

# **Kälteverhalten von bituminösen Bindemitteln**

## **Comportement des liants bitumineux à basse température**

**IMP Bautest AG, Institut für Materialprüfung, Oberbuchsitzen  
Ch. Angst, Dr. sc. techn.  
M. Riedi, dipl. Werkstoffing. ETH**

**Forschungsauftrag VSS 1995/019 (06/95) auf Antrag des  
schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute**

**September 2002**



# **Kälteverhalten von bituminösen Bindemitteln**

## **Comportement des liants bitumineux à basse température**

**Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation  
Bundesamt für Strassen  
Forschungsauftrag VSS 1995/019 (06/95)**

**IMP Bautest AG, Institut für Materialprüfung, Oberbuchsitzen  
Ch. Angst, Dr. sc. techn.  
M. Riedi, dipl. Werkstoffing. ETH**



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>3</b>
1.1 Résumé	4
1.2 Summary	5
<b>2. PROBLEMSTELLUNG</b>	<b>6</b>
2.1 Stand des Wissens	6
2.2 Ziele des Forschungsauftrages	7
<b>3. BRECHPUNKT NACH FRAASS</b>	<b>8</b>
<b>4. BENDING BEAM RHEOMETER</b>	<b>10</b>
4.1 Einführung	10
4.2 Beschrieb der Versuchsdurchführung	11
4.3 Methodenentwicklung	15
4.4 Erste Erfahrungen	22
4.5 Präzision des Versuches	22
4.5.1 Zweck des Ringversuches	22
4.5.2 Organisation	22
4.5.3 Resultate	25
4.5.4 Kommentar	30
4.5.5 Folgerungen und Ausblick	34
<b>5. KRAFTDUKTILITÄTS-PRÜFUNG</b>	<b>35</b>
5.1 Allgemeines	35
5.2 Prüfmethode	36
5.3 Berechnung der Energie	38
5.4 Ergebnisse	40
<b>6. KOMPLEXER MODUL</b>	<b>41</b>
6.1 Organisation der Versuche	41



<b>6.2 Methodik</b>	<b>41</b>
6.2.1 Begriffe	41
6.2.2 Prüfprinzipien	41
<b>6.3 Auswahl der untersuchen Materialien</b>	<b>42</b>
<b>6.4 Durchführen der Untersuchungen</b>	<b>43</b>
6.4.1 Bestimmen der mechanischen Kennwerte mit dem DSR	43
6.4.2 Bestimmung der mechanischen Kennwerte mit dem KAST-BIN	43
6.4.3 Bestimmen des Abkühlverhaltens mit dem KAST-BIN	44
<b>6.5 Ergebnisse</b>	<b>45</b>
6.5.1 Mechanische Kennwerte mit dem DSR	45
6.5.2 Mechanische Kennwerte mit dem KAST-BIN	46
6.5.3 Abkühlverhaltens mit dem KAST-BIN	50
6.5.4 Vergleich der Modulwerte	56
<b>6.6 Folgerungen, Empfehlungen</b>	<b>58</b>
<b>7. DIREKTER ZUGVERSUCH LCPC</b>	<b>59</b>
7.1 Prüfmethode und Prüfplan	59
7.2 Ergebnisse	60
7.3 Kommentar	62
7.3 Kommentar	63
<b>8. VERGLEICH DER PRÜFVERFAHREN</b>	<b>65</b>
8.1 Untersuchte Bindemittel	65
8.2 Gegenüberstellungen	65
8.3 Kommentar	75
<b>9. VERGLEICH MIT VERHALTEN AUF STRASSE</b>	<b>76</b>
9.1 Literaturstudium	76
9.2 Versuchstrecken	78
<b>10. FOLGERUNGEN</b>	<b>82</b>
10.1 Prüfmethoden	82
10.2 Korrelationen zwischen den Prüfmethoden	83
10.3 Vergleich der Prüfmethoden mit dem Verhalten auf der Strasse	84
<b>11. AUSBLICK</b>	<b>85</b>
<b>12. LITERATUR</b>	<b>86</b>



# 1. Zusammenfassung

Die Zielsetzung dieses Forschungsauftrages bestand darin, eine einfache, rasche und zuverlässige Methode für die Prüfung des Kälteverhaltens sowohl von modifizierten als auch von nicht modifizierten bituminösen Bindemitteln bei tiefen Temperaturen zu evaluieren.

Das Forschungsprojekt soll Entscheidungsgrundlagen für die europaweit laufende Diskussion zur Ablösung des bisherigen Verfahrens "Brechtspunkt nach Fraass" liefern.

Im Vordergrund der Untersuchung stand der Bending Beam Rheometer BBR. Bei diesem Versuch wurde eine Parameterstudie durchgeführt, um die Empfindlichkeit des Verfahrens auf kleine Änderungen der Prüfbedingungen zu untersuchen.

Anschliessend wurde ein internationaler Ringversuch durchgeführt und gemäss ISO 5725 statistisch ausgewertet. Somit konnte die Präzision des Versuches bestimmt werden.

Die Arbeit hat sich intensiv mit den heute zur Verfügung stehenden Prüfverfahren zur Beurteilung des Kälteverhaltens von bituminösen Bindemitteln beschäftigt. Durch Gegenüberstellungen der verschiedenen Prüfverfahren wurde versucht Zusammenhänge zu erkennen, um ähnliche Versuche zu gruppieren und allfällige Doppelspurigkeiten zu vermeiden. Es wurden auch neue Lösungsansätze untersucht, bei denen das Kälteverhalten unter kombinierten Belastungen (mechanisch und kryogen) angesprochen wird.

Auf einer Versuchsstrecke mit 16 verschiedenen Bindemitteln in der Deckschicht wurde das Verhalten der Beläge in einem langen Zeitraum beobachtet. Das Bindemittel wurde nach verschiedenen künstlichen Alterungen im Labor sowie in verschiedenen Zeitabständen aus dem Mischgut rückgewonnen und untersucht. Bei der Untersuchung wurden teilweise die gleichen Prüfmethode wie oben beschrieben gewählt. Somit konnte ein Bezug zwischen dem Verhalten auf der Strasse und den Ergebnissen im Labor gesucht werden.

Dazu wurden auf die Risstiefe und das Rissausmass nach 10 Jahren mit verschiedenen Laboruntersuchungen verglichen. Es konnten Korrelationen (bis zu  $R^2 = 0.86$ ) zwischen dem Rissausmass und dem BBR gefunden werden. Sehr erfreulich ist die gute Korrelation zwischen dem BBR an im Labor gealtertem Bindemittel und dem Rissverhalten auf dem Objekt.

Die Vergleichsstrecken liegen in einem klimatisch relativ milden Gebiet. Die auf dem Objekt registrierten winterlichen Temperaturen sind zu wenig tief um thermisch induzierte Risse zu erzeugen. Die festgestellten Risse sind somit auf eine Überlagerung der Beanspruchungen durch den Verkehr und durch das Klima zurückzuführen. Da diese Überlagerung der Beanspruchung in der Schweiz (und Europa) die häufigste Ursache für die Rissbildung darstellt, ist die festgestellte Korrelation mit dem BBR besonders erfreulich.

In einem dynamischen koaxialen Schubtest wurde während des Versuches die Temperatur abgesenkt. Diese neuartige Versuchsanordnung erlaubte interessante Folgerungen bezüglich den Prüfverfahren.

Bei Prüfverfahren die bereits ein Anreissen erfassen, werden harte Bindemitteln tendenziell unterbewertet, da eine teilweise Schädigung einem völligen Versagen gleichgesetzt wird. Umgekehrt werden bei Prüfverfahren, die nur das völlige Durchreissen erfassen, harte Bindemittel überbewertet, da teilweise Schädigungen gar nicht erfasst werden.

Die bisherigen Bemühungen das Kälteverhalten durch Laborversuche zu beschreiben, waren mehrheitlich auf einmalige Belastungen beschränkt. Sowohl der BBR als auch die Kältekontraktionsversuche stellen eine einmalige Belastung des Prüfkörpers dar. Die Rissbildung bei moderaten Temperaturen unter Wiederholbelastung ist noch zu wenig erforscht. In der vorliegenden Arbeit wurde ein vielversprechender Ansatz aufgezeigt, mit welchem mehr über die Vorgänge der Rissbildung in Zusammenhang mit dem Ermüdungsverhalten erfahren werden könnte.

## 1.1 Résumé

Le but de ce mandat de recherche constitue à évaluer une méthode d'essai simple, rapide et fiable pour l'analyse du comportement au froid, autant pour les liants bitumineux modifiés que non modifiés.

Le projet de recherche doit livrer des éléments de décision pour la discussion au niveau européen concernant le remplacement du procédé encore actuel « Point de rupture selon Fraass ».

En premier plan se trouve le Bending Beam Rheometer BBR. Une étude de ses paramètres a été exécutée afin de déterminer la sensibilité de ce procédé par rapport à de légères variations de ses conditions d'essai.

Finalement un essai croisé international a été exécuté et grâce au dépouillement statistique des résultats selon ISO 5725, sa précision a pu être déterminée.

Un des points central de ce travail fut l'étude des méthodes d'essai actuelles à disposition pour l'appréciation du comportement au froid des liants bitumineux. Par le biais de comparaisons entre les différentes méthodes d'essai, il a été tenté de mettre en évidence des rapports, dans le but de grouper les essais semblables et d'éviter ainsi tout cheminement double.

De nouvelles ébauches de solution furent également testées, avec lesquelles le comportement au froid a été sollicité sous des contraintes combinées (mécaniques et cryogènes).

Le comportement d'une planche d'essai composée de 16 différents liants bitumineux dans la couche de roulement, a été observée sur un laps de temps important. Les liants ont été analysés après différents vieillissements artificiels en laboratoire ainsi qu'extraits du revêtement à certains intervalles de temps et analysés. Pour les analyses, partiellement les mêmes procédures d'essai que décrites ci-dessus ont été utilisées. Ainsi un rapport entre les essais effectués en laboratoire et le comportement du revêtement in situ a pu être cherché.

De plus la profondeur de fissuration et son indice après 10 ans, ont été comparés à différents essais de laboratoire. Des corrélations (jusqu'à  $R^2 = 0.86$ ) entre l'indice de fissuration et le BBR ont pu être mis en évidence. Il est très réjouissant de constater la bonne corrélation entre le comportement à la fissuration de l'objet et le BBR effectué sur le liant vieilli en laboratoire.

Les planches comparatives se trouvent dans un climat relativement tempéré. Les températures hivernales qui ont été mesurées sur l'objet ne sont pas assez basses pour pouvoir provoquer une fissuration thermique inductive. La cause des fissures qui ont été remarquées sur l'objet est à trouver dans la combinaison de contraintes dues au trafic et aux conditions climatiques. Etant donné que cette combinaison de contraintes représente en Suisse (et en Europe) la cause principale de fissuration, la corrélation remarquée avec le BBR en est d'autant plus réjouissante.

Lors d'un essai dynamique de cisaillement coaxial, la température a été progressivement réduite. Ce nouvel essai a permis de mettre en avant des conclusions intéressantes concernant les procédures d'essai.

Dans le cas de procédures d'essai qui possèdent comme critère une entame de fissure, les bitumes durs ont tendance à être sous-évalués, car un dommage partiel est identifié à une défaillance complète. Au contraire, les procédures d'essai qui se basent sur une défaillance complète surestiment les bitumes durs, car les dommages partiels ne sont pas retenus.

Les efforts pour évaluer le comportement au froid qui ont été menés jusqu'à présent, furent en grande partie limités à des contraintes uniques. Autant le BBR que l'essai de retrait thermique empêché représentent une contrainte unique de l'échantillon. La formation de fissures lors de contraintes répétées et des températures modérées n'a pas encore été suffisamment étudiée. Le travail actuel offre une solution prometteuse, grâce à laquelle le processus de fissuration en corrélation avec le comportement à la fatigue peut être mieux approché.

## 1.2 Summary

The objective of this research consisted of evaluating a simple, quick and reliable method for the cold behaviour testing both of modified and unmodified binders at low temperatures. The research project shall provide decision-making principles for the European-wide ongoing discussion to replace the previous "*Fraass Breaking Point*" method.

In the foreground of the investigation stood the Bending Beam Rheometer BBR. With this test a parameter study was undertaken to investigate the sensitivity of the procedure to small changes in the test conditions. Subsequently, an international round robin test was carried out and statistically evaluated in accordance with ISO 5725. Thereby, the accuracy of the test could be determined.

The work looked intensively at currently available testing methods to assess the cold behaviour of bituminous binders. By comparing the different testing methods, we tried to identify connections to allow similar tests to be grouped together and to avoid possible duplications. New solutions were tried with which the cold behaviour under combined loading (mechanical and cryogenic) is addressed.

In a test section of road consisting of 16 different binders in the wearing coarse, the behaviour of the pavement was observed over a long time period. The binder was recovered and investigated in the laboratory according to different artificial ageing processes as well as at different time intervals. Partly the same test methods as described above were selected for the investigation. Thus a reference between the behaviour in the road and the laboratory results could be sought.

In addition, the crack depth and the crack extent were compared after 10 years with different laboratory tests. Correlation (up to  $R^2 = 0.86$ ) between the crack extent and the BBR could be found. The good correlation between the BBR of the laboratory aged binder and the crack behaviour of the object is very pleasing.

The test sections of road are situated in climatically a relatively mild area. The registered winter temperatures of the object are not low enough to produce thermally induced cracks. The determined cracks are therefore due to an interaction of the stresses from the traffic and from the climate. Since this interaction of stresses is the most common cause of cracking in Switzerland (and Europe), this determined correlation with the BBR is especially pleasing.

In a dynamic coaxial shear test the temperature was lowered during the test. This novel test configuration showed interesting conclusions concerning the testing method.

The previous efforts to describe the behaviour at low temperatures with laboratory tests were mainly restricted to single loading. Both the BBR and the cold tension tests describe single loading of the test specimen. The cracking at moderate temperatures under repeated loading is still too little researched. In the presented work a promising start was shown with which more knowledge about the procedure of the cracking in connection with the fatigue behaviour could be gained.

## 2. Problemstellung

Als Folge der ständig steigenden Verkehrsbelastung werden die Beläge auf stark beanspruchten Objekten vermehrt im Hinblick auf eine hohe Standfestigkeit optimiert. Dabei wird bewusst ein erhöhtes Risiko der Rissbildung in Kauf genommen. Ausgedehnte Rissprobleme - nicht nur in den Bergen - sind eine direkte Folge dieser Entwicklung. Um einen drohenden Verlust der Bausubstanz zu verhindern, sind Beläge gefragt, welche sowohl ein günstiges Wärme- als auch Kälteverhalten aufweisen.

Eine mögliche Lösung besteht z.B. in der Verwendung von polymermodifizierten Bindemitteln PmB. Gleichzeitig muss jedoch zugegeben werden, dass mit den normierten Prüfverfahren das Kälteverhalten bituminöser Bindemittel messtechnisch nicht befriedigend erfasst werden kann. Traditionelle Prüfmethode (Penetration, Erweichungspunkt Ring und Kugel, Viskosität, Duktilität etc.) die jahrelang als Hinweise für das Verhalten der Beläge in der Praxis dienten, geben das Verhalten von polymermodifizierten Bindemitteln nur ungenügend wieder. Empirisch erkannte Korrelationen zwischen traditionellen Prüfmethode und dem Verhalten in der Praxis müssen bei modifizierten Belägen (dabei ist nicht nur die Modifikation mit Polymeren gemeint) neu überdacht werden.

Aber auch bei nicht modifizierten Standardbitumen ist die Aussagekraft der traditionellen Prüfverfahren in Bezug auf das Kälteverhalten nicht befriedigend. Der Brechpunkt nach Fraass gibt zwar einige Hinweise für die Wahl einer Bitumensorte, er vermag jedoch das Kälteverhalten nicht umfassend zu beschreiben.

Unter dem Begriff "Kälteverhalten" wird die Erfassung der Eigenschaften von Bindemitteln und Asphalten bei tiefen Temperaturen verstanden. Den Witterungsverhältnissen in Mitteleuropa entsprechend, gelten Temperaturen deutlich unter 0°C als "tief".

### 2.1 Stand des Wissens

In vielen europäischen Ländern, unter anderem auch in der Schweiz, ist lediglich der Brechpunkt nach Fraass normiert [ 12 ]. Dieser Versuch wird nach wie vor verwendet, obwohl seine Nachteile bestens bekannt sind:

- Die Vorbereitung der Prüfkörper ist nicht nur aufwendig, sondern auch heikel. Der Einfluss der Prüfkörpervorbereitung auf die Ergebnisse ist recht gross.
- Die Streuung der Untersuchungsergebnisse ist insbesondere bei den polymermodifizierten Bindemitteln gross.

Ein im Rahmen der CEN-Normierung durchgeführter, europäischer Ringversuch mit PmB [13] hat die Grenzen des BP Fraass deutlich aufgezeigt. Die Reproduzierbarkeit R (zwischen verschiedenen Labors) betrug je nach PmB bis zu 10°C. Obwohl der Schreibende der persönlichen Auffassung ist, dass die hohen R-Werte aus dem europäischen Versuch teilweise auf mangelnde Laborpraxis in einigen Labors zurückzuführen sind, bleibt die Tatsache unangefochten, dass die Reproduzierbarkeit des Brechpunktes Fraass nicht befriedigt.

Trotz all dieser Nachteile wird der Brechpunkt Fraass nach wie vor verwendet, da sich noch keine Alternative durchgesetzt hat.

Diverse Ansätze das Kälteverhalten anzusprechen wurden entwickelt, fanden jedoch keine breite Anwendung in der Praxis. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien die bekanntesten, diesbezüglichen Verfahren aufgeführt:

- direkter Zugversuch LCPC [16]
- direkter Zugversuch SHRP [1,2]
- Biegeversuch in Skandinavien analog [3]
- Kraft-Duktilitätsprüfung [17]
- Bestimmung von Masterkurven [4]

## **2.2 Ziele des Forschungsauftrages**

Die Zielsetzung dieses Forschungsauftrages besteht darin, eine einfache, rasche und zuverlässige Methode für die Prüfung des Kälteverhaltens sowohl von modifizierten als auch nicht modifizierten bituminösen Bindemitteln bei tiefen Temperaturen zu evaluieren. Im Vordergrund steht der Bending Beam Rheometer [5].

Das Forschungsprojekt soll Entscheidungsgrundlagen für die europaweit laufende Diskussion zur Ablösung des bisherigen Verfahrens "Brechpunkt nach Fraass" liefern.

Dabei sollten sowohl Reinbitumen als auch polymermodifizierte Bitumen PmB geprüft werden können.

Der Forschungsauftrag wird teilweise zeitlich mit einer anderen Forschungsarbeit durchgeführt, bei welcher versucht wird einen Zusammenhang zwischen den Laboruntersuchungen und dem Verhalten in der Praxis zu finden. In einer gross angelegten Studie auf der N9 im Kanton Wallis wurden 16 Vergleichsfelder mit unterschiedlichen Bindemitteln eingebaut und über mehrere Jahre intensiv untersucht [18, 19].

### 3. Brechpunkt nach Fraass

Der Brechpunkt nach Fraass [12] wurde 1930 zur Prüfung des Kälteverhaltens erstmals normiert. Es wird an dieser Stelle mit Hinweis auf die geltende SN-Norm 670 500-2 "SN EN 12593:1999 – Bestimmung des Brechpunktes nach Fraass" auf eine Beschreibung der Versuchsdurchführung verzichtet.

Der Brechpunkt nach Fraass wird seit Jahren vehement kritisiert, da er einige Schwachstellen aufweist:

- Die Prüfkörperherstellung und die Versuchsdurchführung sind heikel und bedingen handwerkliches Geschick. Zwar wurden Automaten für die Durchführung des Versuches entwickelt, aber der heikelste Punkt, nämlich die Prüfkörperherstellung bleibt Handarbeit.
- Die Streuung der Ergebnisse ist recht gross.
- Die Prüfkörperherstellung hat einen grossen Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse.
- es handelt sich um eine empirische Prüfmethode.

Trotzdem wurde der Brechpunkt nach Fraass bis heute von keiner anderen Prüfmethode abgelöst. Die Erfahrungen aus der Praxis, wonach die Wiederholbarkeit  $r$  (Präzision unter Wiederholbedingungen; ein Beobachter, ein Gerät) wesentlich besser ist als die Vergleichbarkeit  $R$  (Präzision und Vergleichsbedingungen; verschiedene Beobachter, verschiedene Geräte) wurde in einem gross angelegten europäischen Ringversuch bestätigt [13]. Im Vergleich zu anderen Prüfmethoden ist der Unterschied zwischen  $r$  und  $R$  auffallend gross, was auf die Problematik der Prüfkörperherstellung zurückzuführen ist.

Da im vorliegenden Forschungsauftrag die Bestimmung des Brechpunkt nach Fraass nur in einem Labor erfolgte, können die an den verschiedenen Bindemitteln durchgeführten Brechpunkte als zuverlässige Werte betrachtet werden.

Tabelle 3.1: Bestimmung des Brechpunktes nach Fraass; Wiederholbarkeit r und Vergleichbarkeit R [13]

Beschreibung der Proben						Wiederholbarkeit r und Vergleichbarkeit R					
Proben	Pen [ $\frac{1}{10}$ mm]	EP RuK [°C]	Brechpunkt Fraass [°C]			mit allen Labors			nur mit automatischen Geräten		
			alle Labors	nur manuelle Bestimmung	nur maschinelle Bestimmung	Anzahl Labors <sup>1)</sup>	r [°C]	R [°C]	Anzahl Labors <sup>2)</sup>	r [°C]	R [°C]
A	100	51.2	-22.4	-22.0	-23.1	17	3.2	9.3	6	2.6	6.1
B	63	63.8	-18.3	-18.4	-18.2	17	2.7	8.6	6	1.4	10.2
C	44	60.8	-16.9	-16.3	-17.8	20	2.3	11	8	1.6	8.8
D	58	53.0	-15.2	-14.8	-15.7	21	3.6	10.7	9	3.6	12.2
E	40	82.1	-22.3	-20.6	-28.0	22	3.8	17.4	5	4.4	4.4
F	58	53.1	-16.5	--	--	9	2.5	14.6	-	-	-
G	46	69.1	-14.1	-12.3	-15.4	12	3	8.6	7	2.8	7.6

<sup>1)</sup> Insgesamt haben sich 22 Labors am Ringversuch beteiligt. Der Prüfplan sah allerdings vor, dass nicht alle 22 Labors sämtliche Proben (A bis H) zu prüfen hatten. Die hier aufgeführte Anzahl stellt die Anzahl Ergebnisse dar, die nach der statistischen Auswertung gemäss ISO 5725 berücksichtigt wurden (d.h. ohne Ausreisser). Berücksichtigt wurden sowohl manuel als auch mit einem Automaten bestimmte Werte.

<sup>2)</sup> Nur ein Teil der Labors verfügen über einen Automaten zur Bestimmung des BP Fraass.

Die Ergebnisse der gemessenen Brechpunkte nach Fraass an den verschiedenen Bindemitteln werden an dieser Stelle nicht aufgeführt, da sie nur im Vergleich mit anderen Ergebnissen interessant sind. Sie sind im Anhang 3 "Übersicht aller Untersuchungsergebnisse" aufgeführt und werden im Kapitel 8 "Vergleichsuntersuchungen" und Kapitel 9 "Vergleich mit Verhalten auf der Strasse" weiterverwendet.

## 4. Bending Beam Rheometer

### 4.1 Einführung

In der Materialprüfung besteht seit Jahren das Bedürfnis, empirische Werte (z.B. Erweichungspunkt RuK, Marshall Versuch, usw.) durch physikalische definierte Parameter (z.B. Viskosität) zu ersetzen. Das Verhalten von bituminösen Bindemitteln lässt sich mit rheologischen Kennwerten am besten erfassen; Bitumen ist ein linear viskoelastisches Material [6][7].

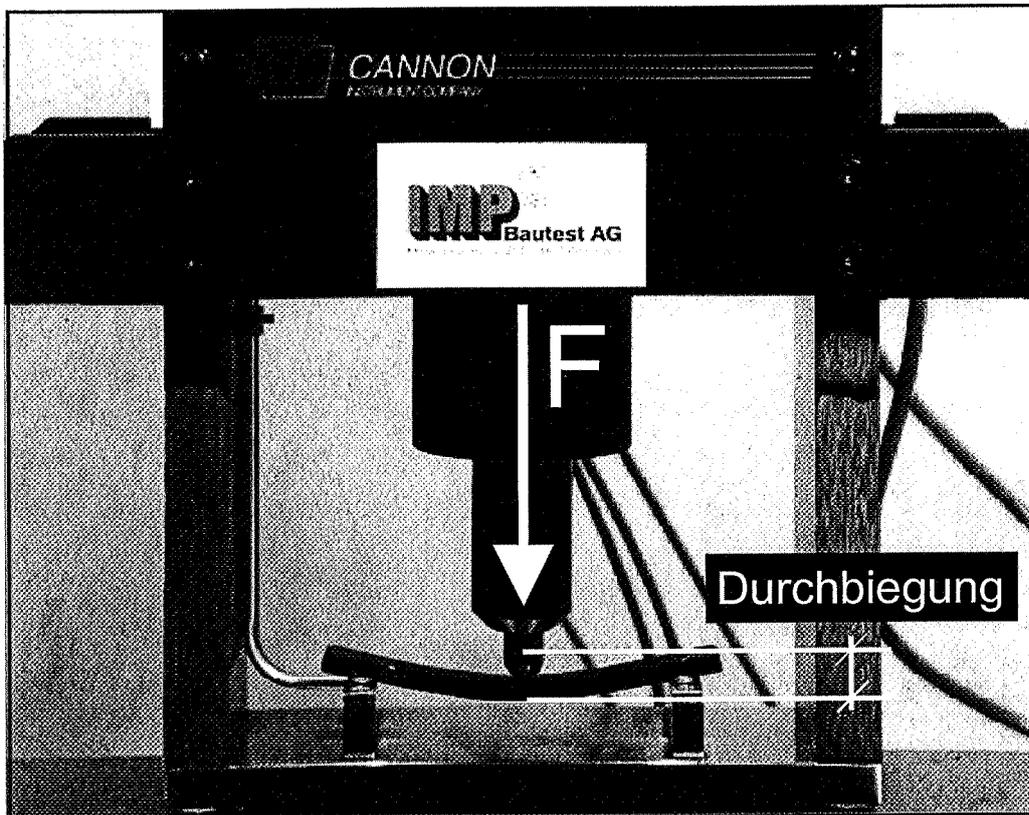
Für die meisten viskoelastischen Materialien, darunter auch bituminöse Bindemittel, gilt das Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip [4] das heisst, die Zeitabhängigkeit einer Materialfunktion hat bei jeder Temperatur die gleiche Form, ist jedoch verschoben. Mit den entsprechenden Verschiebungsfaktoren, die die Temperaturabhängigkeit charakterisieren, kann eine Masterkurve, welche die Zeitabhängigkeit des Bindemittels wiedergibt, berechnet und aufgezeichnet werden. Damit ist es möglich, die Steifigkeit eines Bindemittels zu jeder gewünschten Zeit und Temperatur zu interpolieren.

Im amerikanischen Strategic Highway Research Program (SHRP) wurde der Bending Beam Rheometer entwickelt [5] (Abbildung 4.1) bei dem ein Kriechversuch an einem Bindemittelbalken durchgeführt wird. Der Probekörper wird mit einer konstanten Kraft in einem Biegezugversuch belastet und die daraus resultierende Durchbiegung in Abhängigkeit der Zeit gemessen und aufgezeichnet (Abbildung 4.2). Aus den so erhaltenen Versuchsdaten können rheologische Kennwerte (Steifigkeit, Masterkurven, etc.) berechnet werden.

Weil sich bituminöse Bindemittel mit rheologischen Kennwerten sehr gut erfassen lassen (linear-viskoelastisches Material), kann sowohl die Empfindlichkeit auf die Belastungszeit, als auch die Temperaturempfindlichkeit beschrieben werden.

Mit dem Bending Beam Rheometer ist es möglich auf experimentell relativ einfache Art und Weise bei tiefen Temperaturen rheologische Materialeigenschaften zu bestimmen.

Abbildung 4.1 Bending Beam Rheometer; Bindemittelbalken mit Kraft- und Wegaufnehmer



Bitumen-Balken unter Belastung

## 4.2 Beschrieb der Versuchsdurchführung

Der Bending Beam Rheometer ist ein pneumatisches System, welches aus folgenden Bestandteilen besteht: der Kontrolleinheit, dem Rahmen mit dem Schaft, einer Druckflasche zur Versorgung des Systems mit Druckluft, einer Kältemaschine und einem Personalcomputer zur Steuerung und Auswertung.

### Kontrolleinheit:

In der Kontrolleinheit sind die elektronischen Komponenten eingebaut, welche die Signale vom Wegaufnehmer, von der Kraftmessdose und von der Temperatursonde verarbeiten, bevor sie zum Computer weitergehen. Das Flüssigkeitsbad, welches die Durchführung von Versuchen bei tiefen Temperaturen gestattet, ist ebenfalls in der Kontrolleinheit integriert.

### Rahmen:

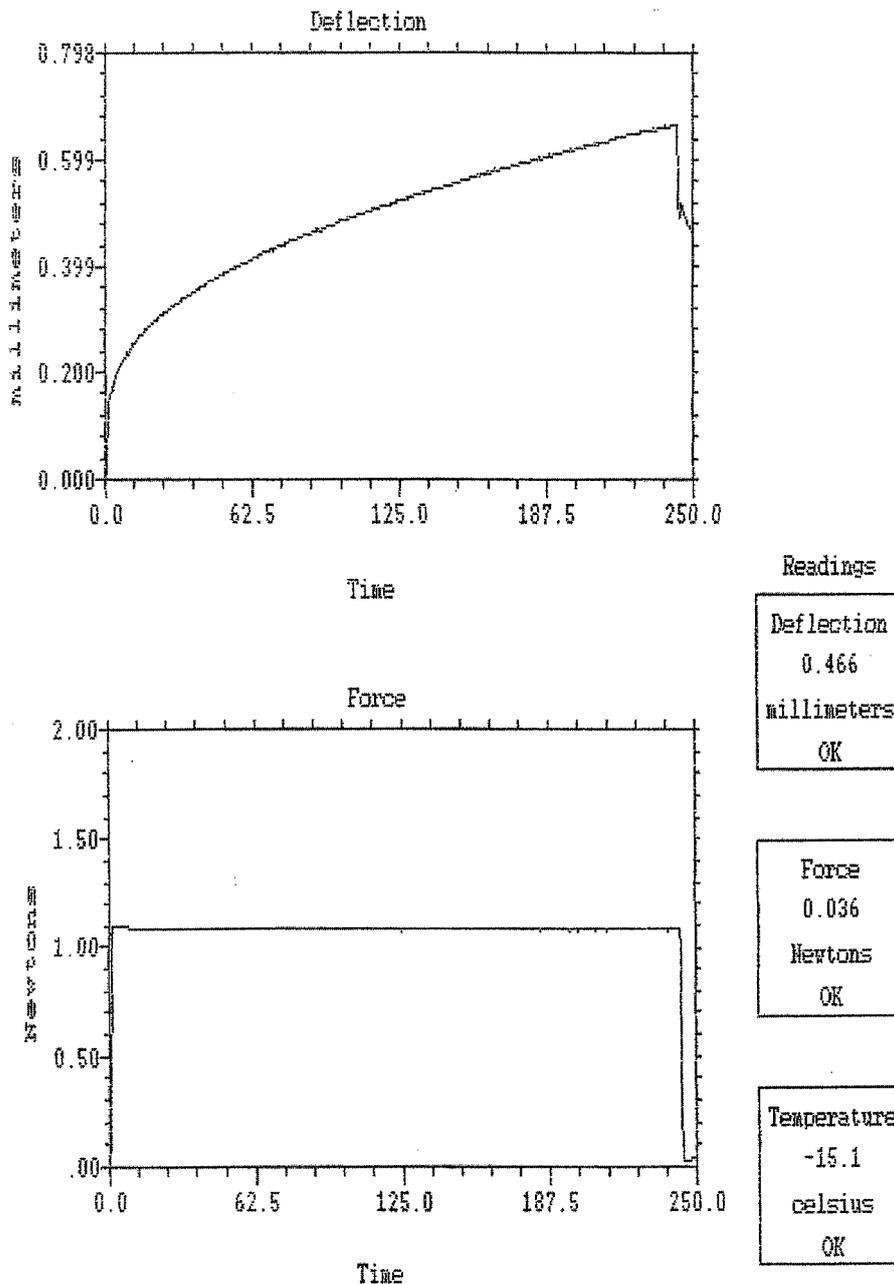
Der untere Teil des Rahmens enthält die Auflager für die Probe sowie die Temperatursonde, dieser Teil ist in das Flüssigkeitsbad eingetaucht. Der obere Teil des Rahmens enthält den Schaft, welcher mit einem pneumatischen Lager reibungslos gelagert ist und mit dem unteren Ende auf der Probe ansteht. Zuerst misst ein Wegaufnehmer die Bewegungen des Schaftes, im unteren Teil ist die Kraftmessdose im Schaft integriert. Sowohl die Kraftmessdose als auch der Wegaufnehmer sind sehr präzise Messinstrumente, welche eine Auflösung der Kraft auf 0,1 g und der Durchbiegung auf 2,5  $\mu\text{m}$  erlauben.

**Versuchsbeschreibung:**

Die genaue Durchführung des Versuches kann der Literatur entnommen werden [2][8][11]. Das Prinzip wird kurz zusammengefasst und die wichtigsten Berechnungen vorgestellt.

Mit dem Bending Beam Rheometer wird ein Kriechversuch durchgeführt. Die Probe wird mit einer konstanten Kraft während 240 Sekunden belastet (Abbildungen 4.1 und 4.2). Während dieser Zeit wird die Durchbiegung in der Mitte der Probe gemessen und aufgezeichnet. Aus den Versuchsdaten (Belastungszeit, Durchbiegung, Belastung der Probe) wird die Steifigkeit als Funktion der Belastungszeit und der Logarithmus der Steigung der Kriechkurve zu den gewählten Zeiten berechnet (siehe Abbildung 4.3).

Abbildung 4.2: Rohdaten eines Versuches, Durchbiegung und Kraft in Abhängigkeit von der Zeit



Aus den aufgezeichneten Daten Kraft (P) und  $\delta(t)$  wird die Steifigkeit des Balkens folgendermassen berechnet:

$$S(t) = P l^3 / 4bh^3 \delta(t) \quad (1)$$

- S(t) = Steifigkeit als Funktion der Zeit (t), [Mpa]
- P = konstante Kraft, [N]
- l = Abstand der Auflager, [mm]
- b = Breite des Prüfbalkens, [mm]
- h = Dicke des Prüfbalkens, [mm]
- $\delta(t)$  = Durchbiegung der Probe als Funktion der Zeit, [mm]

In gegebenem Zeitintervall von 8 bis 240 Sekunden kann die Kurve in Abbildung 4.4 durch ein Polynom beschrieben werden.

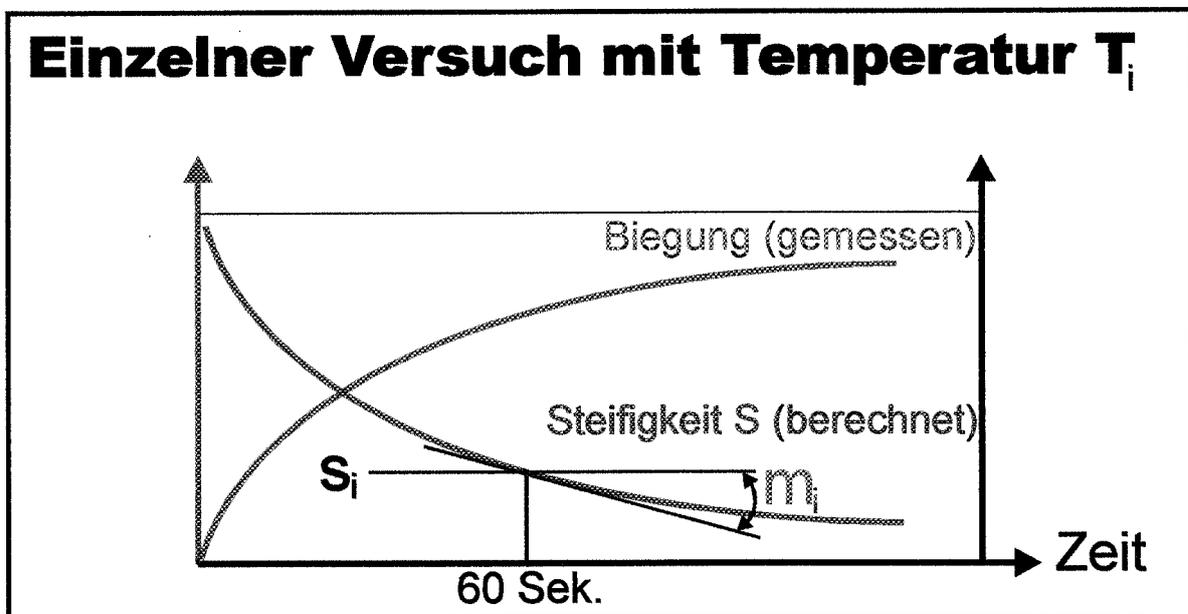
Polynom 2. Grades:

$$\log S(t) = A + B [\log(t)] + C [\log(t)]^2 \quad (2)$$

Die Steigung der Kurve zum Zeitpunkt  $t$  lässt sich berechnen aus:

$$m(t) = d[\log S(t)] / d[\log(t)] = B + 2 C [\log(t)] \quad (3)$$

Abbildung 4.3 .Berechnung der Steifigkeit und des m-Wertes

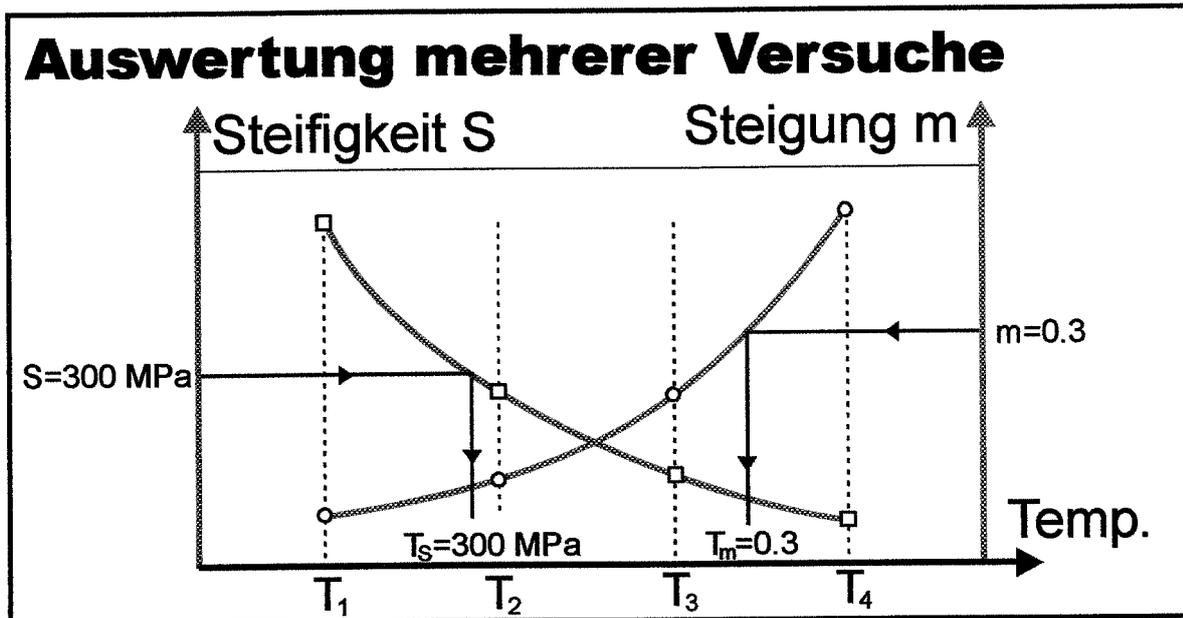


Mit den Formeln (2) und (3) werden die erwarteten Ergebnisse berechnet (Regression). Die erwartete und die gemessene Steifigkeit sollten nicht mehr als 2% abweichen, ansonsten muss der Versuch als fragwürdig eingestuft werden.

Für die Beurteilung von Bindemitteln werden die erwarteten Ergebnisse der Steifigkeit  $S$  und der Steigung  $m$  bei  $t = 60$  Sekunden verwendet.

Im SHRP-Programm werden aus Versuchen bei unterschiedlichen Temperaturen die Kennwerte  $T_{S=300 \text{ MP}}$  (Temperatur bei welcher das Bindemittel eine Steifigkeit von 300 MPa aufweist) sowie  $T_{m=0.3}$  (Temperatur bei welcher das Bindemittel einen  $m$ -Wert von 0.3 aufweist) berechnet. Die Vorgehensweise dazu ist aus der Abbildung 4.4 ersichtlich.

Abb. 4.4: Auswertung von mehreren Versuchen bei unterschiedlichen Temperaturen sowie Bestimmung der Temperaturen  $T_{S=300 \text{ MPa}}$  und  $T_{m=0.3}$ .



### 4.3 Methodenentwicklung

#### Versuchsdurchführung:

Als Prüfkörper dient ein Balken, welcher durch Giessen in eine Aluminiumform hergestellt wird. Die Massen des Prüfkörpers betragen 127 mm x 12,7 mm x 6,3 mm. Dieser Prüfkörper wird eine Stunde im Bad bei der gewünschten Versuchstemperatur gelagert. Die Probe wird zum Zeitpunkt Null mit der gewählten Kraft belastet, die bis zum Schluss des Versuches konstant bleibt. Unter der Einwirkung der Belastung nimmt die Durchbiegung der Probe mit der Zeit zu und wird registriert. Nach 240 Sekunden erfolgt die Entlastung und Auswertung; der nächste Versuch kann durchgeführt werden.

Ein typischer Versuchsablauf mit der Zunahme der Durchbiegung bei konstanter Kraft ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die berechneten Steifigkeiten lassen sich als Funktion der Zeit im doppeltlogarithmischen Massstab darstellen.

In Abbildung 4.5 sind die Ergebnisse eines bei verschiedenen Temperaturen geprüften Bindemittels aufgezeichnet. Daraus lässt sich die Masterkurve dieses Bitumens bei einer Temperatur von  $-15^\circ\text{C}$  durch Verschieben der Kurven zeichnen (Abbildung 4.6). Die entsprechenden Verschiebungsfaktoren sind als Funktion der Temperatur in Abbildung 4.7 dargestellt. Die Masterkurve charakterisiert die Zeitabhängigkeit des Bitumens; die Verschiebungsfaktoren die Temperaturabhängigkeit.

Abbildung 4.5: Steifigkeit als Funktion der Zeit eines Bindemittels bei verschiedenen Temperaturen

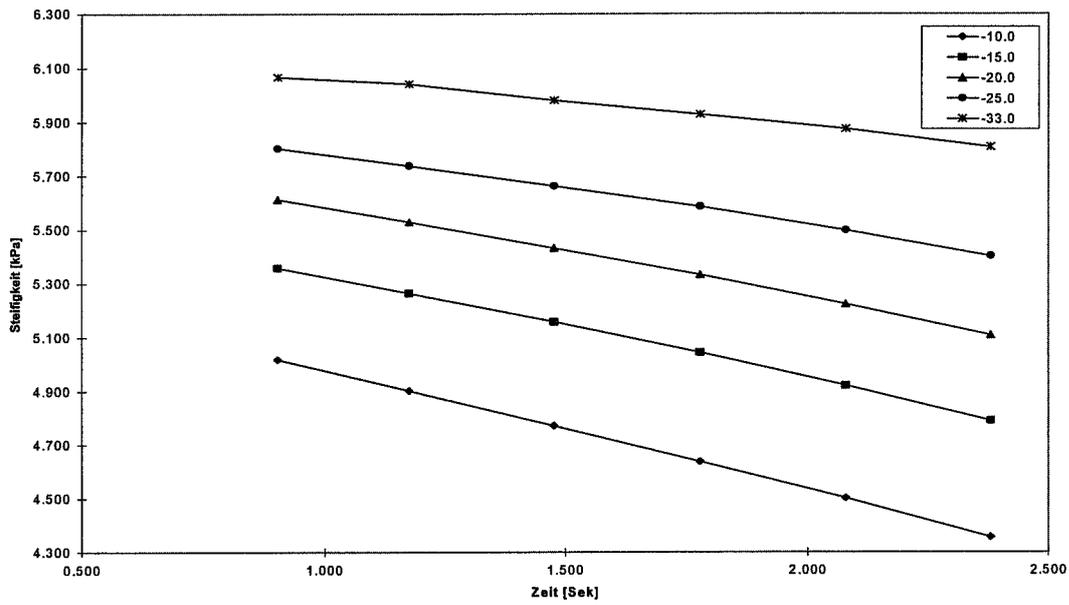


Abbildung 4.6: Masterkurven bei  $-15^{\circ}\text{C}$  von verschiedenen Bindemitteln

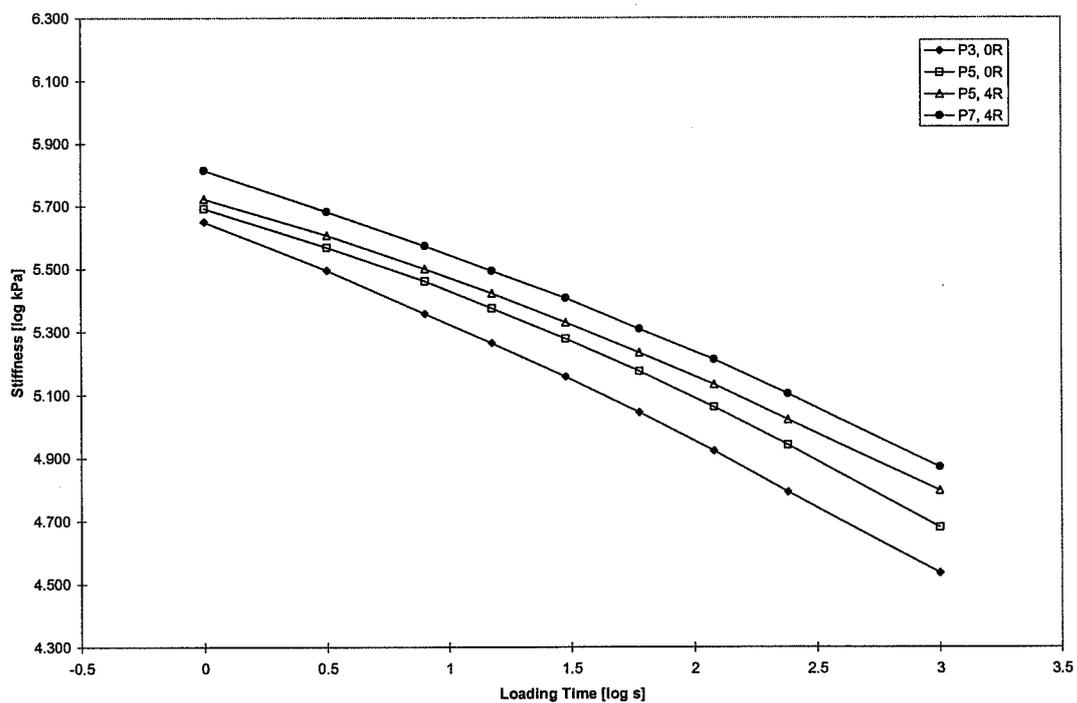
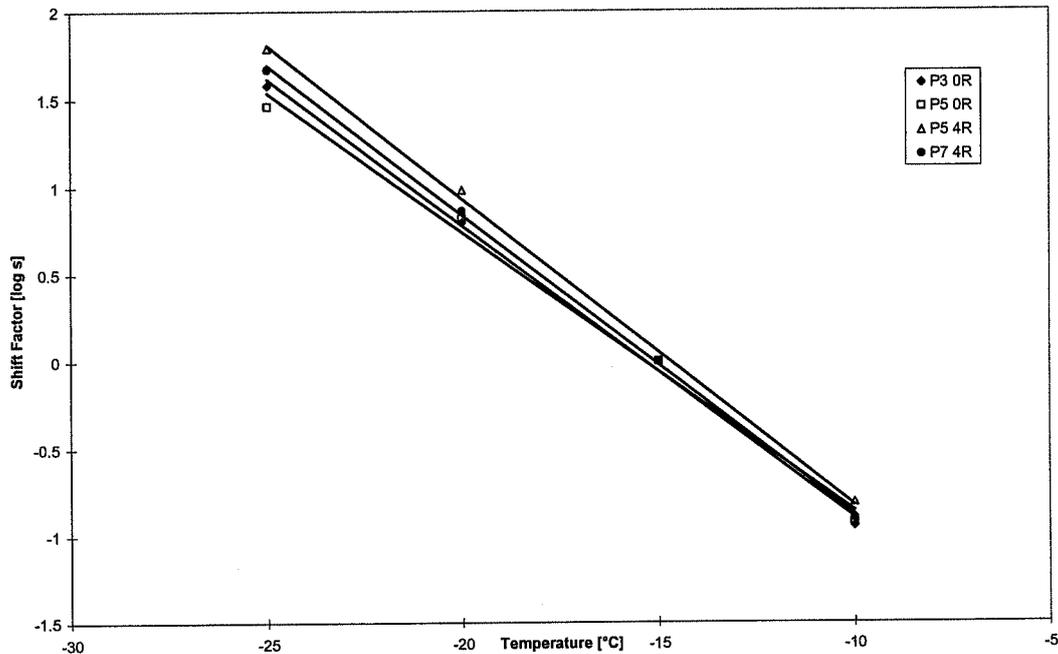


Abbildung 4.7: Verschiebungsfaktoren zu den Masterkurven von Abbildung 4.6



### Parameterstudie:

Um die Einflüsse der verschiedenen Parameter auf die Ergebnisse zu ermitteln wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Dazu wurden die Einflussparameter variiert und der Einfluss auf die Ergebnisse abgeklärt. Die Parameter wurden in den folgenden Bereichen variiert:

- Last: 0,79 bis 1,88 N (Versuchsbedingung 0,98 N)
- Temperatur: -5 bis -25 °C (Versuchsbedingung -15 °C)
- Isothermale Zeit 46 bis 180 Min. (Versuchsbedingung 60 Min.)

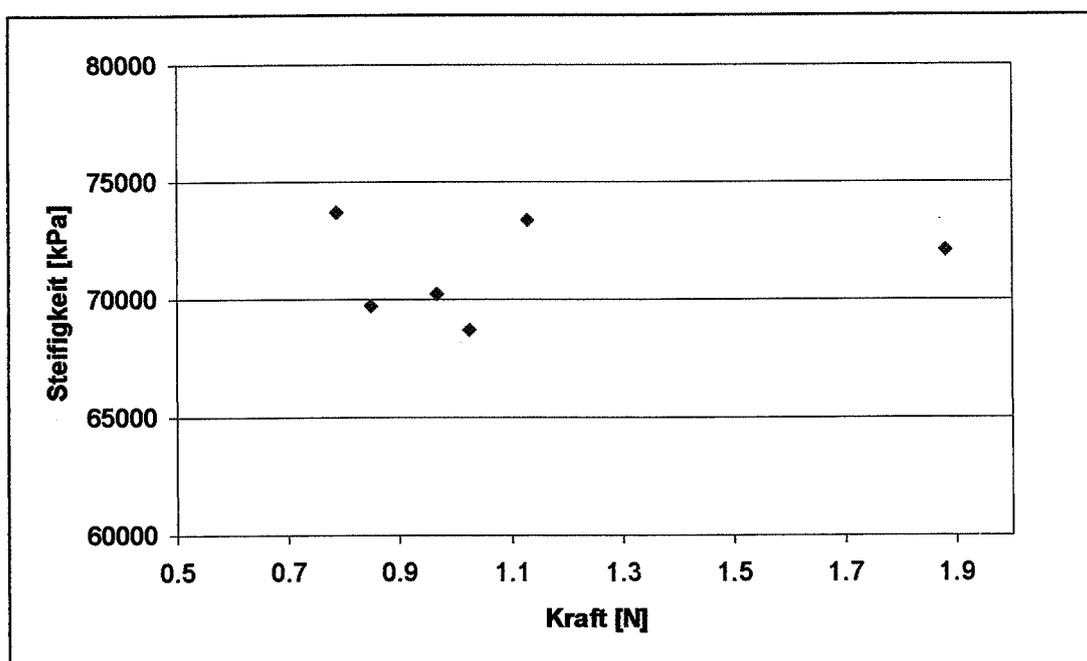
**Last:**

Die Last (Kraft) mit welcher die Probe belastet und der Versuch durchgeführt wird, variierte zwischen 0.79 und 1.88 N. Aus der Abbildung 4.6 ist ersichtlich, dass kein Zusammenhang zwischen der Kraft und dem gemessenen Wert besteht. Dies rührt daher, dass die aktuelle Kraft genau gemessen und in die Rechnung einbezogen wird. Trotzdem ist es zu empfehlen, für die Versuchsdurchführung die Kraft zwischen 0,8 und 1,2 N zu wählen. In dieser Spanne kann mit dem Gerät sehr gut gearbeitet werden.

Tabelle 4.1: Bestimmung der Steifigkeit mit variierender Last

Probenbezeichnung	Bitumen-sorte	Last (Mittel) [N]	Temperatur [°C]	isothermale Zeit [Min]	Steifigkeit 60 Sek [MPa]	Bemerkungen
a6	B 80/100	0.79	-15.1	57	73730	IMP Nr. A91-1077
a7	B 80/100	0.85	-15.1	57	69780	IMP Nr. A91-1077
a8	B 80/100	0.97	-15.1	59	70280	IMP Nr. A91-1077
a9	B 80/100	1.03	-15.1	61	68740	IMP Nr. A91-1077
a10	B 80/100	1.13	-15.0	63	73410	IMP Nr. A91-1077
a11	B 80/100	1.88	-15.0	65	72130	IMP Nr. A91-1077
					Mittelwert	71345
					Standardab.	1868
					in %	2.6

Abbildung 4.8: Ergebnisse der bei unterschiedlichen Lasten durchgeführten BBR-Versuche; es besteht keine Abhängigkeit der Steifigkeit von der Last



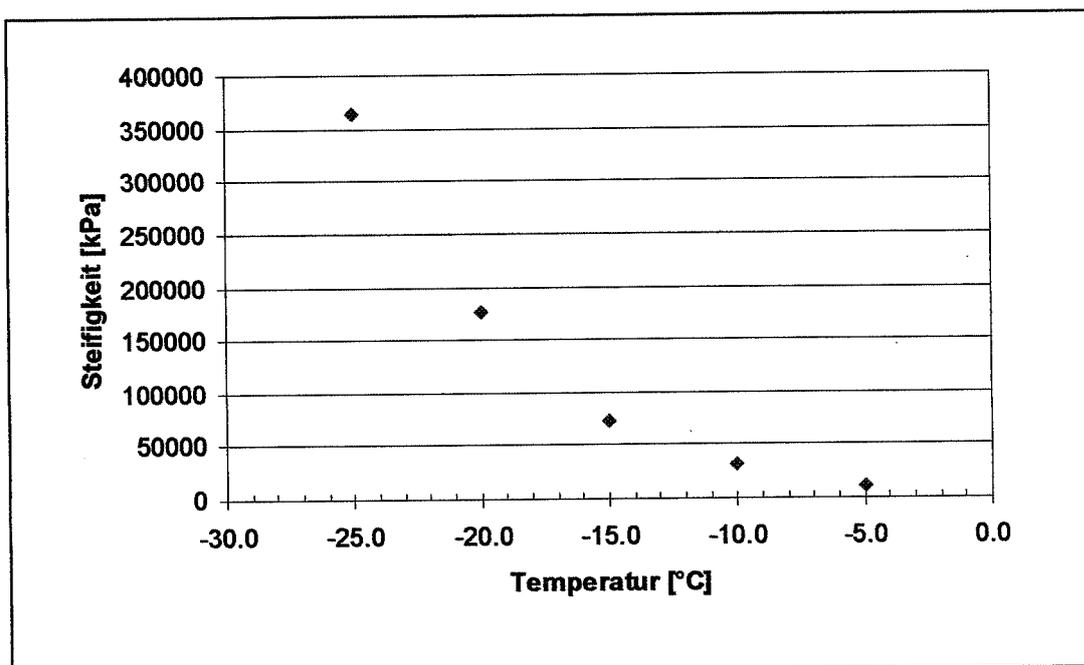
### Temperatur des Bades:

In einem ersten Schritt wurde die Temperatur in einem weiten Feld von  $-5$  bis  $-25$  °C variiert (Tabelle 4.2 und Abbildung 4.9). Wie nicht anders zu erwarten war, hat die Temperatur bei welcher der Versuch durchgeführt wird einen sehr grossen Einfluss auf die Steifigkeit des Bindemittels. Je tiefer die Temperatur ist, desto höher wird die Steifigkeit des Bindemittels.

Tabelle 4.2: Bestimmung der Steifigkeit mit variierender Temperatur

Probenbezeichnung	Bitumen-sorte	Last (Mittel) [N]	Temperatur [°C]	isothermale Zeit [Min]	Steifigkeit 60 Sek [kPa]	Bemerkungen
a24	B 80/100	1.01	-25.0	59	363400	IMP Nr. A91-1077
a25	B 80/100	0.95	-20.0	60	175700	IMP Nr. A91-1077
a26	B 80/100	0.95	-15.0	60	73720	IMP Nr. A91-1077
a27	B 80/100	0.9	-10.0	60	32090	IMP Nr. A91-1077
a28	B 80/100	0.81	-5.0	60	10980	IMP Nr. A91-1077
					Mittelwert	131178
					Standardab.	129210
					in %	98.5

Abbildung 4.9: Ergebnisse der bei verschiedenen Temperaturen durchgeführten BBR-Versuche; Abhängigkeit der Steifigkeit von der Prüftemperatur.

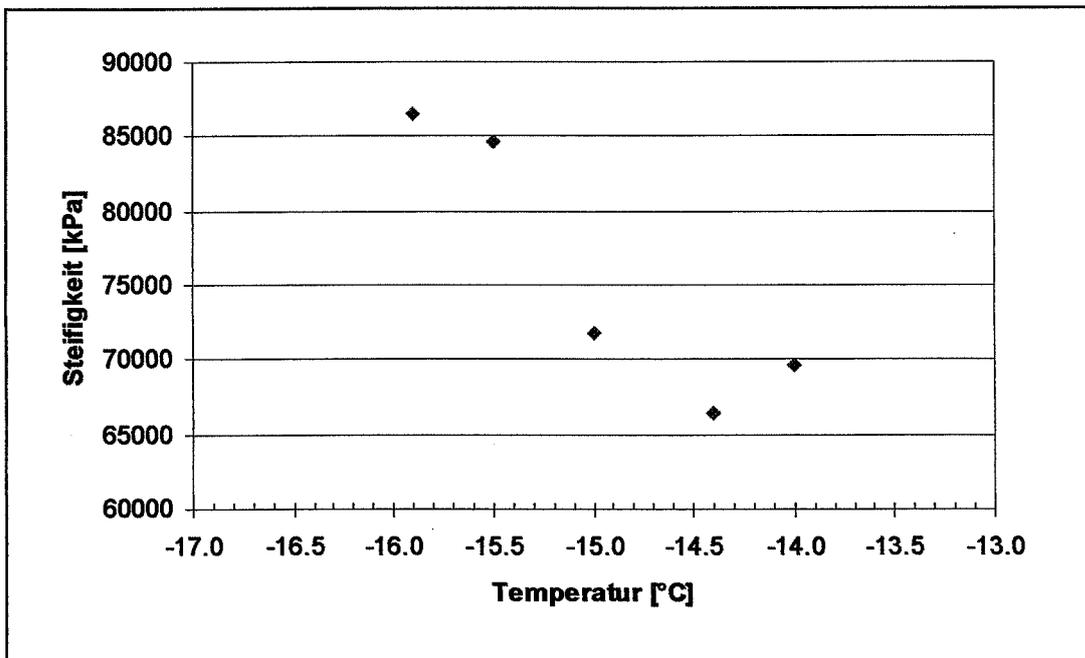


In einem zweiten Schritt wurden die Temperaturen eingengt und Versuche zwischen  $-14$  und  $-16^{\circ}\text{C}$  gemessen (Tabelle 4.3 und Abbildung 4.10). Auch hier lässt sich eine klare Abhängigkeit der Steifigkeit von der Temperatur erkennen. Der Einfluss der Temperatur ist sehr gross; der Unterschied der Steifigkeit bei  $-14,5$  und  $-15,5^{\circ}\text{C}$  beträgt  $18\,190\text{ kPa}$  oder  $27,4\%$  ! Während der Versuchsführung ist eine Genauigkeit des Temperaturbades von  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  auf jeden Fall anzustreben.

Tabelle 4.3: Bestimmung der Steifigkeit mit eng variierender Temperatur

Probenbezeichnung	Bitumen-sorte	Last (Mittel) [N]	Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	isothermale Zeit [Min]	Steifigkeit 60 Sek [kPa]	Bemerkungen
a12	B 80/100	1.00	-15.9	66	86480	IMP Nr. A91-1077
a13	B 80/100	0.94	-15.5	61	84620	IMP Nr. A91-1077
a14	B 80/100	0.96	-15.0	60	71790	IMP Nr. A91-1077
a15	B 80/100	0.95	-14.4	60	66430	IMP Nr. A91-1077
a16	B 80/100	0.95	-14.0	58	69660	IMP Nr. A91-1077
					Mittelwert	75796
					Standardab.	8166
					in %	10.8

Abbildung 4.10: Ergebnisse der bei verschiedenen Temperaturen durchgeführten BBR-Versuche; Abhängigkeit der Steifigkeit von der Prüftemperatur in einem engen Temperaturbereich von  $-15,9$  bis  $-14^{\circ}\text{C}$ .



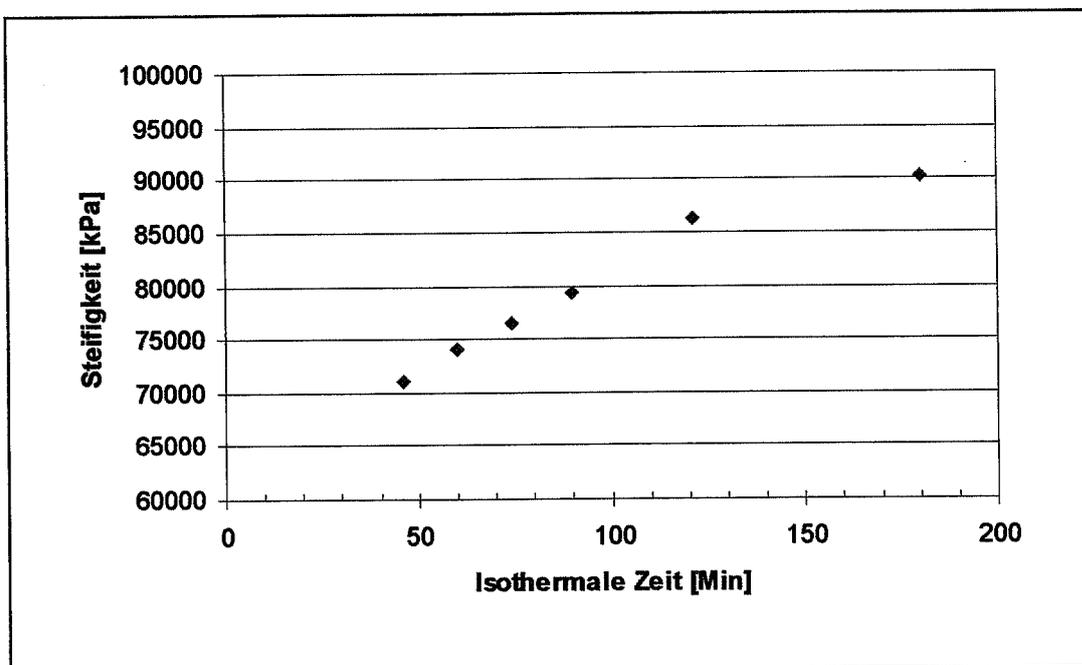
### Isothermale Zeit:

Die Aufenthaltsdauer der Proben im Tieftemperaturbad wird als isothermale Zeit bezeichnet. Diese isothermale Zeit wirkt sich stark auf die Steifigkeit aus, bereits eine Abweichung von einer Viertelstunde bringt eine Veränderung um 4% (Tabelle 4.4 und Abbildung 4.11). Lässt man die Probe statt einer Stunde drei Stunden bei tiefen Temperaturen im Bad, so steigt die Steifigkeit um 15% an. Es ist wichtig, dass die Lagerungszeiten bei tiefen Temperaturen genau eingehalten werden, weil mit einer zunehmenden Dauer der Lagerung eine physikalische Verhärtung stattfindet, welche eine Verfälschung der Messresultate bewirken kann.

Tabelle 4.4: Bestimmung der Steifigkeit mit unterschiedlicher isothermaler Zeit

Probenbezeichnung	Bitumen-sorte	Last (Mittel) [N]	Temperatur [°C]	isothermale Zeit [Min]	Steifigkeit 60 Sek [kPa]	Bemerkungen
a17	B 80/100	0.97	-15.0	46	71060	IMP Nr. A91-1077
a18	B 80/100	0.98	-15.1	60	74000	IMP Nr. A91-1077
a19	B 80/100	1.02	-15.1	74	76460	IMP Nr. A91-1077
a20	B 80/100	1.01	-15.1	90	79410	IMP Nr. A91-1077
a21	B 80/100	1.04	-15.0	121	86250	IMP Nr. A91-1077
a22	B 80/100	1.03	-15.0	180	90170	IMP Nr. A91-1077
Mittelwert					79558	
Standardab.					6710	
in %					8.4	

Abbildung 4.11: Ergebnisse der bei unterschiedlichen isothermalen Zeiten durchgeführten BBR-Versuche; Abhängigkeit der Steifigkeit von der isothermalen Zeit



## 4.4 Erste Erfahrungen

Das Bending Beam Rheometer erweist sich als zuverlässiges und einfach zu bedienendes Gerät. Weil es sehr empfindlich die rheologischen Eigenschaften von Bindemitteln misst, müssen bei der Versuchsdurchführung die entscheidenden Parameter genau eingehalten werden (siehe Kap. 4.3).

Die bisherigen Erfahrungen mit dem BBR sind positiv, es ist jedoch notwendig, weitere Erfahrungen zu sammeln, um Zusammenhänge zwischen den Belageigenschaften und den ermittelten rheologischen Kennwerten zu erhalten. In verschiedenen Publikationen [14][15] wird dies vor allem mit den Parametern  $T_{m=0,3}$  und  $T_{S=300\text{MPa}}$  versucht.

## 4.5 Präzision des Versuches

Zur Bestimmung der Präzision des Prüfverfahrens (Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit) wurde ein internationaler Ringversuch durchgeführt.

