

Optimierung der Kraftduktilitäts-Prüfung von PmB

Optimisation de l'essai force-ductilité pour Bmp

**IMP Bautech AG, Oberbuchsitzen
Ch. Angst, Dr. sc. techn.**

**Forschungsauftrag 13/99 auf Auftrag der
Verreinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)**

Juni 2001

Optimierung der Kraftduktilitäts-Prüfung von PmB

Optimisation de l'essai force-ductilité pour Bmp

**Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
Bundesamt für Strassen
Forschungsauftrag 13/99**

Ch. Angst, Dr. sc. techn., IMP Bautest AG, Oberbuchsitzen

INHALTSVERZEICHNIS

1. ZUSAMMENFASSUNG	2
2. ZIELSETZUNG	4
3. VALIDIERUNG DER PRÜFMETHODE	5
3.1 Zum Begriff der Validierung	5
3.2 Vorgehen	5
3.3 Prüfgeschwindigkeit	6
3.4 Temperatur	6
3.5 Formen	9
3.6 Berechnung der Energie	15
4. VERGLEICHSUNTERSUCHUNGEN	21
4.1 Kleiner Ringversuch	21
4.2 Bestimmung der Wiederholbarkeit	24
4.3 Vergleich Kraftduktilitäts-Prüfung mit dem direkten Zugversuch LCPC	25
5. VORSCHLAG FÜR PRÜFMETHODE	27
6. LITERATUR	28
7. ANHANG	29

1. Zusammenfassung

Zum Zeitpunkt der Erarbeitung der Schweizer Norm für polymermodifizierte Bitumen SN 671 400 „Polymermodifizierte Bitumen (PmB) für Beläge; Anforderungen“ spielten die plastomermodifizierten PmB auf dem schweizerischen (und angrenzenden) Markt keine Rolle. Aus diesem Grunde konnte als einfache Prüfung zur Feststellung, ob ein Bindemittel modifiziert sei oder nicht, die elastische Rückstellung gewählt werden. Diese Prüfung ist ausschliesslich für elastomermodifizierte anwendbar.

In der Zwischenzeit hat sich die Marktsituation geändert; plastomermodifizierte PmB haben sich etabliert, ohne dass ein normiertes Prüfverfahren zu deren Beurteilung zur Verfügung steht.

Im Rahmen der europäischen Normierung beim CEN stand eine Beurteilung mittels Kraftduktilitäts-Prüfung im Vordergrund. Die altbekannte Duktilitätsprüfung (einfacher Zugversuch) wurde derart ergänzt, dass während der Prüfung ein Kraft-Weg-Diagramm aufgenommen wird. Allerdings war der Vorschlag nicht ausgereift und musste präzisiert werden.

Das Ziel der Forschungsarbeit besteht darin, die Parameter für die Durchführung des Versuches und das Auswerteverfahren eindeutig so festzulegen, dass zwischen modifizierten und nicht-modifizierten bituminösen Bindemitteln unterschieden werden kann.

Im Rahmen der Validierung der Prüfmethode wurden folgende Parameter untersucht:

- Versuchsgeschwindigkeit
- Prüfkörperform
- Prüftemperatur
- Berechnung der Energie

Die Untersuchung wurde mit Schwerpunkt auf die plastomermodifizierten Bindemittel durchgeführt, da sich schon im Vorfeld der Arbeit gezeigt hatte, dass elastomermodifizierte PmB sich sehr gut verhalten. Zu diesem Zweck wurden plastomermodifizierte PmB aus verschiedenen europäischen Ländern beschafft; es waren dies:

- England
- Spanien
- Finnland
- Frankreich

Durch Variation der verschiedenen Parameter konnte eine Prüfmethode festgelegt werden, die es erlaubt PmB von Standardbitumen zu unterscheiden und zwar unabhängig davon, ob die PmB mit Elastomeren oder Plastomeren modifiziert wurden. Die Wiederholbarkeit der Prüfmethode (ein Beobachter, ein Gerät) wurde bestimmt. Anhand einer Vergleichsuntersuchung mit 4 Labors konnte keine Vergleichbarkeit bestimmt werden; immerhin zeigte sich, dass die Labors zu sehr ähnlichen Ergebnissen kamen. Die festgelegte Prüfmethode wurde zusätzlich mit dem in Frankreich normierten direkten Zugversuch LCPC verglichen.

Résumé

Lors de l'élaboration de la norme suisse sur les bitumes modifiés aux polymères SN 671 400 „Bitumes modifiés aux polymères (Bmp) pour les enrobés; Exigences", les Bmp modifiés aux plastomères ne jouaient pas un rôle prédominant sur le marché suisse (et limitrophe). Pour cette raison l'essai de recouvrance élastique a été choisi comme essai simple, afin de déterminer si un bitume est modifié ou non. Cet essai est exclusivement applicable pour les bitumes modifiés aux élastomères.

Depuis la situation sur le marché s'est modifiée; les Bmp modifiés aux plastomères se sont établis, sans qu'aucune méthode d'essai normalisée pour leur analyse ne soit à disposition.

Dans le cadre de la normalisation européenne du CEN, l'essai de force-ductilité se trouve au premier plan. L'ancien essai de ductilité (essai simple de traction) a été complété de telle sorte, que durant l'essai, un diagramme force-déformation est enregistré. Il est vrai que la proposition n'était pas encore complètement aboutie et devait être encore précisée.

Le but du mandat de recherche consiste à fixer précisément les paramètres de l'exécution ainsi que celles du traitement des résultats, de telle sorte que l'on puisse différencier clairement un liant bitumineux modifié d'un non-modifié.

Dans le cadre de la validation de la méthode d'essai, les paramètres suivants ont été analysés :

- Vitesse d'essai
- Forme de l'éprouvette
- Température d'essai
- Calcul de l'énergie

L'analyse fut essentiellement exécutée sur des liants modifiés aux plastomères, car comme il a déjà été montré avant ce travail, les Bmp modifiés aux élastomères se comportent très bien. Pour cette raison, des liants modifiés aux plastomères ont été récoltés dans différents pays d'Europe, à savoir en:

- en Angleterre
- en Espagne
- en Finlande
- en France

Par la variation des différents paramètres, une méthode d'essai a pu être déterminée ; elle permet de différencier les Bmp des bitumes standards et cela indépendamment du fait que les Bmp soient modifiés aux élastomères ou aux plastomères. La répétabilité de la méthode d'essai (un laborantin, un appareil) a été déterminée. Suite à l'exécution d'essais comparatifs entre 4 laboratoires, la reproductibilité de la méthode d'essai n'a pu être définie; cependant il a pu être montré que les laboratoires sont parvenus à des résultats très semblables. La méthode d'essai retenue a été en plus comparée à l'essai de traction directe normalisé en France.

2. Zielsetzung

Mit den bisherigen relativ einfachen mechanischen Prüfungen im Baulabor ist es nicht möglich zwischen einem polymermodifizierten Bitumen und einem Reinbitumen zweifelsfrei zu unterscheiden. Die gängigste Methode "Elastische Rückstellung" [1] liefert rasche und zuverlässige Ergebnisse bei elastomermodifiziertem PmB, ist jedoch bei plastomermodifizierten Bindemitteln nicht anwendbar. Diese haben elastische Rückstellungen in der Größenordnung nicht-modifizierter Bitumen. Die Kraft-Duktilitätsprüfung ist geeignet um elastomer- und plastomermodifizierte PmB zu prüfen.

Der Entwurf der Euronorm "Bitumen and bituminous binders – determination of the tensile properties of modified bitumen by the force ductility method" [2] beschreibt die Versuchsdurchführung in ungenügender Art und Weise. Insbesondere wird die Wahl verschiedener Versuchsparameter offen gelassen.

Auch der Entwurf der Euronorm " Bitumen and bituminous binders – Determination of deformation energy of modified bitumen" [3] lässt zu viele Möglichkeiten offen.

Eine Präzisierung beider Prüfverfahren ist dringend erforderlich.

Zum Zeitpunkt der Erarbeitung der Schweizer Norm für Polymermodifizierte Bitumen (PmB) [4] spielten die plastomermodifizierten PmB auf dem schweizerischen (und angrenzenden) Markt keine Rolle. In der Zwischenzeit hat sich die Marktsituation geändert; plastomermodifizierte PmB haben sich etabliert. Somit werden zur Zeit Produkte eingesetzt, bei denen kein normiertes Prüfverfahren besteht, mit welchem festgestellt werden kann, ob sie wirklich modifiziert sind oder nicht.

Erste Vorversuche sowie Bestrebungen im Ausland (vor allem Spanien) haben gezeigt, dass die Kraftduktilitäts-Prüfung zur Lösung des Problems beitragen könnte.

Das Ziel der Forschungsarbeit besteht darin, die Parameter für die Durchführung des Versuches und das Auswerteverfahren eindeutig so festzulegen, dass zwischen modifizierten und nicht-modifizierten bituminösen Bindemitteln unterschieden werden kann.

Definitionen:

Duktilität:	Dehnbarkeit eines bituminösen Bindemittels in einem Zugversuch unter definierten Bedingungen
Kraftduktilität:	Dehnbarkeit bei gleichzeitiger Kraftmessung
Energie:	Fläche unter der Weg-Kraftkurve

3. Validierung der Prüfmethode

3.1 Zum Begriff der Validierung

Unter Validierung versteht man das Überprüfen einer Methode auf ihre charakteristischen Eigenschaften wie ihre Stärken und Schwächen. Ebenso auf Einflüsse, welche diese Eigenschaften verändern und in welche Richtung diese bei welchem Einfluss verändert werden. Schlussendlich kann dann eine Aussage gemacht werden, welcher Kennwert wie und mit welcher Präzision bestimmt werden kann (ISO-Definition).

Methoden-Validierung grenzt immer sehr nahe an die Methodenentwicklung. Daher ist es oft nicht einfach zu sagen wo die Entwicklung aufhört und die Validierung beginnt. Viele der Methodenparameter, welche mit der Validierung in Zusammenhang stehen, wurden bereits bei der Entwicklung evaluiert. Die Validierung ist so zu wählen, dass mit ausreichender Sicherheit eine Aussage über die Tauglichkeit einer Methode gemacht werden kann. Eine Validierung kann eigentlich nie als abgeschlossen betrachtet werden.

Bei einer Validierung ist es wichtig, dass die Studien, die zur Ermittlung der Leistung einer Methode betrieben werden, mit den dafür geeigneten Gerätschaften und Proben durchgeführt werden.

3.2 Vorgehen

Im Rahmen der Validierung der Prüfmethode wurden folgende Parameter untersucht:

- Prüfgeschwindigkeit
- Prüftemperatur
- Formen der Prüfkörper
- Berechnung der Energie

Mit der festgelegten Prüfmethode soll anhand einer Vergleichsuntersuchung mit 3 bis 4 Labors die Robustheit der Prüfmethode untersucht werden. Ebenfalls soll die Wiederholbarkeit innerhalb des gleichen Labors festgelegt werden.

3.3 Prüfungsgeschwindigkeit

Die Dehngeschwindigkeit für die Durchführung der Kraft-/Duktilitätsprüfung wurde aufgrund der Machbarkeit in den meistens Strassenbaulabors festgelegt:

Die Kraft-/Duktilitätsprüfung wird in einem herkömmlichen Duktilometer durchgeführt. Mit diesem Prüfgerät wird auch die Duktilität [5] bestimmt. Diese Prüfung erfolgt bei einer Geschwindigkeit von 50 mm/Min. Es wurde festgestellt, dass die meisten Prüfgeräte keine Möglichkeit haben eine andere Prüfungsgeschwindigkeit zu wählen.

Aufgrund oben stehenden Überlegungen wurde keine labortechnische Validierung der Prüfungsgeschwindigkeit durchgeführt. Für das weitere Vorgehen wurde eine Geschwindigkeit von 50 mm/Min. festgelegt.

3.4 Temperatur

Für die Wahl der Prüftemperatur sind folgende Faktoren massgebend:

- Bei der gewählten Prüfungsgeschwindigkeit von 50 mm/Min. kann die Temperatur nicht allzu tief liegen, da ansonsten die meisten Bindemittel einen Spröbruch 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.

Tabelle 1: Zur Untersuchung des Einflusses der Temperatur wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

Probe	Probe-Nr.	Pen [$\frac{1}{10}$ mm]	RuK [°C]	Prüfform		Temperaturen [°C]
				ASTM	DIN	
PmB (P)	A97-1497	72	56,4	x		-5 / 0 / 5
PmB (P)	A97-1498	42	65,1	x		-5 / 0 / 5
PmB (E)	A99-2496	61	62,1	x	x	5 / 7 / 10 / 13
PmB (P)	A99-2472	61	63,1	x	x	5 / 7 / 10 / 13
Bitumen	A99-2418	57	50,4	x	x	5 / 7 / 10 / 13

PmB (P): plastomermodifiziertes Bitumen

PmB (E): elastomermodifiziertes Bitumen

Im Verlauf der Untersuchungen wurde festgestellt, dass der Einfluss der Temperatur unterschiedlich ist, je nachdem welche Energie berechnet wird:

- Energie bis zum Bruch des Prüfkörpers (Abbildung 1):
Bei einem EVA-modifizierten PmB kann ein deutliches Maximum bei 0°C festgestellt werden, während bei einem weiteren plastomermodifizierten PmB ein kontinuierlicher Anstieg beobachtet wird.
- Energie bis zur maximalen Kraft (Abbildung 2):
Die beiden plastomermodifizierten PmB's zeigen ein ähnliches Bild wie bei der Energie beim Bruch, jedoch mit vertauschten Rollen. Das EVA-modifizierte PmB zeigt innerhalb der geprüften Temperaturspanne kein Maximum.

