Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

# TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

# DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

# Statisches Kriechverhalten von bituminösen Werkstoffen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

> Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab, Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael P. Wistuba und Projektass. Dipl.-Ing. Markus Spiegl Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung,

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen,

von

Joachim Lanschützer E 610/0127146 Kindergartenstraße 5, 3233 Kilb

Wien, im März 2007

Unterschrift

# Kurzfassung

Ziel der gegenständlichen Arbeit ist es, das statische Kriechverhalten von bituminösen Werkstoffen versuchstechnisch und modellhaft zu beschreiben. Zu diesem Zweck wird zunächst das Kriechverhalten von Bitumen bzw. Mastix mit Hilfe von statischen Biegeversuchen mit dem Biegebalkenrheometer (BBR) bestimmt und anschließend das Verhalten von Asphalt anhand von statischen Zugkriechversuchen an prismatischen Asphaltprobekörpern untersucht. Insgesamt werden 4 Bindemittel (2 Standardbindemittel, 2 polymermodifizierte Bindemittel), 4 Mastixtypen, die sich durch ihre Mischungsverhältnisse Bitumen zu Füller voneinander unterscheiden und 4 Asphaltmischguttypen auf ihr Kriechverhalten hin untersucht. Aufbauend auf den Versuchsergebnissen, wird das Kriechverhalten der unterschiedlichen Materialien (Bitumen, Mastix und Asphalt) mit Hilfe eines rheologischen Modells mathematisch beschrieben. Das so genannte Power-Law Modell bietet sich u.a. an. Aus der Modellierung der im Laborversuch erhaltenen Ergebnisse mit Hilfe des Power-Law Modells erhält man die Materialparameter H und p. Anhand dieser beiden Materialparameter wird erstmals versucht, das Kriechverhalten der unterschiedlichen Materialien miteinander zu vergleichen. Als Ergebnis liefert die gegenständliche Arbeit einen möglichen Zusammenhang zwischen dem Kriechverhalten von Asphaltkomponenten (Bitumen bzw. Mastix) und dem Baustoff Asphalt selbst.

# Summary

The scope of this study is to describe the creep characteristics of bituminous materials by means of a rheological model based on laboratory experiments. For this purpose, creep behaviour of bitumen and mastic, respectively, is investigated by means of static bending tests using the bending beam rheometer (BBR), and moreover, the creep behaviour of asphalt concrete is characterized by means of static tensile creep tests conduced on prismatic specimens. In total 4 different binders (2 conventional, and 2 SBS-modified bitumen), 4 types of mastic, that differ in the bitumen-filler-fractions, and 4 different asphalt mix types are tested with respect to creep behaviour. Based on these test results, the creep performance of the different materials can be described by use of a rheological model. Amongst others, the Power-Law model can be employed. By modelling the experimental results with the Power-Law model, the modelling Parameters H and p are described. By means of these two parameters a description of the creep performance of the different materials becomes possible, for the first time. As a result, this study gives useful information on possible interrelations between the creep behaviour of asphalt constituents and the asphalt concrete mixture itself.

#### Vorwort

Ich möchte mich bei all jenen bedanken, die mich im Rahmen dieser Arbeit unterstütz haben. Insbesondere bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael P. Wistuba für die zahlreichen Anregungen und Ideen bei der Umsetzung der Arbeit. Weiters möchte ich mich bei Herrn Projektass. Dipl.-Ing. Markus Spiegl für die Unterstützung bei der Auswertung und Interpretation der Versuchsdaten, die am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung der TU Wien erarbeitet wurden, bedanken. Danken möchte ich auch Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab für die kritische und konstruktive Durchsicht der Arbeit. Die gute Zusammenarbeit mit den Verantwortlichen am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung der TU Wien hat maßgeblich zur Qualität der vorliegenden Arbeit beigetragen. Besonderer Dank gilt auch meinen Eltern Christa und Christian Lanschützer, die mir die Jahre des Studiums ermöglicht haben, meiner Lebensgefährtin, Geschwistern und Freunden.

Joachim Lanschützer - Kilb, im März 2007

# INHALT

1.	EINLEI	rung	2		
2.	RHEOL	OGISCHE GRUNDLAGEN ZUM MATERIALVERHALTEN	3		
	2.1	Allgemeines	3		
	2.2	Grundformen des Materialverhaltens	3		
		2.2.1 Elastizität	3		
		223 Viskosität	+ 6		
	2.3	Kriechen und Relaxieren	7		
	2.4	Modellierung des Kriechverhaltens mit Hilfe des Power-Law Modells	9		
		2.4.1 Mathematische Beschreibung des Power-Law Modells	9		
З.	BESTIN	IMUNG DES KRIECH- BZW. RELAXATIONSVERHALTENS ANHAND VON			
	STAT	ISCHEN LABORVERSUCHEN	11		
	3.1	Art der Beanspruchung	11		
	3.2	Auswertung von statischen Kriechversuchen	13		
	3.3	Prufung von Bitumen und Mastix	14		
		3.3.1 Zuyversuch	14 16		
		3.3.3 Scherversuch	19		
	3.4	Prüfung von Asphalt	21		
		3.4.1 Direkter Zugversuch	21		
		3.4.2 Indirekter Zugversuch	22		
		3.4.3 Direkter Druckversuch	24		
		3.4.4 Indirekter Druckversuch	26		
4.	KRIECH	iverhalten am beispiel von Ausgewählten Bituminösen			
	WER	KSTOFFEN	29		
	4.1	Untersuchte Materialien	29		
		4.1.1 DIIUUIIIIIUUI	29 סכ		
		4.1.3 Gestein	20		
		4.1.4 Füllermaterial	31		
		4.1.5 Asphaltmischgut	31		
	4.2	Durchgeführte Laborprüfungen	33		
		4.2.1 Statische Biegeversuche an Bitumen- und Mastixprobekörpern mit dem			
		BBH	33 vo		
	12	4.2.2 Statische Zugversuche an Asphäliprobekurpern	-24 קר		
	4.0	4 3 1 Bitumen- und Mastixnrüfung	36		
		4.3.2 Asphaltprüfung	37		
	4.4	Interpretation der Versuchsergebnisse	38		
		4.4.1 Bitumen- und Mastixauswertung nach ÖNORM EN 14771	38		
	. –	4.4.2 Auswertung der Asphaltprüfungen	46		
	4.5	Vergleich der Kriecheigenschaften von Bitumen, Mastix und Asphalt anhand der	40		
		A 5 1 Augwortung dan Parameter H und p für Rituman und Magtiv	48 19		
		4.5.1 Auswertung der Parameter H und n für Δsphalt.	40 54		
		4.5.3 Vergleichende Auswertung Bitumen - Mastix - Asphalt	56		
5.	ZUSAN	IMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG	59		
6		TURVERZEICHNIS	61		
 ^^!					
AN	NHANG B: VERSUCHSERGEBNISSE DER ASPHALT PRUFUNGENI				

# 1. EINLEITUNG

Im Rahmen der gebrauchsverhaltensorientierten Prüfung von Asphalten für den Straßenbau werden zur Prognose des Materialverhaltens statische Kriechversuche an Bitumen- und Asphaltprobekörpern durchgeführt. Dabei wird die Bitumenprobe bzw. der Asphaltprobekörper unter kontrollierten Last- und Temperaturbedingungen beansprucht und das Materialverhalten während des Versuches aufgezeichnet. Als Ergebnis erhält man Kriechkurven, aus denen man in einem weiteren Schritt wichtige Materialparameter gewinnen kann. Diese Versuchsergebnisse bilden die Grundlage für die spätere numerische Simulation des Materialverhaltens mit Hilfe von geeigneten Modellen. Mit Hilfe der aus der numerischen Simulation erhaltenen Ergebnisse ist es möglich, das Kriechverhalten unterschiedlicher bituminöser Werkstoffe miteinander zu vergleichen.

Im ersten Teil der Arbeit werden grundlegende Mechanismen des viskoelastischen Materialverhaltens erklärt. Weiters werden die Begriffe "kriechen" und "relaxieren" anhand von Beispielen erklärt.

Im zweiten Teil der Arbeit wird ein Überblick über die Möglichkeiten zur Durchführung von statischen Kriech- und Relaxationsversuchen im Labor gegeben. Dabei wird zwischen Versuchen für Bitumen bzw. Mastix und Asphalt unterschieden. Für jeden Versuchstyp sind die Randbedingungen, Steuergrößen, Ergebnisgrößen und das Versuchsprinzip angeführt.

Der Hauptteil der Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, ob man Zusammenhänge zwischen dem Kriechverhalten von Bitumen bzw. Mastix und Asphalt herstellen kann. Zu diesem Zweck werden im ersten Schritt statische Biegeversuche an Bitumen und Mastixprobekörpern durchgeführt. Als Ergebnis erhält man Durchbiegungskurven, die in einem weiteren Schritt als Grundlage für die Berechnung der Steifigkeit S und des m-Wertes (nach ÖN 14771) herangezogen werden. Aufgrund dieser Ergebnisse können bereits erste Aussagen über das Kriechverhalten der getesteten Bindemittel getätigt werden. Insgesamt wird das Kriechverhalten für 4 verschiedene Bindemittel (2 Standardbindemittel und 2 polymermodifizierte Bindemittel) analysiert.

Das Kriechverhalten von Asphalt wird mit Hilfe von statischen Zugkriechversuchen bestimmt. Als Ergebnis aus dem Versuch erhält man die Längenänderung des Probekörpers über die Zeit. Das Kriechverhalten wird für vier verschiedene Mischguttypen untersucht.

Um einen Zusammenhang zwischen dem Kriechverhalten der unterschiedlichen Materialien (Bitumen, Mastix und Asphalt) herstellen zu können, braucht man vergleichbare Parameter. Diese werden im Rahmen der gegenständlichen Arbeit aus der rheologischen Modellierung gewonnen. Mit dem so genannten Power-Law Modell ist es möglich, auf Grundlage der Versuchsergebnisse, die Materialparameter H und p zu ermitteln. Diese Parameter beschreiben das Kriechverhalten von bituminösen Werksoffen.

Im letzten Teil der Arbeit werden die mit Hilfe des Modells errechneten Materialparameter einander gegenübergestellt und mögliche Zusammenhänge im Kriechverhalten von Bitumen und Asphalt aufgezeigt.

# 2. RHEOLOGISCHE GRUNDLAGEN ZUM MATERIALVERHALTEN

# 2.1 Allgemeines

Die mechanischen Eigenschaften von Werkstoffen spielen im konstruktiven Ingenieurbau eine wesentliche Rolle. Neben der Festigkeit sind die Formänderungseigenschaften unter Belastung durch äußere Kräfte maßgeblich für die Beurteilung und Klassifizierung von Baustoffen. Die Formänderungseigenschaften hängen u.a. von der Prüfkörpergeometrie, der Belastungsgeschwindigkeit, der aufgebrachten Spannung und der Temperatur ab. Um vergleichbare Aussagen über das Werkstoffverhalten tätigen zu können, bedient man sich genormter Prüfverfahren.

# 2.2 Grundformen des Materialverhaltens

Mit Hilfe der Rheologie, der Lehre vom Fließverhalten, ist es möglich, die Formänderungseigenschaften eines Körpers unter Belastung durch äußere Kräfte zu beschreiben. In der Rheologie unterscheidet man zu diesem Zweck drei Grundformen physikalischen Stoffverhaltens: Elastizität, Viskosität und Plastizität. Die meisten Werkstoffe werden sich in der Realität nicht eindeutig einer bestimmten Grundform des physikalischen Stoffverhaltens zuordnen lassen. Das heißt ein Werkstoff wird sich weder rein elastisch, rein plastisch oder rein viskos verhalten. Viel mehr lässt sich das Verhalten der Werkstoffe durch Kombination der einzelnen Wirkungen der Modellkörper am besten beschreiben. Ziel ist es, durch Erstellung mehr oder weniger komplexer Modelle, das Materialverhalten möglichst wirklichkeitsgetreu nachzubilden. Hierzu werden die mit dem jeweiligen Modell mathematisch errechneten Parameter mit Versuchsergebnissen aus dem Labor verglichen. Für jeden Werkstoff kann so ein individuell abgestimmtes Modell erzeugt werden, mit dem eine möglichst realistische Aussage über das Materialverhalten gegeben werden kann. Eine mögliche Form des Modells stellt das so genannte Power-Law Modell, welches in Kapitel 2.4 behandelt wird, dar.

### 2.2.1 Elastizität

Elastisches Verhalten zeigt sich darin, dass durch äußere Kräfte verursachte Dehnungen nach der Entlastung sofort und vollständig zurückgehen. Ist die Spannungs-Dehnungslinie, die aus dem einaxialen Zugversuch resultiert linear, spricht man von einem linearelastischen Verhalten des Werkstoffes. Aus der Steigung der Geraden wird ein wesentlicher Materialparameter abgeleitet, der Elastizitätsmodul, kurz E-Modul (siehe Abbildung 1).

Gleichung 1 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung, was auch als Hookesches Gesetz bekannt ist. Folglich kann man das linearelastische Materialverhalten durch eine Feder, auch Hooke-Element (Abbildung 1) genannt, abbilden.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{i}}$$
E-Modul [N/mm<sup>2</sup>]
Gleichung 1
mit
$$\sigma = \frac{F}{A}$$
Spannung [N/mm<sup>2</sup>]
Gleichung 2
$$F$$
Belastung [N]
A
Querschnittsfläche [mm<sup>2</sup>]
und
$$\varepsilon_{i} = \frac{\Delta I}{l_{0}} = \frac{I - l_{0}}{l_{0}}$$
Längsdehnung [-]
Gleichung 3
$$I$$
Länge zum Betrachtungszeitpunkt [mm]
$$l_{0}$$
Ausgangslänge [mm]
$$\int_{0}^{\sigma} \int_{0}^{\sigma} \int_{$$

Abbildung 1: Hooke´sche Feder, Kraft-Verformungskurven

Gleichzeitig mit der Längsdehnung  $\varepsilon_1$  tritt die so genannte Querdehnung  $\varepsilon_q$  auf. Ein Maß für diese Verformung ist die Querdehnungszahl  $\mu$ , die die Querdehnung  $\varepsilon_q$  in Relation zur Längsdehnung  $\varepsilon_1$  setzt (Gleichung 4).

$$\mu = \frac{\varepsilon_{q}}{\varepsilon_{l}} [-]$$
 Gleichung 4

### 2.2.2 Plastizität

Bei vielen kristallinen Stoffen tritt nach Erreichen einer bestimmten Grenzspannung das Fließen des Werkstoffes ein, bei dem die Verformungen plötzlich zeitabhängig zunehmen, ohne dass dabei die Spannung erhöht wird. Dieses Verhalten kann mit einem St.Venant´schen Reibungselement beschrieben werden (siehe Abbildung 2).



#### Abbildung 2: St. Venant´sches Reibungselement, Kraft-Verformungskurven

Am Reibungselement greift eine Kraft F an. Diese erzeugt die Spannung au zu

$$\tau = \frac{F}{b \cdot I} \text{ [N/mm2]}$$
Gleichung 5

mit

FKraft [N]b ⋅ IReibfläche [mm²]

Wird die Haftreibung  $\mu_{\rm H}$  überschritten, beginnt das Reibungselement zu rutschen, Verschiebung tritt auf. Falls die Gleitreibung  $\mu_{\rm G}$  gleich der Haftreibung  $\mu_{\rm H}$  ist, muss die Kraft konstant gehalten werden, um das Reibungselement weiter zu verschieben. Unterschreitet die angreifende Kraft F die Reibkraft, kommt das Reibungselement zum Stillstand. Die aufgebrachte Verschiebung geht auch bei Wegnahme der Kraft nicht zurück. Bei einer geringen Gleitreibung  $\mu_{\rm G}$  kann die Kraft F nach Erreichen der Grenzspannung verringert werden. Idealplastisches Verhalten heißt, dass bei Erreichen einer bestimmten Grenzkraft, die Verformungen bei konstanter Kraft immer größer werden, damit kann F durch das St.Venant sche Reibungselement dargestellt werden, wenn die Gleitreibung  $\mu_{\rm G}$  gleich der Haftreibung  $\mu_{\rm H}$  ist (siehe Abbildung 2).

