

**TU**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

D I P L O M A R B E I T

Master's Thesis

# **Bestimmung der Materialparameter zur Beschreibung des Tieftemperatur- Kriechens von Bitumen und Mastix auf der Basis von Bending-Beam-Rheometer - Versuchen**

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

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab,

und Dipl.-Ing. Markus Spiegl

Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung,

eingereicht an der Technischen Universität Wien,

Fakultät für Bauingenieurwesen,

von

Schuch Johann

E616/9525653

Wienerstrasse 33, 7013 Klingenbach

Wien, im Oktober 2007

Unterschrift

## Kurzfassung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, auf der Grundlage rheologischer Modelle Materialparameter zu bestimmen die das Kriechverhalten von Bitumen und Mastix bei tiefen Temperaturen beschreiben. Das Kriechverhalten von Bitumen und Mastix wird mit Hilfe von Kriechversuchen am Bending Beam Rheometer (BBR) bestimmt. Es werden bei der Versuchsdurchführung drei Bitumensorten (zwei Standardbitumen und ein polymermodifiziertes Bitumen) und Kalksteinmehl als Füller verwendet. Bei den Versuchen werden Probekörper aus reinem Bitumen und Mastixprobekörper (unterschiedliche Zusammensetzung vom Bitumen und Füller) verwendet. Die Kriechversuche werden bei unterschiedlichen Temperaturen (+6 °C bis -24 °C) durchgeführt, wobei für die Diplomarbeit nur die Werte unterhalb des Nullpunktes verwendet werden. Es werden sowohl Standardkriechversuche als auch erweiterte Langzeitkriechversuche untersucht.

Die so gewonnenen Versuchsergebnisse werden mit unterschiedlichen rheologischen Modellen (Standard BBR-Versuch, Maxwell-Modell, Burgers-Modell, Power-Law-Modell) beschrieben.

## Summary

The goal of this study is to find material parameters based on rheological models, which describe the low temperature creep behavior of bitumen and mastix. The creep behavior of bitumen and mastix is specified by means of creep tests based on the bending beam rheometer (BBR). In this study the test series consists of three different types of bitumen (two conventional, and two polymer modified bitumen) and one type of filler. The BBR is carried out with both bitumen and mastix specimen (different mixing ratio of bitumen and filler). The bending beam creep tests are performed at different temperatures (from +6 °C to -24 °C). Restricting the study to low temperature creep, only temperatures below zero degree Celsius are used to describe both material parameters. The characteristics of bituminous materials are obtained from conventional and long term creep tests.

Based on the experimental results, the material parameters are described with different rheological models (conventional BBR test, Maxwell model, Burgers model and Power-law model).

# INHALTSVERZEICHNIS

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. EINLEITUNG .....</b>                                       | <b>3</b>  |
| <b>2. BENDING-BEAM-RHEOMETER UND VERWENDETE MATERIALIEN.....</b> | <b>5</b>  |
| 2.1 Das Bending Beam Rheometer.....                              | 5         |
| 2.1.1 Probenvorbereitung .....                                   | 7         |
| 2.1.2 Versuchsdurchführung .....                                 | 8         |
| 2.2 Erweiterte Kriechversuche - Langzeitversuche.....            | 9         |
| 2.3 Verwendete Materialien.....                                  | 10        |
| 2.3.1 Bindemittel.....                                           | 10        |
| 2.3.2 Füller.....                                                | 10        |
| <b>3. PARAMETERBESTIMMUNG .....</b>                              | <b>11</b> |
| 3.1 Bending-Beam-Rheometer - Methode (S, m-Wert) .....           | 11        |
| 3.1.1 Auswertung der BBR-Versuche Methode (S, m-Wert) .....      | 11        |
| 3.2 Grundlagen der Rheologie .....                               | 19        |
| 3.3 Das Maxwell-Modell .....                                     | 22        |
| 3.3.1 Auswertungsmethodik des Maxwell-Modell.....                | 23        |
| 3.3.2 Auswertung mit dem Maxwell-Modell .....                    | 25        |
| 3.4 Das Kelvin-Voigt-Modell.....                                 | 37        |
| 3.5 Das Burgers-Modell .....                                     | 38        |
| 3.5.1 Auswertungsmethodik des Burgers-Modell .....               | 39        |
| 3.5.2 Auswertung mit dem Burgers-Modell .....                    | 41        |
| 3.6 Power-Law-Modell.....                                        | 55        |
| 3.6.1 Auswertungsmethodik des Power-Law-Modell.....              | 56        |
| 3.6.2 Auswertung mit dem Power-Law-Modell .....                  | 58        |
| <b>4. GEGENÜBERSTELLUNG VON MODELL UND VERSUCH.....</b>          | <b>72</b> |
| 4.1 Auswertungsmethodik der Gegenüberstellung .....              | 72        |
| 4.1.1 Auswertung der Kurzzeitkriechversuche .....                | 73        |
| 4.1.2 Auswertung der Langzeitkriechversuche.....                 | 75        |
| <b>5. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG .....</b>             | <b>80</b> |
| <b>6. LITERATURVERZEICHNIS.....</b>                              | <b>82</b> |
| <b>7. ABBILDUNGEN UND DIAGRAMME .....</b>                        | <b>84</b> |
| <b>8. ANHANG B: TABELLEN.....</b>                                | <b>93</b> |