Abbildung 1: Unterschiedliche Temperaturabhängigkeit zweier plastomermodifizierter PmB; Energie beim Bruch; ASTM - Form

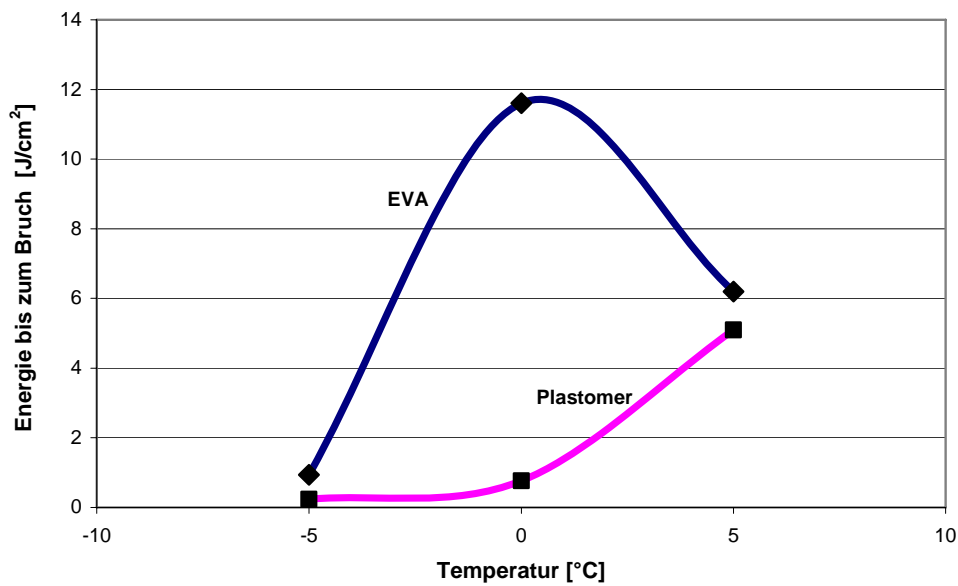
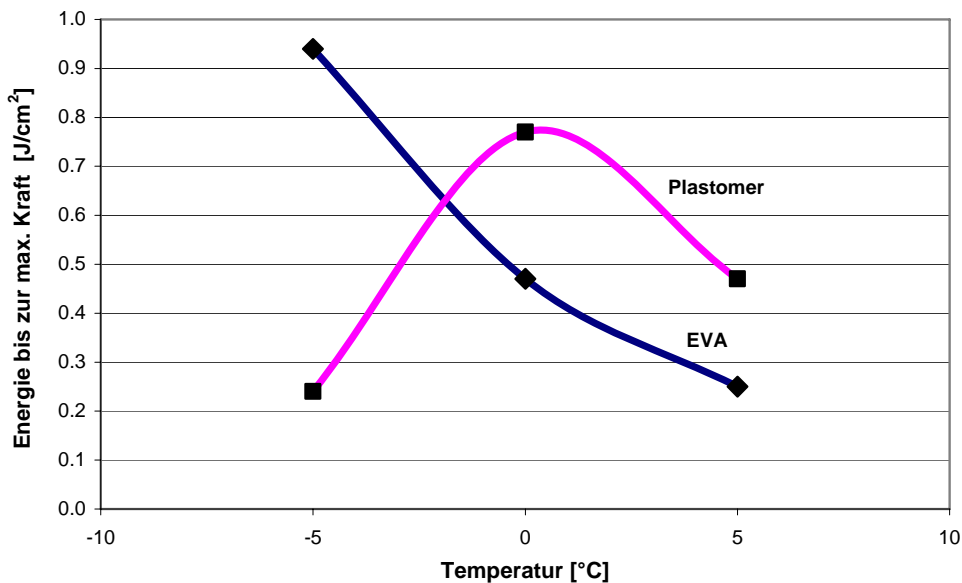


Abbildung 2: Unterschiedliche Temperaturabhängigkeit zweier plastomermodifizierter PmB; Energie bis zur max. Kraft; ASTM - Form



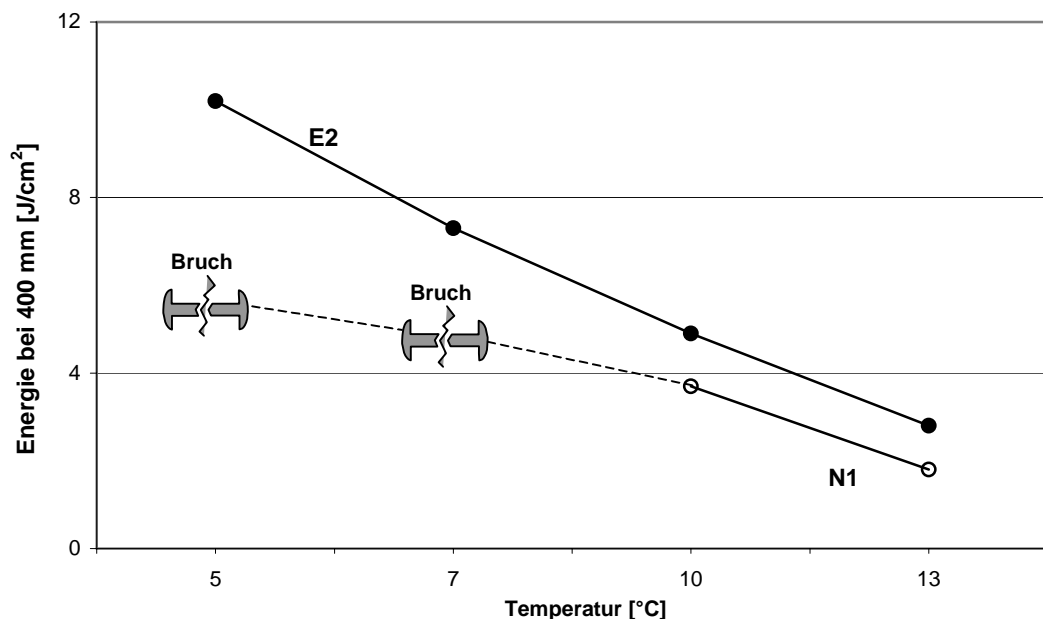
Für beide Energien (E_{Bruch} und E_{max}) wurden keine weiteren Untersuchungen durchgeführt, da relativ früh bereits feststand, dass diese beiden Auswertungen die Zielsetzungen des Forschungsauftrages nicht erfüllten (siehe Kapitel 3.5).

- Energie bei 40 cm Weg (Abbildung 3):

Sowohl beim elastomermodifizierten Bindemittel E2 als auch beim Reinbitumen N1 ist eine lineare Abhängigkeit von der Temperatur zu beobachten. Es kann auch festgestellt werden, dass bereits eine Temperaturdifferenz von 2°C einen markanten Einfluss auf die Energie hat.

Im Verlaufe der Erarbeitung der europäischen Norm zur Kraftduktilitäts-Prüfung [2] wurde ein Vorschlag diskutiert, bei welchem die Wahl zwischen den Temperaturen 5 bzw. 7°C und 10 bzw. 13°C offengelassen werden sollte. Die Temperaturen 5/10°C entsprechen einem EN-Vorschlag; die Temperaturen 7/13°C einer DIN-Vorstellung. Aufgrund des erkannten grossen Einflusses der Temperatur wurde im Rahmen der Euro-Normierung dank den Ergebnissen des vorliegenden Forschungsauftrages eine einheitliche Temperatur festgelegt.

Abbildung 3: Temperaturabhängigkeit zweier Bindemittel; Energie bei 400 mm Dehnweg; ASTM - Form.



3.5 Formen der Prüfkörper

In einem ersten Schritt wurden 4 verschiedene Prüfkörperformen untersucht (siehe auch Abbildung 4):

- H2: Beim Versuch "Essai de traction directe" gemäss LCPC wird diese Form für die Herstellung von Prüfkörper verwendet [6].
- DIN: Diese Form wird bei der Prüfung der Duktilität gemäss [5] als auch bei der Prüfung der elastischen Rückstellung gemäss [1] verwendet.
- SHRP: Im Versuch "Direct tension test" aus dem SHRP-Programm wurde eine spezielle Prüfform verwendet [7].
- ASTM: In den amerikanischen Norm wird die Duktilität mit dieser Form geprüft [8].

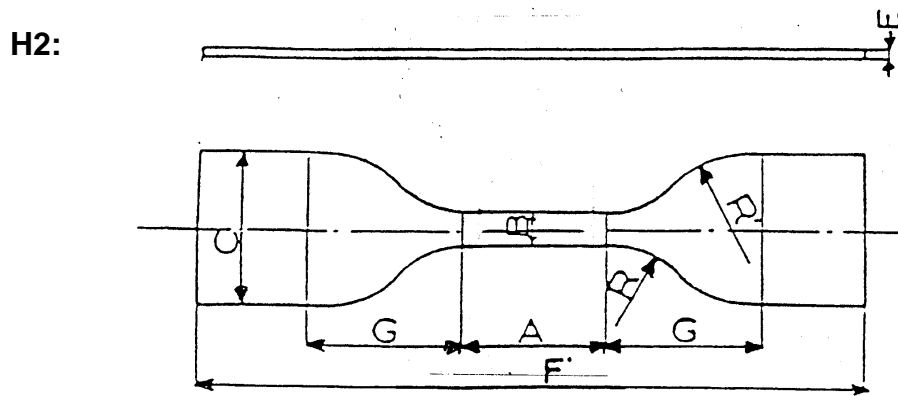
In der untenstehenden Abbildung 4 sind die verschiedenen Prüfformen einander gegenübergestellt.

Zur Untersuchung des Einflusses der Prüfkörperform wurde eine Versuchsreihe mit den in Tabelle 2 aufgeführten Bindemitteln durchgeführt:

Tabelle 2: Untersuchte Bindemittel

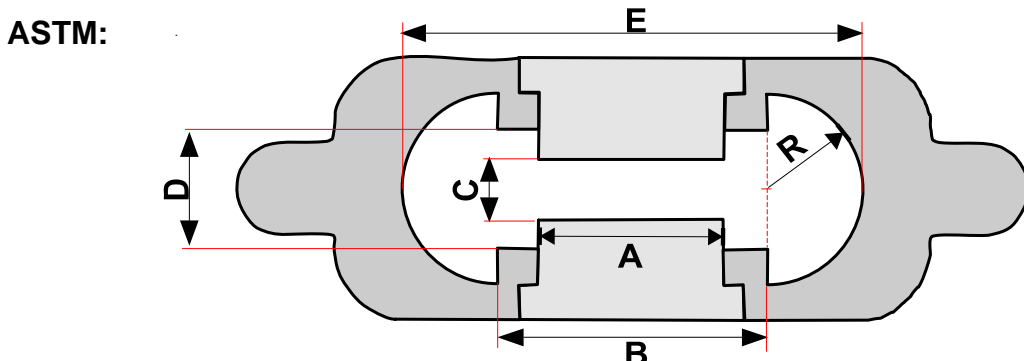
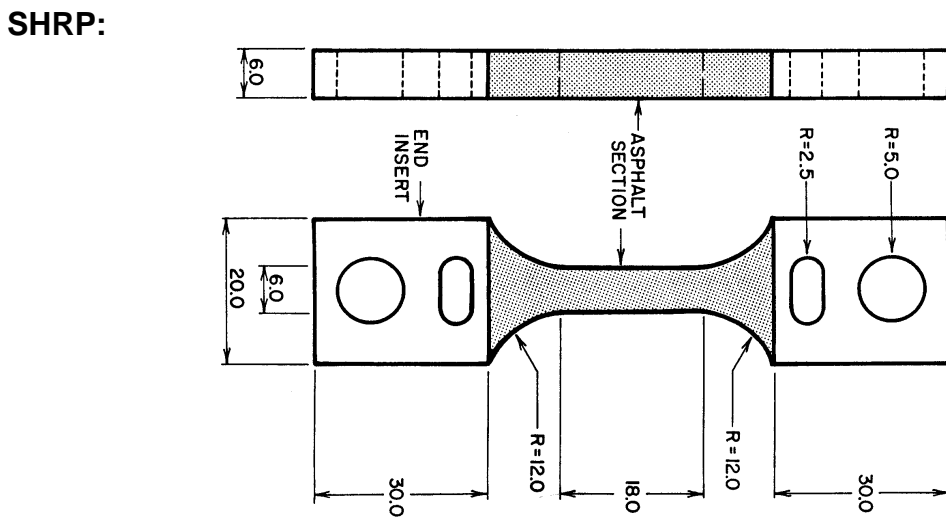
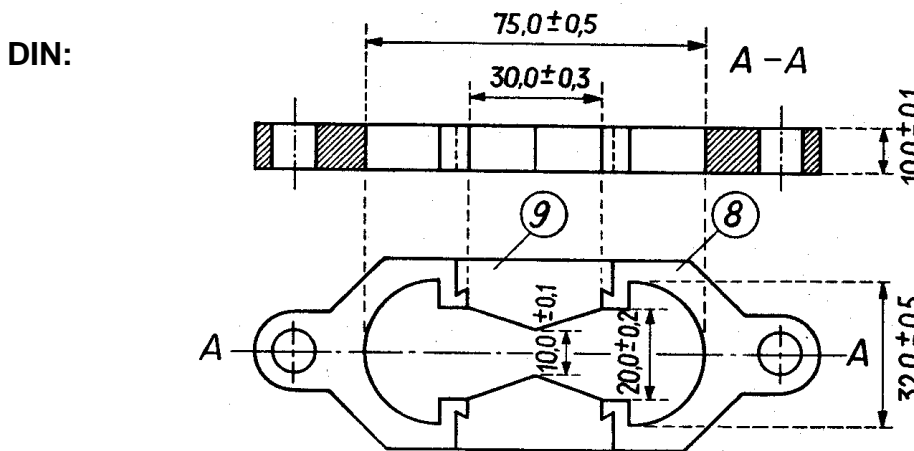
Bezeichnung	IMP-Nummer	Penetration	EP RuK
B 60/70	R0030	59	51,5
B 80/100	R0031	82	47,4
B 120/150	R0032	107	45,9
plast.mod. PmB	A95-1097	43	65,4
elast.mod. PmB	A93-0827	66	52,4
elast.mod. PmB	A95-2102	75	53,0