#### 2.2.3 Viskosität

Viele Werkstoffe zeigen bereits bei geringen aufgebrachten Spannungen eine deutliche Zunahme der Verformung mit der Zeit. Dieses Verhalten nennt man viskoelastisch. Das heißt ihre Verformung unter Last lässt sich auf viskose und elastische Anteile zurückführen. Während die elastischen Anteile unabhängig von der Zeit sind, bedeutet viskos, dass die Verformung unter einer konstanten Last, auch auf geringem Niveau, mit der Zeit stetig zunimmt. Als Modell wird der so genannte Newton-Körper (Abbildung 3) herangezogen. Er besteht aus einem Kolben in einem mit rein viskoser Flüssigkeit gefüllten unendlich langen Zylinder. Unter konstanter Last kriecht dieses Material mit konstanter Geschwindigkeit. Steht der Kolben still, fällt die Spannung abrupt auf null ab. Bringt man die Kraft plötzlich auf, reagiert das Element starr. Je schneller der Kolben bewegt wird, desto größer ist die vorhandene Spannung in der Flüssigkeit.



Abbildung 3: Newton-Körper

Lässt man die Spannung linear mit der Zeit ansteigen, reagiert der Dämpfer mit einer von der Zeit abhängigen quadratischen Verformung. Dies lässt sich mit Hilfe von

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \text{ [N/mm^2]}$$

Gleichung 6

mit

 $\eta$  Viskosität [N\*s/mm<sup>2</sup>]

mathematisch beschreiben. Bei konstant gehaltener Spannung nehmen die Verformungen linear mit der Zeit zu. Aus Gleichung 6 folgt, dass sich die Dehnungen zu einem bestimmten Zeitpunkt zu:

Gleichung 7

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\eta} \cdot t$$
 [-]

ergeben.

# 2.3 Kriechen und Relaxieren

Das Materialverhalten von bituminösen Werkstoffen lässt sich am besten durch Kombinationen von Grundelementen erklären. Sie verhalten sich je nach vor herrschenden Randbedingung elastisch und auch viskos, man spricht vom viskoelastischen Materialverhalten. So kann man beispielsweise für bituminöse Materialien ein stark temperaturund zeitabhängiges Materialverhalten erwarten.

Zur Beschreibung der Formänderungseigenschaften von viskoelastischen Werkstoffen bedient man sich so genannter Kriech- bzw. Relaxationsversuche. Bei rascher Belastung eines viskoelastischen Stoffes mit einer Spannung stellt sich sofort eine elastische Dehnung  $\varepsilon_{\rm el}$  ein. Wirkt diese Spannung über längere Zeit, treten mit der Zeit zunehmende Verformungen auf. Dieses Phänomen wird Kriechen genannt. Wird der Stoff nach gewisser Zeit entlastet, verschwindet die elastische Verformung und es bleiben nur die Kriechverformungen. Mit fortschreitender Zeit gehen die reversiblen Anteile der Kriechverformungen  $\varepsilon_{\rm k,r}$  zurück und es bleiben nur die irreversiblen Teile  $\varepsilon_{\rm k,ir}$  über (Abbildung 4).



Abbildung 4: Kriechen eines viskoelastischen Stoffes

Bildet man den Quotienten aus Kriechverformung  $\epsilon_k$  und der elastischen Verformung  $\epsilon_{el}$  erhält man die Kriechzahl  $\phi_t$  zu:

$$\varphi_t = \frac{\mathcal{E}^k}{\mathcal{E}^{el}}$$

Gleichung 8

Unter Dauerlast ergibt sich die gesamte Dehnung zu:

$$ges_{\mathcal{E}t} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{k} = \varepsilon_{el} + \varphi_{t} \cdot \varepsilon_{el} = \frac{\sigma}{E} \cdot (1 + \varphi_{t})$$
 Gleichung 9

 $\sigma$  Spannung [N/mm<sup>2</sup>]

Während das Kriechen die Veränderung der Dehnung bei konstanter Spannung über einen bestimmten Betrachtungszeitraum beschreibt, versteht man unter Relaxieren die Abnahme der Spannung über die Zeit bei konstant gehaltener Dehnung (Abbildung 5).



Abbildung 5: Relaxation eines viskoelastischen Stoffes

### 2.4 Modellierung des Kriechverhaltens mit Hilfe des Power-Law Modells

Das Power-Law Modell entsteht durch Serienschaltung eines Federelementes mit einem nicht linearen Dämpferelement (Abbildung 6).



Abbildung 6: Power-Law Modell (Aigner et al., 2006)

#### 2.4.1 Mathematische Beschreibung des Power-Law Modells

Die Kriechnachgiebigkeit J ergibt sich aus den Verformungsanteilen der beiden Elemente zu (Aigner et al,. 2006):

$$J = J_0 + J_a \cdot \left(\frac{t}{\tau}\right)^k \qquad \text{Kriechnachgiebigkeit [1/MPa]} \qquad \qquad \text{Gleichung 10}$$

mit

$J_0 = \frac{1}{E_0}$	elastischer Anteil
$\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{a}} \cdot \left(\frac{t}{\tau}\right)^{k}$	viskoser Anteil
Ja	initiale Kriechnachgiebigkeit [1/MPa]
k	Parameter zur Berücksichtigung der Nichtlinearität des Dämpferelementes [-]
τ	charakteristischer Zeitbeiwert zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Kriechprozesses [s]
t	Zeit [s]

Leitet man die Kriechnachgiebigkeit J nach der Zeit t ab, erhält man die Kriechrate dJ/dt zu (Aigner et al., 2006):

$$\frac{dJ}{dt} = J_a \cdot k \cdot \frac{t^{k-1}}{\tau^k} \qquad [1/MPa/s] \qquad \qquad \text{Gleichung 11}$$

Durch Umformung ergibt sich

Setzt man

$$k - 1 = p$$
 [-]

und

$$\frac{J_a}{\tau^k} \cdot k = H \qquad [1/s/MPa]$$

So erhält man die Parameter H und p des Power Law Modells zu:

$$\frac{dJ}{dt} = H \cdot t^p \qquad \qquad \text{Gleichung 13}$$

Mit Hilfe der beiden Parameter ist eine Beschreibung des Kriechverhaltens von Bitumen, Mastix und Asphalt auf Grundlage der Versuchsergebnisse möglich. Abbildung 7 zeigt die gute Übereinstimmung der im Versuch erhaltenen Ergebnisse mit jenen aus der Modellberechnung.



Abbildung 7: Parameter H und p des Power-Law Modells (Aigner et al., 2006)

Der Parameter H beschreibt die initiale Kriechnachgiebigkeit des Dämpferelementes. Aus einer geringen Kriechnachgiebigkeit resultieren kleine H-Werte. Je kleiner die H-Werte desto steifer ist das untersuchte Material. Der Parameter p beschreibt das zeitabhängige Verhalten des nichtlinearen Dämpfers (k=p+1). Für den Spezialfall von p=-1 (k=O) ergibt sich ein rein elastisches Verhalten (Feder mit E=1/Ja) und für p=O (k=1) rein viskoses Fliessen (Newton'scher Dämpfer). Mit der Variation von p zwischen O und -1 kann man somit Materialien mit unterschiedlichstem viskosem Verhalten beschreiben. Die Parameter H und p stellen somit eine wesentliche Grundlage für die Vergleichbarkeit des Kriechverhaltens der unterschiedlichen Materialien (Bitumen, Mastix und Asphalt) dar.

# 3. BESTIMMUNG DES KRIECH- BZW. RELAXATIONSVERHALTENS ANHAND VON STATISCHEN LABORVERSUCHEN

In folgendem Kapitel soll ein Überblick an unterschiedlichen Versuchstypen zur Durchführung von statischen Kriech- und Relaxationsversuchen im Labor gegeben werden. Dabei werden u.a. die international weit verbreiteten Versuchsgeräte vorgestellt, die im Rahmen des US-amerikanischen Forschungsprogramms SHRP (Strategic Highway Research Programm) entwickelt wurden. Weiters werden Versuchsgeräte diskutiert, die speziell zur Ermittlung des Kriech- bzw. Relaxationsverhaltens konzipiert wurden.

# 3.1 Art der Beanspruchung

Die Art der Beanspruchung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Versuchsdurchführung und ist bei der Ergebnisinterpretation von großer Bedeutung. Abbildung 8 gibt einen Überblick über die Möglichkeiten zur Durchführung von Versuchen zur Bestimmung des Verformungsverhaltens und zeigt beispielhaft die Zeit-Verformungskurven für die unterschiedlichen Versuchstypen. Die Beanspruchung kann weiters statisch und/oder dynamisch aufgebracht werden.

Mit Hilfe der statischen Versuche ist es möglich das Langzeitverhalten von bituminösen Werkstoffen anzusprechen. Dynamische Versuche finden bei der Beurteilung des Kurzzeitverhaltens und des elastischen Verhaltens von bituminösen Werkstoffen Anwendung.

Wesentliches Merkmal der eindimensionalen, statischen Versuche ist die Belastung des Probekörpers mittels konstanter Zug- bzw. Druckkraft über die Versuchzeit. Gemessen werden die resultierenden Dehnungen. Die Versuche sind einfach durchzuführen und liefern als Ergebnis Zeit-Verformungskurven, die einfach zu interpretieren sind. Bei den eindimensionalen, dynamischen Versuchen wird der Probekörper sinusförmig belastet. Die Auswertung der Zeit-Verformungskurven ist im Vergleich zu den statischen Versuchen aufgrund der sinusförmigen Belastung komplexer.

Um im Labor möglichst realitätsnahe Versuchsergebnisse zu erhalten, werden die Probekörper einer dreidimensionalen Beanspruchung ausgesetzt. Diese Beanspruchung setzt sich aus dem deviatorischen und dem hydrostatischen Anteil zusammen. Der deviatorische Anteil der Belastung erzeugt eine Spannung  $\sigma_1$ , der hydrostatische Anteil eine Spannung  $\sigma_3$  im Probekörper. Sind die aufgebrachten Spannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  gleich groß, spricht man bei der resultierenden Verformung vom so genannten hydrostatischen Kriechen. Ist die Spannung  $\sigma_1$  größer als  $\sigma_3$ , oder umgekehrt, dann spricht man vom deviatorischen Kriechen. Abbildung 8 zeigt die Möglichkeiten des Zusammenwirkens von hydrostatischem und deviatorischem Anteil. Bei der Durchführung von dreidimensionalen Versuchen werden hohe Anforderungen an die Versuchsgeräte und das Versuchspersonal gestellt. Ihre Durchführung ist technisch aufwendiger und

teurer als jene von eindimensionalen statischen Versuchen. Weiters ist die Interpretation und Auswertung der Versuchsergebnisse schwierig.

Test method	Axial load	Confining pressure
Uniaxial creep test (uniaxial static load test)	Permanent Deformation	-
Uniaxial repeated load test	Pol Time Ungodiant Time Ungodiant Time Ungodiant Creet	-
Uniaxial dynamic test	Pol year	-
Triaxial creep test with constant confining pressure	Permanent Deformation	Static
Triaxial repeated load test with constant confining pressure	PO PO PO PO PO PO PO PO PO PO	Static
Triaxial dynamic test with constant confining pressure	yang Specimen Schematic phase angle = $\varphi$ + + phase angle = $\varphi$ + + tast	Static

Test method	Axial load	Confining pressure
Triaxial dynamic test with oscillating confining pressure	Pool Time phase angla = $\varphi$ phase angla = $\varphi$ tag tag tag tag tag tag	dynamic, oscillating

#### Abbildung 8: Möglichkeiten zur Durchführung von eindimensionalen und dreidimensionalen statischen bzw. dynamischen Kriechversuchen (Blab et al., 2005)

In der gegenständlichen Arbeit kommen ausschließlich statische Kriechversuche zur Anwendung.

### 3.2 Auswertung von statischen Kriechversuchen

Die Auswertung der Versuchsergebnisse aus den Kriechversuchen kann unabhängig vom Versuchstyp durchgeführt werden. Der Scherversuch (Kapitel 3.3.3) ist aufgrund der Belastungsart und Probekörpergeometrie speziell auszuwerten.

Als direktes Ergebnis aus dem Kriechversuch erhält man die Deformation des Probekörpers zufolge einer Belastung bei bestimmten Temperaturen. In Abhängigkeit vom Versuchstyp werden aus den gemessenen Deformationen die Dehnungen  $\varepsilon$  berechnet. Trägt man die berechnete Dehnung  $\varepsilon$  über die Zeit auf, erhält man Zeit-Verformungskurven.

Im nächsten Schritt wird über die aufgebrachte Belastung und den Probekörperquerschnitt die vorhandene Spannung  $\sigma$  errechnet.

Zur Beurteilung des Kriechverhaltens wird die Kriechnachgiebigkeit J als interpretierbare Kenngröße zu:

$$J_{(t)} = rac{\mathcal{E}(t)}{\sigma_{(t)}} \text{ [m/m/MPa]}$$

Gleichung 14

errechnet.

Zur weiteren Interpretation des Kriechverhaltens leitet man die Kriechnachgiebigkeit J(t) nach der Zeit ab. Als Ergebnis erhält man die Kriechrate dJ/dt, die im doppelt logarithmischen Maßstab über die Zeit aufgetragen wird. Abbildung 9 zeigt beispielhaft den Verlauf der Kriechnachgiebigkeit und der Kriechrate eines Asphaltmischgutes in Abhängigkeit von der Zeit bei unterschiedlichen Prüftemperaturen.



Abbildung 9: Kriechnachgiebigkeit J, Kriechrate dJ/dt

# 3.3 Prüfung von Bitumen und Mastix

### 3.3.1 Zugversuch

Die Kriech- und Relaxationsversuche werden in einem Temperaturbereich von  $+5^{\circ}$ C bis -25°C und zusätzlich bei verschiedenen Belastungsstufen durchgeführt. Sinnvoll ist etwa eine Prüfung in 10°C Schritten (+5°C, -5°C, -15°C, -25°C) und jeweils vier Belastungsstufen beim Kriechversuch. Der Relaxationsversuch findet in einem Temperaturbereich von +5°C bis -15°C, ebenfalls in 10°C Schritten (+5°C, -5°C, -15°C) und jeweils drei Belastungsstufen statt (Schellenberg et al., 1994).

Abbildung 10 zeigt die Prüfvorrichtung mit der die Kriech- und Relaxationsversuche durchgeführt werden. Die Probe wird liegend in den Versuchsapperat eingespannt und belastet.