## **1. EINLEITUNG**

Durch die Zunahme des Straßenverkehrs werden sowohl an den Straßenbau als auch an die verwendeten Baustoffe immer höhere Anforderungen gestellt. Die erhöhten An-

forderungen sind notwendig um die Benutzbarkeit der Verkehrswege während der gesamten Nutzungsdauer zu gewährleisten. Eine Reduktion der Nutzungsdauer ist immer mit erhöhten Kosten verbunden. Um die Nutzungsdauer eines Verkehrsweges möglichst genau bestimmen zu können ist es notwendig das Tragverhalten der Unterlage, die räumliche und zeitliche Temperaturverteilung und die Verkehrsbelastung zu kennen. Bei Kenntnis dieser Größen können mathematisch-mechanische Berechnungsmodelle entwickelt werden, welche die theoretische Nutzungsdauer eines Verkehrsweges abschätzen können. Beurteilungskriterium bei Asphaltstraßen ist neben der Ermüdungsfestigkeit auch der Verformungswiderstand. Das Ermüdungsverhalten von Asphalten wird in der Regel durch die Anzahl der Lastwechsel bis zum Eintreten eines ersten kumulativen Ermüdungsschadens beschrieben. Ein Ermüdungsschaden tritt dann auf, wenn die Steifigkeit auf die Hälfte des Anfangswertes sinkt oder ein spontaner Bruch eintritt. Der Einsatz steiferer Asphalte wirkt sich bei hohen Temperaturen sowohl auf die Ermüdungsbeständigkeit als auch auf den Verformungswiderstand positiv aus. Dadurch lässt sich eine Verlängerung der Nutzungsdauer der Fahrbahn erwarten. Seit der zweiten Hälfte der siebziger Jahre ist auch das Verhalten von Asphaltbefestigungen bei tiefen Temperaturen ein wichtiges Thema. Wenn bei tiefen Temperaturen abkühlungsbedingte und verkehrslastbedingte Zugspannungen gleichzeitig auftreten kann es zu einer vorzeitigen Ermüdung kommen, wodurch Risse entstehen. Da Bitumen als Teil der Asphaltbefestigung seine Eigenschaften mit der Temperatur ändert, ist zu überprüfen ob der Einsatz von steiferen Bindemitteln auch bei tieferen Temperaturen von Vorteil ist [Arand et al. (1988)].

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden im ersten Teil die Versuchseinrichtung und die Versuchsdurchführung des Bending Beam Rheometer (BBR) beschrieben. Die Interpretation der Messergebnisse erfolgt zunächst mit den herkömmlichen Versuchsergebnissen, der Steifigkeit  $S$  und dem  $m$ -Wert. Im nächsten Teil erfolgt eine Einführung in die Rheologie, wobei die einzelnen rheologischen Modelle beschrieben werden. Außerdem erfolgt eine Anleitung wie die unterschiedlichen Parameter der einzelnen Modelle aus den Versuchen ermittelt werden. Die gewonnenen Versuche werden dann ausgewertet und einander gegenübergestellt. Im letzten Teil erfolgt dann eine Erweiterung der Versuche auf Langzeitkriechversuche.