Abbildung 4: Verwendete Prüfformen; Angaben in mm



Dimensionen:

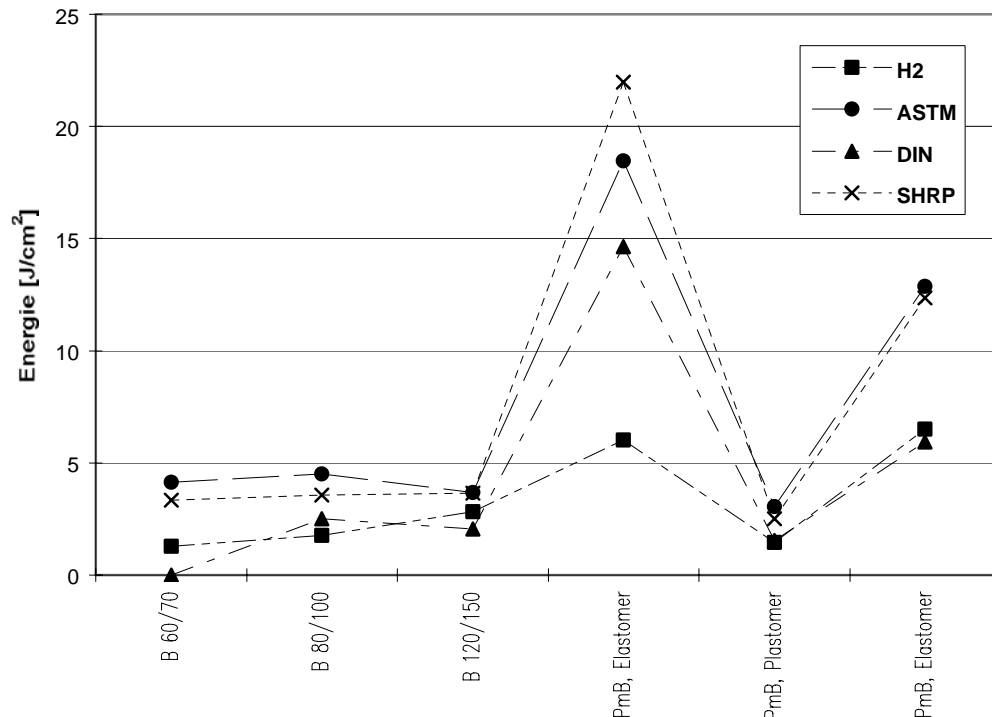
- A: $25 \pm 0,5$
- B: $4 \pm 0,1$
- E: $3 \pm 0,3$
- F: 75 ± 2
- C: $12,5 \pm 1$
- G: $12,5 \pm 1$
- R: $8 \pm 0,3$
- R': $12,5 \pm 0,3$



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: $10 \pm 0,1$

Abbildung 5:



Die Ergebnisse sind in der Abbildung 5 grafisch dargestellt; es wurde die Energie beim Bruch bestimmt. Aus dieser Abbildung lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Mit der gewählten Auswertung (E_{Bruch}) kann mit keiner der vier Formen zwischen plastomermodifiziertem Bindemittel und Reinbitumen unterschieden werden.
- **H2-Form:**
Die H2-Form erweist sich, weil sie so dünn ist, vom Handling her als ungeeignet. Die maximale Kraft ist bei allen geprüften Bindemitteln etwa gleich gross, das heisst die H2-Form ist nicht selektiv.
- **DIN-Form:**
Ein Nachteil der DIN-Form ist der Querschnitt, welcher nicht konstant ist. Einige Prüfkörper sind schon vor der eigentlichen Prüfung gebrochen (bei 5°C). Die DIN-Form zeigt die höchsten maximalen Kräfte, dies ist auf den höchsten Querschnitt aller geprüften Formen zurückzuführen.
- **ASTM-Form:**
Die ASTM-Form hat einen gleichbleibenden Querschnitt über die Länge des Prüfkörpers. Das Handling der Proben bereitet keine Probleme.
- **SHRP-Form:**
Diese Form hat ebenfalls einen gleichbleibenden Querschnitt. Die Formen sind jedoch nicht leicht zu giessen (Ecken). Die Formen sind gut ausformbar bei +5°C, eventuell ist dies anders bei -5°C oder noch tieferen Temperaturen. Mit dem Kriterium der Energie bis zum Bruch (5°C) ist bei der SHRP-Form die grösste Spreizung zwischen PmB-Elastomer und Reinbitumen zu erkennen.

Die mit der SHRP-Form durchgeführten Prüfungen ergeben bei allen Bindemitteln die grössten Energien. Mit Ausnahme der H2-Form bleibt die Reihenfolge der Formen bei allen Bindemitteln gleich: SHRP > ASTM > DIN.

Folgerungen:

Die H2-Form trennt die verschiedenen Bindemittel zu wenig auf. Die Reihenfolge SHRP > ASTM > DIN ist bei allen anderen Formen gleichbleibend.

Die Energie bis zum Bruch ist bei den elastomermodifizierten Bindemitteln viel grösser als bei den Reinbitumen.

Die plastomermodifizierten Bindemittel zeigen eine Energie bis zum Bruch, die etwa gleich gross ist wie bei den Reinbitumen.

In einem zweiten Schritt wurde anhand der Prüfung von 4 Bindemitteln die beiden Formen ASTM und DIN verglichen, wobei die Energie bei einem Dehnweg von 400 mm berechnet wurde. Die Temperaturen wurden dabei paarweise variiert:

- ASTM-Formen 5/10°C
- DIN-Form 7/13°C

Es wurden die in Tabelle 3 aufgeführten Bindemittel untersucht:

Tabelle 3: Untersuchte Bindemittel

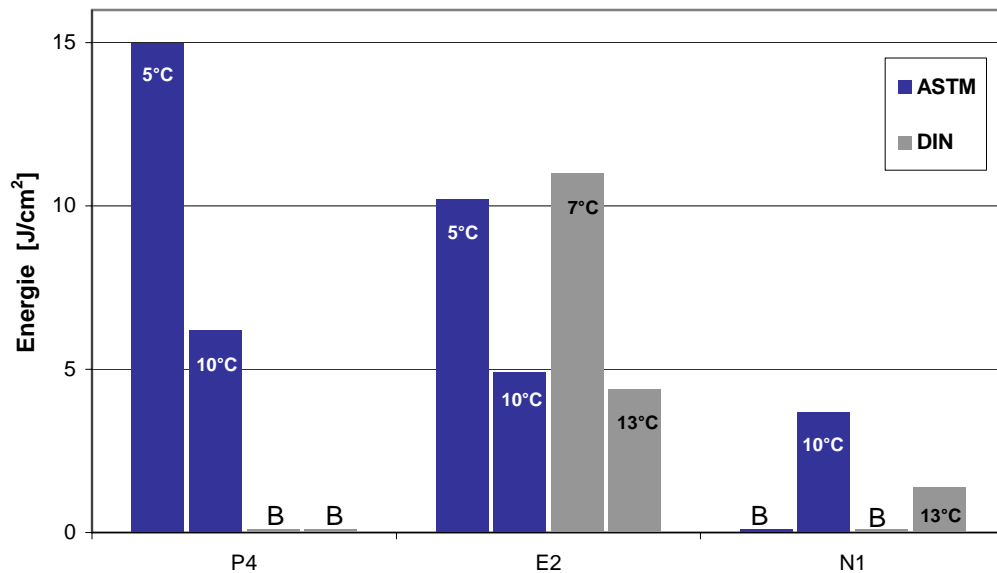
	Produkt	Herkunft	Proben-Nr.
P4	plastomermodifiziertes PmB 50/70	Spanien	IMP-Nr. A99-2472
E2	elastomermodifiziertes PmB 50/70	Spanien	IMP-Nr. A99-2496
N1	Bitumen 50/70	Frankreich	IMP-Nr. A99-2418
NH1	Spezial-Hartbitumen 10/30	Belgien	IMP-Nr. A00-0036

Aus der Abbildung 6 geht hervor:

- Bei elastomermodifizierten Bindemitteln ermöglichen beide Prüfformen die gleiche Aussage.
- Beim plastomermodifizierten PmB (P4) kann mit der DIN-Form keine Energie bei einem Dehnweg von 400 mm gemessen werden, da bereits vor Erreichen des Dehnweges von 400 mm ein Bruch auftritt.

Abbildung 6: Vergleich von Energien (Dehnweg 400 mm), die mit unterschiedlichen Konzepten gemessen wurden:

- DIN - Konzept: DIN - Form; Temperaturen 7 / 13 °C
- ASTM/CEN - Konzept: ASTM - Form; Temperaturen 5 / 10 °C



B: Bruch

Obwohl die Feststellungen auf der Untersuchung von wenigen Bitumensorten basieren, wurden keine weiteren Untersuchungen durchgeführt, da auf die Ergebnisse einer spanischen Arbeit zurückgegriffen werden konnte [9]. In einer nicht publizierten Versuchsreihe des Labors CEPESA, Madrid wurden folgende Ergebnisse erzielt:

**Tabelle 4: Ergebnisse einer spanischen Untersuchung;
Vergleich der DIN- und der ASTM-Form.**

Bindemittel	Energie [J/cm^2] zwischen 400 und 200 mm Dehnweg mit	
	ASTM-Form	DIN-Form
PmB 10/30-70 Plastomer	8,8	-
PmB 50/70-60 Plastomer	4,5	-
PmB 50/70-65 Elastomer	6,4	9,3
PmB 70/100-60 Elastomer	2,0	3,3

Auch diese Untersuchung zeigt, dass mit der DIN-Form nur elastomermodifizierte PmB geprüft werden können.

Beschluss:

Für die weiteren Arbeiten wurde die ASTM-Form gewählt.

3.6 Berechnung der Energie

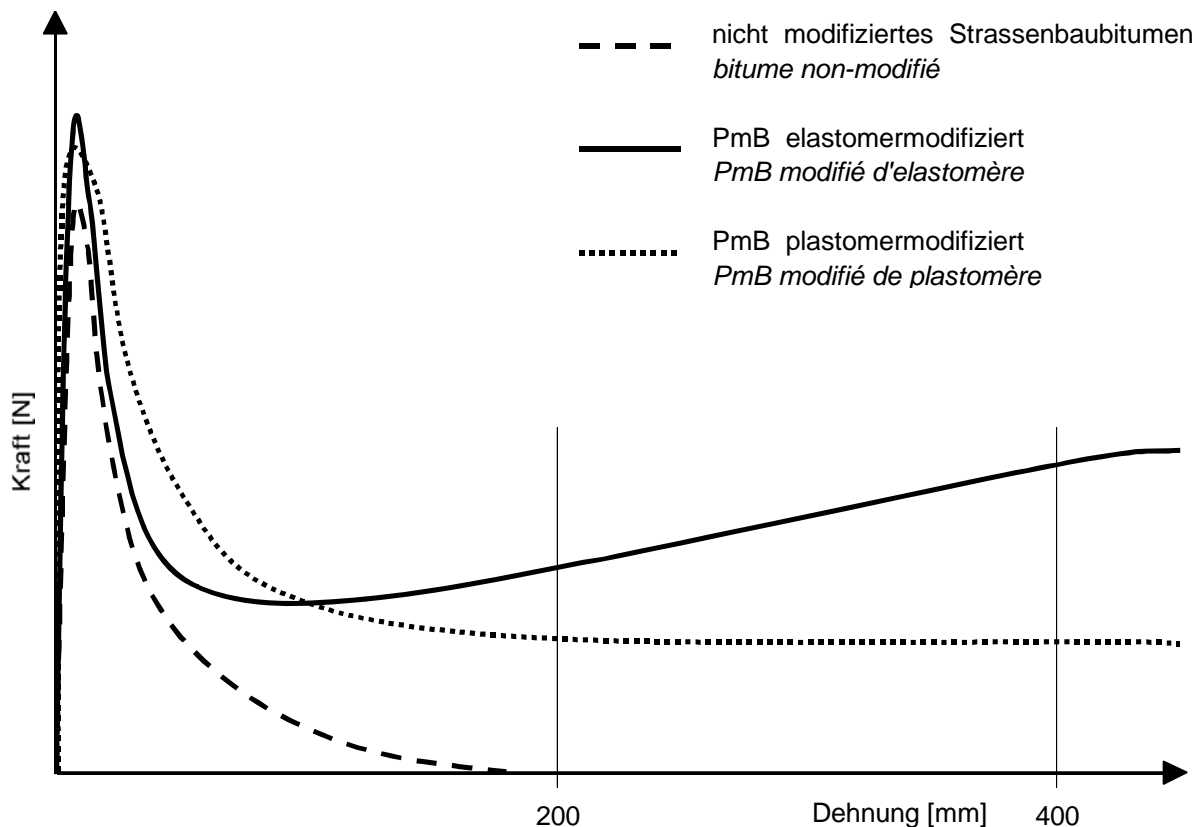
Die Fläche unter der Kraft-Weg-Kurve entspricht der für die Deformation erforderlichen Arbeit. Sie wird durch numerische Integration der Fläche mit einer geeigneten Software bestimmt. Das Ziel des Forschungsauftrages besteht nicht darin innerhalb der PmB's eine Klassierung bzw. Bewertung zu ermöglichen. Die Kraft-/Duktilitätsprüfung soll einzig und alleine dazu dienen festzustellen, ob ein Bitumen modifiziert sei oder nicht. Unter diesem Aspekt ergeben sich folgende Anforderungen an die Auswertung der Energie:

- Klare Unterscheidung zwischen modifizierten und nicht modifizierten Bindemittel (unabhängig davon ob es sich um ein plastomer- oder elastomermodifiziertes PmB handelt).
- möglichst grosses Signal

Im Abschnitt 3.3 wurde bereits gezeigt, dass die Auswertung der Energien E_{Bruch} sowie $E_{\text{maximale Kraft}}$ nicht zum Erfolg führen.