#### Abbildung 10: Versuchsprinzip für den Zugkriech- bzw. Zugrelaxationsversuch und Probekörperabmessungen in mm (Schellenberg et al., 1994)

Das Ergebnis aus dem Kriechversuch sind Zeit-Verformungskurven, aus denen die Zugviskosität bestimmt werden kann. Setzt man voraus, dass die Zeit-Dehnungskurve annähernd linear verläuft, lässt sich mit Hilfe des Newton Körpers (siehe Kapitel 2.2.3 Viskosität) die Viskosität folgendermaßen beschreiben (Schellenberg et al., 1994):

$$\sigma = \lambda_z \cdot \hat{\varepsilon} = \lambda_z \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} \text{ [N/mm^2]} \qquad \text{Gleichung 15}$$
  
mit  

$$\lambda_z \qquad \text{Zugviskosität [N*s/mm^2]}$$
  

$$\sigma_z \qquad \text{Zugspannung [N/mm^2]}$$
  

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} \qquad \text{Steigung im quasi-linearen Teil der Zeit-Dehnungskurve [1/s]}$$

Durch Umformen der Gleichung erhält man,

$$\lambda_z = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\frac{\Delta I}{\Delta t \cdot L_0}}$$
 [N\*s/mm<sup>2</sup>] Gleichung 16

mit

$$\lambda_z$$
 Zugviskosität [N\*s/mm<sup>2</sup>]

$$\sigma$$
konstante, einaxiale Zugspannung [N/mm²] $\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta I}{\Delta t \cdot L_0}$ Steigung im quasi-linearen Teil der Zeit-Dehnungskurve [1/s] $L_0$ Bezugslänge des Probekörpers [mm]

Beim Relaxationsversuch wird der Spannungsabbau eines auf konstante Länge gedehnten Probekörpers über die Versuchszeit gemessen. Als Kenngröße des Relaxationsverhaltens ist die auf dem Maxwell-Modell beruhende Relaxationszeit bei dem 1/e-fachen Betrag der vorgegebenen Anfangsspannung zu ermitteln. Die Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Maxwell-Modells lässt sich durch eine Differenzialgleichung 1. Ordnung beschreiben (Schellenberg et al., 1994).

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\lambda}$$
 [-] Gleichung 17

Aufgrund der Anfangsbedingungen (konstante Deformation zur Zeit t=O und Anfangsspannung  $\sigma_0$ ) ergibt sich der zeitliche Verlauf der Spannungen zu:

$$\sigma_{t} = \sigma_{0} \cdot e^{\frac{-E}{\lambda}t} = E \cdot \varepsilon_{0} \cdot e^{\frac{-t}{tR}} [N/mm^{2}]$$
Gleichung 18  
mit  

$$\sigma_{t}$$
Zugspannung in Abhängigkeit von der Zeit [N/mm^{2}]  

$$\sigma_{0}$$
Anfangszugspannung zur Zeit t=0 [N/mm^{2}]  
E Elastizitätsmodul [N/mm^{2}]  

$$\lambda$$
Zugviskosität [N\*s/mm^{2}]  

$$t$$
Zeit [s]  

$$t_{R} = \frac{\lambda}{F}$$
Relaxationszeit [s]

#### 3.3.2 Biegeversuch

Der statische Biegeversuch an Bitumen- bzw. Mastixproben wird üblicherweise anhand der standardisierten Prüfvorschrift gem. ÖNORM EN 14771 mit Hilfe des Biegebalkenrheometers (BBR) nach SHRP durchgeführt. Über die gemessene Kriechverformung von Bitumen- bzw. Mastixbalken wird die Kriechfähigkeit und die daraus resultierende Relaxationsfähigkeit bestimmt.



Abbildung 11: Versuchsprinzip BBR nach ÖNORM EN 14771

Der Probekörper (L=125,00 mm, H=6,25 mm, B=12,50 mm) wird genau 240 Sekunden lang belastet, wobei für die Berechnung der Kriechsteifigkeit und Relaxationsfähigkeit die Werte nach 60 Sekunden Belastungsdauer herangezogen werden (ÖNORM EN 14771).

Der Probekörper kann bei einer konstanten Last von 980 mN und einer Prüftemperatur von 0° C bis -36° C belastet werden. Als Prüftemperatur ist die niedrigste Deckschichttemperatur für die Bemessung des Asphaltes zuzüglich 10°C zu wählen (ÖNORM EN 14771).

Mit Hilfe der Balkentheorie kann man aus der gemessenen Durchbiegung des Balkens auf die Steifigkeit S des Probekörpers rückrechnen (ÖNORM EN 14771).

$$S_{(60s)} = \frac{P \cdot L^3}{4 \cdot B \cdot H^3 \cdot D_{(60s)}} \text{ [MPa]}$$

Gleichung 19

mit

<b>S</b> (60s)	Kriechsteifigkeit nach 60 Sekunden
Ρ	konstante Einzellast (980 mN)
L	Spannweite des Biegebalkens (102,00 mm)
В	Probekörperbreite (12,50 mm)
Н	Probekörperlänge (6,25 mm)
<b>D</b> (60s)	Durchbiegung nach 60 Sekunden

Trägt man nun die errechneten Steifigkeiten S zu bestimmten Zeitpunkten auf, erhält man den Steifigkeitsverlauf. Um die Relaxationsfähigkeit bestimmen zu können, trägt man die Steifigkeit S über die Zeit t im doppelt logarithmischen Maßstab auf. Die Steigung (m-Wert) der Tangente an die erhaltene Kurve (siehe Abbildung 12) stellt die Relaxationsfähigkeit m des geprüften Materials zum betrachteten Zeitpunkt dar (ÖNORM EN 14771).



Abbildung 12: BBR, Durchbiegung, Steifigkeit, m-Wert (Litzka et al., 1998)

Neben der Steifigkeit S und dem m-Wert kann die Kriechnachgiebigkeit J und die Kriechrate dJ/dt zur Interpretation des Kriechverhaltens herangezogen werden (Kapitel 3.2).

Die Dehnungen  $\varepsilon$  und die Spannungen  $\sigma$  an der Unterseite des Probebalkens ergeben sich zu (Aigner et al., 2006):

$$\varepsilon_{(t)} = \frac{6 \cdot h}{l^2} \cdot u_{(t)} \quad [-]$$
 Gleichung 21

mit

I Spannweite [mm]

h Höhe des Probekörpers [mm]

und

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{F \cdot I}{4}}{\frac{b \cdot h^2}{6}} \text{ [MPa]}$$

mit

F	Belastung [N]	
1	Spannweite [mm]	

Gleichung 22

- *b* Breite des Probekörpers [mm]
- *h* Höhe des Probekörpers [mm]

#### 3.3.3 Scherversuch

Mit Hilfe des Dynamischen Scherrheometer (DSR) kann das Kriechverhalten von bituminösen Werkstoffen gem. ÖNORM EN 14770 ermittelt werden.



Abbildung 13: Versuchsprinzip (Kirchmaier 2006)

Der Probekörper wird mit einer konstanten Schubspannung über einen festgelegten Zeitraum beansprucht. Gemessen werden die Verformungen in Abhängigkeit von der Zeit. Je nach Prüftemperatur (+4°C bis +40°C) kommen Probekörper mit einem Durchmesser von 8,0 mm bzw. 25,0 mm zur Anwendung (Kirchmaier, 2006).

Der Versuch findet bei drei unterschiedlichen Versuchstemperaturen (+4°C, +20°C und +40°C) statt. Die Belastung wird in Abhängigkeit von der Bitumensorte und Prüftemperatur gewählt und als Scherspannung 420 s aufgebracht. Anschließend wird der Probekörper entlastet und die Materialreaktion für 180 s registriert (Rückkriechverhalten). Die Belastung sollte max. 5000 Pa betragen, kann aber bei härteren Bitumensorten und niedriger Prüftemperatur (+4°C) erhöht werden um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Des Weiteren sollte man sicherstellen, dass die durch die Belastung erzeugte Verzerrung nach 380 s ca. 5 % beträgt (Kirchmaier, 2006).



#### Kriech- und Rückkriechkurve



Aus der gemessenen Verformung ergibt sich die so genannte Kriechnachgiebigkeit J(t) zu (Kirchmaier, 2006):

$$J_{(t)} = \frac{\gamma}{\tau} [m/m/MPa]$$
Gleichung 23mit $J_{(t)}$ Kriechnachgiebigkeit  $[m/m/MPa]$  $\gamma = \frac{r \cdot \phi}{h} \cdot 100$ Schubverzerrung [%]Gleichung 24 $h$ Messspalt  $[mm]$ Gleichung 24 $h$ Messspalt  $[mm]$ Gleichung 24 $r$ Radius  $[mm]$ Gleichung 24 $r$ Radius  $[mm]$ Gleichung 25 $M$ Drehmoment  $[Nm]$ Gleichung 25 $M$ Drehmoment  $[Nm]$ Gleichung 25 $R$ Plattenradius  $[m]$ Gleichung 25

Als weitere Ergebnisgröße erhält man die Viskosität  $\eta_{\rm (t)}$  zu (Kirchmaier 2006):

$$\eta_{(t)} = \frac{\tau}{D_{(t)}}$$
 [Pa\*s] Gleichung 26  
mit  
 $\tau$  Schubspannungen [Pa]

$$D(t) = \frac{\partial \gamma(t)}{\partial (t)}$$
 Schergeschwindigkeit bzw. Scherrate [1/s] Gleichung 27

# 3.4 Prüfung von Asphalt

#### 3.4.1 Direkter Zugversuch

Mit Hilfe einer elektro-mechanischen Zugmaschine (Abbildung 15) kann unter Anwendung des Entwurfes zur ÖNORM B 3590 ein direkter Zugversuch bei konstanter Temperatur an prismatischen oder zylindrischen Asphaltprobekörpern durchgeführt werden. Ziel ist es, das Tieftemperaturverhalten von Asphalt zu ermitteln.



Abbildung 15: Versuchsprinzip, Probekörperabmessungen in mm (Spiegl et al., 2005)

Das Relaxations- und Kriechverhalten wird normgemäß an prismatischen oder zylindrischen Probekörpern bestimmt. Die Abmessungen der Probekörper sind von dem im Mischgut vorhandenen Größtkorn abhängig und werden so gewählt, dass sich ein konstanter Spannungsverlauf über den Querschnitt einstellt (Abbildung 15). Der Relaxationsversuch wird üblicherweise in drei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wird der Probekörper auf die gewünschte Testtemperatur gebracht. Anschließend wird über eine Zugkraft eine Dehnung erzeugt, die im dritten Schritt konstant zu halten ist. Registriert wird der Spannungsabfall in der Probe über die Zeit (Spiegl et al., 2005).

Der Kriechversuch wird ebenfalls in drei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wird der Probekörper auf die gewünschte Testtemperatur gebracht. Im zweiten Schritt wird der Probekörper mit einer Zugkraft belastet, die im dritten Schritt konstant zu halten ist. Registriert wird die Längenänderung der Probe über die Zeit (Spiegl et al., 2005).

Die Relaxations- und Kriechversuche werden in einem Temperaturbereich von +20°C bis -25°C durchgeführt. Neben der Prüftemperatur ist die aufgebrachte Last eine wesentliche Steuergröße bei der Versuchdurchführung. Die aufgebrachte Zugkraft sollte maximal 30% der Asphaltzugfestigkeit bei der jeweiligen Testtemperatur betragen (Spiegl et al., 2005).

Abbildung 16 zeigt beispielhaft Kriechkurven eines Asphaltmischgutes aus dem direkten Zugversuch.



SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1; K089G

Abbildung 16: typische Kriechkurven aus dem direkten Zugversuch bei unterschiedlichen Prüftemperaturen

#### 3.4.2 Indirekter Zugversuch

Unter Verwendung des Indirect Tensile Test (IDT), der nach AASHTO TP-9 ausgeführt wird, ist es möglich die Kriecheigenschaften und im einem weiteren Schritt die Relaxationseigenschaften von Asphaltprobekörpern in einem standardisierten Verfahren zu ermitteln.



#### Abbildung 17: Versuchsprinzip, Probekörperabmessungen in mm, Dehnmessstreifenposition und Belastungsrichtung (AASHTO TP 9)

Der Versuch wird mit zylindrischen Probekörpern durchgeführt. Die Abmessungen der Probekörper sind der Abbildung 17 zu entnehmen. Die Belastung wird entlang der vertikalen Zylinderachse aufgebracht. Mit Hilfe von Dehnmessstreifen werden die Dehnungen entlang des vertikalen und horizontalen Durchmessers der zylindrischen Probe gemessen. Die Positionierung der Dehnmessstreifen ist ebenfalls der Abbildung 17 zu entnehmen (AASHTO TP 9).

Die Versuche finden bei 0°C, -10°C und -20°C statt. Die Beanspruchung wird für genau 100 sec aufgebracht, ist abhängig vom verwendeten Mischguttyp und errechnet sich aus der kritischen Bruchlast zu (AASHTO TP 9):

$$S = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} [N/mm^2]$$

**Gleichung 28** 

mit

- S Beanspruchung im Versuch [N/mm<sup>2</sup>]
- d Durchmesser der Probe [mm]
- t Dicke der Probe [mm]
- P Bruchlast [N]

Als Ergebnis erhält man die horizontalen und vertikalen Dehnungen des Probekörpers. Die Spannungen im Probekörper werden mit Hilfe der Formel von Hondros berechnet.

Abbildung 18 zeigt eine typische Kriechkurve aus dem IDT-Test



Abbildung 18: typische Kriechkurve aus dem indirekten Zugversuch

Aufgrund der Versuchsmethodik ist die Durchführung eines Relaxationsversuches nicht möglich. Aus diesem Grund wird das Relaxationsverhalten mit Hilfe des Kriechversuches bestimmt (Shah et al. 2004).

#### 3.4.3 Direkter Druckversuch

Der Druckversuch nach Weng On Tam stellt einen sehr einfachen, einaxialen, statischen Versuch zur Ermittlung des Kriechverhaltens bei mittleren bis höheren Temperaturen dar.

Der Versuch wird mit zylindrischen Probkörpern durchgeführt. Die Abmessungen der Probekörper sind der Abbildung 19 zu entnehmen. Der Asphaltprobekörper wird nach einer Vorbelastung mit einer konstanten Druckkraft belastet und die resultierende Stauchung wird über Wegaufnehmern (LVDT) registriert.



Abbildung 19: Versuchsprinzip (aus dem Englischen übersetzt), Probekörperabmessungen in mm (Weng On Tam et al., 2000)

Der Versuch findet bei +40° C statt. Die Probe wird dreimal mit 556 N vorbelastet und wieder entlastet. Danach wird die Last von 556 N für eine Stunde konstant gehalten und anschließend entlastet (siehe Abbildung 20).



Abbildung 20: Belastungsgeschichte (Weng On Tam et al., 2000)

Die Stauchungen (negative Dehnung) werden mit Wegaufnehmern registriert. Die Spannungen lassen sich mit Hilfe der aufgebrachten Belastung und dem Probekörperquerschnitt errechnen.

Abbildung 21 zeigt eine mit LVDT's gemessene Kriechkurve.



Abbildung 21: typische Kriechkurve (Weng On Tam et al., 2000)

#### 3.4.4 Indirekter Druckversuch

Der Hollow Cylinder Test (HCT) ist ein indirekter Druckversuch. Der Vergleich der Ergebnisse mit jenen des IDT zeigt, dass der Versuch mit dem HCT unter gleichen Randbedingungen zu den gleichen Ergebnissen führt wie beim IDT.

Wie man aus dem Namen leicht erkennen kann, handelt es sich hier um einen zylindrischen, hohlen Probekörper. Die Abmessungen des Probekörpers sind der Abbildung 22 zu entnehmen. Die Belastung wird in Form eines Druckes im Inneren des Zylinders aufgebracht.



Abbildung 22: Probekörperabmessungen in mm, Dehnmessstreifenposition (Buttlar et al., 2000)

Der Prüfkörper befindet sich in einem Behälter mit Kühlflüssigkeit, mit der der Probekörper auf die gewünschte Prüftemperatur gebracht werden kann. Der Versuch wird, wie beim IDT, bei O°C, -10°C und -20°C durchgeführt.

Die Belastung, die mit Hilfe einer Druckmittelflüssigkeit (bis zu 180 psi) erzeugt wird, wird für genau 100 sec aufgebracht (Buttlar et al., 2000).