## 2. BENDING-BEAM-RHEOMETER UND VERWENDETE MATERIALIEN

### 2.1 Das Bending Beam Rheometer

Die Beurteilung des Tieftemperaturverhaltens von Bitumen und Mastix erfolgt mit Hilfe des Biegebalkenrheometers (BBR) [ÖNORM EN 14771 (2005)]. Die Belastung der Probe erfolgt durch einen luftgelagerten Stempel mit einer Last von 980 mN (=98 g). Die Belastungsdauer für den Probekörper (L=125 mm, H=6,25 mm, B=12,5 mm) beträgt beim Standardversuch 240 Sekunden. Um den Probekörper auf die gewünschte Prüftemperatur zu bringen, ist eine Lagerung in einem Ethanolbad notwendig. Während der gesamten Testdauer werden die Temperatur, die Kraft und die Durchbiegung gemessen und aufgezeichnet. Die Steifigkeit kann mit der Belastung und der Durchbiegung aus der Biegebalkentheorie nach Gleichung 1 berechnet werden. Die Federsteifigkeit kann auch nach Gleichung 3 berechnet werden, wenn man das Trägheitsmoment nach Gleichung 2 in Gleichung 1 einsetzt. In Abbildung 1 ist das BBR-Messprinzip nach ÖNORM EN 14771 dargestellt.

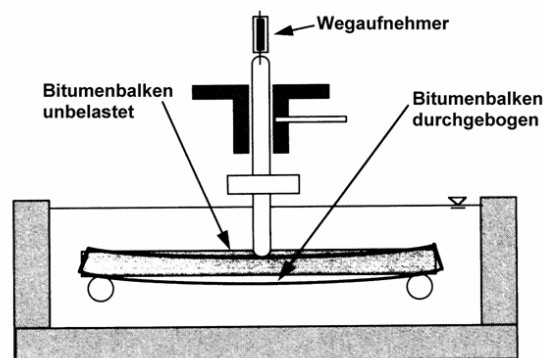


Abbildung 1: Messprinzip des BBR nach ÖNORM EN 14771[Litzka et al. (1998)]

$$S(t) = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot f(t) \cdot J}$$

Gleichung 1

mit

S...Steifigkeit [Pa]

P...Auflast [N]

l....Abstand zwischen den Auflagern [m]

f....Durchbiegung [m]

J....Trägheitsmoment [m<sup>4</sup>]

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

Gleichung 2

mit

J....Trägheitsmoment [m<sup>4</sup>]

b....Balkenbreite [m]

h....Balkenhöhe [m]

Daraus ergibt sich:

$$S(t) = \frac{P \cdot l^3}{4 \cdot f(t) \cdot b \cdot h^3}$$

Gleichung 3

mit

S...Steifigkeit [Pa]

P...Auflast [N]

l....Abstand zwischen den Auflagern [m]

f....Durchbiegung [m]

b...Balkenbreite [m]

h...Balkenhöhe [m]

Die errechnete Steifigkeit wird in einem doppelt logarithmischen Graph über der Zeit aufgetragen. Legt man zum Zeitpunkt t=60 Sekunden eine Tangente an diesen Graph, so ergibt die Steigung dieser Tangente den so genannten m-Wert (=m(60)). Der m-Wert stellt die Relaxationsfähigkeit des Bitumens zu diesem Zeitpunkt dar. Ein hoher m-Wert ergibt einen hohen Abbau der Biegezugspannungen durch Bitumenrelaxation. In Abbildung 2 sieht man, dass die Steifigkeit (=S(60)) und der m-Wert (=m-Wert(60)) zum Zeitpunkt t=60 Sekunden bestimmt wird.