Normbitumen weisen 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 7 sind die typischen Verläufe dargestellt.

Abbildung 7: Typische Kraft-Weg-Kurven für die unterschiedlichen Bindemittel P (plastomermodifiziertes PmB), E (elastomermodifiziertes PmB) und B (Normbitumen)



Will man den Unterschied zwischen PmB und B hervorheben, muss die Energie über einen langen Weg gemessen werden. In einer Versuchsreihe wurden folgende Energien berechnet:

E_{200} : Energie bei einer Dehnstrecke von 200 mm
 E_{400} : Energie bei 400 von 400 mm
 $E_{400} - E_{200}$: Differenz beider Energien

Der Vollständigkeit halber sind die Energien E_{max} sowie E_{Bruch} im Anhang aufgeführt.

Die Kraftduktilitäts-Prüfung wurde bei 5°C durchgeführt. Kam es bei dieser Temperatur zu einem Bruch bevor der Prüfkörper 400 mm lang gedehnt werden konnte, wurde die Temperatur auf 10°C erhöht und der Versuch mit neuen Prüfkörpern wiederholt.

Da aus den früheren Arbeitsschritten bekannt war, dass es bei den plastomermodifizierten Bindemitteln schwieriger ist einen Unterschied zu den Reinbitumen hervorzuheben, wurden vor allem plastomermodifizierte PmB's untersucht.

Tabelle 5: Herkunft und Charakterisierung der verwendeten PmB

Probe	Herkunftsland	IMP-Nummer	Penetration	EP RuK
P1	England	A99-2347	60	73,8
P2	Finnland	A99-2348	78	79,7
P3	England	A99-2470	46	65,1
P4	Spanien	A99-2472	61	63,1
P5	England	A99-2405	45	55,7
P6	Spanien	A99-2471	29	64,7
E1	Deutschland	A99-2437	46	71,9
E2	Spanien	A99-2496	61	62,1
N1	Frankreich	A99-2418	57	50,4
NH1	Belgien	A00-0036	21	64,7
B 55/70	Belgien	A00-0035	47	52,0
B 120	Belgien	A00-0037	97	48,3

P1...P6: plastomermodifizierte Bitumen
 E1, E2: elastomermodifizierte Bitumen
 N1, NH1: Reinbitumen

Aus der Abbildung 8 fällt auf, dass das Reinbitumen B 55/70 einen erstaunlich hohen Wert aufweist. Offenbar reicht ein Dehnweg von 200 mm noch nicht aus um die PmB hervorzuheben.

Aus der Abbildung 9 ist ersichtlich, dass ein deutlicher Unterschied zwischen PmB's und Bitumen aufgezeigt werden kann. Beim PmB P3 musste die Kraft-/Duktilitätsprüfung bei einer Temperatur von 15°C durchgeführt werden, um einen Dehnweg von 400 mm zu erreichen.

Abbildung 8: Energie bei einem Dehnweg von 200 mm (B: Bruch)

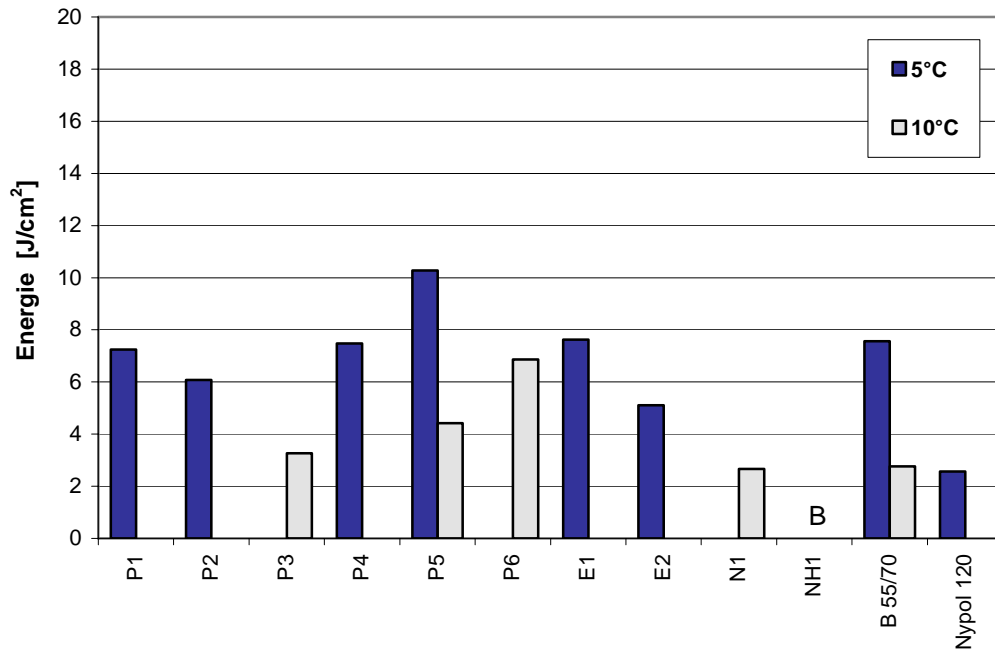
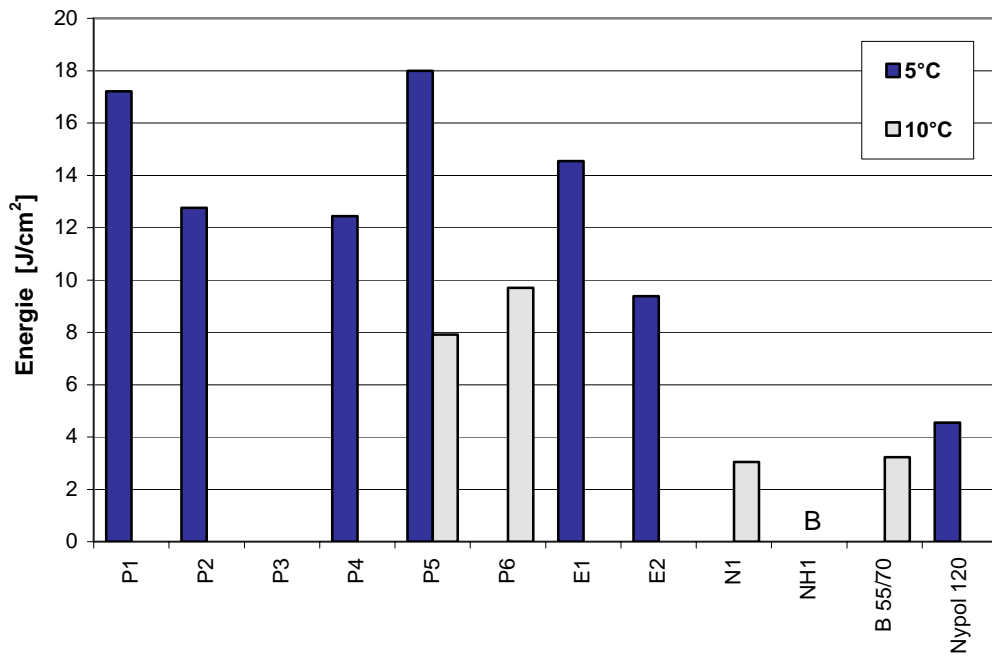


Abbildung 9: Energie bei einem Dehnweg von 400 mm (B: Bruch)



Aus der Abbildung 10 geht hervor, dass mit der Bildung der Differenz beider Energien $E_{400} - E_{200}$ ebenfalls sehr gut zwischen PmB und B unterschieden werden kann.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen ergeben sich grundsätzlich 2 Möglichkeiten um das Ziel des Forschungsauftrages zu erreichen:

- Berechnung der Energie bei einem Dehnweg von 400 mm
- Berechnung der Energie, welche auf dem Dehnweg von 200 bis 400 mm erforderlich ist um den Prüfkörper zu dehnen ($E_{400} - E_{200}$)

Abbildung 10: Energie bei einem Dehnweg von 400 mm abzüglich Energie bei einem Dehnweg von 200 mm. (Per Definition ergeben sich negative Zahlen falls bei einem Dehnweg von 400 mm keine Energie gemessen werden konnte; da der Prüfkörper vor Erreichen des Dehnweges brach).

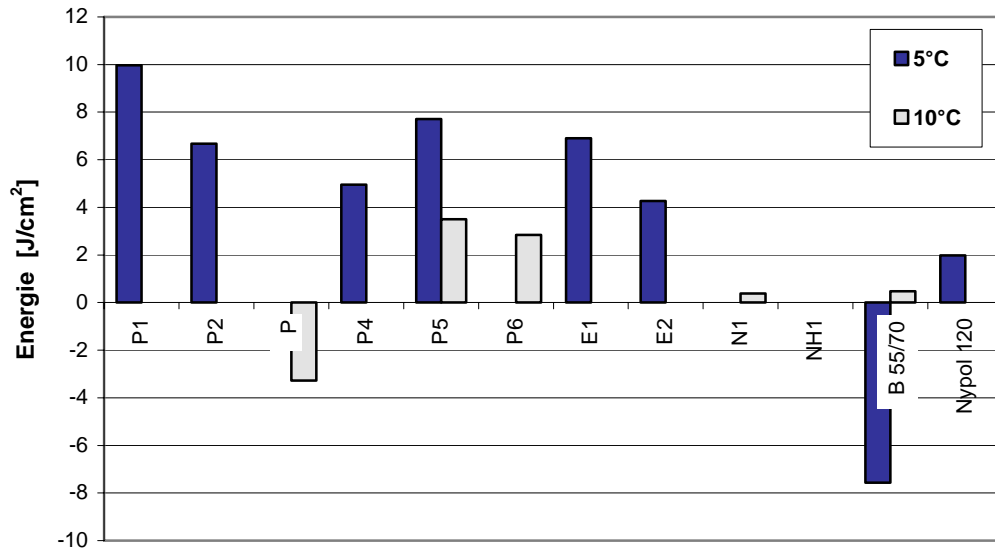


Tabelle 6: Ergebnisse einer spanischen Untersuchung (Bestimmung der Kraft-Duktilität mit ASTM-Form bei +5°C / 50 mm/Min.)

Bindemittel	Energie bei einem Dehnweg von		E ₄₀₀ -E ₂₄₀ [J/cm ²]
	400 mm [J/cm ²]	240 mm** [J/cm ²]	
B 40/50	8,2 *	7,9	0,3
B 80/100	3,6	3,4	0,2
B 150/200	1,6	1,5	0,1
PmB 35/50	18,3	11,3	7,0
PmB 55/70 (plast.)	11,4	8,1	3,3
PmB 55/70 (elast.)	14,7	7,6	7,1
PmB 55/70 (elast.)	15,7	9,5	6,2
PmB 80/130	6,8	4,0	2,8
PmB 150/200	3,0	1,6	1,4

* Bruch bei 2 von 3 Prüfkörpern

** Die Energie bei einem Dehnweg von 200 mm liegt nicht vor.

In der Tabelle 6 sind die Ergebnisse einer spanischen Untersuchung [9] aufgeführt. Daraus geht hervor, dass sehr weiche PmB (PmB 150/200) bei einem Dehnweg von 400 mm tiefere Energien aufweisen als (härtere) Reinbitumen. Bei der Energiedifferenz E₄₀₀ - E₂₄₀ ergibt sich eine klarere Unterscheidung zwischen PmB und Reinbitumen. Die Differenz E₄₀₀-E₂₀₀ konnte leider nicht ermittelt werden, die in der Tabelle 6 berechnete Energie E₄₀₀-E₂₄₀ zeigt mit genügender Deutlichkeit auf, dass die Energie bei 400 mm Dehnweg (E₄₀₀) für die Unterscheidung modifiziert - nicht modifiziert nicht befriedigt.

An einem extrem harten PmB (IMP-Nr. A00-0322) wurde eine Reihe Kraftduktilitäts-Prüfungen bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Das untersuchte PmB (elastomer-modifiziert) wies folgende Kenndaten auf:

Penetration	25°C	[¹ / ₁₀ mm]	17
Erweichungspunkt RuK		[°C]	67,7
Penetrationsindex PI			+0,2
Brechpunkt Fraass		[°C]	-4

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 7 aufgeführt:

Tabelle 7: Kraftduktilitäts-Prüfungen an einer sehr harten PmB-Probe

Temperatur [°C]	Energie [J/cm ²] bei			
	max. Kraft	200 mm Dehnweg (E ₂₀₀)	400 mm Dehnweg (E ₄₀₀)	E ₄₀₀ - E ₂₀₀
5	B	B	B	B
10	0,5	B	B	B
15	0,5	7,7	13,5	5,8
20	0,3	3,3	5,6	2,3

B: Bruch

Bei dieser extrem harten Probe musste die Versuchstemperatur bis auf 15°C erhöht werden um den Versuch ohne vorzeitigen Bruch durchführen zu können.

4. Vergleichsuntersuchungen

4.1 Kleiner Ringversuch

Mit folgenden 4 Prüfstellen wurde eine Vergleichsuntersuchung durchgeführt:

- Repsol Petróleo SA, Laboratoires de Asfaltos, Madrid
- Centro de Estudios de Carreteras (CEDEX) Ministerio de Fomento, Madrid
- Deutsche BP, Hamburg
- IMP Baustest AG, Oberbuchsiten

Dabei wurden die bereits in Tabelle 5 erwähnten Bindemittel P4, E2, N1 und NH1 untersucht. Die Prüfung erfolgte mit der ASTM-Form bei 5°C und einer Vorschubgeschwindigkeit von 50 mm/Min. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 8 sowie den Abbildungen 11, 12 und 13 aufgeführt.