Die resultierenden Dehnungen werden mit Hilfe der Dehnmessstreifen registriert. Der Druck im Inneren des Zylinders wird über einen Druckmessfühler kontrolliert. Die Spannungen im Probekörper hängen vom Innendruck ab und errechnen sich zu (Buttlar et al., 2000):

$$\sigma_t = \frac{\boldsymbol{a}^2 \cdot \boldsymbol{p}_i}{\boldsymbol{b}^2 - \boldsymbol{a}^2} \cdot \left(1 + \frac{\boldsymbol{b}^2}{r^2}\right) \text{[MPa]}$$

Gleichung 29

Gleichung 30

$$\sigma_r = \frac{\boldsymbol{a}^2 \cdot \boldsymbol{p}_i}{\boldsymbol{b}^2 - \boldsymbol{a}^2} \cdot \left(1 - \frac{\boldsymbol{b}^2}{r^2}\right) \text{[MPa]}$$

mit

- $\sigma_t$  Tangentialspannung (Zug)
- $\sigma_r$  Radialspannung (Druck)
- *p*<sub>i</sub> Innendruck [psi]
- *a* Innenradius [mm]
- *b* Außenradius [mm]

Abbildung 23 zeigt die oben angeführten Zusammenhänge zwischen dem aufgebrachten Innendruck und den resultierenden Spannungen.



Abbildung 23: Zusammenhang zwischen Innendruck und resultierender Spannung (Buttlar et al., 2000)

Abbildung 24 zeigt exemplarisch die resultierenden Dehnungen für unterschiedliche Versuchsdurchführungen.



Abbildung 24: typische Kriechkurve aus dem HCT (Buttlar et al., 2000)

# 4. KRIECHVERHALTEN AM BEISPIEL VON AUSGEWÄHLTEN BITUMINÖSEN WERKSTOFFEN

# 4.1 Untersuchte Materialien

#### 4.1.1 Bindemittel

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 2 Standardbindemittel (B 50/70, B 70/100) und 2 polymermodifizierte Bindemittel (PmB 45/80-50, PmB 45/80-65) getestet. Die Materialkennwerte sind in Tabelle 1 enthalten.

#### Tabelle 1: geprüfte Bindmitteltypen

Bindemittelbezeichnung	Materialkennwerte			
	RuK	50,0	[°C]	
B 50/70	Penetration	63,0	[1/10mm]	
1 00,70	RV@135 °C	511	[mPa.s]	
	PG genau	67-24	[°C]	
	RuK	46,8	[°C]	
B 70/100	Penetration	85,0	[1/10mm]	
	RV@135 °C	375	[mPa.s]	
	PG genau	63-24	[°C]	
	RuK	59,4	[°C]	
PmB 45/80-50	Penetration	75,0	[1/10mm]	
	RV@135 °C	1256	[mPa.s]	
	PG genau	69-27	[°C]	
	RuK	68,0	[°C]	
PmB 45/80-65	Penetration	77,0	[1/10mm]	
	RV@135 °C	1384	[mPa.s]	
	PG genau	79-28	[°C]	

#### 4.1.2 Bindemittelträger

Als Bindemittelträger wurde das Produkt Viatop Premium der Firma J. Rettenmaier & Söhne GMBH u. CO KG. verwendet. Die Viatop - Cellulosefasern werden in einem speziellen Herstellungsverfahren mit Bitumen umhüllt, das als Granulierhilfe dient. Gleichzeitig übernimmt das Bitumen die Funktion des Abstandhalters zwischen den Fasern und bildet so die Voraussetzung für das vollständige Auflösen der Pellets während des Mischvorgangs.

#### 4.1.3 Gestein

Tabelle 2 und 3 geben einen Überblick über die verwendeten Gesteine. Sämtliche Materialkennwerte wurden nach den einschlägigen Fachnormen ermittelt. Dies sind die ÖNORM 1097-4, ÖNORM 1097-6 und ÖNORM 1097-7. Die Mischguttypen AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4 und AC 22 trag 50/70, F4, G4 wurden mit Kalk hergestellt, während die Mischguttypen SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1 und SMA 11 70/100, S1, G1 mit Diabas hergestellt wurden.

Übersicht Gesteinsrohdichte Diabas 0 - 11					
Korngröße	scheinbare Rohdichte	Rohdichte ofengetr. Basis ord	Rohdichte wasser gesät. Basis ossd	Wasserauf- nahme	
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]	
[0 - 2]	2,81	2,75	2,77	0,758	
[2 - 4]	2,82	2,77	2,79	0,629	
[4 - 8]	2,85	2,77	2,8	0,982	
[8 - 11]	2,81	2,75	2,77	0,821	

#### Tabelle 2: Diabas, Saalfelden/Ö

#### Tabelle 3: Kalk, Bad Deutsch-Altenburg/D

Übersicht Gesteinsrohdichte Hollitzer 0 - 32						
Korngröße	scheinbare Rohdichte øa	Rohdichte ofengetr. Basis ord	Rohdichte wasser gesät. Basis øssd	Wasserauf- nahme		
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]		
[0 - 2]	2,83	2,79	2,80	0,600		
[2 - 4]	2,85	2,78	2,81	0,825		
[4 - 8]	2,89	2,81	2,84	0,921		
[8 - 11]	2,87	2,81	2,83	0,674		
[11 - 16]	2,85	2,80	2,82	0,595		
[16 - 22]	2,81	2,79	2,80	0,342		
[22 - 32]	2,84	2,80	2,82	0,454		

### 4.1.4 Füllermaterial

Als Füllermaterial wurde Kalksteinmehl der Firma Wopfinger verwendet.

Tabelle 4: Füllerkennv	verte
------------------------	-------

Füllerkennwerte			
Produktbezeichnung	Mineralogie	Rohdichte [mg/m³]	Hohlraumgehalt [vol-%]
Kalksteinmehl - Wopfinger	Kalzit, Dolomit	2,71	30

### 4.1.5 Asphaltmischgut

Für die gegenständliche Arbeit wurden insgesamt 4 Asphaltmischguttypen auf ihr Kriechverhalten hin untersucht:

Tragschichtasphalte:

- AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4
- AC 22 trag 50/70, F4, G4

Deckschichtasphalte:

- SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1
- SMA 11 70/100, S1, G1

Die Rezepturen und Sieblinien der Mischguttypen sind in Abbildung 25 und 26 angegeben. Der Unterschied zwischen AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4 und AC 22 trag 50/70, F4, G4 liegt nur im verwendeten Bindemittel, die restlichen Bestandteile sind im gleichen Verhältnis in beiden Mischguttypen vorhanden.



Abbildung 25: Rezeptur und Sieblinie AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4 und AC 22 trag 50/70, F4, G4 nach ÖNORM B 3580-2

Der Unterschied zwischen SMA11 PmB 45/80-65, S1, G1 und SMA11 70/100, S1, G1 liegt nur im verwendeten Bindemittel, die restlichen Bestandteile sind im gleichen Verhältnis in beiden Mischguttypen vorhanden.



Abbildung 26: Rezeptur und Sieblinie SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1 und SMA 11 70/100, S1, G1 nach ÖNORM 3584

Das Kriechverhalten der Asphalte wurde an prismatischen Probekörpern ermittelt. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die getesteten Probekörper der verschiedenen Asphaltmischguttypen. Für die Mischguttypen AC 22 trag 50/70, F4, G4 und AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4 kamen Probekörper mit den Abmessungen 200 mm x 60 mm x 60 mm zum Einsatz. Für die Mischguttypen SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1 und SMA 11 70/100, S1, G1 wurden Probekörper mit den Abmessungen 200 mm x 50 mm x 50 mm hergestellt. Die unterschiedlichen Abmessungen resultieren aus dem verwendeten Größtkorn.
Tabelle	5:	Probekörper
---------	----	-------------

Probe- körpernr.	Rohdichte [kg/m³]	Raum- dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Gesteins- Gehalt [vol-%]	Bindemittel- Gehalt [vol-%]	Hohlraum- Gehalt [%]					
AC 22 trag 50/70, F4, G4										
KO84A	2611,20	2474,88	83,80	11,00	5,20					
KO84B	2611,20	2470,87	83,61	10,99	5,40					
KO84C	2611,20	2465,52	83,44	10,96	5,60					
KO84E	2611,20	2481,45	83,97	11,03	5,00					
KO84G	2611,20	2484,74	84,15	11,05	4,80					
AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4										
EO9OD	2612,00	2492,80	84,10	11,02	4,60					
EO91D	2612,00	2495,40	84,47	11,03	4,50					
EO92D	2612,00	2469,90	83,68	10,92	5,40					
E093D	2612,00	2477,20	83,85	10,95	5,20					
EO95D	2612,00	2495,30	84,47	11,03	4,50					
	SM	A 11 PmB 45	5/80-65, S1,	G1						
EO89G	2516,90	2422,04	80,44	15,46	3,80					
EO89H	2516,90	2424,72	80,51	15,48	3,70					
K118F	2524,50	2438,80	80,73	15,57	3,40					
		SMA 11 70/	′100, S1, G1							
K120B	2534,60	2455,47	80,83	15,77	3,10					
K120F	2534,60	2461,10	81,00	15,81	2,90					
K120H	2534,60	2448,20	80,58	15,72	3,40					

# 4.2 Durchgeführte Laborprüfungen

Im Rahmen der gegenständlichen Arbeit werden bereits vorhandene Daten zur Beurteilung des Kriechverhaltens herangezogen. Diese wurden in zahlreichen Versuchsreihen am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung der TU Wien erarbeitet. Das Kriechverhalten für Bitumen und Mastix wurde mit Hilfe des Bending Beam Rheometers nach ÖNORM EN 14771 untersucht (siehe Kapitel 3.3.2). Zur Untersuchung des Kriechverhaltens von Asphalt wurden mit Hilfe einer elektro-mechanischen Zugmaschine direkte Zugversuche an Asphaltprobekörpern durchgeführt (siehe Kapitel 3.4.1).

#### 4.2.1 Statische Biegeversuche an Bitumen- und Mastixprobekörpern mit dem BBR

Mit Hilfe des BBR wurden Kriechversuche an Bitumen- und Mastixbalken durchgeführt um das so genannte Tieftemperaturkriechen (Low-Temperature-Creep) zu untersuchen. Die Mischungsverhältnisse zwischen Bitumen und dem Füllermaterial für die Mastixproben und die Prüftemperaturen sind in Tabelle 6 aufgelistet. Als Füllermaterial wurde Kalksteinmehl verwendet. Für jedes Mischungsverhältnis wurden 2-3 Versuche durchgeführt. Zur Auswertung wurden die Mittelwerte der Einzelversuche berechnet und anschließend für die grafische Auswertung herangezogen.

Bindemittel		°C			Bindemittel		°C	
	-12	-18	-24			-12	-18	-24
PmB 45/80-65 (B 50/90S) <b>1:0,5</b>	x	x	x		B 50/70 <b>1:0,5</b>	x	x	x
PmB 45/80-65 (B 50/90S) <b>1:1</b>	x	x	x		B 50/70 1:1	x	х	х
PmB 45/80-65 (B 50/90S) 1:1,5	x	x	x B 1:		B 50/70 1:1,5	x	х	х
PmB 45/80-65 (B 50/90S) <b>1:2</b>	x	x	x	x B 50/70 1:2		x	х	х
PmB 45/80-65 (B 50/90S) <b>rein</b>	x	x	x		B 50/70 rein	x	х	x
				- เ				
PmB 45/80-50 (B 60/90) <b>1:0,5</b>	x	x	x		B 70/100 <b>1:0,5</b>	x	x	x
PmB 45/80-50 (B 60/90) <b>1:1</b>	x	x	x		B 70/100 1:1	x	x	x
PmB 45/80-50 (B 60/90) <b>1:1,5</b>	x	x	x		B 70/100 <b>1:1,5</b>	x	x	x
PmB 45/80-50 (B 60/90) <b>1:2</b>	x	x	x		B 70/100 <b>1:2</b>	x	x	x
PmB 45/80-50 (B 60/90) <b>rein</b>	x	x	x		B 70/100 rein	x	x	x

#### Tabelle 6: Mischungsverhältnisse der Mastixproben und Prüftemperaturen

#### 4.2.2 Statische Zugversuche an Asphaltprobekörpern

Mit Hilfe der in Kapitel 3.4.1 vorgestellten Prüfmaschine wurden statische Zugversuche an Asphaltprobekörpern durchgeführt. Eine Übersicht über die getesteten Probekörper und die Prüftemperaturen für die verschiedenen Mischguttypen gibt die Tabelle 7. Die Zugkraft wurde temperaturabhängig aufgebracht und bewegt sich in einem Bereich von 0,40 KN bis 3,00 KN. Sie ist ebenfalls der Tabelle 7 zu entnehmen.

Probe-			T	Temper	atur [°C	;]				
körpernr.	+15	+10	+5	Ō	-5	-10	-15	-20		
AC 22 trag 50/70, F4, G4										
K084A		0,50		0,75		1,00		1,00 u. 1,50		
KO84B		0,40		0,75		1,00		1,00		
KO84C		0,40		0,75		1,00		3,00		
KO84E	0,40		0,50		1,00		1,00			
KO84G	0,40		0,50		1,00		1,00			
AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4										
EO9OD		0,40		0,75		1,00		1,00		
EO91D		0,40		0,75		1,00		1,00		
E092D		0,40		0,75		1,00		1,00		
EO93D		0,40		0,75		1,00		1,00		
EO95D		0,40		0,75		1,00		3,00 u. 1,00		
	SN	ЛА 11	PmB 45	5/80-6	5, S1, I	G1				
EO89G		0,50		0,75		1,00		1,50		
EO89H		0,50		0,75		1,00		1,50		
K118F		0,50		0,75		1,00		1,50		
		SMA	11 70/	/100, 5	31, G1					
K120B		0,50		0,75		1,00		1,50		
K120F		0,50		0,75		1,00		1,50		
K120H		0,50		0,75		1,00		1,50		

Tabelle 7: Probekörpernummer, Prüftemperaturen und Zugkraft in kN

# 4.3 Versuchsergebnisse

In folgendem Kapitel werden die aus dem Versuch ermittelten Ergebnisse einander gegenübergestellt. Als direktes Ergebnis aus den BBR-Versuchen für die Bitumen- und Mastixproben erhält man die Durchbiegung des Probekörpers, die als Grundlage für die Berechnung von interpretierbaren Kenngrößen dient (Steifigkeit S und m-Wert, siehe Kapitel 3.3.2). Die Durchbiegung wird über die Zeit in so genannten Kriechkurven dargestellt. Man erhält für jedes der vier Bindemittel mit den zugehörigen Mastixmischungsverhältnissen fünf Kriechkurven. In Kapitel 4.3.1 werden die erhaltenen Kriechkurven exemplarisch anhand eines Bindemittels mit zugehörigen Mastixmischungsverhältnissen gezeigt. Alle weiteren Ergebnisse sind dem Anhang A zu entnehmen.

Die Ergebnisse aus den Asphaltkriechversuchen werden auf ähnliche Art und Weise ausgewertet, wie die BBR Daten. Die Längenänderungen der Probekörper werden über die Zeit aufgetragen und graphisch dargestellt. Als Ergebnis erhält man Kriechkurven der verschiedenen Asphaltmischguttypen. Kapitel 4.3.2 zeigt beispielhaft typische Kriechkurven aus den Zugkriechversuchen. Sämtliche Kriechkurven der getesteten Asphaltmischguttypen findet man im Anhang B.