### 4.5.1 Zweck des Ringversuches

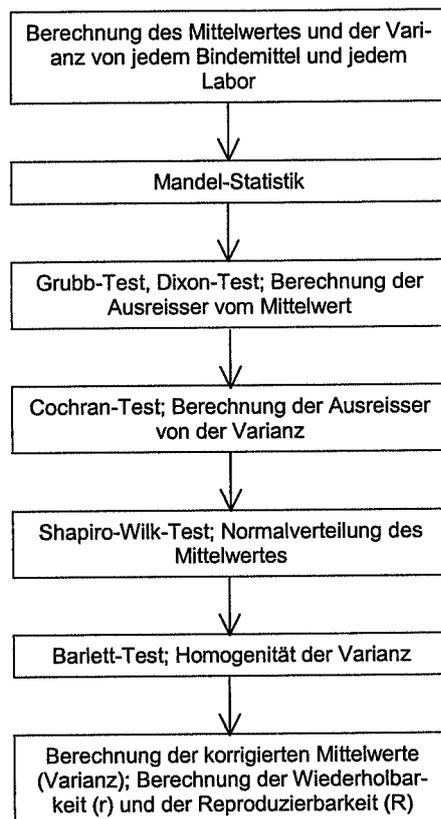
Das Ziel dieses Ringversuches war es, die Wiederholbarkeit und die Reproduzierbarkeit der mit dem Bending Beam Rheometer bestimmten Kennwerte zu bestimmen. Zudem sollen Aussagen darüber gemacht werden können, wie die Prüfverfahren weiter vereinheitlicht und spezifiziert werden müssen.

### 4.5.2 Organisation

Die Proben wurden Ende März 1996 gleichzeitig an alle teilnehmenden Labors versandt. Die Laborergebnisse trafen im Verlauf des Sommers bei der Koordinationsstelle ein und wurden tabellarisch erfasst.

Für die statistische Auswertung der zugesandten Untersuchungsergebnisse wurde das gleiche Verfahren wie bei der Auswertung des europäischen Ringversuches für PmB gewählt, der von der Arbeitsgruppe CEN TC 19/SC1/WG4 durchgeführt wurde [13]. Die Auswertung wurde verdankenswerterweise durch Herrn Dr. P. Tittarelli (Stazione Sperimentale Combustibili; San Donato, Milano) gemäss der Norm ISO 5725 durchgeführt. Die einzelnen Schritte sind in der Abbildung 4.10 dargestellt.

Abbildung 4.12: Vorgehen bei der statistischen Auswertung des Ringversuches



An diesem internationalen Ringversuch nahmen insgesamt 11 Labors teil; 10 aus Europa und eines aus den USA.

Wir betrachten die Teilnahme von Prof. Dr. Anderson (Pennsylvania State University) als sehr wichtig für den Vergleich mit den europäischen Prüfstellen, da der Bending Beam Rheometer in seinem Labor entwickelt wurde [8]. Die Liste der teilnehmenden Labors ist in der Tabelle 4.5 aufgeführt.

Tabelle 4.5: Teilnehmer am internationalen Ringversuch  
Bending Beam Rheometer

Asfalt Industrien	Vejforskningslaboratorium	Hvidovre	Dänemark
Elf Antar France	Centre de Recherche Elf Solaize	Solaize	Frankreich
Highway Engineering	SINTEF	Trondheim	Norwegen
IMP Bautest AG	Institut für Materialprüfung	Oberbuchsitzen	Schweiz
Istituto di Strade	Universita di Ancona	Ancona	Italien
Laboratoire des Ponts et Chaussées	Aix-en-Provence	Aix en Provence	Frankreich
Nynas AB	Bittek	Nynashamn	Schweden
Repsol	Tecnologia	Madrid	Spanien
Shell Recherche SA	Centre de Recherche	Grand-Couronne	Frankreich
Swedish National Road	Transport Research Institute	Linköping	Schweden
The Pennsylvania State University	Pennsylvania Trans.Institute	University Park PA	USA

Es wurden insgesamt 3 Bindemittel mit den folgenden Grundeigenschaften in den Ringversuch miteinbezogen:

Tabelle 4.6: Bindemittel, die im Ringversuch untersucht wurden

	Penetration (25°C) [1/10mm]	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
Bindemittel A	44,9	59,3
Bindemittel B	42,6	56,3
Bindemittel C	125,0	43,0

Das Untersuchungsprogramm das von jedem Labor durchzuführen war, ist in der Tabelle 4.7 aufgeführt.

Tabelle 4.7: Untersuchungsprogramm das von jedem Labor durchgeführt wurde

Bindemittel- probe	Steifigkeit bei - 15°C	m-Wert	Temperatur bei 300 MPa
A	3-fach Bestimmung	3-fach Bestimmung	3-fach Bestimmung
B	"	"	-
C	"	"	3-fach Bestimmung

Die Prüfbedingungen unter welchen die Versuche durchzuführen waren, wurden wie folgt festgelegt:

- Zur Herstellung der Prüfkörper waren die Bindemittel bei  $140 \pm 5^\circ\text{C}$  (entsprechend der pr EN... "Preparation of test samples of bituminous binders" [20]) während  $60 \pm 5$  Minuten vorzuwärmen.
- Lagerungsdauer der Prüfkörper bei  
Prüftemperatur im Kühlbad:  $60 \pm 2$  Minuten
- Belastung des Balkens:  $100 \pm 5$  g

Es wurde darauf verzichtet, vorgängig zum Ringversuch die Prüfanleitung detaillierter zu umschreiben, als dies im SHRP-Programm bereits getan wurde [9]. Es wurde vorausgesetzt, dass sich die einzelnen Prüflabors an der SHRP-Prüfanleitung orientieren.

#### 4.5.3 Resultate

Die statistische Auswertung erfolgte gemäss den in Abbildung 4.12 beschriebenen Schritten und ist in der Tabelle 4.8 zusammengefasst. Darin enthalten sind die Anzahl der akzeptierten Labors, die Ausreisser, der ausreisserfreie Mittelwert, die Wiederholbarkeit sowie die Reproduzierbarkeit.

Tabelle 4.8: Ergebnisse der statischen Auswertung des Ringversuches

<b>Steifigkeit (-15 °C/60 Sek.)</b>							
Binde- mittel	Akzeptierte Labors	Ausreisser	Mittelwert [kPa]	Wiederhol- barkeit (r) [kPa]	Reproduzier- barkeit (R) [kPa]	r [%]	R [%]
A	9	2	160100	9600	37600	6	23
B	8	3	106000	6300	20500	6	19
C	9	1	51900	6300	12000	12	23

<b>m-Wert (-15 °C/60 Sek.)</b>							
Binde- mittel	Akzeptierte Labors	Ausreisser	Mittelwert	Wiederhol- barkeit (r)	Reproduzier- barkeit (R)	r [%]	R [%]
A	9	2	0.386	0.011	0.024	3	6
B	9	2	0.389	0.010	0.034	3	9
C	8	2	0.498	0.017	0.036	3	7

<b>Temperatur (T=300MPa/60 Sek)</b>							
Binde- mittel	Akzeptierte Labors	Ausreisser	Mittelwert [°C]	Wiederhol- barkeit (r) [°C]	Reproduzier- barkeit (R) [°C]	r [%]	R [%]
A	6	1	-19.7	0.36	0.93	2	5
C	6	1	-25.0	1.05	1.56	4	6

In den Abbildungen 4.13 – 4.15 sind die Ergebnisse der einzelnen Labors jeweils in aufsteigender Reihenfolge graphisch dargestellt. Wir weisen darauf hin, dass die Code-Nr. der Prüfstellen in keinem Zusammenhang mit der Auflistung der Prüfstellen in der Tabelle 4.5 stehen.

Abbildung 4.13: Auswertung des Ringversuches für das Bindemittel A;  
Steifigkeit, m-Wert und  $T_{S=300 \text{ MPa}}$

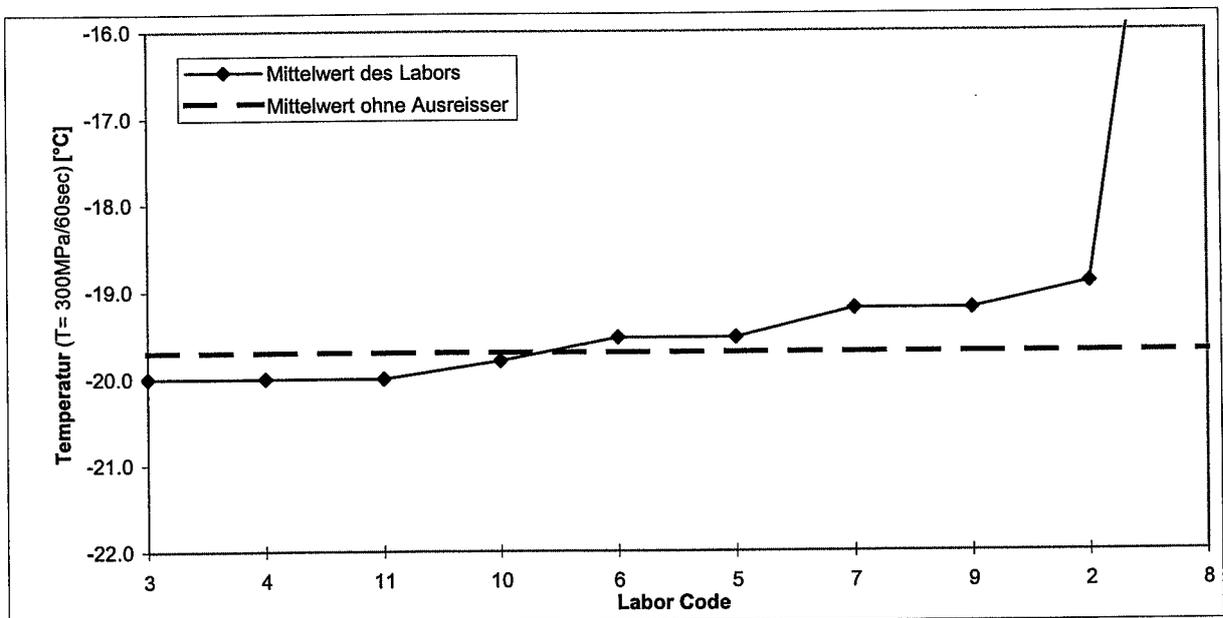
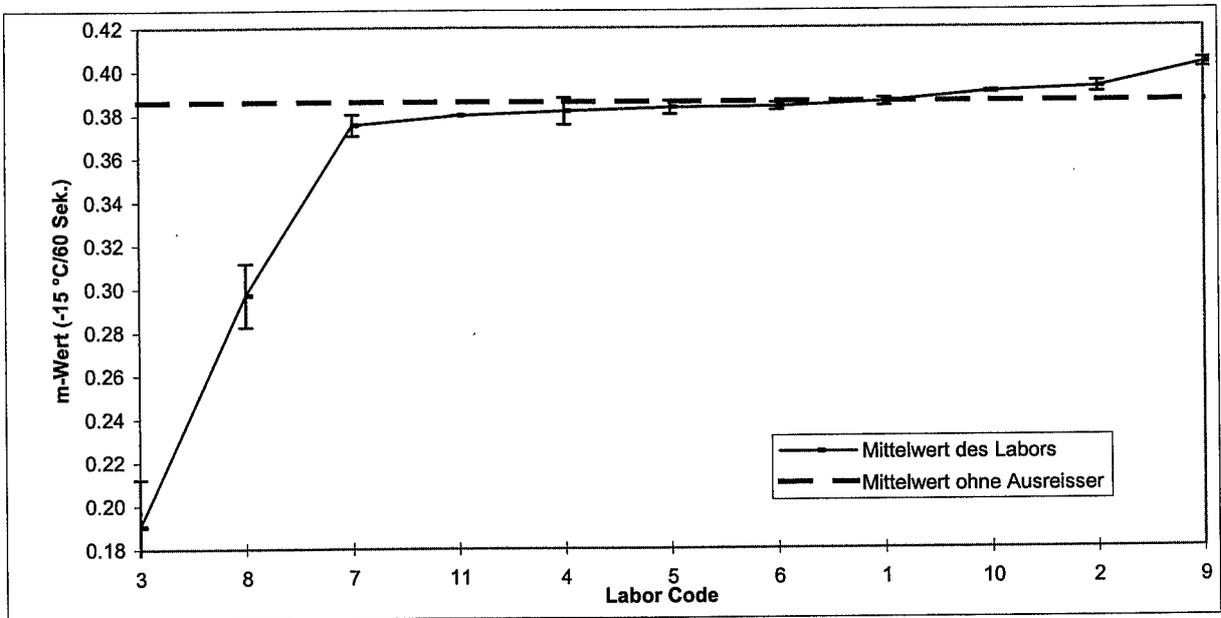
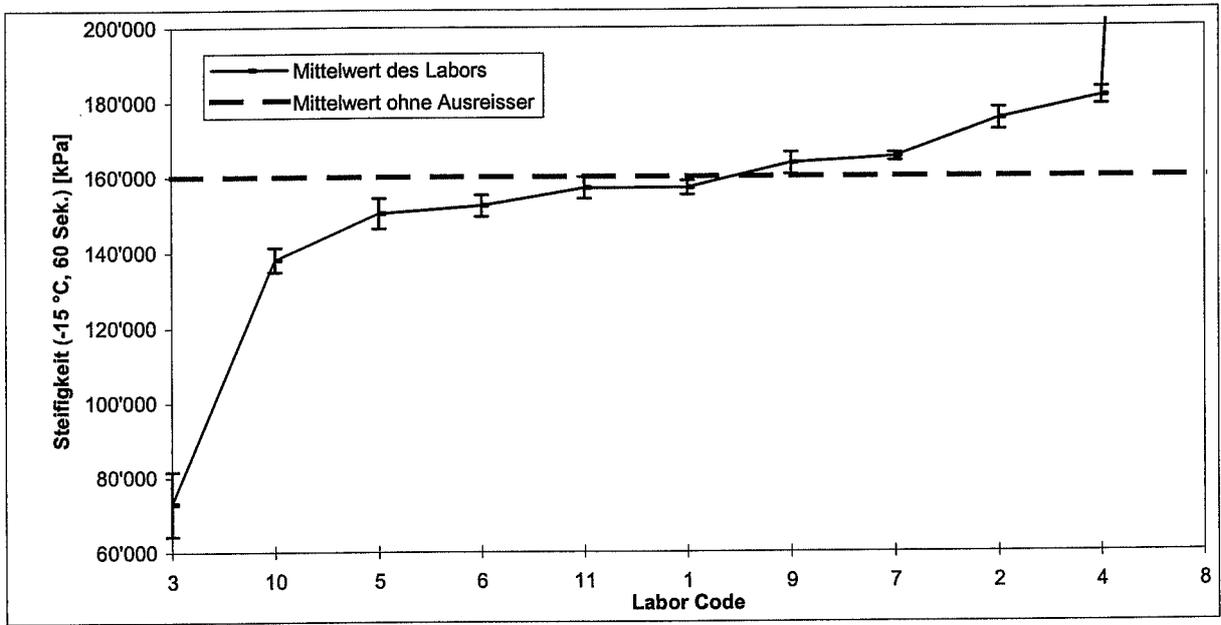


Abbildung 4.14: Auswertung des Ringversuches für das Bindemittel B; Steifigkeit, m-Wert

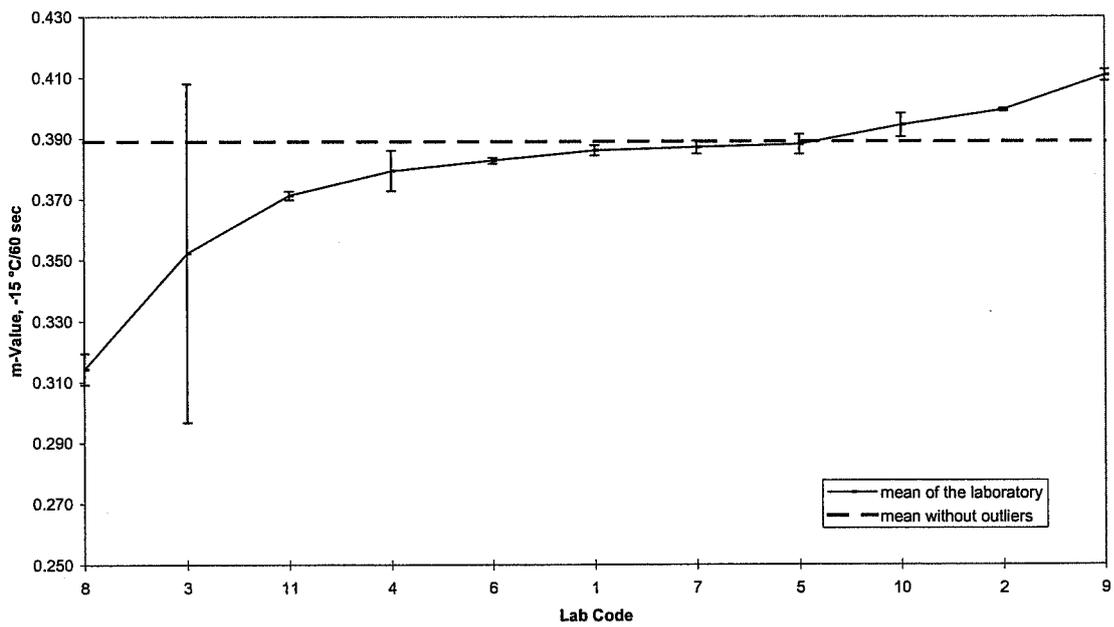
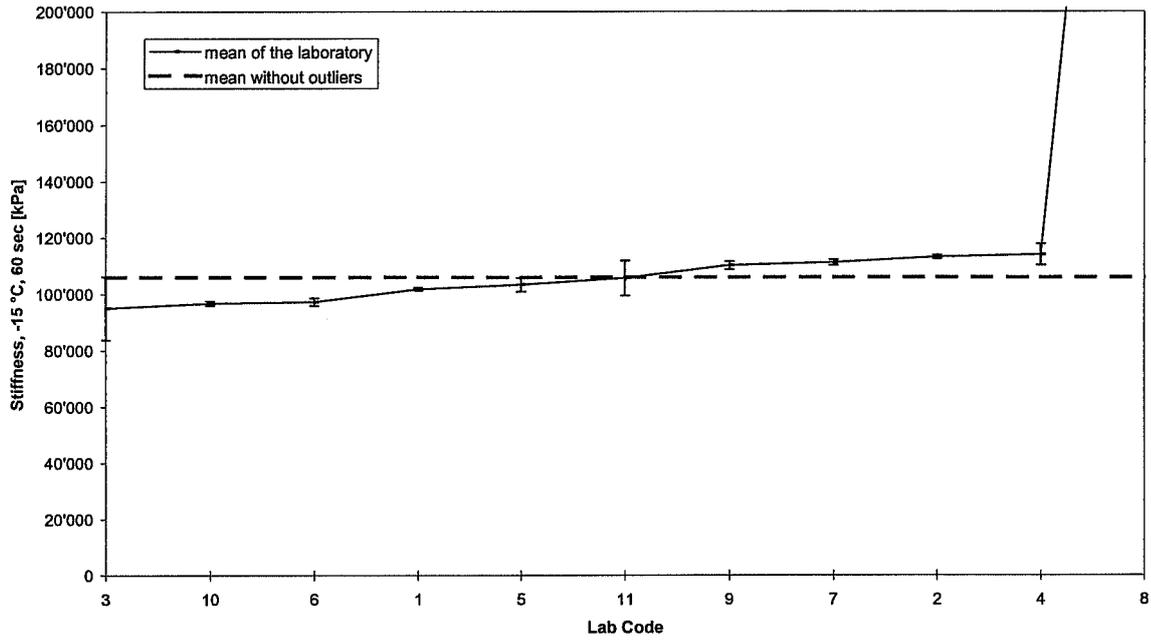
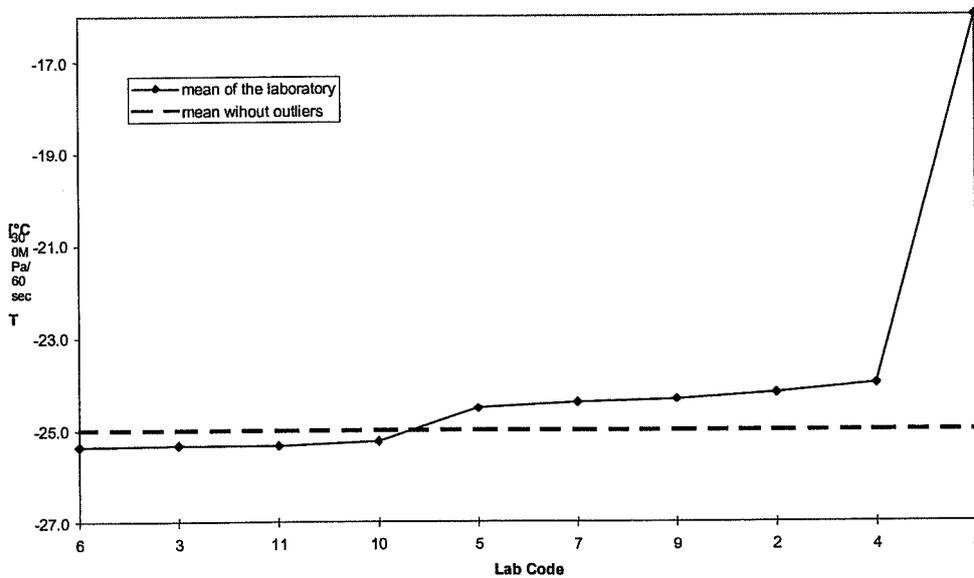
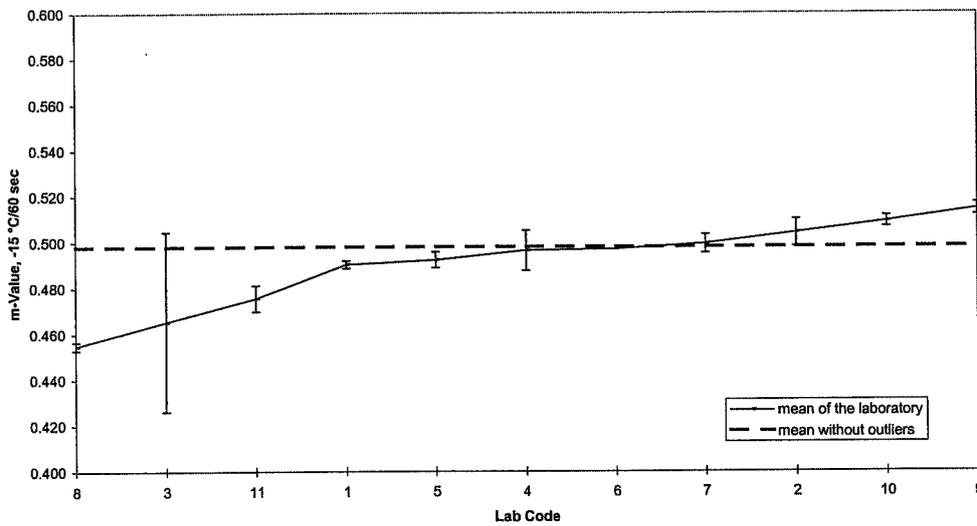
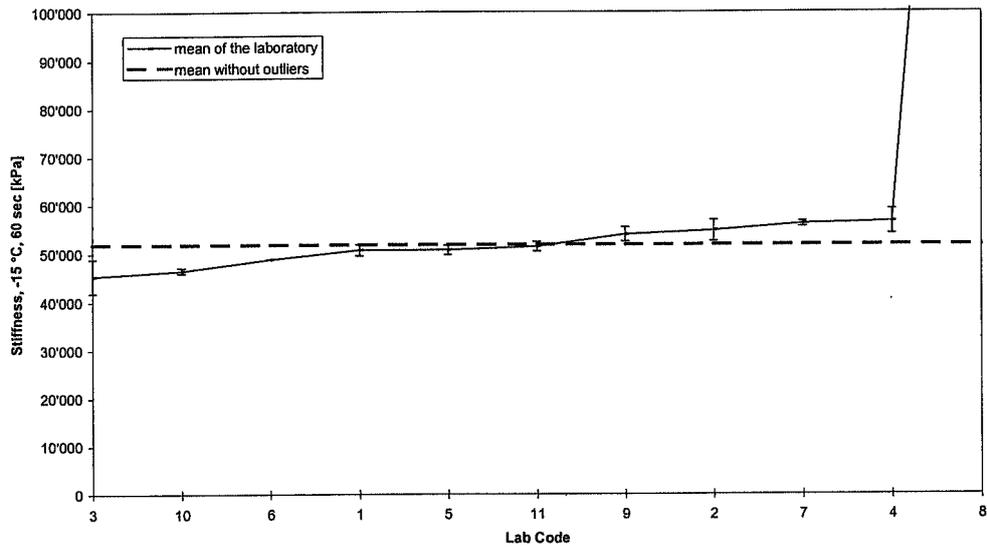


Abbildung 4.15: Auswertung des Ringversuches für das Bindemittel C;  
Steifigkeit, m-Wert und  $T_{S=300 \text{ MPa}}$



Gleichzeitig mit der Durchführung des Ringversuches erfolgte eine Umfrage über die Art der verwendeten Giessformen für die Prüfkörperherstellung und das verwendete Kühlmittel (siehe Tabelle 4.9).

Tabelle 4.9: Verwendete Kühlmittel und Formen

Labor	Kühlmittel	Material der Giessformen
1	Keine Angabe	Keine Angabe
2	Ethanol	Aluminium
3	Methanol	Aluminium
4	Ethanol	Silikon
5	Isopropanol	Aluminium
6	Propandiol/Methanol/Wasser	Aluminium
7	Ethanol	Aluminium
8	Luft	Messing mit PE überzogen
9	Ethanol	Aluminium
10	Ethanol	Aluminium
11	Methanol	Aluminium

#### 4.5.4 Kommentar

Insgesamt nahmen am Ringversuch 11 Prüfstellen teil. Diese Anzahl ist, unter Berücksichtigung dass jede Prüfstelle die Versuche dreimal durchführte, gross genug um die Wiederholbarkeit und die Reproduzierbarkeit zu berechnen.

Die teilnehmenden Labors erhielten die statistische Auswertung des Ringversuches und sie wurden gebeten, einen Kommentar abzugeben. In der Folge werden die (wenigen) eingegangenen Bemerkungen zusammengefasst:

- Es wurde der Wunsch geäussert, eine präzisere Versuchsanleitung zu formulieren. Tatsächlich lässt der Versuchsbeschreibung in den SHRP-Publikationen einen Spielraum offen, der zu einer unterschiedlichen Durchführung der Prüfung führt (Giesstemperatur, Ausformtemperatur, Berechnung von  $T_{S=300 \text{ MPa}}$ ).
- Die Prüfkörper-Vorbereitung ist detaillierter zu umschreiben, insbesondere die Temperatur bei welcher die Prüfkörper auszuformen sind.
- Das Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Aix en Provence (M.F. Migliori) hat einen interessanten Vorschlag zur Bestimmung der  $T_{S=300 \text{ MPa}}$  (Temperatur bei welcher die Steifigkeit 300 MPa beträgt) unterbreitet. Wir erlauben uns, seinen Vorschlag zu publizieren:

- Für die Bestimmung von  $T_{S=300 \text{ MPa}}$  wurde die Steifigkeit bei 3 verschiedenen Temperaturen gemessen.
- In der Abbildung 4.16 wird die Temperatur  $T_{S=300 \text{ MPa}}$  in einer linearen Darstellung mittels 2 Werten inter- bzw. extrapoliert. Je nach gewähltem Wertepaar ergibt sich eine  $T_{S=300 \text{ MPa}}$  - Temperatur von  $-23,4$  bis  $-28,2^\circ\text{C}$ ; der max. Unterschied (= mögliche Fehler) beträgt  $4,8^\circ\text{C}$ .
- In der Abbildung 4.15 wird die Temperatur  $T_{S=300 \text{ MPa}}$  analog zur Abbildung 4.14 bestimmt, jedoch in einem logarithmischen Massstab für die Steifigkeit. Die  $T_{S=300 \text{ MPa}}$  - Temperaturen liegen zwischen  $-24,6$  und  $-25,2^\circ\text{C}$ ; der max. Unterschied beträgt  $0,6^\circ\text{C}$ .

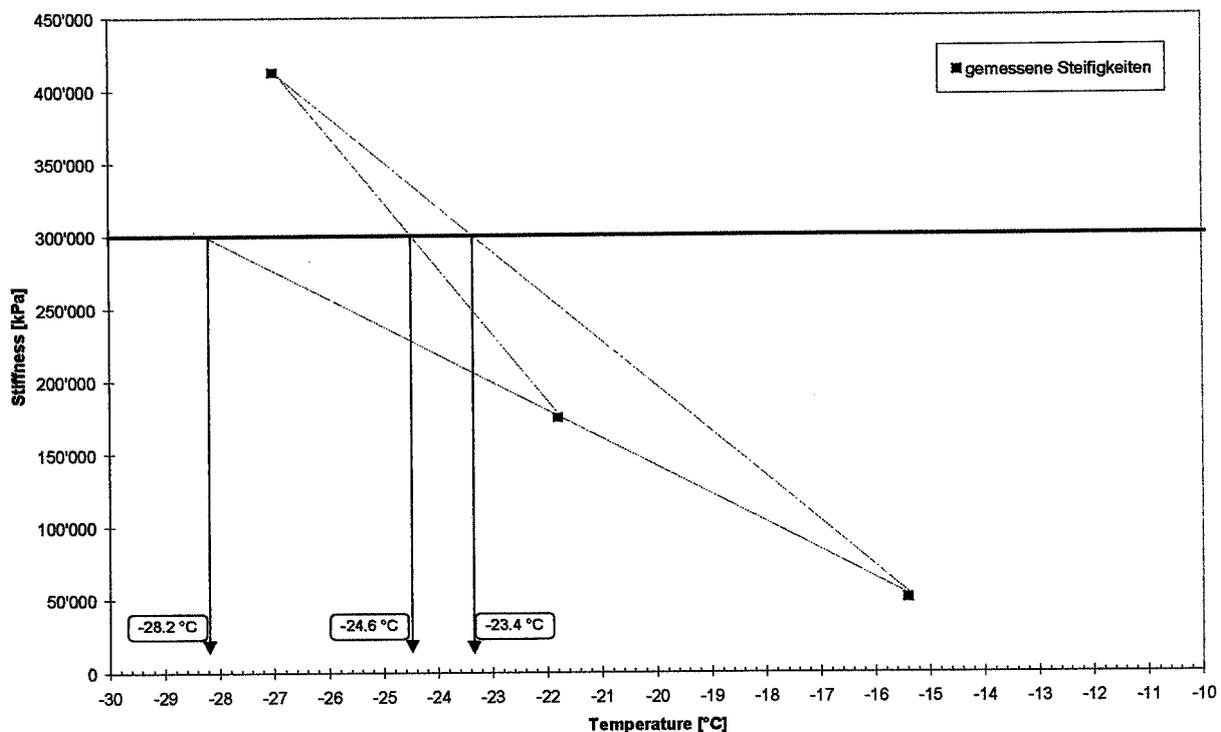
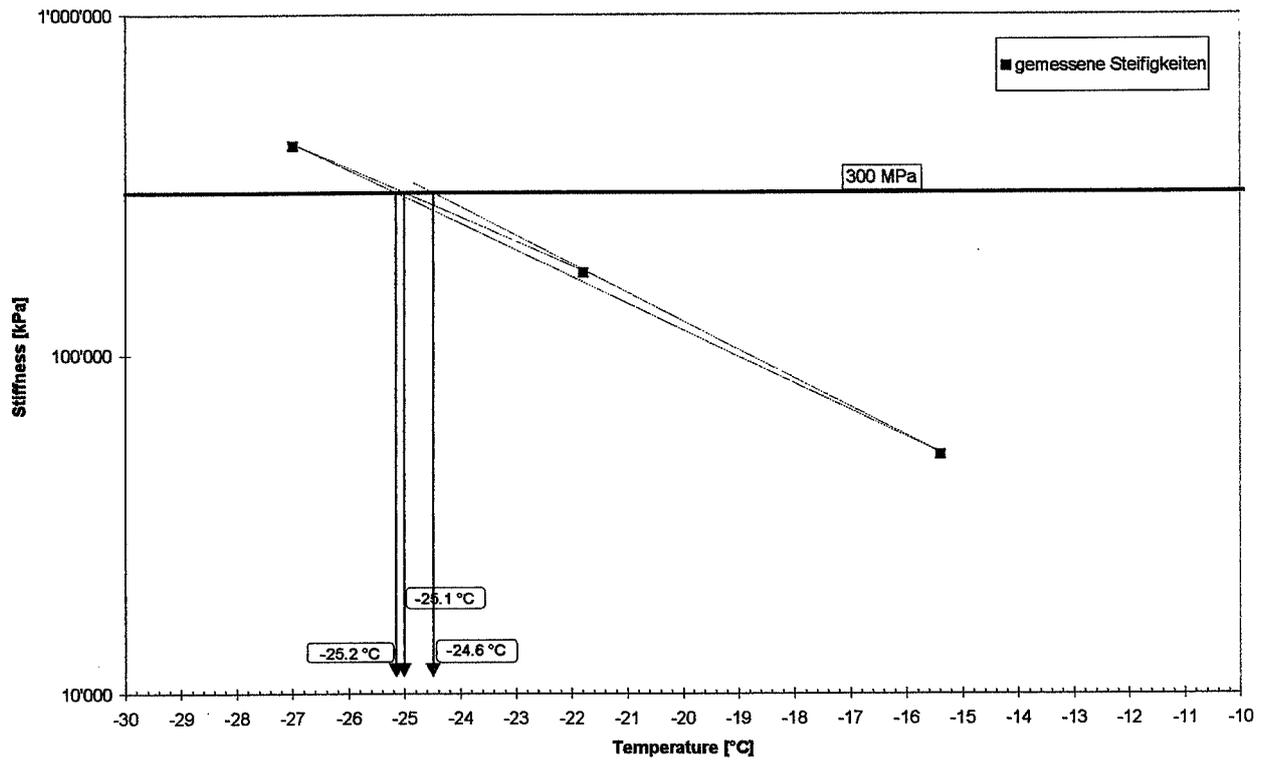
Abbildung 4.16: Berechnung von  $T_{S=300 \text{ MPa}}$  mit linearer Darstellung

Abbildung 4.15: Berechnung von  $T_{S=300\text{ MPa}}$  mit logarithmischer Darstellung der Steifigkeit



- In der zum Zeitpunkt des Ringversuches gültigen prEN.12594 „Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Vorbereitung von Proben“ [20] wurde die Temperatur festgelegt, bei welcher ein Bitumen vor der Verwendung für die Herstellung von Prüfkörpern zu erwärmen ist. Diese Temperatur lag um 80 °C über dem zu erwartenden Erweichungspunkt RuK. Gestützt auf diese Vorschrift wurde für den Ringversuch die Aufschmelztemperatur zu 140°C festgelegt.  
Es zeigte sich allerdings, dass diese Temperatur für PmB zu niedrig war! In der Zwischenzeit wurde die EN 12594 [20] angepasst; die Aufschmelztemperatur darf bei PmB unabhängig vom EP RuK bis zu max. 200°C betragen.

Die aus diesem Ringversuch errechneten Werte für r und R können, unabhängig von den geprüften Bitumensorten, angegeben werden, sie sind in der Tabelle 4.10 aufgeführt.

Tabelle 4.10: Errechnete Werte für die Wiederholbarkeit r und die Reproduzierbarkeit R

	Wiederholbarkeit r	Reproduzierbarkeit R
Steifigkeit	8%	22%
m-Wert	3%	7%
Temperatur $T_{S=300 \text{ MPa}}$	3%	6%

Steifigkeit: Die Wiederholbarkeit (r) ist befriedigend, hingegen liegt die Reproduzierbarkeit (R) zu hoch.

m-Wert: Sowohl r als auch R sind befriedigend; bezogen auf die ermittelten Werte beträgt  $r=0,010$  und  $R=0,036$ .

Temperatur  $T_{S=300 \text{ MPa}}$ : Sowohl r als auch R sind befriedigend; bezogen auf die ermittelten Werte beträgt  $r=0,7^\circ\text{C}$  und  $R=1,4^\circ\text{C}$ .

In einem 1998 durchgeführten Ringversuch [43] wurden sehr ähnliche Werte gefunden:

Tabelle 4.11: Ergebnisse eines anderen Ringversuches [43]

Parameter	Standard Abweichung	Reproduzierbarkeit R
Steifigkeit	6%	16%
m-Wert	4%	11%
Temperatur $T_{S=300 \text{ MPa}}$		ca. 1°C

#### 4.5.5 Folgerungen und Ausblick

Der Ringversuch hat gezeigt, dass mit dem Bending Beam Rheometer eine gute Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit erreicht wird.

Es wurde jedoch ebenfalls klar, dass die Prüfbedingungen und die Prüfanleitung noch genauer festgelegt und eingehalten werden müssen, um zuverlässige und vergleichbare Resultate zu erhalten. Dazu sind in der nahen Zukunft weitere Anstrengungen nötig, wobei teilweise auf Erfahrungen aus den USA zurückgegriffen werden kann.

Gestützt auf den Vorschlag des LRPC D'Aix en Provence (M.F. Migliori) sowie eigene Erfahrungen, empfehlen wir die Bestimmung der Temperatur  $T_{S=300 \text{ MPa}}$  durch Interpolation zwischen 2 max. 6°C auseinanderliegende Werte im halblogarithmischen Massstab durchzuführen. Die Bestimmung durch Extrapolation ist nur dann zulässig, wenn die Temperatur  $T_{S=300 \text{ MPa}}$  um nicht weniger als 2 °C von einer der beiden Temperaturen abweicht, bei denen der Versuch durchgeführt wurde.

Zur Zeit kann europaweit ein Bedürfnis für ein relativ einfaches und rasches Prüfverfahren zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bindemitteln festgestellt werden.

Aufgrund unserer bisherigen Erfahrung scheint uns das Bending Beam Rheometer ein vielversprechender, neuer Ansatz für die Lösung eines alten Problems zu sein [10].

Obwohl die Aufgabe des CEN darin besteht existierende, europäische Normen zu harmonisieren (z.Z. besteht keine europäische Norm zum Bending Beam Rheometer) wäre es unseres Erachtens angebracht, wenn das TC19/SC1 die Initiative ergreifen würde, den Bending Beam Rheometer zu normalisieren. Es ist sinnvoll die ursprüngliche Aufgabe des CEN zu erweitern, bevor unterschiedliche nationale Normen entstehen, die dann wiederum in mühsamer Arbeit auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen sind. Diese Hinweise wurden bereits 1997 publiziert [21].

## 5. Kraftduktilitäts-Prüfung

### 5.1 Allgemeines

In der Schweiz sind 3 Zugversuche an bituminösen Bindemitteln normiert. Es sind dies:

- Duktilitätsprüfung [21 ]
- Elastische Rückstellung [22 ]
- Kraftduktilitäts-Prüfung [17]

Die Prüfung der Duktilität sowie der elastischen Rückstellung wird gemäss Norm bei einer Temperatur von 25°C durchgeführt. Beide Versuche eignen sich daher wenig um das Kälteverhalten der bituminösen Bindemittel anzusprechen. Die Kraftduktilitäts-Prüfung welche standardmässig bei + 5°C durchgeführt wird, eignet sich wesentlich besser obwohl die Temperaturen nicht unter 0°C liegen. Bevor in den untenstehenden Kapiteln auf die Kraftduktilitäts-Prüfungen eingegangen wird, sollen noch weitere international anerkannte Prüfungen besprochen werden:

- direkter Zugversuch gemäss [16]. Dieser Versuch wird im Kapitel 7 besprochen.
- direkter Zugversuch gemäss SHRP Vorschlag [24]. Dieser Zugversuch wird an Bindemittelbalken durchgeführt, welche in einer speziellen Form gegossen werden. Die Versuchsbedingungen sind:
  - Temperatur: -0 bis -36°C (je nach Bitumensorte)
  - Zuggeschwindigkeit: 1 mm / Min.

Obwohl dieser Versuch im Rahmen des SHRP-Programmes eine gewisse Bedeutung erhalten hat wird er im weiteren aus folgenden Gründen nicht weiter verfolgt:

- Das Handling mit den Proben ist relativ schwierig. Bei der Herstellung und dem Einspannen der dünnen Bitumenproben besteht ein hohes Risiko, dass diese entweder brechen oder verformt werden.
- Bei Zugversuchen ist der Prüfkörperquerschnitt von grosser Bedeutung. Die kleinen Abmessungen der SHRP-Prüfform bringt es mit sich, dass sich kleine Ungenauigkeiten beim Giessen viel stärker auswirken.
- Die Krafteinleitung ist sehr heikel. Bindemittel bei tiefen Temperaturen verhalten sich sehr spröde. Bei der Krafteinleitung zu Beginn des Versuches sind Spannungsspitzen sehr schwierig zu verhindern. Bei den Prüfbedingungen gemäss SHRP kann trotz messtechnisch sehr aufwendiger Ausrüstung nicht verhindert werden, dass Spannungsspitzen entstehen. Im Rahmen des Forschungsauftrages stehen Versuche im Vordergrund, welche ohne aufwendige Prüfeinrichtung durchgeführt werden können.

Die Prüfmethode Kraftduktilitäts-Prüfung gemäss [17] wurde einzig und alleine zum Zweck entwickelt den Unterschied zwischen modifizierten und nicht modifizierten bituminösen Bindemitteln messbar zu machen. Im Verlaufe des Versuches wird sowohl die Kraft wie auch der Weg gemessen. Die Fläche unter der Kraftweg-Kurve entspricht der geleisteten Arbeit, welche für die Verformung des Prüfkörpers erforderlich war. Die Prüfmethode besteht im wesentlichen aus zwei Schritten, welche auch in den entsprechenden Euro-Normen in zwei verschiedene Normen festgelegt wurden:

- Versuchsdurchführung [25]
- Berechnung der Energie [26]

## 5.2 Prüfmethode

Im Forschungsauftrag FA 13/99 "Optimierung der Kraftduktilitäts-Prüfung" [27] wurde die Prüfmethode detailliert festgelegt. Dieser Forschungsauftrag diente auch als Entscheidungsgrundlage für die Euro-Norm.

### Prüfgeschwindigkeit:

Die Kraft-/Duktilitätsprüfung wird in einem herkömmlichen Duktilometer durchgeführt. Mit diesem Prüfgerät wird auch die Duktilität [22] bestimmt. Diese Prüfung erfolgt bei einer Geschwindigkeit von 50 mm/Min. Es wurde festgestellt, dass die meisten Prüfgeräte keine Möglichkeit haben eine andere Prüfgeschwindigkeit zu wählen.

Deshalb wurde die Dehngeschwindigkeit für die Durchführung der Kraft-/Duktilitätsprüfung aufgrund der Machbarkeit in den meistens Strassenbaulabors bei 50 mm/Min. festgelegt:

### Prüftemperatur:

Für die Wahl der Prüftemperatur sind folgende Faktoren massgebend:

- Bei der gewählten Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/Min. kann die Temperatur nicht allzu tief liegen, da ansonsten die meisten Bindemittel einen Sprödbbruch zeigen würden.
- Um eine gute Reproduzierbarkeit des Prüfergebnisses zu gewährleisten sollte ein möglichst grosses Signal gemessen werden können.

Die Wahl der Temperatur sollte derart erfolgen, dass möglichst grosse Kräfte auf den Prüfkörper wirken, ohne dass er brüchig wird. Die Prüfkörper sollten sich noch bei hohen Kräften duktil verhalten.

Im Rahmen des FA 13/99 "Optimierung der Kraftduktilitäts-Prüfung von PmB" [27] wurde eine Prüftemperatur von +5°C festgelegt.

### Prüfformen:

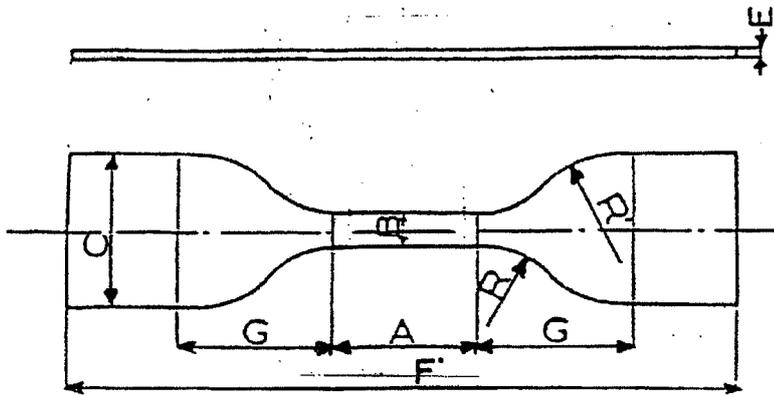
In [27] wurden 4 verschiedene Prüfkörperformen untersucht:

- H2: Beim Versuch "Essai de traction directe" gemäss LCPC wird diese Form für die Herstellung von Prüfkörper verwendet [16].
- DIN: Diese Form wird bei der Prüfung der Duktilität gemäss [22] als auch bei der Prüfung der elastischen Rückstellung gemäss [23] verwendet.
- SHRP: Im Versuch "Direct tension test" aus dem SHRP-Programm wurde eine spezielle Prüfform verwendet [24].
- ASTM: In den amerikanischen Normen wird die Duktilität mit dieser Form geprüft [28].

In der untenstehenden Abbildung 5.1 sind die verschiedenen Prüfformen einander gegenübergestellt.

Abbildung 5.1: Verwendete Prüfformen; Angaben in mm

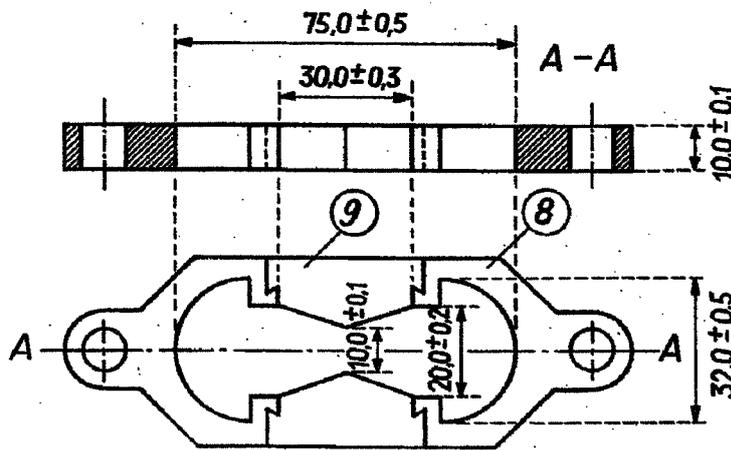
H2:



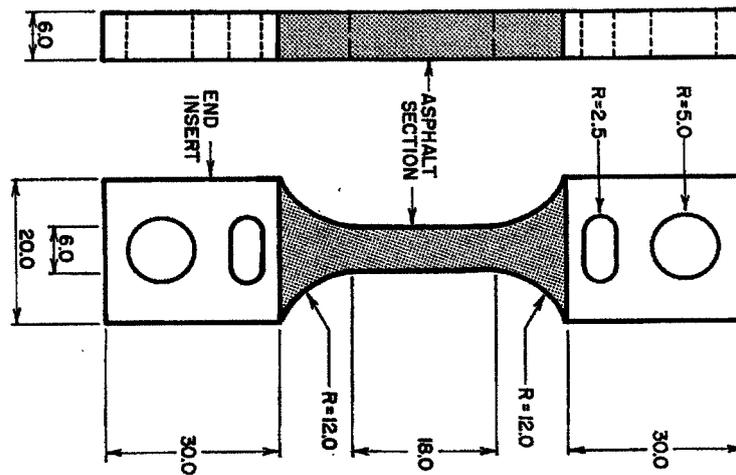
Dimensionen:

- A:  $25 \pm 0,5$
- B:  $4 \pm 0,1$
- E:  $3 \pm 0,3$
- F:  $75 \pm 2$
- C:  $12,5 \pm 1$
- G:  $12,5 \pm 1$
- R:  $8 \pm 0,3$
- R':  $12,5 \pm 0,3$

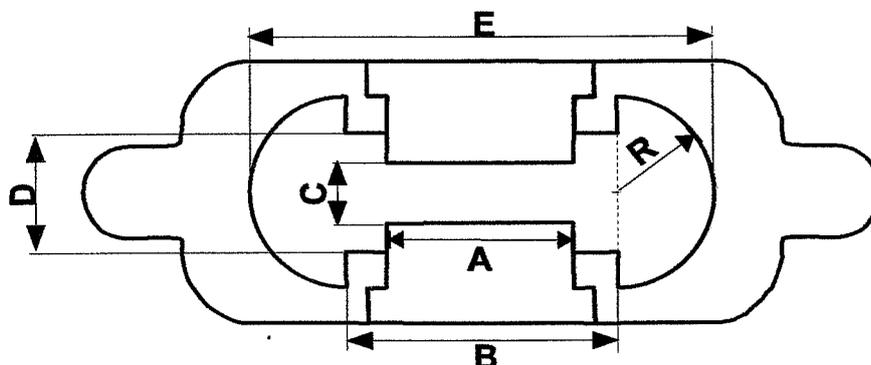
DIN:



SHRP:



ASTM:



Dimensionen:

- A:  $30,0 \pm 0,1$
- B:  $43,0 \pm 0,5$
- C:  $10,0 \pm 0,1$
- D:  $20,0 \pm 0,3$
- E:  $75,0 \pm 0,5$
- R:  $16,0 \pm 0,2$
- Dicke:  $10 \pm 0,1$

Gestützt auf die in [27] durchgeführten Untersuchungen wurde die ASTM-Form gemäss [28] gewählt. Diese Prüfform bietet folgende Vorteile:

- Die ASTM-Form hat einen gleichbleibenden Querschnitt über die Länge des Prüfkörpers.
- Das Handling der Proben bereitet keine Probleme. Grösse analog DIN-Form.
- Handelsübliche Form; wird für Duktilitäts-Prüfungen in den USA verwendet.
- Mit der ASTM-Form können sowohl elastomer- wie auch plastomermodifizierte PmB geprüft werden.

Die auch in der Schweiz für die Prüfung der Duktilität übliche DIN-Form wurde verworfen da sie folgenden, gewichtigen Nachteil aufweist:

Die Kraftduktilitäts-Prüfung mit DIN-Formen spricht die plastomermodifizierten PmB nicht an. Während mit anderen Prüfformen deutliche Unterschiede messbar sind, zeigt die DIN-Form keine Unterschiede zwischen nicht modifizierten Strassenbaubitumen und plastomermodifizierten Bitumen an.

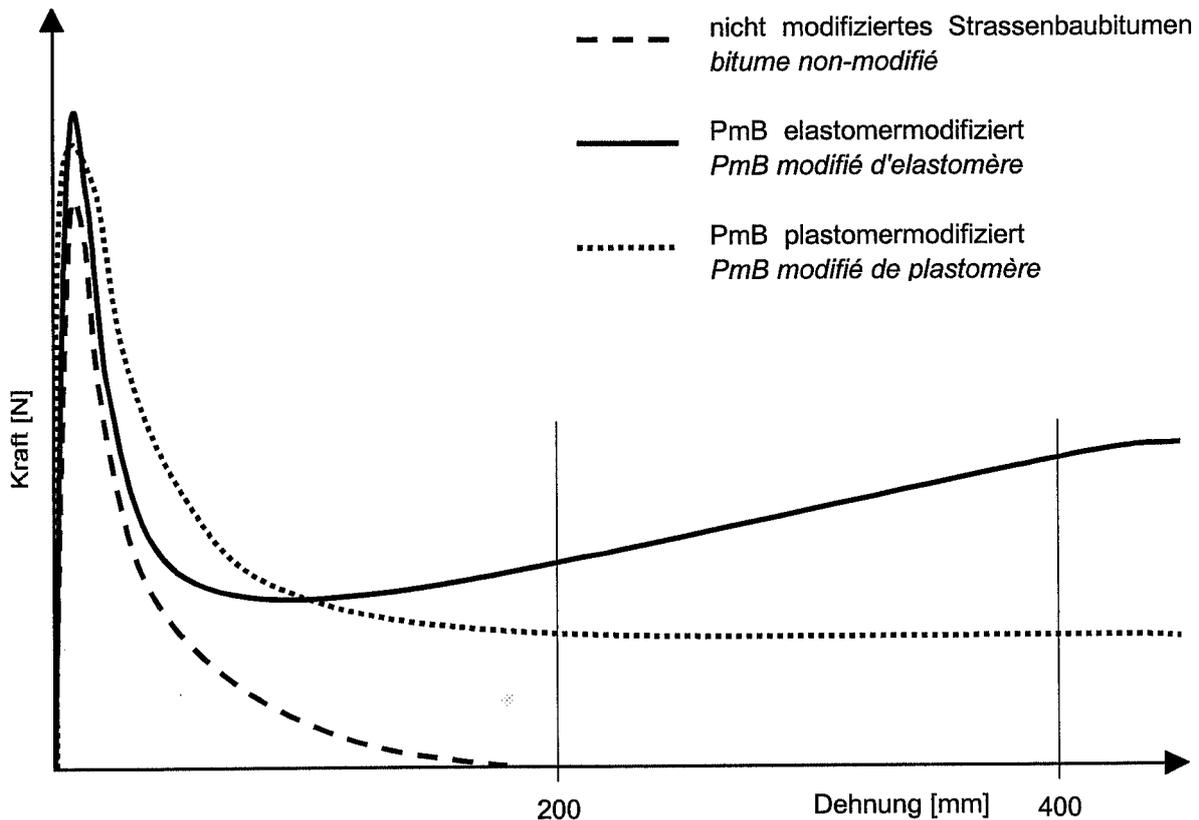
### 5.3 Berechnung der Energie

In der Praxis sind sowohl bei thermisch induzierten Spannungen (infolge Abkühlung) als auch bei mechanischer Beanspruchung eine hohe Zugfestigkeit und/oder ein duktileres Verhalten gefragt. Die Kohäsion des Bindemittels kann in diesem Sinne als Summenparameter für Zugfestigkeit und Dehnbarkeit betrachtet werden. Bei der Kraftduktilitäts-Prüfung wird die Energie als Mass für die Kohäsion bestimmt.

Die Fläche unter der Kraft-Weg-Kurve entspricht der für die Deformation erforderlichen Arbeit. Diese Verformungsarbeit ist erforderlich um die Kohäsion des Bindemittels zu überwinden. Die SN 670 548 [17] definiert in diesem Zusammenhang die Kohäsion als „Bezeichnung für den inneren Zusammenhalt eines Stoffes“:

Nicht modifizierte Bitumen weisen bei einer Prüftemperatur von 5 °C oft eine hohe maximale Kraft auf und haben daher eine entsprechend hohe Energie zum Zeitpunkt der maximalen Kraft. PmB's zeichnen sich im Unterschied dazu dadurch aus, dass sie über einen langen Weg eine hohe Kraft aufrechterhalten können. In der Abbildung 5.2 sind die typischen Verläufe dargestellt.

**Abbildung 5.2: Typische Kraft-Weg-Kurven für unterschiedliche Bindemittel: plastomermodifiziertes PmB, elastomermodifiziertes PmB und Normbitumen**



Die in der Norm SN 671 748 "Bituminöse Bindemittel, Kraftduktilität" gewählte Berechnung der Energie (Energie bei einer Dehnung von 400 mm abzüglich Energie bei einer Dehnung von 200 mm) wurde einzig und alleine mit dem Ziel festgelegt, eine klare Unterscheidung zwischen polymermodifizierten Bindemittel und Reinbitumen aufzeigen zu können. Für die Beurteilung des Kälteverhalten von Bindemitteln ist diese Auswertung nicht optimal da auch nicht modifizierte Bindemittel günstige Kälteeigenschaften aufweisen können. Zudem sagen die langen Dehnwege von bis zu 400 mm wenig aus über die in der Praxis geforderten Eigenschaften.

Für die Beurteilung des Kälteverhaltens ist eine andere Berechnung der Energie zu suchen:

- Energie bei maximaler Kraft:  
Harte, spröde Bindemittel mit hoher Bruchkraft werden bei dieser Auswertung bevorteiligt. Trotz der kurzen Wege entstehen infolge der grossen Bruchkräfte hohe Energien. Unseres Erachtens ist diese Auswertung für die Beurteilung des Kälteverhaltens weniger geeignet.
- Energie beim Bruch:  
Diese Auswertung spricht die Duktilität bei tiefen Temperaturen eher an. Ein Bindemittel das bei tiefen Temperaturen noch flexibel und dehnbar ist kann diese Eigenschaften besser einbringen als bei der Berechnung der Energie bei maximaler Kraft.

Aufgrund obenstehender Argumente wurde im folgenden die Energie beim Bruch als Ergebnis der Kraftduktilitäts-Prüfung weiter verwendet.

Im Zuge der Normierung der Bestimmung der Kraftduktilität wurde die Energie zwischen einer Dehnung von 400 mm und 200 mm ( $E_{400-200}$ ) als massgebendes Kriterium festgelegt. Dies erfolgte mit dem alleinigen Ziel zwischen einem PmB und einem Reinbitumen unterscheiden zu können.

## 5.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der bestimmten Energien an den verschiedenen Bindemitteln werden an dieser Stelle nicht aufgeführt, da sie nur im Vergleich mit anderen Prüfmethode interessant sind. Im Anhang 3 „Übersicht aller Untersuchungsergebnisse“ ist sowohl die Energien beim Bruch  $E_B$ , als auch die normierte Energie  $E_{400-200}$  aufgeführt. In den Kapiteln 8 „Vergleich der Prüfverfahren“ und 9 „Vergleich mit Verhalten auf der Strasse“ werden diese Untersuchungsergebnisse weiter verwendet.

## 6. Komplexer Modul

### 6.1 Organisation der Versuche

Die Forschungsstelle, EMPA Dübendorf, Abteilung Strassenbau/Abdichtung wurde von der IMP beauftragt, als Bestandteil des Forschungsauftrages 6/95 folgende Prüfungen durchzuführen:

- Bestimmen des komplexen Moduls und der Phasenverschiebung mittels dem Dynamic Shear Rheometer DSR im mittleren Temperaturbereich (10 bis 40 °C).
- Bestimmen des komplexen Moduls und der Phasenverschiebung mittels dem koaxialen Schubtest für Bindemittel im tiefen Temperaturbereich (-15 bis +15 °C).

### 6.2 Methodik

#### 6.2.1 Begriffe

##### **DSR; Dynamic Shear Rheometer:**

Das Bindemittel wird in diesem Prüfgerät nach [29,30] zwischen zwei kreisrunde, parallele Platten eingebaut. Die eine davon wird dann gegen die andere verdreht, wobei diese Auslenkung gegenüber der Ruhelage klein und sinusförmig ist. Die obere Platte wird also zuerst etwas nach links gedreht, dann zurück zur Ruhelage und weiter nach rechts und dann wieder zurück zur Ruhelage, wobei der nächste Zyklus sich unmittelbar anschliesst.

##### **KAST-BIN; Koaxialer Schubtest:**

Das Bindemittel wird zwischen einen inneren Zylinder und einen äusseren Hohlzylinder eingegossen. Der innere Zylinder wird in axialer Richtung gegenüber dem äusseren festen Zylinder verschoben, wobei diese Auslenkung klein ist und einen sinusförmigen Verlauf aufweist [31].

#### 6.2.2 Prüfprinzipien

##### **DSR:**

Eine zylindrische, zwischen zwei Stahlplatten eingebaute Bindemittelprobe von 8 mm Durchmesser und 1 mm Dicke, wird bei den gewählten Prüftemperaturen einer Oszillation der gewünschten Frequenzen unterworfen. Die Prüfbedingungen sind in Tabelle 6.1 zusammengestellt. Die Reihenfolge von Temperaturen und Frequenzen entspricht dem zeitlichen Ablauf der Prüfung, wobei zu jeder Prüftemperatur jeweils bei allen angegebenen Frequenzen geprüft wurde bevor die nächste Temperatur angestellt wurde.

Die Rotation der beweglichen Platte und das Drehmoment werden als Funktion der Zeit gemessen und daraus werden für die gewählten Temperaturen und Oszillationsfrequenzen die mechanischen Kennwerte ermittelt.

**KAST-BIN (Koaxialer Schubtest für Bindemittel):**

Das zu prüfende Bindemittel wird zwischen einem äusseren Hohlzylinder von 60 mm Innenradius und einem inneren Zylinder von 50 mm Radius eingegossen; die Prüfkörperhöhe beträgt 200 mm. Der äussere Zylinder wird fest in der Prüfkammer montiert, der innere mit der Servohydraulik verbunden. Durch Anwendung einer sinusförmigen Kraft (Zug-/Druck) wird dem inneren Zylinder eine sinusförmige Auslenkung von der Mittellage aufgezwungen. Die Probe wird so bei gewählten Prüftemperaturen, Frequenzen und Kraftamplituden einer Scherung unterworfen. Die Prüfbedingungen sind in Tabelle 6.2 zusammengestellt. Die Reihenfolge von Temperaturen und Frequenzen entspricht dem zeitlichen Ablauf der Prüfung, wobei zu jeder Prüftemperatur jeweils bei allen angegebenen Frequenzen geprüft wurde bevor die nächste Temperatur angesteuert wurde.

Die Auslenkung des beweglichen Innenzylinders und die Kraft werden als Funktion der Zeit gemessen und daraus werden für die gewählten Temperaturen und Oszillationsfrequenzen die mechanischen Kennwerte ermittelt.

**6.3 Auswahl der untersuchten Materialien**

Die untersuchten Bindemittel sind in der Tabelle 6.1 zusammengestellt. Die Kennzahlen (Penetration, EP RuK etc.) der einzelnen untersuchten Bindemittel können dem Anhang 1 entnommen werden. Für die Bindemittelsorten wurden die aktuellen Bezeichnungen der Norm EN 12591 verwendet.

Tabelle 6.1: Liste der Bindemittel an denen die Prüfungen DSR und KAST-BIN durchgeführt wurden.

Bezeichnungen	Bindemittelsorte
IMP	
R0033	B 160/220
A97-1562	B 70/100
R0029	B 35/50
A98-2215	B 10/20
A95-2102	PmB 50/70-53 elastomermodifiziert
A96-0171	PmB 30/50-58 plastomermodifiziert

## 6.4 Durchführen der Untersuchungen

### 6.4.1 Bestimmen der mechanischen Kennwerte mit dem DSR

#### Prüfkörperherstellung:

Die Proben wurden kalt entnommen, indem ein Polylöffel für 20 Sekunden in die gerade noch ein wenig gelblich leuchtende Flamme des Bunsenbrenners gehalten wurden. Dann wurde ein Polylöffel voll des Bindemittels aus der Probe herausgestochen. Bei weichen Bindemitteln schmolz dieses als Folge der im Metall des Polylöffels gespeicherten Wärme, bei härteren Bindemitteln wurde der Löffel je nach Bedarf noch ein oder zwei mal für 5 Sekunden in die Flamme gehalten. Anschliessend wurden die Proben auf den Prüfstempel gegossen.

#### Prüfkörpereinbau:

Die Proben wurden in Anlehnung an [29] eingebaut.

#### Versuchsdurchführung:

Die Versuche wurden gemäss [30] durchgeführt, die Prüfbedingungen sind in der Tabelle 6.2. aufgeführt. Die Temperatur wurde, ausgehend von 40 °C, in 5°C-Schritte auf 10 °C reduziert, wobei sämtliche Frequenzen in der höheren Temperatur gefahren wurden bevor die Temperatur abgesenkt wurde.

Die maximale Auslenkung der Proben betrug 2 mm.

Tabelle 6.2: Prüfbedingungen für die Bestimmung des Moduls mittels DSR

Temperaturen [°C]	40, 35, 30, 25, 20, 15, 10
Frequenzen [s <sup>-1</sup> ]	0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 1.5, 2, 3, 5, 7, 10
Strain [%]	2

### 6.4.2 Bestimmung der mechanischen Kennwerte mit dem KAST-BIN

#### Prüfkörperherstellung:

Die Bindemittel und die KAST-BIN-Prüfform wurden auf die Vergiesstemperaturen gemäss [20] aufgewärmt. Das flüssige Bindemittel wurde vorsichtig in die Form eingegossen. Die Form wurde in einer Kapelle zum Abkühlen stehen gelassen, das Bindemittel zugedeckt in den Ofen zurückgestellt. Nachdem die Form sich auf etwa 60 bis 80 °C abgekühlt hatte, wurde nochmals eine geringe Menge Bindemittel nachgeführt, um die Volumenänderung durch Kontraktion auszugleichen.

#### Prüfkörpereinbau:

Die Prüfform wurde in die Prüfanlage eingebaut, mit der Servohydraulik verbunden und bis zum Start der Prüfung in fixer Position gehalten. Der Weggeber wurde mit Endmassen kontrolliert, die Temperaturmessung mit kalibriertem Thermometer.

### Versuchsdurchführung:

Die Versuchsdurchführung erfolgte automatisch. Die verwendete Software gewährleistet eine Temperierung des Bindemittels nach Erreichen der gewünschten Temperatur während einer Stunde. Das Temperaturngleichgewicht im Prüfkörper wird damit sichergestellt.

An jedem Bindemittel wurden die komplexen Module in Abhängigkeit von der Temperatur und Frequenz bestimmt. Die Amplituden wurden variiert, um sicherzustellen, dass bei allen Temperaturen und Frequenzen hinreichend genaue Datensätze vorlagen. Zusätzlich wurde an den Bindemitteln das Abkühlverhalten bestimmt, indem unter dauernder Schwingbelastung ( $2 \text{ s}^{-1}$ ) die Probe von  $15$  auf  $-15$  °C abgekühlt wurde. Eine sprunghafte Abnahme des Moduls zeigt Rissbildung unter der kombinierten Einwirkung von thermischer Spannung und Schwingbelastung an. Bei hohen Modulwerten ist bei dieser Prüfserie wegen den kleinen Verformungen eine zunehmende Streuung festzustellen. Zu erkennen ist diese Streubreite an der Bandbreite der Modulkurve. Die Rissbildung kann aber dennoch erkannt werden, weil die durch sie verursachte Modulabnahme generell grösser ist als die Streuung der Module.

Tabelle 6.3: Prüfbedingungen für den koaxialen Schubtest KAST-BIN

Prüfung	Details	Prüfbedingungen
Modulbestimmung	kraft geregelt	Temperaturen [°C]: 15, 10, 5, 0, -5, -10, -15
		Frequenzen [ $\text{s}^{-1}$ ]: 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8
		Amplituden [kN]: 0.3, 1, 3
Modulbestimmung	weg geregelt	Temperaturen [°C]: -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15
		Frequenzen [ $\text{s}^{-1}$ ]: 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8
		Amplituden [kN]: 0.3, 1, 3
Abkühlverhalten		Temperatur [°C]: von 15.0 auf -15.0 mit einer Rate von 1°C pro Stunde abkühlen
		Frequenz [ $\text{s}^{-1}$ ]: 2.0
		Amplitude [kN]: 2.0

#### 6.4.3 Bestimmen des Abkühlverhaltens mit dem KAST-BIN

Prüfkörperherstellung und Einbau erfolgen wie in 6.4.2 beschrieben. Die Versuchsdurchführung erfolgt ebenfalls automatisch. Nach der Einstellung der Starttemperatur wird das Temperaturngleichgewicht wie in 6.4.2 abgewartet. Das Fahren des Temperaturprofils erfolgt automatisch, dabei können aber Abweichungen zwischen dem Sollprofil und dem Istprofil entstehen.

Bei einer konstanten Frequenz von  $2 \text{ s}^{-1}$  wurde der Prüfkörper von  $+15$  °C auf  $-15$  °C abgekühlt; dies entspricht einer Abkühlrate von  $5$  °C pro Stunde.