Tabelle 8: Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung
(die Nummern der Labors stehen in keinem Zusammenhang mit der obenstehenden Reihenfolge)

Bindemittel	Labor				berechnete Energie
	L1	L2	L3	L4	
P4	20,45		20,40	18,90	Energie beim Bruch [J/cm ²]
E2	16,43		15,20	20,10	
N1	3,77	6,61	6,52	2,00	
NH1	0,27	0,76	0,00	0,20	
P4	12,44	12,33	14,70	15,00	Energie bei einem Dehnweg von 400 mm [J/cm ²]
E2	9,38	8,35	9,20	10,20	
N1	3,04	3,00	B	3,70	
NH1	B	B	B	B	
P4	4,96	4,57	5,20	6,40	Energie E400 - E200 [J/cm ²]
E2	4,27	4,87	4,00	4,70	
N1	0,38	0,29	B	0,50	
NH1	B	B	B	B	

10°C

B: Bruch

Die relativ kleine Anzahl beteiligter Labors erlaubt keine statistische Auswertung der Vergleichsuntersuchung. Die Reproduzierbarkeit (gleichbedeutend wie Vergleichbarkeit; verschiedene Beobachter, verschiedene Geräte) müsste im Rahmen einer grösseren Untersuchung bestimmt werden. Immerhin zeigen jedoch die Abbildungen 11 bis 13, dass:

- alle 4 Labors deutliche Unterschiede zwischen den modifizierten Bindemitteln (P4, E2) und den Reinbitumen (N1, NH1) feststellten.
- bei der Energie $E_{400} - E_{200}$ die Unterschiede zwischen den Labors am kleinsten sind.

Abbildung 11: Vergleichsuntersuchung mit 4 Prüfstellen; Energie beim Bruch.

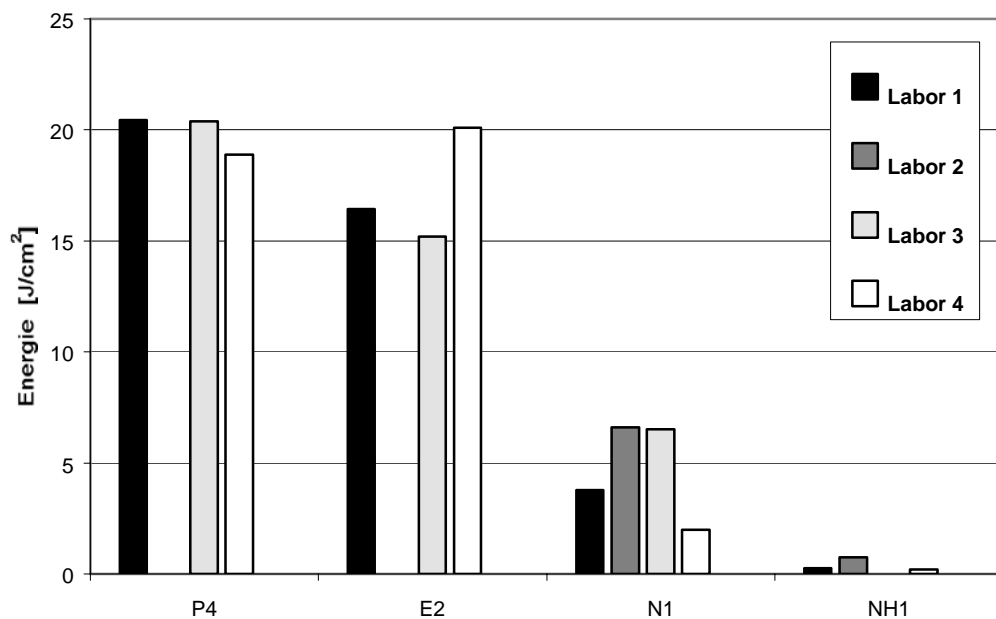


Abbildung 12: Vergleichsuntersuchung mit 4 Prüfstellen; Energie bei einem Dehnweg von 400 mm (E_{400}).

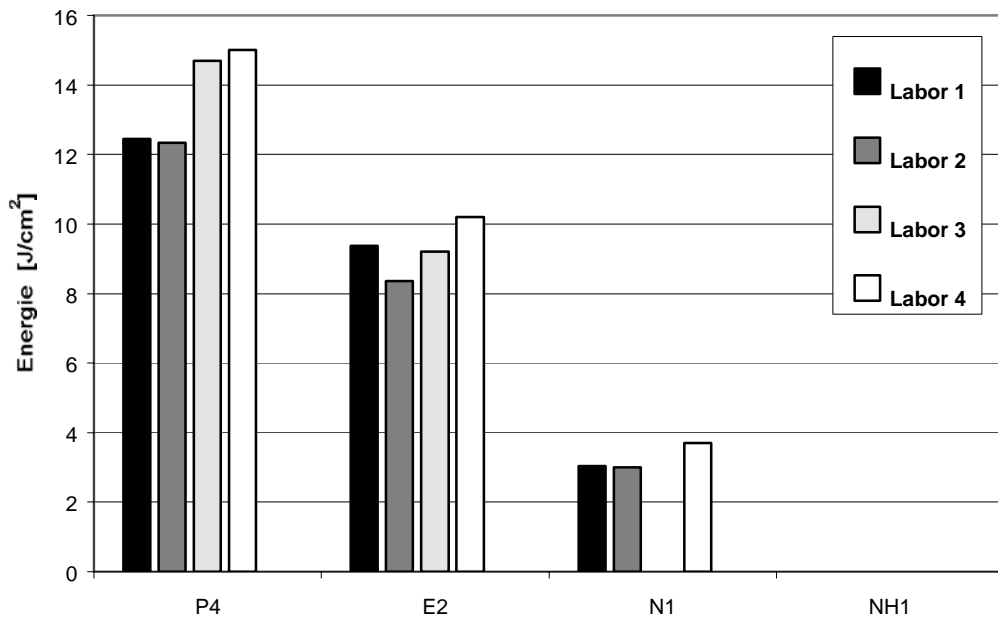
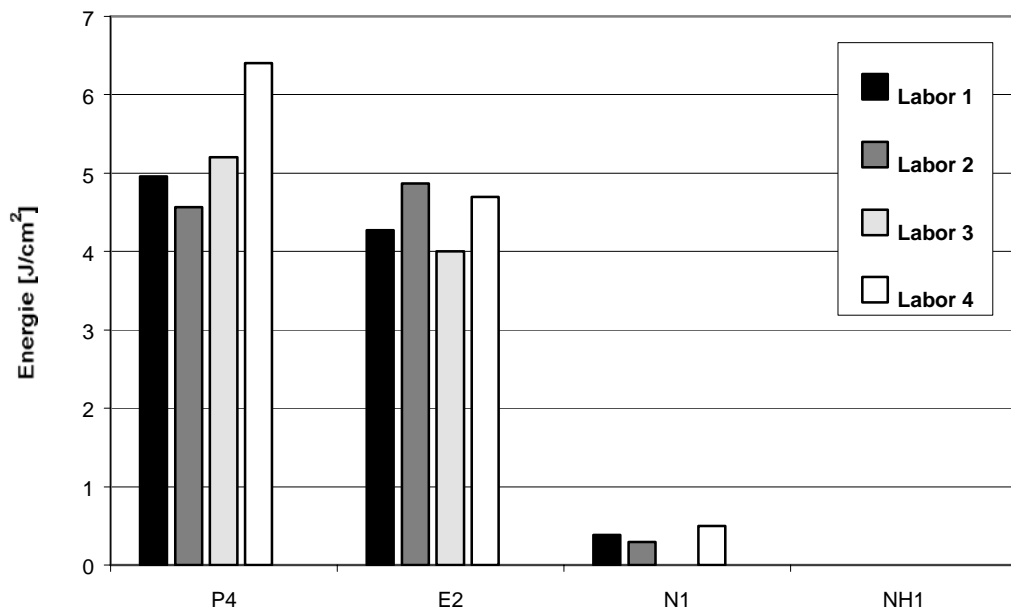


Abbildung 13: Vergleichsuntersuchung mit 4 Prüfstellen; $E_{400} - E_{200}$



4.2 Bestimmung der Wiederholbarkeit

Unter dem Begriff Wiederholbarkeit wird die Präzision des Verfahrens unter Wiederholbedingungen (1 Beobachter, 1 Gerät) verstanden.

Die Vergleichbarkeit (verschiedene Beobachter, verschiedene Geräte) wurde nicht bestimmt.

An der gleichen Probe (A99-2496) wurde der Versuch Kraftduktilität gemäss vorgeschlagener Prüfmethode mehrmals durchgeführt und ausgewertet.

Als PmB für diese Versuchsreihe wurde ein elastomermodifiziertes PmB mittlerer Konsistenz gewählt (Penetration $61 \cdot \frac{1}{10}$ mm; EP RuK 62°C).

Tabelle 9: 6-malige Wiederholung der gleichen Prüfung zur Bestimmung der Wiederholbarkeit (jeder Wert entspricht einem Mittelwert aus einer 3-fachen Bestimmung)

Bestimmung	Energie $E_{400} - E_{200}$ [J/cm ²]
1	4,27
2	3,93
3	3,59
4	3,93
5	3,98
6	4,23
Mittelwert	3,99
Standardabweichung	0,225

Die Wiederholbarkeit berechnet sich zu $2,7 \cdot$ Standardabweichung; aus obenstehender Versuchsreihe ergibt sich die Wiederholbarkeit zu 0,61.

Die Wiederholbarkeit wurde mit einer Probe bestimmt, deren Wert knapp über dem provisorischen Grenzwert (3 J) der prEN 14023 liegt.

Da bei Ergebnissen deutlich oberhalb des Grenzwertes die Frage nach der Wiederholbarkeit weniger von Interesse ist, genügt die durchgeführte Bestimmung der Wiederholbarkeit.

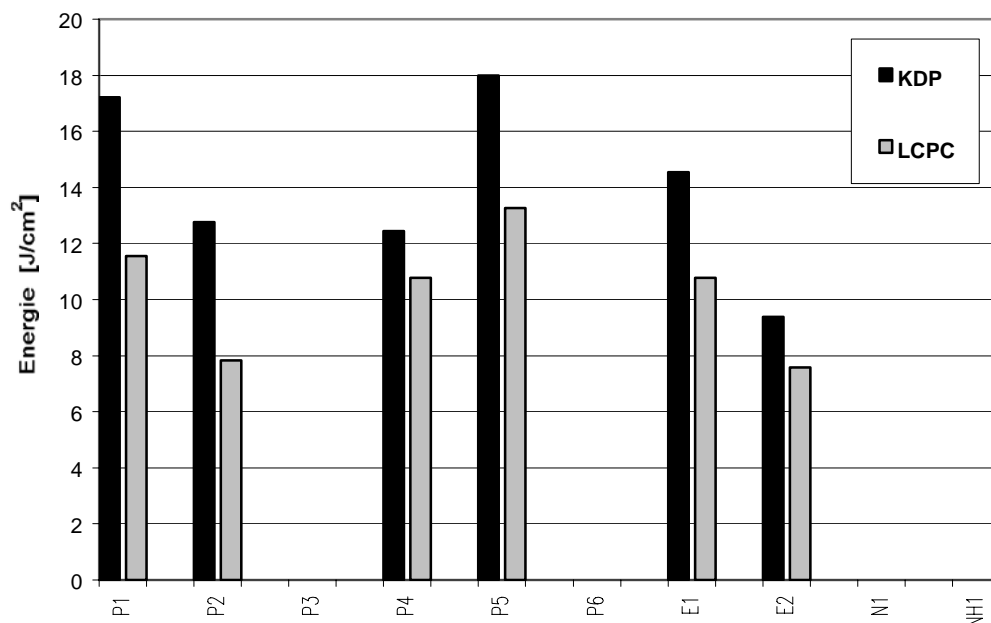
4.3 Vergleich Kraftduktilitäts-Prüfung mit dem direkten Zugversuch LCPC

An den Bindemitteln N1, NH1, P1, P2, P3, P4, P5, P6, E1 und E2 (siehe Tabelle 5) wurde im Labor Appia, Direction Technique; Velizy der direkte Zugversuch [6] durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 10 aufgeführt.

In der Abbildung 14 werden die Ergebnisse der Kraftduktilitäts-Prüfung mit den Ergebnissen des direkten Zugversuches LCPC verglichen. Die Kraftduktilitäts-Prüfung wurde mit einer ASTM-Form bei 5°C mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 50 mm/Min. durchgeführt. Dabei wurden folgende Werte einander gegenübergestellt:

- beim direkten Zugversuch: die Energie bei einer Dehnung von 400%; der Versuch wird bei dieser Dehnung abgebrochen
- bei der Kraftduktilitäts-Prüfung: die Energie bei einer Dehnung von 400 mm (=1333%); der Versuch wird bei dieser Dehnung abgebrochen.

Abbildung 14: Vergleich zwischen direktem Zugversuch LCPC und Kraftduktilitäts-Prüfung (KDP)



Mit dem direkten Zugversuch werden generell tiefere Energiewerte ermittelt als mit der Kraftduktilitäts-Prüfung bei 5°C. Die Rangfolge der geprüften Bindemittel ist bei beiden Versuchen etwa gleich.