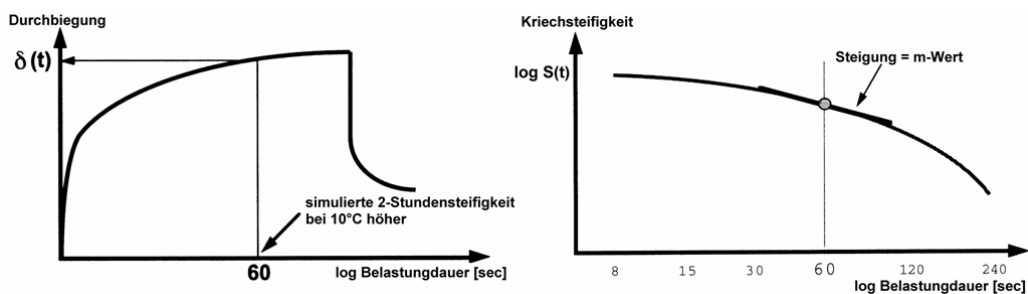
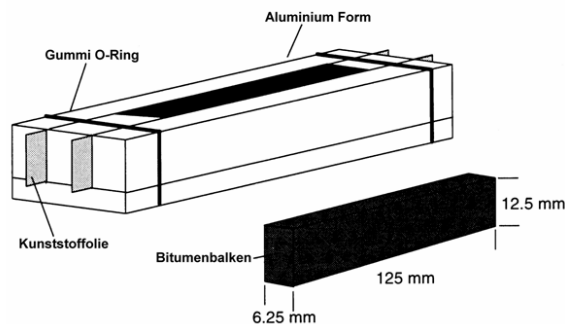


Abbildung 2: BBR, Durchbiegung, Steifigkeit, m-Wert [Litzka et al. (1998)]

### 2.1.1 Probenvorbereitung

Die Herstellung des Bitumenbalkens erfolgt in einer Aluminiumform. Sämtliche Aluminiumteile werden mit einem silikonfreien Fett bestrichen und durch einen Kunststoffstreifen abgedeckt. Die Einzelteile werden mittels zweier Gummiringe fixiert. Das Bitumen wird mittels einer Heißluftpistole erhitzt und anschließend in einem Zug in die Form gegossen. Die Probekörperform soll etwas überfüllt werden, da der Bitumen beim abkühlen etwas nachsacken kann. In Abbildung 3 sind die Aluminiumform und der Probekörper aus Bitumen dargestellt.



**Abbildung 3: BBR, Aluminiumform und Probekörper [Litzka et al. (1998)]**

Für die Herstellung eines Probekörpers werden 15 g Bitumen benötigt. Bei der Herstellung der Bitumen/Füller-Probekörper wird eine Gesamtmasse von etwa 25 g benötigt, wobei sich die einzelnen Massenanteile je nach Mischungsverhältnis zusammensetzen. Das Bitumen bzw. die Bitumen/Füller-Mischung kühlt nun 45 bis 60 Minuten bei Raumtemperatur ab. Bevor die Probe ausgeformt wird, wird das überschüssige Material mit einer heißen Spachtel abgeschnitten. Während der Abkühlzeit muss der Biegebalkenrheometer laut Softwareanweisung kalibriert werden und das Ethanolbad auf Prüftemperatur eingestellt werden. Das Ethanol fließt in einem Kreislauf zwischen einem Kryostat und dem Temperierbad. Bei der Einstellung der Temperatur am Kryostat ist zu beachten, dass die eingestellte Temperatur niedriger ist als die gewünschte Prüftemperatur, da es in den Leitungen zu Wärmeverlusten kommt. Die Temperatureinstellung kann sich auch mit der aktuellen Raumtemperatur ändern. Als Grundlage für die Temperatureinstellung kann die Tabelle 1 verwendet werden.

**Tabelle 1: Temperatureinstellung am Kryostat**

| Prüftemperatur<br>[°C] | Temperatureinstellung am Kryostat<br>[°C] |
|------------------------|-------------------------------------------|
| -6                     | -7,3                                      |
| -12                    | -13,4                                     |
| -18                    | -19,5                                     |
| -24                    | -25,7                                     |