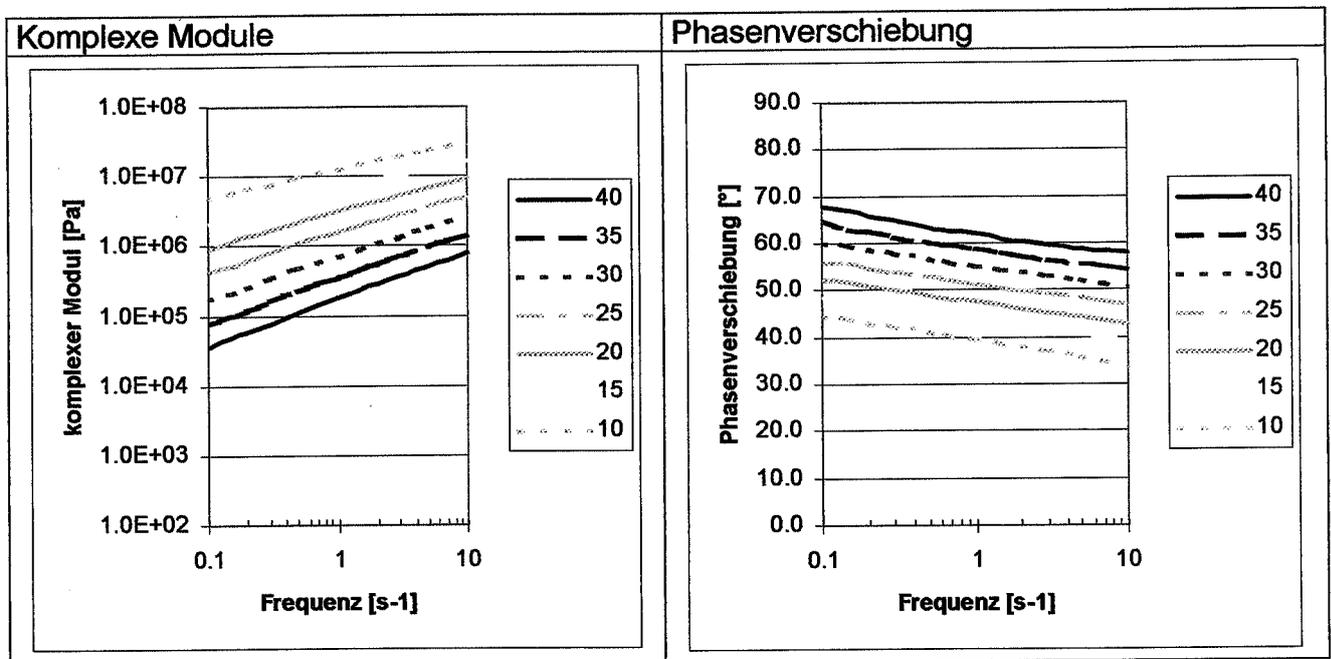
## 6.5 Ergebnisse

### 6.5.1 Mechanische Kennwerte mit dem DSR

Die komplexen Module und die Phasenverschiebungen sind für einen Temperaturbereich von 10 bis 40 °C und für einen Frequenzbereich von 0.1 bis 10 Hertz für die Bindemittel B 160/220 bis PMB 30/50-58 (PLAST.) im Anhang 4 zusammengestellt.

In der Abbildung 6.1 werden die komplexen Module und Phasenverschiebungen des Bindemittels B 35/50 in Abhängigkeit der Temperatur zur Veranschaulichung der Ergebnisse aufgeführt (weitere Abbildungen im Anhang).

Abbildung 6.1: Komplexe Module und Phasenverschiebungen des Bindemittels B 35/50 als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen



### 6.5.2 Mechanische Kennwerte mit dem KAST-BIN

Die komplexen Module für einen Temperaturbereich von -15 bis 15 °C und für einen Frequenzbereich von 0.125 bis 8 Hertz sind für die Bindemittel B 160/220 bis PMB 30/50-58 (PLAST.) im Anhang 5 sowohl in Tabellenform als auch graphisch dargestellt zu finden.

Die Prüfungen am sehr weichen Bindemittel B 160/220 mussten in Abweichung zu allen anderen Bindemitteln weggeregelt durchgeführt werden.

#### Kommentare:

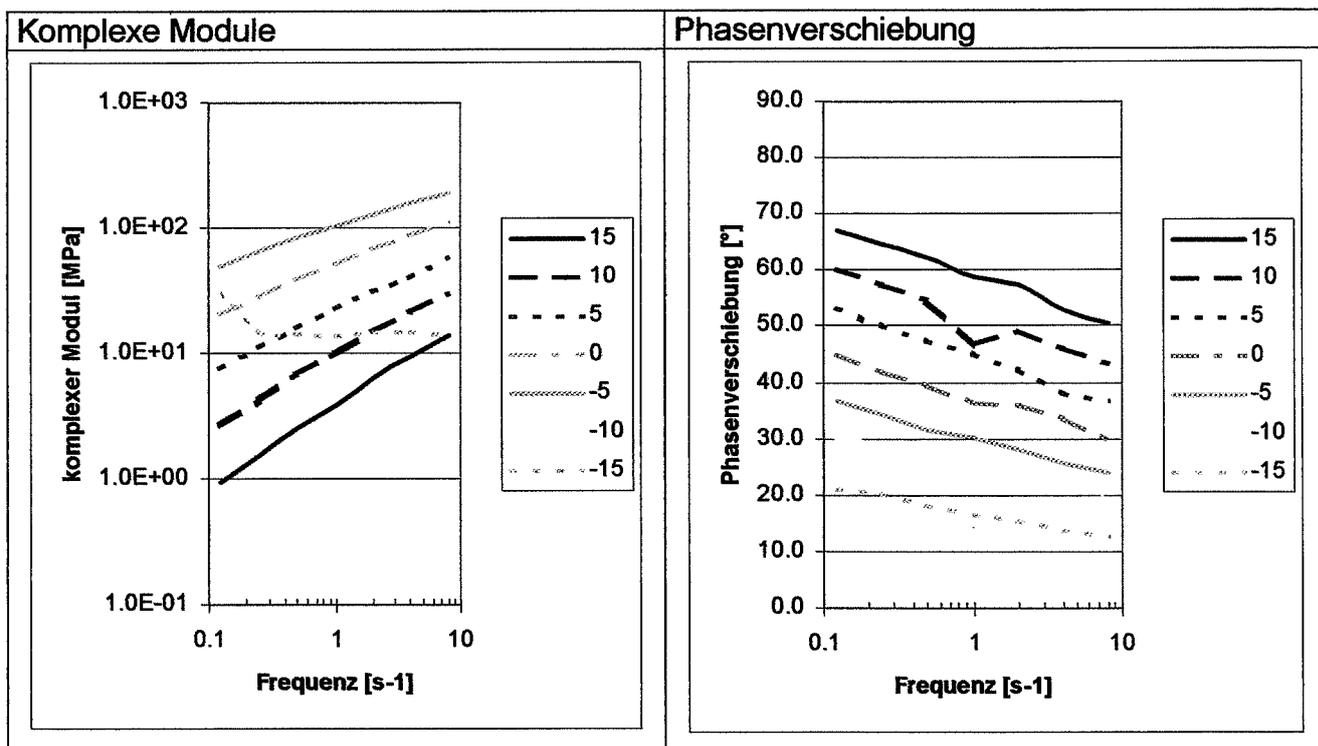
##### *Bindemittel B 160/220:*

Beim Bindemittel B 160/220 kann kein Anzeichen für Rissbildung beobachtet werden.

##### *Bindemittel B 70/100:*

Der ausgeprägte Abfall der Module (ersichtlich in der Abbildung 6.2) zeigt das Auftreten eines Risses unter der mechanischen Belastung bei Temperatur -15 °C.

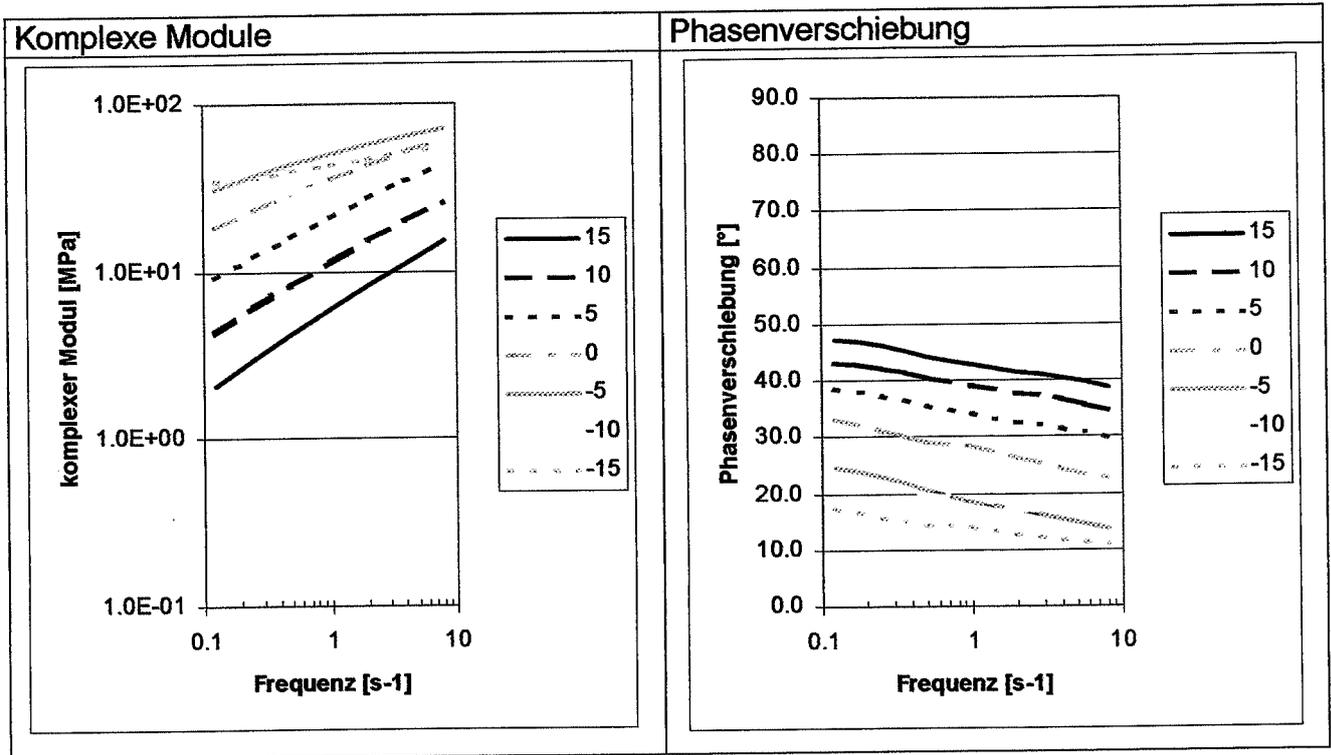
Abbildung 6.2: Komplexe Module und Phasenverschiebungen des Bindemittels B 70/100 als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-BIN-Messungen



**Bindemittel B 35/50:**

Der Abfall der Module (ersichtlich in der Abbildung 6.3) zeigt das Auftreten eines partiellen Risses unter der mechanischen Belastung bei Temperatur -10 °C. Bestätigt wird das durch die Unstetigkeit in der Phasenverschiebung, die bei der selben Temperatur auftritt.

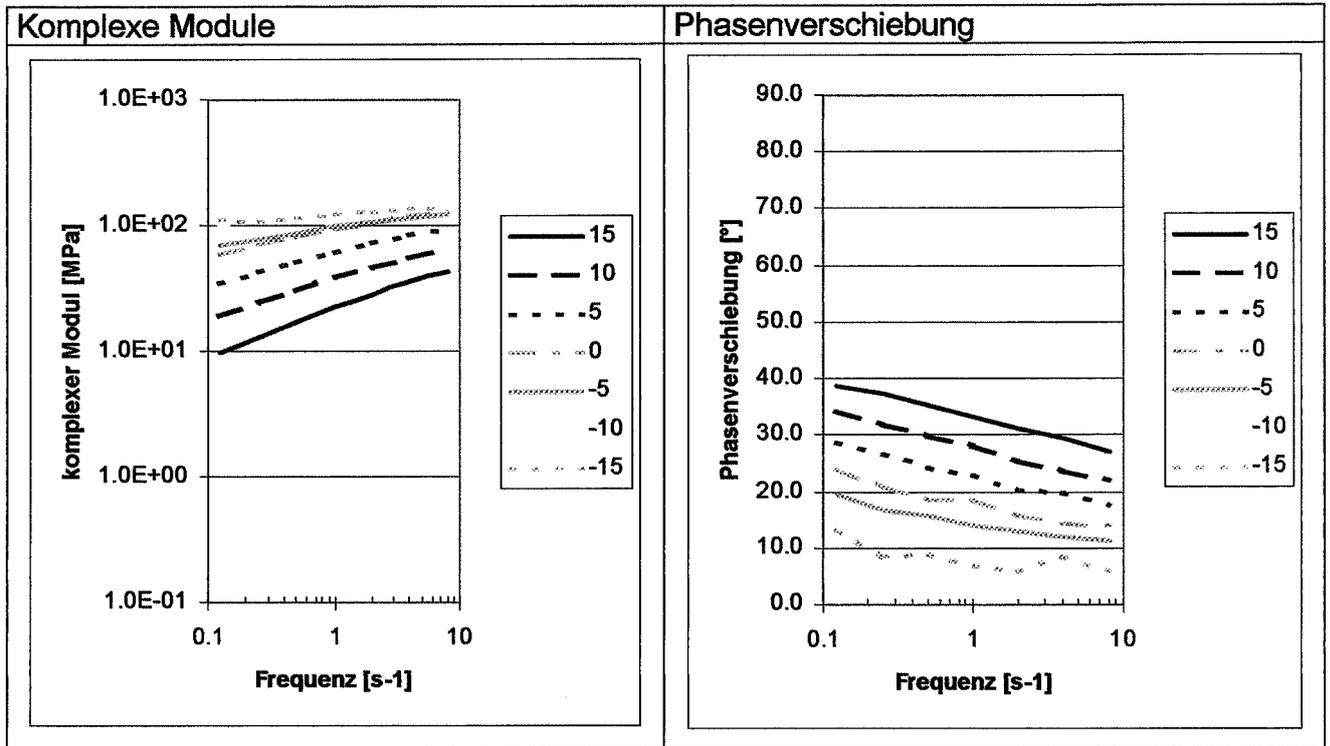
Abbildung 6.3: Komplexe Module und Phasenverschiebungen des Bindemittels B 35/50 als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-BIN-Messungen



**Bindemittel B 10/20:**

Der flache Verlauf der Module (ersichtlich in Abbildung 6.4) bei  $-5^{\circ}\text{C}$  zeigt eine einsetzende Rissbildung insbesondere bei höheren Frequenzen an, die bei  $-15^{\circ}\text{C}$  zuerst abfallenden Module zeigen eine mit der mechanischen Belastung sich entwickelnde verstärkte Rissbildung an.

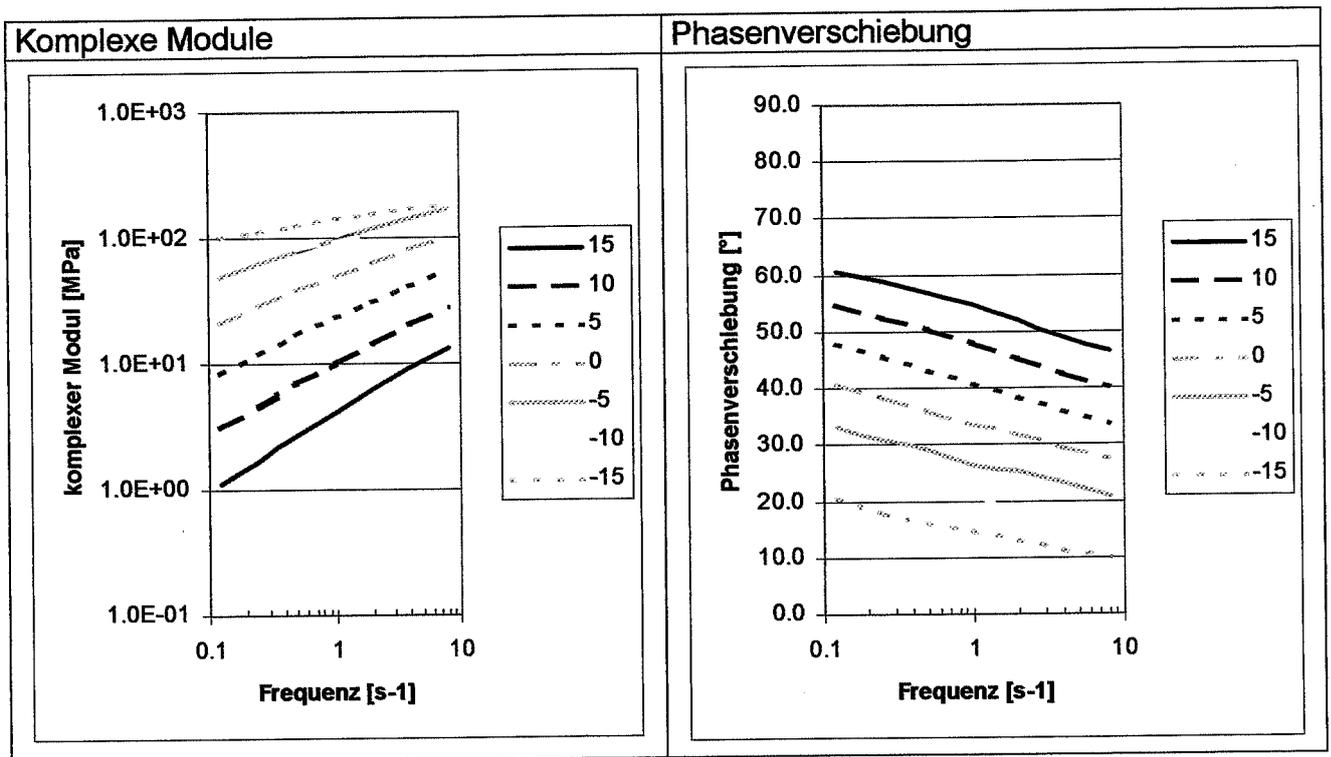
Abbildung 6.4: Komplexe Module und Phasenverschiebungen des Bindemittels B 10/20 als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-BIN-Messungen



**Bindemittel PMB 50/70-53 (ELAST.):**

Der Abfall der Module (ersichtlich in der Abbildung 6.5) zeigt das Auftreten eines Risses unter der mechanischen Belastung bei Temperatur -15 °C.

Abbildung 6.5: Komplexe Module und Phasenverschiebungen des Bindemittels PMB 50/70-53 (ELAST.) als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-BIN-Messungen



**Bindemittel PMB 30/50-58 (PLAST.):**

Beim Bindemittel PMB 30/50-58 (PLAST.) kann kein Anzeichen für Rissbildung beobachtet werden.

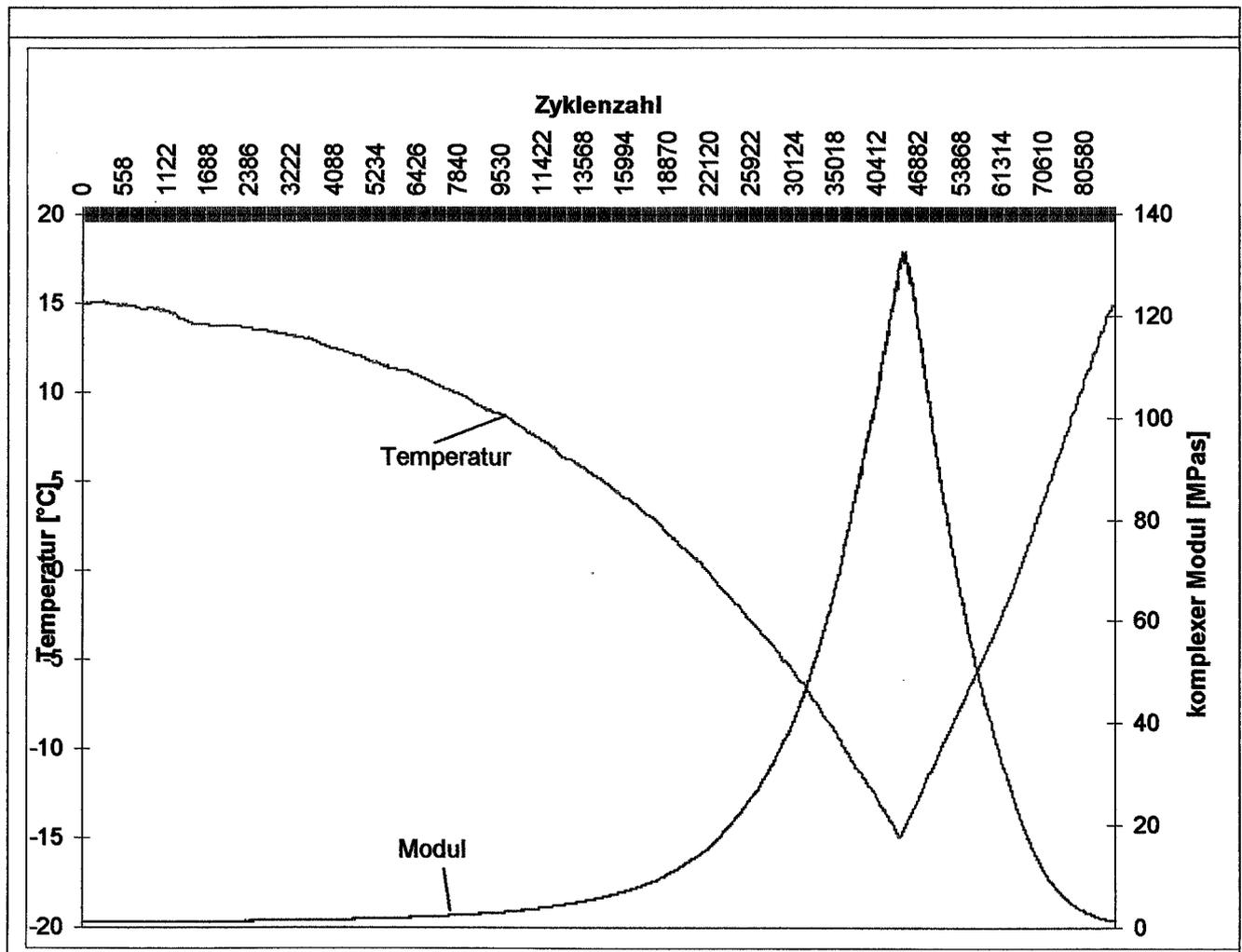
### 6.5.3 Abkühlverhaltens mit dem KAST-BIN

Um die beim Bestimmen der komplexen Module beobachteten Anzeichen von Rissbildung zu bestätigen, wurden die Bindemittel unter Schwingbelastung abgekühlt. Plötzlicher Abfall des Moduls kann dabei als sicheres Anzeichen für Rissbildung bewertet werden. Der Versuch wurde ausgehend von einer Temperatur von +15°C bis zu einer Temperatur von -15°C gefahren

#### Bindemittel A:

Es ist keine Rissbildung festzustellen. Die Bruchtemperatur liegt somit deutlich tiefer als -15 °C.

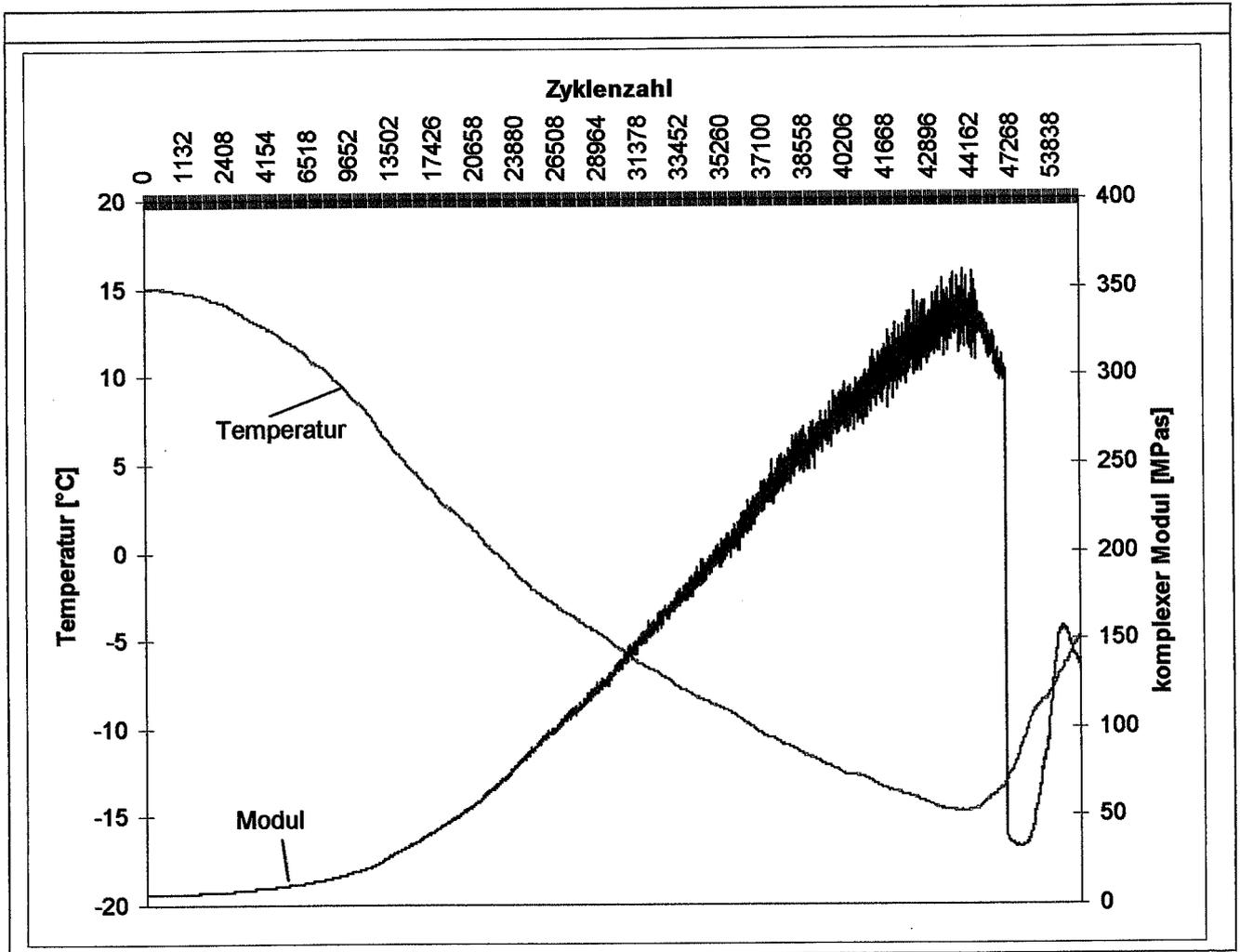
Abbildung 6.6: Abkühlverhalten des Bindemittels B 160/220, als Funktion der Zyklenzahl und somit der Temperatur.



**Bindemittel B 70/100:**

Ein ausgeprägter Riss, verbunden mit einem starken Abfall des Moduls, tritt erst nach dem Überschreiten des Temperaturminimums auf. Die Bruchtemperatur kann somit eindeutig auf -15 °C festgelegt werden. Ein Modul von 300 MPa konnte ohne Rissbildung erreicht werden.

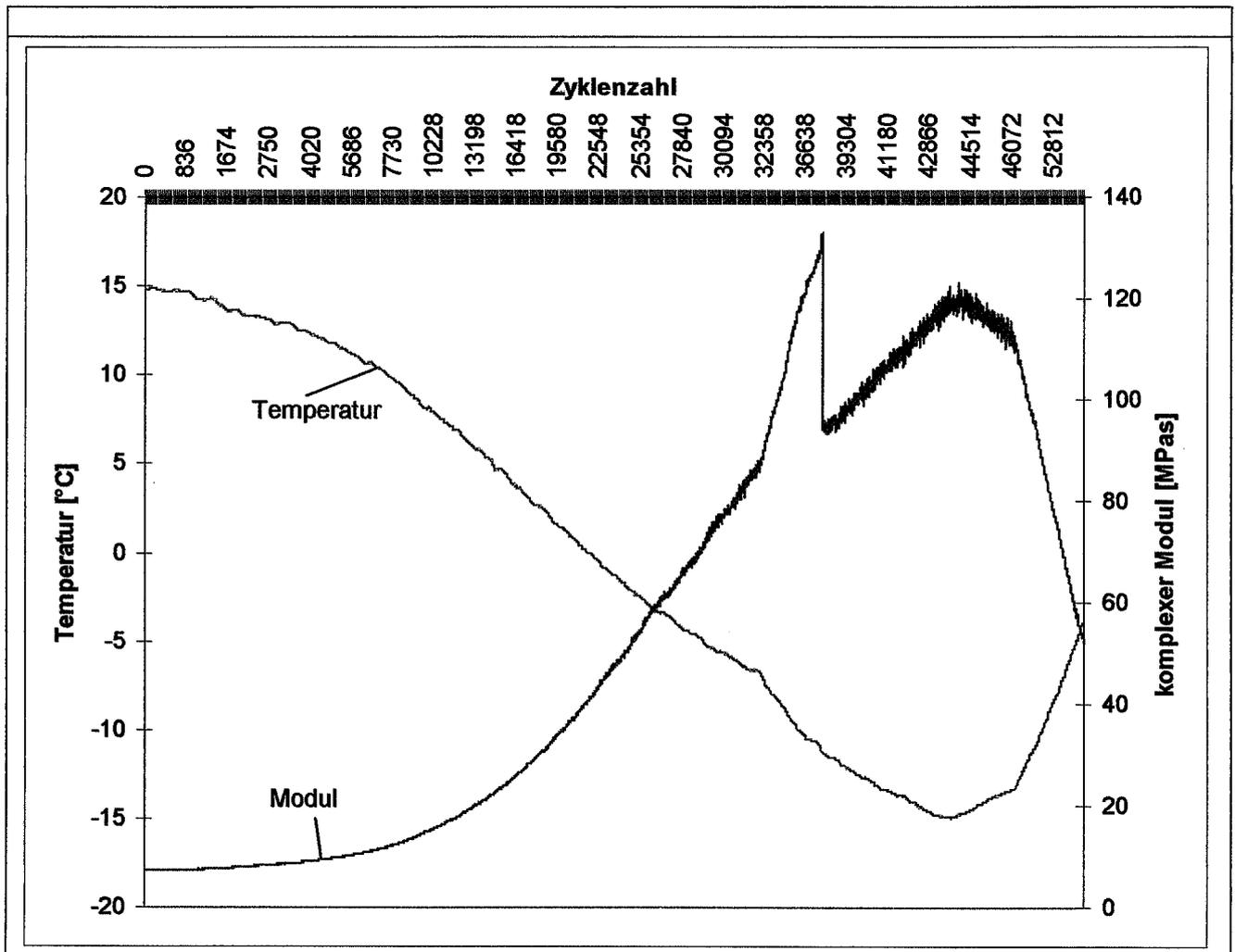
Abbildung 6.7: Abkühlverhalten des Bindemittels B 70/100, als Funktion der Zyklenzahl und somit der Temperatur.



**Bindemittel B 35/50:**

Ein Riss, verbunden mit einem Abfall des Moduls, tritt bei -11 °C auf. Die Bruchtemperatur kann auf -11 °C festgelegt werden. Die Rissbildung trat bei einem Modul von etwa 130 MPa auf.

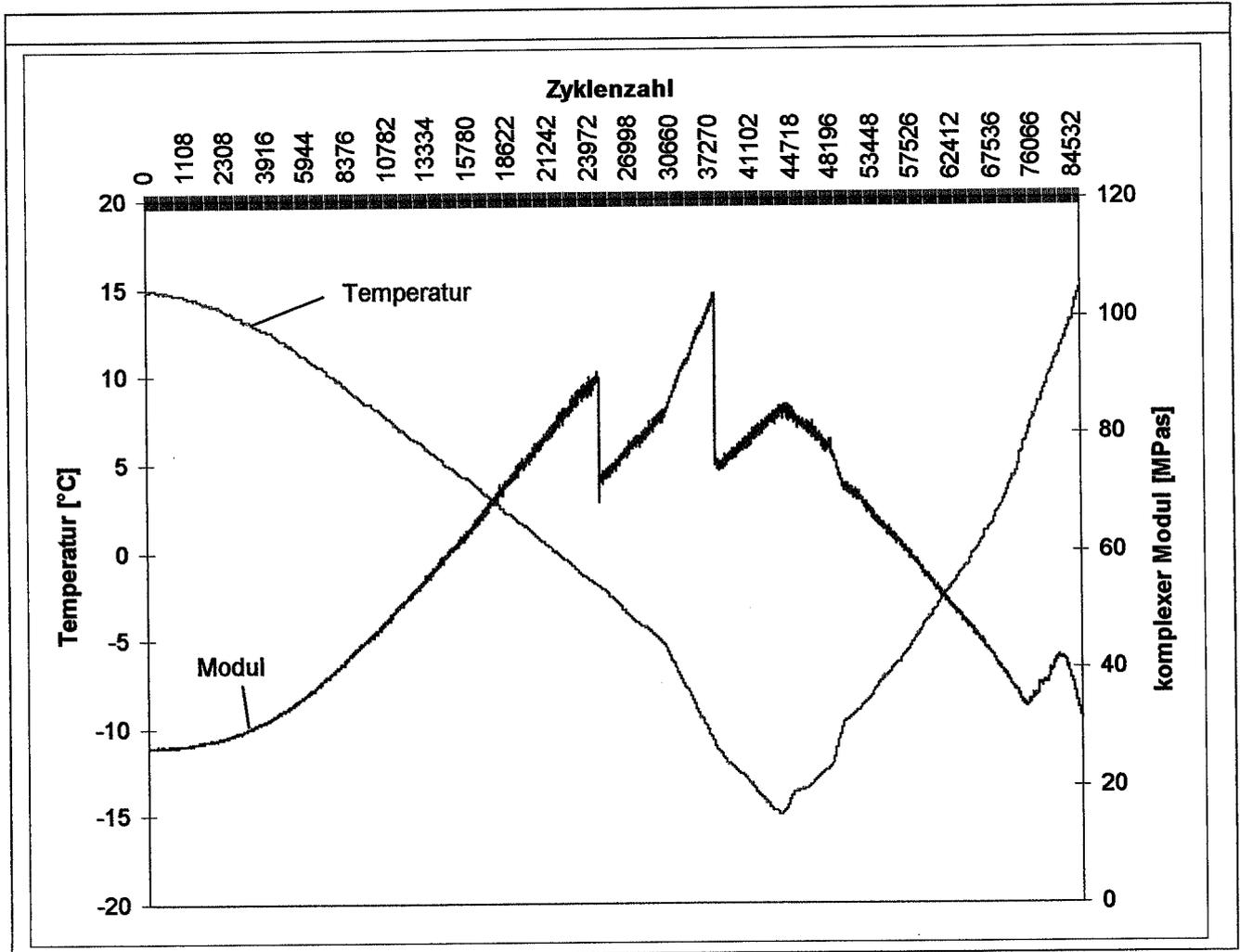
Abbildung 6.8: Abkühlverhalten des Bindemittels B 35/50, als Funktion der Zyklenzahl und somit der Temperatur.



**Bindemittel B 10/20:**

Ein erster Riss, verbunden mit einem geringen Abfall des Moduls, tritt bei -2 °C auf, zweiter Riss bei ca. -11 °C. Die Bruchtemperatur kann auf den Mittelwert -6.5 °C festgelegt werden, da beide Risse bedeutend sind. Der erste Riss wurde bei einem Modul von etwa 90 MPa beobachtet.

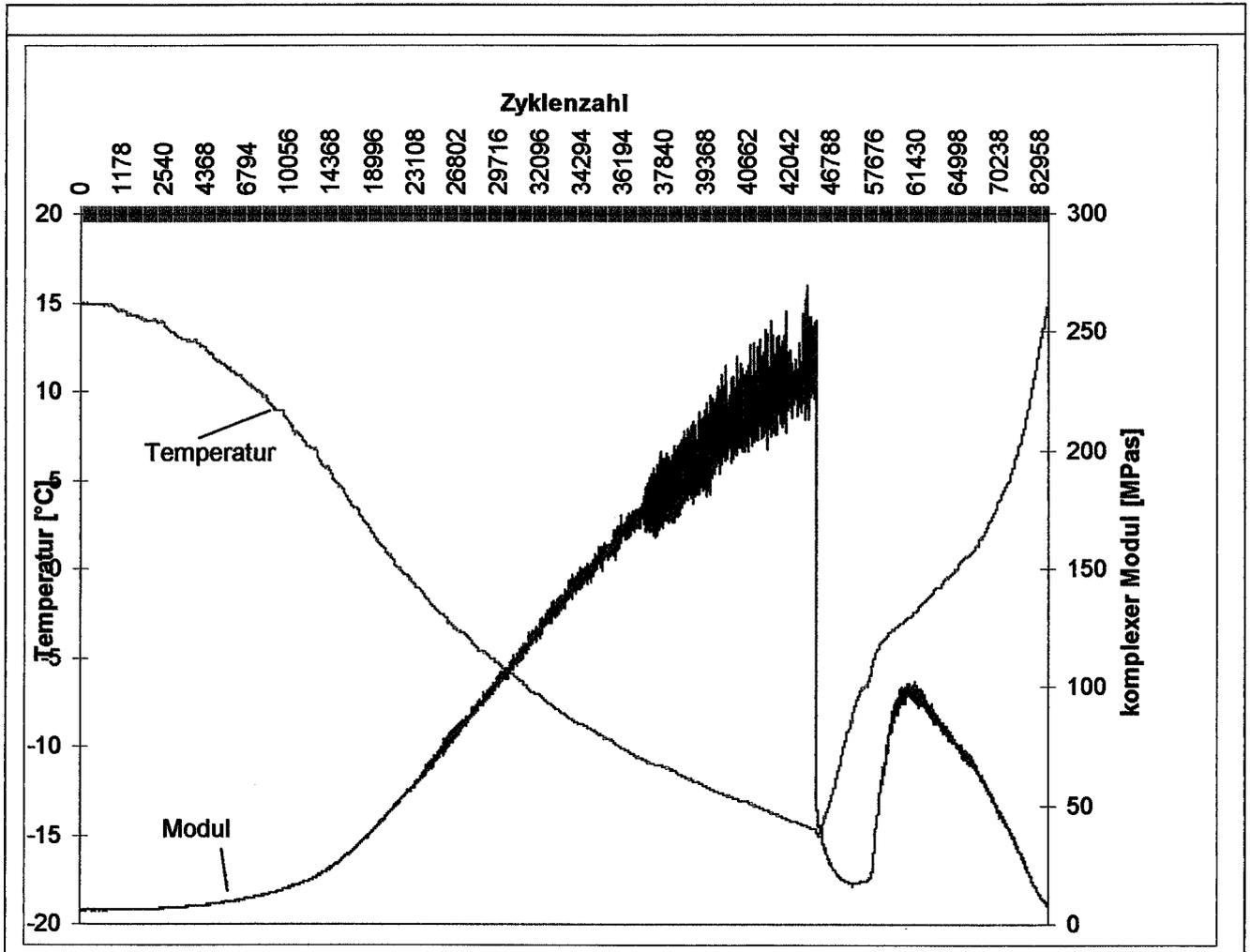
Abbildung 6.9: Abkühlverhalten des Bindemittels B 10/20, als Funktion der Zyklenzahl und somit der Temperatur



**Bindemittel E:**

Anzeichen für eine erste, minime Rissbildung zeigen sich bei -14 °C, ein praktisch völliges Reisen tritt bei -14.7 °C auf, verbunden mit einem dramatischen Abfall des Moduls. Die Bruchtemperatur kann auf -14.7 °C festgelegt werden. Der Modul bei der Rissbildung beträgt etwa 230 MPa.

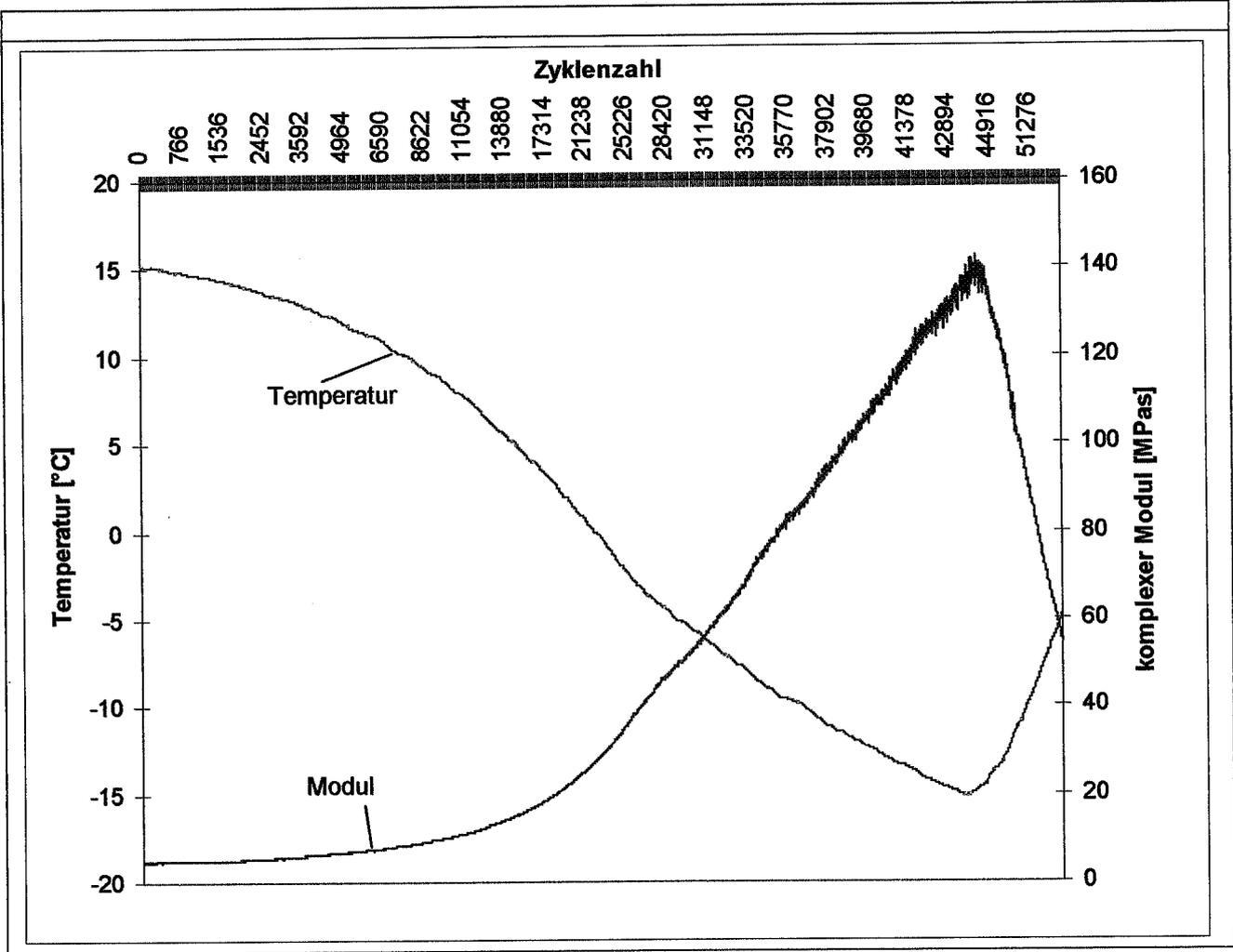
Abbildung 6.10: Abkühlverhalten des Bindemittels PMB 50/70-53 (ELAST.), als Funktion der Zyklenzahl und somit der Temperatur



**Bindemittel F:**

Es tritt kein Riss verbunden mit einem Abfall des Moduls auf. Die Bruchtemperatur liegt somit tiefer als -15 °C.

Abbildung 6.11: Abkühlverhalten des Bindemittels PMB 50/70-53 (ELAST.), als Funktion der Zyklenzahl und somit der Temperatur



### 6.5.4 Vergleich der Modulwerte

Die bei jeweils gleicher Temperatur und Frequenz in den verschiedenen Prüfungen ermittelten Modulwerte sind im Anhang 6 einander gegenübergestellt.

In der Tabelle 6.4 werden die Module der 3 Prüfverfahren miteinander verglichen. Da beim Abkühlverfahren eine konstante Frequenz von  $2 \text{ s}^{-1}$  gefahren wurde, werden in der Tabelle die Module der beiden anderen Prüfverfahren ebenfalls bei einer Frequenz von  $2 \text{ s}^{-1}$  eingesetzt.

Zu beachten ist:

- Die drei Prüfverfahren weisen eine unterschiedliche Vorgeschichte bezüglich der Temperatur auf, die je nach Material zu Unterschieden in den mechanischen Kennwerten führen kann.
- Die drei Verfahren weisen zudem unterschiedliche Scherraten auf, die gerade bei polymermodifizierten und sehr harten Bindemittel ebenfalls zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.
- Teilweise erreichte das DSR-Gerät nicht mehr den eingestellten Strain von 2%, bei harten Bindemitteln und bei  $10 \text{ °C}$  nicht einmal mehr den vom Hersteller als Minimum geforderten Strain von 1%. Die Messungen sind dementsprechend ungenau.

Tabelle 6.4: Vergleich der komplexen Module aller 6 untersuchten Bindemittel, bestimmt mit den 3 verschiedenen Prüfverfahren, jedoch der gleichen Frequenz ( $2 \text{ s}^{-1}$ ).

Temperatur [°C]	Bindemittel	DSR [kPa]	KAST-BIN [kPa]	Abkühlverfahren [kPa]
15	B 160/220	1156	1355	1104
15	B 70/100	8450	6200	6396
15	B 35/50	8810	8158	7286
15	B 10/20	29054	28300	26769
15	PMB 50/70-53 (ELAST.)	5438	6295	5899
15	PMB 30/50-58 (PLAST.)	6733	4849	4876
10	B 160/220	2980	3699	2432
10	B 70/100	17845	10100	15206
10	B 35/50	16500	15030	11849
10	B 10/20	51453	46620	39390
10	PMB 50/70-53 (ELAST.)	12410	14490	11795
10	PMB 30/50-58 (PLAST.)	11773	8802	8706

In Anbetracht der unterschiedlichen Versuchsdurchführung können die Übereinstimmungen zwischen den Ergebnissen im allgemeinen als gut, beim Bindemittel B 70/100 mit den grössten Unterschieden noch als ausreichend bezeichnet werden.

Die bei der Bestimmung der komplexen Module und dem Prüfen des Abkühlverhaltens festgestellten Temperaturen der Rissbildung sind einander in Tabelle 6.5 gegenübergestellt. Es ist zu beachten, dass die Temperaturen bei der Modulbestimmung entsprechend dem Temperaturraster nur auf 5° angegeben werden können. Angesichts dieser Unterschiede im Prüfverfahren kann die Übereinstimmung als sehr gut bezeichnet werden.

Tabelle 6.5: Vergleich der Temperaturen bei Rissbildung beim Bestimmen des komplexen Moduls und bei der Abkühlprüfung

Bindemittel		Modulbestimmung	Abkühlverhalten
B 160/220	R0033	keine Rissbildung bis -15 °C	keine Rissbildung bis -15 °C
B 70/100	A97-1562	Riss bei -15°C	-15 °C
B 35/50	R0029	Riss bei -10 °C	-11 °C
B 10/20	A98-2215	Zunehmende Rissbildung, beginnend bei -5, bis -15 °C	-2, -11 °C
PMB 50/70-53 (ELAST.)	A98-2102	-15 °C	-14.7 °C
PMB 30/50-58 (PLAST.)	A96-0171	keine Rissbildung bis -15 °C	keine Rissbildung bis -15 °C

Der Beginn der Rissbildung beim Abkühlverhalten ist in Tabelle 6.6 zusammengestellt.

Tabelle 6.6: Rissbildung beim Prüfen auf das Abkühlverhalten

Bindemittel		Beginn der Rissbildung
B 160/220	R0033	keine Rissbildung bis -15 °C
B 70/100	A97-1562	Rissbildung bei -15 °C, schlagartig
B 35/50	R0029	Rissbildung bei -11 °C, nur teilweise
B 10/20	A98-2215	Rissbildung beginnt bei -2, schreitet nur langsam fort
PMB 50/70-53 (ELAST.)	A98-2102	Rissbildung bei -15 °C, schlagartig
PMB 30/50-58 (PLAST.)	A96-0171	keine Rissbildung bis -15 °C

## 6.6 Folgerungen, Empfehlungen

### Folgerungen zu den Prüfverfahren:

- Module können mit dem KAST-BIN in einem Temperaturbereich von  $-15$  bis  $15$  °C bestimmt werden.
- Die Übereinstimmung mit dem DSR ist im Bereich von  $10$  und  $15$  °C ausreichend bis gut.
- Im tiefen Temperaturbereich treten Anomalien auf, die auf Rissbildung beruhen, die Modulbestimmung mit dem KAST-BIN zeigt somit an, bei welcher Temperatur für den Lastfall dynamische Schwingbelastung bei gleichzeitiger thermischer Spannung die Rissbildung einsetzt.
- Die Ergebnisse bezüglich Rissbildung bei der Modulbestimmung konnten durch ein Prüfen des Abkühlverhaltens validiert werden. Damit lässt sich die Temperatur bei der die Rissbildung beginnt genauer festhalten und auch die Rissbildung selber detaillierter verfolgen.
- Mit dem Prüfen des Abkühlverhaltens kann die Temperatur beginnender Rissbildung unter definierter Belastung festgestellt werden.
- Der Temperaturbereich beim Prüfen des Abkühlverhaltens sollte auf bis  $-20$  °C ausgeweitet werden.

### Folgerungen zum Verhalten der Bindemittel:

- Bei weichen Bindemitteln beginnt die Rissbildung bei tiefen bis sehr tiefen Temperaturen, bei harten bei erheblich höheren Temperaturen; was zu erwarten war.
- Bei weichen Bindemitteln bildet sich ein Riss durch den grössten Teil des Prüfkörpers aus, der Modul fällt auf einen Bruchteil des vorherigen Wertes ab.
- Harte Bindemittel wie B 35/50 und B 10/20 zeigen eine Rissbildung bei viel höheren Temperaturen. Da aber die Modulwerte zu über 50% erhalten bleiben und die Verformungs- und Belastungskurven weiterhin sinusförmig bleiben, kann gefolgert werden, dass nur eine teilweise Rissbildung auftritt. Die Rissbildung entspricht einem Anriss mit anschliessender Spannungsumlagerung.
- Prüfverfahren, welche bereits ein Anreissen erfassen, unterbewerten tendenziell die harten Bindemittel indem sie eine teilweise, eventuell sogar recht geringe Schädigung einem völligen Versagen gleich setzen.
- Prüfverfahren, die nur das völlige Durchreissen erfassen, überbewerten unter Umständen harte Bindemittel, indem sie teilweise Schädigungen gar nicht erfassen.

## 7. Direkter Zugversuch LCPC

Die Forschungsstelle, Laboratoire des Voies de Circulation LAVOC der ETH Lausanne wurde von der IMP beauftragt, als Bestandteil des Forschungsauftrages 6/95 den direkten Zugversuch LCPC an einer Auswahl von Bindemitteln durchzuführen.

### 7.1 Prüfmethode und Prüfplan

Die Versuche wurden gemäss der prEN 13587 „Bitumen and bituminous binders – Determination of the tensile properties of bituminous binders by the tensile test method“ durchgeführt [16]. Diese Euronorm ist aus der französischen Norm NF T 51-034 „Essai de traction directe sur liants bitumieux“ entstanden, welche auf einer Prüfmethode des LCPC basierte. Der Versuch ist unter dem Begriff „direkter Zugversuch LCPC“ bekannt.

Für die Versuchsdurchführung werden Prüfkörper in einer H2-Form gegossen (siehe Abbildung 5.1). Bei verschiedenen Temperaturen und Geschwindigkeiten werden die Prüfkörper bis zum Bruch einer Zugbeanspruchung unterzogen. Gemessen werden die Kräfte und Dehnungen sowohl bei der Fließgrenze, als auch beim Bruch. Die Versuchsparameter der in dieser Arbeit durchgeführten Prüfungen sind in der Tabelle 7.1 aufgeführt.

Tabelle 7.1 Versuchparameter für den direkten Zugversuch LCPC

Temperaturen	[°C]	-10, -5, 0, +5
Prüfgeschwindigkeiten	[mm/min]	100, 10

Da für jede Parameterkombination das massgebende Ergebnis aus dem Mittelwert von 5 Einzelwerten berechnet wird, wurden pro Bindemittel insgesamt 40 einzelne Zugversuche durchgeführt.

Um die verschiedenen Prüfmethode miteinander vergleichen zu können, wurden am LAVOC die gleichen Bindemittel wie an der EMPA (Kapitel 6) untersucht. Die einzelnen Bindemittel sind in der Tabelle 7.2 aufgeführt; die Kennzahlen ( Penetration, EP RuK etc.) der einzelnen untersuchten Bindemittel können dem Anhang 1 entnommen werden.

Tabelle 7.2: Liste der Bindemittel an denen der direkte Zugversuch gemäss prEN 13587 [16] durchgeführt wurde.

IMP Nr.	Bindemittelsorte
R0033	B 160/220
A97-1562	B 70/100
R0029	B 35/50
A98-2215	B 10/20
A95-2102	PmB 50/70-53 elastomermod.
A96-0171	PmB 30/50-58 plastomermod.

## 7.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der einzelnen Versuche sind im Anhang 7 aufgeführt und in der Tabelle 7.3 zusammengefasst.

Tabelle 7.3: Zusammenfassung der Ergebnisse der durchgeführten direkten Zugversuche

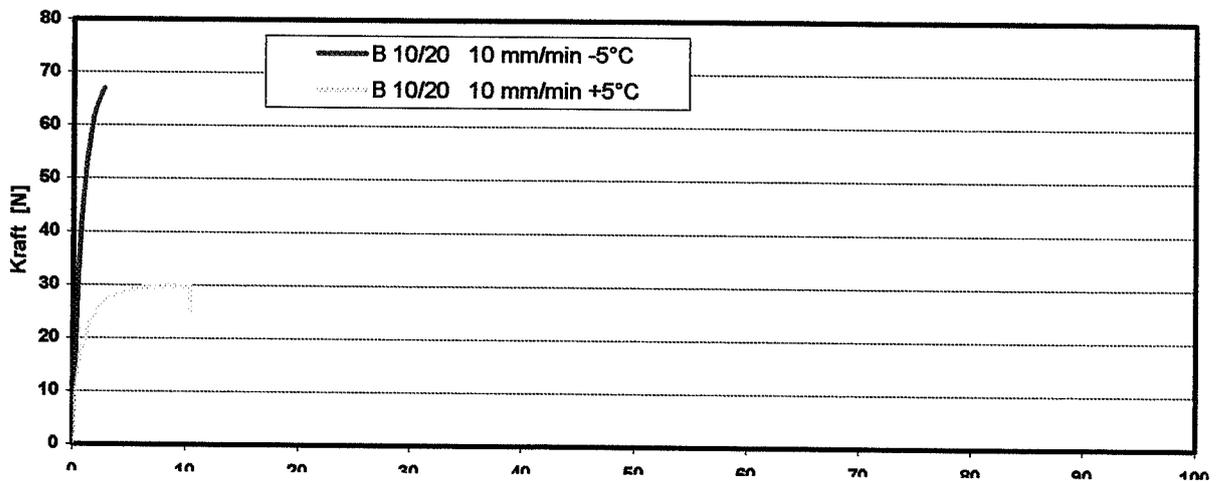
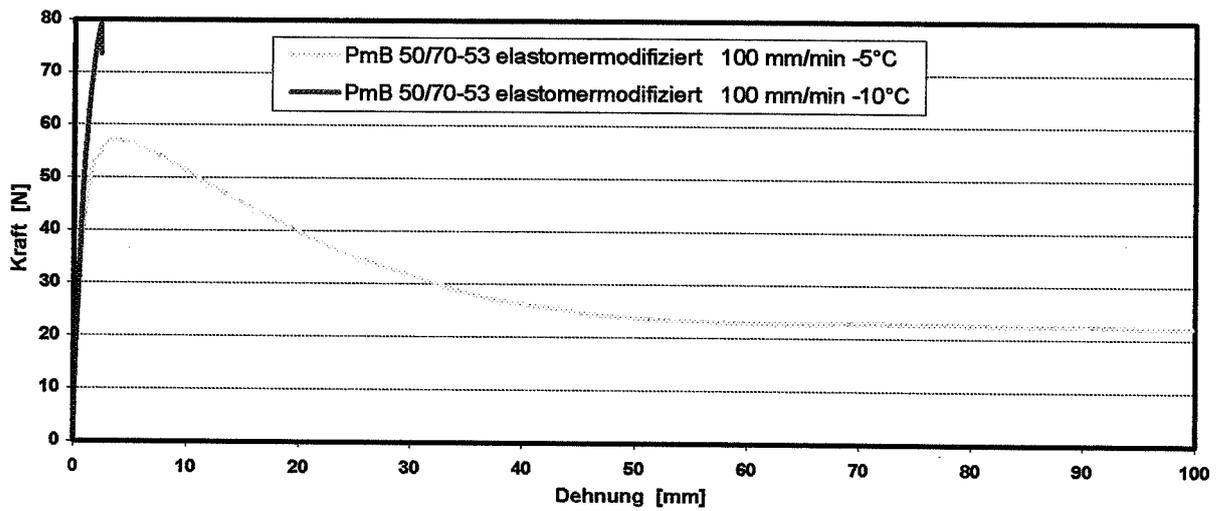
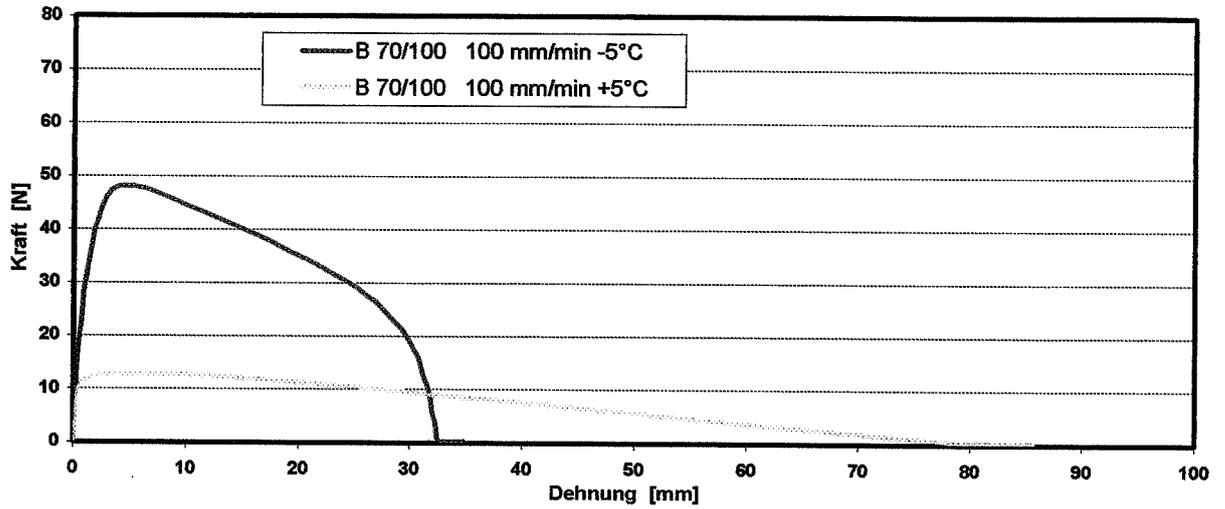
IMP-Nr.	Bindemittel	Prüf- geschwindigkeit	Temperatur	Bruch- spannung	Bruch- dehnung	Fließ- spannung	Fließ- Dehnung
		[mm/min]	[°C]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
A96-0171	<b>PmB 30/50-58 plastomermod</b>	100	-10	0.03	67.2	3.74	10.4
		10	-10	0.03	95.5	1.85	19.7
		100	-5	0.03	90.7	2.12	14.6
		10	-5	0.03	92.8	1.10	20.0
		100	0	0.03	91.0	1.32	17.0
		10	0	0.03	157.3	0.63	23.3
		100	5	0.03	122.4	0.77	18.8
		10	5	0.03	193.4	0.34	27.2
A95-2102	<b>PmB 50/70-53 elastomermod</b>	100	-10	5.67	4.5	--	--
		10	-10	3.53	26.7	--	--
		100	-5	1.76	587.3	3.89	7.3
		10	-5	0.93	587.3	1.89	15.9
		100	0	1.05	587.3	2.25	9.5
		10	0	0.45	587.3	0.90	19.0
		100	5	0.49	587.3	0.89	16.2
		10	5	0.23	588.1	0.38	17.9
R 0033	<b>B 160/220</b>	100	-10	0.03	62.4	2.85	10.5
		10	-10	0.03	132.7	1.32	25.1
		100	-5	0.03	94.8	1.52	14.0
		10	-5	0.03	289.0	0.59	25.1
		100	0	0.03	313.7	0.57	15.8
		10	0	0.01	588.1	0.19	23.3
		100	5	0.01	588.1	0.23	17.3
		10	5	0.01	588.1	0.05	24.5
A97-1562	<b>B 70/100</b>	100	-10	Versuch nicht durchführbar; Spröbruch			
		10	-10	0.03	80.8	3.43	21.9
		100	-5	0.03	64.2	3.86	9.1
		10	-5	0.03	161.8	1.76	24.8
		100	0	0.03	94.3	2.10	10.7
		10	0	0.03	318.2	0.68	21.5
		100	5	0.03	151.6	0.95	16.1
		10	5	0.03	588.1	0.25	27.5

IMP-Nr.	Bindemittel	Prüf- geschwindigkeit	Temperatur	Bruch- spannung	Bruch- dehnung	Fließ- spannung	Fließ- Dehnung
		[mm/min]	[°C]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
R 0029	<b>B 35/50</b>	100	-10	Versuch nicht durchführbar; Sprödbbruch			
		10	-10	3.40	10.0	--	--
		100	-5	Versuch nicht durchführbar; Sprödbbruch			
		10	-5	2.00	24.8	--	--
		100	0	Versuch nicht durchführbar; Sprödbbruch			
		10	0	0.03	73.6	1.21	23.5
		100	5	0.03	101.8	1.35	19.2
		10	5	0.03	207.2	0.61	20.3
A98-2215	<b>B 10/20</b>	100	-10	Versuch nicht durchführbar; Sprödbbruch			
		10	-10	3.39	1.0	--	--
		100	-5	Versuch nicht durchführbar; Sprödbbruch			
		10	-5	4.86	4.6	--	--
		100	0	Versuch nicht durchführbar; Sprödbbruch			
		10	0	3.33	11.0	--	--
		100	5	2.92	51.1	3.84	9.8
		10	5	1.99	25.6	2.03	17.6

Untenstehend sind einige typische Kraft-weg-Diagramme aufgeführt:

- B 10/20; 10 mm/min; -5°C
- B 10/20; 10 mm/min; +5°C
- B 50/70; 100 mm/min; -5°C
- B 50/70; 100 mm/min; +5°C
- PmB 50/70-53 elastomermodifiziert; 100 mm/min; -5°C
- PmB 50/70-53 elastomermodifiziert; 100 mm/min; -10°C

Abbildung 7.1: Direkter Zugversuch; einige typische Kraft-Dehnungs-Kurven



## 7.3 Kommentar

Aus den in Tabelle 7.3 zusammengefassten Untersuchungsergebnissen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

Bei der höheren Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min können die härteren Bindemittelsorten bei Temperaturen unter Null °C nicht geprüft werden; es entsteht ein spröder Bruch zu Beginn des Versuches.

Anhand der Bruchspannung lassen sich die 6 untersuchten Bindemittel in zwei 3-er-Gruppen unterteilen:

- Plastomermodifiziertes PmB, B 70/100, B 180/220:  
Trotz sehr grosser Unterschiede bei der Bruchdehnung weisen alle 3 Bindemittel bei allen Prüfgeschwindigkeiten und Temperaturen praktisch keine Bruchspannung auf. Das heisst, es findet ein vollständiger Spannungsabbau innerhalb des Prüfkörpers statt bevor der Bindemittelfaden reisst. Diese Bindemittel verhalten sich sehr duktil.
- SBS-modifiziertes PmB, B40/50, Hartbitumen:  
Beim Bruch besteht eine Restspannung im Prüfkörper.  
Hier muss ergänzend erwähnt werden, dass beim SBS-PmB in der Regel kein Bruch erfolgte, der Versuch musste abgebrochen werden, da die Prüfapparatur keine grössere Dehnung erlaubte. Die Spannung zu diesem Zeitpunkt wurde als Bruchspannung festgelegt.

Bei der Bruchdehnung fällt auf, dass das SBS-PmB die grössten Werte aufweist. Bereits bei -5°C und sogar der grösseren Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min wird das (apparaturbedingte) mögliche Maximum von ca. 590 % erreicht. Das Bitumen B180/220 erreicht diese Dehnung erst bei 0°C und der langsameren Prüfgeschwindigkeit (10 mm/min); bzw. bei +5°C und der grösseren Geschwindigkeit. Das Bitumen B 70/100 erreicht die max. Dehnung erst bei +5°C und 10 mm/min. Bei den übrigen Bindemitteln erfolgt der Bruch bei wesentlich tieferen Bruchdehnungen.

Bei der Fließspannung fällt auf, dass bei 4 von 6 Bindemitteln der maximal erreichte Wert ca. 3,8 N/mm<sup>2</sup> beträgt.

Dieser Wert stimmt recht gut mit den von Stinsky [40] bereits 1978 publizierten Ergebnissen von Spaltzugversuche an verschiedenen AB-Mischungen. Stinsky stellte fest, dass unabhängig vom Grösstkorn (AB 6, AB 10, AB 16), von der Bitumensorte (B 60/70, B 80/100, B 180/200) und von der Provenienz (5 verschiedene Provenienzen) die maximal zu erreichende Spaltzugfestigkeit zwar bei unterschiedlichen Temperaturen auftritt, jedoch in der Grössenordnung stets im Bereich von ca. 3.5 N/mm<sup>2</sup> zu liegen kommt.

Die Fließdehnung zeigt eine grössere Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit als von der Temperatur wie aus der Tabelle 7.4 zu sehen ist.

Tabelle 7.4: Fließdehnungen der direkten Zugversuche; die Prüfgeschwindigkeit beeinflusst die Fließdehnung bedeutend stärker als die Prüftemperatur.

Bindemittel	Prüfgeschwindigkeit	-10°C	-5°C	0°C	+5°C
PmB 30/50-58 plastomermod	100	10.4	14.6	17.0	18.8
	10	19.7	20.0	23.3	27.2
PmB 50/70-53 elastomermod	100	-	7.3	9.5	16.2
	10	-	15.9	19.0	17.9
B 160/220	100	10.5	14.0	15.8	17.3
	10	25.1	25.1	23.3	24.5
B 70/100	100	-	9.1	10.7	16.1
	10	21.9	24.8	21.5	27.5
B 35/50	100	-	-	-	19.2
	10	-	-	23.5	20.3
B 10/20	100	-	-	-	9.8
	10	-	-	-	17.6

## 8. Vergleich der Prüfverfahren

### 8.1 Untersuchte Bindemittel

Der Vergleich der Prüfverfahren basiert einerseits auf eine gezielt durchgeführte Vergleichsuntersuchung mit 6 verschiedenen Bindemitteln, andererseits wurden aus anderen Forschungsprojekten sowie Untersuchungsaufträgen der IMP Daten erhoben und ausgewertet. Der Vergleich zweier Prüfmethoden erfolgt somit aufgrund einer gleichbleibenden Auswahl an Bindemitteln (siehe Tabelle 8.1) plus, soweit vorhanden, weiteren Daten. Im Anhang 1 "Übersicht der verwendeten Proben" sind die weiteren Bindemittel aufgeführt; im Anhang 2 "Übersicht aller Versuche" die Untersuchungsergebnisse der durchgeführten Prüfungen.