Tabelle 10: Ergebnisse des direkten Zugversuches LCPC

Bindemittel		N1		NH1		P1	P2	P3	P4		P5	P6	E1	E2				
Temperatur [°C]		5		5	10	5	5	5	5		5	5	5	5				
Vorschubgeschwindigkeit [mm/Min.]		100	50	100	100	100	100	100	100	50	100	100	100	100	50			
Essais de Traction H2	Seuil	Contrainte (Mpa)	1,642	1,234	F R A G I L E	F R A G I L E	1,396	0,642	1,446	1,240	0,864	1,884	3,184	1,288	0,858	0,628		
		% Allongement	9	11			9	19	12	13	13	9	8	11	14	15		
		Energie (J/cm ²)	0,59	0,51			0,43	0,49	0,68	0,64	0,45	0,60	1,00	0,56	0,46	0,38		
	Rupture	Contrainte (Mpa)	0,050	0,056							0,220				0,642			
		% Allongement	165	177							148				189			
		Energie (J/cm ²)	6,54	5,40							6,78				14,18			
	Allongement maximal	Contrainte (Mpa)							0,610	0,370		0,336	0,248	0,416		0,420	0,304	0,220
		% Allongement							440	440		440	440	438		440	440	439
		Energie (J/cm ²)							12,69	8,47		11,40	8,62	14,05		11,51	8,15	5,93
	Energie à 400% (J/cm ²)								11,55	7,82		10,77	8,14	13,27		10,77	7,58	5,55

5. Vorschlag für Prüfmethode

Die vorliegende Arbeit wurde in enger Zusammenarbeit mit weiteren Prüfstellen, namentlich aus Spanien, Frankreich und Deutschland durchgeführt. Es wurden folgende Eckdaten für die Durchführung der Kraftduktilitäts-Prüfung festgelegt:

- Verwendete Prüfform gemäss ASTM [8]
- Prüftemperatur: 5°C; in seltenen Fällen, bei sehr harten Bindemitteln erfolgt bei dieser Temperatur ein Bruch vor Erreichen des erforderlichen Dehnweges von 400 mm. In diesen Fällen ist die Temperatur um 5°C zu erhöhen.
- Vorschubgeschwindigkeit: 50 mm/Min.
- Berechnung der Energie: Energie bei einem Dehnweg von 400 mm abzüglich Energie bei einem Dehnweg von 200 mm

Diese Arbeit diene als Grundlage für die Erarbeitung einer Prüfnorm sowohl im Rahmen der europäischen als auch der nationalen Normen:

- prEN 13589 "Bitumen and bituminous binders – Determination of the tensile properties by the force ductility method" [2]
- prEN 13703 "Bitumen and bituminous binders – Determination of the deformation energy of modified bitumen" [3]
- SN 671 748 "Bituminöse Bindemittel; Bestimmung der Kraftduktilität"; in Vorbereitung [10]

6. Literatur

- [1] Norm SN 671 747; Bituminöse Bindemittel, Prüfvorschriften; Elastische Rückstellung
- [2] prEN 13589; Bitumen and bituminous binders – Determination of the tensile properties by the force ductility method
- [3] prEN 13703; Bitumen and bituminous binders – Determination of the deformation energy of modified bitumen
- [4] SN 671 400; Polymermodifizierte Bitumen (PmB) für Beläge; Anforderungen
- [5] Norm SN 671 746a; Bituminöse Bindemittel; Bestimmung der Duktilität
- [6] prEN 13587; Bitumen and bituminous binders – Determination of the tensile properties of bituminous binders by the tensile test method
- [7] Performance Graded Asphalt; Binder Specification on Testing; Superpose Series No 1 (SP-1); Asphalt Institute, Lexington 1997
- [8] ASTM D6084; Standard test method for elastic recovery of bituminous materials by ductilometer
- [9] Fernandez Milagros; nicht publizierte Ergebnisse einer spanischen Arbeitsgruppe; Mitteilung CEN TC19/SC1/WG4 Oktober 2000
- [10] Norm SN 671 748; Bituminöse Bindemittel; Bestimmung der Kraftduktilität"; in Vorbereitung
- [11] Eurachem, The Fitness for Purpose of Analytical Methods, English Edition 1.0-1998, ISBN 0-948926-12-0

7. Anhang

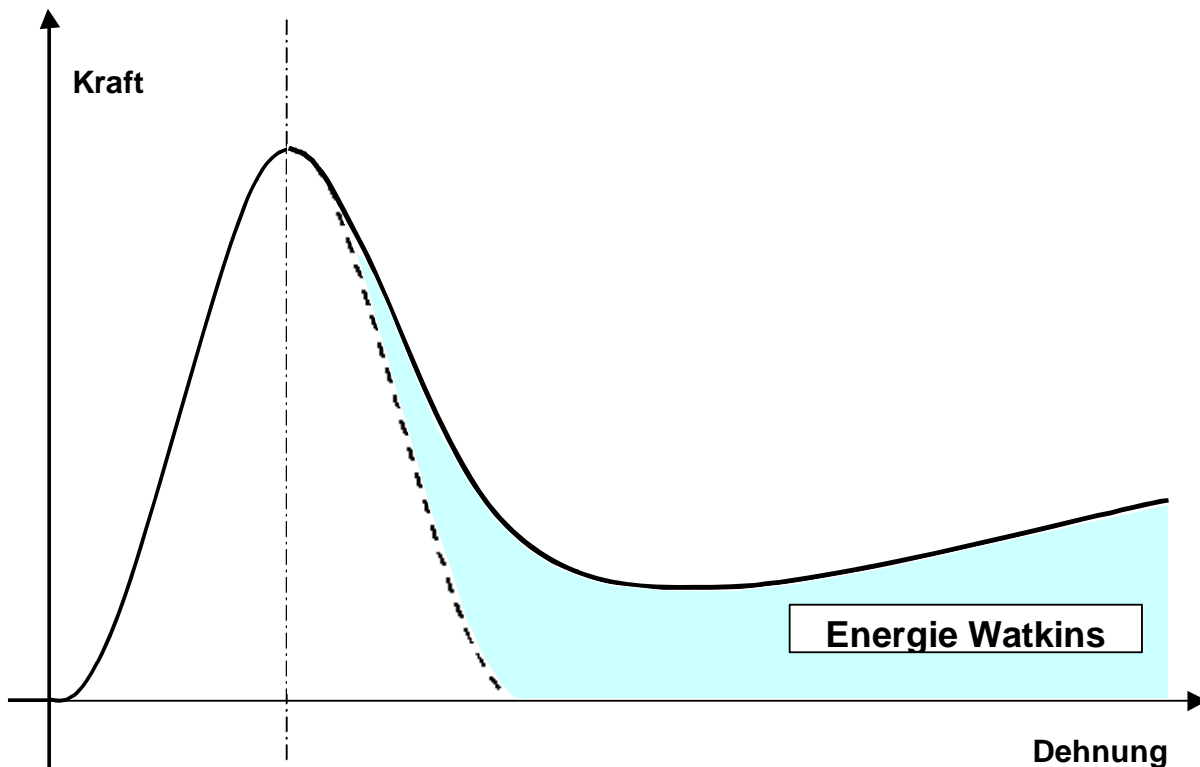
	Anhang Seite
Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.4 "Temperatur"	1
Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.5 "Formen"; Daten zur Abbildung 5	2
Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.5 "Formen"; Daten zur Abbildung 6	6
Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.6 "Berechnung der Energie"	7

Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.4 "Temperatur"

Daten zu den Abbildungen 1 und 2:

Temperatur [°C]	Energie max. Kraft [J/cm ²]		Energie Bruch [J/cm ²]		Energie Watkins [J/cm ²]	
	A97-1497	A97-1498	A97-1497	A97-1498	A97-1497	A97-1498
-5	0,94	0,24	0,94	0,24	-	-
0	0,47	0,77	11,6	0,77	10,7	-
5	0,25	0,47	6,2	5,1	5,7	4,2

Im Rahmen einer Besprechung mit Herrn Simon Watkins; BP Bitumen UK wurde vorgeschlagen, nur den "nicht-symmetrischen Teil" des Kraft-Weg-Diagrammes zu berücksichtigen. Man erhoffte sich eine bessere Unterscheidung der PmB zu den Reinbitumen.



Daten zur Abbildung 3:
Prüfung mit ASTM-Form; Energie beim Bruch

Bindemittel	Temperatur [°C]			
	5	7	10	13
E2	10.2 [J/cm ²]	7.3 [J/cm ²]	4.9 [J/cm ²]	2.8 [J/cm ²]
N1	B	B	3.7 [J/cm ²]	1.8 [J/cm ²]

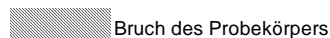
B: Bruch

Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.5 "Formen"; Daten zur Abbildung 5: Ergebnisse mit ASTM-Form

Auswertung Kraft-Duktilität

Auftrag: A- 0038

Form: ASTM



L_0 : 3 Ausgangslänge

Temperatur: 5 °C

400 %: 12 cm

Bindemittel: alle

Querschnitt 1 cm^2

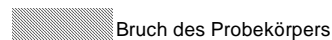
IMP Nr.	Bindemittel	Versuch Nr.	Max. Kraft [N]			Max. Spannung [N/cm^2]			Dehnung bei max. Kraft [%]			Energie bis max. Kraft, E_s [J/cm^2]			Energie bis Bruch, E_r [J/cm^2]		
			Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.
R 0030	B 60/70	1	72.7	74.2	1.1	72.7	74.2	1.1	30.6	35.2	3.4	0.57	0.48	0.06	4.48	4.14	0.39
		2	75.2			75.2			38.9			0.46			3.59		
		3	74.7			74.7			36.1			0.42			4.34		
R 0031	B 80/100	1	61.7	60.2	1.1	61.7	60.2	1.1	33.3	34.1	3.6	0.56	0.48	0.07	4.65	4.50	0.23
		2	59.6			59.6			30.1			0.49			4.67		
		3	59.3			59.3			38.9			0.40			4.18		
R 0032	B 120/150	1	46.0	48.8	2.8	46.0	48.8	2.8	41.7	38.0	3.5	0.32	0.32	0.02	3.60	3.69	0.13
		2	47.7			47.7			38.9			0.35			3.60		
		3	52.6			52.6			33.3			0.30			3.87		
A95-2102	mB, Elastom Styrelf	1	82.0	79.9	1.5	82.0	79.9	1.5	33.3	27.8	4.5	0.34	0.34	0.00	18.70	18.47	0.21
		2	79.0			79.0			22.2			0.33			18.50		
		3	78.7			78.7			27.8			0.34			18.20		
A95-1097	mB, Plastom Practiplast	1	69.1	69.5	1.9	69.1	69.5	1.9	38.9	35.2	4.1	0.34	0.42	0.05	2.64	3.05	0.36
		2	66.0			66.0			27.8			0.38			2.67		
		3	68.7			68.7			33.3			0.48			3.53		
		4	71.5			71.5			33.3			0.40			3.34		
		5	71.0			71.0			38.9			0.42			3.35		
		6	70.9			70.9			38.9			0.47			2.78		
A93-0827	mB, Elastom EL 70	1	71.0	67.0	4.3	71.0	67.0	4.3	41.7	34.2	4.2	0.42	0.35	0.04	14.70	12.88	0.88
		2	72.7			72.7			36.1			0.38			12.80		
		3	69.6			69.6			30.1			0.30			12.00		
		4	62.6			62.6			30.6			0.35			13.00		
		5	63.5			63.5			30.6			0.30			12.20		
		6	62.3			62.3			36.1			0.33			12.60		

Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.5 "Formen"; Daten zur Abbildung 5: Ergebnisse mit DIN-Form

Auswertung Kraft-Duktilität

Auftrag: A- 0038

Form: DIN



Bruch des Probekörpers

L_0 3 Ausgangslänge

Temperatur: 5 °C

400 %: 12 cm

Bindemittel: alle

Querschnitt 1 cm²

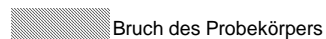
IMP Nr.	Bindemittel	Versuch Nr.	Max. Kraft [N]			Max. Spannung [N/cm ²]			Dehnung bei max. Kraft [%]			Energie bis max. Kraft, E _s [J/cm ²]			Energie bis Bruch, E _r [J/cm ²]		
			Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.
R 0030	B 60/70	1 2 3		#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!
R 0031	B 80/100	1 2 3	95.1	95.1	0.0	95.1	95.1	0.0	30.6	30.6	0.0	0.78	0.78	0.00	2.50	2.50	0.00
R 0032	B 120/150	1 2 3	76.5 75.4 75.6	75.8	0.5	76.5 75.4 75.6	75.8	0.5	27.8 30.6 30.6	29.7	1.3	0.53 0.49 0.52	0.51	0.02	2.09 2.01 2.06	2.05	0.03
A95-2102	mB, Elastom Styrelf	1 2 3	128.0 118.1	123.1	5.0	128.0 118.1	123.1	5.0	25.0 25.0	25.0	0.0	0.68 0.64	0.66	0.02	15.20 14.10	14.65	0.55
A95-1097	mB, Plastom Practiplast	1 2 3 4 5 6	92.4 92.6 93.9 100.5 101.8 103.2	97.4	4.5	92.4 92.6 93.9 100.5 101.8 103.2	97.4	4.5	24.9 25.0 33.3 33.3 30.1 27.8	29.1	3.5	0.58 0.46 0.33 0.43 0.40 0.41	0.44	0.08	1.68 1.47 1.31 1.40 1.66 1.72	1.54	0.15
A93-0827	mB, Elastom EL 70	1 2 3 4 5 6	93.9 92.5 91.2 91.7	92.3	1.0	93.9 92.5 91.2 91.7	92.3	1.0	30.6 25.0 33.3 41.1	32.5	5.8	0.33 0.48 0.32 0.33	0.37	0.07	5.92 5.87 5.75 6.16	5.93	0.15

Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.5 "Formen"; Daten zur Abbildung 5: Ergebnisse mit H2-Form

Auswertung Kraft-Duktilität

Auftrag: A- 0038

Form: H2



L₀ 2.5 cm Ausgangslänge

Temperatur: 5 °C

400 %: 10 cm

Bindemittel: alle

Querschnitt 0.12 cm²

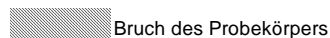
IMP Nr.	Bindemittel	Versuch Nr.	Max. Kraft [N]			Max. Spannung [N/cm ²]			Dehnung bei max. Kraft [%]			Energie bis max. Kraft, E _s [J/cm ²]			Energie bis Bruch, E _r [J/cm ²]		
			Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.
R 0030	B 60/70	1	8.0	9.6	1.6	66.7	80.0	13.3	20.0	18.4	1.6	0.26	0.36	0.10	0.75	1.28	0.53
		2	11.2			93.3			16.7			0.46			1.80		
		3															
R 0031	B 80/100	1	11.0	10.7	0.4	91.7	89.4	3.1	20.0	23.3	7.2	0.35	0.70	0.47	0.40	1.77	0.98
		2	10.2			85.0			33.3			1.36			2.60		
		3	11.0			91.7			16.7			0.38			2.31		
R 0032	B 120/150	1	8.6	8.8	0.2	71.7	73.3	1.8	26.7	22.2	4.2	0.38	0.37	0.01	3.10	2.83	0.25
		2	9.1			75.8			16.7			0.36			2.50		
		3	8.7			72.5			23.3			0.38			2.90		
A95-2102	mB, Elastomer Styrelf	1	11.8	10.4	2.7	98.3	86.9	22.9	26.7	22.2	6.3	0.19	0.18	0.06	4.00	6.01	5.80
		2	12.9			107.5			26.7			0.24			13.90		
		3	6.6			55.0			13.3			0.10			0.14		
A95-1097	mB, Plastomer Practiplast	1	9.0	9.0	0.6	75.0	75.1	5.0	30.0	28.4	3.2	0.37	0.29	0.06	1.74	1.45	0.48
		2	8.6			71.7			26.7			0.29			0.81		
		3	9.9			82.5			30.1			0.37			2.08		
		4	9.4			78.3			23.3			0.24			1.40		
		5	9.2			76.7			33.3			0.27			1.83		
		6	8.0			66.7			26.7			0.20			0.85		
A93-0827	mB, Elastomer EL 70	1	7.6	9.3	0.9	63.3	77.4	7.9	20.0	26.1	4.5	0.19	0.25	0.08	0.34	6.50	3.06
		2	9.7			80.8			30.0			0.40			7.30		
		3	8.7			72.5			23.3			0.26			8.43		
		4	10.0			83.3			26.7			0.16			6.50		
		5	10.5			87.5			23.3			0.22			10.20		
		6	9.2			76.7			33.3			0.24			6.20		

Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.5 "Formen"; Daten zur Abbildung 5: Ergebnisse mit SHRP-Form

Auswertung Kraft-Duktilität

Auftrag: A- 0038

Form: SHRP



L_0 : 4 Ausgangslänge

Temperatur: 5 °C

400 %: 16

Bindemittel: alle

Querschnitt 0.36 cm²

IMP Nr.	Bindemittel	Versuch Nr.	Max. Kraft [N]			Max. Spannung [N/cm ²]			Dehnung bei max. Kraft [%]			Energie bis max. Kraft, E _s [J/cm ²]			Energie bis Bruch, E _r [J/cm ²]		
			Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.
R 0030	B 60/70	1	37.6	33.6	3.3	104.4	93.4	9.1	16.7	18.1	3.5	0.62	0.47	0.10	3.22	3.34	0.40
		2	33.7			93.6			22.9			0.40			2.93		
		3	29.6			82.2			14.6			0.40			3.88		
R 0031	B 80/100	1	27.1	27.8	0.9	75.3	77.2	2.4	16.7	16.0	1.0	0.35	0.39	0.04	3.38	3.57	0.14
		2	27.3			75.8			16.7			0.38			3.72		
		3	29.0			80.6			14.6			0.44			3.60		
R 0032	B 120/150	1	23.3	23.5	0.2	64.7	65.3	0.6	18.8	18.8	0.0	0.37	0.38	0.01	3.43	3.67	0.23
		2	23.7			65.8			18.8			0.39			3.90		
		3															
A95-2102	mB, Elastom Styrelf	1	37.1	36.1	1.1	103.1	100.3	3.0	16.7	16.0	1.0	0.54	0.47	0.07	22.70	21.97	0.71
		2	36.6			101.7			16.7			0.50			22.20		
		3	34.6			96.1			14.6			0.37			21.00		
A95-1097	mB, Plastom Practiplast	1	26.8	28.2	0.8	74.4	78.3	2.3	25.0	20.8	3.2	0.34	0.33	0.10	2.32	2.52	0.19
		2	27.3			75.8			20.3			0.46			2.68		
		3	28.5			79.2			18.8			0.44			2.51		
		4	28.6			79.4			25.0			0.34			2.79		
		5	28.7			79.7			18.8			0.21			2.24		
		6	29.2			81.1			16.7			0.18			2.55		
A93-0827	mB, Elastom EL 70	1	27.8	26.6	1.1	77.2	73.8	2.9	16.7	16.4	1.4	0.41	0.33	0.09	12.96	12.36	0.41
		2	26.7			74.2			18.8			0.42			12.00		
		3	28.1			78.1			14.6			0.41			12.20		
		4	25.8			71.7			16.7			0.24			12.00		
		5	25.3			70.3			14.6			0.20			12.10		
		6	25.8			71.7			16.7			0.28			12.90		

Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.5 "Formen"

Daten zur Abbildung 6:

Temperatur [°C]	Energie bei Dehnweg 400 mm [J/cm ²]					
	5	7	10	13	7	13
Form	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM	DIN	DIN
P4	15,0	-	6,2	-	B	B
E2	10,2	7,3	4,9	2,8	11,0	4,4
N1	B	B	3,7	1,8	B	1,4

B: Bruch

Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.6 "Berechnung der Energie"

Daten zu den Abbildungen 8, 9 und 10

max. Kraft [N]

	5°C	10°C	15°C	20°C
P1	104.80	0.00		
P2	44.20	0.00		
P3	104.90	46.30	22.90	9.40
P4	84.40	0.00		
P5	140.00	58.10		
P6	210.50	86.70		
E1	95.00	0.00		
E2	61.10	0.00		
N1	98.90	39.50		
NH1	123.00	138.20		
55/70	117.90	37.60		
Nypol 120	32.40	0.00		

Energie bei max. Kraft [J/cm²]

	5°C	10°C	15°C	20°C
P1	0.41	0.00		
P2	0.32	0.00		
P3	0.66	0.33	0.10	0.10
P4	0.46	0.00		
P5	0.75	0.30		
P6	1.43	0.65		
E1	0.44	0.00		
E2	0.38	0.00		
N1	0.35	0.25		
NH1	0.13	0.26		
55/70	0.66	0.29		
Nypol 120	0.14	0.00		

Energie beim Bruch [J/cm²]

	5°C	10°C	15°C	20°C
P1	17.46	0.00		
P2	19.00	0.00		
P3	6.43	3.15	1.60	0.70
P4	20.45	0.00		
P5	17.46	12.48		
P6	5.33	12.40		
E1	19.10	0.00		
E2	16.43	0.00		
N1	3.77	3.27		
NH1	0.14	0.27		
55/70	8.15	3.69		
Nypol 120	17.96	0.00		

Energie bei Dehnweg 200mm E₂₀₀ [J/cm²]

	5°C	10°C	15°C	20°C
P1	7.24	0.00		
P2	6.08	0.00		
P3	0.00	3.27	1.60	0.70
P4	7.48	0.00		
P5	10.28	4.42		
P6	0.00	6.86		
E1	7.63	0.00		
E2	5.11	0.00		
N1	0.00	2.66		
NH1	0.00	0.00		
55/70	7.56	2.76		
Nypol 120	2.57	0.00		

Energie bei Dehnweg 400mm E₄₀₀ [J/cm²]

	5°C	10°C	15°C	20°C
P1	17.21	0.00		
P2	12.76	0.00		
P3	B	B	B	B
P4	12.44	0.00		
P5	17.99	7.92		
P6	0.00	9.70		
E1	14.54	0.00		
E2	9.38	0.00		
N1	0.00	3.04		
NH1	0.00	0.00		
55/70	0.00	3.23		
Nypol 120	4.55	0.00		

E₄₀₀ - E₂₀₀ [J/cm²]

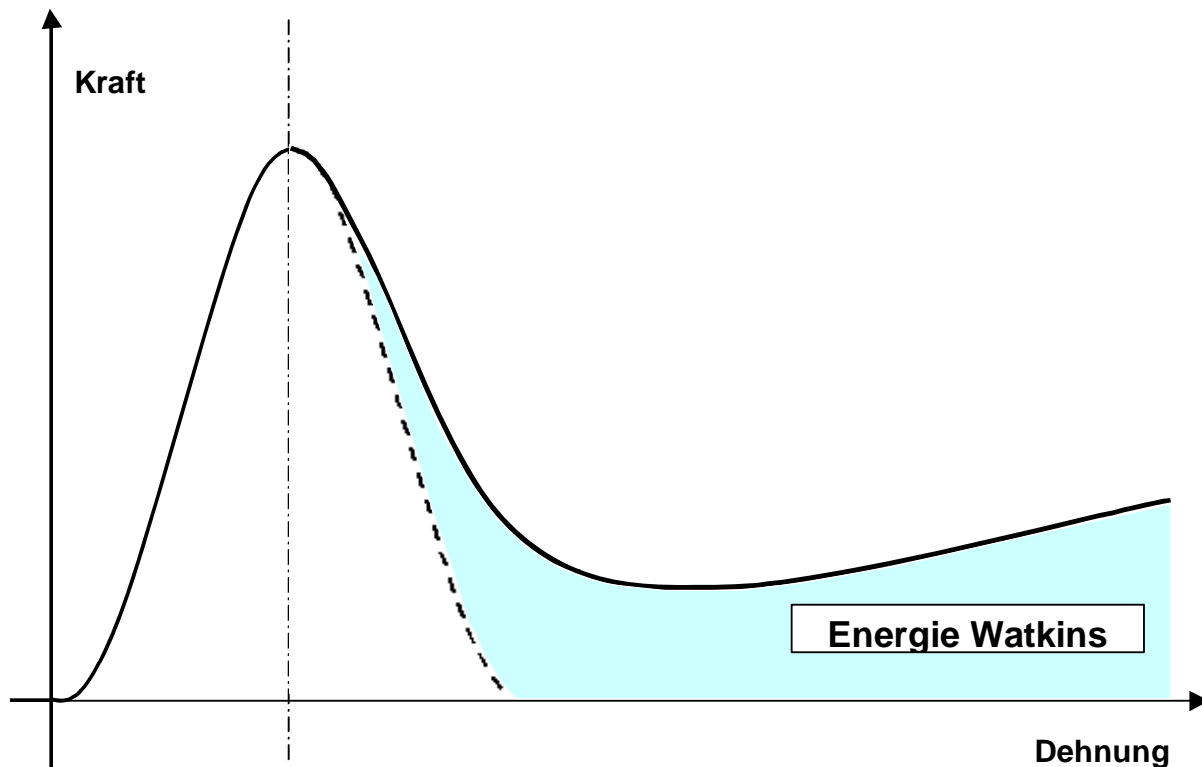
	5°C	10°C	15°C	20°C
P1	9.97	0.00		
P2	6.68	0.00		
P3	0.00	-3.27	-1.60	-0.70
P4	4.96	0.00		
P5	7.71	3.50		
P6	0.00	2.84		
E1	6.91	0.00		
E2	4.27	0.00		
N1	0.00	0.38		
NH1	0.00	0.00		
55/70	-7.56	0.47		
Nypol 120	1.98	0.00		

Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.4 "Temperatur"

Daten zu den Abbildungen 1 und 2:

Temperatur [°C]	Energie max. Kraft [J/cm ²]		Energie Bruch [J/cm ²]		Energie Watkins [J/cm ²]	
	A97-1497	A97-1498	A97-1497	A97-1498	A97-1497	A97-1498
-5	0,94	0,24	0,94	0,24	-	-
0	0,47	0,77	11,6	0,77	10,7	-
5	0,25	0,47	6,2	5,1	5,7	4,2

Im Rahmen einer Besprechung mit Herrn Simon Watkins; BP Bitumen UK wurde vorgeschlagen, nur den "nicht-symmetrischen Teil" des Kraft-Weg-Diagrammes zu berücksichtigen. Man erhoffte sich eine bessere Unterscheidung der PmB zu den Reinbitumen.