#### 4.3.1 Bitumen- und Mastixprüfung

Abbildung 27 zeigt exemplarisch für das Bindemittel B 50/70 mit zugehöriger Mastix die mit dem BBR gemessene Durchbiegung in Probekörpermitte bei -12°C, -18°C und -24°C. Aufgrund der großen Verformungen die bei den einzelnen Versuchen auftreten, wurden für jede Prüftemperatur eigene Probekörper hergestellt. Da mehrere Versuche bei der gleichen Prüftemperatur durchgeführt wurden, werden zur Auswertung die Mittelwerte der Einzelversuche herangezogen.



Abbildung 27: Kriechkurven B 50/70 rein, Mischungsverhältnis [1:0,5], [1:1], [1:1,5], [1:2]

Abbildung 28 stellt die Durchbiegungswerte nach jeweils 60 s Belastung in Balkenmitte dar und soll die Materialreaktion in Abhängigkeit von der Prüftemperatur und dem Füllergehalt verdeutlichen.



Abbildung 28: B 50/70, Durchbiegung nach 60s für die unterschiedlichen Mischungsverhältnisse und Prüftemperaturen

### 4.3.2 Asphaltprüfung

Das Kriechverhalten von Asphalt wurde anhand von 4 Mischguttypen untersucht. Da es sich hier um eine zerstörungsfreie Prüfmethode handelt, wird das Kriechverhalten bei den unterschiedlichen Temperaturen und Belastungen durch wiederholte Versuche mit veränderten Prüfbedingungen an einem Probekörper ermittelt. Als Ergebnis trägt man die gemessenen Längenänderungen über die Zeit auf. Die Versuche wurden bei vier verschiedenen Prüftemperaturen durchgeführt. Die aufgebrachte Belastung ist von der Temperatur abhängig und darf 1/3 der Zugfestigkeit des Materials bei der jeweiligen Prüftemperatur nicht überschreiten. Abbildung 29 zeigt exemplarisch den Verlauf der Kriechkurven für die Probekörper des Mischgutes SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1.





#### Abbildung 29: Kriechkurven SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1 Probekörper K118F, E089G und E089H

Abbildung 30 verdeutlicht die überproportionale Zunahme der Längenänderung mit steigender Prüftemperatur.





### 4.4 Interpretation der Versuchsergebnisse

#### 4.4.1 Bitumen- und Mastixauswertung nach ÖNORM EN 14771

Bei genauer Betrachtung der Kriechkurven (Kapitel 4.3.1) stellt man ein stark temperaturabhängiges Verhalten des Bitumens bzw. der Mastix fest. Die Durchbiegung bei -12°C von reinem Bitumen ist nach 240 s Belastung ca. 6 mal so groß wie bei -24°C. Weiters stellt man fest, dass die Durchbiegungen mit steigendem Füllergehalt stark abnehmen. Bei -12°C ist bei reinem Bitumen die Durchbiegung ca. 6 mal so groß wie bei einem Mischungsverhältnis von 1:2. Daraus lässt sich schließen, dass der Füllergehalt neben der Temperatur eine weitere wichtige Einflussgröße auf das Kriechverhalten darstellt. Der Füller wirkt versteifend und reduziert somit die Kriechnachgiebigkeit. Weiters fällt auf, dass die Größenordnung der Zunahme der Durchbiegung von -24°C auf -12°C mit steigendem Füllergehalt abnimmt. Der Füllergehalt hat bei hohen Temperaturen einen größeren Einfluss auf das Kriechverhalten als bei niedrigen. Die Aussagen lassen sich mit Hilfe errechneter Materialparameter (m-Wert und Steifigkeit S), die das Kriech- und Relaxationsverhalten von Bitumen bzw. Mastix beschreiben, bestätigen.

Aus der gemessenen Durchbiegung werden entsprechend der ÖNORM EN 14771 die Steifigkeit S und der m-Wert ermittelt. Das Kriechverhalten wird anhand der errechneten Kenngrößen analysiert. Abbildung 31 zeigt exemplarisch für das Bitumen B 50/70 mit zugehöriger Mastix die Verläufe der Steifigkeit S über die Zeit.



# Abbildung 31: Verlauf der Steifigkeit S B 50/70 rein, Mischungsverhältnis [1:0,5], [1:1], [1:1,5], [1:2]

Die Steifigkeitsverläufe der restlichen Bindemittel mit zugehöriger Mastix sind im Anhang A zu finden.

Zur Interpretation werden aus den Steifigkeitsverläufen die Werte nach 60 s Belastung herangezogen. Stellt man die Steifigkeit S von reinem Bitumen und zugehöriger Mastix nach 60 s Belastung im Balkendiagramm (siehe Abbildung 32) bei den drei unterschiedlichen Prüftemperaturen dar, erkennt man, unabhängig vom getesteten Bindmittel, die Abnahme der Steifigkeit S mit zunehmender Temperatur und weiters die Zunahme der Steifigkeit S mit zunehmendem Füllergehalt. Deutlich wird hier auch der Unterschied von Standardbindemittel und polymermodifizierten Bindemittel. Die polymermodifizierten Bindemittel haben im Vergleich zu Standardbindemittel geringere Steifigkeiten.



Abbildung 32: Steifigkeit S nach 60 s aus dem BBR-Versuch: B 70/100, B 50/70, PmB 45/80-50 und PmB 45/80-65

Im nächsten Schritt sollen die Steifigkeitswerte genauer betrachtet werden. Zu diesem Zweck werden diese in Abhängigkeit von der Prüftemperatur dargestellt. Man erhält somit für jedes Mischungsverhältnis drei Punkte (bei -24°C, -18°C und -12°C) im Diagramm. Wie bereits erwähnt, nimmt die Steifigkeit S mit zunehmender Temperatur stark ab. Die Abnahme der Steifigkeitswerte lässt sich mit Hilfe einer Exponentialfunktion beschreiben (Abbildung 33).



Abbildung 33: Verlauf der Steifigkeit S in Abhängigkeit von der Temperatur: B 70/100, B 50/70, PmB 45/80-50 und PmB 45/80-65

Im nächsten Schritt wertet man die Exponentialfunktion bei den drei Temperaturen aus. Die Hochzahl in der Gleichung der jeweiligen Exponentialfunktion ist ein Maß für die Abnahme der Steifigkeit S. Je größer die Zahl des Exponenten ist, umso größer ist die Steifigkeitsabnahme. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 8 bis 11 auf der linken Seite zu finden. Auf der rechten Seite findet man die Zunahme der Steifigkeit S bei zunehmendem Füllergehalt bezogen auf reines Bitumen.

Steifigkeit B 70/100 nach 60 s (rückgerechnet)					Steifigkeit B 70/100 nach 60 s bezogen auf Bitumen rein			
MV*	-24°C	-18°C	-12°C	MV	-24°C	-18°C	-12°C	
1:0	593	251	106	1:0	100%	100%	100%	
1:0.5	884	396	177	1:0.5	150%	158%	167%	
1:1	1421	563	223	1:1	240%	225%	210%	
1:1.5	1914	929	451	1:1.5	323%	371%	425%	
1:2	2565	1141	508	1:2	433%	455%	479%	

Tabelle 8: Zunahme der Steifigkeit mit steigendem Füllergehalt; B 70/100

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

Tabelle 8 zeigt, dass sich die Steifigkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur in unterschiedlichem Ausmaß ändern. Bei -24°C ist der Steifigkeitswert bei einem Mischungsverhältnis von 1:2 ca. 4-mal so groß wie von reinem Bitumen. Der Vergleich bei -12°C zeigt, dass die Steifigkeit bei einem Mischungsverhältnis von 1:2 ca. 5-mal so groß ist wie von reinem Bitumen. Der Füllergehalt hat bei höheren Temperaturen einen stärkeren Einfluss auf das Kriechverhalten.

				-			
Ste	ifigkeit B 50 (rückger	/70 nach 6 rechnet)	0 s		Steifigkeit B bezogen a	50/70 nach Iuf Bitumen re	60 s ein
MV*	-24°C	-18°C	-12°C	MV	-24°C	-18°C	-12°C
1:0	551	247	111	1:0	100%	100%	100%
1:0.5	904	439	213	1:0.5	164%	177%	192%
1:1	1356	648	309	1:1	246%	262%	279%
1:1.5	1895	952	478	1:1.5	344%	385%	431%
1:2	2347	1297	717	1:2	426%	524%	646%

Tabelle 9: Zunahme der Steifigkeit mit steigendem Füllergehalt; B 50/70

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

Tabelle 10:	Zunahme der	• Steifigkeit	mit steigendem	Füllergehalt;	PmB 45,	/80-50

Steifigkeit PmB 45/80-50 nach 60 s (rückgerechnet)					Steifigkeit PmB 45/80-50 nach 60 s bezogen auf Bitumen rein			
MV*	-24°C	-18°C	-12°C	MV	-24°C	-18°C	-12°C	
1:0	488	198	80	1:0	100%	100%	100%	
1:0.5	761	320	134	1:0.5	156%	162%	168%	
1:1	1111	495	221	1:1	228%	251%	276%	
1:1.5	1535	718	336	1:1.5	314%	363%	420%	
1:2	2095	1012	489	1:2	429%	512%	612%	

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

Der Vergleich der Werte der Bindemittel in Tabelle 9 bis 10 zeigt einen leicht veränderten Trend. Die Steifigkeiten nehmen bei -24°C von reinem Bitumen auf das Mischungsverhältnis 1:2 in der selben Größenordnung zu wie bei dem Bindemittel B 70/100. Bei -12°C ist die Steifigkeit bei einem Mischungsverhältnis von 1:2 ca. 6mal so groß wie von reinem Bitumen. Hier kann man die größere Einflussnahme des Füllers bei höheren Temperaturen noch deutlicher erkennen.

Tabelle 11:	Zunahme der	Steifiakeit	mit steigender	n Füllergehalt:	PmB 45/80-65
		Grounding	init otoigonaoi	n i anoi gonaio,	

Steifigkeit PmB 45/80-65 nach 60 s (rückgerechnet)					Steifigkeit PmB 45/80-65 nach 60 s bezogen auf Bitumen rein			
MV*	-24°C	-18°C	-12°C	MV	-24°C	-18°C	-12°C	
1:0	261	104	42	1:0	100%	100%	100%	
1:0.5	451	188	79	1:0.5	173%	181%	189%	
1:1	667	315	149	1:1	256%	302%	358%	
1:1.5	929	423	192	1:1.5	356%	406%	463%	
1:2	1276	602	284	1:2	488%	578%	683%	

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

Am deutlichsten fallen die Unterschiede jedoch bei dem Bindemittel PmB 45/80.-65 auf (Tabelle 11). Die Steifigkeit ist in diesem Fall bei -24°C und einem Mischungsverhältnis von 1:2 ca. 5-mal so groß wie bei reinem Bitumen und selben Mischungsverhältnis. Der Trend setzt sich auch bei -12°C fort. Die Steifigkeitszunahme ist bei dem Bindemittel PmB 45/80-65 am größten. Sie ist bei einem Mischungsverhältnis von 1:2 ca. 7-mal so groß wie die von reinem Bitumen bei -24°C. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse kann man sagen, dass sich die Steifigkeiten von reinem Bindemittel in Abhängigkeit vom der Bindemittelsorte durch Zugabe von Füllermaterial auf das 5- bis 7-fache steigern lassen.

Wie bereits erwähnt, wird neben der Steifigkeit S auch der m-Wert zur Beurteilung des Kriechverhaltens nach ÖNORM EN 14771 herangezogen. Da der m-Wert die Steigung der Tangente an die Steifigkeitskurve darstellt, repräsentieren große m-Werte eine rasch abnehmende Steifigkeit über die Zeit. Mit anderen Worten, je höher der m-Wert, desto stärker kriecht das Material. Abbildung 34 zeigt exemplarisch für das Bindemittel B 50/70 den Verlauf des m-Wertes über die Zeit.



Abbildung 34: Verlauf des m-Wertes B 50/70 rein, Mischungsverhältnis [1:0,5], [1:1], [1:1,5], [1:2]

Analog zu den Steifigkeitswerten werden auch bei den m-Werten zur weiteren Interpretation die Werte nach 60 s herangezogen (siehe Abbildung 35). Bei genauerer Betrachtung stellt man bei allen vier getesteten Bindemittelsorten einen Anstieg der m-Werte mit zunehmender Temperatur fest. Außerdem ist zu beobachten, dass die m-Werte mit steigendem Füllergehalt kleiner werden.



Abbildung 35: m-Werte nach 60 s aus dem BBR-Versuch: B 70/100, B 50/70, PmB 45/80-50, PmB 45/80-65

Zur Interpretation der m-Werte werden diese in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt (Abbildung 36). Man erhält für jedes Mischungsverhältnis 3 Punkte im Diagramm. Die m-Werte verändern sich in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis und Temperatur offensichtlich in gleichem Ausmaß. Dieser Trend lässt sich mit Hilfe einer linearen Funktion beschreiben.





Abbildung 36: Verlauf der m-Werte: B 70/100, B 50/70, PmB 45/80-50 und PmB 45/80-65

Nach Auswertung der in Abbildung 36 angeführten linearen Funktion erhält man die Ergebnisse laut Tabelle 12 bis 15. Die linke Seite zeigt die dem Trend entsprechenden m-Werte, die rechte Seite gibt die Zunahme der m-Werte bezogen auf das Mischungsverhältnis 1:2 an. Das Material weist bei einem Füllergehalt von 1:2 die größte Steifigkeit und somit den kleinsten m-Wert auf.

r	n-Wert B 70 (rückg	/100 nach 6 erechnet)	60 s	m-Wert B 70/100 nach 60 s bezogen auf das Mischungsverhältnis 1:2			
MV*	-24°C	-18°C	-12°C	MV	-24°C	-18°C	-12°C
1:0	0,2326	0,3400	0,4474	1:0	163%	123%	109%
1:0.5	0,2241	0,3333	0,4425	1:0.5	157%	120%	108%
1:1	0,1952	0,3176	0,4400	1:1	137%	115%	107%
1:1.5	0,1804	0,2932	0,4060	1:1.5	126%	106%	99%
1:2	0,1430	0,2768	0,4106	1:2	100%	100%	100%

Tabelle 12: Zunahme des m-Wertes mit sinkendem Füllergehalt; B 70/100

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

Tabelle 13: Zunahme des m-W	rtes mit sinkendem	ı Füllergehalt; E	3 50/70
-----------------------------	--------------------	-------------------	---------

m-Wert B 50/70 nach 60 s (rückgerechnet)					m-Wert B 50/70 nach 60 s bezogen auf das Mischungsverhältnis 1:2			
MV*	-24°C	-18°C	-12°C	C MV -24°C -18°0			-12°C	
1:0	0,2385	0,3363	0,4341	1:0	158%	131%	120%	
1:0.5	0,2177	0,3113	0,4049	1:0.5	144%	121%	112%	
1:1	0,1988	0,3008	0,4028	1:1	132%	117%	111%	
1:1.5	0,1727	0,2813	0,3899	1:1.5	114%	110%	108%	
1:2	0,1510	0,2566	0,3622	1:2	100%	100%	100%	

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

m-Wert PmB 45/80-50 nach 60 s (rückgerechnet)				m-Wert PmB 45/80-50 nach 60 s bezogen auf das Mischungsverhältnis 1:2			
MV*	-24°C	-18°C	-12°C	MV	-24°C	-18°C	-12°C
1:0	0,2540	0,3548	0,4556	1:0	141%	120%	112%
1:0.5	0,2422	0,3220	0,4018	1:0.5	134%	109%	98%
1:1	0,2298	0,3360	0,4422	1:1	127%	114%	108%
1:1.5	0,2094	0,3192	0,4290	1:1.5	116%	108%	105%
1:2	0,1806	0,2946	0,4086	1:2	100%	100%	100%

Tabelle 14: Zunahme des m-Wertes mit sinkendem Füllergehalt; PmB 45/80-50

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

#### Tabelle 15: Zunahme des m-Wertes mit sinkendem Füllergehalt; PmB 45/80-65

m-Wert PmB 45/80-65 nach 60 s (rückgerechnet)					m-Wert PmB 45/80-65 nach 60 s bezogen auf das Mischungsverhältnis 1:2			
MV*	-24°C	-18°C	-12°C	MV	-24°C	-18°C	-12°C	
1:0	0,2997	0,3927	0,4857	1:0	128%	117%	111%	
1:0.5	0,2752	0,3616	0,4480	1:0.5	117%	108%	103%	
1:1	0,2649	0,3669	0,4689	1:1	113%	109%	108%	
1:1.5	0,2502	0,3474	0,4446	1:1.5	107%	104%	102%	
1:2	0,2346	0,3354	0,4362	1:2	100%	100%	100%	

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

Es zeigt sich unabhängig vom getesteten Bindemittel, dass die m-Werte bei –12°C von Mischungsverhältnis 1:2 auf reines Bitumen um ca. 10 bis 20% anwachsen. Im Vergleich dazu verändern sich die Werte bei -24°C um ca. 30 bis 60%. Das Material verliert mit abnehmendem Füllergehalt an Steifigkeit. Da bei -12°C die Änderung der Steifigkeit am geringsten ausfällt, zeigt sich auch hier der größere Einfluss des Füllers bei höheren Temperaturen.