Tabelle 8.1: Standard - Bindemittelauswahl an denen sämtliche Prüfungen durchgeführt wurden.

IMP Nr.	Bindemittelsorte	Penetration [ $1/_{10}$ mm]	EP RuK [°C]	BP Fraass [°C]
R0033	B 160/220	179	40.8	-23
A97-1562	B 70/100	81	46.7	-20
R0029	B 35/50	36	60.1	-16
A98-2215	B 10/20	17	69.1	-4
A95-2102	PmB 50/70-53 elastomerm. mod.	64	51.9	-20
A96-0171	PmB 30/50-58 plastomerm. mod.	41	64.6	-23

### 8.2 Gegenüberstellungen

In der untenstehenden Übersichtstabelle sind alle durchgeführten Gegenüberstellungen zweier Prüfmethoden aufgezeigt.

Tabelle 8.2: Übersicht der durchgeführten Vergleiche zweier Prüfmethoden.

**A-0360 FA-Kälte**

Tabelle 8.3.1: Raster der Gegenüberstellungen

	Kraftduktilitäts-Prüfung (KDM)		Zugversuch LCPC			KAST Bruch- Temperatur	elast. Rück.	BP Fraass	Pen.	RuK
	E <sub>40-20</sub>	E <sub>max. Force</sub>	E <sub>Bruch</sub>	Fließ- spannung	Fließ- dehnung					
BBR	T <sub>s=300</sub>		☹	☹	☺	☹	☹	☺	☺1)	☹
	T <sub>m=0.3</sub>		☹	☹	☹	☹	☹	☺	☺2)	☹
KDM	E <sub>40-20</sub>	▨								
	E <sub>max. Force</sub>		▨				☺			
	E <sub>Bruch</sub>			▨			☹			☹

☺
☹
☹

Korrelation vorhanden

Korrelation angedeutet; möglicherweise vorhanden

keine Korrelation

1) nur für nichtmodifizierte Bitumen

2) vor allem für nichtmodifizierte Bitumen

Im Anhang sind sämtliche durchgeführten Vergleiche graphisch dargestellt. Im Weiteren werden diejenigen Vergleiche aufgezeigt, bei denen sich eine Korrelation abzeichnet. Aufgrund der teilweise geringen Datenmenge (im Minimum 6 Wertepaare) wurde auf eine systematische Berechnung der Korrelationskoeffizienten verzichtet. Die Beurteilung der Korrelation erfolgte visuell; fallweise wurden die Korrelationskoeffizienten berechnet. Dabei wurden, wie in Tabelle 8.2 angedeutet, folgende Fälle unterschieden:

- ☺ Eine Korrelation oder Tendenz zeichnet sich deutlich ab; es ist offensichtlich, dass ein Zusammenhang zwischen den beiden Prüfmethoden besteht
- ☹ es lässt sich eine Tendenz erkennen wonach ein Zusammenhang bestehen könnte; die Datenbasis ist zu klein um eine endgültige Aussage zu machen
- ⊗ Es besteht klar kein Zusammenhang; die Wertepaare ergeben ein wolkenähnliches Bild

Grundsätzlich ist zu erwähnen, dass sich einige Tendenzen erkennen lassen, dass jedoch in keinem Fall eine sehr gute Korrelation festgestellt werden konnte. Schliesst man die PmB aus der Betrachtung aus, verbessert sich die Korrelation merklich. Diese Beobachtung steht im Einklang mit verschiedenen Literaturstellen, in denen darauf hingewiesen wird, dass der BBR die Eigenschaften von PmB schlecht erfasst [32, 33].

Im Folgenden werden diejenigen Fälle aufgezeigt, bei denen ein Zusammenhang zwischen den Prüfverfahren besteht.

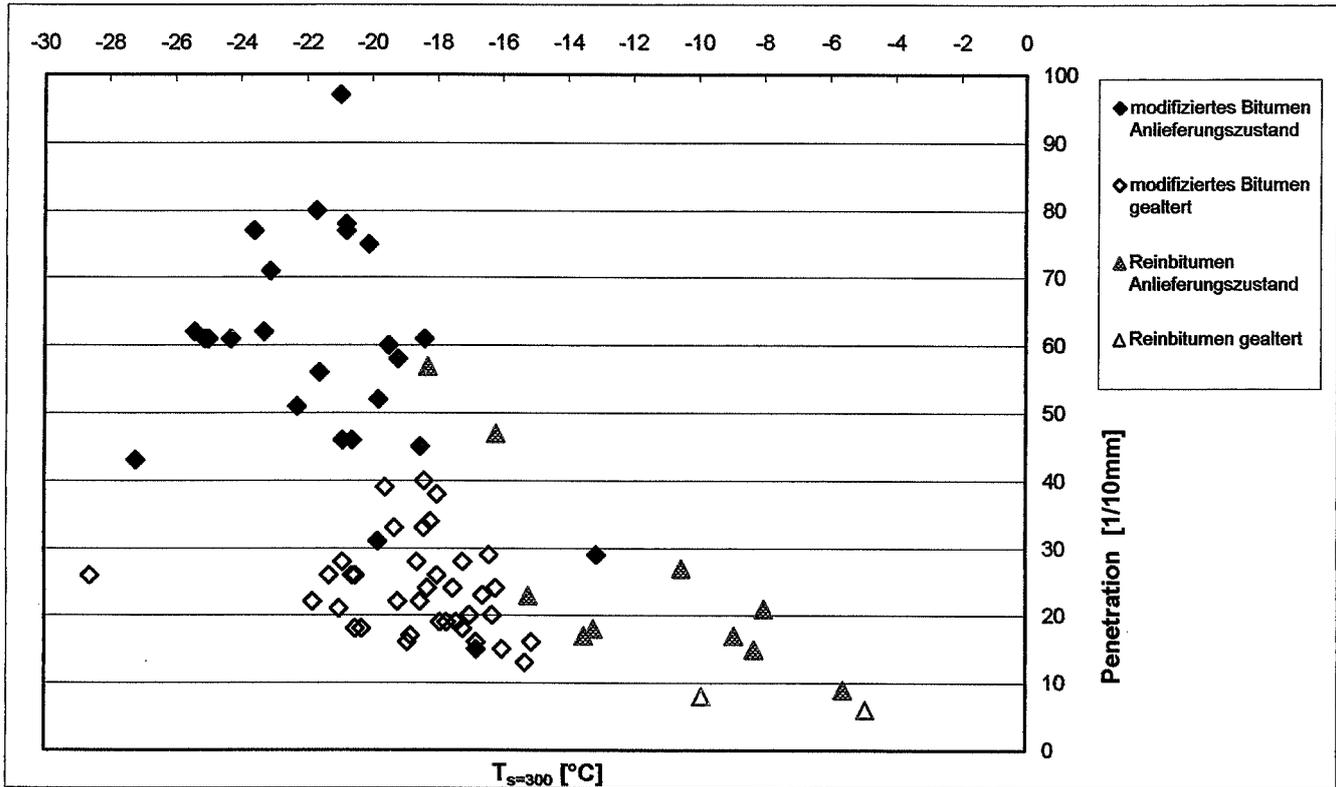
### **Penetration – Bending Beam Rheometer BBR:**

Wie der Abbildung 8.1 entnommen werden kann, besteht eine Abhängigkeit zwischen Penetration und den Temperaturen  $T_{S=300}$  und  $T_{m=0,3}$ . Die Korrelation ( $T_{S=300}$ ) ist mit einem Bestimmtheitsmass  $r^2$  von 0.32 alles andere als befriedigend.

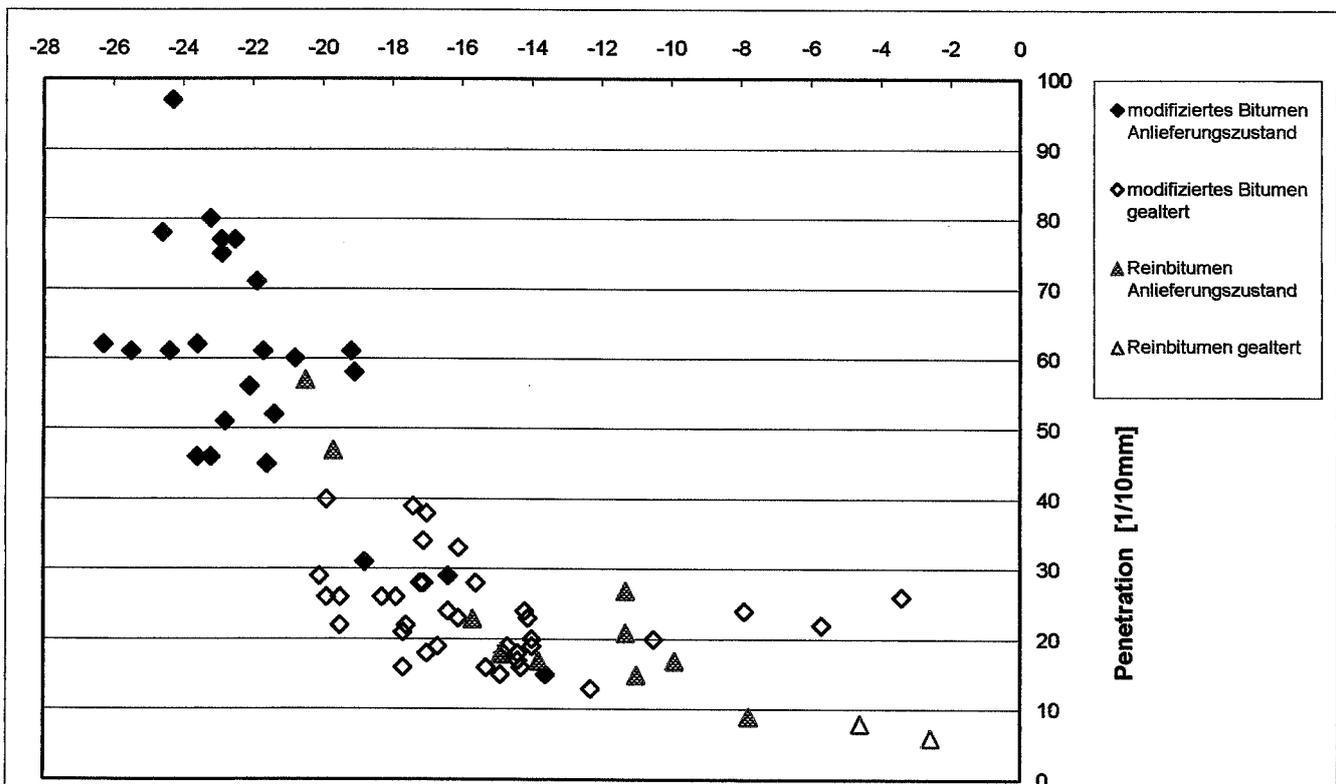
Die Abbildung enthält eine grosse Anzahl verschiedener Bindemittel inkl. PmB. Betrachtet man nur die Reinbitumen ( $\Delta$ ), reduziert sich zwar die Anzahl der Proben, das Bestimmtheitsmass wird jedoch auf  $r^2 = 0.65$  verbessert.

Abbildung 8.1: Gegenüberstellung Penetration mit den BBR-Temperaturen  $T_{S=300}$  und  $T_{m=0,3}$

**Diagramm  $T_{S=300}$  / Penetration**



**Diagramm  $T_{m=0,3}$  / Penetration**



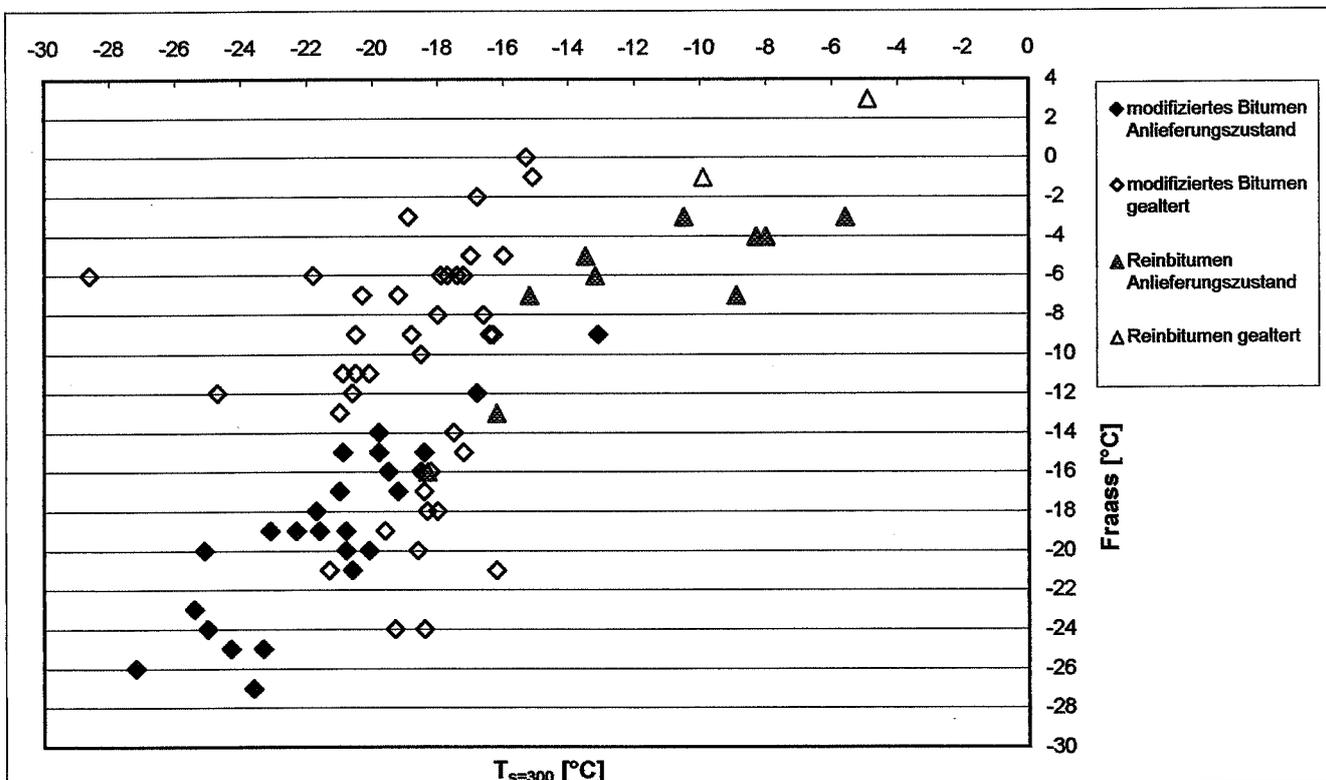
**Brechpunkt Fraass – Bending Beam Rheometer:**

Auch in diesem Fall ist ein klarer Trend festzustellen, obwohl das Bestimmtheitsmass (Korrelationskoeffizient) unbefriedigend ist ( $r^2 = 0.43$ ). Betrachtet man die nicht modifizierten Bitumen alleine verbessert sich der Korrelationskoeffizient auf  $r^2 = 0.71$ .

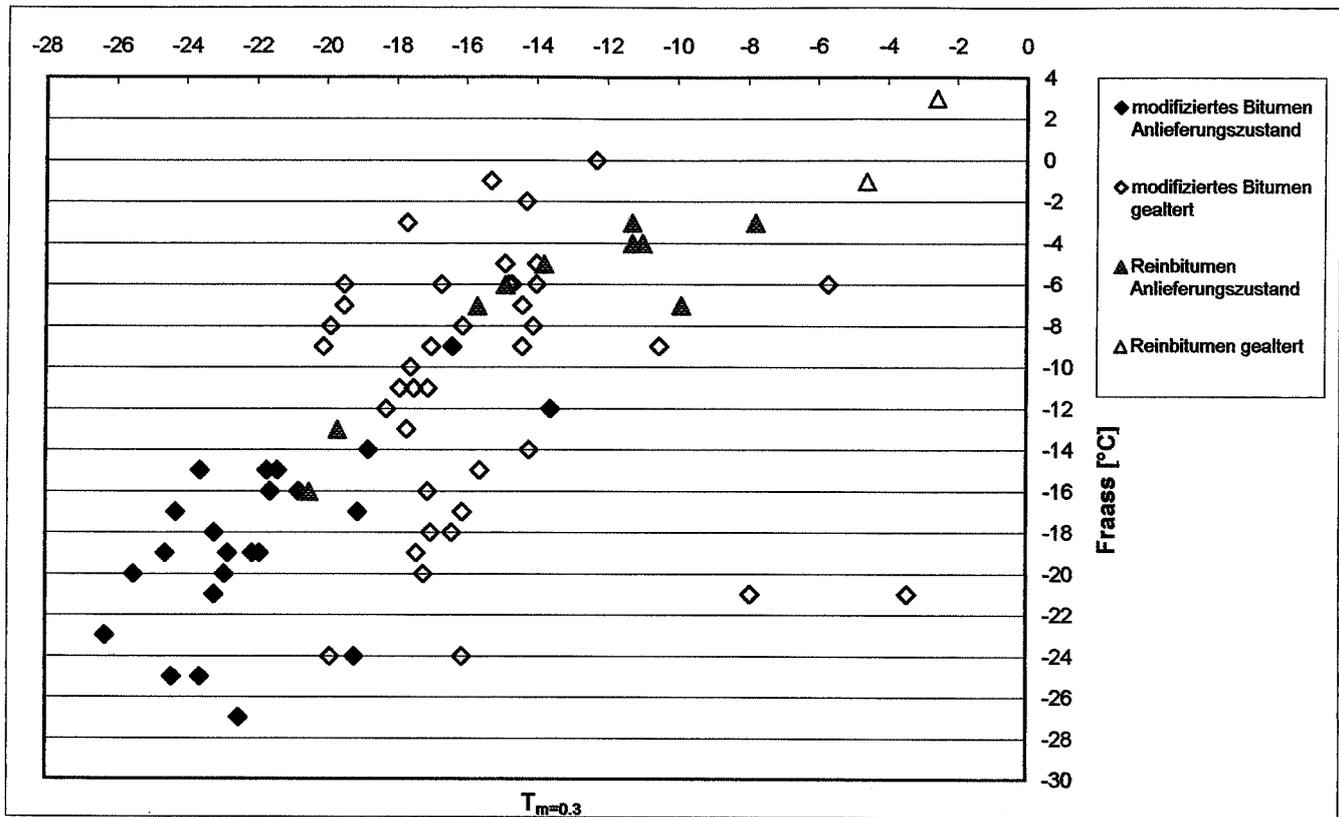
Die gute Übereinstimmung zwischen Brechpunkt Fraass und BBR wurde auch in anderen Arbeiten bestätigt [34, 35]. Aus diesem Zusammenhang darf unseres Erachtens nicht geschlossen werden der Versuch BBR habe keine Berechtigung, denn seine Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit sind ungleich besser als beim Brechpunkt Fraass. Vielmehr kann aus der Korrelation der beiden Versuche das vorhandene Erfahrungspotential mit dem Brechpunkt Fraass auf den BBR übertragen werden.

Abbildung 8.2 Gegenüberstellung Brechpunkt Fraass mit den BBR- Temperaturen  $T_{s=300}$  und  $T_{m=0,3}$

**Diagramm  $T_{s=300}$  / BP Fraass**



**Diagramm  $T_{m=0.3}$  / BP Fraass**

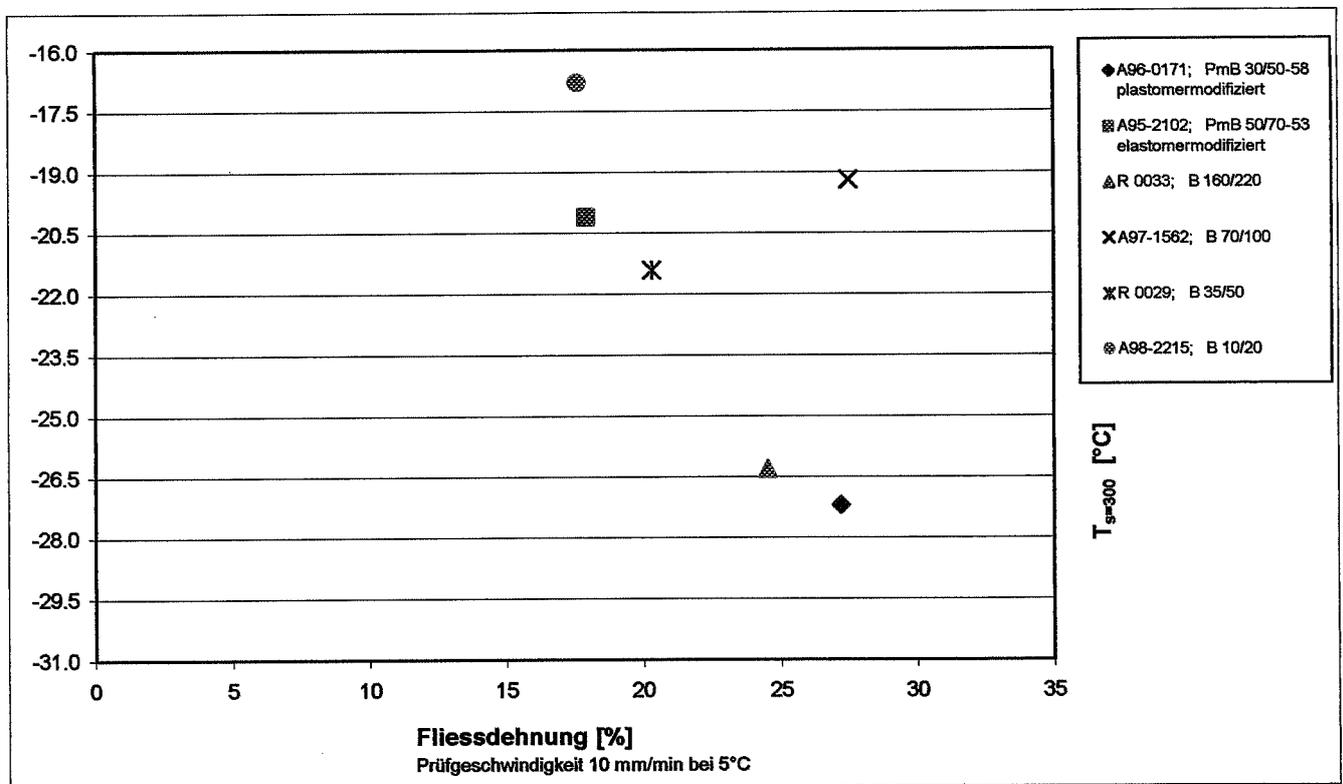


**Direkter Zugversuch – Bending Beam Rheometer:**

Die Datenmenge reicht nicht aus, um eine gesicherte Korrelation abzuleiten, doch lässt Abbildung 8.3 einen Zusammenhang zwischen der Fliegsdehnung und der BBR-Temperatur  $T_{S=300}$  erkennen. Falls die Probe B 70/100 als Ausreisser betrachtet wird, kann ein Korrelationskoeffizient von  $R^2 = 0.91$  berechnet werden. Allerdings fehlen sachliche Argumente um die Probe B 70/100 als Ausreisser zu eliminieren. Immerhin dürfte es sich bei einer späteren Arbeit lohnen dieser Korrelation nachzugehen.

Abbildung 8.3 Gegenüberstellung der Fliegsdehnung im direkten Zugversuch (10 mm/min bei 5°C) mit der BBR- Temperatur  $T_{S=300}$ .

**Diagramm Fliegsdehnung (Prüfgeschwindigkeit 10mm/min bei 5°C) / BBR  $T_{S=300}$**



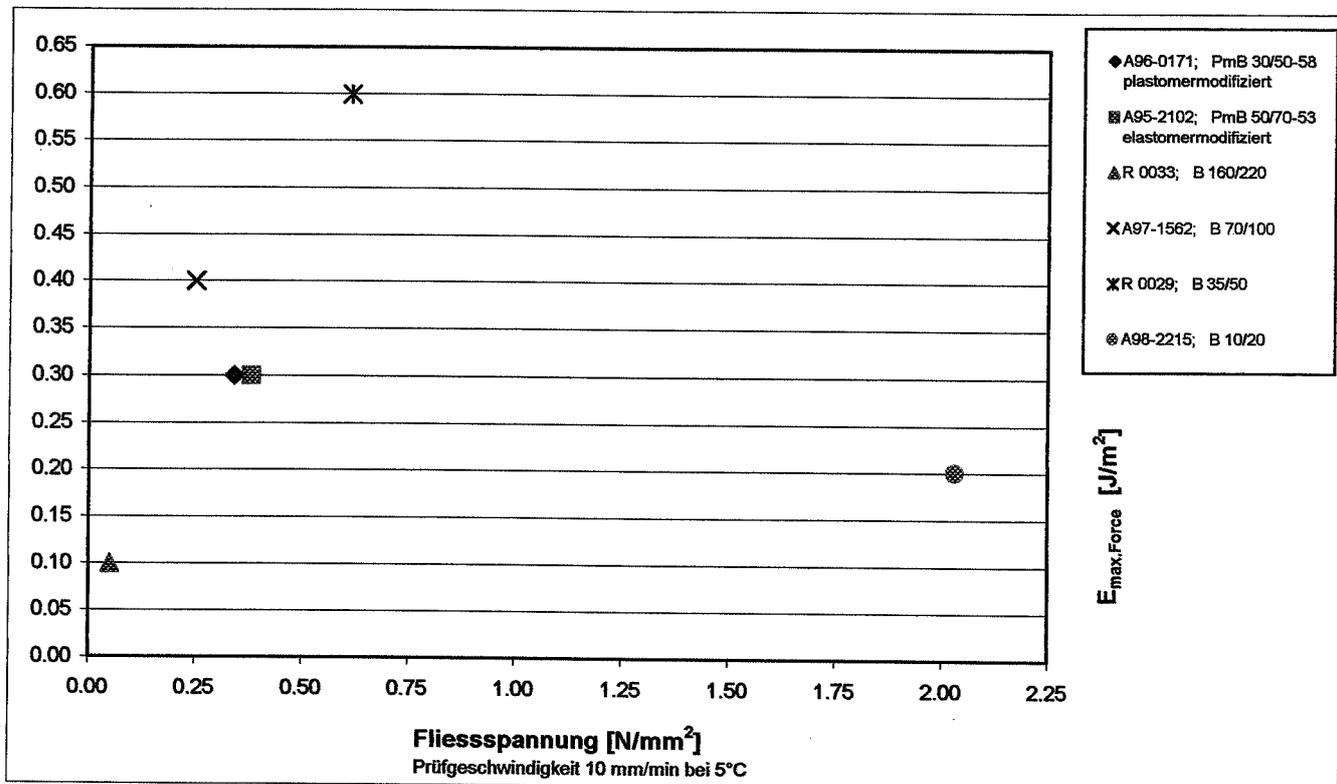
**Direkter Zugversuch – Kraftduktilität:**

Fliessspannung – Energie bei maximaler Kraft:

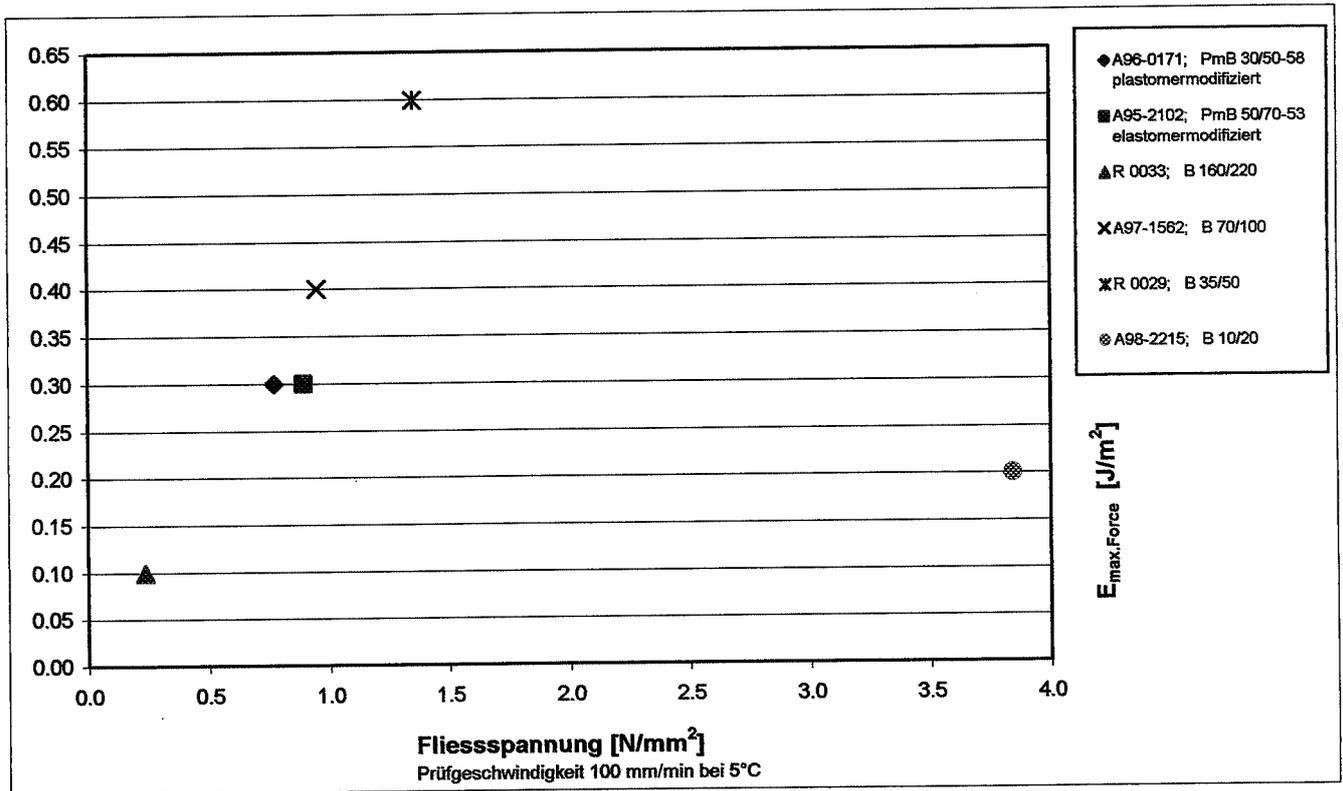
Der Vergleich erfolgt mit den bei einer Temperatur von +5°C durchgeführten direkten Zugversuchen, da diese Temperatur derjenigen der Bestimmung der Kraftduktilität entspricht. Die Fliessspannungen bei einer Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min und bei 10 mm/min stimmen recht gut mit der Energie der Kraftduktilitäts-Prüfung überein. In beiden Vergleichen trägt das Hartbitumen die Rolle des Spielverderbers, wäre doch die Korrelation ohne dieses Bindemittel wesentlich besser. Bei der Prüfgeschwindigkeit 100 mm/Min. beträgt der Korrelationskoeffizient  $R^2 = 0.82$  (ohne das Hartbitumen B 10/20).

Abbildung 8.4 Gegenüberstellung der Fliessspannung im direkten Zugversuch (10 mm/min und 100 mm/min bei 5°C) mit der Energie bei maximaler Kraft aus der Kraftduktilitäts-Prüfung.

**Diagramm Fliessspannung** (Prüfgeschwindigkeit 10mm/min bei 5°C) / **KDM  $E_{max.Force}$**

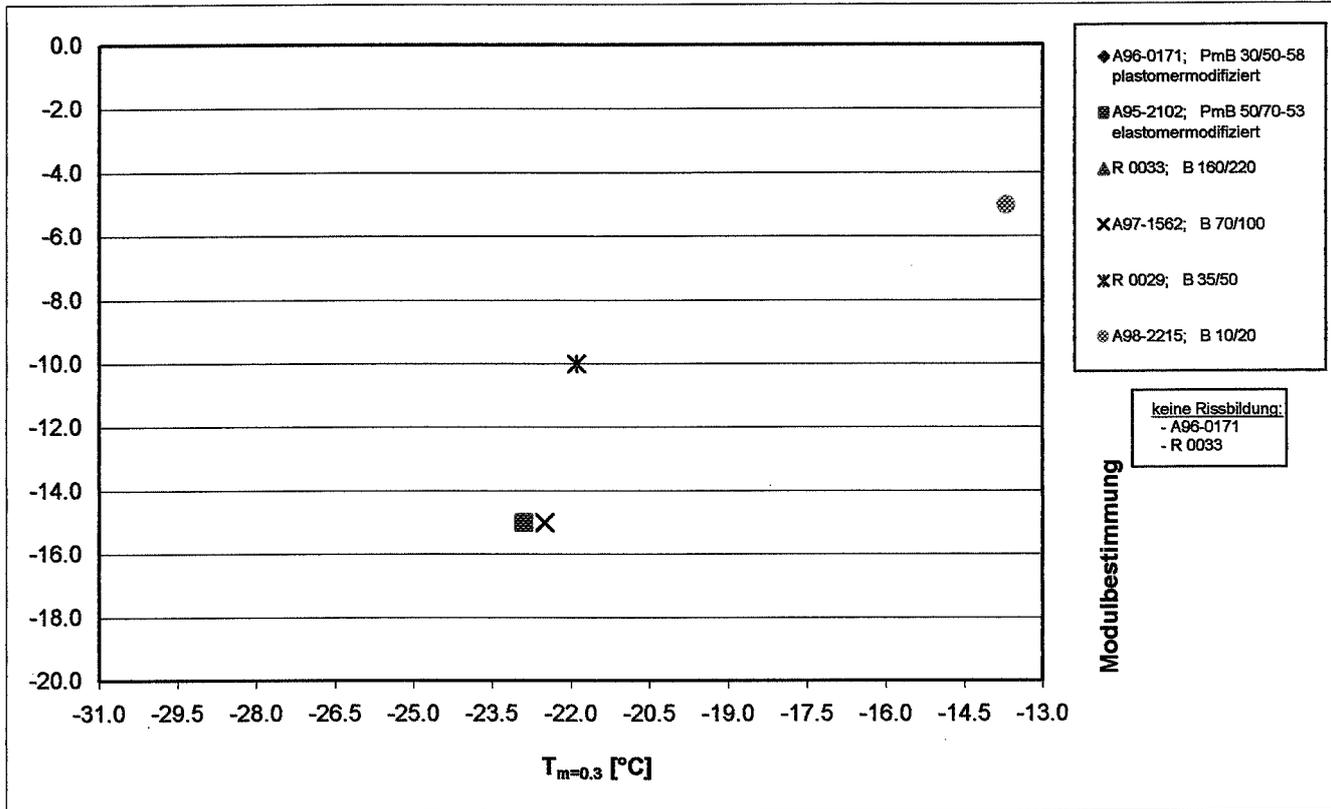


**Diagramm Fließspannung** (Prüfgeschwindigkeit 100mm/min bei 5°C) / **KDM  $E_{max.Force}$**





**BBR  $m_{=0.3}$  / Risstemperatur bei Modulbestimmung**



**8.3 Kommentar**

Aus der Vielzahl der Gegenüberstellungen zweier Versuche konnten nur bei wenigen Wertepaaren Korrelationen beobachtet werden. Dabei wurden auch Wertepaare berücksichtigt, bei denen zwar ein Zusammenhang ersichtlich ist, jedoch der Korrelationskoeffizient zu tief liegt, um von einer statistisch gesicherten Korrelation zu reden. Die höchsten Werte für  $R^2$  konnten bei folgenden Gegenüberstellungen festgestellt werden:

Brechpunkt Fraass	↔	Bending Beam Rheometer $T_s = 300 \text{ Mpa}$	$R^2 = 0.71$
Fliessdehnung im direkten Zugversuch; 10 mm/Min.; 5 °C	↔	Bending Beam Rheometer $T_s = 300 \text{ Mpa}$	$R^2 = 0.91$
Fliessspannung im direkten Zugversuch; 100 mm/Min.; 5 °C	↔	Kraftduktilität; Energie bei max. Kraft	$R^2 = 0.82$

## 9. Vergleich mit Verhalten auf Strasse

### 9.1 Literaturstudium

Es würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, wenn eine vollständige Übersicht über die Literaturstellen zu diesem Thema angestrebt würde. Der Wunsch, das Verhalten auf der Strasse mittels Laborversuchen vorherzusagen, hat sehr viele Arbeiten und Forschungsprojekte ausgelöst. In den letzten Jahren haben zwei Hauptthemen die internationale Szene beherrscht:

- Die Kältekontraktionsversuche der TU Braunschweig unter Prof. W. Arand
- Das US-amerikanische Projekt SHRP mit dem Bending Beam Rheometer

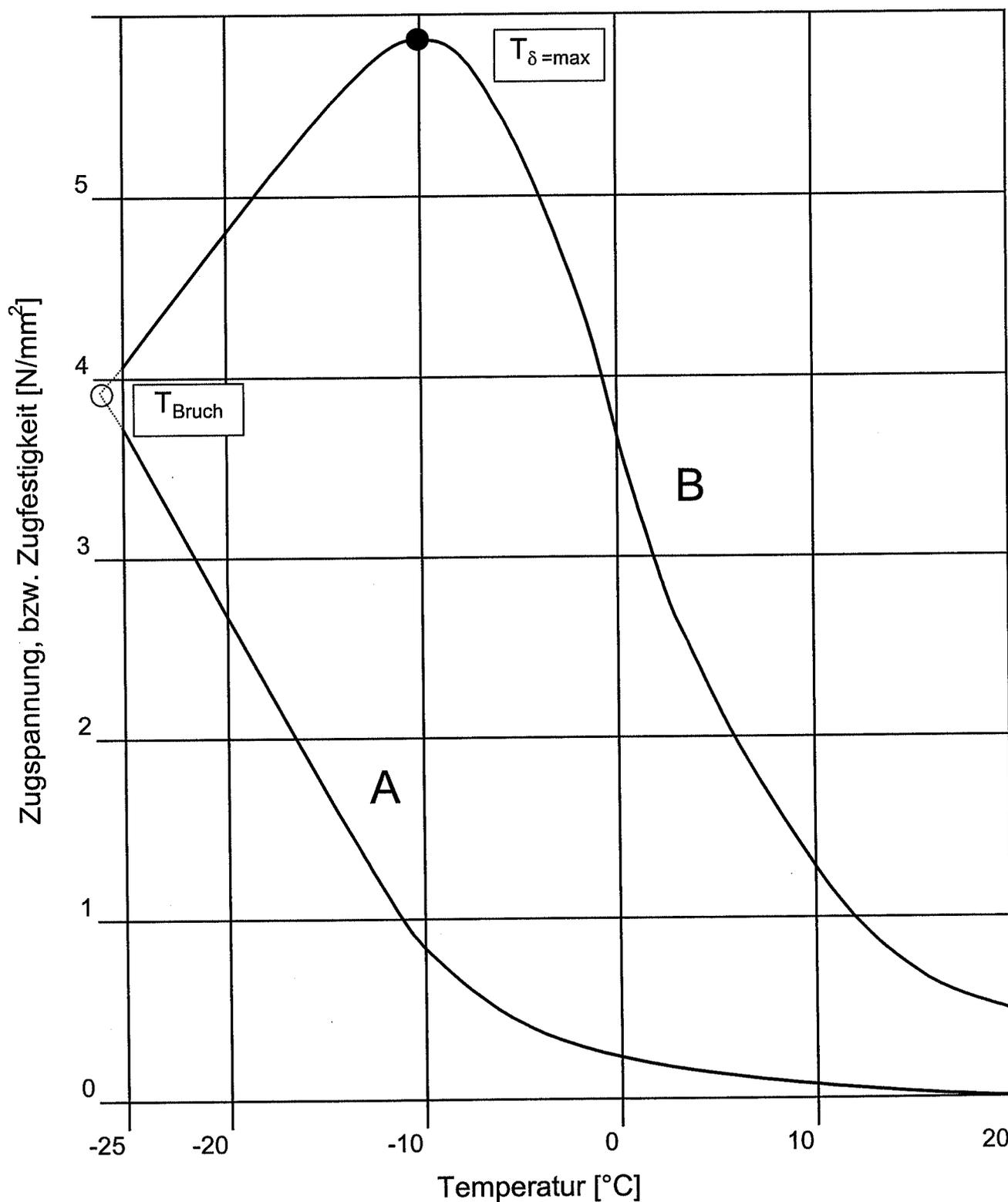
Die Kältekontraktionsversuche werden am Mischgut durchgeführt, im Bending Beam Rheometer wird das Bindemittel untersucht. Was bei der Beurteilung des Wärmeverhaltens bituminöser Mischungen (beispielsweise Spurrinnenbildung) nicht möglich ist, kann bei der Beurteilung des Kälteverhaltens vollzogen werden:

Bindemitteltests bei tiefen Temperaturen erlauben es, die Eigenschaften eines Belages zu beurteilen.

Arand hat Kälterelaxations-Versuche in die Laborpraxis [14] eingeführt und definiert. Erste Gedanken zu derartigen Laborprüfungen wurden bereits 1965 von Monismith [38] publiziert. Dabei wird eine Belagsprobe kontinuierlich abgekühlt, ohne dass sie sich zusammenziehen kann; es entstehen Kältekontraktions-Spannungen, die registriert werden. In der untenstehenden Abbildung 9.1 wurde eine typische Kurve des Spannungsverlaufes während eines Kältekontraktions-Versuches aufgezeichnet (Kurve A). In die gleiche Abbildung wurde der Verlauf der Bruchspannungen (ermittelt in Zugversuchen) in Abhängigkeit der Temperatur (Kurve B) aufgezeichnet. Aus dieser Abbildung lassen sich 2 charakteristische Temperaturen definieren:

- $T_{\sigma=\max}$  Temperatur bei welcher die Bruchspannung im Zugversuch am höchsten ist. Bei dieser Temperatur besitzt der geprüfte Belag am meisten Reserve um Belastungen durch den Verkehr schadlos aufzunehmen. Als „Reserve“ wird die Differenz zwischen den beiden Kurven A und B verstanden. Diese Temperatur scheint uns für das schweizerische Mittelland der massgebende Fall zu sein.
- $T_{\text{Bruch}}$  Temperatur bei welcher der Belag auch ohne Verkehrsbelastung reißt (temperaturinduzierte Risse). Die Temperatur  $T_{\text{Bruch}}$  ist der massgebende Belastungsfall in Bergregionen.

Abbildung 9.1: Thermisch induzierte Spannungen im Verlauf eines Kältekontraktionsversuches (Kurve A) und Bruchspannung in Abhängigkeit der Temperatur (Kurve B).



Es ist bekannt [15], dass die Ergebnisse des Bending Beam Rheometers gut mit den Ergebnissen aus den Kältekontraktions-Versuchen gemäss [14] bzw. den Kältezugversuchen übereinstimmen; es bestehen folgende Beziehungen:

$T_{\sigma=\max}$  hat eine gute Korrelation zu  $T_{m=0,3}$   
 $T_{\text{Bruch}}$  hat eine gute Korrelation zu  $T_{s=300\text{MPa}}$

Die Kältekontraktions-Versuche sind sehr aufwändig, es ist deshalb zu begrüßen, wenn die gleichen Aussagen mit den viel einfacheren Versuchen mit dem BBR gemacht werden können.

Werden mit den Parametern  $T_{m=0,3}$  und  $T_{s=300\text{MPa}}$  die Kälteeigenschaften eines Belages beschrieben, so müssen diese Daten auch mit den Beobachtungen auf der Strasse übereinstimmen.

Tatsächlich konnte Piber [36] eine Korrelation zwischen dem Verhalten auf der Strasse und dem BBR finden. Aus dem Kärntner Strassennetz wurden 10 Strassenabschnitte, in welchen thermische Risse festgestellt wurden, ausgewählt. Die gerissenen Deckschichten wurden mit einem Rissindex bewertet und die Ergebnisse des BBR an rückgewonnenem Bindemittel ausgewertet. Der Korrelationskoeffizient  $R^2$  zwischen dem Rissindex und der Temperatur  $T_{s=300\text{MPa}}$  beträgt 0.82.

## 9.2 Versuchstrecken

Um einen Bezug zwischen den Laborprüfungen und dem Verhalten auf der Strasse zu suchen, wurden die Ergebnisse einer noch nicht abgeschlossenen weiteren Forschungsarbeit miteinbezogen. Es handelt sich dabei um die Vergleichsstrecken mit PmB, welche auf der A9 im Kanton Wallis erstellt wurden [18, 19].

Ende der 80-iger Jahre wurden auf der A9 im Kanton Wallis 16 Versuchsfelder mit einer Länge von je 300 m eingebaut. Diese Felder unterschieden sich lediglich in der verwendeten Bindemittelsorte der Deckschicht; sämtliche übrigen Parameter (Mineralstoffe, Rezeptur sowie darunterliegende Schichten) wurden konstant gehalten. Diese Versuchsfelder wurden zur Erarbeitung der Schweizer Norm für polymermodifizierte Bitumen als Langzeit - Beobachtungstrecken konzipiert. Aus diesem Grund wurden auf 13 der 16 Felder Polymere verwendet.

Neben einer Vielzahl von Laboruntersuchungen wurden auch der Bending Beam Rheometer BBR, die Kraftduktilität sowie der Brechpunkt nach Fraass zu verschiedenen Zeitpunkten am rückgewonnenem Bindemittel durchgeführt. Die Entwicklung der Risse auf dem Objekt wurde periodisch gemessen; nach 8 Jahren wurde auch die Risstiefe bestimmt.

**Bestimmung der Risstiefe:**

Mit einer Vakuum-Druck-Imprägnierung [41] konnten die Risse sichtbar gemacht und ausgemessen werden. In der untenstehenden Abbildung 9.2 wird das Bild einer Bestimmung beispielhaft aufgeführt.

Abbildung 9.2: Bestimmung der Risstiefe mittels Vakuum-Druck-Imprägnierung der Bohrkerne.

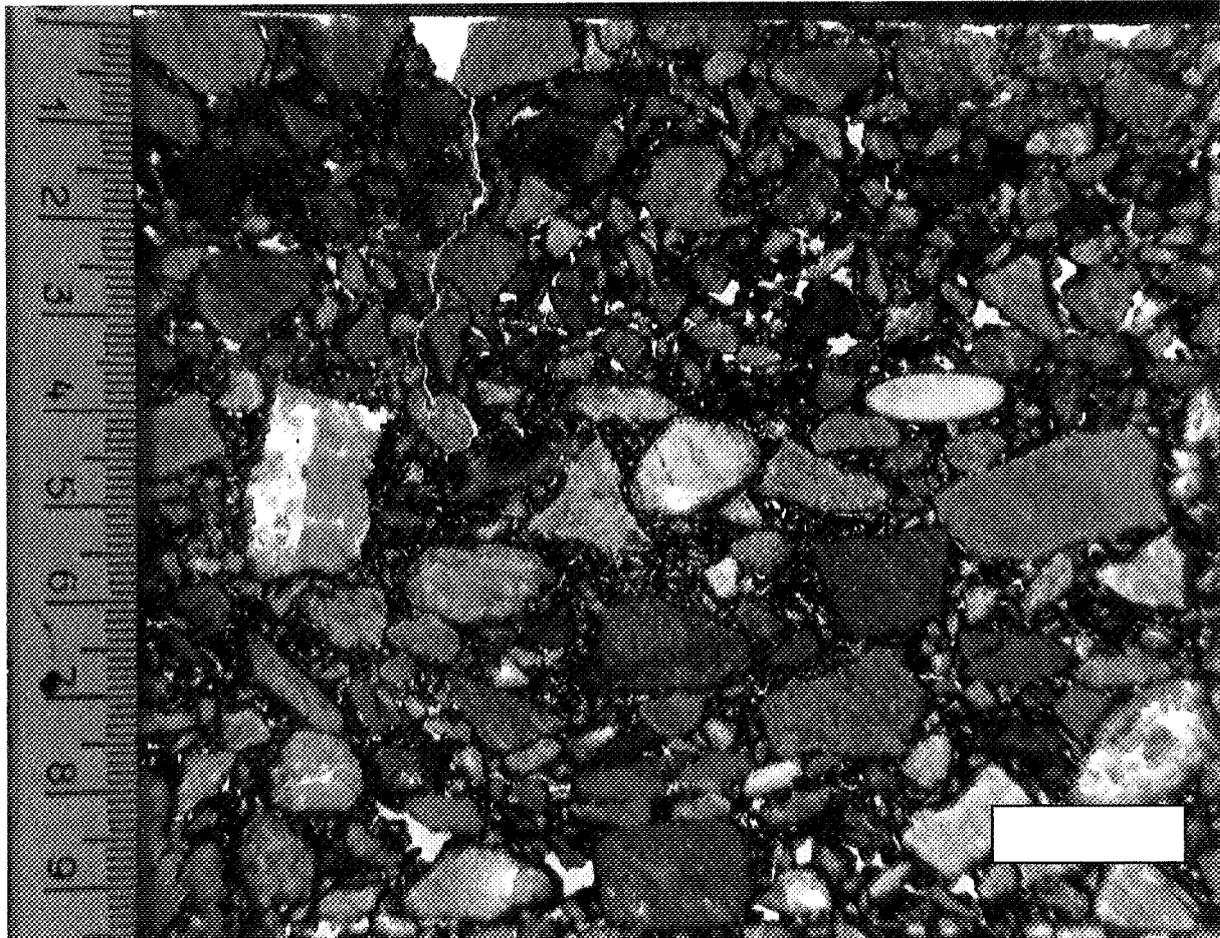


Planche 12 Fissure 3 / trace roue droite

IMP-Archiv Nr 996

**Bestimmung des Rissausmass:**

Das Ausmass der Rissebildung wurde gemäss der entsprechenden SN [42] bestimmt. Dabei wird zur Bestimmung des Schadenausmasses eine visuelle Beurteilung der Strassenoberfläche vorgenommen.

**Bindemitteluntersuchungen:**

Die Bindemitteln wurden zu verschiedenen Zeitpunkten untersucht:

- Zum Zeitpunkt der Anlieferung also im „Anlieferungszustand“
- Nach der künstlichen Alterung gemäss PAV [39]
- Nach 8-jähriger Liegedauer wurden Bohrkern entnommen, das Bindemittel rückgewonnen und untersucht.

In der Tabelle 9.1 sind die Wertepaare aufgeführt, für welche eine Korrelation gesucht wurde.

Tabelle 9.1: Raster der Gegenüberstellungen Laborergebnisse - Verhalten auf Strasse

	Bindemittel Anlieferungszustand				Bindemittel nach PAV				Bindemittel nach 8 J. rückgewonnen			
	BBR		BP	KDM	BBR		BP	KDM	BBR		BP	KDM
	T <sub>s=300</sub>	T <sub>m=0.3</sub>	Fraass	E <sub>Bruch</sub>	T <sub>s=300</sub>	T <sub>m=0.3</sub>	Fraass	E <sub>Bruch</sub>	T <sub>s=300</sub>	T <sub>m=0.3</sub>	Fraass	E <sub>Bruch</sub>
Rissausmass 7 J.	☹	☺	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☺	☹	☹
Risstiefe 8 J.	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☺	☹	☺	☺	☹	☺



Korrelation vorhanden

Korrelation angedeutet; möglicherweise vorhanden

keine Korrelation

BBR: Bending Beam Rheometer

KDM: Kraft-Duktilitäts-Messung

**Kommentar:**

In keinem der Fälle konnte eine befriedigende Korrelation gefunden werden. Dies ist unter Anderem darauf zurückzuführen, dass

- Das Kriterium „Rissausmass“ zu wenig spreizt; die Werte nach 7 Jahren Liegedauer des Belages liegen in 9 von 13 Fällen zwischen 0 und 0.5.
- Das Objekt zu wenig beansprucht ist. Die Temperaturen liegen zu hoch, um klassische thermisch induzierte Risse zu erzeugen.
- Die durchgeführten Versuche und deren Auswertung das Verhalten auf der Strasse zu wenig ansprechen.

Im Schlussbericht zu den Versuchsstrecken (in Vorbereitung) wurden Korrelationen zwischen dem Rissausmass nach 10 Jahren und den Bindemittelleigenschaften untersucht. Es zeigte sich, dass im vorliegenden Fall lineare Korrelationen aussagekräftiger sind als

exponentielle. Aus der grossen Anzahl untersuchter Korrelationen werden im Folgenden diejenigen aufgeführt, bei denen ein Korrelationskoeffizient  $R^2 > 0.7$  berechnet wurde.

Tabelle 9.2 : Korrelationskoeffizienten zwischen den Laboruntersuchungen und dem Rissausmass nach 10 Jahren

Versuch	Bindemittel	Korrelationskoeffizient
Flie遢spannung beim direkter Zugversuch bei 20°C	Nach DIN-Alterung	0.77
Bending Beam Rheometer; Steigung m bei – 15°C und 60 Sekunden	Bindemittel aus Bohrkerne unmittelbar nach dem Einbau rückgewonnen	0.86
Bending Beam Rheometer; Steigung m bei – 15°C und 60 Sekunden	Nach PAV-Alterung	0.79
Bending Beam Rheometer; Temperatur bei welcher die Steigung m = 0.3 ist	Nach PAV-Alterung	0.86

Bereits nach 7 Jahren wurden mögliche Korrelationen beim Wert  $T_{m=0.3}$  angedeutet (siehe Tabelle 9.1), nach 10 Jahren konnten sie bestätigt werden.

## 10. Folgerungen

### 10.1 Prüfmethoden

#### Bending Beam Rheometer

In einer Parameterstudie wurde der Einfluss verschiedener Prüfparameter untersucht. Durch geringfügige Variation der Last, Temperatur des Bades und der isothermalen Zeit konnte der Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Prüfergebnisse ermittelt werden. Daraus wurden Empfehlungen für die einzuhaltenden Präzision der Prüfparameter abgeleitet.

In einer internationalen Ringanalyse unter Beteiligung von insgesamt 11 Labors aus Europa und den USA wurden 3 verschiedene Bindemittel in einem Penetrationsbereich von 45 bis 125 1/10 mm geprüft. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte gemäss ISO 5725 durch die Stazione Sperimentale Combustibili; Milano.

Aus dieser Ringanalyse konnten wichtige Erkenntnisse für die Durchführung des Versuches Bending Beam Rheometer gefunden werden [21]. Es wurden folgende Wiederholbarkeiten  $r$  und Vergleichbarkeiten  $R$  aus den Untersuchungsergebnissen berechnet:

	Wiederholbarkeit $r$	Reproduzierbarkeit $R$
Steifigkeit	8%	22%
m-Wert	3%	7%
Temperatur $T_S = 300 \text{ MPa}$	3%	6%

#### KAST-BIN

Bei diesem Prüfverfahren wird das Bindemittel zwischen einem äusseren und einem inneren Zylinder gegossen; der äussere Zylinder wird festgehalten, während der innere mit einer sinusförmigen Kraft belastet wird. Mit diesem, an der EMPA durchgeführten koaxialen Schubtest, können Module bei verschiedenen Frequenzen und Temperaturen bestimmt werden.

In Abänderung des obenbeschriebenen Verfahrens wurden auch Versuche mit einer konstanten Frequenz von  $2 \text{ s}^{-1}$  gefahren, wobei während des Versuches die Temperatur mit einer Abkühlrate von  $5 \text{ °C}$  pro Stunden abgesenkt wurde. Diese neuartige Versuchsanordnung erlaubte folgende Schlüsse:

- Im tiefen Temperaturbereich treten Anomalien auf, die auf Rissbildung beruhen.
- Bei weichen Bindemitteln bildet sich ein Riss durch den grössten Teil des Prüfkörpers aus, der Modul fällt auf einen Bruchteil des ursprünglichen Wertes.
- Bei harten Bindemitteln fällt der Modul nach der Rissbildung deutlich weniger ab. Die Verformungs- und Belastungskurven bleiben sinusförmig, sodass angenommen werden kann, dass nur eine teilweise Rissbildung auftritt. Die Rissbildung entspricht einem Anriss mit anschliessender Spannungsumlagerung.
- Bei Prüfverfahren, die bereits ein Anreissen erfassen, werden harte Bindemittel tendenziell unterbewertet, da eine teilweise Schädigung einem völligen Versagen gleichgesetzt wird.

- Bei Prüfverfahren, die nur das völlige Durchreißen erfassen werden harte Bindemittel überbewertet, da teilweise Schädigungen gar nicht erfasst werden.

### Direkter Zugversuch

Die untersuchten Bindemittel lassen sich in zwei Gruppen unterteilen:

- Plastomermodifiziertes PmB, B 70/100, B 180/220:  
Trotz sehr grosser Unterschiede bei der Bruchdehnung weisen alle 3 Bindemittel bei allen Prüfgeschwindigkeiten und Temperaturen praktisch keine Bruchspannung auf. Das heisst, es findet ein vollständiger Spannungsabbau innerhalb des Prüfkörpers statt bevor der Bindemittelfaden reisst. Diese Bindemittel verhalten sich sehr duktil.
- SBS-modifiziertes PmB, B40/50, B 10/20:  
Beim Bruch besteht eine Restspannung im Prüfkörper.  
Hier muss ergänzend erwähnt werden, dass beim SBS-PmB in der Regel kein Bruch erfolgte, der Versuch musste abgebrochen werden, da die Prüfapparatur keine grössere Dehnung erlaubte. Die Spannung zu diesem Zeitpunkt wurde als Bruchspannung festgelegt.

Bei der Bruchdehnung fällt auf, dass das SBS-PmB die grössten Werte aufweist. Bereits bei  $-5^{\circ}\text{C}$  und sogar der grösseren Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min wird das (apparaturbedingte) mögliche Maximum von ca. 590 % erreicht. Das Bitumen B180/220 erreicht diese Dehnung erst bei  $0^{\circ}\text{C}$  und der langsameren Prüfgeschwindigkeit (10 mm/min); bzw. bei  $+5^{\circ}\text{C}$  und der grösseren Geschwindigkeit. Das Bitumen B 70/100 erreicht die max. Dehnung erst bei  $+5^{\circ}\text{C}$  und 10 mm/min. Bei den übrigen Bindemitteln erfolgt der Bruch bei wesentlich tieferen Bruchdehnungen.

## 10.2 Korrelationen zwischen den Prüfmethoden

Aus der Vielzahl der Gegenüberstellungen zweier Versuche konnten nur bei wenigen Wertepaaren nennenswerte Korrelationen beobachtet werden:

Brechpunkt Fraass	↔	Bending Beam Rheometer $T_S = 300 \text{ Mpa}$	$R^2 = 0.71$
Fliessdehnung im direkten Zugversuch; 10 mm/Min.; $5^{\circ}\text{C}$	↔	Bending Beam Rheometer $T_S = 300 \text{ Mpa}$	$R^2 = 0.91$
Fliessspannung im direkten Zugversuch; 100 mm/Min.; $5^{\circ}\text{C}$	↔	Kraftduktilität; Energie bei max. Kraft (50 mm/Min.; $5^{\circ}\text{C}$ )	$R^2 = 0.82$

Aus der Korrelation des Brechpunktes nach Fraass und des Bending Beam Rheometer darf nicht gefolgert werden, der BBR würde keine Vorteile bieten. Neben dem höheren Informationsgehalt bietet der BBR auch eine wesentlich bessere Vergleichbarkeit (Vergleich verschiedener Labors).

Der hohe Korrelationskoeffizient von  $R^2$  beim Vergleich der Fliegsdehnung mit der Temperatur  $T_{S=300 \text{ Mpa}}$  wurde zwar nur mit 5 verschiedenen Bindemitteln erreicht, trotzdem ist der Wert erstaunlich hoch. Weitere Arbeiten zu diesem Thema dürften interessant sein.

Die Fliegsstressspannung im direkten Zugversuch und die Energie bei maximaler Kraft bei der Kraftduktilitätsprüfung sprechen ähnliche Eigenschaften an, was wenig erstaunt, da ähnliche Versuche bei gleicher Temperatur und ähnlichen Geschwindigkeiten durchgeführt werden.

### **10.3 Vergleich der Prüfmethode mit dem Verhalten auf der Strasse**

Um einen Bezug zwischen den Laborprüfungen und dem Verhalten auf der Strasse zu suchen, wurden auf einer Vergleichsstrecke mit 16 verschiedenen Bindemitteln die Rissstiefe und das Rissausmass nach 10 Jahren mit verschiedenen Laboruntersuchungen verglichen. Es konnten Korrelationen ( $R^2 = 0,86$ ) zwischen dem Rissausmass und dem BBR gefunden werden. Sehr erfreulich ist die gute Korrelation zwischen dem BBR an im Labor gealtertem Bindemittel und dem Rissverhalten, denn damit steht ein Prüfverfahren zur Verfügung, mit welchem das Rissverhalten vorausgesagt werden kann.

## 11. Ausblick

Mit dem Bending Beam Rheometer steht ein Prüfverfahren zur Beurteilung des Kälteverhaltens von bituminösen Bindemitteln zur Verfügung, dessen Vergleichbarkeit wesentlich besser ist, als beim Brechpunkt nach Fraass.

Die Aussagekraft des BBR bei der Beschreibung der rheologischen Eigenschaften von polymermodifizierten Bitumen ist beschränkt. So wies Lecomte [33] beispielsweise auf, dass sich unterschiedliche SBS-Dosierungen (0 bis 5 Masse-%) nicht auf die Ergebnisse im BBR auswirken. Auch Chappat [32] wies darauf hin, dass nur Zugversuche ein unterschiedliches Verhalten von PmB gegenüber Reinbitumen aufzeigen können. Trotz dieser Bedenken, die auf Laboruntersuchungen basieren, konnte eine sehr gute Korrelation zwischen den Werten des BBR und dem Risseverhalten verschiedener Teststrecken mit PmB festgestellt werden.

Mit der Kraftduktilität [27] wurde ein Prüfverfahren normiert [17], mit dem zwischen PmB und Reinbitumen qualitativ unterschieden werden kann. Es fragt sich, ob ein Zugversuch (zBesp. die Kraftduktilität) auch geeignet ist um eine quantitative Beurteilung von PmB zu ermöglichen.

Die bisherigen Bemühungen das Kälteverhalten durch Laborversuche zu beschreiben waren auf einmalige Belastungen beschränkt. Sowohl der BBR als auch die Kältekontraktionsversuche stellen eine einmalige Belastung des Prüfkörpers dar. Die Rissbildung bei moderaten Temperaturen unter Wiederholbelastung ist noch zu wenig erforscht. In der vorliegenden Arbeit hat die EMPA einen vielversprechenden Ansatz aufgezeigt, mit welchem mehr über die Vorgänge der Rissbildung in Zusammenhang mit dem Ermüdungsverhalten erfahren werden könnte.

## 12. Literatur

- [1] Ch. Angst; "Das SHRP-Programm"; *Strasse & Verkehr* 7/91
- [2] P. Bellin; "Die Ergebnisse der Bitumen- und Asphaltforschung des Strategic Highway Research Program SHRP"; *Bitumen* 2/95
- [3] SIA-281, Ausgabe 1992; "Bitumen und Polymerbitumen-Dichtungsbahnen", Prüfung Nr. 4 "Biegeverhalten bei tiefen Temperaturen"
- [4] M.L. Williams, R.F. Landel, J.D. Ferry  
J. Am. Chem. Soc. 77,3701 (1955)
- [5] Ch. Angst, M. Riedi; "Der Bending Beam Rheometer"; *Strasse & Verkehr* 3/95
- [6] C. van der Poel; "A General System describing the Visco-Elastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data"; *Journal of applied Chemistry*, Vol. 4, p. 221 (1954)
- [7] R. Jongepier, B. Kuilman; "Characterization of the Rheology of Bitumens"; *Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 38, p. 98 (1969)
- [8] H.U. Bahia, D.A. Anderson, D.W. Christensen; "The Bending Beam Rheometer; a simple device for measuring low-temperature rheology of asphalt binders"; *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 62, p. 117-153 (1993)
- [9] E.T. Horrigan, R.B. Leahy, J.S. Youtcheff; "The Superpave Mix Design System Manual of Specifications, Test Methods and Practices"; SHRP-A-379, p. 7-28 (1994)
- [10] Ch. Angst, M. Riedi; "Comparison of Bending Beam Rheometer with cracking performance of polymer modified Asphalt"; *European Workshop on Rheology*; April 1996, Brussels
- [11] Standard Test Method for determining the flexural Creep Stiffness of Asphalt binder using the Bending Beam Rheometer (BBR); AASHTO Designation: TP 1-97
- [12] SN 670 500-2:1999; Bestimmung des Brechpunktes nach Fraass

- [13] Ch. Angst; Internationale Ringanalyse PmB; Schlussbericht FA 12/92; ASTRA-Bericht Nr.430; Dezember 1998
- [14] A.F. Stock, W. Arand; Low temperature cracking in polymermodified binders; Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 62, p. 23-53 (1993)
- [15] G.N. King, H.W. King, O. Harders, W. Arand P. Planche; Influence of asphalt grade and polymer concentration on the low temperature performance of polymer modified asphalt; Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 62, p. 1-21 (1993)
- [16] prEN 13587; Bitumes et liants bitumineux – détermination des caractéristiques de traction des liants bitumineux par la méthode d’essai de traction
- [17] SN 670 548; Bituminöse Bindemittel, Kraftduktilität
- [18] Dumont A.-G., Schwéry B., Angst Ch.; Planche comparatives avec bitumes modifiés et ajouts; EVED-Bericht 313; Oktober 1994
- [19] Schwéry B., Angst Ch.; Long term behaviour of the bituminous mixers issued of the comparative test sections realized in Switzerland, 5<sup>th</sup> Eurobitume Congress, Juni 1993, Stockholm
- [20] EN 12594; Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Vorbereitung von Proben
- [21] Ch. Angst, M. Riedi; Internationaler Ringversuch mit dem Bending Beam Rheometer; Bitumen 3/97
- [22] SN 670 456; Bituminöse Bindemittel, Prüfvorschrift; Bestimmung der Duktilität
- [23] SN 671 747; Bituminöse Bindemittel, Prüfvorschrift; Elastische Rückstellung
- [24] Performance Graded Asphalt; Binder Specification on Testing; Superpave Series No 1 (SP-1); Asphalt Institute, Lexington 1997
- [25] prEN 13589; Bitumen and bituminous binders – Determination of the tensile properties by the force ductility method.
- [26] prEN 13703; Bitumen and bituminous binders – Determination of the deformation energy of modified bitumen.