Daten zur Abbildung 3:
Prüfung mit ASTM-Form; Energie beim Bruch

Bindemittel	Temperatur [°C]			
	5	7	10	13
E2	10.2 [J/cm ²]	7.3 [J/cm ²]	4.9 [J/cm ²]	2.8 [J/cm ²]
N1	B	B	3.7 [J/cm ²]	1.8 [J/cm ²]

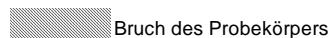
B: Bruch

Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.5 "Formen"; Daten zur Abbildung 5: Ergebnisse mit ASTM-Form

Auswertung Kraft-Duktilität

Auftrag: A- 0038

Form: ASTM



L_0 : 3 Ausgangslänge

Temperatur: 5 °C

400 %: 12 cm

Bindemittel: alle

Querschnitt: 1 cm²

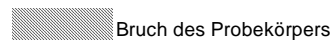
IMP Nr.	Bindemittel	Versuch Nr.	Max. Kraft [N]			Max. Spannung [N/cm ²]			Dehnung bei max. Kraft [%]			Energie bis max. Kraft, E _s [J/cm ²]			Energie bis Bruch, E _r [J/cm ²]		
			Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.
R 0030	B 60/70	1	72.7	74.2	1.1	72.7	74.2	1.1	30.6	35.2	3.4	0.57	0.48	0.06	4.48	4.14	0.39
		2	75.2			75.2			38.9			0.46			3.59		
		3	74.7			74.7			36.1			0.42			4.34		
R 0031	B 80/100	1	61.7	60.2	1.1	61.7	60.2	1.1	33.3	34.1	3.6	0.56	0.48	0.07	4.65	4.50	0.23
		2	59.6			59.6			30.1			0.49			4.67		
		3	59.3			59.3			38.9			0.40			4.18		
R 0032	B 120/150	1	46.0	48.8	2.8	46.0	48.8	2.8	41.7	38.0	3.5	0.32	0.32	0.02	3.60	3.69	0.13
		2	47.7			47.7			38.9			0.35			3.60		
		3	52.6			52.6			33.3			0.30			3.87		
A95-2102	mB, Elastom Styrelf	1	82.0	79.9	1.5	82.0	79.9	1.5	33.3	27.8	4.5	0.34	0.34	0.00	18.70	18.47	0.21
		2	79.0			79.0			22.2			0.33			18.50		
		3	78.7			78.7			27.8			0.34			18.20		
A95-1097	mB, Plastom Practiplast	1	69.1	69.5	1.9	69.1	69.5	1.9	38.9	35.2	4.1	0.34	0.42	0.05	2.64	3.05	0.36
		2	66.0			66.0			27.8			0.38			2.67		
		3	68.7			68.7			33.3			0.48			3.53		
		4	71.5			71.5			33.3			0.40			3.34		
		5	71.0			71.0			38.9			0.42			3.35		
		6	70.9			70.9			38.9			0.47			2.78		
A93-0827	mB, Elastom EL 70	1	71.0	67.0	4.3	71.0	67.0	4.3	41.7	34.2	4.2	0.42	0.35	0.04	14.70	12.88	0.88
		2	72.7			72.7			36.1			0.38			12.80		
		3	69.6			69.6			30.1			0.30			12.00		
		4	62.6			62.6			30.6			0.35			13.00		
		5	63.5			63.5			30.6			0.30			12.20		
		6	62.3			62.3			36.1			0.33			12.60		

Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.5 "Formen"; Daten zur Abbildung 5: Ergebnisse mit DIN-Form

Auswertung Kraft-Duktilität

Auftrag: A- 0038

Form: DIN



Bruch des Probekörpers

L_0 3 Ausgangslänge

Temperatur: 5 °C

400 %: 12 cm

Bindemittel: alle

Querschnitt 1 cm²

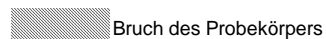
IMP Nr.	Bindemittel	Versuch Nr.	Max. Kraft [N]			Max. Spannung [N/cm ²]			Dehnung bei max. Kraft [%]			Energie bis max. Kraft, E _s [J/cm ²]			Energie bis Bruch, E _r [J/cm ²]		
			Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.
R 0030	B 60/70	1 2 3		#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!
R 0031	B 80/100	1 2 3	95.1	95.1	0.0	95.1	95.1	0.0	30.6	30.6	0.0	0.78	0.78	0.00	2.50	2.50	0.00
R 0032	B 120/150	1 2 3	76.5 75.4 75.6	75.8	0.5	76.5 75.4 75.6	75.8	0.5	27.8 30.6 30.6	29.7	1.3	0.53 0.49 0.52	0.51	0.02	2.09 2.01 2.06	2.05	0.03
A95-2102	mB, Elastom Styrelf	1 2 3	128.0 118.1	123.1	5.0	128.0 118.1	123.1	5.0	25.0 25.0	25.0	0.0	0.68 0.64	0.66	0.02	15.20 14.10	14.65	0.55
A95-1097	mB, Plastom Practiplast	1 2 3 4 5 6	92.4 92.6 93.9 100.5 101.8 103.2	97.4	4.5	92.4 92.6 93.9 100.5 101.8 103.2	97.4	4.5	24.9 25.0 33.3 33.3 30.1 27.8	29.1	3.5	0.58 0.46 0.33 0.43 0.40 0.41	0.44	0.08	1.68 1.47 1.31 1.40 1.66 1.72	1.54	0.15
A93-0827	mB, Elastom EL 70	1 2 3 4 5 6	93.9 92.5 91.2 91.7	92.3	1.0	93.9 92.5 91.2 91.7	92.3	1.0	30.6 25.0 33.3 41.1	32.5	5.8	0.33 0.48 0.32 0.33	0.37	0.07	5.92 5.87 5.75 6.16	5.93	0.15

Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.5 "Formen"; Daten zur Abbildung 5: Ergebnisse mit H2-Form

Auswertung Kraft-Duktilität

Auftrag: A- 0038

Form: H2



L₀ 2.5 cm Ausgangslänge

Temperatur: 5 °C

400 %: 10 cm

Bindemittel: alle

Querschnitt 0.12 cm²

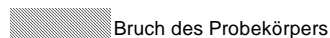
IMP Nr.	Bindemittel	Versuch Nr.	Max. Kraft [N]			Max. Spannung [N/cm ²]			Dehnung bei max. Kraft [%]			Energie bis max. Kraft, E _s [J/cm ²]			Energie bis Bruch, E _r [J/cm ²]		
			Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.
R 0030	B 60/70	1	8.0	9.6	1.6	66.7	80.0	13.3	20.0	18.4	1.6	0.26	0.36	0.10	0.75	1.28	0.53
		2	11.2			93.3			16.7			0.46			1.80		
		3															
R 0031	B 80/100	1	11.0	10.7	0.4	91.7	89.4	3.1	20.0	23.3	7.2	0.35	0.70	0.47	0.40	1.77	0.98
		2	10.2			85.0			33.3			1.36			2.60		
		3	11.0			91.7			16.7			0.38			2.31		
R 0032	B 120/150	1	8.6	8.8	0.2	71.7	73.3	1.8	26.7	22.2	4.2	0.38	0.37	0.01	3.10	2.83	0.25
		2	9.1			75.8			16.7			0.36			2.50		
		3	8.7			72.5			23.3			0.38			2.90		
A95-2102	mB, Elastomer Styrelf	1	11.8	10.4	2.7	98.3	86.9	22.9	26.7	22.2	6.3	0.19	0.18	0.06	4.00	6.01	5.80
		2	12.9			107.5			26.7			0.24			13.90		
		3	6.6			55.0			13.3			0.10			0.14		
A95-1097	mB, Plastomer Practiplast	1	9.0	9.0	0.6	75.0	75.1	5.0	30.0	28.4	3.2	0.37	0.29	0.06	1.74	1.45	0.48
		2	8.6			71.7			26.7			0.29			0.81		
		3	9.9			82.5			30.1			0.37			2.08		
		4	9.4			78.3			23.3			0.24			1.40		
		5	9.2			76.7			33.3			0.27			1.83		
		6	8.0			66.7			26.7			0.20			0.85		
A93-0827	mB, Elastomer EL 70	1	7.6	9.3	0.9	63.3	77.4	7.9	20.0	26.1	4.5	0.19	0.25	0.08	0.34	6.50	3.06
		2	9.7			80.8			30.0			0.40			7.30		
		3	8.7			72.5			23.3			0.26			8.43		
		4	10.0			83.3			26.7			0.16			6.50		
		5	10.5			87.5			23.3			0.22			10.20		
		6	9.2			76.7			33.3			0.24			6.20		

Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.5 "Formen"; Daten zur Abbildung 5: Ergebnisse mit SHRP-Form

Auswertung Kraft-Duktilität

Auftrag: A- 0038

Form: SHRP



L_0 : 4 Ausgangslänge

Temperatur: 5 °C

400 %: 16

Bindemittel: alle

Querschnitt 0.36 cm²

IMP Nr.	Bindemittel	Versuch Nr.	Max. Kraft [N]			Max. Spannung [N/cm ²]			Dehnung bei max. Kraft [%]			Energie bis max. Kraft, E _s [J/cm ²]			Energie bis Bruch, E _r [J/cm ²]		
			Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.	Einzelwerte	Mittelwert	Standardabw.
R 0030	B 60/70	1	37.6	33.6	3.3	104.4	93.4	9.1	16.7	18.1	3.5	0.62	0.47	0.10	3.22	3.34	0.40
		2	33.7			93.6			22.9			0.40			2.93		
		3	29.6			82.2			14.6			0.40			3.88		
R 0031	B 80/100	1	27.1	27.8	0.9	75.3	77.2	2.4	16.7	16.0	1.0	0.35	0.39	0.04	3.38	3.57	0.14
		2	27.3			75.8			16.7			0.38			3.72		
		3	29.0			80.6			14.6			0.44			3.60		
R 0032	B 120/150	1	23.3	23.5	0.2	64.7	65.3	0.6	18.8	18.8	0.0	0.37	0.38	0.01	3.43	3.67	0.23
		2	23.7			65.8			18.8			0.39			3.90		
		3															
A95-2102	mB, Elastom Styrelf	1	37.1	36.1	1.1	103.1	100.3	3.0	16.7	16.0	1.0	0.54	0.47	0.07	22.70	21.97	0.71
		2	36.6			101.7			16.7			0.50			22.20		
		3	34.6			96.1			14.6			0.37			21.00		
A95-1097	mB, Plastom Practiplast	1	26.8	28.2	0.8	74.4	78.3	2.3	25.0	20.8	3.2	0.34	0.33	0.10	2.32	2.52	0.19
		2	27.3			75.8			20.3			0.46			2.68		
		3	28.5			79.2			18.8			0.44			2.51		
		4	28.6			79.4			25.0			0.34			2.79		
		5	28.7			79.7			18.8			0.21			2.24		
		6	29.2			81.1			16.7			0.18			2.55		
A93-0827	mB, Elastom EL 70	1	27.8	26.6	1.1	77.2	73.8	2.9	16.7	16.4	1.4	0.41	0.33	0.09	12.96	12.36	0.41
		2	26.7			74.2			18.8			0.42			12.00		
		3	28.1			78.1			14.6			0.41			12.20		
		4	25.8			71.7			16.7			0.24			12.00		
		5	25.3			70.3			14.6			0.20			12.10		
		6	25.8			71.7			16.7			0.28			12.90		

Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.5 "Formen"

Daten zur Abbildung 6:

Temperatur [°C]	Energie bei Dehnweg 400 mm [J/cm ²]					
	5	7	10	13	7	13
Form	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM	DIN	DIN
P4	15,0	-	6,2	-	B	B
E2	10,2	7,3	4,9	2,8	11,0	4,4
N1	B	B	3,7	1,8	B	1,4

B: Bruch

Labor-Ergebnisse zum Kapitel 3.6 "Berechnung der Energie"

Daten zu den Abbildungen 8, 9 und 10

max. Kraft [N]

	5°C	10°C	15°C	20°C
P1	104.80	0.00		
P2	44.20	0.00		
P3	104.90	46.30	22.90	9.40
P4	84.40	0.00		
P5	140.00	58.10		
P6	210.50	86.70		
E1	95.00	0.00		
E2	61.10	0.00		
N1	98.90	39.50		
NH1	123.00	138.20		
55/70	117.90	37.60		
Nypol 120	32.40	0.00		

Energie bei max. Kraft [J/cm²]

	5°C	10°C	15°C	20°C
P1	0.41	0.00		
P2	0.32	0.00		
P3	0.66	0.33	0.10	0.10
P4	0.46	0.00		
P5	0.75	0.30		
P6	1.43	0.65		
E1	0.44	0.00		
E2	0.38	0.00		
N1	0.35	0.25		
NH1	0.13	0.26		
55/70	0.66	0.29		
Nypol 120	0.14	0.00		

Energie beim Bruch [J/cm²]

	5°C	10°C	15°C	20°C
P1	17.46	0.00		
P2	19.00	0.00		
P3	6.43	3.15	1.60	0.70
P4	20.45	0.00		
P5	17.46	12.48		
P6	5.33	12.40		
E1	19.10	0.00		
E2	16.43	0.00		
N1	3.77	3.27		
NH1	0.14	0.27		
55/70	8.15	3.69		
Nypol 120	17.96	0.00		

Energie bei Dehnweg 200mm E₂₀₀ [J/cm²]

	5°C	10°C	15°C	20°C
P1	7.24	0.00		
P2	6.08	0.00		
P3	0.00	3.27	1.60	0.70
P4	7.48	0.00		
P5	10.28	4.42		
P6	0.00	6.86		
E1	7.63	0.00		
E2	5.11	0.00		
N1	0.00	2.66		
NH1	0.00	0.00		
55/70	7.56	2.76		
Nypol 120	2.57	0.00		

Energie bei Dehnweg 400mm E₄₀₀ [J/cm²]

	5°C	10°C	15°C	20°C
P1	17.21	0.00		
P2	12.76	0.00		
P3	B	B	B	B
P4	12.44	0.00		
P5	17.99	7.92		
P6	0.00	9.70		
E1	14.54	0.00		
E2	9.38	0.00		
N1	0.00	3.04		
NH1	0.00	0.00		
55/70	0.00	3.23		
Nypol 120	4.55	0.00		

E₄₀₀ - E₂₀₀ [J/cm²]

	5°C	10°C	15°C	20°C
P1	9.97	0.00		
P2	6.68	0.00		
P3	0.00	-3.27	-1.60	-0.70
P4	4.96	0.00		
P5	7.71	3.50		
P6	0.00	2.84		
E1	6.91	0.00		
E2	4.27	0.00		
N1	0.00	0.38		
NH1	0.00	0.00		
55/70	-7.56	0.47		
Nypol 120	1.98	0.00		