#### 4.4.2 Auswertung der Asphaltprüfungen

Bei genauerer Betrachtung der Kriechkurven stellt man den gleichen Trend wie bei Bitumen und Mastix fest. Das Mischgut kriecht bei hohen Temperaturen stärker als bei niedrigen Temperaturen. Dieser Trend zeigt sich unabhängig vom getesteten Probekörper und Mischgut. Für den Vergleich der einzelnen Mischguttypen werden die Mittelwerte aus den Einzelversuchen errechnet (Tabelle 16). Aufgrund der unterschiedlichen Steuergrößen (siehe Kapitel 4.2.2, Tabelle 7) bei den Einzelversuchen, ist ein Vergleich der Werte miteinander nur eingeschränkt möglich.

Tabelle 16: gemittelte Längenänderung der Probekörper nach 2 Stunden Belastung

gemittelte Längenänderung der einzelnen Probekörper der jeweiligen Mischguttypen									
Mischgut	-20°C	-10°C	O°C	+10°C					
SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1	0,0258	0,0967	0,4805	1,5564					
SMA 11 70/100, S1, G1	0,0097	0,0336	0,2855	1,1564					
AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4	0,0319	0,0363	0,2261	0,5336					
AC 22 trag 50/70, F4, G4	0,0161	0,0265	0,3620	1,7036					

Trägt man die errechneten Werte in Abhängigkeit von der Prüftemperatur auf, zeigt sich bei allen getesteten Mischguttypen ein ähnlicher Verlauf. Die Kriechverformungen nehmen mit steigender Temperatur überproportional zu (Abbildung 37).



#### Abbildung 37: gemittelte Längenänderung der Probekörper der unterschiedlichen Mischguttypen nach 2 Stunden Belastung

Abbildung 37 zeigt weiters, dass die Mischguttypen mit Standardbindemittel, mit Ausnahme der Werte des Mischgutes AC 22 trag 50/70, F4, G4 bei 0°C und +10°C, geringere Kriechverformungen aufweisen als die Mischguttypen mit polymermodifiziertem Bindemittel. Daraus lässt sich schließen, dass Mischguttypen mit Standardbindemittel höhere Steifigkeiten haben als jene mit polymermodifiziertem Bindemittel. Die Aussagen lassen sich mit Hilfe der Werte in Tabelle 17 bestätigen.

Tabelle	17:	Vergleich	von	Mischgut	mit	Standardbindemittel	bzw.	polymermodifi-
	2	ziertem Bir	ndem	littel				

Vergleich von Mischgut mit Standardbindemittel bzw. polymermodifiziertem Bindemittel								
Mischgut	-20°C	-10°C	O°C	+10°C				
SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1	267%	288%	168%	135%				
SMA 11 70/100, S1, G1	100%	100%	100%	100%				
AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4	198%	137%	62%	31%				
AC 22 trag 50/70, F4, G4	100%	100%	100%	100%				

Vergleicht man im nächsten Schritt die Zunahme der Längenänderung mit steigender Temperatur, stellt man jedoch fest, dass die Kriechverformungen bei Mischgut mit Standardbindemittel mit steigender Temperatur stärker ausfallen als bei Mischgut mit polymermodifiziertem Bindemittel (siehe Tabelle 18).

Zunahme der Längenänderung mit steigender Temperatur									
Mischgut	-20°C	-10°C	0°C	+10°C					
SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1	100%	375%	1862%	6032%					
SMA 11 70/100, S1, G1	100%	347%	2951%	11953%					
AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4	100%	114%	710%	1675%					
AC 22 trag 50/70, F4, G4	100%	165%	2255%	10614%					

Tabelle 18	B: Zunahme	der Läng	genänderung	mit :	steigender	Temperatur

Zur weiteren Interpretation des Kriechverhaltens der unterschiedlichen Asphaltmischguttypen und zur Bestätigung der getroffenen Aussagen werden die Parameter H und p des Power-Law Modells herangezogen (siehe Kapitel 2.4).

## 4.5 Vergleich der Kriecheigenschaften von Bitumen, Mastix und Asphalt anhand der Parameter H und p

#### 4.5.1 Auswertung der Parameter H und p für Bitumen und Mastix

Unter Anwendung des in Kapitel 2.4 vorgestellten Power-Law Modells werden die H-Werte und p-Werte für Bitumen und Mastix auf Basis der Versuchsergebnisse errechnet. Die Parameter H und p beschreiben, nicht wie die Steifigkeitswerte und m-Werte das Kriechverhalten zu einem bestimmten Zeitpunkt, sondern das Kriechverhalten über die gesamte Versuchszeit. Abbildung 38 zeigt den Verlauf der H-Werte in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis und der Prüftemperatur für die getesteten Bindemittel.



#### Abbildung 38: H-Werte: B 70/100, B 50/70, PmB 45/80-50, PmB 45/80-65

Die H-Werte nehmen mit steigender Temperatur zu und mit steigendem Füllergehalt ab. Unabhängig vom getesteten Bindemittel zeigt sich eine starke Abnahme der H-Werte von reinem Bitumen auf das Mischungsverhältnis 1:2 bei allen Temperaturen. Die Abnahme beträgt ca. 80 bis 90% (siehe Tabelle 19 bis 22). Der H-Wert beschreibt also den Einfluss des Füllers auf die Anfangssteifigkeit des Materials.

	H-Wert	ce B 70/100		H-Werte B 70/100 bezogen auf Bitumen rein			
MV	-24°C	-18°C	-12°C	MV	-24°C	-18°C	-12°C
1:0	0,065258	0,229481	0,375636	1:0	100%	100%	100%
1:0.5	0,037688	0,093883	0,189909	1:0.5	58%	41%	51%
1:1	0,021761	0,056426	0,195355	1:1	33%	25%	52%
1:1.5	0,015949	0,030768	0,084136	1:1.5	24%	13%	22%
1:2	k.A.	0,023178	0,073214	1:2	k.A.	10%	19%

Tabelle 19: Abnahme der H-Werte bei steigendem Füllergehalt; B 70/100

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

	H-Wer	te B 50/70			H-Wer bezogen a	te B 50/70 uf Bitumen re	ein
MV	-24°C	-18°C	-12°C	MV	-24°C	-18°C	-12°C
1:0	0,066777	0,124834	0,281002	1:0	100%	100%	100%
1:0.5	0,040390	0,090251	0,229479	1:0.5	60%	72%	82%
1:1	0,022345	0,055359	0,129068	1:1	33%	44%	46%
1:1.5	0,010844	0,036711	0,081380	1:1.5	16%	29%	29%
1:2	0,013693	0,019706	0,054142	1:2	21%	16%	19%

#### Tabelle 20: Abnahme der H-Werte bei steigendem Füllergehalt; B 50/70

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

#### Tabelle 21: Abnahme der H-Werte bei steigendem Füllergehalt; PmB 45/80-50

	H-Werte F	<sup>2</sup> mB 45/80-5	50		H-Werte F bezogen a	PmB 45/80-5 Juf Bitumen re	50 ein
MV	-24°C	-18°C	-12°C	MV	-24°C	-18°C	-12°C
1:0	0,104717	0,137772	0,520655	1:0	100%	100%	100%
1:0.5	0,062011	0,109530	0,222546	1:0.5	59%	80%	43%
1:1	0,029853	0,080924	0,195016	1:1	29%	59%	37%
1:1.5	0,020230	0,048063	0,115148	1:1.5	19%	35%	22%
1:2	0,013082	0,030593	0,072979	1:2	12%	22%	14%

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

#### Tabelle 22: Abnahme der H-Werte bei steigendem Füllergehalt; PmB 45/80-65

	H-Werte I	°mB 45/80-6	65		H-Werte F bezogen a	PmB 45/80-6 Juf Bitumen re	65 ein
MV	-24°C	-18°C	-12°C	MV	-12°C		
1:0	0,155800	0,281567	0,782659	1:0	100%	100%	100%
1:0.5	0,079950	0,204130	0,481733	1:0.5	51%	73%	62%
1:1	0,065194	k.A.	0,203201	1:1	42%	k.A.	26%
1:1.5	0,041721	0,108539	0,219717	1:1.5	27%	39%	28%
1:2	0,029214	0,063640	0,137836	1:2	19%	23%	18%

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

Als zweiten wichtigen Parameter zur Beurteilung des Kriechverhaltens erhält man den p-Wert. Die Abbildung 39 zeigt die p-Werte der unterschiedlichen Bindemittel in Abhängigkeit von Prüftemperatur und Füllergehalt. Die p-Werte sind unabhängig vom Mischungsverhältnis bei allen vier Bindemitteltypen von der gleichen Größenordnung. Die Werte in den Tabellen 23 bis 26 bestätigen dies. Abbildung 39 zeigt auch, dass die p-Werte mit steigender Temperatur leicht abnehmen.



#### Abbildung 39: p-Werte: B 70/100, B 50/70, PmB 45/80-50, PmB 45/80-65

Die Tabellen 23 bis 26 zeigen den sehr konstanten Verlauf der p-Werte unabhängig vom Füllergehalt. Die Werte schwanken lediglich um ein paar Prozent. Weiters ist auch kein wesentlicher Unterschied zwischen Standardbindemittel und polymermodifiziertem Bindemittel zu erkennen.

	p-Wert	ce B 70/100		p-Werte B 70/100 bezogen auf Bitumen rein			
MV	-24°C	-18°C	-12°C	MV	-12°C		
1:0	-0,552103	-0,489695	-0,406432	1:0	100%	100%	100%
1:0.5	-0,561111	-0,491330	-0,392032	1:0.5	102%	100%	96%
1:1	-0,564049	-0,508497	-0,440354	1:1	102%	104%	108%
1:1.5	-0,593075	-0,489983	-0,422780	1:1.5	107%	100%	104%
1:2	k.A.	-0,520283	-0,408896	1:2	k.A.	106%	101%

Tabelle 23	· n-Werte	hei	steigendem	Füllergehalt:	R	70	/100
	. p-weite	nei	Sceigendem	rulleryellait,	D	7υ,	

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

	p-Wer	rte B 50/70		p-Werte B 50/70 bezogen auf -24°C			
MV	-24°C	-18°C	-12°C	MV	-18°C	-12°C	
1:0	-0,624758	-0,532343	-0,443641	1:0	100%	100%	100%
1:0.5	-0,571611	-0,527629	-0,477992	1:0.5	91%	99%	108%
1:1	-0,565909	-0,526789	-0,445157	1:1	91%	99%	100%
1:1.5	-0,516202	-0,551246	-0,447437	1:1.5	83%	104%	101%
1:2	-0,617406	-0,522103	-0,452673	1:2	99%	98%	102%

#### Tabelle 24: p-Werte bei steigendem Füllergehalt; B 50/70

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

#### Tabelle 25: p-Werte bei steigendem Füllergehalt; PmB 45/80-50

	p-Werte I	PmB 45/80-5	50	p-Werte PmB 45/80-50 bezogen auf Bitumen rein			
MV	-24°C	-18°C	-12°C	C MV -24°C -18°C			
1:0	-0,586591	-0,473175	-0,411074	1:0	100%	100%	100%
1:0.5	-0,605014	-0,491407	-0,368300	1:0.5	103%	104%	90%
1:1	-0,554476	-0,512346	-0,443280	1:1	95%	108%	108%
1:1.5	-0,555705	-0,514281	-0,419469	1:1.5	95%	109%	102%
1:2	-0,565795	-0,508937	-0,411796	1:2	96%	108%	100%

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

#### Tabelle 26: p-Werte bei steigendem Füllergehalt; PmB 45/80-65

	p-Werte I	PmB 45/80-6	35	p-Werte PmB 45/80-65 bezogen auf Bitumen rein				
MV	-24°C	-18°C	-12°C	C MV -24°C -18°C -				
1:0	-0,561794	-0,474487	-0,429244	1:0	100%	100%	100%	
1:0.5	-0,512903	-0,476420	-0,399703	1:0.5	91%	100%	93%	
1:1	-0,553166	k.A.	-0,350212	1:1	98%	k.A.	82%	
1:1.5	-0,557603	-0,515199	-0,435390	1:1.5	99%	109%	101%	
1:2	-0,553389	-0,502692	-0,411716	1:2	99%	106%	96%	

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

Um die Abnahme der p-Werte bei steigender Temperatur zu zeigen, werden die Werte von -12°C mit jenen von -24°C verglichen (siehe Tabelle 27 bis 30).

	p-Werte B 7	'0/100 nach	60 s	p-Werte B 70/100 bezogen auf -12°C			
MV	-24°C	-18°C	-12°C	MV	-24°C	-18°C	-12°C
1:0	-0,552103	-0,489695	-0,406432	1:0	100%	89%	74%
1:0.5	-0,561111	-0,491330	-0,392032	1:0.5	100%	88%	70%
1:1	-0,564049	-0,508497	-0,440354	1:1	100%	90%	78%
1:1.5	-0,593075	-0,489983	-0,422780	1:1.5	100%	83%	71%
1:2	k.A.	-0,520283	-0,408896	1:2	k.A.	k.A.	k.A.