- [27] Ch. Angst; Optimierung der Kraftduktilitäts-Prüfung von PmB; Schlussbericht FA 13/99; Juni 2001.
- [28] ASTM D6084; Standard test method for elastic recovery of bituminous materials by ductilometer.
- [29] EMPA SOP 2926, Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Bindemitteln mit dem Dynamic Shear Rheometer (DSR), 2000
- [30] AASHTO Designation TP5, Superpave Series SP-1
- [31] Jürg P. Junker; Entwicklungen zur Bestimmung mechanischer Materialkennwerte in bituminösen Baustoffen, insbesondere an Asphalt; Diss. ETH 8177; Zürich 1987
- [32] M. Chappat, J. Poirier, M. Robert, G. Durant; Appréciation à partir d'essais rhéologiques et de traction direct sur liants de l'impact du vieillissement de liants modifiés vis à vis du comportement à froid; Eurasphalt & Eurobitume Congress; 2000 Barcelona
- [33] M.J. Lecomte, G. Durant, M. Robert, M.C. Phillips; Examination of the capability of superpave tests to predict the low-temperature performance of polymer-modified binders; Eurasphalt & Eurobitume Congress; 2000 Barcelona
- [34] B. Brulé, S. Largeaud, M. Maze; Evaluation performatielle des bitumes polymères: de nouveaux résultats et des propositions concrètes; Revue générale des Routes et des Aérodrômes; avril 1998
- [35] S. Largeaud, B. Brulé; Propriétés des liants bitumineux à basse température: relation entre les indicateurs; Eurasphalt & Eurobitume Congress; 2000 Barcelona
- [36] H. Piber; Oberflächenrisse und Asphalteeigenschaften; Eurasphalt & Eurobitume Congress; 2000 Barcelona
- [37] T. Pucci; Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux; thèse No 2282 (2000); ETH Lausanne
- [38] Carl L. Monismith et al; Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete"; Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologist (AAPT) Vol. 65 (1965)
- [39] Ch. Angst; Der Pressure Aging Vessel PAV; Strasse und Verkehr 2/97

- [40] F. Stinsky; Wärme-und Kälteverhalten von Asphaltbeton bei Zusatz von Trinidad Epuré; 4. Internationale Trinidad Tagung; München 1978
- [41] Ch. Angst; Morphologische Beurteilung verdichteter bituminöser Mischungen; Mitteilung des Institutes für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau ISETH der ETH Zürich; Juli 1882
- [42] SN 640 925a Zustandserfassung und Bewertung von Strassen, April 1997
- [43] A. Vanelstraete, D. Sybilski; Results of the RILEM round robin test on binder rheology; Ninth International Conference on Asphalt Pavements ISAP 2002; August 2002, Copenhagen



# ANHANG

Anhang 1 Übersicht über die verwendeten Bindemittel

Anhang 2 Übersicht aller Versuche

Anhang 3 Übersicht aller Untersuchungsergebnisse

Anhang 4 Ergebnisse der DSR-Versuche

Anhang 5 Mechanische Kennwerte mit dem KAST-BIN

Anhang 6 Vergleich der Modulwerte

Anhang 7 Ergebnisse direkter Zugversuch

Anhang 8 Vergleichsmessungen

**ANHANG 1: Übersicht über die verwendeten Bindemittel**

Tabelle A1.1: In der untenstehenden Tabelle sind sämtliche Bindemittel aufgeführt, deren Untersuchungsergebnisse verwendet wurden.

Probenummer	Bindemittelsorte	Alterungszustand
R 0030	B 60/70	Anlief.
R 0031	B 80/100	Anlief.
R 0032	B 120/150	Anlief.
A95-1097	Practiplast	Anlief.
A93-0827	EL 70	Anlief.
A95-2102	Styrelf	Anlief.
	Practiplast M40	Anlief. PAV
A00-0309	Olexobit SMA	Anlief.
A99-0120	A	Anlief.
A99-0121	B	Anlief.
A99-0122	C	Anlief.
A99-0123	D	Anlief.
A99-0124	E	Anlief.
A99-0174	F	Anlief.
A99-0742	G	Anlief.
A00-0035	50/70	Anlief.
A00-0036	10/30	Anlief.
A00-0037	Nypol 120	Anlief.
A99-2347	PmB 50/100-75	Anlief.
A99-2348	PmB 50/100-75	Anlief.
	Plastomer	
A99-2405	PmB 30/50-50	Anlief.
A99-2418	50/70	Anlief.
A99-2437	PmB 50/70-60	Anlief.
A99-2470	PmB 50/70-60	Anlief.
	Plastomer	
A99-2471	PmB 10/20	Anlief.
	Plastomer mod.	
A99-2472	PmB 50/70	Anlief.
	Plastomer mod.	
A99-2496	E2	Anlief.
A96-0113	PmB Feld 1	Anlief. DIN PAV
A90-0302		0 J. BMR
A98-2252		4 J. BMR
A98-0020		8 J. BMR
A96-0114	PmB	Anlief.

	Feld 2	DIN PAV 0 J. BMR 4 J. BMR 8 J. BMR
A90-0303 A98-2253 A98-0021 A96-0115	PmB Feld 3	Anlief. DIN PAV 0 J. BMR 4 J. BMR 8 J. BMR
A90-0304 A98-2254 A98-0022 A96-0116	PmB Feld 4	Anlief. DIN PAV 0 J. BMR 4 J. BMR 8 J. BMR
A90-0305 A98-2255 A98-0023 A96-0117	PmB Feld 5	Anlief. DIN PAV 0 J. BMR 4 J. BMR 8 J. BMR
A90-0306 A98-2256 A98-0034 A96-0118	PmB Feld 6	Anlief. DIN PAV 0 J. BMR 4 J. BMR 8 J. BMR
A90-0307 A98-0027 A98-0035 A96-0119	PmB Feld 7	Anlief. DIN PAV 0 J. BMR 4 J. BMR 8 J. BMR
A90-0308 A98-0028 A98-0036 A96-0120	PmB Feld 8	Anlief. DIN PAV 0 J. BMR 4 J. BMR 8 J. BMR
A90-0309 A99-0029 A98-0037 A96-0121	PmB Feld 9	Anlief. DIN PAV 0 J. BMR 4 J. BMR 8 J. BMR
A90-0310 A99-0178 A98-0038 A96-0124	PmB	Anlief.
A90-0311 A99-0179 A98-0039 A96-0124	PmB Feld 10	0 J. BMR 4 J. BMR 8 J. BMR
	PmB Feld 11	Anlief. DIN PAV 0 J. BMR 4 J. BMR 8 J. BMR
A90-0312 A99-0180 A98-0040 A90-0313	PmB	0 J. BMR

A99-0181	Feld 12	4 J. BMR
A98-0041		8 J. BMR
A90-0314	PmB	0 J. BMR
A99-0182	Feld 13	4 J. BMR
A98-0118		8 J. BMR
A96-0127	PmB	Anlief.
	Feld 14	DIN
		PAV
A90-0315		0 J. BMR
A99-0183		4 J. BMR
A98-0119		8 J. BMR
A96-0128	PmB	Anlief.
	Feld 15	DIN
		PAV
A90-0316		0 J. BMR
A99-0184		4 J. BMR
A98-0120		8 J. BMR
A96-0129	PmB	Anlief.
	Feld 16	DIN
		PAV
A90-0317		0 J. BMR
A99-0185		4 J. BMR
A98-0121		8 J. BMR
A93-0088	PmB	4 J. BMR
A93-0089	PmB	4 J. BMR
A93-0090	PmB	4 J. BMR
A93-0091	PmB	4 J. BMR
A93-0092	PmB	4 J. BMR
A93-0093	PmB	4 J. BMR
A93-0094	PmB	4 J. BMR
A93-0095	PmB	4 J. BMR
A93-0096	PmB	4 J. BMR
A93-0097	PmB	4 J. BMR
A93-0098	PmB	4 J. BMR
A93-0099	PmB	4 J. BMR
A93-0100	PmB	4 J. BMR
A93-0101	PmB	4 J. BMR
A93-0102	PmB	4 J. BMR
A93-0103	PmB	4 J. BMR
A00-0117	PmB 45	Anlief.
		PAV
A98-1010	Mixelf 10/20	Anlief.
		PAV
A98-2223	BP Structur	Anlief.
		PAV

## ANHANG 2: Übersicht aller Versuche

Tabelle A2.1:

Probenummer	Bindemittel-sorte	Alterungs-zustand	Prüfungen						EMPA kompl. Modul	LAVOC Zugvers. LCPC	Bemerkungen
			BBR	KDM	elast. Rück.	BP Fraass	Pen.	RuK			
R0029	B 35/50	Anlief.	x	x		x	x	x	x	x	
R0033	B 160/220	Anlief.	x	x		x	x	x	x	x	
A97-1562	B 70/100	Anlief.	x	x		x	x	x	x	x	
A98-2215	B 10/20	Anlief.	x	x		x	x	x	x	x	
A95-2102	PmB 50/70-53 elast.	Anlief.	x	x		x	x	x	x	x	
A96-0171	PmB 30/50-58 plast.	Anlief.	x	x		x	x	x	x	x	
R 0030	B 60/70	Anlief.		x							jeweils 4 Formen
R 0031	B 80/100	Anlief.		x							jeweils 4 Formen
R 0032	B 120/150	Anlief.		x							jeweils 4 Formen
A95-1097	Practiplast	Anlief.		x							jeweils 4 Formen
A93-0827	EL 70	Anlief.		x							jeweils 4 Formen
A95-2102	Styrelf	Anlief.		x							jeweils 4 Formen
	Practiplast M40	Anlief.	x			x	x	x			Masterkurven vorh.
	PAV		x			x	x	x			Masterkurven vorh.
A00-0309	Olexobit SMA	Anlief.		x	x		x	x			
A99-0120	A	Anlief.	x			x	x	x			weitere Vers. vorh.
A99-0121	B	Anlief.	x			x	x	x			weitere Vers. vorh.
A99-0122	C	Anlief.	x			x	x	x			weitere Vers. vorh.
A99-0123	D	Anlief.	x			x	x	x			weitere Vers. vorh.
A99-0124	E	Anlief.	x			x	x	x			weitere Vers. vorh.
A99-0174	F	Anlief.	x			x	x	x			weitere Vers. vorh.
A99-0742	G	Anlief.	x			x	x	x			weitere Vers. vorh.
A00-0035	50/70	Anlief.	x	x	x	x	x	x			
A00-0036	10/30	Anlief.	x	x	x	x	x	x			
A00-0037	Nypol 120	Anlief.	x	x	x	x	x	x			
A99-2347	PmB 50/100-75	Anlief.	x	x	x	x	x	x			
A99-2348	PmB 50/100-75 Plastomer	Anlief.	x	x	x	x	x	x			
A99-2405	PmB 30/50-50	Anlief.	x	x	x	x	x	x			
A99-2418	50/70	Anlief.	x	x	x	x	x	x			
A99-2437	PmB 50/70-60	Anlief.	x	x	x	x	x	x			
A99-2470	PmB 50/70-60 Plastomer	Anlief.	x	x	x	x	x	x			
A99-2471	PmB 10/20 Plastomer mod.	Anlief.	x	x	x	x	x	x			
A99-2472	PmB 50/70 Plastomer mod.	Anlief.	x	x	x	x	x	x			
A99-2496	E2	Anlief.	x	x	x	x	x	x			
A96-0113	PmB Feld 1	Anlief.	x	x	x	x	x	x			
	DIN		x	x	x	x	x	x			
	PAV		x	x	x	x	x	x			
A90-0302	0 J. BMR		x	x	x	x	x	x			
A98-2252	4 J. BMR		x	x	x	x	x	x			
A98-0020	8 J. BMR		x	x	x	x	x	x			
A96-0114	PmB Feld 2	Anlief.	x	x	x	x	x	x			
	DIN		x	x	x	x	x	x			
	PAV		x	x	x	x	x	x			
A90-0303	0 J. BMR		x	x	x	x	x	x			
A98-2253	4 J. BMR		x	x	x	x	x	x			
A98-0021	8 J. BMR		x	x	x	x	x	x			
A96-0115	PmB Feld 3	Anlief.	x	x	x	x	x	x			
	DIN		x	x	x	x	x	x			

A90-0306		PAV	x	x	x	x	x	x				
A98-2256		0 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A98-0034		4 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A96-0118	PmB	8 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
	Feld 6	Anlief.	x	x	x	x	x	x				
		DIN	x	x	x	x	x	x				
		PAV	x	x	x	x	x	x				
A90-0307		0 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A98-0027		4 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A98-0035		8 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A96-0119	PmB	Anlief.	x	x	x	x	x	x				
	Feld 7	DIN	x	x	x	x	x	x				
		PAV	x	x	x	x	x	x				
A90-0308		0 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A98-0028		4 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A98-0036		8 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A96-0120	PmB	Anlief.	x	x	x	x	x	x				
	Feld 8	DIN	x	x	x	x	x	x				
		PAV	x	x	x	x	x	x				
A90-0309		0 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A98-0029		4 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A98-0037		8 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A96-0121	PmB	Anlief.	x	x	x	x	x	x				
	Feld 9	DIN	x	x	x	x	x	x				
		PAV	x	x	x	x	x	x				
A90-0310		0 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A99-0178		4 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A98-0038		8 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A96-0124	PmB	Anlief.	x	x	x	x	x	x				
A90-0311	PmB	0 J. BMR	x	x								
A99-0179	Feld 10	4 J. BMR	x	x								
A98-0039		8 J. BMR	x	x								
A96-0124	PmB	Anlief.	x	x	x	x	x	x				
	Feld 11	DIN	x	x	x	x	x	x				
		PAV	x	x	x	x	x	x				
A90-0312		0 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A99-0180		4 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A98-0040		8 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A90-0313	PmB	0 J. BMR	x	x								
A99-0181	Feld 12	4 J. BMR	x	x								
A98-0041		8 J. BMR	x	x								
A90-0314	PmB	0 J. BMR	x	x								
A99-0182	Feld 13	4 J. BMR	x	x								
A98-0118		8 J. BMR	x	x								
A96-0127	PmB	Anlief.	x	x	x	x	x	x				
	Feld 14	DIN	x	x	x	x	x	x				
		PAV	x	x	x	x	x	x				
A90-0315		0 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A99-0183		4 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A98-0119		8 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A96-0128	PmB	Anlief.	x	x	x	x	x	x				
	Feld 15	DIN	x	x	x	x	x	x				
		PAV	x	x	x	x	x	x				
A90-0316		0 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A99-0184		4 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A98-0120		8 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A96-0129	PmB	Anlief.	x	x	x	x	x	x				
	Feld 16	DIN	x	x	x	x	x	x				
		PAV	x	x	x	x	x	x				
A90-0317		0 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A99-0185		4 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A98-0121		8 J. BMR	x	x	x	x	x	x				
A93-0099	PmB	4 J. BMR	x									
A93-0100	PmB	4 J. BMR	x									
A93-0101	PmB	4 J. BMR	x									
A93-0102	PmB	4 J. BMR	x									
A93-0103	PmB	4 J. BMR	x									
A00-0117	PmB 45	Anlief.	x	x				x		x		
		PAV	x	x				x		x		
A98-1010	Mixelf 10/20	Anlief.	x					x				
		PAV	x					x				
A98-2223	BP Structur	Anlief.	x					x				
		PAV	x					x				

### ANHANG 3: Übersicht aller Untersuchungsergebnisse

Tabelle A3.1: Sämtliche in dieser Arbeit beim IMP durchgeführten Versuche und deren Ergebnisse sind in dieser Tabelle aufgeführt.

Legende: Kraft-Duktilität \* = gerissen nach .....cm  
\*\* = gerissen bei max. Kraft

Probe-nummer	Bindemittel-sorte	Alterungs-zustand	Prüfungen											
			BBR					KDM (Form: ASTM)		elast. Rück.	BP Fraass	Pen. [1/10 mm]	RuK [°C]	
			Steifigkeit 60 s [°C]	[kPa]	m-Wert 60 s	T <sub>s=300</sub>	T <sub>m=0.3</sub>	[°C]	E <sub>40-20</sub> [J/cm <sup>2</sup> ]					E <sub>Bruch</sub> [J/cm <sup>2</sup> ]
R 0029	B 35/50	Anlief.	-15	128'500	0.367	-24.1	-21.9	5	--	5.2		-16	36	60.1
			-21	285'400	0.310									
			-27	564'300	0.252									
R 0033	B 160/220	Anlief.	-15	42'827	0.514	-26.3	-30.0	5	0.2	1.8		-23	179	40.8
			-21	132'867	0.419									
			-27	334'867	0.335									
A97-1562	B 70/100	Anlief.	-9	48'603	0.535	-19.2	-22.5	5	0.6	5.2		-20	81	46.7
			-15	156'333	0.423									
			-21	395'167	0.321									
A98-2215	B 10/20	Anlief.	-9	161'733	0.349	-16.8	-13.7	5	--	0.2		-4	17	69.1
			-15	390'833	0.288									
			-21	667'267	0.226									
A96-0171	PmB 30/50-58 plastomermod.	Anlief.	-15	66'443	0.353	-27.2	-24.2	5	--	3.3		-23	41	64.6
			-21	141'867	0.322									
			-27	293'333	0.282									
A95-2102	PmB 50/70-53 elastomermod.	Anlief.						5	7.3	18.5		-20	64	51.9
		Form: ASTM						5		14.7				
		Form: DIN						5		22.0				
		Form: SHRP						5		6.0				
		Form: H2						5						
R 0030	B 60/70	Anlief.						5	*~17cm	4.1		-18	59	51.5
		Form: ASTM						5						
		Form: DIN						5		3.3				
		Form: SHRP						5		1.3				
		Form: H2						5						
R 0031	B 80/100	Anlief.						5	0.4	4.5		-17	82	47.4
		Form: ASTM						5		2.5				
		Form: DIN						5		3.6				
		Form: SHRP						5		1.8				
		Form: H2						5						
R 0032	B 120/150	Anlief.						5	0.4	3.7		-16	107	45.9
		Form: ASTM						5		2.1				
		Form: DIN						5		3.7				
		Form: SHRP						5		2.8				
		Form: H2						5						
A95-1097	Practiplast	Anlief.						5	*~12cm	2.9		-26	43	65.4
		Form: ASTM						5		1.5				
		Form: DIN						5		2.5				
		Form: SHRP						5		1.5				
		Form: H2						5						
A93-0827	EL 70	Anlief.						5	*~36cm	13.1				
		Form: ASTM						5		5.9				
		Form: DIN						5		12.4				
		Form: SHRP						5		6.5				
		Form: H2						5						
A95-1097	Practiplast M40	Anlief.	-15	65'495	0.360							-26	43	65.4
			-25	236'733										
			-28	326'300										
		PAV	-10	69'797								-12	25	90.1



Probe- nummer	Bindemittel- sorte	Alterungs- zustand	Prüfungen											
			BBR				T <sub>m=0.3</sub>	KDM (Form: ASTM)		elast. Rück.	BP Fraass	Pen. [1/10 mm]	RuK [°C]	
			Steifigkeit <sub>60s</sub> [°C]	[kPa]	m-Wert <sub>60s</sub>	T <sub>s=300</sub>		E <sub>40-20</sub> [J/cm <sup>2</sup> ]	E <sub>Bruch</sub> [J/cm <sup>2</sup> ]					
A98-0022		8 J. BMR	-21	361'433	0.271	-19.2	-19.5	5	*-24cm	12.4	70	-7	22	68.1
			-9	77'770	0.388									
			-15	159'266	0.346									
A96-0116	PmB Feld 4	Anlief.	-21	359'733	0.285	-21.6	-22.1	5	4.7	13.8	78	-19	56	55.1
			-9	71'713	0.409									
			-15	121'100	0.388									
A90-0305		0 J. BMR	-15	198'833	0.295	-18.8	-14.4	5	**	0.6	70	-17	39	62.1
			-21	381'367	0.241									
			-15	172'100	0.332									
A98-2255		4 J. BMR	-15	232'033	0.293	-17.5	-14.2	5	**	0.2	67	-14	24	68.0
			-21	433'500	0.243									
			-9	114'167	0.349									
A98-0023		8 J. BMR	-15	239'700	0.294	-16.8	-14.3	5	**	0.3	67	-2	16	77.5
			-21	445'600	0.244									
			-9	116'400	0.355									
A96-0117	PmB Feld 5	Anlief.	-15	90'747	0.407	-23.1	-21.9	5	4.8	13.3	100	-19	71	80.6
			-21											
			-15	153'650	0.320									
A90-0306		0 J. BMR	-15	301'900	0.264	-20.9	-17.1	5	6.6	16.1	72	-11	28	70.3
			-21	301'900	0.264									
			-15	149'300	0.363									
A98-2256		4 J. BMR	-15	212'200	0.312	-18.4	-16.1	5	*-37cm	14.0	81	-17	33	71.8
			-21	391'367	0.252									
			-9	95'576	0.367									
A98-0034		8 J. BMR	-15	225'033	0.301	-17.0	-14.0	5	*-2 cm	3.8	77	-5	20	74.3
			-21	449'533	0.242									
			-9	122'367	0.368									
A96-0118	PmB Feld 6	Anlief.	-15	93'903	0.414	-23.3	-23.6	5	7.4	16.4	97	-25	62	81.0
			-21											
			-15	151'733	0.329									
A90-0307		0 J. BMR	-15	315'467	0.277	-20.6	-18.3	5	*-23 cm	14.1	92	-18	48	74.4
			-21	315'467	0.277									
			-15	136'800	0.346									
A99-0027		4 J. BMR	-15	198'867	0.322	-18.6	-17.2	5	*-21 cm	14.7	83	-20	28	74.7
			-21	395'067	0.266									
			-9	100'027	0.384									
A98-0035		8 J. BMR	-15	208'666	0.319	-17.7	-16.7	5	*-25 cm	20.4	77	-6	19	77.6
			-21	410'300	0.256									
			-9	98'973	0.380									
A96-0119	PmB Feld 7	Anlief.	-15	90'667	0.409	-22.3	-22.8	5	2.6	9.1	64	-19	51	59.3
			-21											
			-15	162'100	0.314									
A90-0308		0 J. BMR	-15	316'067	0.272	-20.5	-17.0	5	*-12 cm	8.0	58	-22	37	64.1
			-21	316'067	0.272									
			-15	140'200	0.359									
A99-0028		4 J. BMR	-15	211'733	0.312	-18.3	-16.4	5	**	0.5	60	-18	24	69.9
			-21	400'233	0.265									
			-9	109'333	0.360									
A98-0036		8 J. BMR	-15	264'133	0.297	-16.0	-14.9	5	**	1.2	58	-5	15	78.2
			-21	487'600	0.231									
			-9	124'733	0.357									
A96-0120	PmB Feld 8	Anlief.	-15	89'277	0.335	-25.0	-19.2	5	*-11 cm	2.9	30	-24	61	59.5
			-25	300'633	0.258									
			-15	100'223	0.294									
		PAV	-15	140'800	0.234	-28.6	0.7	5	**	0.1	40	-21	38	72.1
			-15	140'800	0.234	-28.6	0.7	5	**	0.1	gerissen	-6	26	88.5

Probe- nummer	Bindemittel- sorte	Alterungs- zustand	Prüfungen											
			BBR					KDM (Form: ASTM)			elast. Rück. [%]	BP Fraass [°C]	Pen. [1/10 mm]	RuK [°C]
			Steifigkeit <sub>60 s</sub> [°C]	[kPa]	m-Wert <sub>60 s</sub>	T <sub>g=300</sub>	T <sub>m=0.3</sub>	E <sub>40-20</sub> [°C]	E <sub>Bruch</sub> [J/cm <sup>2</sup> ]	E <sub>Bruch</sub> [J/cm <sup>2</sup> ]				
		PAV	-15	157733	0.296	-20.3	-14.4	5	**	0.8	gerissen	-7	18	78.5
A90-0310		0 J. BMR	-15	493'600	0.195									
A99-0178		4 J. BMR	-15	271'076	0.253	-16.2	-7.9	5	**	0.1	gerissen	-15	31	67.9
			-21	454'633	0.219						gerissen	-21	24	76.9
			-9	145'400	0.283									
A98-0038		8 J. BMR	-15	253'333	0.267	-16.3	-10.5	5	**	0.2	gerissen	-9	20	80.9
			-21	476'233	0.237									
			-9	136'133	0.314									
A90-0311	Feld 10	0 Jahre	-15	164'200	0.324									
A99-0179	PmB	4 J. BMR	-15	206'300	0.280			5	**	0.5				
			-21	412'700	0.239									
			-9	105'866	0.342									
A98-0039	PmB	8 J. BMR	-15	205'267	0.288			5	**	0.2	gerissen			
			-21	390'633	0.231									
			-9	107'667	0.345									
A96-0124	PmB	Anlief.	-15	125'433	0.453	-20.1	-22.9	5	6.6	15.9	82	-20	75	53.0
	Feld 11		-25	687'367	0.260									
		DIN	-15	157'700	0.413						78	-21	52	57.9
		PAV	-15	220'867	0.369	-16.4	-20.1	5	**	0.3	57	-9	29	68.2
			-21	817'367										
			-25											
A90-0312		0 J. BMR	-15	120'600	0.439						77	-18	56	56.9
A99-0180		4 J. BMR	-15	195'200	0.363	-18.4	-19.9	5	*~12 cm	9.2	73	-24	40	62.5
			-21	413'566	0.287									
			-9	79'040	0.437									
A98-0040		8 J. BMR	-15	167'100	0.339	-18.0	-19.9	5	*~22 cm	12.3	68	-8	26	64.8
			-21	432'533	0.291									
			-9	67'147	0.456									
A90-0313	Feld 12	0 Jahre	-15	115'800	0.359									
A99-0181	PmB	4 J. BMR	-15	136'066	0.331			5	*~3 cm	2.0				
			-21	288'566	0.288									
			-27	530'433	0.230									
A98-0041	PmB	8 J. BMR	-15	137'867	0.332			5	**	0.3	gerissen			
			-21	286'333	0.277									
			-27	552'833	0.229									
A90-0314	Feld 13	0 Jahre	-15	214'400	0.332									
A99-0182	PmB	4 J. BMR	-15	261'300	0.297			5	**	0.2				
			-21	521'100	0.244									
			-9	121'667	0.353									
A98-0118	PmB	8 J. BMR	-15	218'767	0.324			5	**	0.5	gerissen			
			-21	478'467	0.267									
			-9	99'803	0.388									
A96-0127	PmB	Anlief.	-15	78'707	0.422	-24.3	-24.4	5	*~32 cm	5.8	58	-25	61	55.1
	Feld 14		-27											
		DIN	-15								61	-19	42	61.5
		PAV	-15	153'733	0.320	-21.0	-17.7	5	*~10 cm	7.2	gerissen	-13	21	74.4
			-21	299'050	0.275									
A90-0315		0 J. BMR	-15	118'700	0.379						61	-19	43	60.1
A99-0183		4 J. BMR	-15	186'933	0.311	19.3	-16.1	5	*~1 cm	1.7	gerissen	-24	33	66.7
			-21	363'966	0.257									
			-9	93'400	0.356									
A98-0119		8 J. BMR	-15	220'033	0.299	-17.2	-14.8	5	*~3 cm	2.7	gerissen	-6	18	75.1
			-21	435'333	0.268									
			-9	99'743	0.373									
A96-0128	PmB	Anlief.	-15	128'800	0.426	-20.8	-22.9	5	*~33 cm	4.6	15	-20	77	47.4



## ANHANG 4: Ergebnisse der DSR-Versuche

Die EMPA verwendete intern ein firmeneigenes System der Bezeichnung der untersuchten Bindemittel. Die untenstehende Tabelle stellt deshalb die Bezeichnungen EMPA und IMP einander gegenüber. Die Kennzahlen ( Penetration, EP, RuK etc.) der einzelnen untersuchten Bindemittel können dem Anhang 1 entnommen werden.

Bezeichnungen IMP	Bindemittelsorte	Bezeichnungen der EMPA
R0033	B 160/220	KVA
A97-1562	B 70/100	KVB
R0029	B 35/50	KVC
A98-2215	B 10/20	KVD
A95-2102	PmB 50/70-53 elastomermodifiziert	KVE
A96-0171	PmB 30/50-58 plastomermodifiziert	KVF

### Ergebnisse des Bindemittels KVA:

Die komplexen Module und die Phasenverschiebungen des Bindemittels KVA sind in den Tabellen A4.1 und A4.2 zusammengestellt sowie in den Abbildungen A4.1 und A4.2 dargestellt.

Tabelle A4.1: Komplexe Module des Bindemittels KVA als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

Temperatur [°C]	40	35	30	25	20	15	10
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	komplexe Module [kPa]						
0.1	0.83	1.88	5.02	13.64	40.05	120.3	371.5
0.15	1.23	2.73	7.53	19.53	56.15	166.3	501.5
0.2	1.62	3.5	9.75	25.21	71.39	207.8	617.8
0.3	2.41	5.04	14.04	35.6	99	283.8	830.5
0.5	4.01	8.15	22.09	54.91	149.6	419.2	1192
0.7	5.39	11.12	29.69	72.64	195	542.2	1497
1	7.16	15.38	40.48	97.34	259.3	704	1909
1.5	10.23	22.1	58.04	135.4	354.6	943.6	2482
2	13.12	28.44	74.33	170.8	442.6	1156	2980
3	18.72	40.77	104.4	235.9	601.8	1530	3827
5	29.32	63.77	160.1	352.4	878.9	2159	5208
7	39.75	84.71	209	455.8	1120	2685	6317
10	55	115	278.4	602.2	1441	3389	7731

Tabelle A4.2: Phasenverschiebung des Bindemittels KVA als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

Temperatur [°C]	40	35	30	25	20	15	10
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	Phasenverschiebung [°]						
0.1	87.01	85.46	82.43	79.78	75.67	71.35	68.2
0.15	86.04	84.53	81.72	78.43	74.71	70.85	66.07
0.2	85.81	83.73	81.18	77.6	74.14	70.01	65.49
0.3	85.36	82.99	80.26	76.84	73.16	69.12	64.33
0.5	84.58	82.09	79.24	75.55	72.06	67.81	62.91
0.7	84.08	81.39	78.5	75.04	71.26	66.97	61.84
1	83.13	80.51	77.7	74.04	70.45	65.99	60.66
1.5	82.03	79.85	76.75	73.08	69.49	64.94	59.22
2	81.25	79.41	76.29	72.65	68.61	64.03	58.49
3	80.33	78.66	75.68	71.78	67.51	62.75	57.11
5	79.07	78.62	75.39	70.59	66.22	61.15	55.39
7	79.77	78.91	75.25	69.61	65.4	60.07	54.08
10	85.29	80.38	75.56	68.64	64.43	58.93	52.76

Abbildung A4.1: Komplexe Module des Bindemittels KVA als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

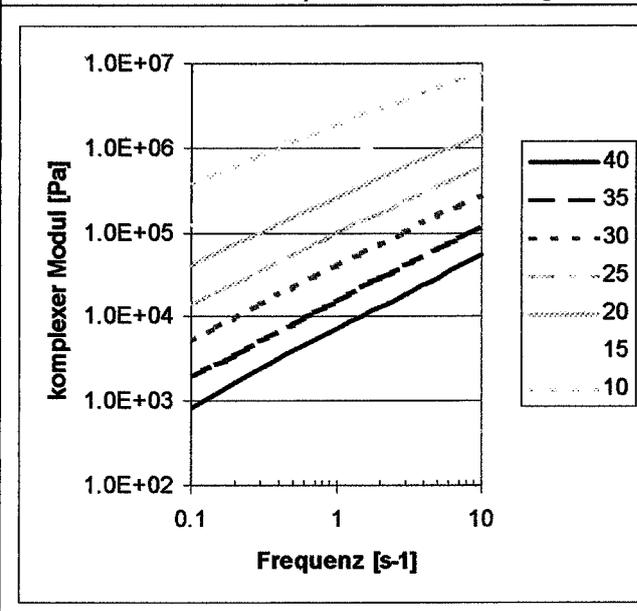
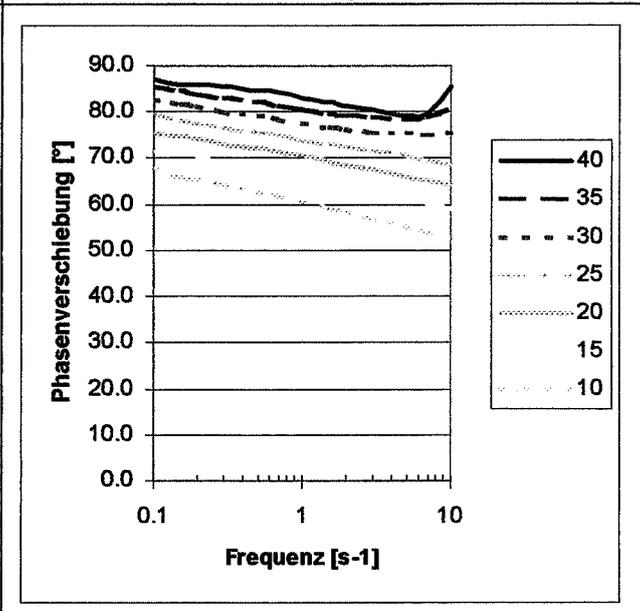


Abbildung A4.2: Phasenverschiebung des Bindemittels KVA als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen



**Ergebnisse des Bindemittels KVB:**

Die komplexen Module und die Phasenverschiebungen des Bindemittels KVB sind in den Tabellen A4.3 und A4.4 zusammengestellt sowie in den Abbildungen A4.3 und A4.4 dargestellt.

Tabelle A4.3: Komplexe Module des Bindemittels KVB als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

Temperatur [°C]	40	35	30	25	20	15	10
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	komplexe Module [kPa]						
0.1	7.67	20.81	55.29	162.77	478.74	1385.8	3772.3
0.15	11.13	30.29	78.37	222.25	639.48	1797.7	4787.8
0.2	14.53	38.82	100.34	279.87	788.47	2174.7	5644.8
0.3	21	54.88	140.35	382.18	1055.07	2812.2	7077.6
0.5	33.28	85.07	212.76	562.87	1510	3861	9243
0.7	44.82	112.19	277.97	719.11	1885.1	4706	10931
1	61.16	151.18	369.84	933.35	2393.6	5795.3	13014
1.5	87.04	210.01	508.69	1246.2	3108.4	7265.4	15677
2	111.21	265.37	629.83	1525.1	3706.7	8450	17845
3	156.63	366.84	852.5	2010	4741.6	10408	21259
5	240.45	546.03	1238.4	2804.9	6343.6	13379	26491
7	312.92	700.5	1554.8	3470.8	7639	15641	30359
10	415.72	919.7	1998	4324	9211	18389	35026

Tabelle A4.4: Phasenverschiebung des Bindemittels KVB als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

Temperatur [°C]	40	35	30	25	20	15	10
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	Phasenverschiebung [°]						
0.1	83.45	80.51	77.54	73.1	68.99	63.1	54.54
0.15	82.36	79.38	75.6	71.66	66.5	60.23	53.36
0.2	81.92	78.8	75.12	70.75	65.61	59.25	51.91
0.3	80.94	77.79	74.09	69.55	64.14	57.63	50.27
0.5	79.61	76.52	72.53	67.82	62.21	55.55	48.19
0.7	78.76	75.55	71.68	66.78	60.79	54.07	46.69
1	77.92	74.63	70.37	65.45	59.41	52.7	45.52
1.5	76.95	73.58	69.1	63.85	57.84	50.91	43.92
2	76.15	72.63	68.25	62.97	56.57	49.87	42.75
3	75.15	71.7	66.96	61.36	55.13	48.3	41.09
5	73.95	70.06	65.17	59.36	52.94	46.38	38.79
7	73.17	69.29	63.96	58.29	51.78	44.91	37.38
10	72.52	68.32	62.64	56.91	50.46	43.6	35.73

Abbildung A4.3: Komplexe Module des Bindemittels KVB als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

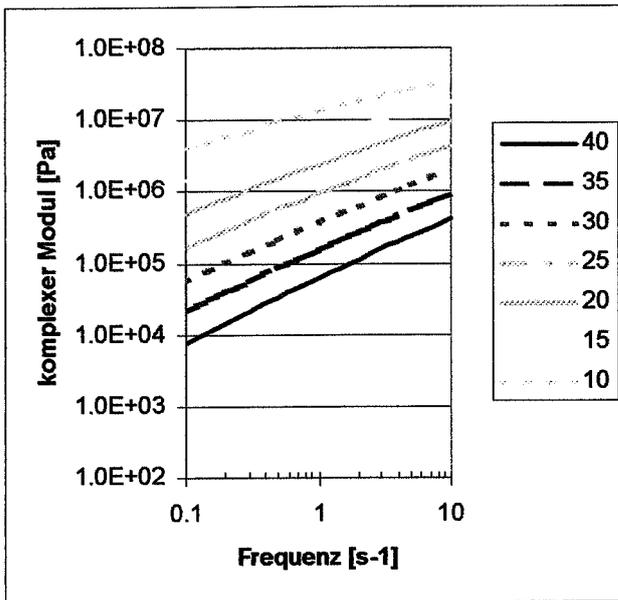
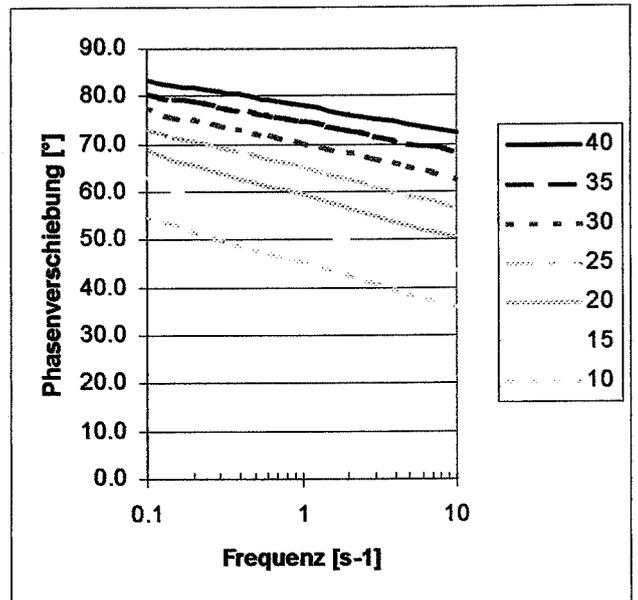


Abbildung A4.4: Phasenverschiebung des Bindemittels KVB als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen



**Ergebnisse des Bindemittels KVC:**

Die komplexen Module und die Phasenverschiebungen des Bindemittels KVC sind in den Tabellen A4.5 und A4.6 zusammengestellt sowie in den Abbildungen A4.5 und A4.6 dargestellt.

Tabelle A4.5: Komplexe Module des Bindemittels KVC als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

Temperatur [°C]	40	35	30	25	20	15	10
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	komplexe Module [kPa]						
0.1	34.42	75.65	168	407	914	2100	4670
0.15	46.91	99.43	212	523	1170	2610	5610
0.2	57.49	121	259	622	1370	3020	6390
0.3	76.68	158	337	791	1720	3690	7580
0.5	111	224	466	1070	2240	4750	9450
0.7	140	278	572	1300	2660	5540	10900
1	179	352	708	1580	3190	6530	12600
1.5	234	454	906	1960	3910	7780	14700
2	282	544	1080	2290	4470	8810	16500
3	369	701	1360	2830	5440	10400	19200
5	509	948	1810	3670	6900	12900	23200
7	627	1150	2170	4330	7990	14700	26300
10	781	1410	2620	5160	9360	16900	30000

Tabelle A4.6: Phasenverschiebung des Bindemittels KVC als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

Temperatur [°C]	40	35	30	25	20	15	10
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	Phasenverschiebung [°]						
0.1	67.97	64.85	60.14	55.79	52.37	48.55	44.3
0.15	66.87	62.77	59.4	55.78	51.6	47.64	43.87
0.2	65.84	62.32	58.84	54.85	51.13	47.26	42.92
0.3	64.77	61.26	57.94	53.99	50.3	46.17	42.13
0.5	63.44	60.12	56.57	52.98	49.03	45.07	40.95
0.7	62.58	59.4	56.05	52.1	48.24	44.22	40.12
1	61.94	58.61	55.21	51.54	47.59	43.57	39.28
1.5	60.8	57.75	54.34	50.66	46.74	42.62	38.46
2	60.37	57.3	53.79	49.91	46.08	42.12	37.87
3	59.78	56.46	53.05	49.26	45.41	41.27	36.94
5	58.83	55.46	51.99	48.35	44.38	40.25	35.7
7	58.26	55.02	51.54	47.55	43.57	39.66	34.94
10	57.81	54.39	50.68	47.02	42.86	38.83	33.81

Abbildung A4.5: Komplexe Module des Bindemittels KVC als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

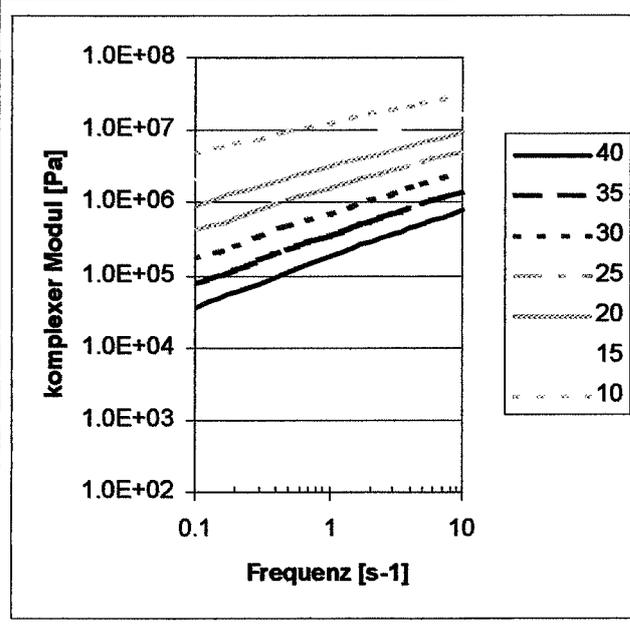
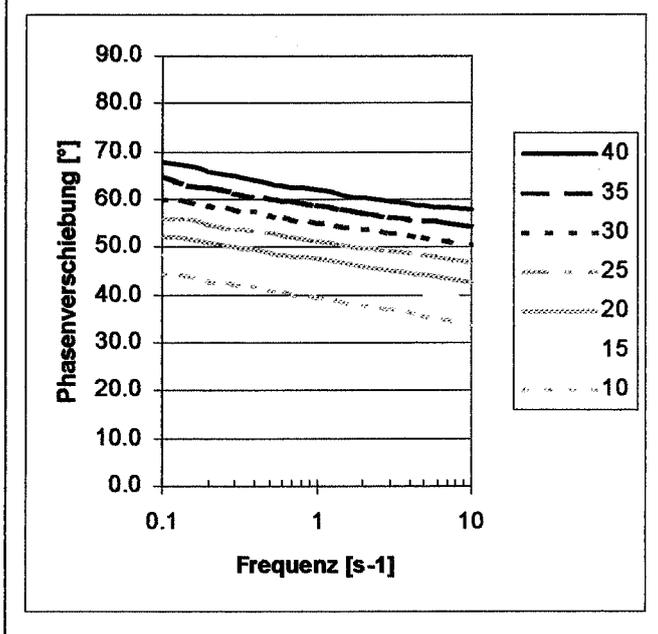


Abbildung A4.6: Phasenverschiebung des Bindemittels KVC als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen



**Ergebnisse des Bindemittels KVD:**

Die komplexen Module und die Phasenverschiebungen des Bindemittels KVD sind in den Tabellen A4.7 und A4.8 zusammengestellt sowie in den Abbildungen A4.7 und A4.8 dargestellt.

Tabelle A4.7: Komplexe Module des Bindemittels KVD als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

Temperatur [°C]	40	35	30	25	20	15	10
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	komplexe Module [kPa]						
0.1	128.5	296.9	723.7	1715	3970	9303	18646
0.15	170.6	381.1	929.3	2116	4801	10411	20917
0.2	206.4	468.1	1104	2495	5590	11801	23462
0.3	273.2	611.9	1401	3116	6754	13905	27165
0.5	385	843	1889	4055	8537	17016	32639
0.7	481.3	1039	2292	4801	9950	19462	36657
1	611.6	1283	2792	5729	11575	22271	41351
1.5	798.8	1631	3470	6965	13699	26020	47161
2	953.9	1928	4051	7998	15479	29054	51453
3	1230	2428	4974	9636	18153	33756	58087
5	1670	3204	6433	12024	22277	40241	67069
7	2041	3841	7564	13878	25270	44967	73213
10	2504	4641	8944	16066	29031	50580	80119

Tabelle A4.8: Phasenverschiebung des Bindemittels KVD als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

Temperatur [°C]	40	35	30	25	20	15	10
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	Phasenverschiebung [°]						
0.1	65.98	60.29	56.86	51.58	47.92	41.9	37.97
0.15	63.83	60.34	56.33	51.98	47.37	42.21	36.21
0.2	63.31	59.33	55.24	50.79	46.19	41.2	35.32
0.3	62.22	58.41	54.33	50.01	45.25	40.16	34.23
0.5	61.06	57.08	53.05	48.63	43.76	38.66	32.56
0.7	60.09	56.31	52.12	47.6	42.93	37.76	31.18
1	59.43	55.41	51.34	46.92	42.07	36.88	30.09
1.5	58.28	54.27	50.22	45.69	40.86	35.23	28.73
2	57.59	53.79	49.42	44.9	40.05	34.29	27.76
3	56.82	52.54	48.39	43.87	38.92	32.96	26.59
5	55.53	51.69	47.21	42.6	37.58	31.21	25.06
7	54.91	50.69	46.47	41.88	36.54	30.06	24.14
10	54.12	49.89	45.65	40.82	35.42	28.82	23.17

Abbildung A4.7: Komplexe Module des Bindemittels KVD als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

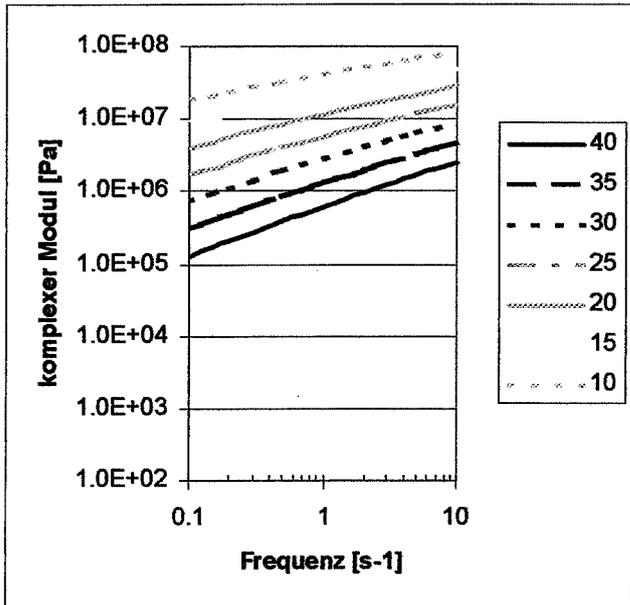
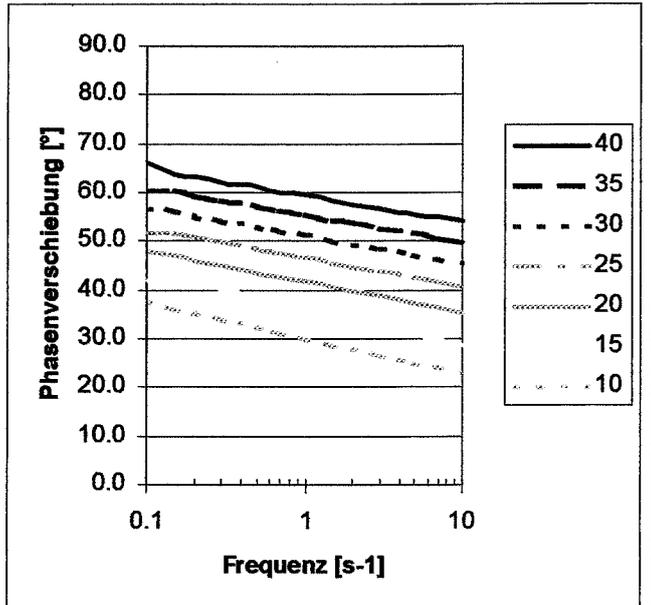


Abbildung A4.8: Phasenverschiebung des Bindemittels KVD als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen



**Ergebnisse des Bindemittels KVE:**

Die komplexen Module und die Phasenverschiebungen des Bindemittels KVE sind in den Tabellen A4.9 und A4.10 zusammengestellt sowie in den Abbildungen A4.9 und A4.10 dargestellt.

Tabelle A4.9: Komplexe Module des Bindemittels KVE als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

Temperatur [°C]	40	35	30	25	20	15	10
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	komplexe Module [kPa]						
0.1	7.82	16.5	36.66	97.73	275.21	795.8	2327
0.15	10.56	22.17	49.22	134.64	374.81	1054.9	2903.2
0.2	13.33	27.67	62.1	166.54	458.57	1275.5	3517.9
0.3	18.26	37.89	85.49	226.06	613.14	1682.3	4507.1
0.5	27.06	56.22	126.79	333.72	888	2340.5	6044
0.7	35.02	72.69	164.55	429.34	1126.8	2896.1	7252
1	46.19	95.93	216.04	560.68	1445.5	3627.1	8703
1.5	63.53	131.52	295.8	748.1	1898.6	4626	10722
2	79.24	162.96	368.97	917.7	2296.1	5438	12410
3	108.87	222.52	500.8	1225.3	2975.5	6839	15061
5	161.95	330.65	726.6	1736.5	4092.3	9033	18911
7	208.63	424.92	927.9	2174.2	4988	10696	22110
10	274.93	558.4	1192.8	2754.4	6139	12844	25792

Tabelle A4.10: Phasenverschiebung des Bindemittels KVE als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

Temperatur [°C]	40	35	30	25	20	15	10
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	Phasenverschiebung [°]						
0.1	70.18	70.53	68.68	68.73	66.78	64.04	57.81
0.15	69.86	69.71	69.5	68.31	66.16	62.07	56.61
0.2	70.06	69.73	69.25	68.06	65.65	61.55	55.71
0.3	70.08	69.84	69.28	67.75	64.95	60.29	54.26
0.5	70.06	69.87	68.97	67.19	63.93	58.78	52.24
0.7	70.4	69.89	68.97	66.59	62.85	57.54	51.18
1	70.28	69.93	68.55	66.21	62.11	56.46	49.91
1.5	70.43	69.77	68.06	65.28	60.87	54.96	48.28
2	70.72	69.64	67.95	64.58	59.97	54.18	47.35
3	70.96	69.63	67.24	63.79	58.64	52.74	45.81
5	71.37	69.38	66.3	62.4	57.2	51.05	44.01
7	71.65	69.06	65.89	61.44	56.04	49.8	42.74
10	72.24	68.89	65.03	60.44	54.88	48.52	41.37

Abbildung A4.9: Komplexe Module des Bindemittels KVE als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

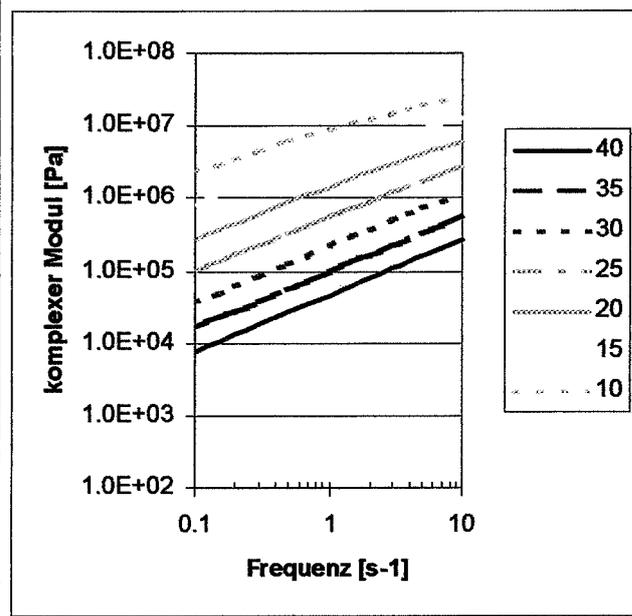
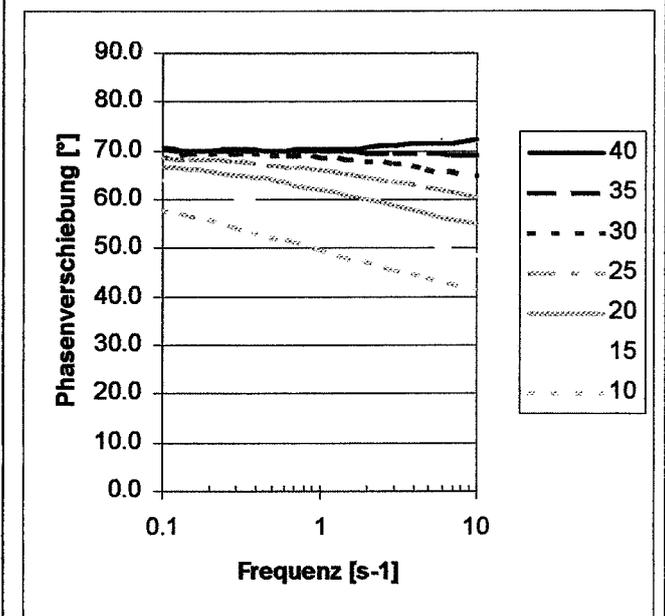


Abbildung A4.10: Phasenverschiebung des Bindemittels KVE als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen



**Ergebnisse des Bindemittels KVF:**

Die komplexen Module und die Phasenverschiebungen des Bindemittels KVF sind in den Tabellen A4.11 und A4.12 zusammengestellt sowie in den Abbildungen A4.11 und A4.12 dargestellt

Tabelle A4.11: Komplexe Module des Bindemittels KVF als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

Temperatur [°C]	40	35	30	25	20	15	10
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	komplexe Module [kPa]						
0.1	68.8	143.4	274.1	522.9	1048	2116	4227
0.15	86.77	172.9	332.7	638.4	1253	2483	4688
0.2	103.8	205.1	386.6	734.5	1428	2798	5217
0.3	132.6	256.4	477.6	890.7	1708	3280	6073
0.5	179.1	338.7	618.9	1131	2123	3991	7291
0.7	216.3	406.4	731.6	1316	2459	4553	8191
1	265	488.3	869.2	1548	2846	5209	9299
1.5	332.4	602.2	1058	1860	3366	6071	10679
2	388.1	696.3	1211	2109	3790	6733	11773
3	483.9	852.2	1464	2512	4450	7806	13433
5	635	1096	1852	3109	5428	9384	15814
7	753.9	1282	2149	3568	6154	10572	17620
10	907.9	1519	2515	4123	7063	11928	19744

Tabelle A4.12: Phasenverschiebung des Bindemittels KVF als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

Temperatur [°C]	40	35	30	25	20	15	10
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	Phasenverschiebung [°]						
0.1	58.7	53.15	48.86	47.4	43.12	39.66	37.55
0.15	56.19	52.94	49.63	45.89	43.04	39.78	36.27
0.2	55.76	52.08	48.7	45.51	42.26	38.98	36.11
0.3	54.73	51.29	48.06	44.76	41.77	38.59	35.65
0.5	53.5	50.12	46.95	43.9	41.05	37.87	34.88
0.7	52.91	49.66	46.4	43.55	40.47	37.38	34.72
1	52.12	48.91	45.96	43.07	40.11	37.25	34.23
1.5	51.31	48.15	45.37	42.51	39.74	36.73	33.89
2	50.88	47.84	44.86	42.3	39.24	36.7	33.68
3	50.32	47.32	44.36	41.83	39.01	36.17	33.28
5	49.48	46.6	43.8	41.33	38.69	35.88	32.92
7	49.01	46.57	43.62	41.19	38.32	35.64	32.62
10	48.53	45.81	43.34	40.82	38.16	35.34	32.24

Abbildung A4.11: Komplexe Module des Bindemittels KVF als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen

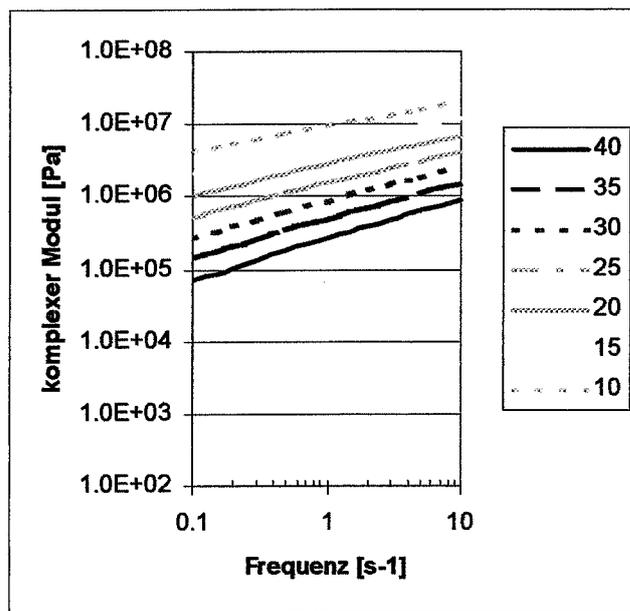
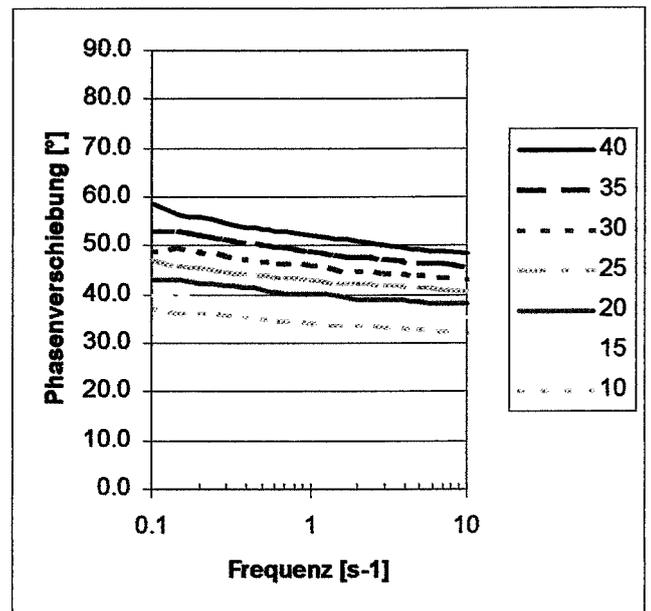


Abbildung A4.12: Phasenverschiebung des Bindemittels KVF als Funktion von Temperatur und Frequenz, DSR-Messungen



## ANHANG 5: Mechanische Kennwerte mit dem KAST-BIN

Die EMPA verwendete intern ein firmeneigenes System der Bezeichnung der untersuchten Bindemittel. Die untenstehende Tabelle stellt deshalb die Bezeichnungen EMPA und IMP einander gegenüber. Die Kennzahlen ( Penetration, EP, RuK etc.) der einzelnen untersuchten Bindemittel können dem Anhang 1 entnommen werden.

Bezeichnungen IMP	Bindemittelsorte	Bezeichnungen der EMPA
R0033	B 160/220	KVA
A97-1562	B 70/100	KVB
R0029	B 35/50	KVC
A98-2215	B 10/20	KVD
A95-2102	PmB 50/70-53 elastomermodifiziert	KVE
A96-0171	PmB 30/50-58 plastomermodifiziert	KVF

Die Anordnung der Werte entspricht generell dem zeitlichen Ablauf der Prüfung, es wurde jeweils als erstes bei der Temperatur in der linken Spalte geprüft und bei jeder Temperatur zuerst bei der Frequenz in der obersten Wertezeile.

### Ergebnisse des Bindemittels KVA:

Die komplexen Module und die Phasenverschiebungen des Bindemittels KVA sind in den Tabellen A5.1 und A5.2 zusammengestellt sowie in den Abbildungen A5.1 und A5.2 dargestellt.

Tabelle A5.1: Komplexe Module des Bindemittels KVA als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

Temperatur [°C]	15	10	5	0	-5	-10	-15
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	komplexe Module [kPa]						
0.125	174	577	1813	5295	14210	33020	73810
0.25	299	943	2810	7792	19880	43920	82410
0.5	502	1516	4286	11320	27410	58350	106900
1	834	2387	6420	16200	37220	75730	135500
2	1355	3699	9433	22750	49650	96980	165300
4	2158	5605	13690	31380	65210	122100	200700
8	3368	8363	19540	42660	84980	152200	246100

Tabelle A5.2: Phasenverschiebung des Bindemittels KVA als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

Temperatur [°C]	15	10	5	0	-5	-10	-15
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	Phasenverschiebung[°]						
0.125	69.4	64.7	59.3	52.8	46	39.1	32
0.25	68.1	63	57.1	50.4	43.4	36.6	30.3
0.5	66.3	61	54.8	48	40.9	34.3	28.1
1	64.8	58.9	52.5	45.5	38.6	32.1	25.6
2	62.8	56.7	50.2	43.1	36.4	30	23.2
4	61	54.5	47.7	40.8	34.1	28	22.7
8	58.6	52.1	45.4	38.5	32.3	27.5	22

Abbildung A5.1: Komplexe Module des Bindemittels KVA als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

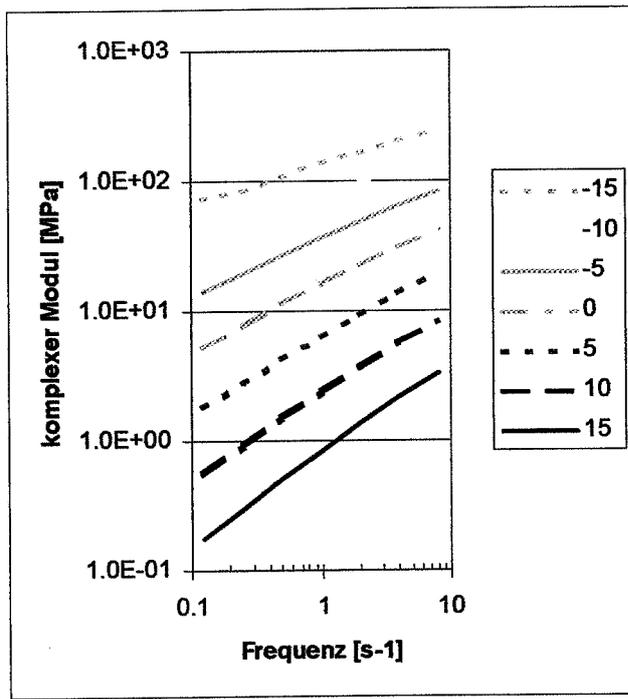
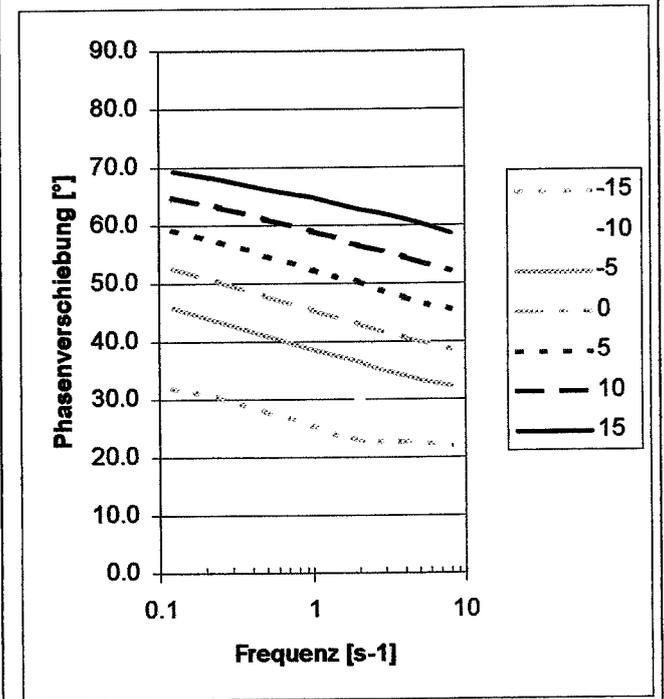


Abbildung A5.2: Phasenverschiebung des Bindemittels KVA als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen



**Ergebnisse des Bindemittels KVB:**

Die komplexen Module und die Phasenverschiebungen des Bindemittels KVB sind in den Tabellen A5.3 und A5.4 zusammengestellt sowie in den Abbildungen A5.3 und A5.4 dargestellt.

**Tabelle A5.3: Komplexe Module des Bindemittels KVB als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen**

Temperatur [°C]	15	10	5	0	-5	-10	-15
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	komplexe Module [kPa]						
0.125	938	2736	7425	20370	50080	103700	29030
0.25	1519	4267	10970	28250	64900	132900	14710
0.5	2487	6663	15900	38970	84430	156000	14500
1	3816	10100	22680	51740	105000	189300	13940
2	6200	14720	31560	67980	129500	233200	14780
4	9221	21250	40000	85500	161100	269300	14670
8	13830	29920	57780	112500	191700	289300	14400

**Tabelle A5.4: Phasenverschiebung des Bindemittels KVB als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen**

Temperatur [°C]	15	10	5	0	-5	-10	-15
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	Phasenverschiebung[°]						
0.125	67	60.1	53.1	45	36.8	30.3	21
0.25	64.5	57.5	50.3	42	34.4	29.1	20.1
0.5	62.2	54.6	47.3	39.6	31.7	26.3	18.1
1	58.6	46.6	45	36.5	30.4	21.7	16.6
2	57.3	49.1	42.4	36.1	28.3	23.2	15.5
4	52.8	46	38.2	33.5	25.7	23.8	13.8
8	50.4	43.3	36.7	30	23.9	18.8	12.8

Abbildung A5.3: Komplexe Module des Bindemittels KVB als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

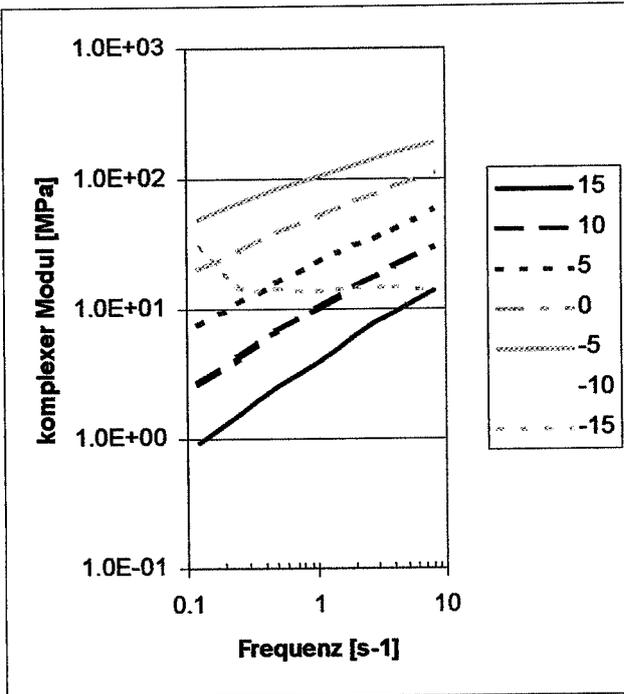
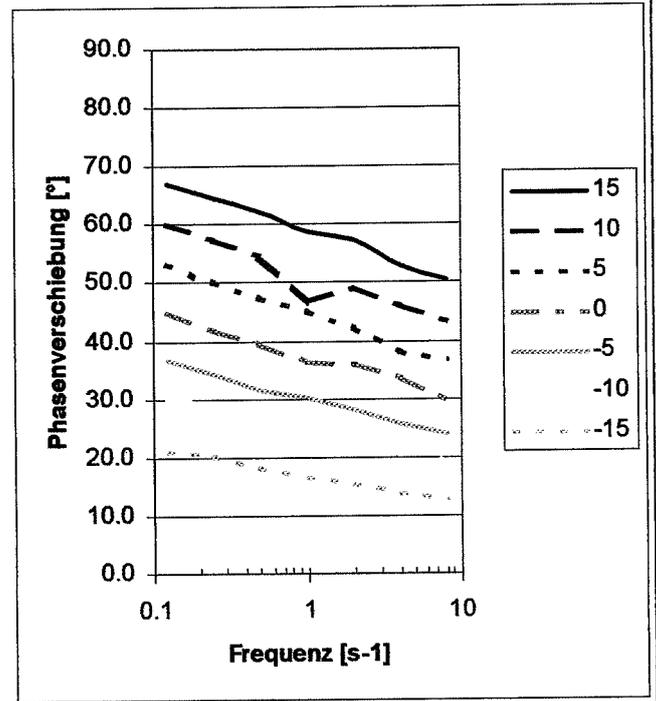


Abbildung A5.4: Phasenverschiebung des Bindemittels KVB als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen



**Ergebnisse des Bindemittels KVC:**

Die komplexen Module und die Phasenverschiebungen des Bindemittels KVC sind in den Tabellen A5.5 und A5.6 zusammengestellt sowie in den Abbildungen A5.5 und A5.6 dargestellt.