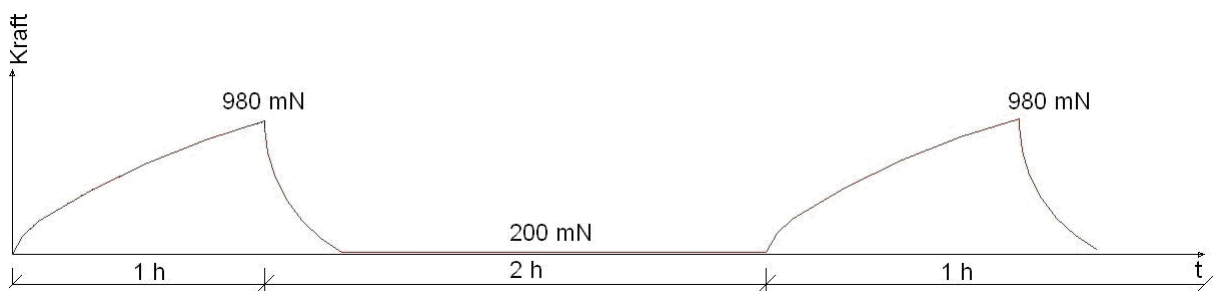
Nach Ablauf der Abkühlzeit wird die Aluminiumform mit dem Prüfbalken für 10 Sekunden in Eiswasser gehalten und anschließend ausgeformt. Beim Ausformen ist darauf zu achten, dass sich der Prüfbalken weder verdreht noch verformt. Prüfbalken aus Bitumen/Füller-Gemisch sind steifer und daher weniger empfindlich gegen mechanische Verformung. Nach dem Ausformen wird der Prüfbalken für 60 Minuten ( $\pm 5$  Minuten) in das Ethanolbad gelegt, welches sich bereits auf Prüftemperatur ( $\pm 0,1$  °C) befindet. Damit die gleiche Temperierdauer gewährleistet ist, sollte die zweite Probe beim Standardversuch erst nach 5 Minuten in das Ethanolbad gegeben werden.

### **2.1.2 Versuchsdurchführung**

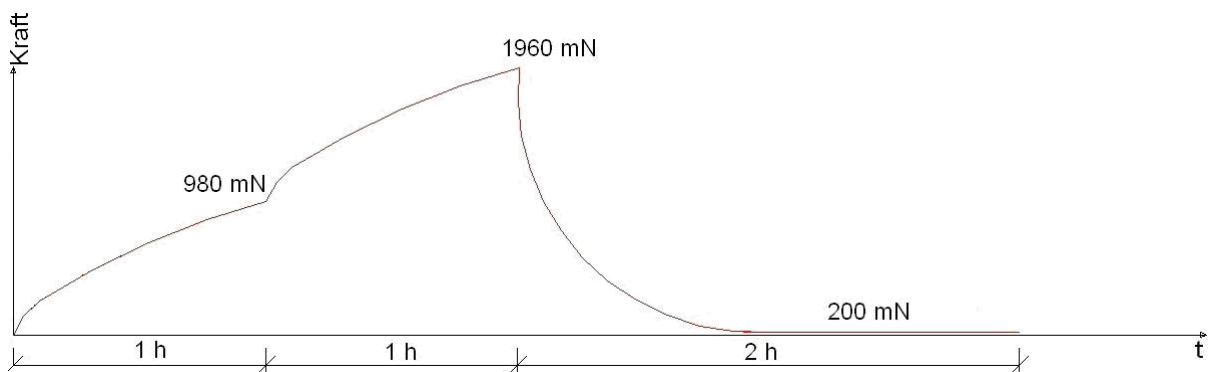
Nach Ablauf der Temperierzeit wird der Prüfbalken auf die Auflage gelegt und der Belastungsstempel vorsichtig auf den Balken aufgesetzt. Die Vorbelastung von  $35 \pm 10$  mN erfolgt manuell innerhalb von 10 Sekunden. Der Prüfbalken wird für eine Sekunde mit 980 mN belastet und danach wieder entlastet. Beim Standardversuch wird die Prüflast von 980 mN für eine Dauer von 240 Sekunden aufgebracht. Während der gesamten Versuchszeit werden alle Daten (Durchbiegung, Belastung, Temperatur) ständig gemessen. Nach dem Prüfvorgang wird die Probe wieder entlastet. Die Steifigkeit  $S(60)$  und der  $m$ -Wert(60) werden von der Software automatisch berechnet. Die Software stellt auch den Verlauf der Durchbiegung und der Steifigkeit über der Zeit automatisch dar.