Tabelle 27: Abnahme der	p-Werte mit steigender	Temperatur; B 70/100

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

#### Tabelle 28: Abnahme der p-Werte mit steigender Temperatur; B 50/70

	p-Wer	rte B 50/70		p-Werte B 50∕70 bezogen auf -24°C			
MV	MV -24°C -18°C -12°C				-24°C	-18°C	-12°C
1:0	-0,624758	-0,532343	-0,443641	1:0	100%	85%	71%
1:0.5	-0,571611	-0,527629	-0,477992	1:0.5	100%	92%	84%
1:1	-0,565909	-0,526789	-0,445157	1:1	100%	93%	79%
1:1.5	-0,516202	-0,551246	-0,447437	1:1.5	100%	107%	87%
1:2	-0,617406	-0,522103	-0,452673	1:2	100%	85%	73%

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

### Tabelle 29: Abnahme der p-Werte mit steigender Temperatur; PmB 45/80-50

	p-Werte I	<sup>2</sup> mB 45/80-5	50	p-Werte PmB 45/80-50 bezogen auf -24°C			
MV	-24°C	-18°C	-12°C	C MV -24°C -18°C			
1:0	-0,586591	-0,473175	-0,411074	1:0	100%	81%	70%
1:0.5	-0,605014	-0,491407	-0,368300	1:0.5	100%	81%	61%
1:1	-0,554476	-0,512346	-0,443280	1:1	100%	92%	80%
1:1.5	-0,555705	-0,514281	-0,419469	1:1.5	100%	93%	75%
1:2	-0,565795	-0,508937	-0,411796	1:2	100%	90%	73%

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

	p-Werte I	PmB 45/80-6	35	p-Werte PmB 45/80-65 bezogen auf -12°C			
MV	-24°C	-18°C	-12°C	C MV -24°C -18°C			
1:0	-0,561794	-0,474487	-0,429244	1:0	100%	84%	76%
1:0.5	-0,512903	-0,476420	-0,399703	1:0.5	100%	93%	78%
1:1	-0,553166	k.A.	-0,350212	1:1	100%	k.A.	63%
1:1.5	-0,557603	-0,515199	-0,435390	1:1.5	100%	92%	78%
1:2	-0,553389	-0,502692	-0,411716	1:2	100%	91%	74%

Tabelle 30: Abnahme der p-Werte mit steigender Temperatur; PmB 45/80-65

\*MV....Mischungsverhältnis Bitumen : Füller

Die Tabellen 27 bis 30 zeigen sehr deutlich, dass die p-Werte in Abhängigkeit von der Prüftemperatur abnehmen. Die Abnahme der p-Werte ist bei Standardbindemittel und polymermodifiziertem Bindemittel gleich und beträgt ca. 20 bis 30% der Werte bei -24°C. Der Füllergehalt hat keinen Einfluss auf die Abnahme der p-Werte. Der p-Wert beschreibt somit die viskosen Einflüsse des Bitumens auf das Kriechverhalten.

#### 4.5.2 Auswertung der Parameter H und p für Asphalt

Die Ermittlung der H-Werte und p-Werte für die Asphaltmischguttypen erfolgt analog zu den Bitumen- und Mastixwerten mit Hilfe des Power-Law Modells (siehe Kapitel 2.4). Als Grundlage für die Berechungen der Parameter werden die vorhandenen Versuchsergebnisse herangezogen. Zur Interpretation des Kriechverhaltens der unterschiedlichen Mischguttypen werden die erhaltenen Ergebnisse der einzelnen Probekörper gemittelt. Abbildung 40 gibt einen Überblick über den Verlauf der gemittelten H-Werte und p-Werte in Abhängigkeit von der Temperatur.



Abbildung 40: H-Werte und p-Werte der getesteten Asphaltmischguttypen

Bei den H-Werten zeigt sich ein stark temperaturabhängiges Verhalten der untersuchten Mischguttypen. Die H-Werte nehmen analog zu den Werten von Bitumen und Mastix bei steigender Temperatur zu. Während die Veränderungen von -20°C auf -10°C eher gering sind, nehmen die Werte von 0°C bis +10°C überproportional zu (siehe Tabelle 31 bis 34).

Die p-Werte werden analog zu den Werten von Bitumen und Mastix bei steigender Temperatur kleiner (siehe Tabelle 31 bis 34). Der p-Wert des Mischgutes AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4 bei -10°C und der p-Wert des Mischgutes SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1 bei +10°C werden nicht berücksichtigt. Bei Betrachtung der p-Werte stellt man fest, dass diese bei Mischgut mit Standardbindemittel stärker abnehmen als bei Mischgut mit polymermodifiziertem Bindemittel. Der Vergleich der H-Werte zeigt weiters, dass die Mischguttypen mit Standardbindemittel geringere H-Werte aufweisen als jene mit polymermodifiziertem Bindemittel. Das lässt sich darauf zurückführen, dass Standardbindemittel prinzipiell kleinere H-Werte und somit höhere Steifigkeiten aufweisen als polymermodifizierte Bindemittel (siehe Kapitel 4.5.1). Eine endgültige Aussage ist aber aufgrund der geringen Datendichte, vor allem bei hohen Temperaturen nicht möglich. Hier ist auch der Vergleich von reinem Bindemittel bzw. Mastix mit Asphalt nicht möglich, da für Bitumen und Mastix nur Werte für niedrige Temperaturen vorliegen (-24°C, -18°C und -12°C). Eine Fortführung der Versuche mit einer Ausweitung des Versuchsprogramms sollte im Rahmen eines Folgeprojekts realisiert werden.

Tabelle 31: Zunahme H-Wert und p-Wert bei steigender Temperatur: SMA 11 70/100, S1, G1

H-We	erte SMA 11	70/100, S1	, G1	H-Werte SMA 11 70/100, S1, G1 bezogen auf -20°C				
-20°C	-10°C	0°C	+10°C	-20°C	-10°C	O°C	+10°C	
0,002030	0,002368	0,017332	0,071144	100%	117%	854%	3504%	

p-We	erte SMA 11	70/100, S1	, G1	p-Werte SMA 11 70/100, S1, G1 bezogen auf -20°C				
-20°C	-10°C	O°C	+10°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C	
-0,83795	-0,54715	-0,41861	-0,31331	1000%	65%	50%	37%	

#### Tabelle 32: Zunahme des H-Wertes bei steigender Temperatur: AC 22 50/70, F4, G4

H-Werte AC 22 trag 50/70, F4, G4				H-We	H-Werte AC 22 trag 50/70, F4, G4 bezogen auf -20°C -20°C -10°C 0°C +10°C			
-20°C	-10°C	0°C	+10°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C	
0,002963	0,006637	0,015800	0,113748	100%	224%	533%	3840%	

p-Werte AC 22 trag 50/70, F4, G4				p-We	p-Werte AC 22 trag 50/70, F4, G4 bezogen auf -20°C			
-20°C	-10°C	O°C	+10°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C	
-0,82122	-0,66078	-0,33732	-0,31641	100%	80%	41%	39%	

Die Werte in Tabelle 31 und 32 zeigen, dass bei Mischgut mit Standardbindemittel das verwendete Größtkorn keinen Einfluss auf die H-Werte hat. Bei beiden Bindemitteln sind die Werte bei +10°C ca. 40-mal so groß wie bei -20°C.

#### Tabelle 33: Zunahme des H-Wertes bei steigender Temperatur: SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1

H-Werte SMA 11 PmB 45/80-65 S1, G1				H-Werte SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1 bezogen auf -20°C			
-20°C	-10°C	0°C	+10°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C
0,003144	0,007265	0,033712	0,185303	100%	231%	1072%	5894%

p-Werte SMA 11 PmB 45/80-65 S1, G1				p-Werte	p-Werte SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1 bezogen auf -20°C			
-20°C	-10°C	O°C	+10°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C	
-0,68430	-0,51678	-0,44609	-0,48289	100%	76%	65%	71%	

#### Tabelle 34: Zunahme des H-Wertes bei steigender Temperatur: AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4

H-Werte AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4				H-Werte A	H-Werte AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4 bezogen auf -20°C -20°C -10°C 0°C +10°C			
-20°C	-10°C	0°C	+10°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C	
0,001980	0,018228	0,048401	0,174390	100%	920%	2444%	8806%	

p-Werte AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4				p-Werte A	p-Werte AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4 bezogen auf -20°C				
-20°C	-10°C	O°C	+10°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C		
-0,63765	-0,77664	-0,54436	-0,52362	100%	122%	85%	82%		

Im Gegensatz zu den Mischguttypen mit Standardbindemittel zeigt sich bei jenen mit polymermodifiziertem Bindemittel (siehe Tabelle 33 und 34) sehr wohl ein Einfluss auf die H-Werte aufgrund des verwendeten Größtkorns. Beim Mischgut SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1 ist der H-Wert bei +10°C ca. 60-mal so groß wie bei -20°C. Im Gegensatz dazu ist der H-Wert bei +10°C bei dem Mischgut AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4 ca. 90-mal so groß wie bei -20°C.

### 4.5.3 Vergleichende Auswertung Bitumen - Mastix - Asphalt

Ein direkter Vergleich der Ergebnisse von statischen Kriechversuchen an Bitumen- bzw. Mastixproben und an Asphaltprobekörpern ist nur anhand von Materialkennwerten möglich, die das Kriechverhalten unabhängig vom gewählten Versuchstyp charakterisieren. Die Modellparameter H und p, die mit Hilfe des Power-Law Modellansatzes aus Kriechversuchen abgeleitet werden können, stellen solche physikalisch fundierte Materialkennwerte dar. Die H-Werte und p-Werte von Bitumen bzw. Mastix wurden mit Hilfe der Versuchsdaten aus dem BBR ermittelt. Aufgrund der Versuchsmethodik des BBR beschreiben die erhaltenen Materialparameter das Biegezugkriechen des Materials. Im Gegensatz dazu wurden die H-Werte und p-Werte zur Beschreibung des Kriechverhaltens von Asphaltmischgut über einen einaxialen Zugversuch bestimmt und beschreiben somit das einaxiale Kriechverhalten des Materials. In der Folge werden die Ergebnisse aus Kriechversuchen an Bitumen- bzw. Mastixproben und an Asphaltproben mit Hilfe der Parameter H und p miteinander verglichen und mögliche Zusammenhänge aufgezeigt.

Zu diesem Zweck werden die H-Werte von reinem Bitumen und von Mastix im Mischungsverhältnis 1:2 mit dem zugehörigen Asphaltmischguttyp verglichen, da das Verhältnis von Füller zu Bitumen im fertigen Asphaltmischgut ungefähr dem Mischungsverhältnis 1:2 entspricht. Die H-Werte werden im logarithmischen Maßstab den Prüftemperaturen gegenübergestellt (siehe Abbildung 41 bis 44). Der Trend bei den H-Werten wird mit Hilfe einer Exponentialfunktion dargestellt. Analog dazu wird der Trend für die p-Werte mit Hilfe einer linearen Funktion dargestellt. Die Gleichungen für die Funktionen sind der jeweiligen Abbildung zu entnehmen.



Abbildung 41: H und p; AC 22 trag 50/70, F4, G4; B 50/70



Abbildung 42: H und p; AC 22 binder PmB 45/80-65 F3, G4; PmB 45/80-65



Abbildung 43: H und p; SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1; PmB 45/80-65



Abbildung 44: H und p; SMA 11 70/100, S1, G1; B 70/100

Der Vergleich der H-Werte zeigt, dass die Geraden von Bitumen, Mastix und Asphaltmischgut annähernd parallel verlaufen. Der Startwert der Geraden ist vom Füller- bzw. Gesteinsgehalt abhängig. Je kleiner der H-Wert, desto größer ist die Steifigkeit. Die Unterschiede bei den Startwerten von reinem Bitumen zu einem Mischungsverhältnis von 1:2 beträgt ungefähr eine 10er Potenz und zum Mischgut ca. zwei 10er Potenzen. Beim Vergleich der p-Werte zeigt sich, dass die Geraden für reines Bitumen und für das zugehörige Mischungsverhältnis 1:2 identisch verlaufen, was auf die bereits erwähnte Unabhängigkeit des p-Wertes vom Füllergehalt zurückzuführen ist. Der Verlauf der Geraden für die Mischguttypen AC 22 weicht zwar gering von den Geraden für Bitumen und Mastix ab (siehe Abbildung 41 und 44), passt aber zum Trend. Die teilweise vorhandenen Abweichungen bei den Verläufen sind möglicherweise auf die bereits erwähnten Unterschiede bei der Versuchsmethodik zurückzuführen.

Mit Hilfe der erhaltenen Ergebnisse ist es also möglich, Zusammenhänge zwischen dem Kriechverhalten von Bitumen, Mastix und dem Mischgut herzustellen. Der H-Wert liefert Aussagen über die Größenordnung der Anfangssteifigkeit der untersuchten Materialien. Mit Hilfe des p-Wertes wird das viskose Materialverhalten beschrieben. Weiters zeigt der p-Wert den Einfluss des Größtkorns auf das Materialverhalten.

# 5. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Um das Kriech- und Relaxationsverhalten von unterschiedlichen bituminösen Werkstoffen bewerten zu können, werden zum besseren Verständnis des Materialverhaltens von bituminösen Werkstoffen, die Phänomene Kriechen und Relaxieren, mit Hilfe von rheologischen Stoffmodellen erläutert.

Ziel der gegenständlichen Arbeit ist es, einen Überblick über die Möglichkeiten zur Bestimmung des Kriech- und Relaxationsverhaltens von bituminösen Werkstoffen (Bitumen, Mastix und Asphalt) anhand von statischen Kriechversuchen zu geben.

Zur Beurteilung des Kriechverhaltens werden statische Kriechversuche an Bitumen, Mastix und Asphalt durchgeführt. Weiters bietet die Arbeit eine Zusammenstellung und kritische Interpretation bereits vorhandener Rohdaten, die im Rahmen zahlreicher Versuchsreihen am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung der TU-Wien erarbeitet wurden.

Weiters werden die Grundlagen zur vergleichenden Beurteilung von Kriechversuchen an Bitumen- bzw. Mastixproben und Asphaltprobekörpern, die mit denselben Ausgangsmaterialien hergestellt wurden, aufbereitet und diskutiert. Dazu wird das Power Law-Modell eingeführt und zur rheologischen Modellierung der Versuchsdaten aus Kriechversuchen angewandt. Schließlich erlauben die Parameter H und p des Power-Law Modells eine vergleichende Beurteilung auf den unterschiedlichen Betrachtungsebenen Bitumen - Mastix - Asphalt. Dies wird anhand ausgewählter Beispiele gezeigt. Damit sollen erste Grundlagen geschaffen werden, um vom Kriechverhalten der Komponenten Bitumen und/oder Mastix auf das Kriechverhalten des daraus hergestellten Asphaltes schließen zu können.

Insgesamt wurden 4 Bindemittel, davon 2 Standardbindemittel und 2 polymermodifizierte Bindemittel in reinem Zustand getestet. Für die Mastixuntersuchung wurde jedes Bindemittel mit Kalksteinmehl als Füllermaterial in 4 Mischungsverhältnissen geprüft. Ergebnis der Prüfungen mit dem Bending Beam Rheometer (BBR) ist nach ÖNORM EN 14771 der Steifigkeitswert und der m-Wert. Mit Hilfe dieser Materialkennwerte ist es möglich das Kriechverhalten der unterschiedlichen Bindemittel miteinander zu vergleichen. Unabhängig vom getesteten Bindemittel zeigt sich, dass die Steifigkeit des Materials mit steigendem Füllergehalt zunimmt und mit steigender Temperatur abnimmt. Beim Vergleich von polymermodifizierten Bindemitteln mit Standardbindemitteln zeigt sich, dass letztere prinzipiell höhere Steifigkeiten aufweisen. Im Gegensatz zu den Steifigkeitswerten nehmen die m-Werte bei steigender Temperatur zu und bei steigendem Füllergehalt ab. Bei Betrachtung der m-Werte stellt man, im Hinblick auf den Füllergehalt, im Gegensatz zu den Steifigkeiten S keine Unterschiede zwischen Standardbindemittel und polymermodifiziertem Bindemittel fest. Sowohl der Verlauf der Steifigkeitswerte als auch der Verlauf der m-Werte zeigt, dass der Füllergehalt bei hohen Temperaturen einen größeren Einfluss auf das Materialverhalten hat als bei niedrigen Temperaturen. Wie bereits erwähnt, werden zusätzlich zum Zweck der Vergleichbarkeit des Kriechverhaltens von Bitumen bzw. Mastix mit jenem von Asphalt die Parameter H und p nach dem Power Law-Modell ermittelt. Als Grundlage für die Berechnung dienen die Versuchsergebnisse. Im Gegensatz zur Steifigkeit S nehmen die H-Werte mit steigender Temperatur zu und bei steigendem Füllergehalt ab. Die Änderung der H-Werte von reinem Bitumen auf die verschiedenen Mischungsverhältnisse ist bei Standardbindemittel und polymermodifizierten Bindemittel gleich. Prinzipiell sind die H-Werte von polymermodifizierten Bindemitteln aber höher. Aufgrund der erhaltenen Ergebnisse zeigt sich, dass der H-Wert für die Beschreibung des Füllers, im Hinblick auf die Anfangssteifigkeit, herangezogen werden kann. Als zweiter wichtiger Parameter wird der p-Wert zur Beschreibung des Kriechverhaltens herangezogen. Es zeigt sich, dass dieser unabhängig vom getesteten Bindemitteltyp über alle Prüftemperaturen und unabhängig vom Mischungsverhältnis einen konstanten Verlauf hat. Er beschreibt somit den viskosen Einfluss des Bitumens auf das Kriechverhalten.