Tabelle A5.5: Komplexe Module des Bindemittels KVC als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

Temperatur [°C]	15	10	5	0	-5	-10	-15
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	komplexe Module [kPa]						
0.125	2093	4373	9151	18040	31190	26560	34760
0.25	2981	6088	12220	22970	37060	26270	35880
0.5	4236	8332	16080	28720	43770	29450	39580
1	5931	11300	21090	35540	50340	33030	43260
2	8158	15030	27150	42520	57940	36660	46380
4	11150	19930	34200	51210	62940	40960	51260
8	15050	25980	43140	60580	70060	44560	53160

Tabelle A5.6: Phasenverschiebung des Bindemittels KVC als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

Temperatur [°C]	15	10	5	0	-5	-10	-15
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	Phasenverschiebung[°]						
0.125	47.3	43.2	38.6	33.1	24.8	22.9	17.3
0.25	46.1	42.1	37.3	31.3	22.9	21.5	15.8
0.5	44.3	40.4	35.6	29.1	20.7	19.9	14.4
1	42.9	38.9	34.1	28.3	18.5	19.1	14
2	41.4	37.5	32.6	26.5	17	17.2	12.7
4	40.4	36.5	31.6	24.4	15.4	16.4	11.7
8	38.8	34.6	29.8	22.7	13.7	15.1	11.1

Abbildung A5.5: Komplexe Module des Bindemittels KVC als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

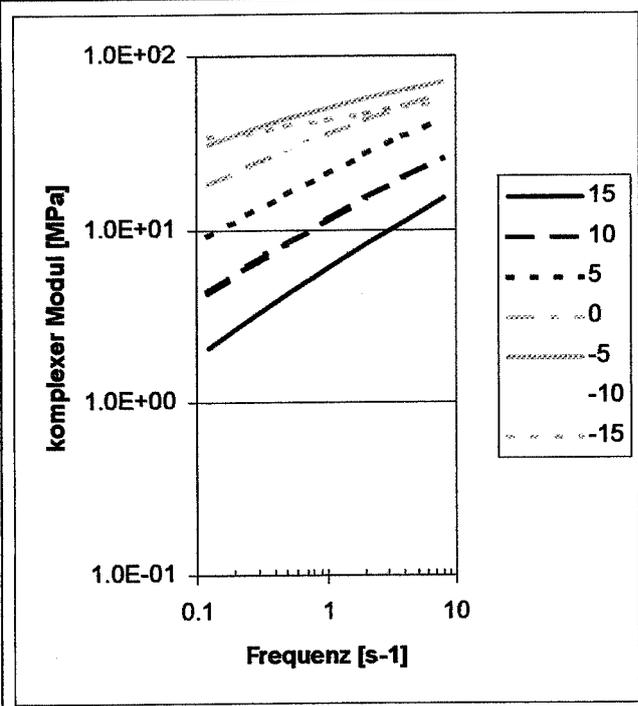
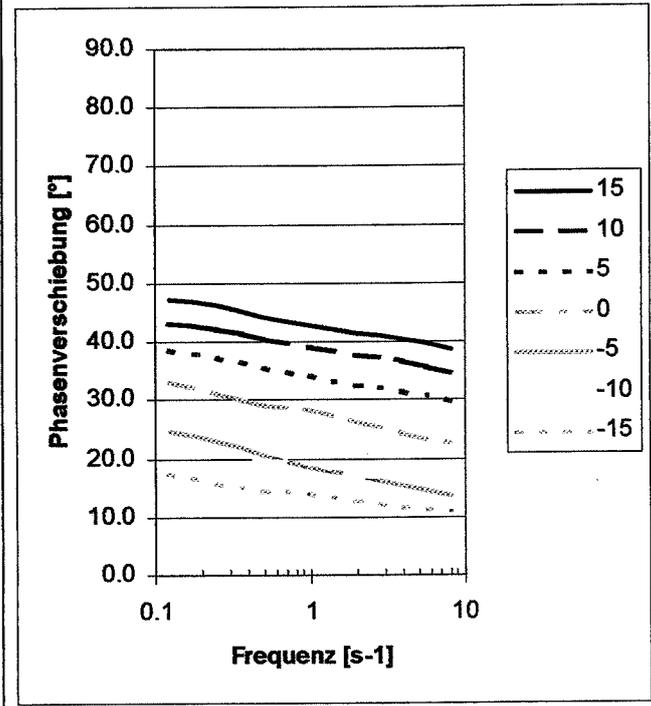


Abbildung A5.6: Phasenverschiebung des Bindemittels KVC als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen



**Ergebnisse des Bindemittels KVD:**

Die komplexen Module und die Phasenverschiebungen des Bindemittels KVD sind in den Tabellen A5.7 und A5.8 zusammengestellt sowie in den Abbildungen A5.7 und A5.8 dargestellt.

Tabelle A5.7: Komplexe Module des Bindemittels KVD als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

Temperatur [°C]	15	10	5	0	-5	-10	-15
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	komplexe Module [kPa]						
0.125	9652	18620	34510	59670	70320	101700	110500
0.25	12940	23920	42460	69850	78340	110600	107600
0.5	17090	30330	51250	81200	88100	122400	115500
1	22220	37820	61310	94360	99670	133400	125700
2	28300	46620	72430	101800	107500	138500	126000
4	35300	55300	83070	117600	115800	144800	135900
8	43440	66130	94660	128900	125700	152700	139500

Tabelle A5.8: Phasenverschiebung des Bindemittels KVD als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

Temperatur [°C]	15	10	5	0	-5	-10	-15
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	Phasenverschiebung[°]						
0.125	38.7	34.2	28.7	24.1	19.4	16.6	13.2
0.25	37.2	31.7	26.7	20.9	16.8	13.5	8.7
0.5	35.1	29.7	24.4	18.6	15.6	11.1	8.9
1	33.3	28.1	22.9	18.5	13.9	11.2	6.8
2	31	25.4	20.2	15.6	13.1	9.1	5.9
4	29.4	23.5	19.9	14.4	12.1	8.8	8.4
8	26.9	22	17.4	13.9	11.4	7.6	5.8

Abbildung A5.7: Komplexe Module des Bindemittels KVD als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

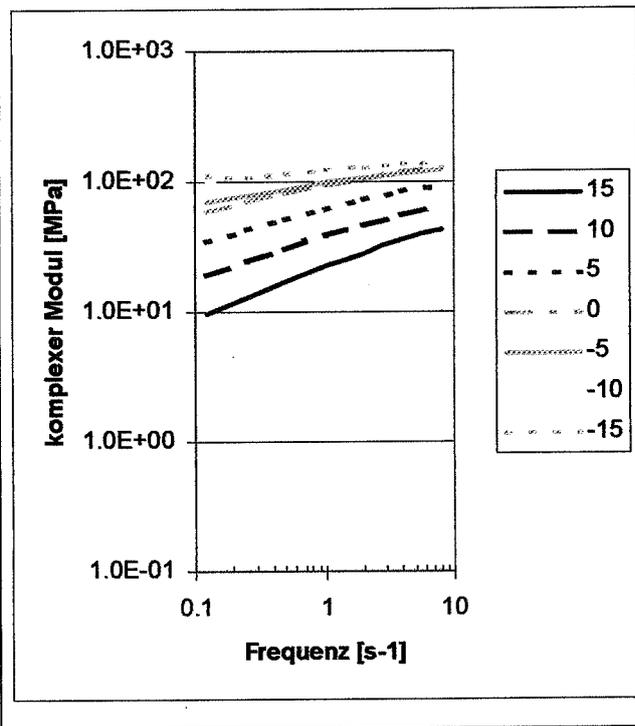
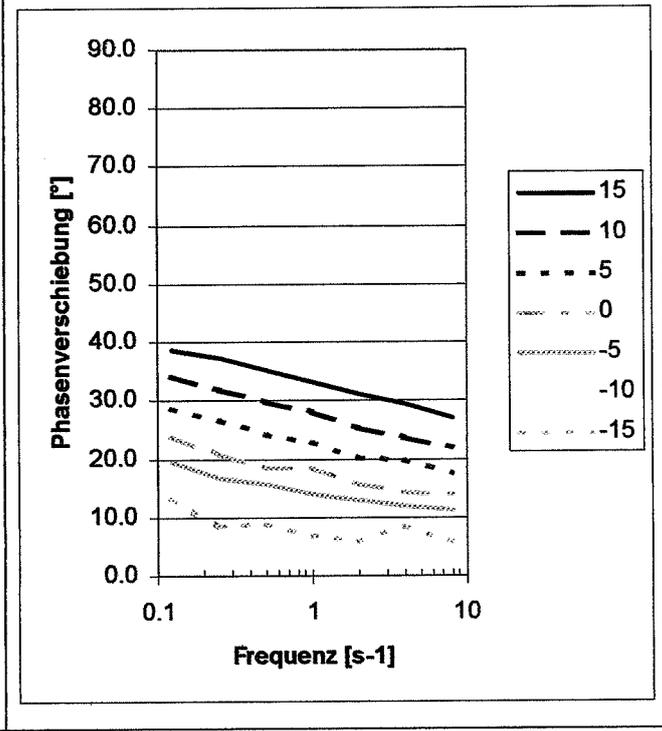


Abbildung A5.8: Phasenverschiebung des Bindemittels KVD als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen



**Ergebnisse des Bindemittels KVE:**

Die komplexen Module und die Phasenverschiebungen des Bindemittels KVE sind in den Tabellen A5.9 und A5.10 zusammengestellt sowie in den Abbildungen A5.9 und A5.10 dargestellt.

Tabelle A5.9: Komplexe Module des Bindemittels KVE als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

Temperatur [°C]	15	10	5	0	-5	-10	-15
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	komplexe Module [kPa]						
0.125	1098	3073	8284	21000	49060	63110	99060
0.25	1721	4642	11940	28460	62890	70970	111000
0.5	2704	6932	16890	37950	78670	82110	125200
1	4155	10110	23230	49720	98220	94700	140600
2	6295	14490	31440	63730	120500	109100	154900
4	9262	20310	41930	80200	144300	123200	170500
8	13430	28000	54810	99980	169700	137900	182200

Tabelle A5.10: Phasenverschiebung des Bindemittels KVE als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

Temperatur [°C]	15	10	5	0	-5	-10	-15
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	Phasenverschiebung[°]						
0.125	60.7	54.9	47.8	40.6	33.2	27.1	20.5
0.25	58.9	52.5	45.4	38.3	30.9	24.7	17.9
0.5	56.7	50.2	43.2	36	29	22.7	16.2
1	54.6	47.8	40.6	33.6	26.3	20.6	14.7
2	52	45.2	38.2	31.7	25.2	19	13.1
4	49.1	42.6	35.8	29.6	23.1	17.1	11.3
8	46.7	40.2	33.6	27.4	21	15.1	10

Abbildung A5.9: Komplexe Module des Bindemittels KVE als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

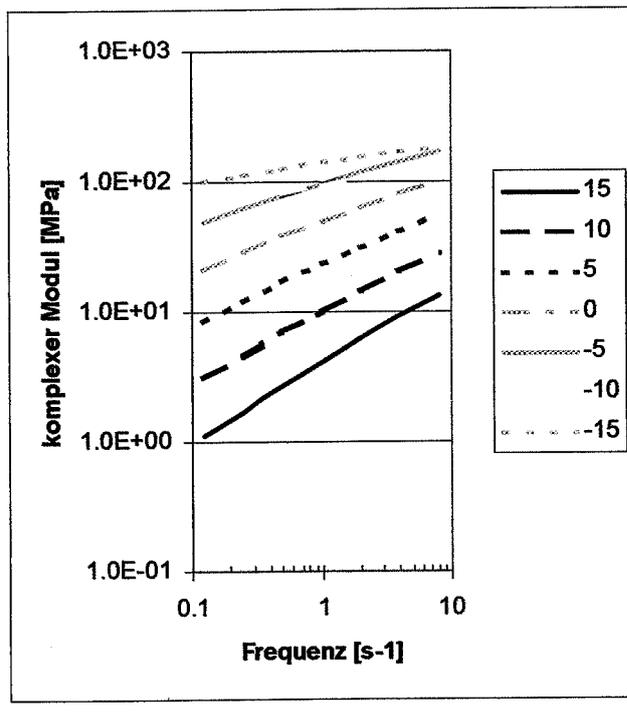
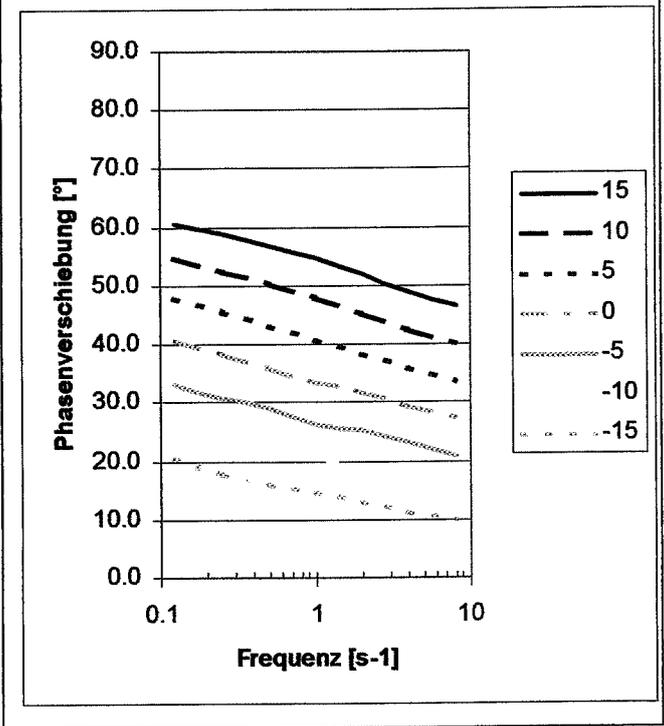


Abbildung A5.10: Phasenverschiebung des Bindemittels KVE als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen



**Ergebnisse des Bindemittels KVF:**

Die komplexen Module und die Phasenverschiebungen des Bindemittels KVF sind in den Tabellen A5.11 und A5.12 zusammengestellt sowie in den Abbildungen A5.11 und A5.12 dargestellt.

Tabelle A5.11: Komplexe Module des Bindemittels KVF als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

Temperatur [°C]	15	10	5	0	-5	-10	-15
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	komplexe Module [kPa]						
0.125	1455	2850	5767	11620	22770	44380	81450
0.25	1947	3775	7539	14890	28680	54870	98520
0.5	2653	5023	9859	19000	35930	67820	114400
1	3594	6675	12790	24100	45160	82370	140000
2	4849	8802	16570	30530	56250	99350	168100
4	6489	11490	21370	38420	70790	120400	203300
8	8688	15160	27640	48720	87750	145600	239800

Tabelle A5.12: Phasenverschiebung des Bindemittels KVF als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

Temperatur [°C]	15	10	5	0	-5	-10	-15
Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	Phasenverschiebung [°]						
0.125	67	60.1	53.1	45	36.8	30.3	21
0.25	64.5	57.5	50.3	42	34.4	29.1	20.1
0.5	62.2	54.6	47.3	39.6	31.7	26.3	18.1
1	58.6	46.6	45	36.5	30.4	21.7	16.6
2	57.3	49.1	42.4	36.1	28.3	23.2	15.5
4	52.8	46	38.2	33.5	25.7	23.8	13.8
8	50.4	43.3	36.7	30	23.9	18.8	12.8

Abbildung A5.11: Komplexe Module des Bindemittels KVF als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen

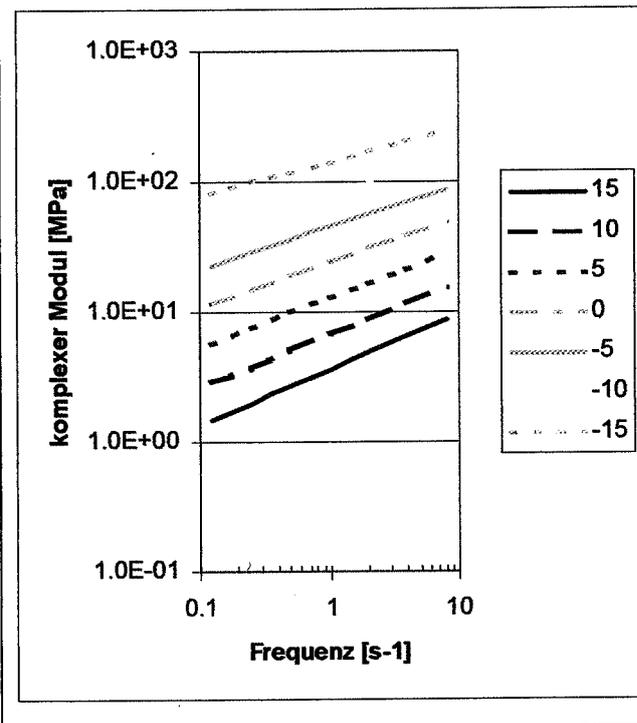
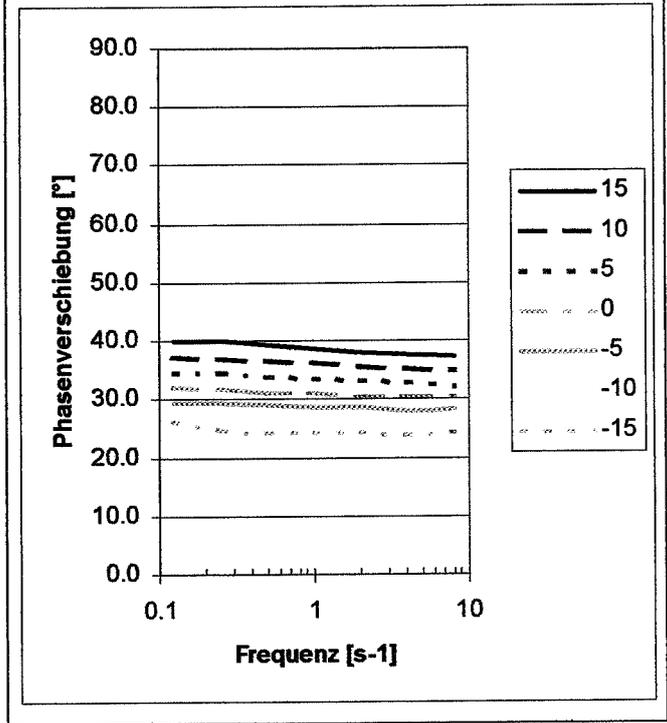


Abbildung A5.12: Phasenverschiebung des Bindemittels KVF als Funktion von Temperatur und Frequenz, KAST-Messungen



## ANHANG 6: Vergleich der Modulwerte

Die EMPA verwendete intern ein firmeneigenes System der Bezeichnung der untersuchten Bindemittel. Die untenstehende Tabelle stellt deshalb die Bezeichnungen EMPA und IMP einander gegenüber. Die Kennzahlen ( Penetration, EP, RuK etc.) der einzelnen untersuchten Bindemittel können dem Anhang 1 entnommen werden.

Bezeichnungen IMP	Bindemittelsorte
R0033	B 160/220
A97-1562	B 70/100
R0029	B 35/50
A98-2215	B 10/20
A95-2102	PmB 50/70-53 elastomermodifiziert
A96-0171	PmB 30/50-58 plastomermodifiziert

Tabelle A6.1: Vergleich der komplexen Module des Bindemittels KVA, bestimmt in unterschiedlichen Prüfungen bei jeweils gleichen Temperaturen und Frequenzen.

Temperatur [°C]	Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	DSR [kPa]	KAST, Module [kPa]	Abkühlverhalten [kPa]
15	0.5	419	502	
15	1	704	834	
15	2	1156	1355	1104
10	0.5	1192	1516	
10	1	1909	2387	
10	2	2980	3699	2432

Tabelle A6.2: Vergleich der komplexen Module des Bindemittels KVB, bestimmt in unterschiedlichen Prüfungen bei jeweils gleichen Temperaturen und Frequenzen.

Temperatur [°C]	Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	DSR [kPa]	KAST, Module [kPa]	Abkühlverhalten [kPa]
15	0.5	3861	2487	
15	1	5795	3816	
15	2	8450	6200	6396
10	0.5	9243	4267	
10	1	13014	6663	
10	2	17845	10100	15206

Tabelle A6.3: Vergleich der komplexen Module des Bindemittels KVC, bestimmt in unterschiedlichen Prüfungen bei jeweils gleichen Temperaturen und Frequenzen.

Temperatur [°C]	Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	DSR [kPa]	KAST, Module [kPa]	Abkühlverhalten [kPa]
15	0.5	4750	4236	
15	1	6530	5931	
15	2	8810	8158	7286
10	0.5	9450	8332	
10	1	12600	11300	
10	2	16500	15030	11849

Tabelle A6.4: Vergleich der komplexen Module des Bindemittels KVD, bestimmt in unterschiedlichen Prüfungen bei jeweils gleichen Temperaturen und Frequenzen.

Temperatur [°C]	Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	DSR [kPa]	KAST, Module [kPa]	Abkühlverhalten [kPa]
15	0.5	17016	17090	
15	1	22271	22220	
15	2	29054	28300	26769
10	0.5	32639	30330	
10	1	41351	37820	
10	2	51453	46620	39390

Tabelle A6.5: Vergleich der komplexen Module des Bindemittels KVE, bestimmt in unterschiedlichen Prüfungen bei jeweils gleichen Temperaturen und Frequenzen.

Temperatur [°C]	Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	DSR [kPa]	KAST, Module [kPa]	Abkühlverhalten [kPa]
15	0.5	2340	2704	
15	1	3627	4155	
15	2	5438	6295	5899
10	0.5	6044	6932	
10	1	8703	10110	
10	2	12410	14490	11795

Tabelle A6.6: Vergleich der komplexen Module des Bindemittels KVF, bestimmt in unterschiedlichen Prüfungen bei jeweils gleichen Temperaturen und Frequenzen.

Temperatur [°C]	Frequenz [s <sup>-1</sup> ]	DSR [kPa]	KAST, Module [kPa]	Abkühlverhalten [kPa]
15	0.5	3991	2653	
15	1	5209	3594	
15	2	6733	4849	4876
10	0.5	7291	5023	
10	1	9299	6675	
10	2	11773	8802	8706

**ANHANG 7: Ergebnisse des direkten Zugversuches**

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1} \text{N.mm}^{-2}$ ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1} \text{N.mm}^{-2}$ ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]	
Practiplast M40	1	-10.0	100	3.21	39.9	0.3	9.0	70.1	
	2	-10.0	100	3.24	36.7	0.3	10.4	70.1	
	3	-10.0	100	3.13	36.1	0.3	10.4	64.2	
	4	-10.0	100	3.38	38.2	0.3	10.4	58.2	
	5	-10.0	100	3.17	36.0	0.3	11.9	73.1	
	<b>Moyenne</b>	<b>-10.0</b>	<b>100</b>	<b>3.23</b>	<b>37.4</b>	<b>0.3</b>	<b>10.4</b>	<b>67.2</b>	
<b>Ecart-type</b>				<b>1.7</b>	<b>0.0</b>	<b>1.1</b>	<b>6.0</b>		
	1	-10.0	10	3.25	18.8	0.3	16.4	68.7	
	2	-10.0	10	3.25	19.1	0.3	23.9	110.4	
	3	-10.0	10	3.28	19.2	0.3	14.9	88.1	
	4	-10.0	10	3.22	18.0	0.3	22.4	97.0	
	5	-10.0	10	3.20	17.2	0.3	20.9	113.4	
<b>Moyenne</b>	<b>-10</b>	<b>10</b>	<b>3.24</b>	<b>18.5</b>	<b>0.3</b>	<b>19.7</b>	<b>95.5</b>		
<b>Ecart-type</b>				<b>0.8</b>	<b>0.0</b>	<b>3.9</b>	<b>18.2</b>		

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]
Practiplast M40	1	0.0	100	3.37	14.5	0.3	16.4	80.6
	2	0.0	100	3.26	13.5	0.3	14.9	120.9
	3	0.0	100	3.32	12.3	0.3	19.4	85.1
	4	0.0	100	3.15	12.7	0.3	17.9	77.6
	5	0.0	100	3.30	12.7	0.3	16.4	91.0
	<b>Moyenne</b>	<b>0.0</b>	<b>100</b>	<b>3.28</b>	<b>13.2</b>	<b>0.3</b>	<b>17.0</b>	<b>91.0</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>0.9</b>	<b>0.0</b>	<b>1.7</b>	<b>17.4</b>
Practiplast M40	1	0.0	10	3.63	5.8	0.3	23.9	156.7
	2	0.0	10	3.70	6.8	0.3	26.9	171.6
	3	0.0	10	3.50	6.0	0.3	23.9	146.3
	4	0.0	10	3.40	6.2	0.3	22.4	141.8
	5	0.0	10	3.63	6.6	0.3	19.4	170.1
	<b>Moyenne</b>	<b>0.0</b>	<b>10</b>	<b>3.57</b>	<b>6.3</b>	<b>0.3</b>	<b>23.3</b>	<b>157.3</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>0.4</b>	<b>0.0</b>	<b>2.7</b>	<b>13.5</b>

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]
Practiplast M40	1	5.0	100	3.51	8.5	0.3	19.4	122.4
	2	5.0	100	3.40	7.4	0.3	17.9	117.9
	3	5.0	100	3.40	7.6	0.3	19.4	125.4
	4	5.0	100	3.34	7.5	0.3	17.9	103.0
	5	5.0	100	3.35	7.5	0.3	19.4	143.3
	<b>Moyenne</b>	<b>5.0</b>	<b>100</b>	<b>3.40</b>	<b>7.7</b>	<b>0.3</b>	<b>18.8</b>	<b>122.4</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>0.5</b>	<b>0.0</b>	<b>0.8</b>	<b>14.5</b>
Practiplast M40	1	5.0	10	3.29	3.6	0.3	22.4	200.0
	2	5.0	10	3.35	3.3	0.3	23.9	164.2
	3	5.0	10	3.28	3.7	0.3	29.9	216.4
	4	5.0	10	3.32	3.3	0.3	29.9	204.5
	5	5.0	10	3.30	3.3	0.3	29.9	182.1
	<b>Moyenne</b>	<b>5.0</b>	<b>10</b>	<b>3.31</b>	<b>3.4</b>	<b>0.3</b>	<b>27.2</b>	<b>193.4</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>0.2</b>	<b>0.0</b>	<b>3.7</b>	<b>20.5</b>

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]
BMP SBS	1	-10.0	100	3.43	-	57.7	-	4.6
	2	-10.0	100	3.50	-	58.0	-	4.9
	3	-10.0	100	3.48	-	56.0	-	4.6
	4	-10.0	100	3.42	-	57.0	-	4.0
	5	-10.0	100	3.43	-	54.5	-	4.5
	<b>Moyenne</b>	<b>-10.0</b>	<b>100</b>	<b>3.45</b>	<b>-</b>	<b>56.7</b>	<b>-</b>	<b>4.5</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>-</b>	<b>1.4</b>	<b>-</b>	<b>0.3</b>
BMP SBS	1	-10.0	10	3.06	38.2	33.7	16.7	26.9
	2	-10.0	10	3.19	34.8	34.2	16.1	27.5
	3	-10.0	10	3.38	36.4	33.4	15.5	30.4
	4	-10.0	10	3.22	39.4	37.0	14.9	29.3
	5	-10.0	10	3.39	38.3	38.3	14.9	19.7
	<b>Moyenne</b>	<b>-10</b>	<b>10</b>	<b>3.25</b>	<b>37.4</b>	<b>35.3</b>	<b>15.6</b>	<b>26.7</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>1.8</b>	<b>2.2</b>	<b>0.8</b>	<b>4.2</b>

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]
BMP SBS	1	-5.0	100	3.43	37.6	17.2	7.9	587.3
	2	-5.0	100	3.47	38.3	17.3	7.9	587.3
	3	-5.0	100	3.49	41.5	18.6	7.9	587.3
	4	-5.0	100	3.54	40.4	17.8	6.3	587.3
	5	-5.0	100	3.47	36.6	17.0	6.3	587.3
	<b>Moyenne</b>	<b>-5.0</b>	<b>100</b>	<b>3.48</b>	<b>38.9</b>	<b>17.6</b>	<b>7.3</b>	<b>587.3</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>2.0</b>	<b>0.7</b>	<b>0.9</b>	<b>0.0</b>
BMP SBS	1	-5.0	10	3.39	17.4	9.1	15.9	587.3
	2	-5.0	10	3.30	18.5	9.4	15.9	587.3
	3	-5.0	10	3.34	19.5	9.3	15.9	587.3
	4	-5.0	10	3.23	19.5	9.3	19.0	587.3
	5	-5.0	10	3.42	19.6	9.4	12.7	587.3
	<b>Moyenne</b>	<b>-5.0</b>	<b>10</b>	<b>3.34</b>	<b>18.9</b>	<b>9.3</b>	<b>15.9</b>	<b>587.3</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>0.9</b>	<b>0.1</b>	<b>2.2</b>	<b>0.0</b>

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]	
BMP SBS	1	0.0	100	3.28	20.1	9.8	9.5	587.3	
	2	0.0	100	3.30	21.5	10.3	11.1	587.3	
	3	0.0	100	3.09	25.6	11.0	7.9	587.3	
	4	0.0	100	3.22	22.4	10.6	9.5	587.3	
	5	0.0	100	3.12	23.1	10.9	9.5	587.3	
	<b>Moyenne</b>	<b>0.0</b>	<b>100</b>	<b>3.20</b>	<b>22.5</b>	<b>10.5</b>	<b>9.5</b>	<b>587.3</b>	
<b>Ecart-type</b>				<b>2.0</b>	<b>0.5</b>	<b>1.1</b>	<b>0.0</b>		
BMP SBS	1	0.0	10	3.00	9.0	4.3	15.9	587.3	
	2	0.0	10	3.02	9.6	4.3	20.6	587.3	
	3	0.0	10	3.29	8.2	4.3	20.6	587.3	
	4	0.0	10	3.39	8.8	4.7	14.3	587.3	
	5	0.0	10	3.38	9.5	4.7	23.8	587.3	
	<b>Moyenne</b>	<b>0.0</b>	<b>10</b>	<b>3.22</b>	<b>9.0</b>	<b>4.5</b>	<b>19.0</b>	<b>587.3</b>	
<b>Ecart-type</b>				<b>0.6</b>	<b>0.2</b>	<b>3.9</b>	<b>0.0</b>		

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]	
BMP SBS	1	5.0	100	3.30	8.8	4.5	15.9	587.3	
	2	5.0	100	3.35	8.4	4.5	15.9	587.3	
	3	5.0	100	3.28	9.1	4.9	15.9	587.3	
	4	5.0	100	3.35	8.7	5.1	17.5	587.3	
	5	5.0	100	3.32	9.3	5.4	15.9	587.3	
	<b>Moyenne</b>	<b>5.0</b>	<b>100</b>	<b>3.32</b>	<b>8.9</b>	<b>4.9</b>	<b>16.2</b>	<b>587.3</b>	
	<b>Ecart-type</b>				<b>0.4</b>	<b>0.4</b>	<b>0.7</b>	<b>0.0</b>	
BMP SBS	1	5.0	10	3.18	3.8	2.5	17.9	588.1	
	2	5.0	10	3.12	4.2	2.6	17.9	588.1	
	3	5.0	10	2.93	3.8	2.0	17.9	588.1	
	4	5.0	10	2.92	3.8	2.4	17.9	588.1	
	5	5.0	10	3.15	3.5	2.2	17.9	588.1	
	<b>Moyenne</b>	<b>5.0</b>	<b>10</b>	<b>3.06</b>	<b>3.8</b>	<b>2.3</b>	<b>17.9</b>	<b>588.1</b>	
<b>Ecart-type</b>				<b>0.2</b>	<b>0.2</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>		

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]
B 180/220	1	-10.0	100	3.26	28.5	0.3	10.1	57.9
	2	-10.0	100	3.52	28.1	0.3	10.1	76.4
	3	-10.0	100	3.42	29.5	0.3	10.1	59.7
	4	-10.0	100	3.45	28.1	0.3	10.1	69.3
	5	-10.0	100	3.24	28.1	0.3	11.9	49.0
	<b>Moyenne</b>	<b>-10.0</b>	<b>100</b>	<b>3.38</b>	<b>28.48</b>	<b>0.3</b>	<b>10.5</b>	<b>62.4</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>0.6</b>	<b>0.0</b>	<b>0.8</b>	<b>10.6</b>
B 180/220	1	-10.0	10	3.18	12.3	0.3	23.9	119.4
	2	-10.0	10	3.06	11.8	0.3	29.9	151.0
	3	-10.0	10	3.12	14.1	0.3	23.9	124.2
	4	-10.0	10	3.00	14.3	0.3	23.9	136.1
	5	-10.0	10	3.16	13.3	0.3	23.9	132.5
	<b>Moyenne</b>	<b>-10</b>	<b>10</b>	<b>3.10</b>	<b>13.2</b>	<b>0.3</b>	<b>25.1</b>	<b>132.7</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>1.1</b>	<b>0.0</b>	<b>2.7</b>	<b>12.2</b>

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]
B 180/220	1	-5.0	100	3.37	13.9	0.3	14.9	87.8
	2	-5.0	100	3.38	15.7	0.3	12.5	87.8
	3	-5.0	100	3.37	15.7	0.3	13.1	98.5
	4	-5.0	100	3.39	13.9	0.3	14.9	100.3
	5	-5.0	100	3.32	16.6	0.3	14.3	99.7
	<b>Moyenne</b>	<b>-5.0</b>	<b>100</b>	<b>3.37</b>	<b>15.2</b>	<b>0.3</b>	<b>14.0</b>	<b>94.8</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>1.2</b>	<b>0.0</b>	<b>1.1</b>	<b>6.5</b>
B 180/220	1	-5.0	10	3.44	5.5	0.3	20.9	265.7
	2	-5.0	10	3.42	5.8	0.3	29.9	303.0
	3	-5.0	10	3.39	5.9	0.3	22.4	271.6
	4	-5.0	10	3.42	6.1	0.3	29.9	304.5
	5	-5.0	10	3.32	6.0	0.3	22.4	300.0
	<b>Moyenne</b>	<b>-5.0</b>	<b>10</b>	<b>3.40</b>	<b>5.9</b>	<b>0.3</b>	<b>25.1</b>	<b>289.0</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>0.2</b>	<b>0.0</b>	<b>4.4</b>	<b>18.7</b>

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]	
B 180/220	1	0.0	100	3.02	5.6	0.3	16.4	313.4	
	2	0.0	100	2.90	5.2	0.3	16.4	320.9	
	3	0.0	100	3.32	6.3	0.3	16.4	306.0	
	4	0.0	100	3.02	5.0	0.3	14.9	332.8	
	5	0.0	100	3.22	6.2	0.3	14.9	295.5	
	<b>Moyenne</b>	<b>0.0</b>	<b>100</b>	<b>3.10</b>	<b>5.7</b>	<b>0.3</b>	<b>15.8</b>	<b>313.7</b>	
<b>Ecart-type</b>				<b>0.6</b>	<b>0.0</b>	<b>0.8</b>	<b>14.2</b>		
B 180/220	1	0.0	10	3.27	2.1	0.1	26.9	588.1	
	2	0.0	10	3.50	2.3	0.1	23.9	588.1	
	3	0.0	10	3.17	1.7	0.1	22.4	588.1	
	4	0.0	10	3.20	1.6	0.1	17.9	588.1	
	5	0.0	10	3.19	1.9	0.1	25.4	588.1	
	<b>Moyenne</b>	<b>0.0</b>	<b>10</b>	<b>3.27</b>	<b>1.9</b>	<b>0.1</b>	<b>23.3</b>	<b>588.1</b>	
<b>Ecart-type</b>				<b>0.3</b>	<b>0.0</b>	<b>3.4</b>	<b>0.0</b>		

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]	
B 180/220	1	5.0	100	2.98	2.3	0.1	14.9	588.1	
	2	5.0	100	2.94	2.2	0.1	14.9	588.1	
	3	5.0	100	2.97	2.3	0.1	17.9	588.1	
	4	5.0	100	2.96	2.3	0.1	20.9	588.1	
	5	5.0	100	3.00	2.3	0.1	17.9	588.1	
	<b>Moyenne</b>	<b>5.0</b>	<b>100</b>	<b>2.97</b>	<b>2.3</b>	<b>0.1</b>	<b>17.3</b>	<b>588.1</b>	
<b>Ecart-type</b>				<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>2.5</b>	<b>0.0</b>		
B 180/220	1	5.0	10	3.09	0.5	0.1	26.9	588.1	
	2	5.0	10	3.23	0.4	0.1	23.9	588.1	
	3	5.0	10	3.30	0.5	0.1	23.9	588.1	
	4	5.0	10	3.50	0.6	0.1	20.9	588.1	
	5	5.0	10	3.02	0.4	0.1	26.9	588.1	
	<b>Moyenne</b>	<b>5.0</b>	<b>10</b>	<b>3.23</b>	<b>0.5</b>	<b>0.1</b>	<b>24.5</b>	<b>588.1</b>	
<b>Ecart-type</b>				<b>0.1</b>	<b>0.0</b>	<b>2.5</b>	<b>0.0</b>		

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]	
B 70/100	1	-10.0	100						
	2	-10.0	100						
	3	-10.0	100	Essai non réalisable, rupture instantanée					
	4	-10.0	100						
	5	-10.0	100						
	<b>Moyenne</b>	<b>-10.0</b>							
	<b>Ecart-type</b>								
B 70/100	1	-10.0	10	3.17	32.8	0.3	13.4	63.3	
	2	-10.0	10	3.06	51.3	0.3	17.9	93.7	
	3	-10.0	10	3.26	30.4	0.3	27.5	76.4	
	4	-10.0	10	3.23	27.9	0.3	29.9	100.3	
	5	-10.0	10	3.25	29.2	0.3	20.9	70.4	
	<b>Moyenne</b>	<b>-10</b>	<b>10</b>	<b>3.19</b>	<b>34.3</b>	<b>0.3</b>	<b>21.9</b>	<b>80.8</b>	
	<b>Ecart-type</b>				<b>9.7</b>	<b>0.0</b>	<b>6.8</b>	<b>15.7</b>	

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]
B 70/100	1	-5.0	100	3.19	39.2	0.3	8.4	62.1
	2	-5.0	100	3.22	38.8	0.3	7.8	66.9
	3	-5.0	100	3.28	36.3	0.3	11.9	54.9
	4	-5.0	100	3.18	38.1	0.3	9.6	65.1
	5	-5.0	100	3.27	40.7	0.3	7.8	72.2
	<b>Moyenne</b>	<b>-5.0</b>	<b>100</b>	<b>3.23</b>	<b>38.6</b>	<b>0.3</b>	<b>9.1</b>	<b>64.2</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>1.6</b>	<b>0.0</b>	<b>1.8</b>	<b>6.4</b>
B 70/100	1	-5.0	10	3.44	16.3	0.3	23.9	241.8
	2	-5.0	10	3.52	17.6	0.3	25.4	161.2
	3	-5.0	10	3.46	17.3	0.3	23.9	152.2
	4	-5.0	10	3.48	17.8	0.3	26.9	134.3
	5	-5.0	10	3.42	18.7	0.3	23.9	119.4
	<b>Moyenne</b>	<b>-5.0</b>	<b>10</b>	<b>3.46</b>	<b>17.6</b>	<b>0.3</b>	<b>24.8</b>	<b>161.8</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>0.9</b>	<b>0.0</b>	<b>1.3</b>	<b>47.5</b>

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]	
B 70/100	1	0.0	100	3.50	22.9	0.3	9.0	98.5	
	2	0.0	100	3.40	20.3	0.3	9.0	83.6	
	3	0.0	100	3.43	20.4	0.3	9.0	83.6	
	4	0.0	100	3.44	21.2	0.3	14.9	95.5	
	5	0.0	100	3.46	20.2	0.3	11.9	110.4	
	<b>Moyenne</b>	<b>0.0</b>	<b>100</b>	<b>3.45</b>	<b>21.0</b>	<b>0.3</b>	<b>10.7</b>	<b>94.3</b>	
<b>Ecart-type</b>				<b>1.1</b>	<b>0.0</b>	<b>2.7</b>	<b>11.3</b>		
B 70/100	1	0.0	10	3.63	6.6	0.3	17.9	307.5	
	2	0.0	10	3.52	7.1	0.3	20.9	361.2	
	3	0.0	10	3.51	6.3	0.3	20.9	349.3	
	4	0.0	10	3.60	6.9	0.3	26.9	271.6	
	5	0.0	10	3.61	7.2	0.3	20.9	301.5	
	<b>Moyenne</b>	<b>0.0</b>	<b>10</b>	<b>3.57</b>	<b>6.8</b>	<b>0.3</b>	<b>21.5</b>	<b>318.2</b>	
<b>Ecart-type</b>				<b>0.4</b>	<b>0.0</b>	<b>3.3</b>	<b>36.7</b>		

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]	
B 70/100	1	5.0	100	3.46	10.1	0.3	14.9	146.3	
	2	5.0	100	3.33	10.2	0.3	14.9	119.4	
	3	5.0	100	3.34	9.6	0.3	17.9	176.1	
	4	5.0	100	3.31	9.7	0.3	14.9	158.2	
	5	5.0	100	3.43	8.2	0.3	17.9	158.2	
	<b>Moyenne</b>	<b>5.0</b>	<b>100</b>	<b>3.37</b>	<b>9.5</b>	<b>0.3</b>	<b>16.1</b>	<b>151.6</b>	
<b>Ecart-type</b>				<b>0.8</b>	<b>0.0</b>	<b>1.6</b>	<b>20.9</b>		
B 70/100	1	5.0	10	3.27	2.4	0.3	23.9	588.1	
	2	5.0	10	3.16	2.5	0.3	23.9	588.1	
	3	5.0	10	3.31	2.6	0.3	29.9	588.1	
	4	5.0	10	3.36	2.7	0.3	29.9	588.1	
	5	5.0	10	3.53	2.4	0.3	29.9	588.1	
	<b>Moyenne</b>	<b>5.0</b>	<b>10</b>	<b>3.33</b>	<b>2.5</b>	<b>0.3</b>	<b>27.5</b>	<b>588.1</b>	
<b>Ecart-type</b>				<b>0.1</b>	<b>0.0</b>	<b>3.3</b>	<b>0.0</b>		

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]
B 40-50	1	-10.0	100					
	2	-10.0	100					
	3	-10.0	100	Essai non réalisable, rupture instantanée				
	4	-10.0	100					
	5	-10.0	100					
	<b>Moyenne</b>	<b>-10.0</b>						
<b>Ecart-type</b>								
B 40-50	1	-10.0	10	3.11		36.0		9.1
	2	-10.0	10	3.22		33.9		10.3
	3	-10.0	10	3.24		32.7		9.7
	4	-10.0	10	3.32		35.2		9.3
	5	-10.0	10	3.28		32.0		11.6
	<b>Moyenne</b>	<b>-10</b>	<b>10</b>	<b>3.23</b>		<b>34.0</b>		<b>10.0</b>
<b>Ecart-type</b>					<b>1.7</b>		<b>1.0</b>	

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]
B 40-50	1	-5.0	100					
	2	-5.0	100					
	3	-5.0	100	Essai non réalisable, rupture instantanée				
	4	-5.0	100					
	5	-5.0	100					
	<b>Moyenne</b>	<b>-5.0</b>	<b>100</b>					
<b>Ecart-type</b>								
B 40-50	1	-5.0	10	3.32		18.4		26.3
	2	-5.0	10	3.36		18.8		23.9
	3	-5.0	10	3.15		19.4		29.9
	4	-5.0	10	3.23		21.7		20.9
	5	-5.0	10	3.26		22.1		23.3
	<b>Moyenne</b>	<b>-5.0</b>	<b>10</b>	<b>3.26</b>		<b>20.0</b>		<b>24.8</b>
<b>Ecart-type</b>					<b>1.7</b>		<b>3.4</b>	

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]	
B 40-50	1	0.0	100						
	2	0.0	100						
	3	0.0	100	Essai non réalisable, rupture instantanée					
	4	0.0	100						
	5	0.0	100						
		<b>Moyenne</b>	<b>0.0</b>	<b>100</b>					
	<b>Ecart-type</b>								
B 40-50	1	0.0	10	3.39	12.1	0.3	25.1	79.4	
	2	0.0	10	3.51	11.4	0.3	23.9	80.6	
	3	0.0	10	3.32	12.3	0.3	23.9	68.7	
	4	0.0	10	3.45	12.5	0.3	20.9	71.6	
	5	0.0	10	3.43	12.2	0.3	23.9	67.5	
		<b>Moyenne</b>	<b>0.0</b>	<b>10</b>	<b>3.42</b>	<b>12.1</b>	<b>0.3</b>	<b>23.5</b>	<b>73.6</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>0.4</b>	<b>0.0</b>	<b>1.6</b>	<b>6.1</b>	

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]	
B 40-50	1	5.0	100	2.96	13.9	0.3	18.0	125.1	
	2	5.0	100	3.02	13.2	0.3	21.0	93.4	
	3	5.0	100	2.98	12.8	0.3	21.0	119.8	
	4	5.0	100	2.96	14.2	0.3	18.0	82.6	
	5	5.0	100	2.97	13.5	0.3	18.0	88.0	
		<b>Moyenne</b>	<b>5.0</b>	<b>100</b>	<b>2.98</b>	<b>13.5</b>	<b>0.3</b>	<b>19.2</b>	<b>101.8</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>0.6</b>	<b>0.0</b>	<b>1.6</b>	<b>19.3</b>	
B 40-50	1	5.0	10	3.02	5.6	0.3	23.9	209.0	
	2	5.0	10	3.06	5.9	0.3	20.9	194.0	
	3	5.0	10	2.98	5.7	0.3	20.9	191.0	
	4	5.0	10	3.24	6.8	0.3	17.9	253.7	
	5	5.0	10	3.20	6.3	0.3	17.9	188.1	
		<b>Moyenne</b>	<b>5.0</b>	<b>10</b>	<b>3.10</b>	<b>6.1</b>	<b>0.3</b>	<b>20.3</b>	<b>207.2</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>0.5</b>	<b>0.0</b>	<b>2.5</b>	<b>27.2</b>	

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]	
BP Structur	1	-10.0	100						
	2	-10.0	100						
	3	-10.0	100	Essai non réalisable, rupture instantanée					
	4	-10.0	100						
	5	-10.0	100						
	<b>Moyenne</b>	<b>-10.0</b>							
<b>Ecart-type</b>									
BP Structur	1	-10.0	10	3.60		34.7		1.0	
	2	-10.0	10	3.55		31.0		0.9	
	3	-10.0	10	3.42		31.6		1.0	
	4	-10.0	10	3.45		43.8		1.3	
	5	-10.0	10	3.42		28.7		0.7	
	<b>Moyenne</b>	<b>-10</b>	<b>10</b>	<b>3.49</b>		<b>33.9</b>		<b>1.0</b>	
<b>Ecart-type</b>					<b>5.9</b>		<b>0.2</b>		

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]	
BP Structur	1	-5.0	100						
	2	-5.0	100						
	3	-5.0	100	Essai non réalisable, rupture instantanée					
	4	-5.0	100						
	5	-5.0	100						
	<b>Moyenne</b>	<b>-5.0</b>	<b>100</b>						
<b>Ecart-type</b>									
BP Structur	1	-5.0	10	3.25		45.8		3.4	
	2	-5.0	10	3.02		46.7		3.0	
	3	-5.0	10	3.12		53.5		5.4	
	4	-5.0	10	3.00		47.7		4.9	
	5	-5.0	10	3.07		49.5		6.3	
	<b>Moyenne</b>	<b>-5.0</b>	<b>10</b>	<b>3.09</b>		<b>48.6</b>		<b>4.6</b>	
<b>Ecart-type</b>					<b>3.0</b>		<b>1.4</b>		

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]	
BP Structur	1	0.0	100						
	2	0.0	100						
	3	0.0	100	Essai non réalisable, rupture instantanée					
	4	0.0	100						
	5	0.0	100						
	<b>Moyenne</b>	<b>0.0</b>	<b>100</b>						
	<b>Ecart-type</b>								
BP Structur	1	0.0	10	2.88		33.0		11.2	
	2	0.0	10	2.96		32.1		8.7	
	3	0.0	10	3.02		33.8		10.9	
	4	0.0	10	3.20		34.4		11.0	
	5	0.0	10	3.17		33.1		13.4	
	<b>Moyenne</b>	<b>0.0</b>	<b>10</b>	<b>3.05</b>		<b>33.3</b>		<b>11.0</b>	
	<b>Ecart-type</b>					<b>0.9</b>		<b>1.7</b>	

Type de liant	N° d'éprouvette	Température [°C]	Vitesse d'étirement [mm/min]	Epaisseur de l'éprouvette [mm]	Contrainte au seuil d'écoulement [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Contrainte à la rupture [ $10^{-1}$ N.mm <sup>-2</sup> ]	Allongement au seuil d'écoulement [%]	Allongement à la rupture [%]
BP Structur	1	5.0	100	3.40	40.6	27.1	9.0	61.5
	2	5.0	100	3.42	38.3	33.9	9.0	47.8
	3	5.0	100	3.47	38.9	30.3	9.0	48.4
	4	5.0	100	3.52	37.8	26.4	11.9	51.9
	5	5.0	100	3.61	36.6	28.3	10.1	46.0
	<b>Moyenne</b>	<b>5.0</b>	<b>100</b>	<b>3.48</b>	<b>38.4</b>	<b>29.2</b>	<b>9.8</b>	<b>51.1</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>1.5</b>	<b>3.0</b>	<b>1.3</b>	<b>6.2</b>
BP Structur	1	5.0	10	3.69	20.9	18.2	17.9	33.4
	2	5.0	10	3.66	20.5	20.2	17.9	20.9
	3	5.0	10	3.67	20.4	20.2	17.3	20.9
	4	5.0	10	3.62	20.4	20.2	16.7	21.5
	5	5.0	10	3.68	19.0	20.7	17.9	31.0
	<b>Moyenne</b>	<b>5.0</b>	<b>10</b>	<b>3.66</b>	<b>20.3</b>	<b>19.9</b>	<b>17.6</b>	<b>25.6</b>
	<b>Ecart-type</b>				<b>0.7</b>	<b>1.0</b>	<b>0.5</b>	<b>6.2</b>