## 2.2 Erweiterte Kriechversuche - Langzeitversuche

Als Erweiterung zu den Standardversuchen [ÖNORM EN 14771 (2005)] mit einer Belastungsdauer von 240 Sekunden wurden auch Langzeitversuche durchgeführt. Für diese Versuche wurde die neue Software BBRw 3.10 verwendet. Die Probekörper wurden aus reinem Bitumen B70/100 hergestellt und bei unterschiedlichen Temperaturen (-12 °C und -18 °C) geprüft. Bei jeder Temperatur wurden zwei Arten von Langzeitversuchen durchgeführt. Die Lagerzeit im Ethanolbad beträgt bei diesen Versuchen 24 Stunden. In der ersten Versuchsreihe wird die Probe für eine Stunde mit 980 mN belastet, gefolgt von einer Entlastungsphase mit 200 mN von zwei Stunden. Nach Ablauf dieser Entlastungsphase wird die Probe wieder für eine Stunde mit 980 mN belastet. In der zweiten Versuchsreihe wird die Probe für eine Stunde mit 980 mN belastet. Nach dieser Stunde wird die Prüfkraft auf 1960 mN erhöht und nach Ablauf einer weiteren Stunde erfolgt eine Entlastungsphase von zwei Stunden. Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll nun festgestellt werden wie gut die Kriechkurven der Langzeitkriechversuche nachgebildet werden. Der Belastungsablauf für die erste Versuchsreihe ist in Abbildung 4 dargestellt. Abbildung 5 zeigt den Belastungsablauf für die zweite Versuchsreihe.



**Abbildung 4: Belastungsablauf der ersten Versuchsreihe**



**Abbildung 5: Belastungsablauf der zweiten Versuchsreihe**

## 2.3 Verwendete Materialien

### 2.3.1 Bindemittel

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Bitumensorten geprüft. Die Materialkennwerte der zwei Standardbitumensorten B50/70 und B70/100 sowie des polymer-modifiziertem Bitumen E60/90 sind in der nachfolgenden Tabelle 2 [Lackner et al. (2005)] angeführt. Die genaue Bezeichnung der Probekörper ist im Anhang B enthalten.

**Tabelle 2: geprüfte Bitumensorten**

| Bindemittel-<br>bezeichnung | Materialkennwerte            |                          |                                   |
|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
|                             | Erweichungs-<br>punk<br>[°C] | Penetration<br>[1/10 mm] | Brechkpunkt nach<br>Fraaß<br>[°C] |
| B50/70                      | 51                           | 49                       | -13                               |
| B70/100                     | 47                           | 72                       | -17                               |
| E60/90                      | 58                           | 64                       | -18                               |

### 2.3.2 Füller

Als Füllermaterial wurde Kalksteinmehl der Firma Wopfinger verwendet. Die Materialkennwerte in Tabelle 3 kommen aus [Lackner et al. (2005)].

**Tabelle 3: Füllerkennwerte**

| Materialkennwerte |                 |                      |                       |                     |                      |
|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|
| Füller            | Mineralogie     | Rohdichte<br>[mg/m³] | Reindichte<br>[mg/m³] | H-Gehalt<br>[Vol-%] | Oberfläche<br>[m²/g] |
| Kalksteinmehl     | Kalzit, Dolomit | 2,71                 | 2,72                  | 30                  | 2,05                 |

### 3. PARAMETERBESTIMMUNG

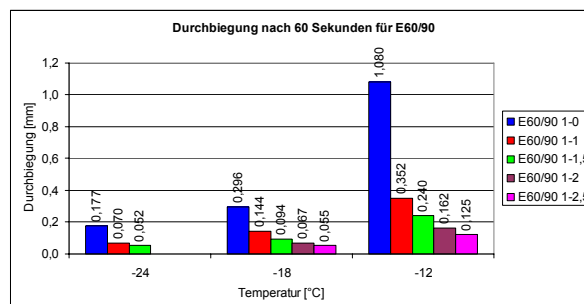
Am Anfang dieses Kapitels erfolgt die Auswertung der BBR-Versuche (s, m-Wert). Als nächstes werden die Grundlagen der rheologischen Modelle erklärt. Weiters wird für jedes Modell die Auswertungsmethodik beschrieben. Die errechneten Materialparameter werden im Anschluss einander gegenübergestellt.