Mit Hilfe des statischen Zugkriechversuches wurden insgesamt 4 Asphaltmischguttypen auf ihr Kriechverhalten hin untersucht. Es zeigt sich, dass bei hohen Temperaturen die Mischguttypen mit polymermodifiziertem Bindemittel deutlich geringere Kriechverformungen aufweisen als jene mit Standardbindemittel. Über den gesamten Temperaturbereich zeigen die Mischguttypen mit Standardbindemittel aber geringere Kriechverformungen. Je tiefer die Temperaturen werden, desto geringer ist der Einfluss des verwendeten Bindemittels auf die Kriechverformungen. Bei tiefen Temperaturen zeigt sich ein deutlich höherer Einfluss des verwendeten Größtkorns auf das Kriechverhalten. Um die Mischguttypen untereinander vergleichen zu können, bedient man sich weiters der Parameter H und p des Power-Law Modells, die im nächsten Schritt auch für den direkten Vergleich von Bitumen, Mastix und Asphalt herangezogen werden können. Bei den H-Werten zeigt sich ein stark temperaturabhängiges Verhalten der untersuchten Mischguttypen. Während die H-Werte bei niedrigen Temperaturen eher moderate Veränderungen zeigen, stellt man einen überproportionalen Anstieg der Werte bei hohen Temperaturen fest. Die Untersuchung zeigte, dass die H-Werte von Mischgut mit polymermodifizierten Bindemitteln höher sind als die von Mischgut mit Standardbindemitteln. Dies lässt sich auf die höheren H-Werte von polymermodifizierten Bindemitteln zurückführen. Außerdem hat das Größtkorn bei der Verwendung von polymermodifizierten Bindemitteln einen Einfluss auf das Kriechverhalten. Bei den p-Werten stellt man unabhängig vom Mischguttyp eine gleichmäßige Abnahme der Werte von -20°C auf +10°C fest.

Im letzten Teil der Arbeit werden die erhaltenen Parameter H und p von reinem Bitumen, Mastix und Asphaltmischgut gegenübergestellt. Im direkten Vergleich der H-Werte und p-Werte von reinem Bitumen mit jenen der Mastix im Mischungsverhältnis 1:2 und jenen von Asphalt zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung des Kriechverhaltens. Mit Hilfe des H-Wertes lassen sich die Unterschiede zwischen reinem Bitumen, Mastix im Mischungsverhältnis 1:2 und dem Asphaltmischgut darstellen. Die Werte der Mastix sind in etwa 10-mal so groß und die Werte des Mischgutes in etwa 100-mal so groß wie jene von reinem Bitumen. Beim Vergleich der p-Werte stellt man fest, dass mit zunehmendem Größtkorn eine schlechtere Übereinstimmung erreicht wird. Grund dafür sind möglicherweise die unterschiedlichen Versuchsmethoden bei der Ermittlung des Kriechverhaltens von Bitumen bzw. Mastix und Asphalt.

Zur Verbesserung der Aussagekraft wäre es sinnvoll, die Prüftemperaturen bei der Bitumen bzw. Mastixprüfung und der Asphaltprüfung gleich zu wählen. Eine weitere Optimierungsmöglichkeit wäre die Durchführung gleichartiger Laborversuche. Es wäre denkbar, die Materialkennwerte von Bitumen und Mastix entweder über einen direkten Zugversuch oder die Asphaltkennwerte mittels Biegeversuch zu ermitteln. Zur Bestätigung der erhaltenen Ergebnisse wäre es weiters sinnvoll, die Rohdaten mit Hilfe weiterer rheologischer Modelle zu modellieren und gegenüberzustellen.

# 6. LITERATURVERZEICHNIS

AASHTO TP9, Ruggedness Evaluation of AASHTO TP7 and TP9: Phase 1 Indirect Tensile Strength Test, American Association of State Highway and Transportation Officials.

Aigner, E., Lackner, R., Wistuba, M., Spiegl, M. & Blab, R. Application of a material model for low-temperature characterization of asphalt mixtures. Vienna University of Technology, draft paper, unpublished.

Bitumen and Bituminous Binders: Determination of Zero-Shear Viscosity (ZSV) using a Shear Stress Rheometer. Method 2: Creep Mode, CEN TC 336 Draft 1.5 2003-03-21

Blab, R., Eberhardsteiner, J. 2005: Methoden der Strukturoptimierung flexibler Straßenbefestigungen. Mitteilungen des Institutes für Straßenbau und Straßenerhaltung Heft 17, Technische Universität Wien.

Blab, R., Kappl, K., Lackner, R., Aigner, E. 2005: Permanent deformation of bituminous bound materials in flexible pavements – evaluation of test methods and prediction models. Mitteilungen des Institutes für Straßenbau und Straßenerhaltung Heft 17, Technische Universität Wien.

Buttlar, W., Al-Khateeb, G. 2000: Hollow - Cylinder Tensile Tester for asphalt paving mixtures, Mid Continent Transportation Symposium 2000 Proceedings, Departement of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana Campaign, 205 North Mathews Avenue, MC-250, Urbana, Illinois 61801.

Entwurf zur ÖNORM B 3590 2007: Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt - Tieftemperaturverhalten

Hondros, G. 1959: Evaluation of Poisson's Ratio and the Modulus of Materials of a Low Tensile Resistance by the Brazilian (Indirect Tensile) Test with Particular Reference to Concrete. *Austr. J. Appl. Sci.*, Vol. 10, No. 3, 243-268.

Kim, Y. Richard, Daniel, Jo S., Haifang W. 2002: Fatigue Performance Evaluation of WesTrack Asphalt Mixtures Using Viscoelastic Continuum Damage Approach, North Carolina State University, Department of Civil Engineering.

Kirchmaier, L. 2006: Gebrauchsverhaltensorientierte Bindemittelprüfung mit dem "Dynamik Shear Rheometer" – Kriechversuche an Bitumen, Interdisziplinäre Seminararbeit, Technische Universität Wien, Österreich.

Lackner, R., Blab, R., Jäger, A., Spiegl, M., Kappl, K., Wistuba, M., Gagliano, B., Eberhardsteiner, J. 2004: Multiscale modeling as the basis for reliable predictions of

the behaviour of multi-compsed materials. Procress in Engineering Computational Technology, Saxe-Coburg Publications, Chapter 8, pp 153-187, ISBN 1-874672-22-9.

Lackner, R., Spiegl, M., Blab, R., Eberhardsteiner, J. 2005: Is low-temperature creep of asphalt mastic independent of filler shape and mineralogy? – arguments from multiscale analysis. Journal Of Materials In Civil Engineerimg (ASCE), Volume 17, number 5, pp 485-491.

Litzka, J., Strobl, R., Pass, F., Augustin, H. 1998: Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung Heft 9. Mitteilungen des Institutes für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien.

On Tam, W., Solaimanian, M., W. Kennedy, T. 2000: Development and use of Static Creep Test to evaluate rut resistance, Center of Transportation Research, The University of Texas at Austin, 3208 Red River, Suite 200, Austin.

ÖNORM 1097-4 1999: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 4: Bestimmung des Hohlraumgehaltes an trocken verdichtetem Füller

ÖNORM EN 14770 2006: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR)

ÖNORM EN 14771 2005: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Biegekriechsteifigkeit - Biegebalkenrheometer(BBR)

ÖNORM 1097-6 2006: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme

ÖNORM 1097-7 1999: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 7: Bestimmung der Dichte von Füller - Pyknometerverfahren

Rowe, Geoffrey M. 2002: Tri-County Landfill Site, Elgin, Illinois Pavement Evaluation Study and Development of Design Procedures for MatConTM Pavements, Abatech, Inc., 73 Old Dublin Pike, #312, Doylestown, PA 18901.

Shah, A. and Olek, J. 2004: Development of Indiana's SPS9-A Site, Joint Transportation Research Program, 1284 Civil Engineering Building, Purdue University, West Lafayette, IN 47907-1284.

Schießl, P. 2002: Allgemeine Grundlagen, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, Technische Universität München.

Schellenberg, K., Eulitz, J. 1994: Ansprache des Fließverhaltens von Bitumen und polymermodifizierten Bitumen bei tiefen Temperaturen, Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik" des Bundesministers für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Heft 695, Bonn-Bad Godesberg. Spiegl, M., Wistuba, M., Lackner, R., Blab, R. 2005 a: Evaluation of temperature associated cracking in asphalt mixtures by means of performance based laboratory testing, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Trondheim, Norway.

Spiegl, M., Wistuba, M., Lackner, R., Blab, R. 2005 b: Risk assessment of low-temerature cracking of asphalt – an experimental study, 11<sup>th</sup> International Conference on Fracture, March 20-25, Turin.

Wen, Hafiang 2001: Fatigue Performance Evaluation of Westrack Asphakt Mixtures based on viscoelastic Analysis of Indirect Tensile Test, North Carolina State University, Department of Civil Engineering.

Wistuba, M., Lackner, R., Blab, R., Spiegl, M. 2006: Low temperature performance of asphalt mixtures used for LLP – new approach based on fundamental test methods and numerical modelling. International Journal Of Pavement Engineering, Special Issue on Long-Life Pavements, Taylor & Francis.

# ANHANG A: VERSUCHSERGEBNISSE DER BITUMEN UND MASTIX PRÜFUNGEN

# B 1 B 50/70

Kriechkurvenkurven:







0,0

Ο

#### Steifigkeitskurven:









Steifigkeit nach 60 s:





#### H-Werte:



#### p-Werte:



# B 2 B 70/100

Kriechkurvenkurven:







#### Steifigkeitskurven:






#### m-Wert-Kurven:





BBR - m-Wert B70/100 1:1,5





Steifigkeit nach 60 s:



#### m-Werte nach 60 s:



#### H-Werte:



#### p-Werte:

B 70/100 rein B 70/100 1:0,5 B 70/100 1:1 B 70/100 1:1,5 B 70/100 1:2 -1,00 -0,80 -1,00 -1,00 -1,00 -0,80 -1,00 -1



## B 3 PmB 45/80-65

Kriechkurvenkurven:





BBR - Durchbiegungsverlauf PmB45/80-65 (B50/90S)





Zeit [s]

Steifigkeitskurven:











BBR - m-Wert PmB45/80-65 (B50/90S) 1:0,5 -m-Wert @ -24 °C 0,6 0,5 0,4 Е 0,2 0,1 0.0 250 50 200 0 100 150

Zeit [s]





Steifigkeit nach 60 s:





m-Werte nach 60 s:

#### H-Werte:



p-Werte:



## B 4 PmB 45/80-50

Kriechkurvenkurven:







Steifigkeitskurven:



Ο

Zeit [s]

Ο

Zeit [s]



#### m-Wert-Kurven:





BBR - m-Wert PmB45/80-50 (B60/90) 1:1,5





Steifigkeiten nach 60 s:



#### m-Werte nach 60 s:



#### H-Werte:



#### p-Werte:



# ANHANG B: VERSUCHSERGEBNISSE DER ASPHALT PRÜFUNGEN

### B 1 AC 22 trag 50/70, F4, G4

Kriechkurven:



AC 22 trag 50/70, F4, G4; K084C



AC 22 trag 50/70, F4, G4; K084G 2,5 Längenänderung [mm] 2 1,5 1 0,5 0 0 1000 2000 3000 4000 5000 6000 7000 Zeit [sec]

AC 22 trag 50/70, F4, G4; K084E





#### Tabelle 35: gemittelte H-Werte

H - Wert AC 22, trag 50/70, F4, G4				H - Wert AC 22, trag 50/70, F4, G4 bezogen auf +10°C			
-20°C	-10°C	0°C	+10°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C
0,0029625	0,006637	0,015800	0,1137484	100,00%	224,03%	533,34%	3839,61%

#### Tabelle 36: gemittelte p-Werte

p - Wert AC 22, trag 50/70, F4, G4				p - Wert AC 22, trag 50/70, F4, G4 bezogen auf +10°C			
-20°C	-10°C	0°C	+10°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C
-0,8212168	-0,660780	-0,337319	-0,316411	100,00%	80,46%	41,08%	38,53%

#### AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4 **B**2

#### Kriechkurven:



AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4; E092D





AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4; E091D

AC 22 binder PmB 45/80-65, F3, G4; E093D





Anhang B



#### Tabelle 37: gemittelte H-Werte

H - Wert AC 22, binder PmB 45/80-65, F3, G4				H - Wert AC 22, binder PmB 45/80-65, F3, G4 be- zogen auf +10°C			
-20°C	-10°C	0°C	+10°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C
0,0019804	0,018228	0,048401	0,1743899	100,00%	920,44%	2444,01%	8805,79%

#### Tabelle 38: gemittelte p-Werte

p - Wert AC 22, binder PmB 45/80-65, F3, G4				p - Wert AC	22, binder Pn bezogen auf	nB 45∕80-65 -+10℃	5, F3, G4
-20°C	-10°C	0°C	+10°C	-20°C	-10°C	O°C	+10°C
-0,6376453	-0,776640	-0,544361	-0,523620	100,00%	121,80%	85,37%	82,12%

## B 3 SMA 11 70/100, S1, G1

Kriechkurven:





SMA 11 70/100, S1, G1; K120F





#### Tabelle 39: gemittelte H-Werte

H - V	Vert SMA 11,	70/100, S1	, G1	H - Wert SMA 11, 70/100, S1, G1 bezogen auf +10°C			
-20°C	-10°C	0°C	+10°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C
0,0020303	0,002368	0,017332	0,0711443	100,00%	116,62%	853,67%	3504,13%

#### Tabelle 40: gemittelte p-Werte

p - Wert SMA 11, 70/100, S1, G1				p - Wert SMA 11, 70/100, S1, G1 zogen auf +10°C			
-20°C	-10°C	0°C	+10°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C
-0,8379476	-0,547154	-0,418613	-0,313311	100,00%	65,30%	49,96%	37,39%

# B 4 SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1

#### Kriechkurven:



SMA 11 PmB 45/80-65, S1, G1; E089H









T-H

Т-р



#### Tabelle 41: gemittelte H-Werte

H - Wert SMA 11, PmB 45/80-65 S1, G1				H - Wert SMA 11, PmB 45/80-65, S1, G1 bezogen auf +10°C			
-20°C	-10°C	0°C	+10°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C
0,0031437	0,007265	0,033711	0,1853031	100,00%	231,10%	1072,34%	5894,36%

#### Tabelle 42: gemittelte p-Werte

p - Wert SMA 11, PmB 45/80-65 S1, G1				p - Wert SMA 11, PmB 45/80-65, S1, G1 bezogen auf +10°C			
-20°C	-10°C	0°C	+10°C	-20°C	-10°C	0°C	+10°C
-0,684297	-0,516784	-0,446090	-0,482895	100,00%	75,52%	65,19%	70,57%