## ANHANG 8: Vergleiche der Prüfmethode

Abbildung A8.1

Diagramm  $T_{s=300}$  / Penetration

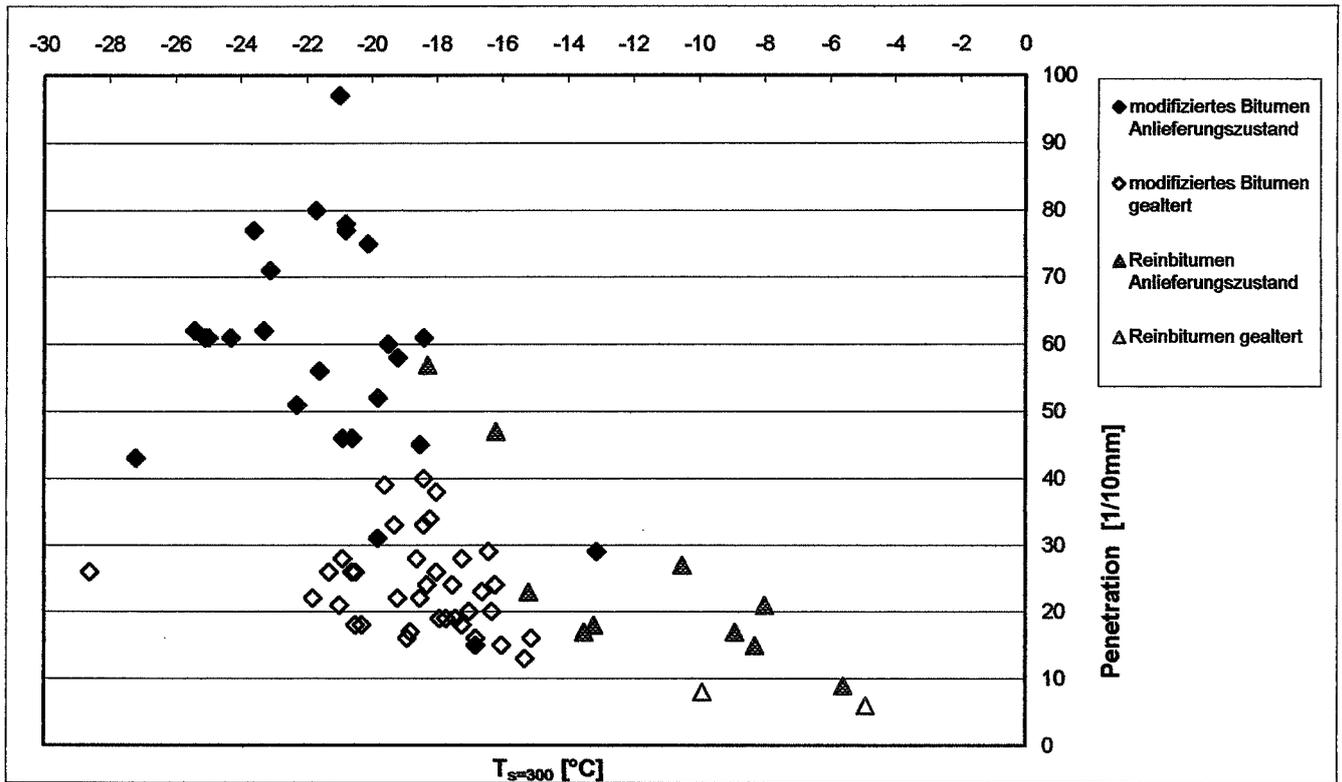


Abbildung A8.2

Diagramm  $T_{m=0.3}$  / Penetration

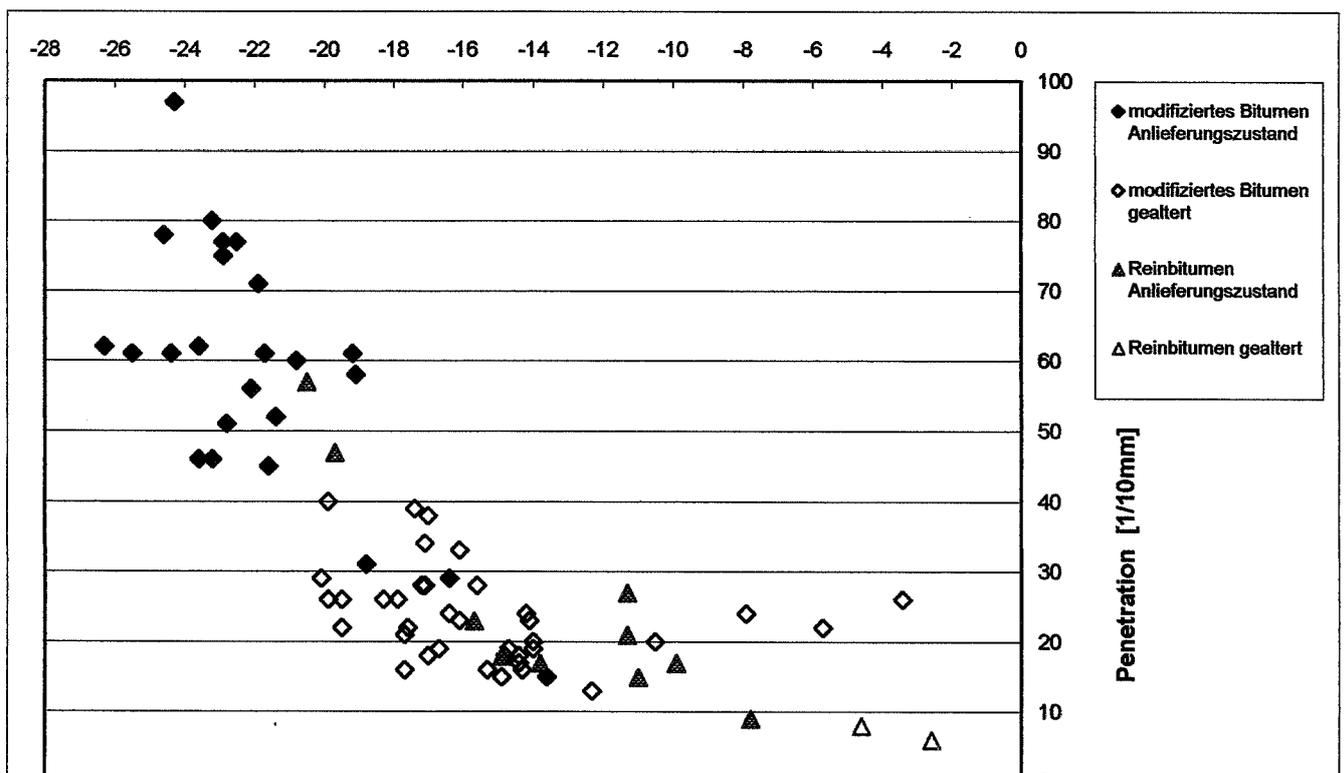


Abbildung A8.3

Diagramm  $T_{s=300}$  / EP RuK

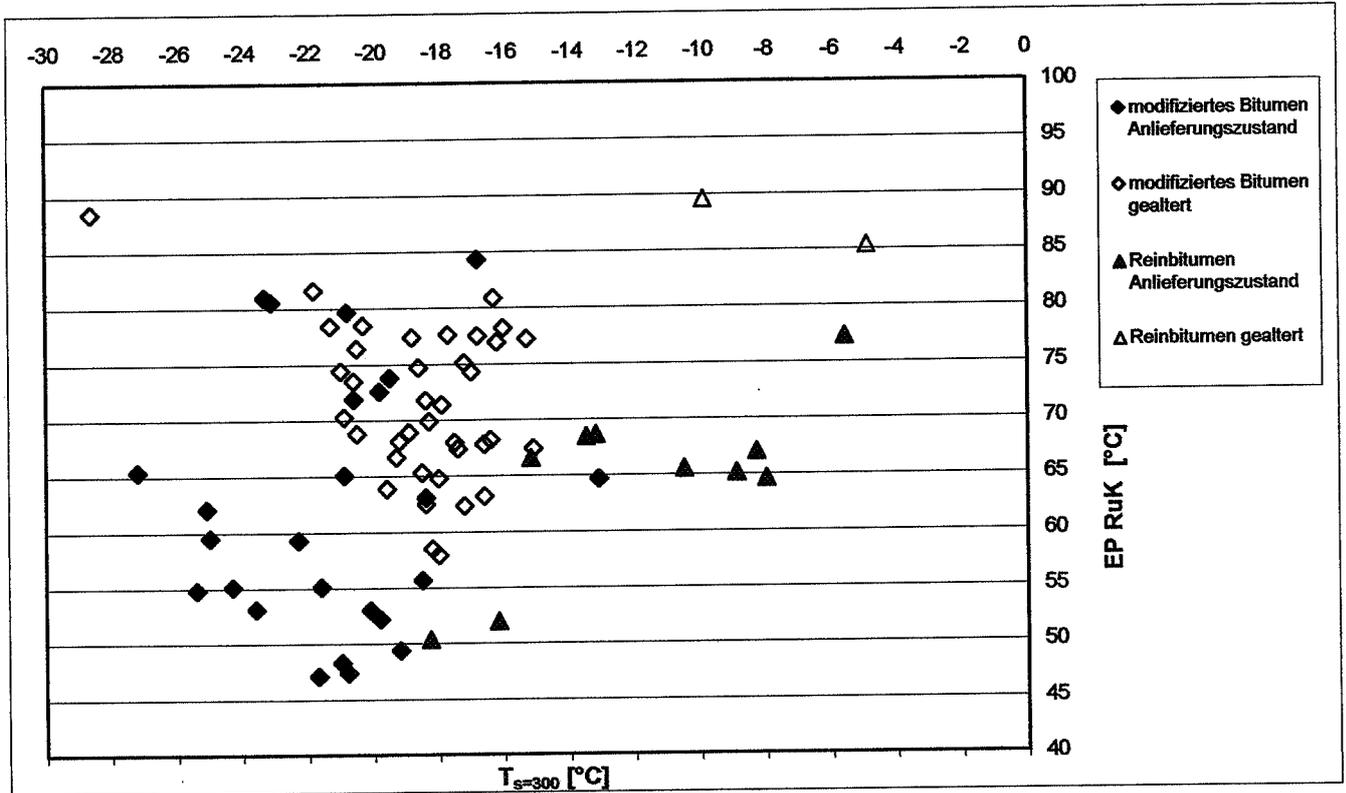


Abbildung A8.4

Diagramm  $T_{m=0.3}$  / EP RuK

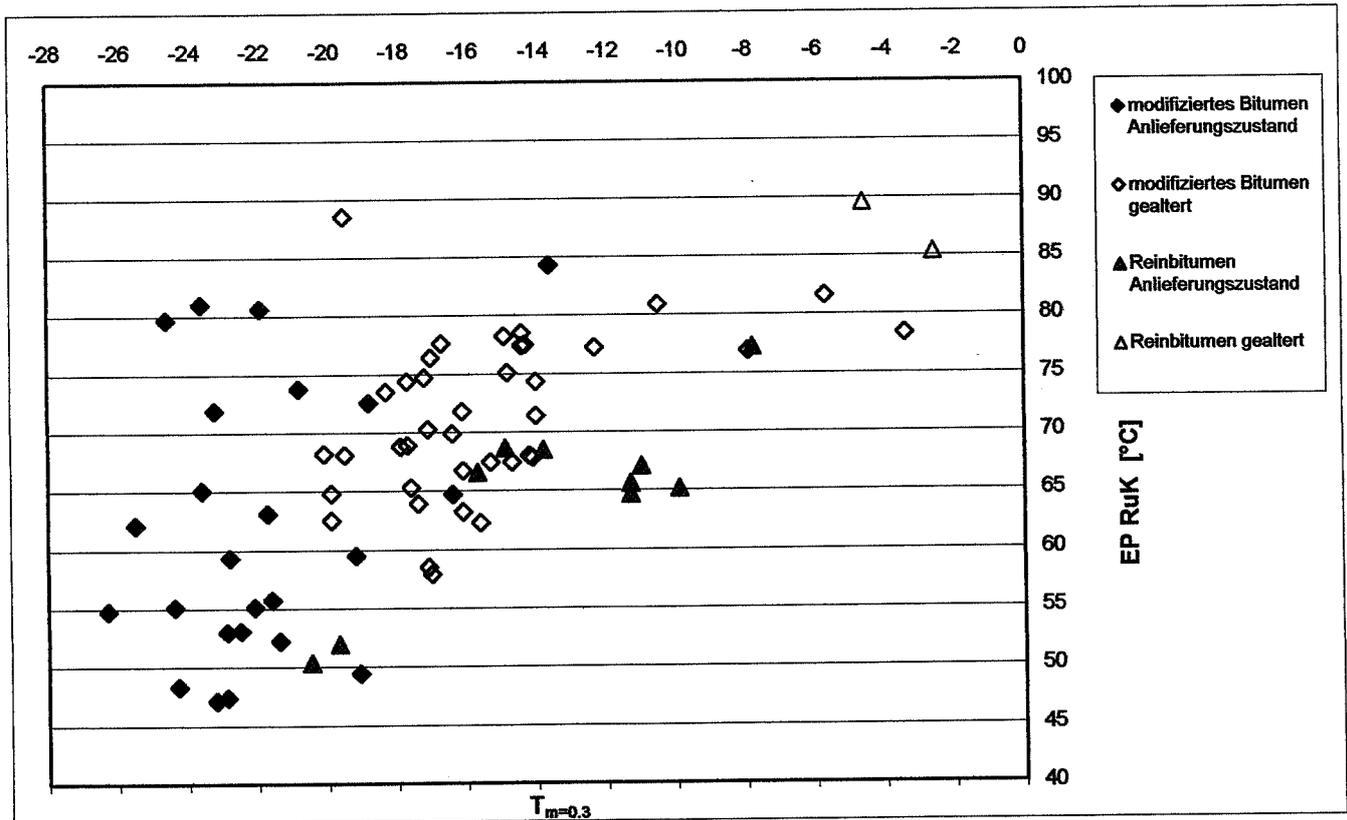


Abbildung A8.5

Diagramm  $T_{s=300}$  / BP Fraass

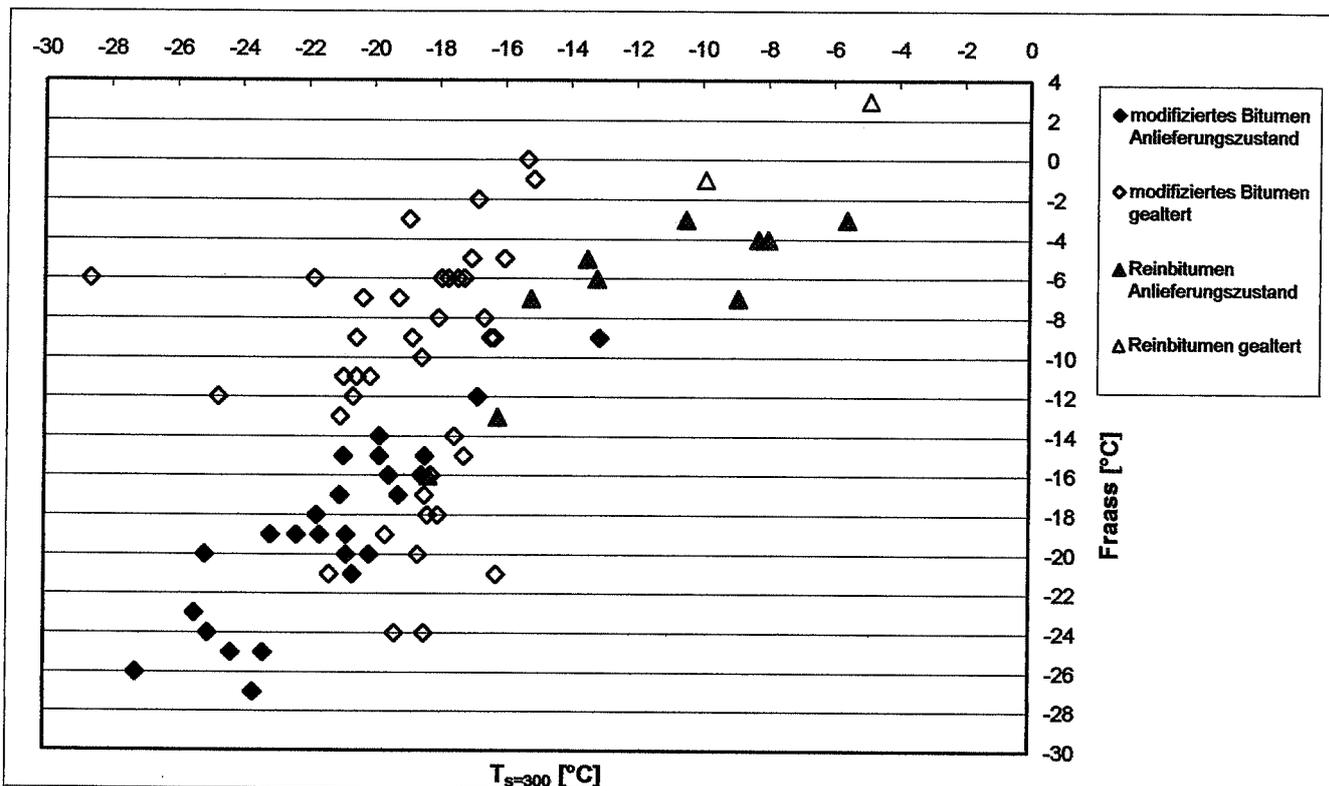


Abbildung A8.6

Diagramm  $T_{m=0.3}$  / BP Fraass

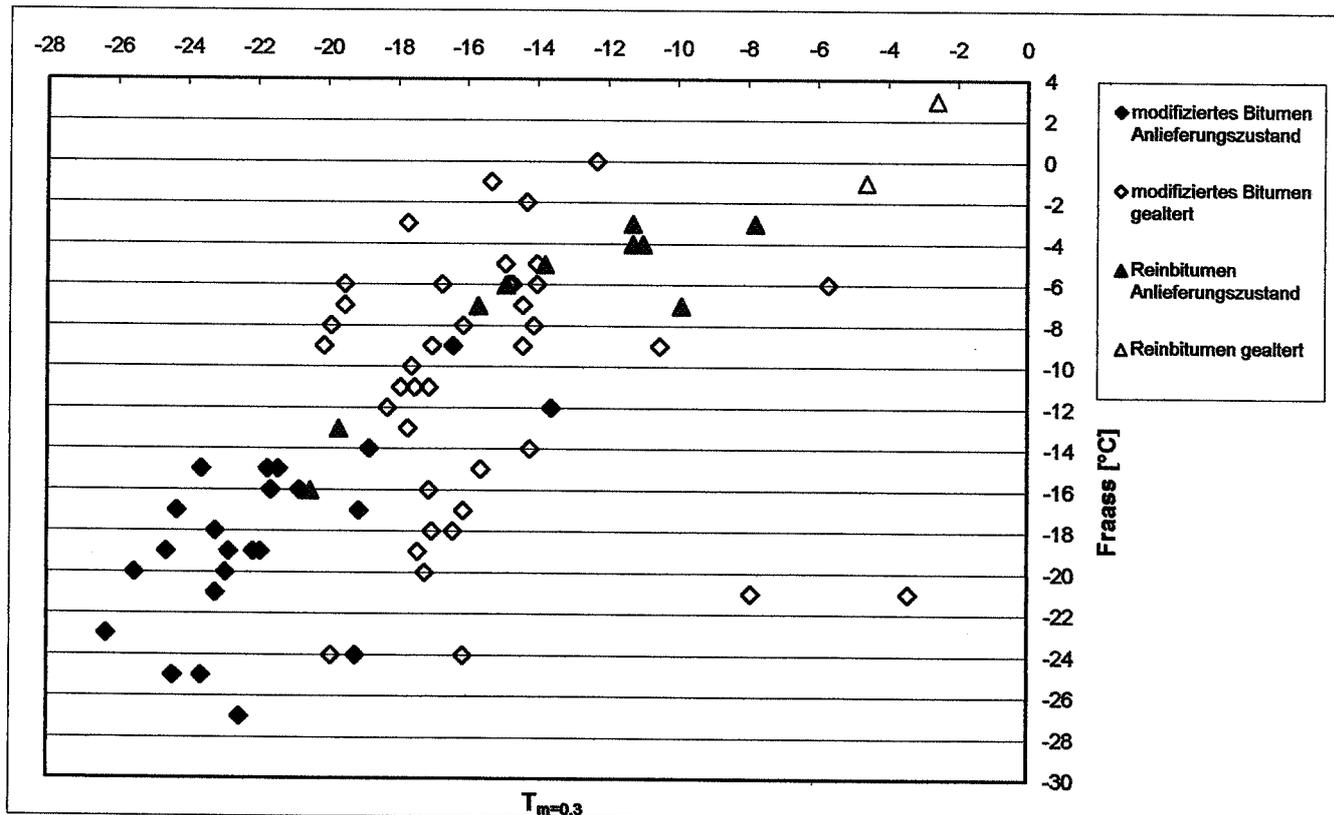


Abbildung A8.7

Diagramm  $T_{s=300}$  / elast. Rückstellung

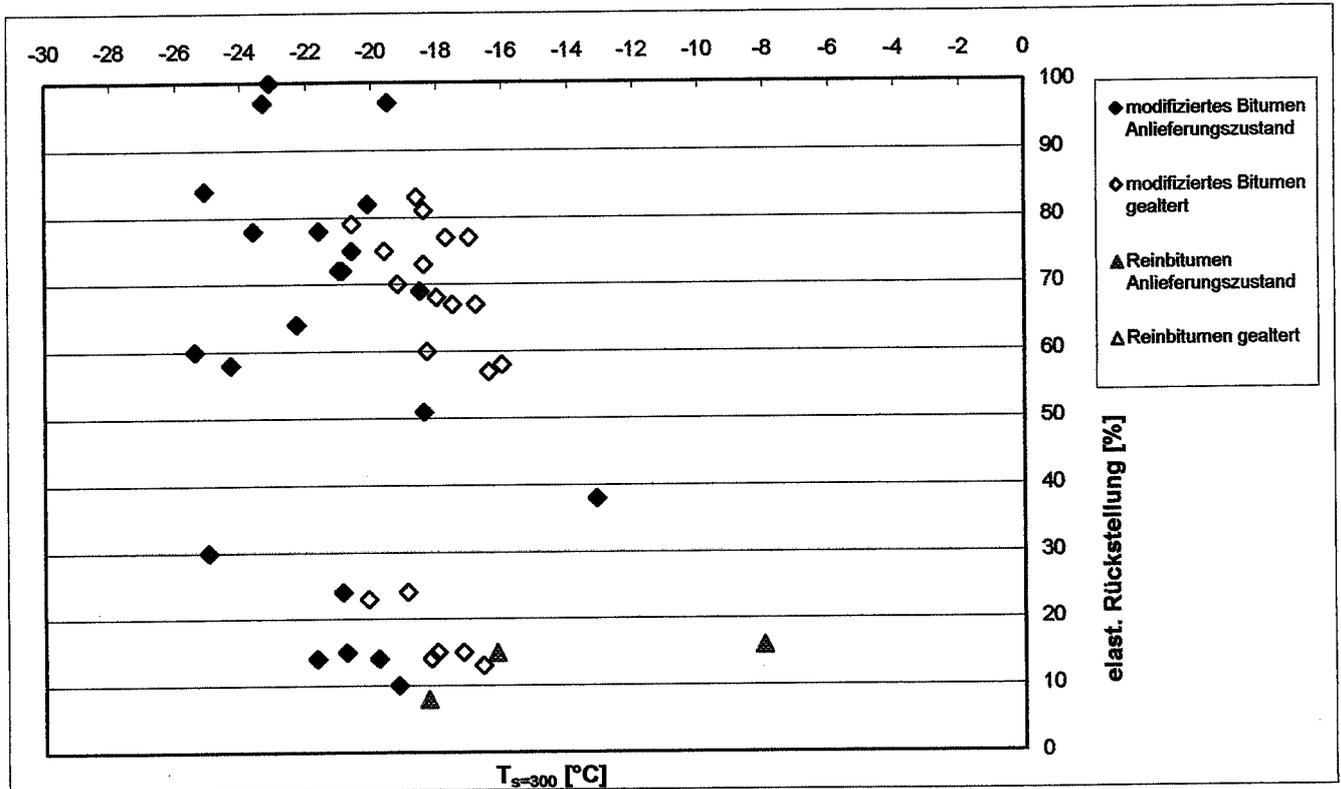


Abbildung A8.8

Diagramm  $T_{m=0.3}$  / elast. Rückstellung

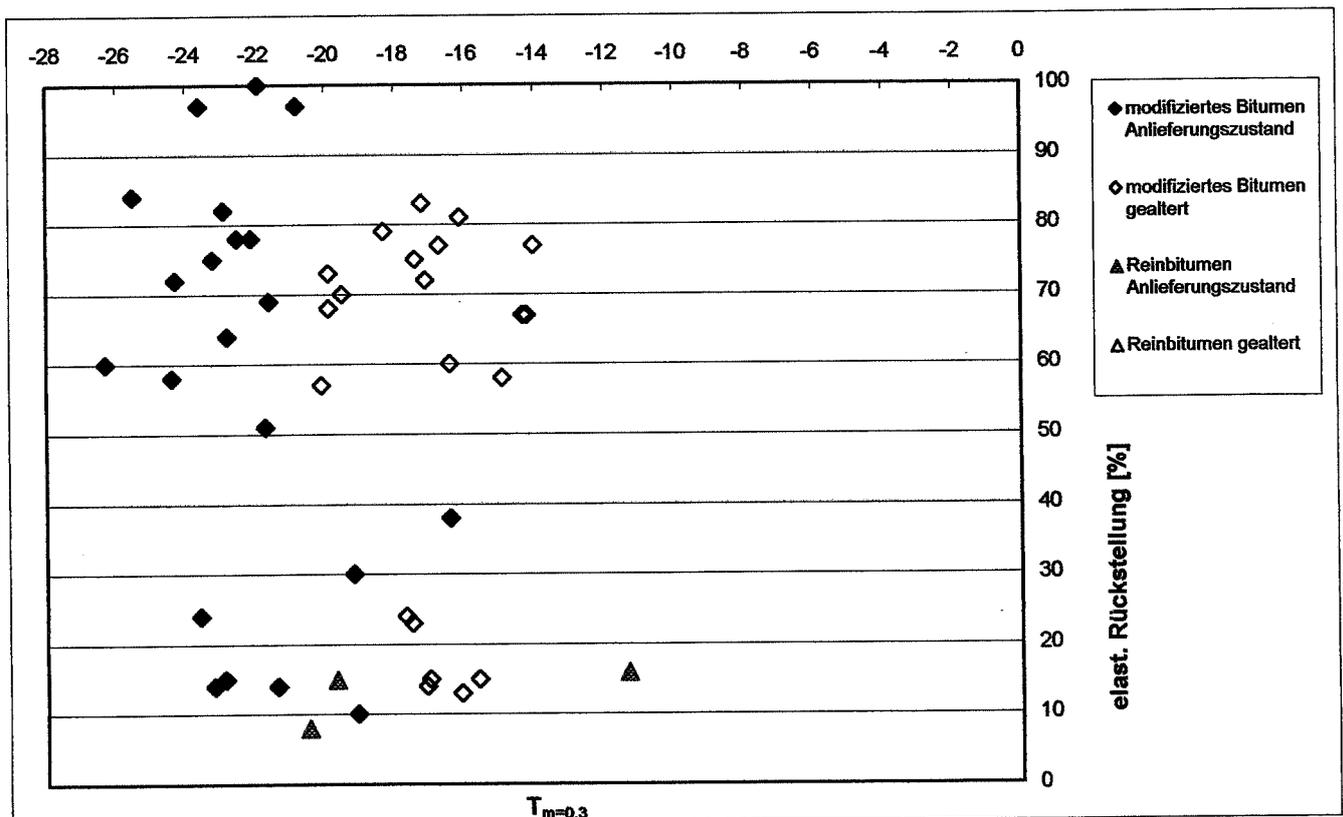


Abbildung A8.9

**BBR  $T_{s=300}$  / Rissbildung beim Abkühlverhalten**

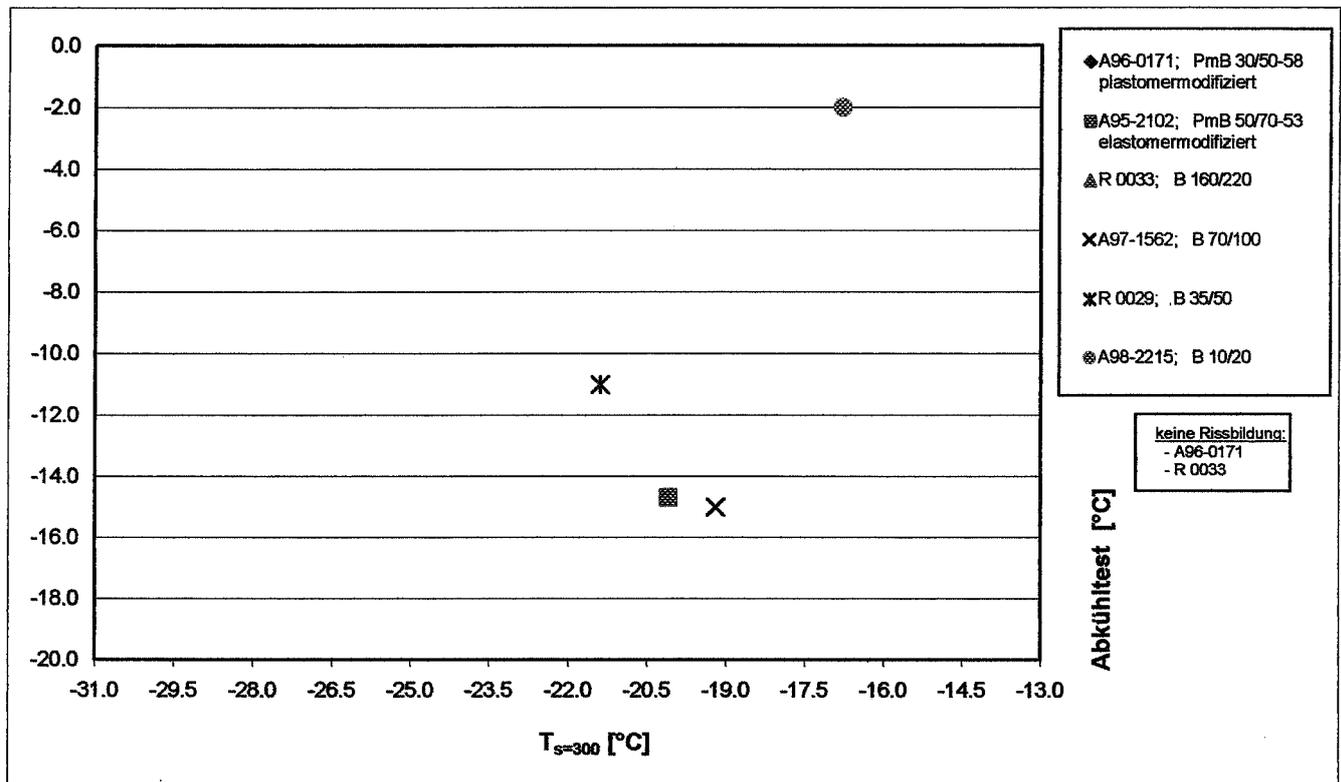


Abbildung A8.10

**BBR  $m_{=0.3}$  / Risstemperatur bei Modulbestimmung**

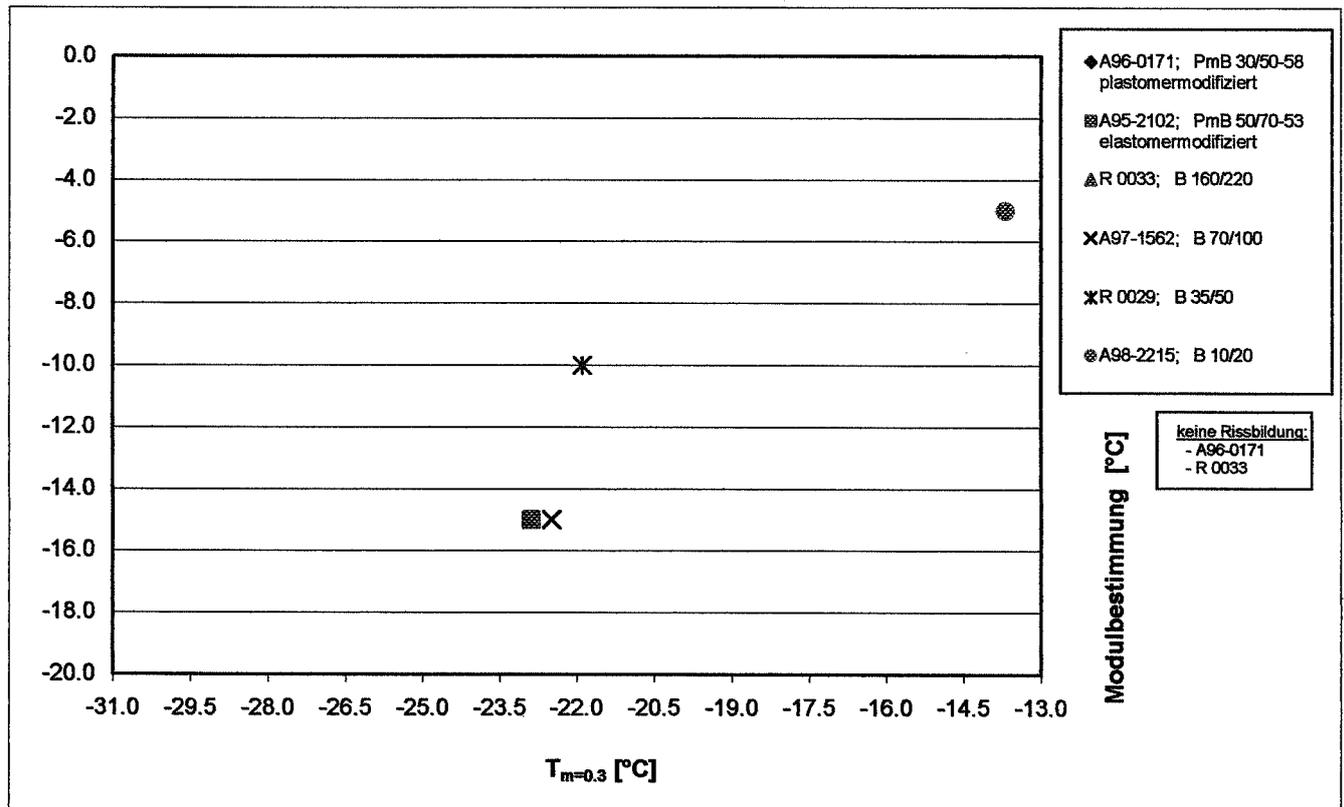


Abbildung A8.11

**Diagramm Bruchdehnung** (Prüfgeschwindigkeit 10mm/min bei 5°C) / **BBR  $T_{S=300}$**

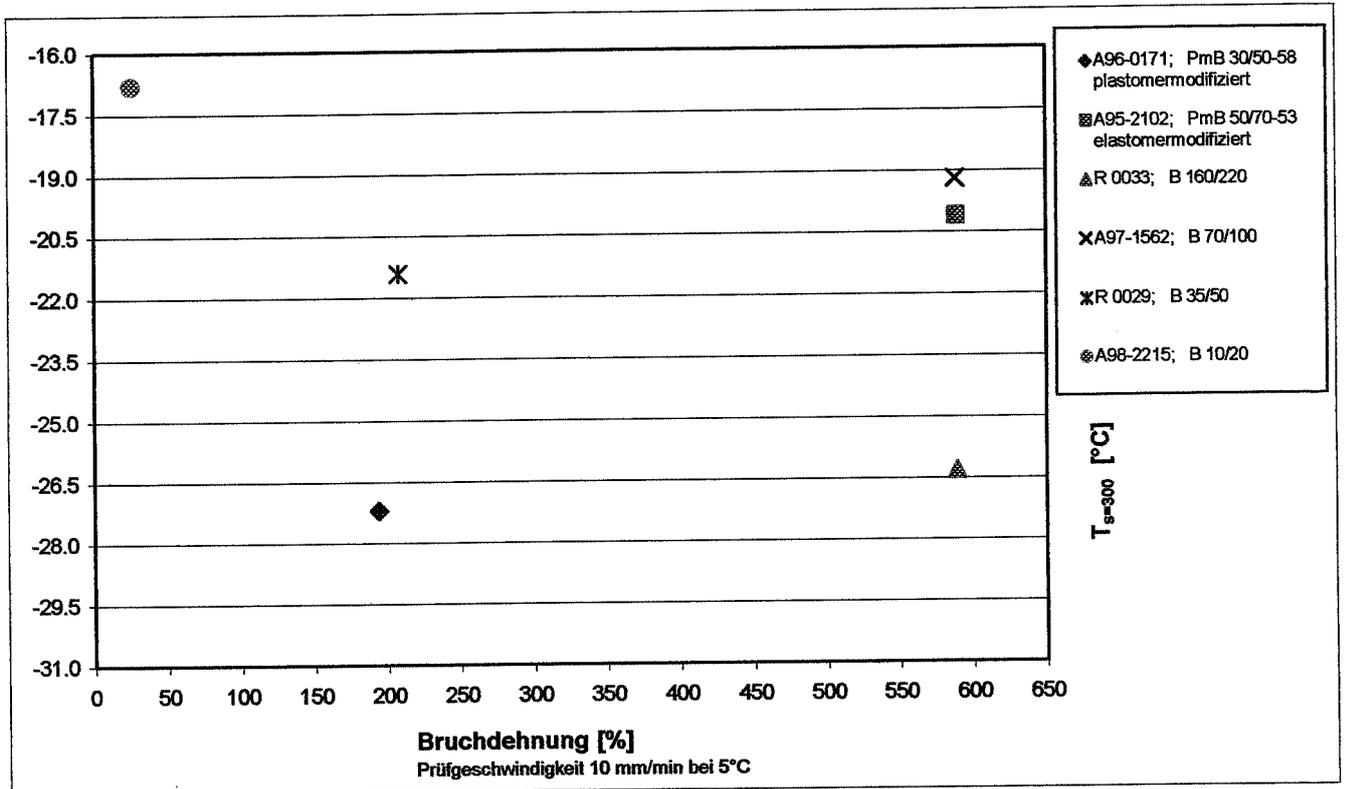


Abbildung A8.12

**Diagramm Bruchdehnung** (Prüfgeschwindigkeit 10mm/min bei 5°C) / **BBR  $m_{=0.3}$**

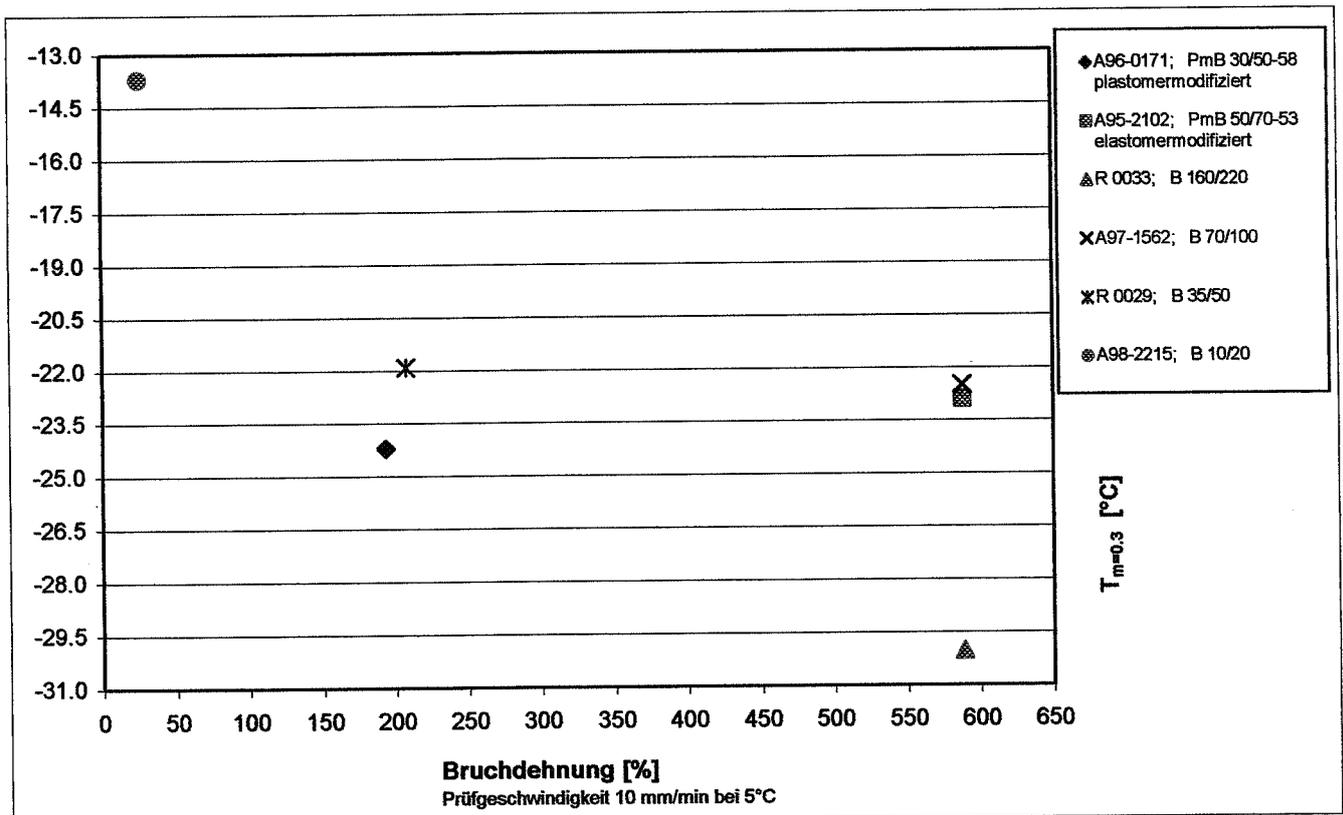


Abbildung A8.13

**Diagramm Bruchspannung** (Prüfgeschwindigkeit 10mm/min bei 5°C) / **BBR  $T_{s=300}$**

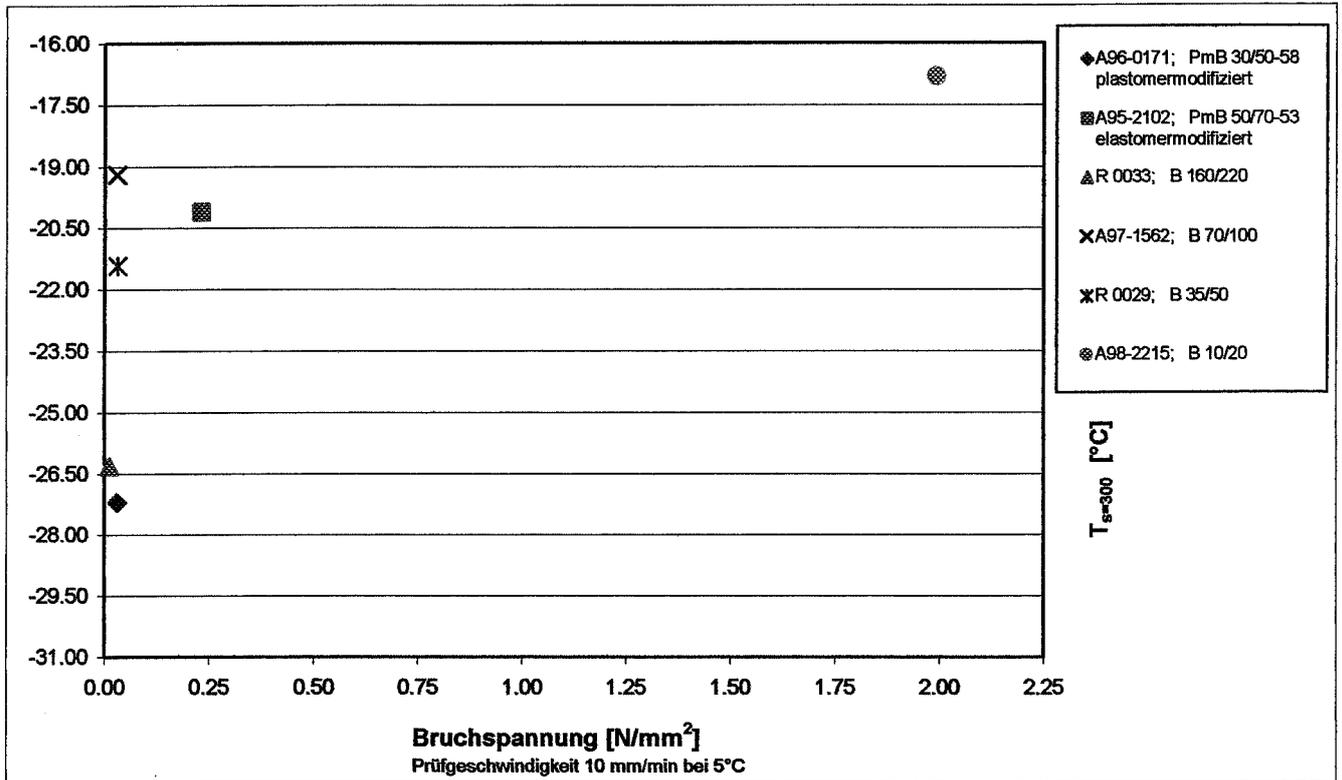


Abbildung A8.14

**Diagramm Bruchspannung** (Prüfgeschwindigkeit 10mm/min bei 5°C) / **BBR  $m_{=0.3}$**

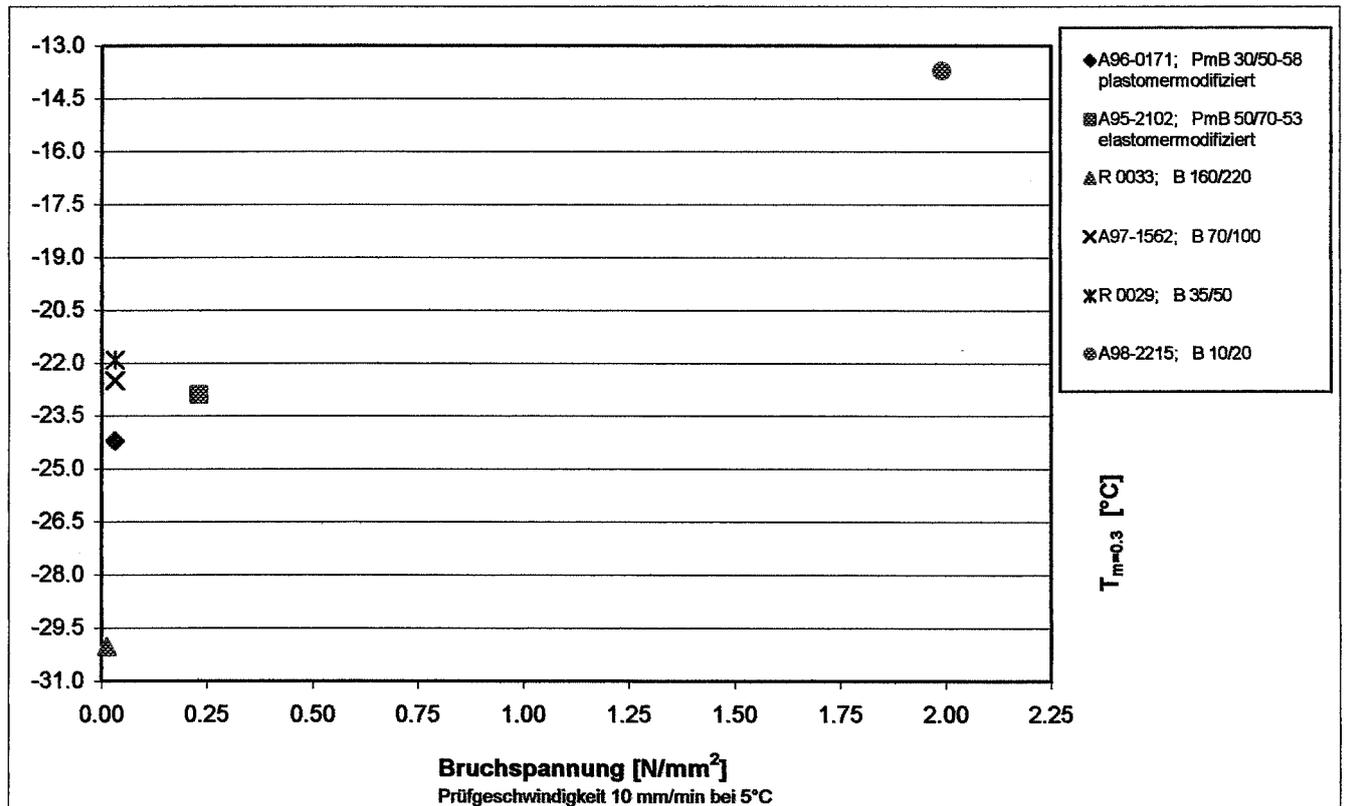


Abbildung A8.15

**Diagramm FlieBdehnung** (Prüfgeschwindigkeit 10mm/min bei 5°C) / BBR  $T_{s=300}$

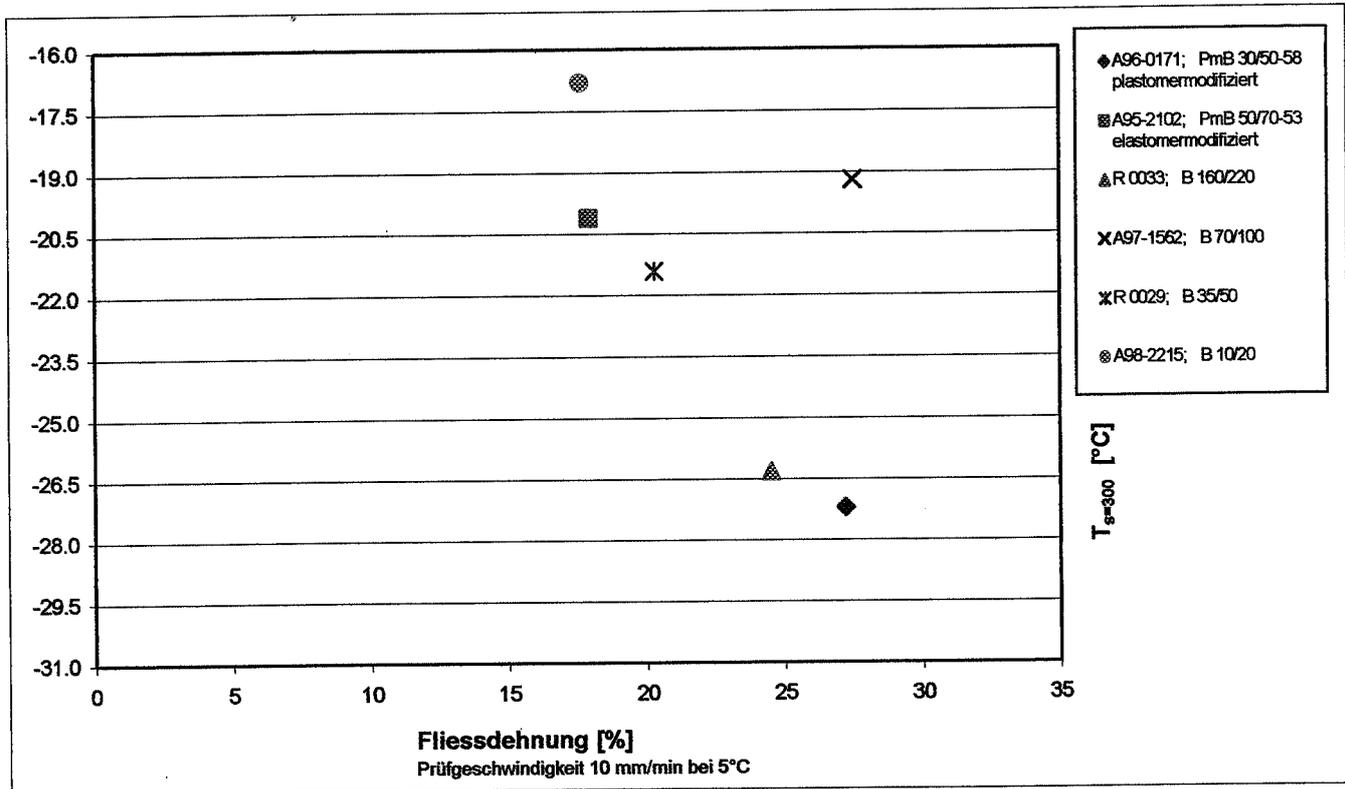


Abbildung A8.16

**Diagramm FlieBdehnung** (Prüfgeschwindigkeit 10mm/min bei 5°C) / BBR  $m_{=0.3}$

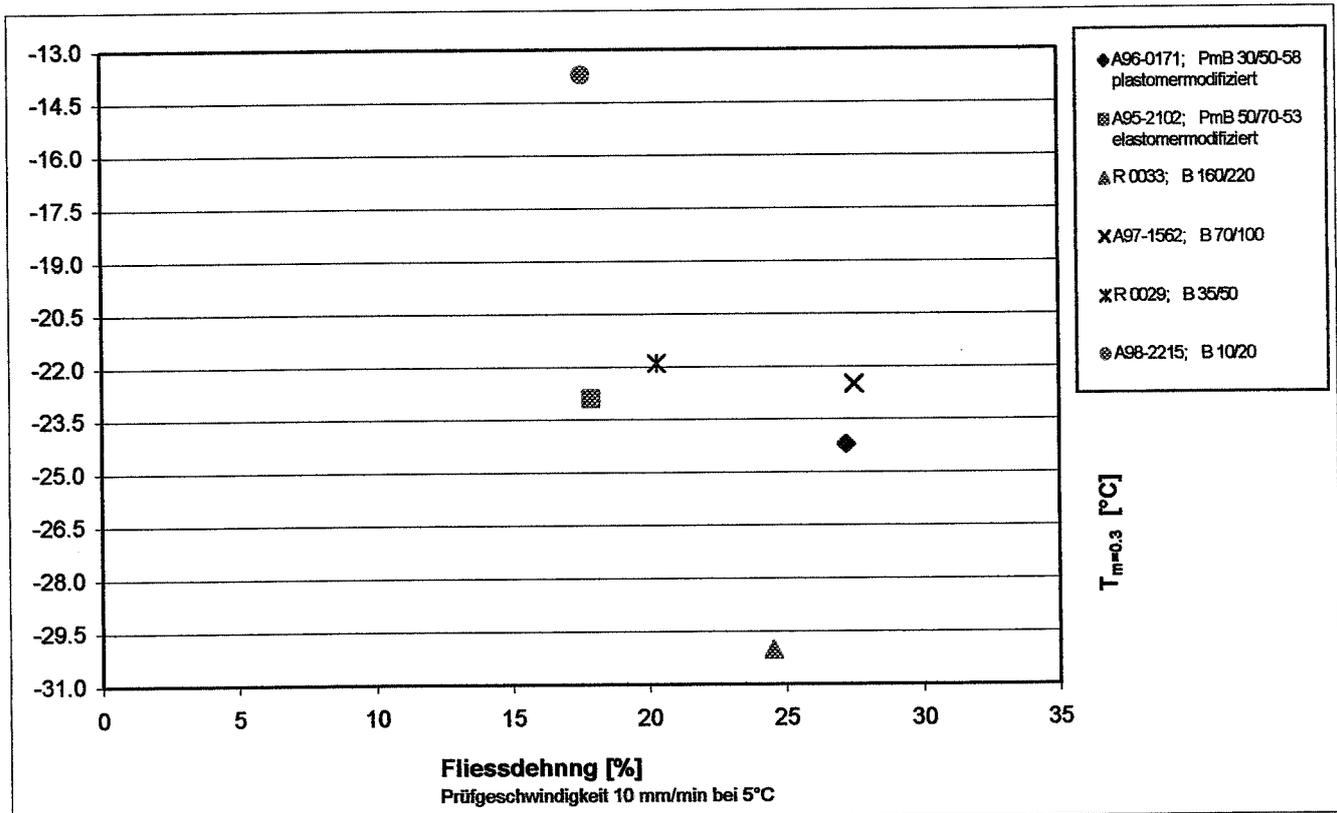


Abbildung A8.17

**Diagramm Fließspannung** (Prüfgeschwindigkeit 10mm/min bei 5°C) / **BBR  $T_{s=300}$**

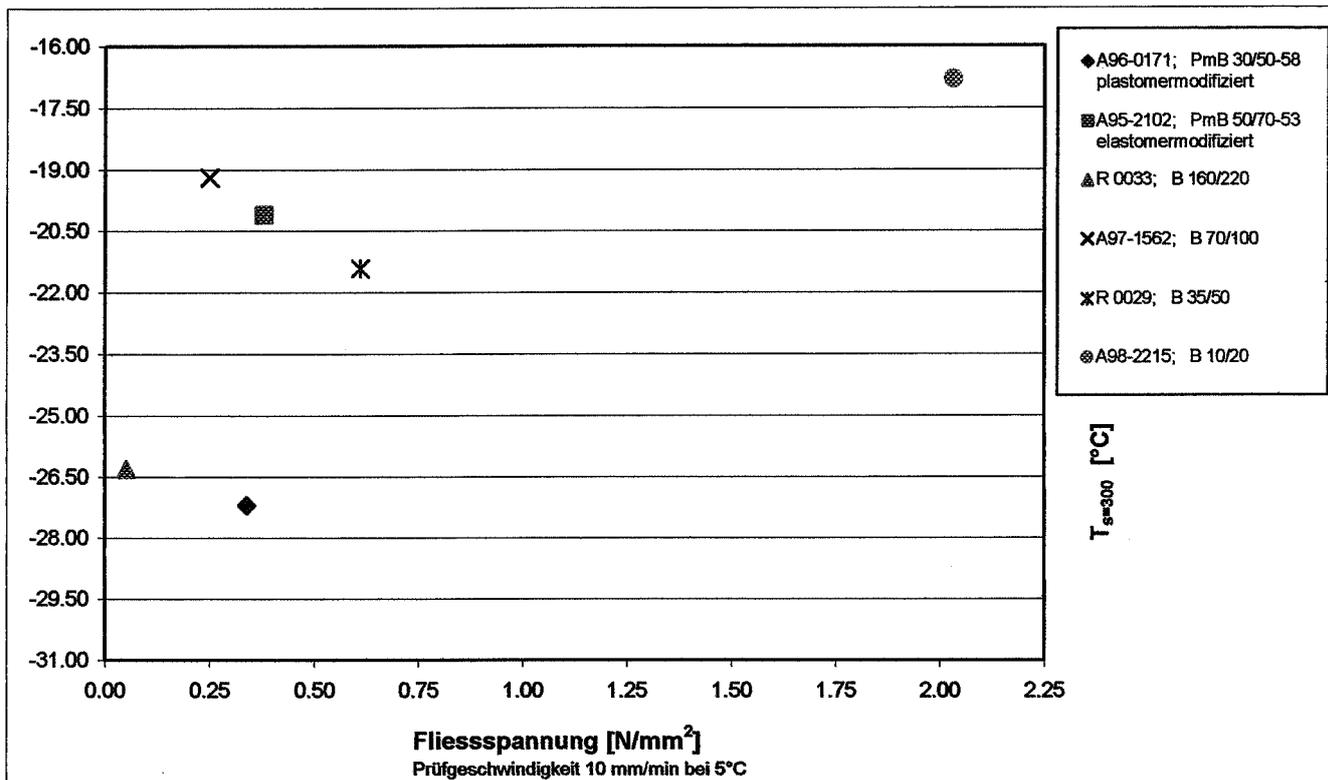


Abbildung A8.18

**Diagramm Fließspannung** (Prüfgeschwindigkeit 10mm/min bei 5°C) / **BBR  $m=0.3$**

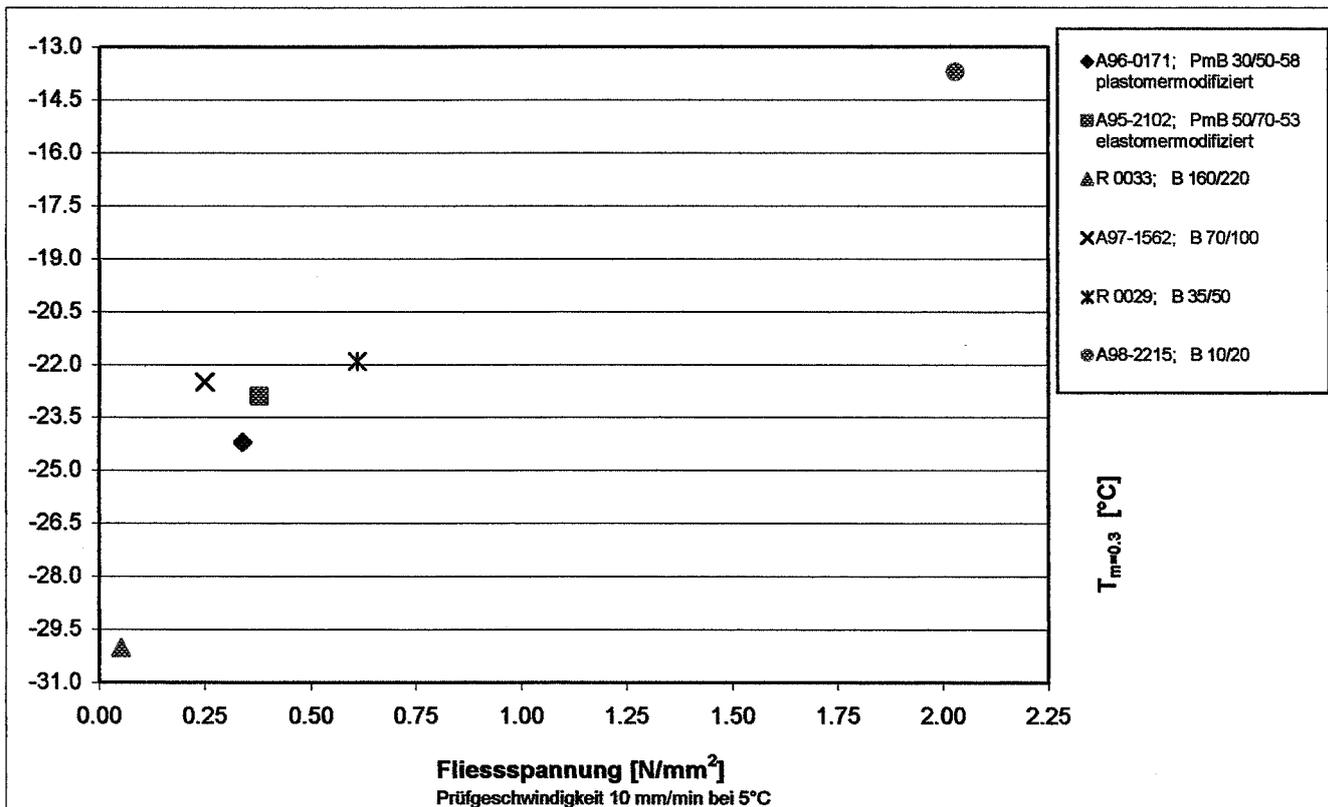


Abbildung A8.19

**Diagramm Bruchdehnung** (Prüfgeschwindigkeit 100mm/min bei 5°C) / **BBR  $T_{s=300}$**

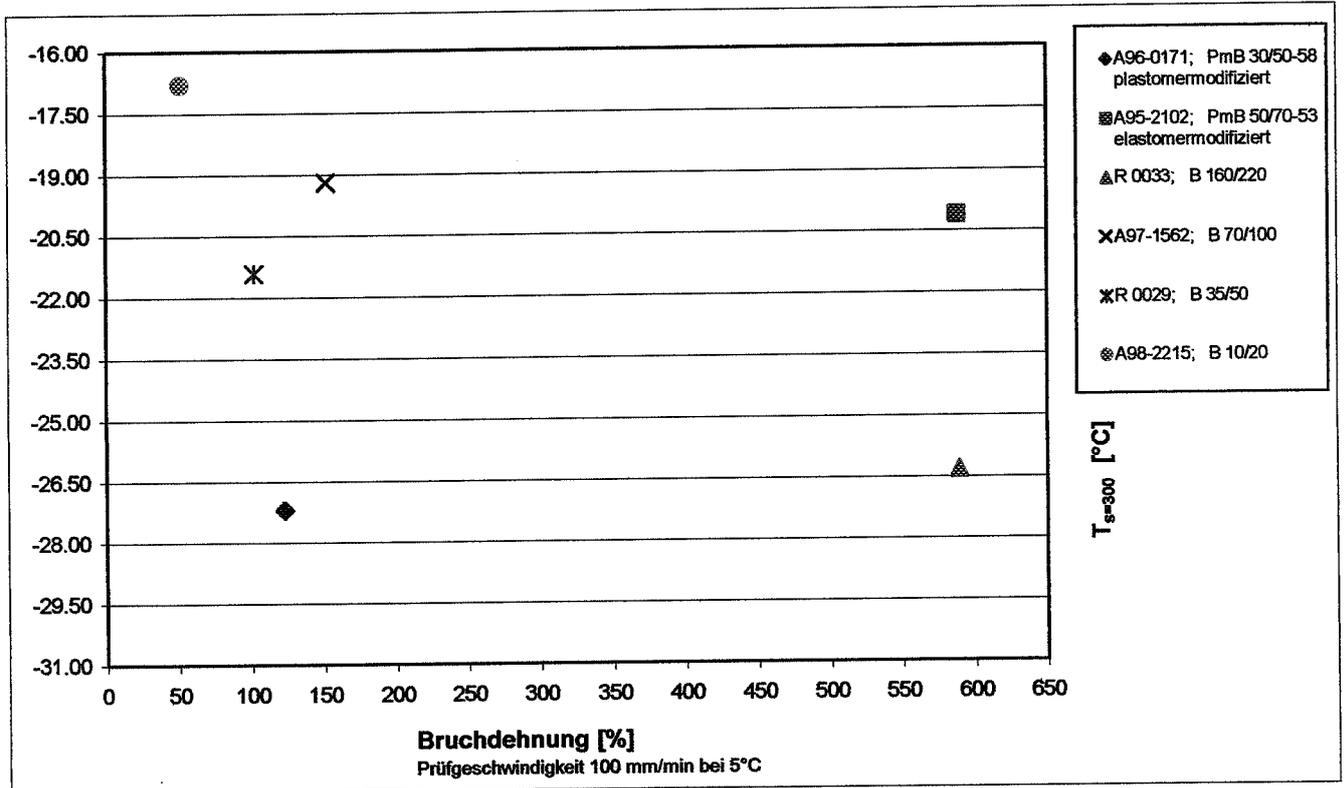


Abbildung A8.20

**Diagramm Bruchdehnung** (Prüfgeschwindigkeit 100mm/min bei 5°C) / **BBR  $m=0.3$**

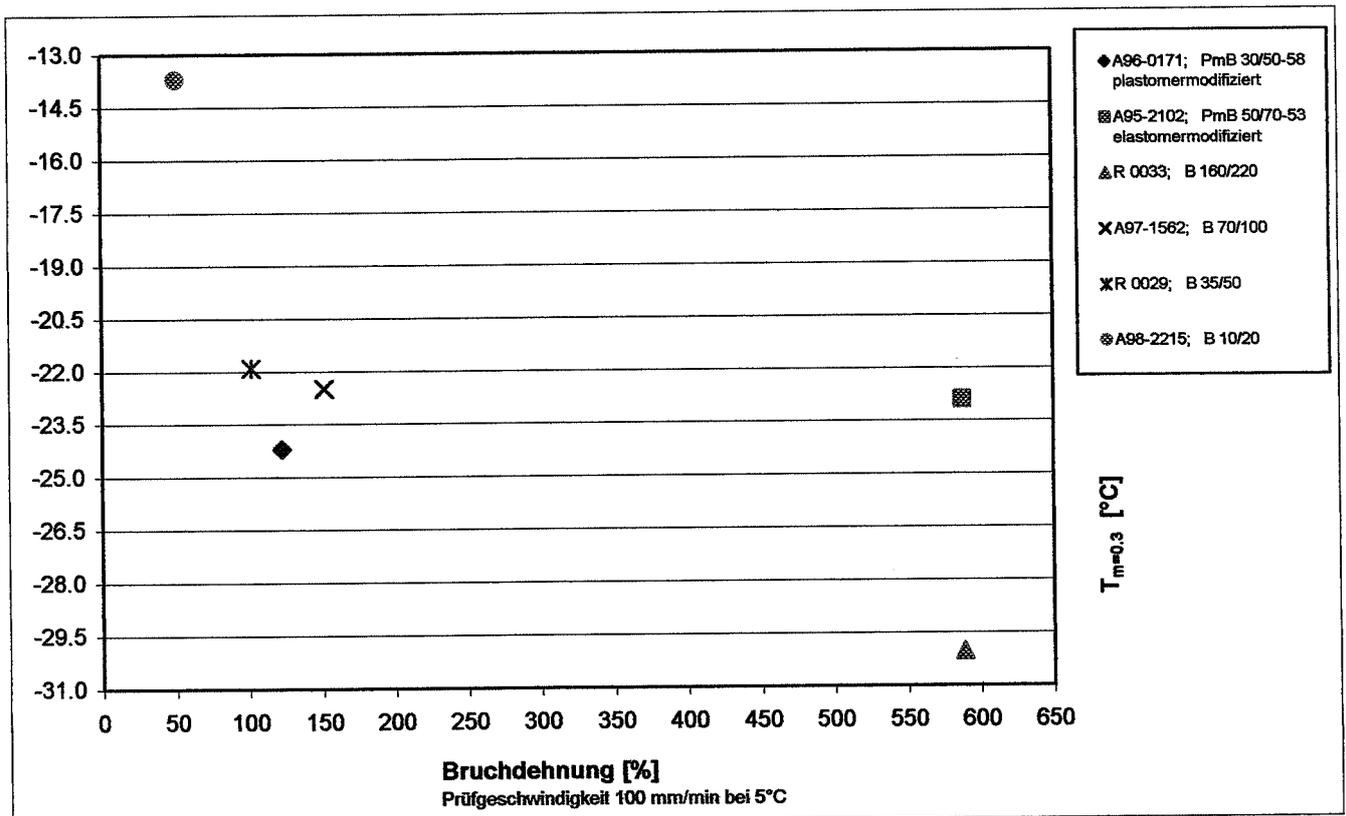


Abbildung A8.21

**Diagramm Bruchspannung** (Prüfgeschwindigkeit 100mm/min bei 5°C) / **BBR  $T_{s=300}$**

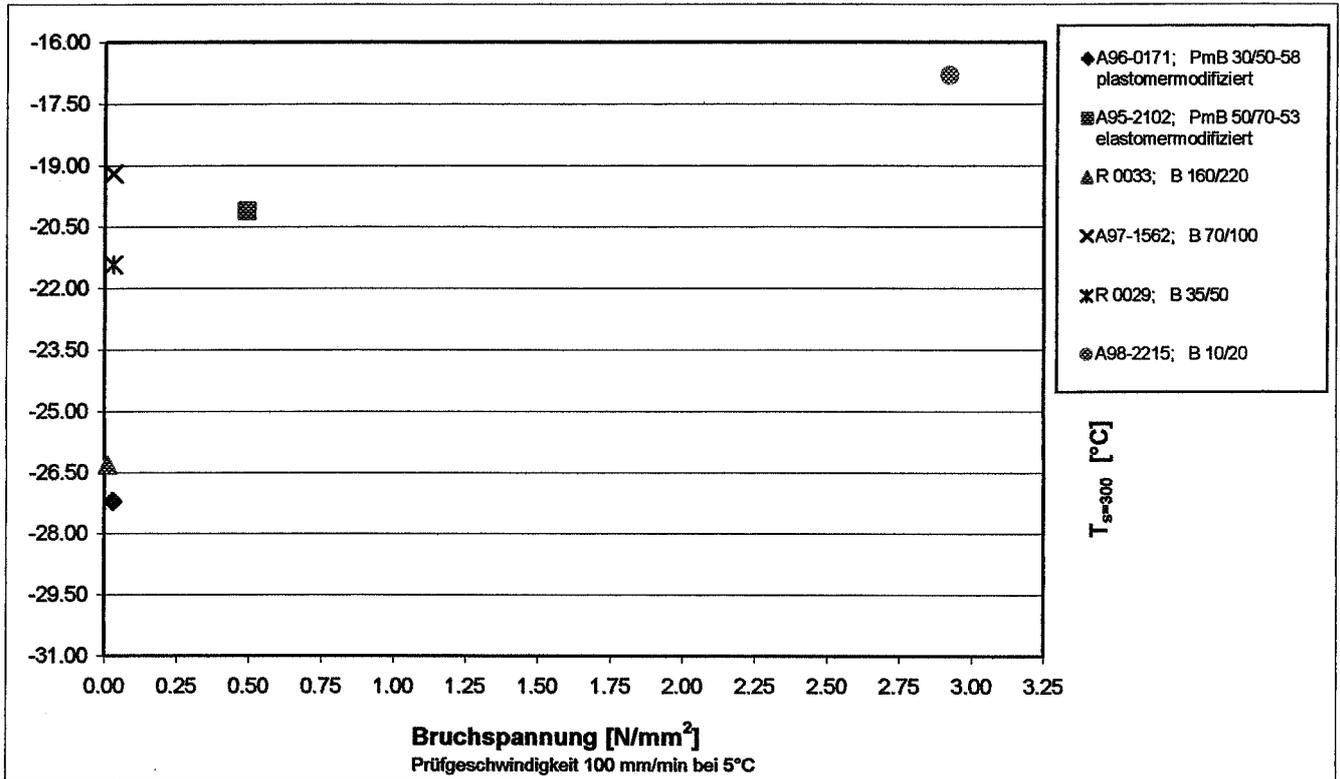


Abbildung A8.22

**Diagramm Bruchspannung** (Prüfgeschwindigkeit 100mm/min bei 5°C) / **BBR  $m_{=0.3}$**

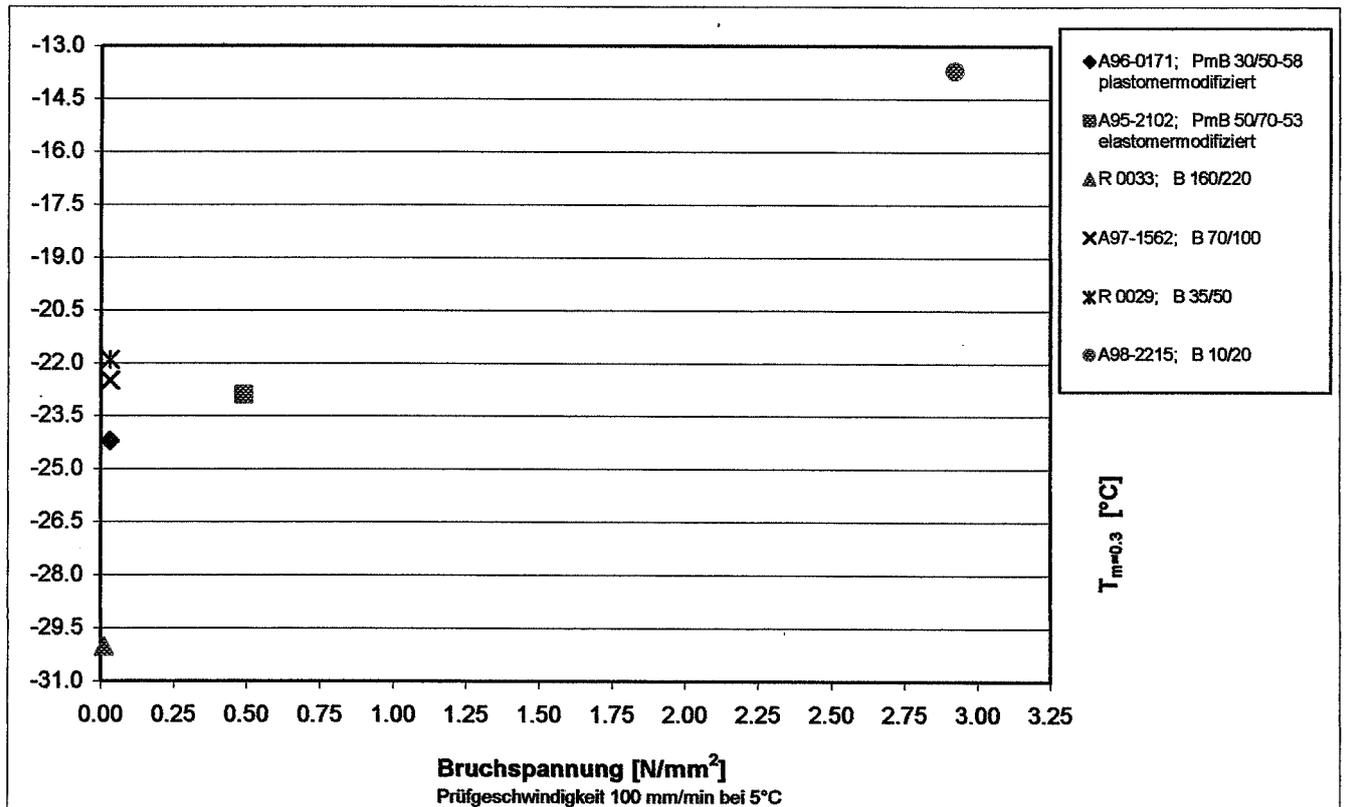


