerziell erhältlich sind. So wird die Prüfung je nach Prüfgerät in Luft oder unterschiedlichen Kühlfüssigkeiten durchgeführt. Daraus zeigt sich, dass die Verwendung eines einheitlichen Prüfgerätes unabdingbar ist für eine Verbesserung der Vergleichspräzision zwischen den Prüflaboratorien.

Der CSC-Bruchversuch (Cyclic Shear Cooling Failure Test) wurde an der Empa neu entwickelt und kann mit einem kommerziell erhältlichen Scherrheometer (DSR) durchgeführt werden. Die Wiederholpräzision ist in den meisten Fällen sehr gut, eine Vergleichspräzision ist aber noch nicht vorhanden. Die CSC-Bruchpunkte der polymermodifizierten Bin-demittel im Anlieferungszustand liegen deutlich tiefer als von nicht modifizierten Bitumen und zeigen damit deutlich den Einfluss der Polymermodifikation im Bindemittel auf. Nach der Alterung (RTFOT/PAV) hingegen sind diese Unterschiede teilweise verschwunden. Insbesondere das Alterungsverhalten von nicht modifizierten Bitumen, die nach der PAV-Alterung tiefere CSC-Bruchpunkte aufweisen, kann nicht erklärt werden. Die Resultate sind stark von den gewählten Prüfparametern wie Frequenz, Dehnamplitude und Starttemperatur abhängig. Es ist nicht gelungen, alle Bindemittelsorten mit den gleichen Parametern zu messen.

Für die Normierung des CSC-Bruchversuches sind weitere Verbesserungen und Abklärungen notwendig. Abschliessend ist festzuhalten, dass die beiden untersuchten Prüfmethode noch nicht reif sind, um die bestehende Prüfmethode Brechpunkt nach Fraass zu ersetzen, obwohl das verbesserte Tieftemperaturverhalten von polymermodifizierten Bindemitteln im Anlieferungszustand besser reflektiert werden als beim Brechpunkt nach Fraass. Entweder ist die Vergleichspräzision noch ungenügend oder die Prüfbedingungen müssen noch verbessert werden.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

#### Zielerreichung:

Die im Antrag formulierten Ziele konnten nicht vollumfänglich erreicht werden. Die vielversprechendste Methode für einen Ersatz der Normprüfung „Breachpunkt nach Fraass“ ist der Fracture Toughness Test FTT. Allerdings sind die im letzten Ringversuch erzielten Präzisionsdaten nicht besser als beim Breachpunkt nach Fraass. Dies liegt zu einem grossen Teil daran, dass die Prüfung mit unterschiedlichen Prüfgeräten durchgeführt werden mussten, da es noch kein FTT-Prüfgerät auf dem Markt zu kaufen ist. Leider hat bisher noch kein Hersteller von Prüfgeräten Interesse gezeigt ein FTT-Prüfgerät anzubieten. Solange keine einheitlichen Prüfgeräte (insbesondere Kühlbad) verwendet werden, wird es schwierig sein, die Vergleichspräzision zu verbessern.

#### Folgerungen und Empfehlungen:

Die untersuchten Prüfmethode sind noch nicht bereit, um den Breachpunkt nach Fraass zu ersetzen. Es gibt deshalb die folgenden Möglichkeiten:

- die bisherige Prüfmethode Breachpunkt nach Fraass zu verbessern
- eine der beiden Methoden FTT oder CSC-Bruchpunkttest weiterzuentwickeln
- eine vollständig neue oder aus einem anderen Materialbereich abgeleitete Prüfmethode zu entwickeln

Angesichts der erwähnten Schwierigkeiten, könnte es sinnvoll sein, die bestehende alte Prüfung mit den heute möglichen neuen technischen Methoden vollständig neu zu untersuchen, um die Ursache der schlechten Vergleichspräzision zu eruieren.

#### Publikationen:

Bueno, M., Hugener, M., Partl, M.N.: (2014) Low Temperature Characterization of Bituminous Binders with a New Cyclic Shear Cooling (CSC) Failure Test. Construction and Building Materials, 58, pp16-24.

Bueno, M. Hugener, M., Partl, M.N.: Low temperature behavior of bituminous binders. Fracture toughness test. Materials and Structures, DOI 10.1617/s11527-014-0378-4.

#### Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Hugener

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Empa, Abteilung Strassenbau/Abdichtungen

#### Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Doberda 30.10.14



## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Die im Antrag formulierten Ziele konnten nicht vollumfänglich erreicht werden. Die vielversprechendste Methode für einen Ersatz der Normprüfung „Breachpunkt nach Fraass“ ist der Fracture Toughness Test FTT. Aber solange keine einheitlichen Prüfgeräte (insbesondere Kühlbad) verwendet werden, wird es schwierig sein, die Vergleichspräzision zu verbessern. Obwohl das erwartete Ergebnis nicht erreicht werden konnte, wurde diesen Forschungsauftrag gut durchgeführt.

##### Umsetzung:

Mit den Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojektes kann die Norm "Breachpunkt nach Fraass" leider nicht ersetzt sein. Es gibt momentan keine mögliche Umsetzung.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

Das Problem der Charakterisierung der Tieftemperatureigenschaften wurde nicht abschliessend gelöst. Es ist zu entscheiden, welche Methode weiterentwickelt werden soll.

##### Einfluss auf Normenwerk:

Im Moment kann die Norm Brechpunkt nach Fraass nicht ersetzt werden.

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Nättorp


Vorname: Anders

Amt, Firma, Institut: Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

 26.9.2014

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3

für die FK 3 Baustoffe:  
D. Bander 30.10.14 

Seite 3 / 3

## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtsgeschoss für die Verdichtungskontrolle von Foundationsschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbaupflaster mit bituminösen Bindemitteln	2014
1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbaupflaster in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung	2013
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	2013
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchsanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmen Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektierungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1418	VSS 2008/402	Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen	2012
1417	FGU 2009/002	Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Vieillissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologientransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsanbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppenwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkieranlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS"	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labor-massstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme	2011
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN	2010
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmassnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisell	2009
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeugrückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebsparkeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDAinSVT Einsatz modellbasierter Datentransfernormen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Synthesebericht	2008
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrsintensiven Einrichtungen (VE)	2009
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut	2007
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
660	AGB 2008/002	Indirekt gelagerte Betonbrücken - Sachstandsbericht	2014
659	AGB 2009/014	Suizidprävention bei Brücken: Follow-Up	2014
658	AGB 2006/015_OBF	Querkraftwiderstand vorgespannter Brücken mit ungenügender Querkraftbewehrung	2014
657	AGB 2003/012	Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen	2013
656	AGB 2009/015	Experimental verification of integral bridge abutments	2013
655	AGB 2007/004	Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges Based on Actual Traffic Loads	2013
654	AGB 2005-008	Thermophysical and Thermomechanical Behavior of Cold-Curing Structural Adhesives in Bridge Construction	2013
653	AGB 2007/002	Poinçonnement des pontsdalles précontraints	2013
652	AGB 2009/006	Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode	2013
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010



Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlag-schutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	2009
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009