Abbildung A8.23

**Diagramm Fließdehnung (Prüfgeschwindigkeit 100mm/min bei 5°C) / BBR  $T_{s=300}$**

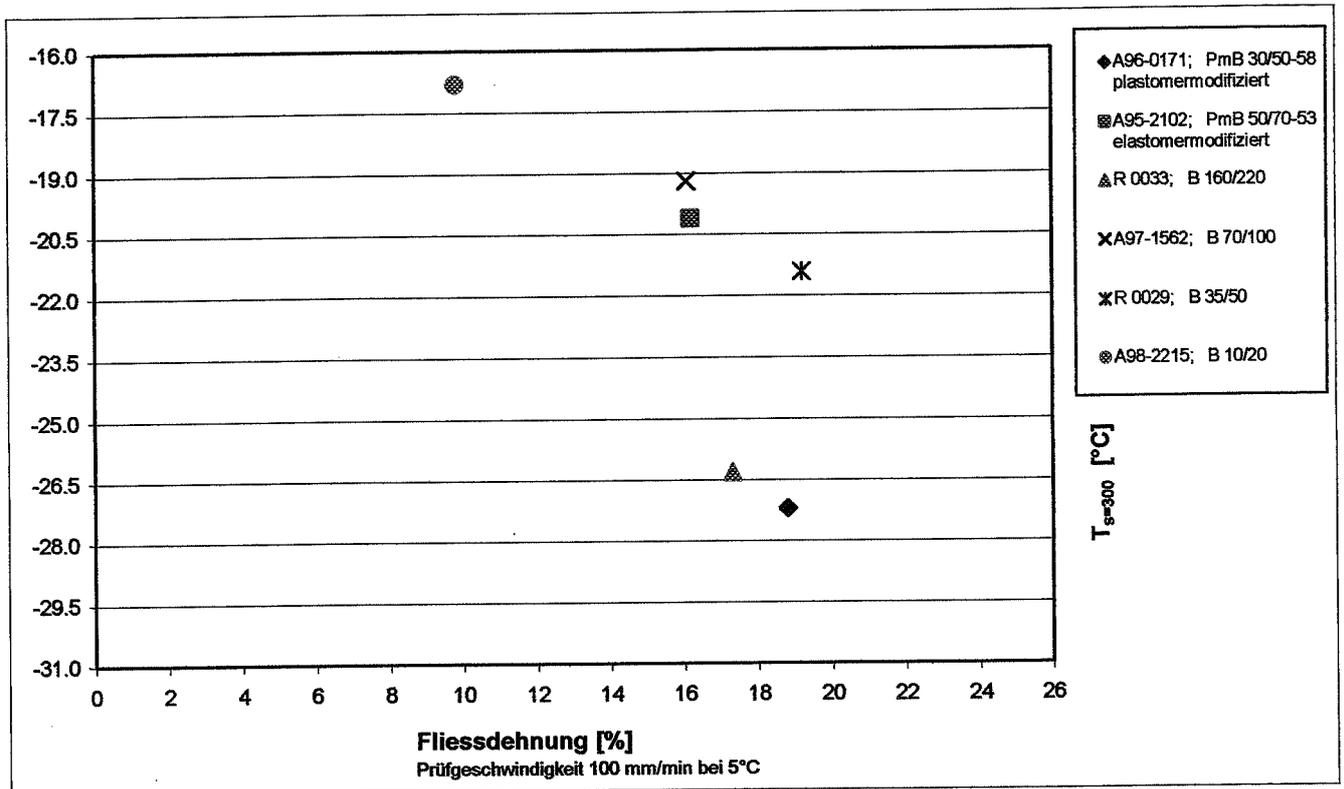


Abbildung A8.24

**Diagramm Fließdehnung (Prüfgeschwindigkeit 100mm/min bei 5°C) / BBR  $m=0.3$**

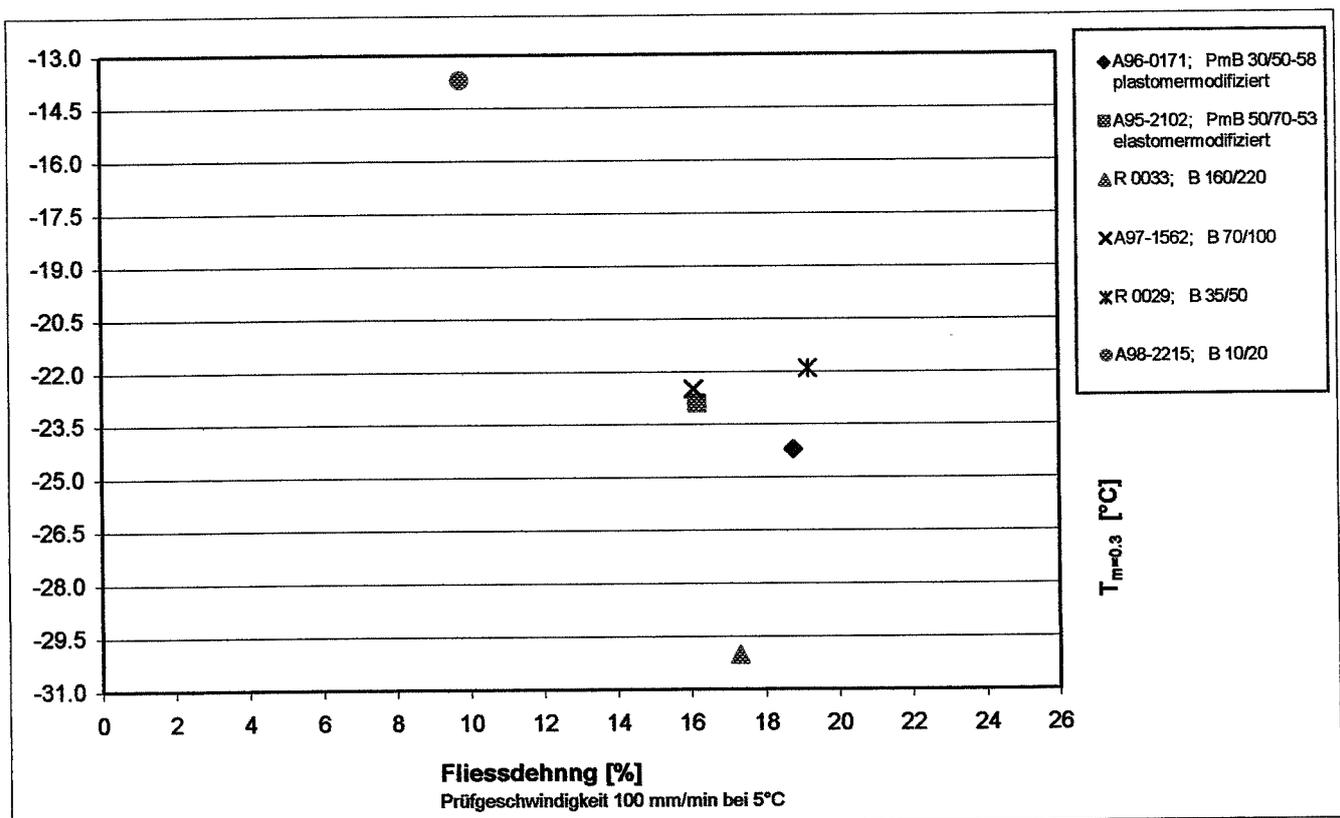


Abbildung A8.25

**Diagramm Fließspannung** (Prüfgeschwindigkeit 100mm/min bei 5°C) / **BBR  $T_{s=300}$**

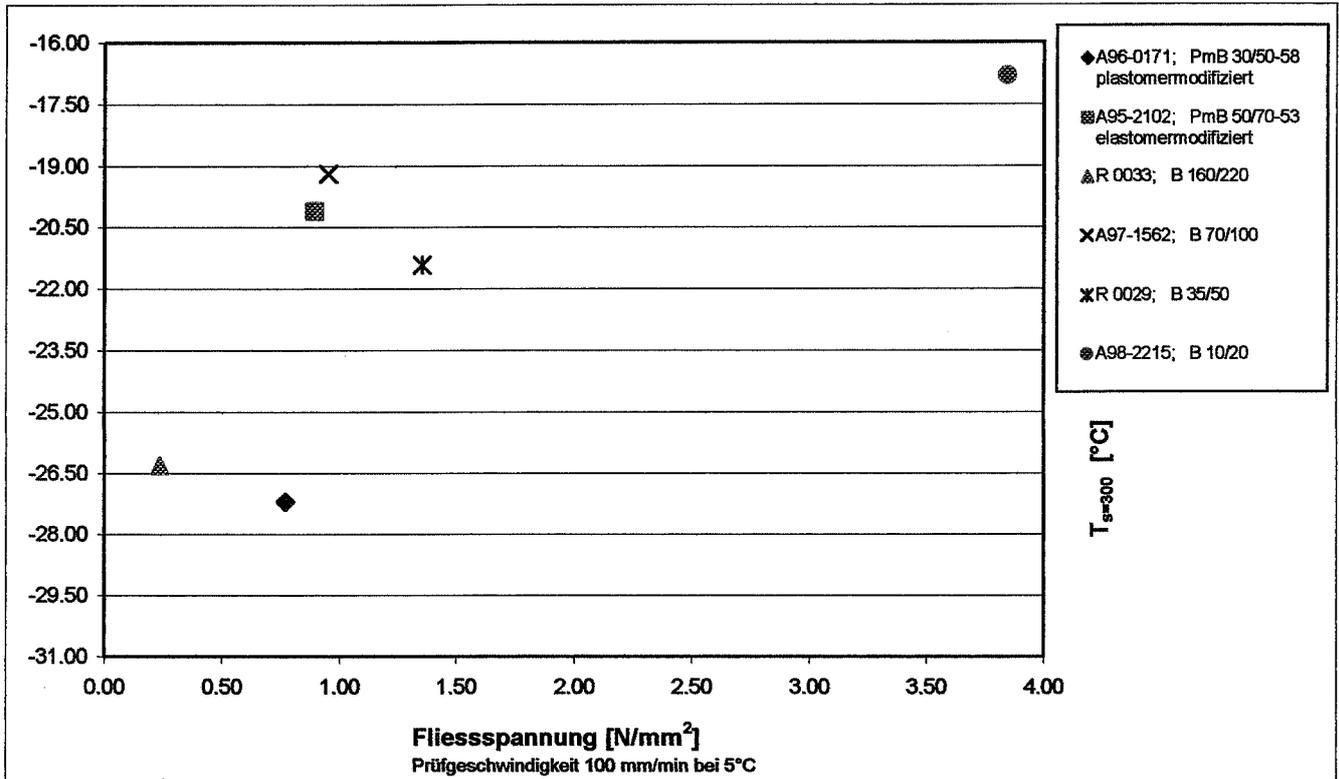


Abbildung A8.26

**Diagramm Fließspannung** (Prüfgeschwindigkeit 100mm/min bei 5°C) / **BBR  $m=0.3$**

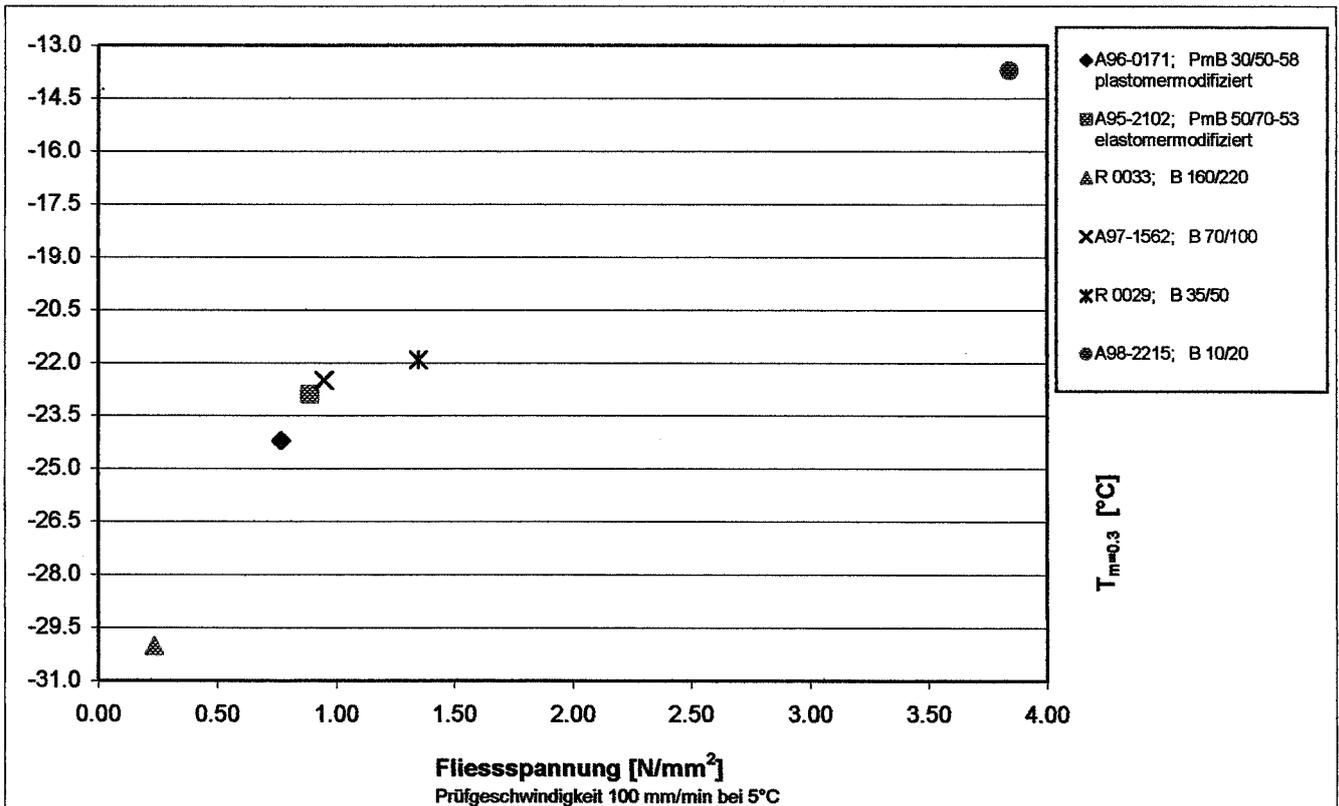


Abbildung A8.27

Diagramm  $T_{s=300} / KDM E_{40} - E_{20}$

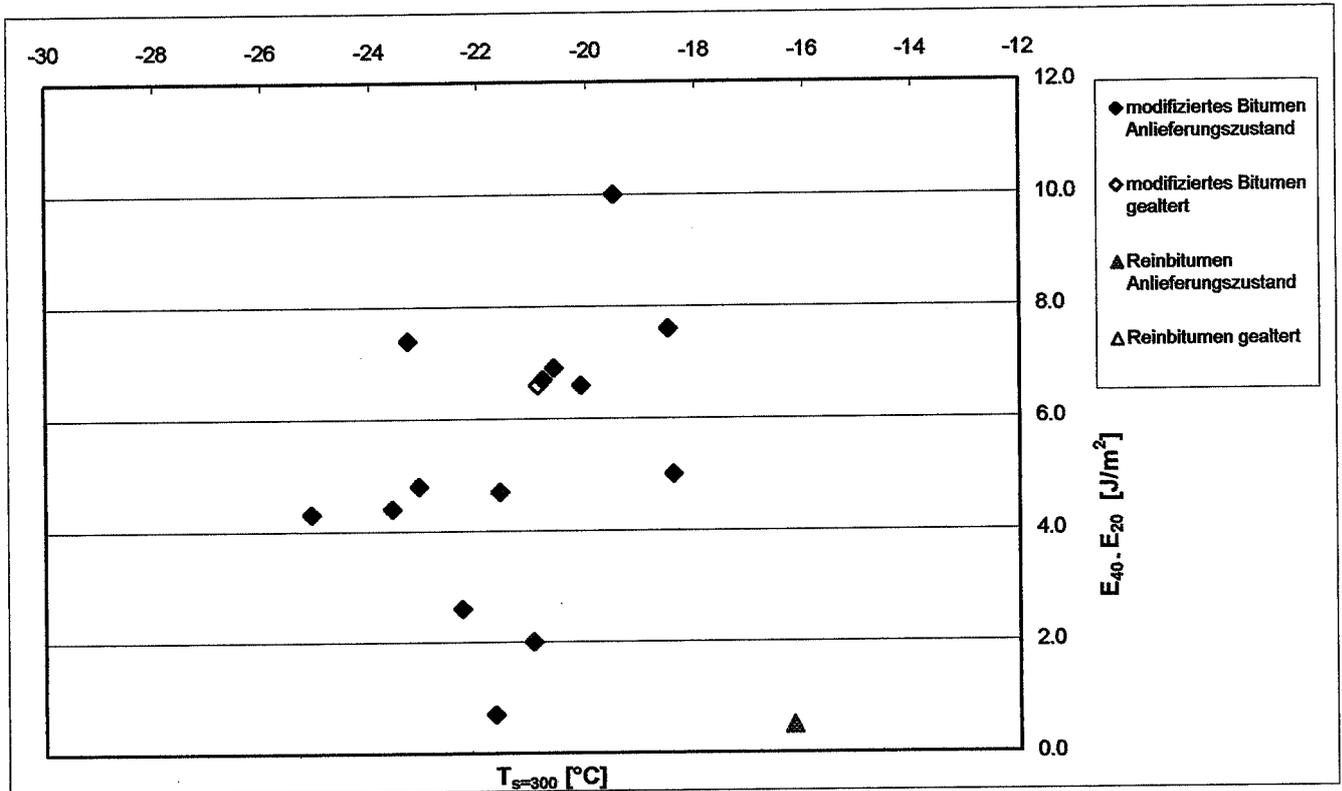


Abbildung A8.28

Diagramm  $T_{m=0.3} / KDM E_{40} - E_{20}$

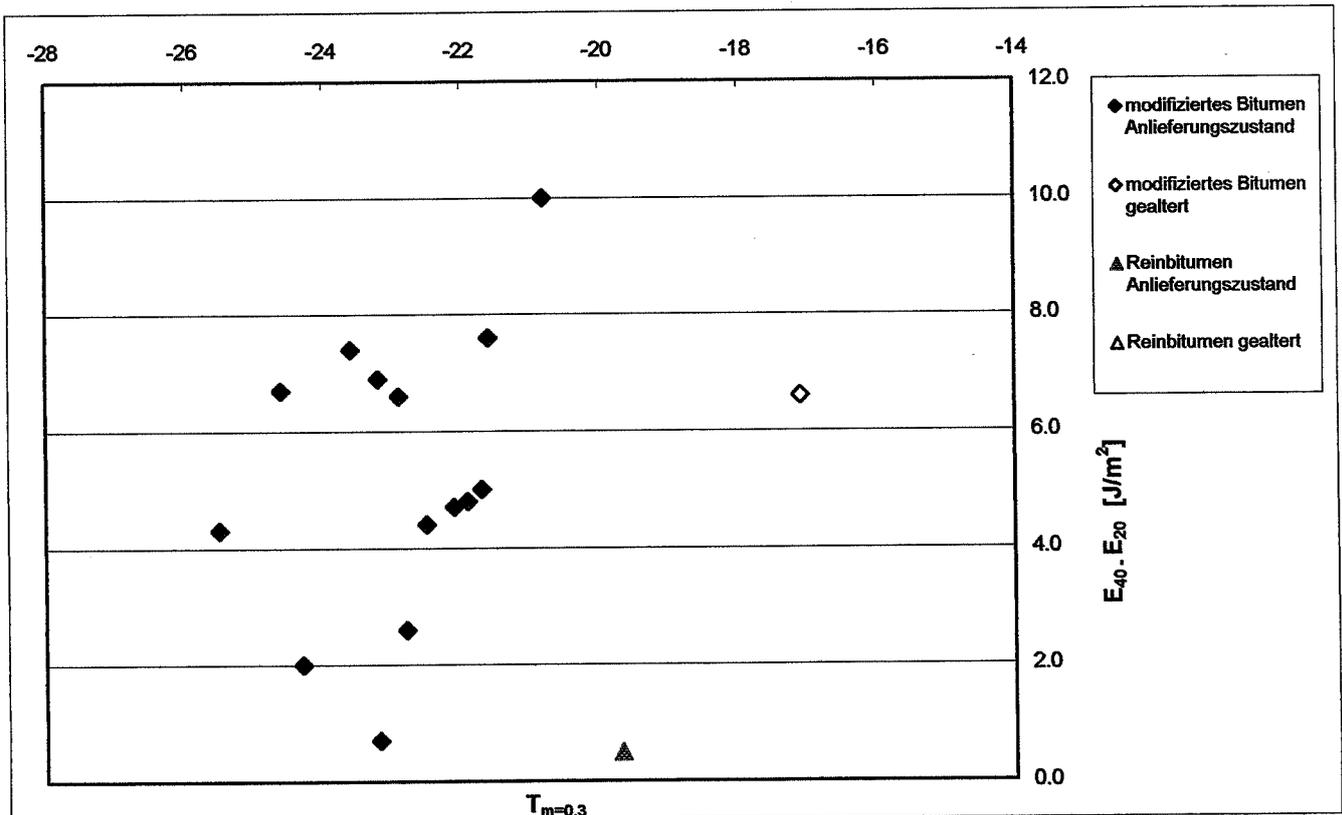


Abbildung A8.29

Diagramm  $T_{s=300} / KDM E_{Bruch}$

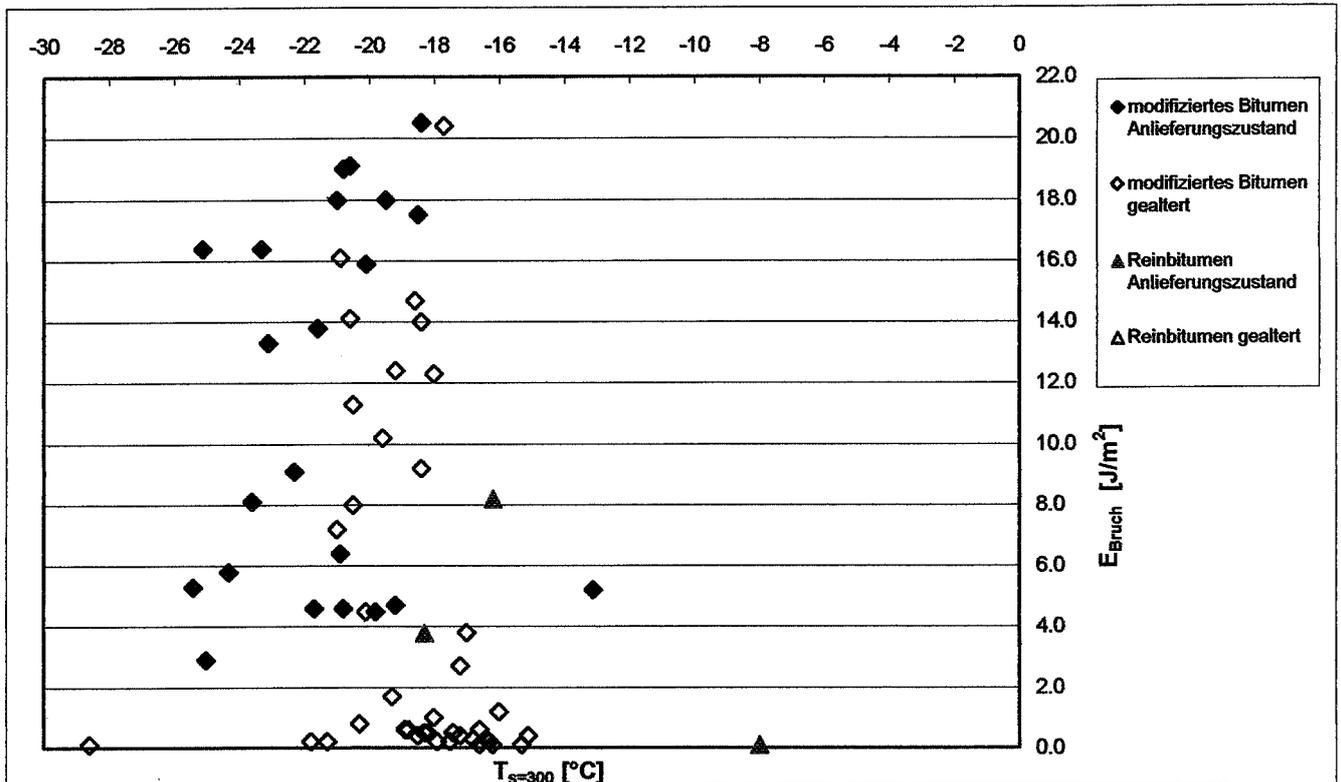


Abbildung A8.30

Diagramm  $T_{m=0.3} / KDM E_{Bruch}$

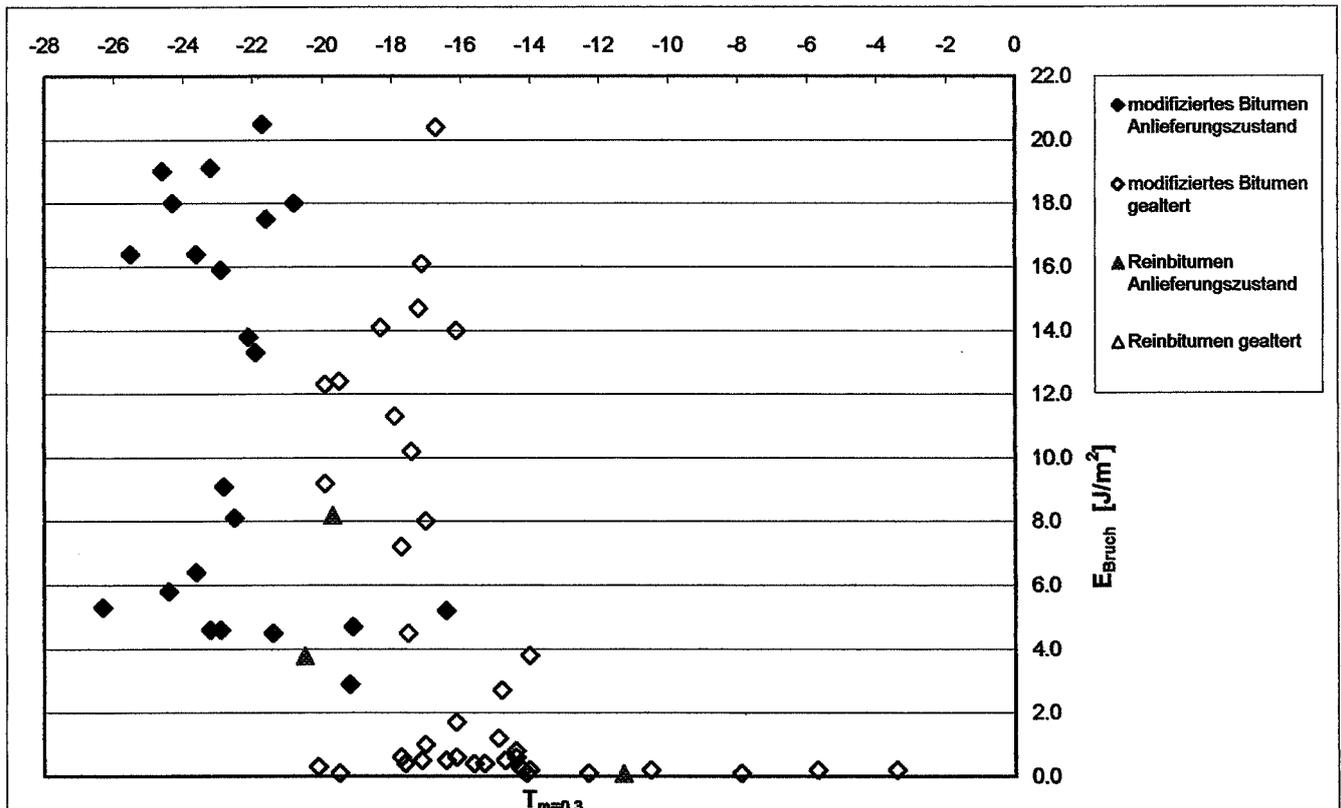


Abbildung A8.31

Diagramm Penetration / KDM  $E_{Bruch}$

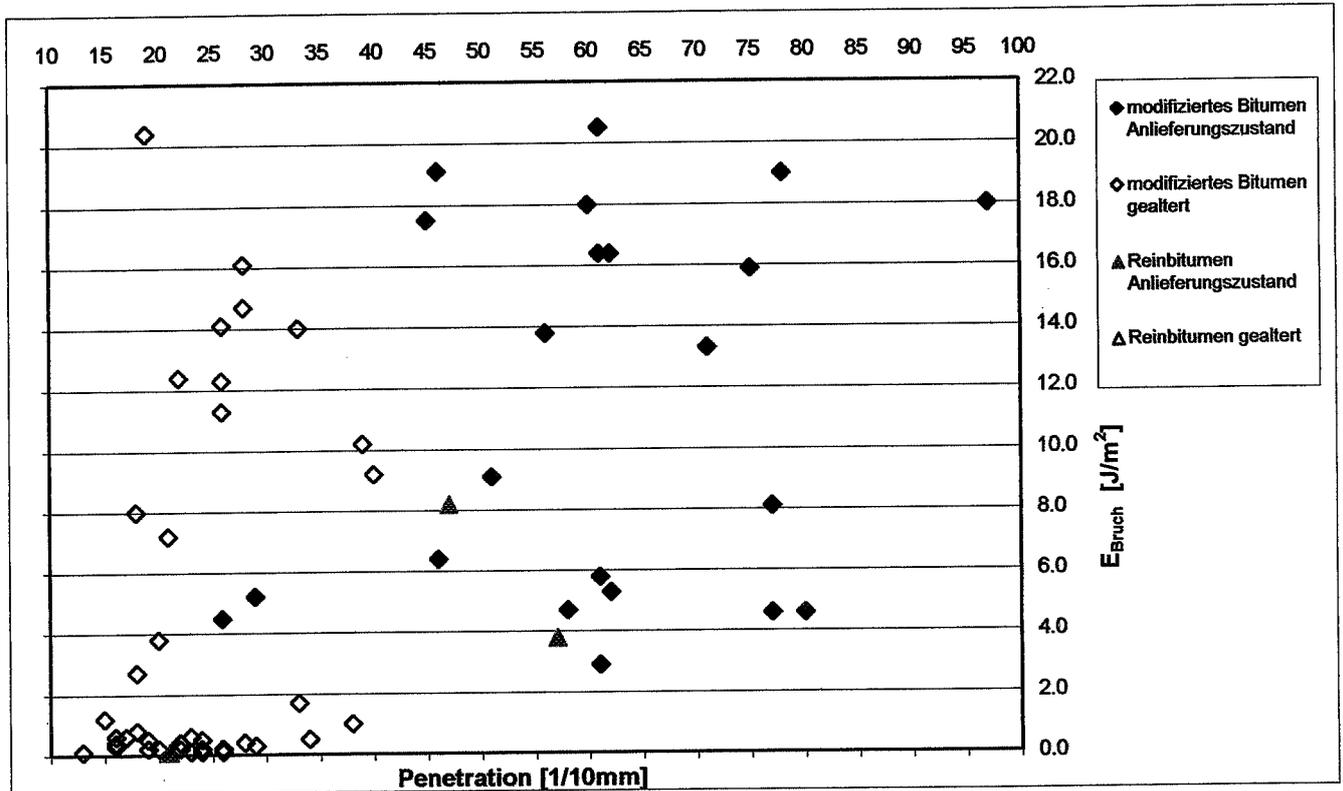


Abbildung A8.32

Diagramm EP RuK / KDM  $E_{Bruch}$

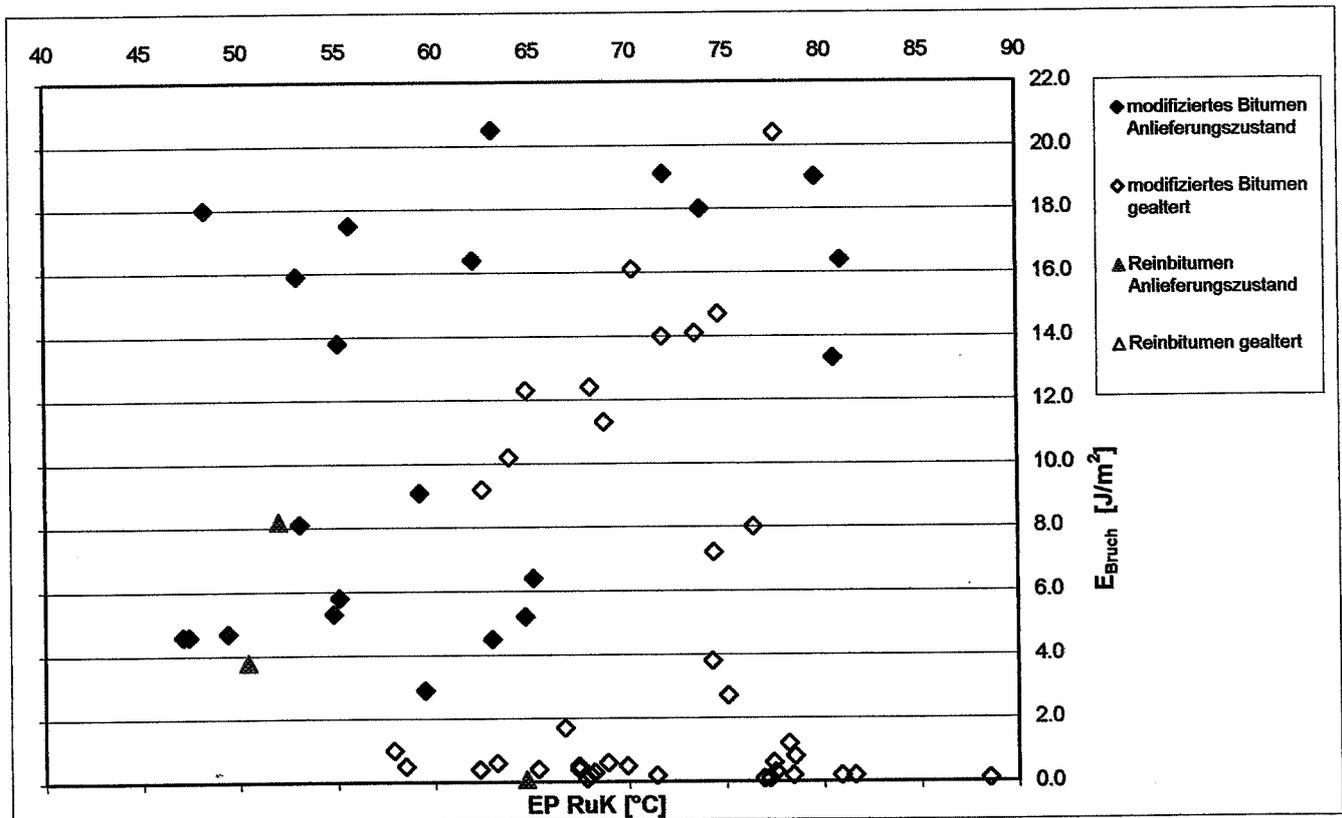


Abbildung A8.33

Diagramm BP Fraass / KDM  $E_{Bruch}$

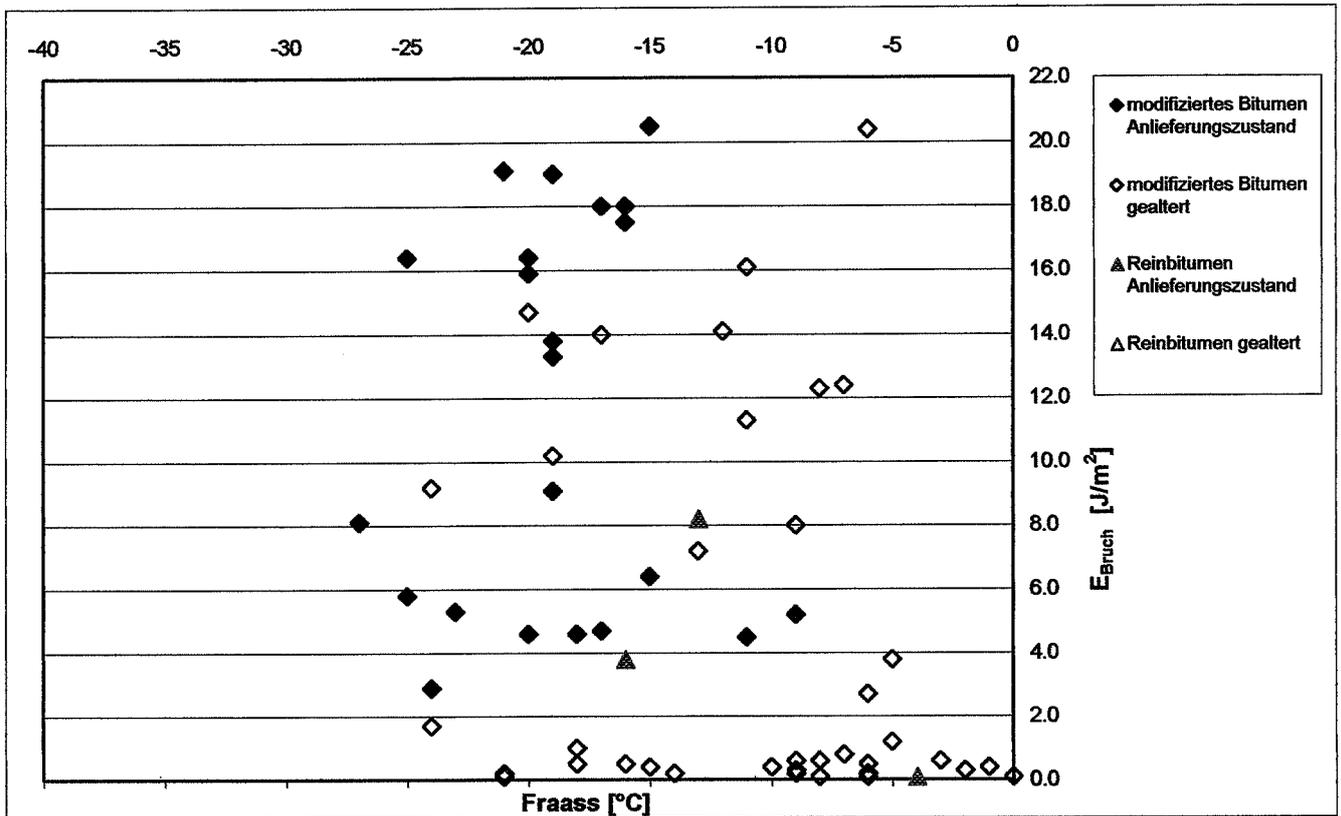


Abbildung A8.34

Diagramm Elast. Rückstellung / KDM  $E_{Bruch}$

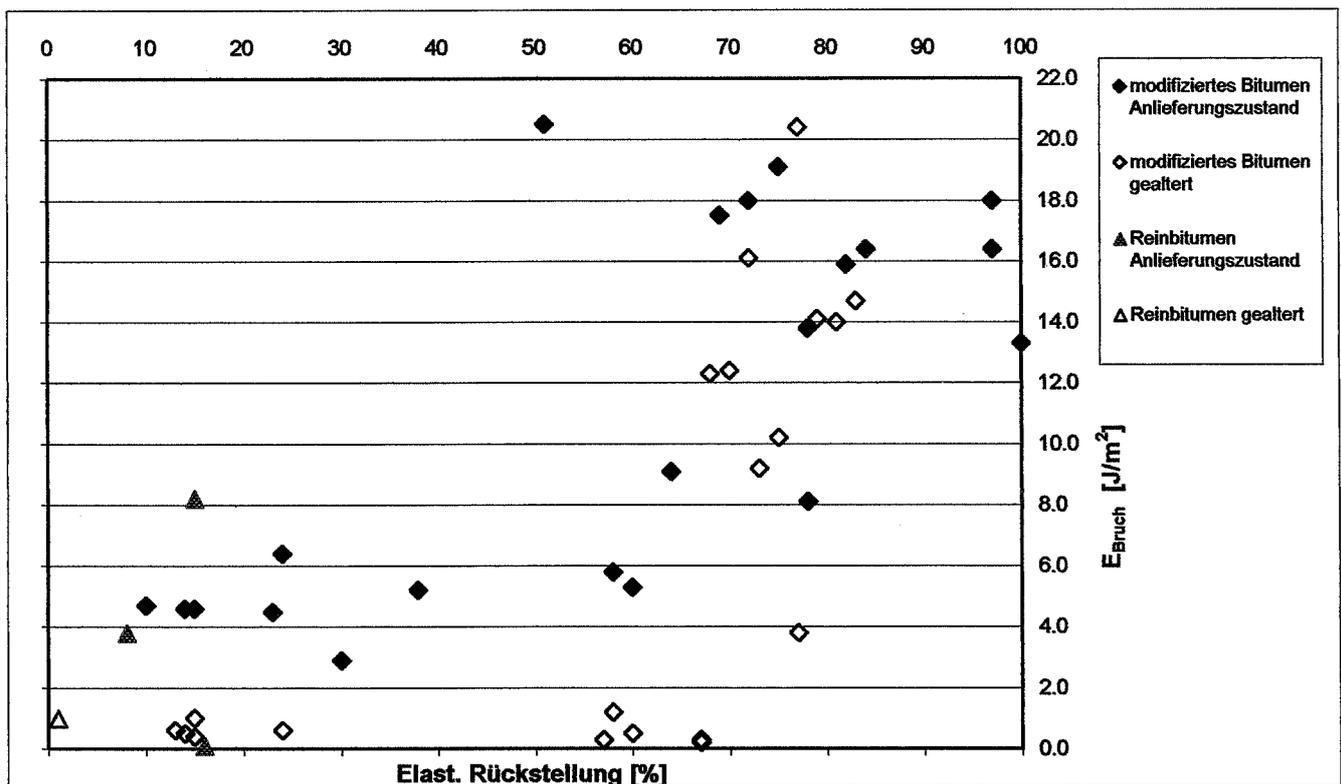


Abbildung A8.35

**KDM  $E_{max.Force}$  / Rissbildung beim Abkühlverhalten**

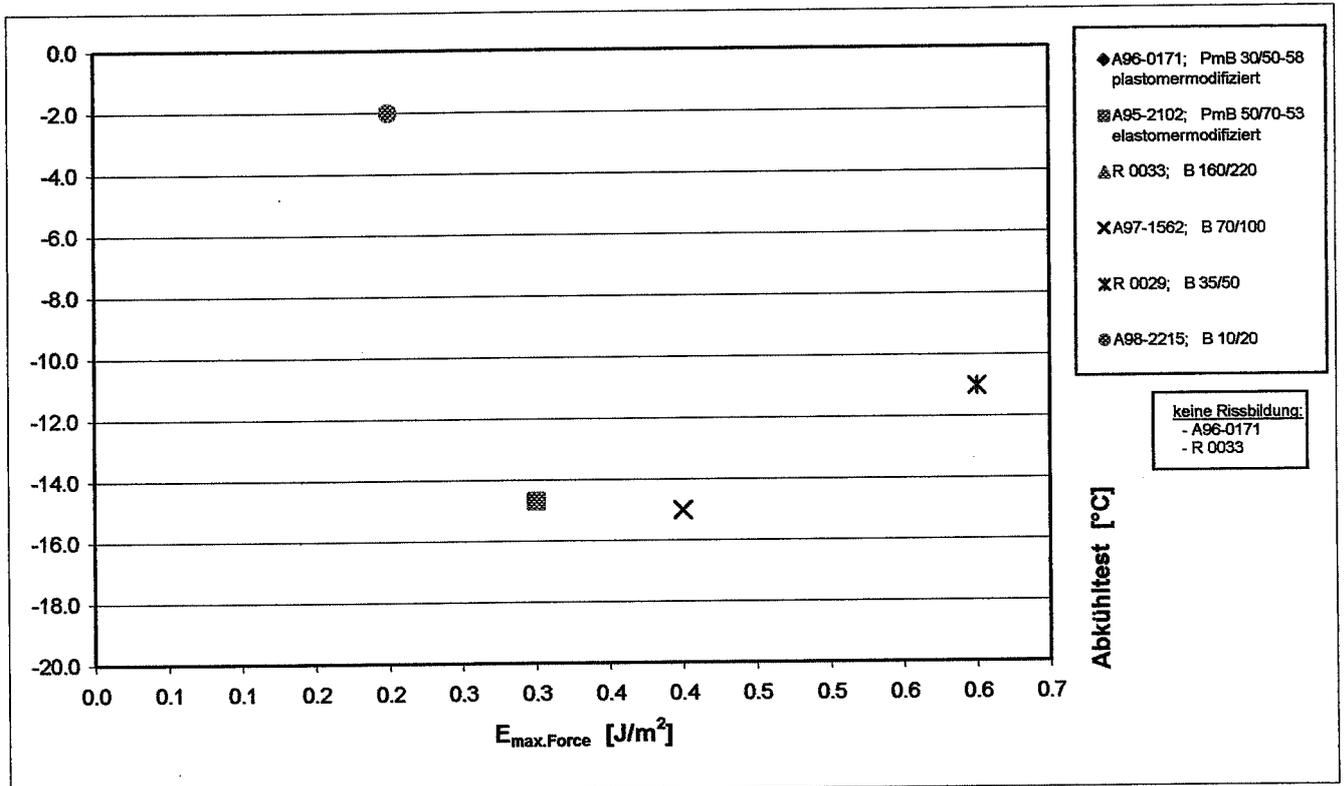


Abbildung A8.36

**KDM  $E_{Bruch}$  / Risstempertur bei Modulbestimmung**

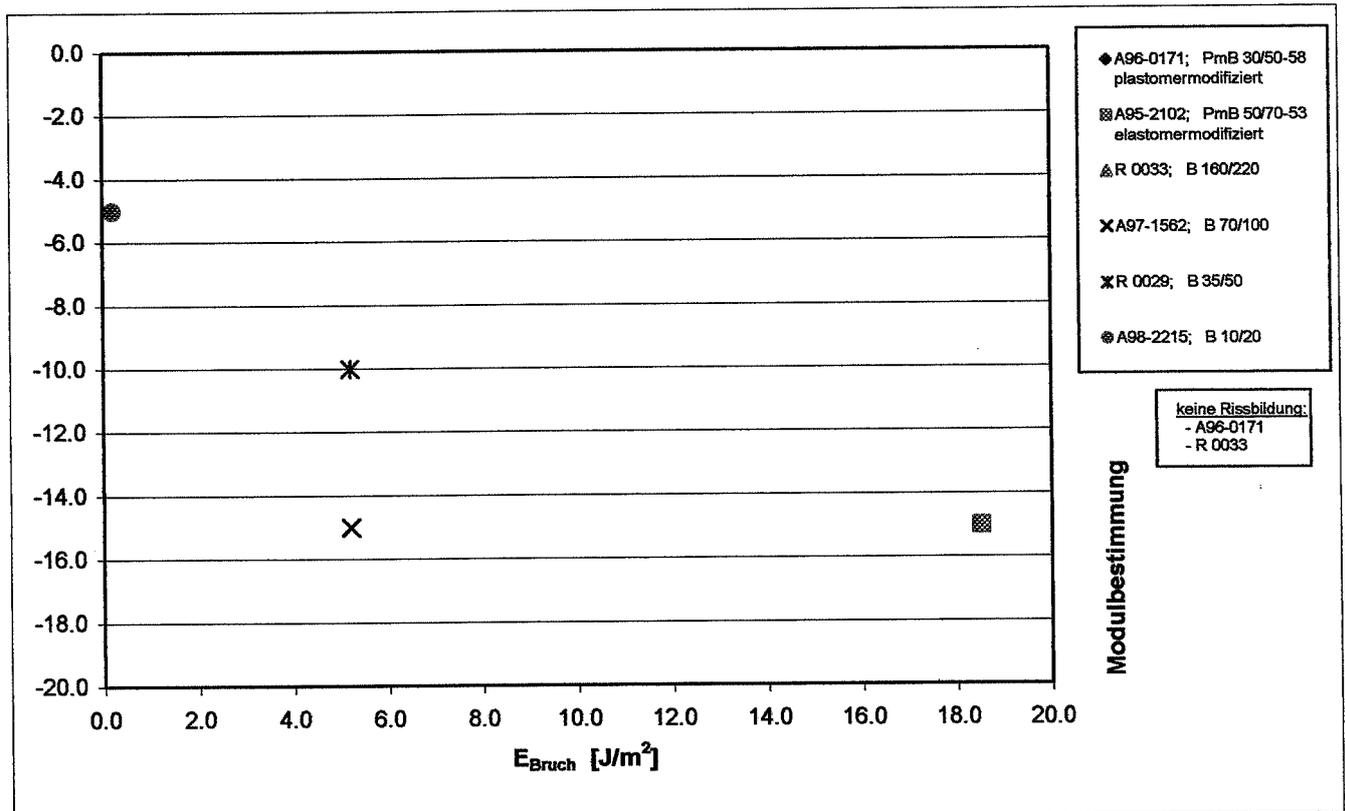


Abbildung A8.37

**Diagramm Bruchspannung** (Prüfgeschwindigkeit 10mm/min bei 5°C) / **KDM  $E_{max,Force}$**

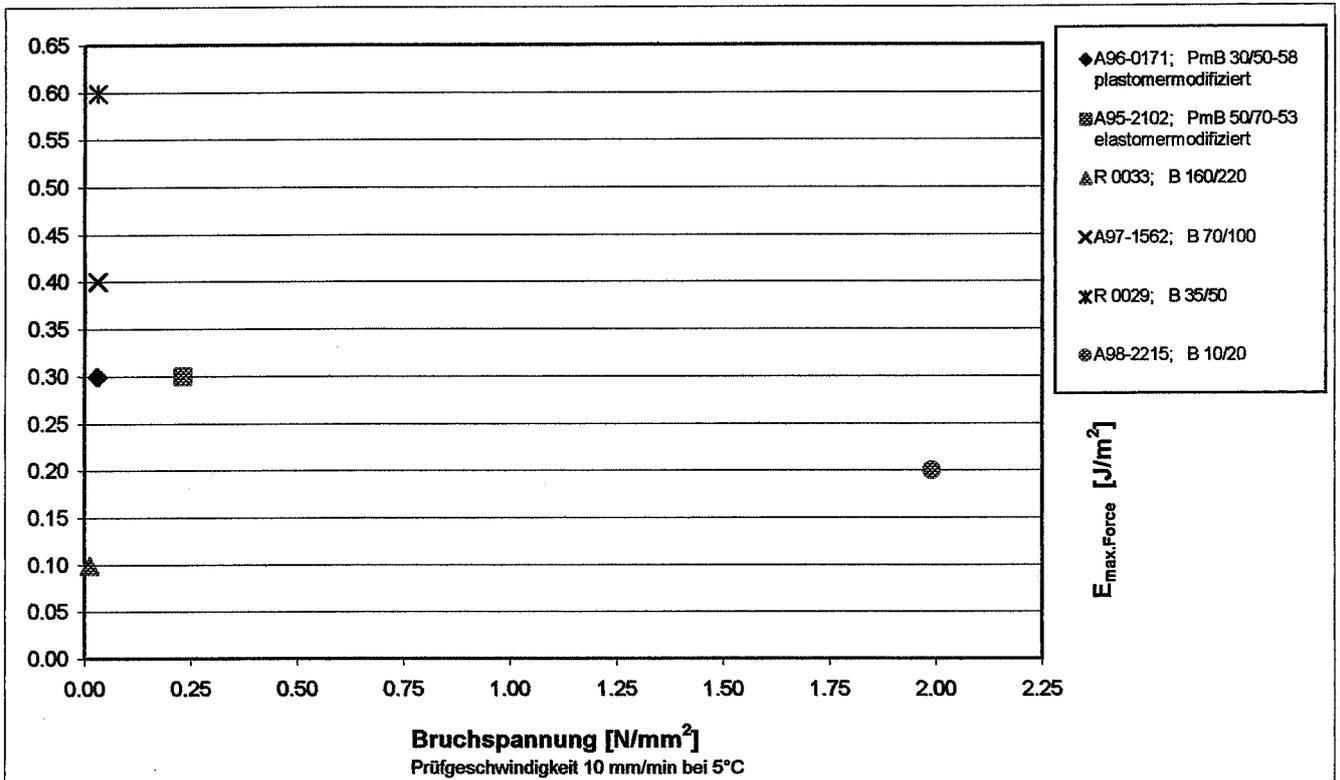


Abbildung A8.38

**Diagramm Bruchspannung** (Prüfgeschwindigkeit 10mm/min bei 5°C) / **KDM  $E_{Bruch}$**

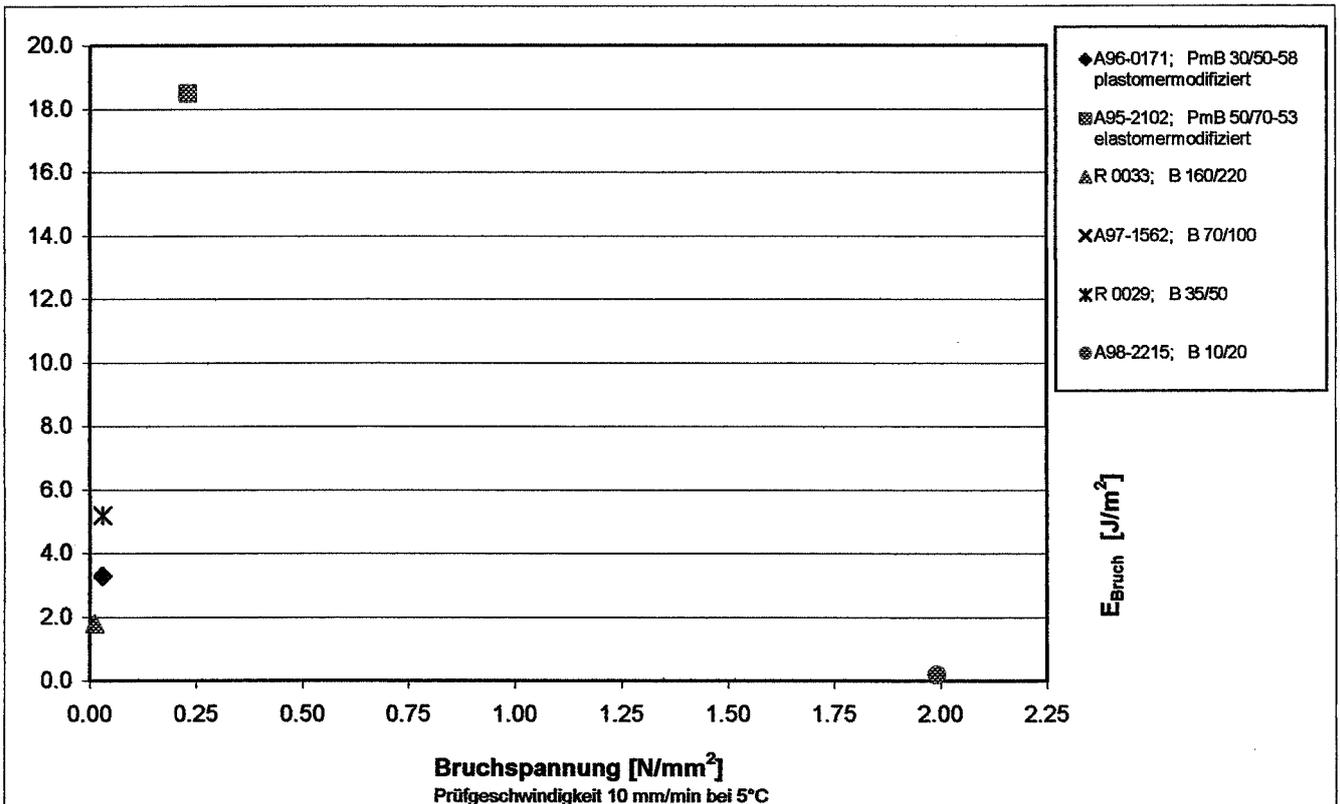


Abbildung A8.39

Diagramm Fließspannung (Prüfgeschwindigkeit 10mm/min bei 5°C) / KDM  $E_{max,Force}$

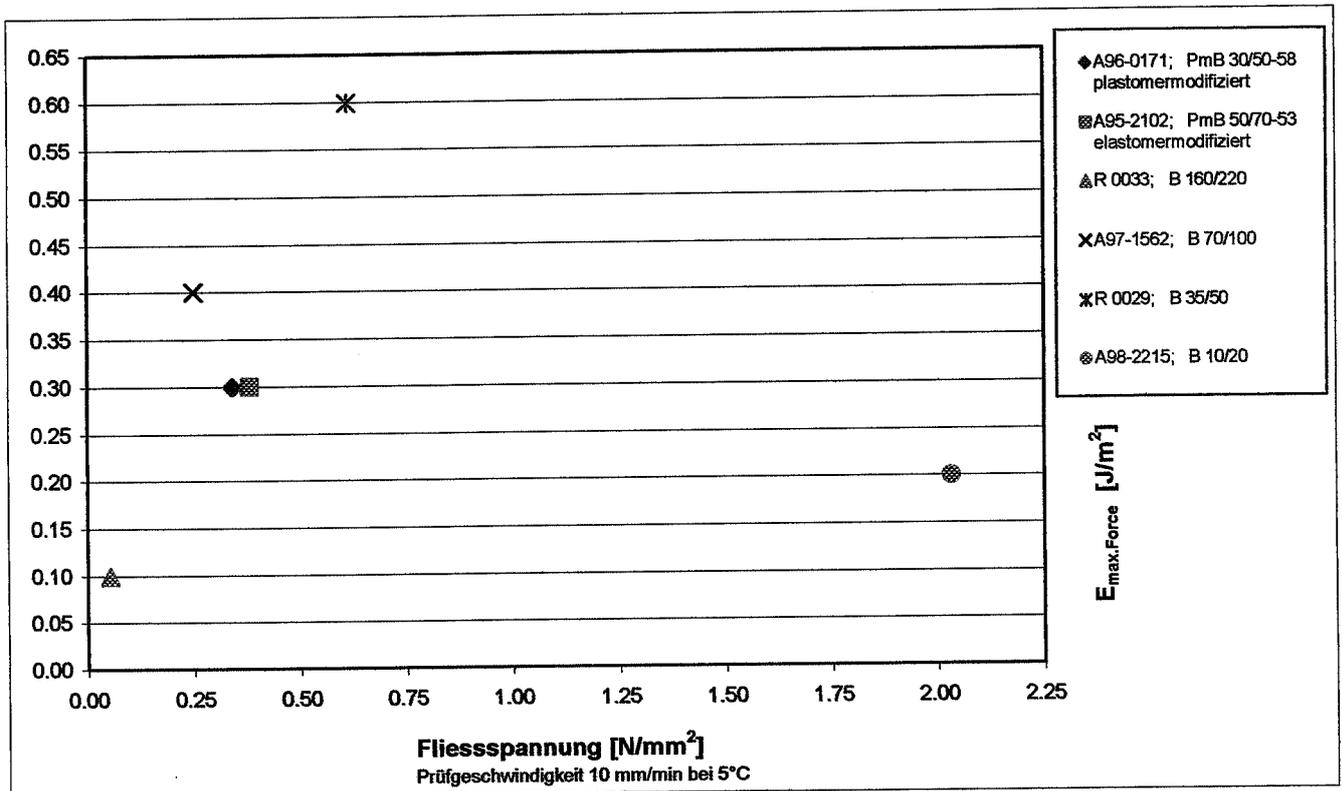


Abbildung A8.40

Diagramm Fließspannung (Prüfgeschwindigkeit 10mm/min bei 5°C) / KDM  $E_{Bruch}$

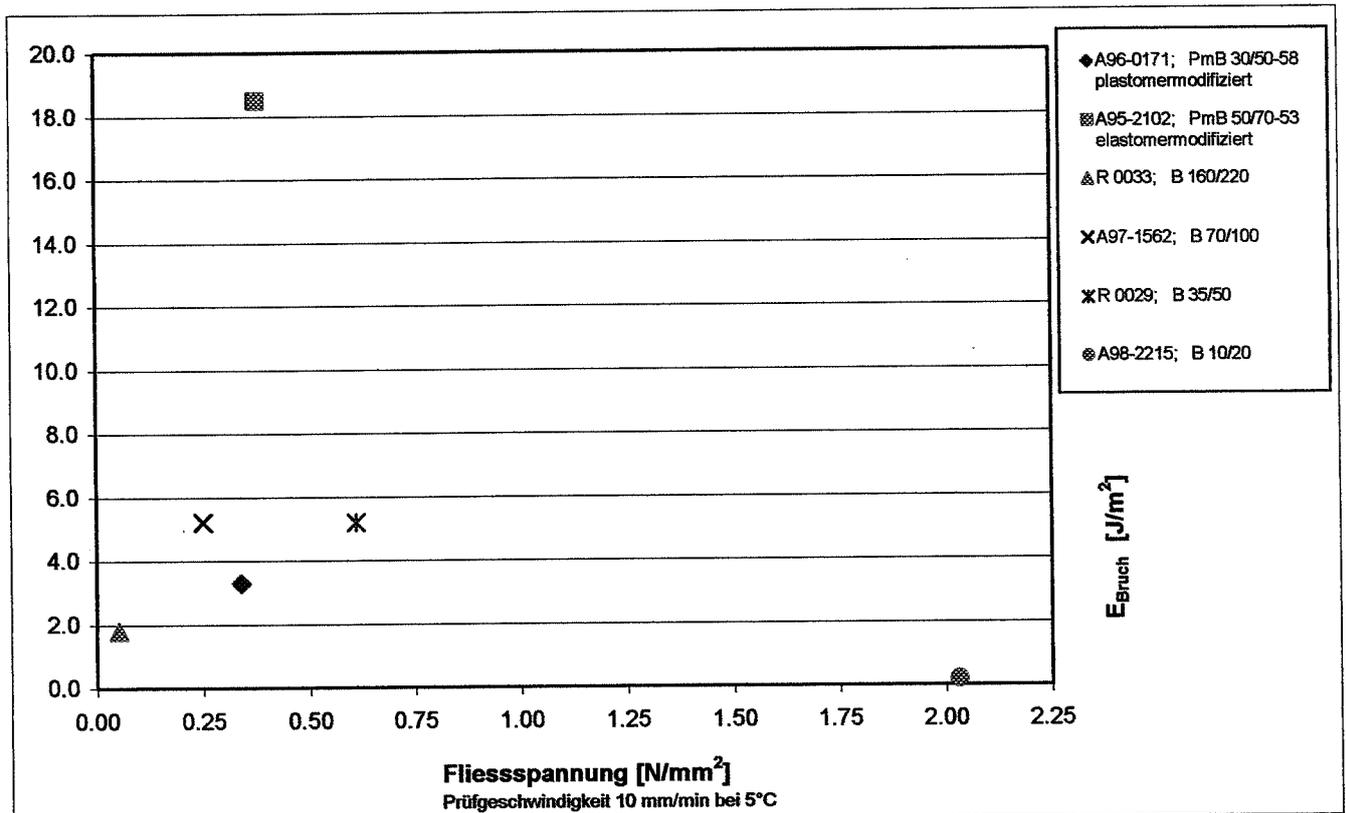


Abbildung A8.41

**Diagramm Bruchspannung** (Prüfgeschwindigkeit 100mm/min bei 5°C) / **KDM  $E_{max.Force}$**

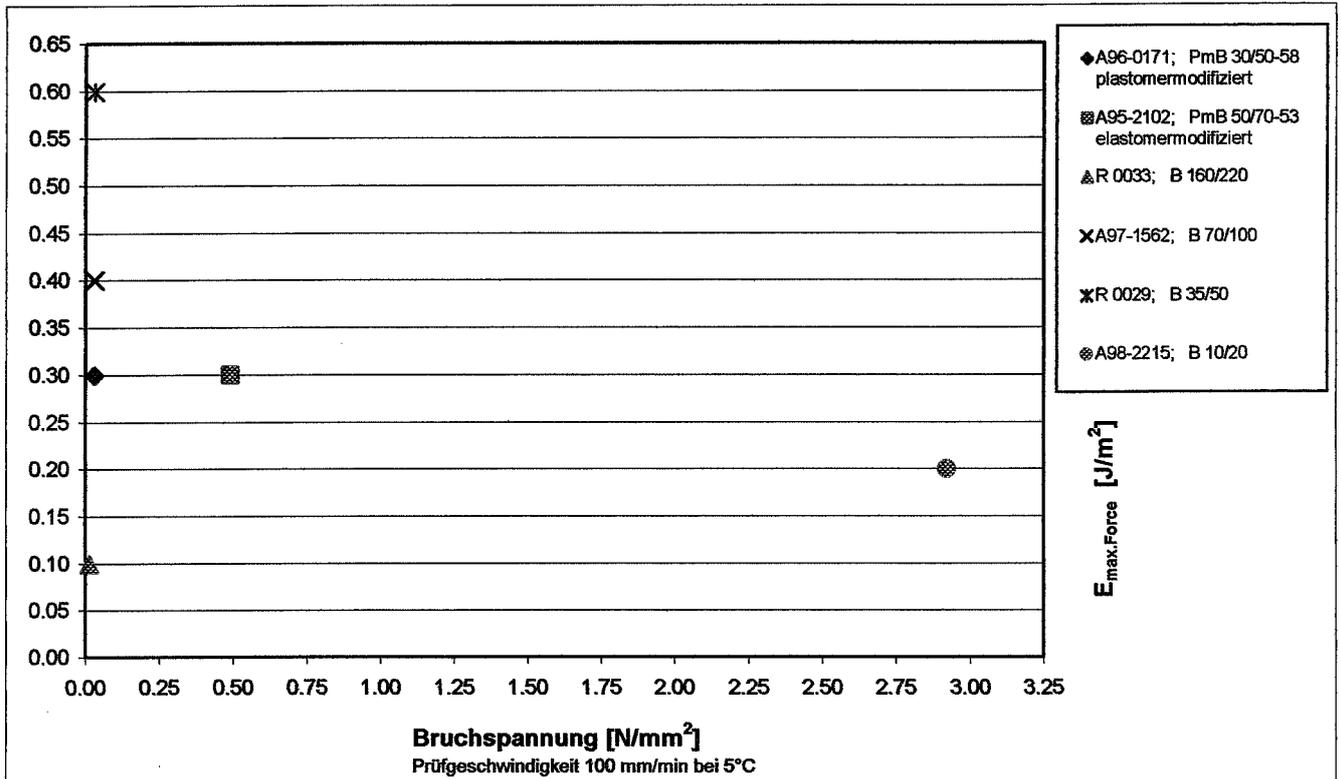


Abbildung A8.42

**Diagramm Bruchspannung** (Prüfgeschwindigkeit 100mm/min bei 5°C) / **KDM  $E_{Bruch}$**

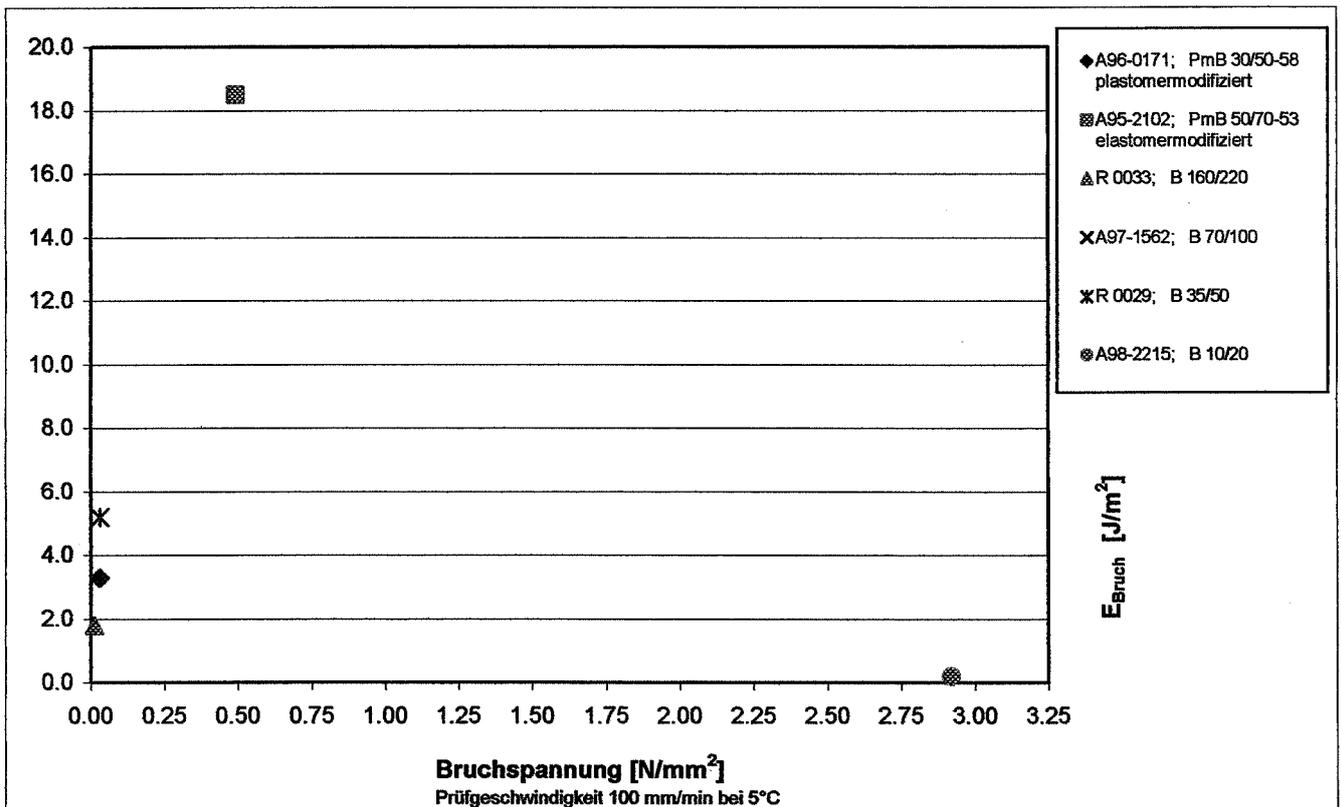


Abbildung A8.43

Diagramm Fließspannung (Prüfgeschwindigkeit 100mm/min bei 5°C) / KDM  $E_{max,Force}$

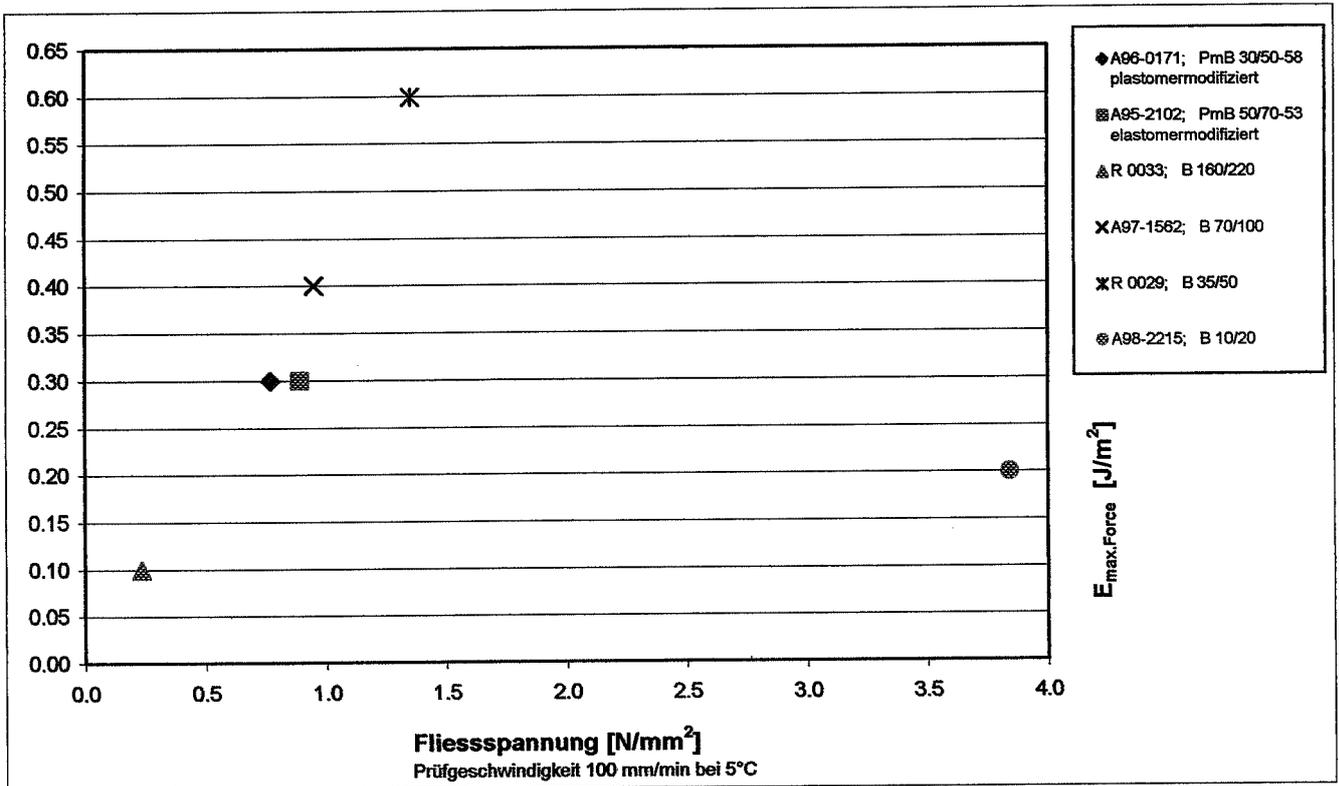


Abbildung A8.44

Diagramm Fließspannung (Prüfgeschwindigkeit 100mm/min bei 5°C) / KDM  $E_{Bruch}$