#### 3.1 Bending-Beam-Rheometer - Methode (S, m-Wert)

Die errechnete Steifigkeit wird in einem doppelt logarithmischen Graph über der Zeit aufgetragen. Legt man zum Zeitpunkt  $t = 60$  Sekunden eine Tangente an diesen Graph, so ergibt die Steigung dieser Tangente den so genannten m-Wert. Der m-Wert stellt die Relaxationsfähigkeit des Bitumens zu diesem Zeitpunkt dar. Ein hoher m-Wert ergibt einen hohen Abbau der Biegezugspannungen durch Bitumenrelaxation.

##### 3.1.1 Auswertung der BBR-Versuche Methode (S, m-Wert)

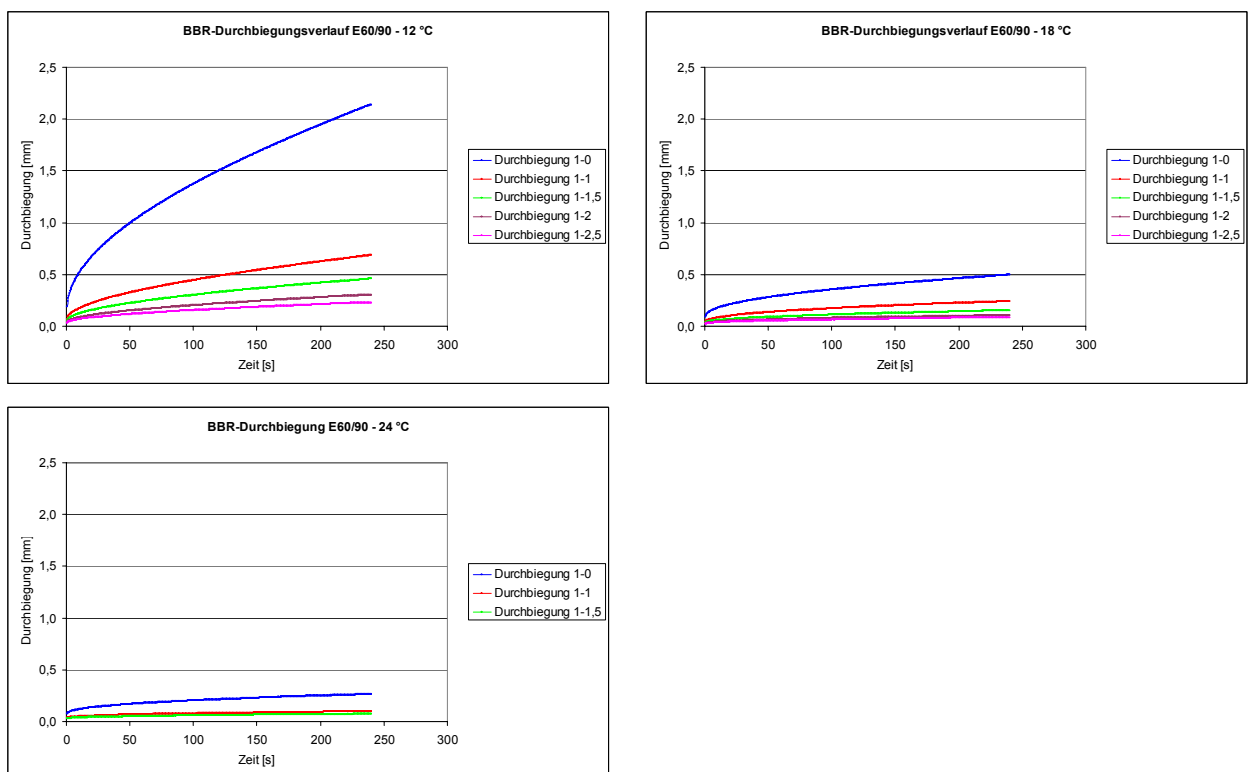
Wie bereits erwähnt werden die Steifigkeit und der m-Wert von der Software automatisch berechnet und sind auf einem Ausdruck mit den anderen Versuchsdaten dargestellt. Die Software stellt auch den Verlauf der Durchbiegung und der Steifigkeit über der Zeit automatisch dar. Bei den Versuchen wurden drei Bitumensorten bei unterschiedlichen Temperaturen und Mischungsverhältnissen geprüft. Bei Proben aus reinen Bitumen wurden zwei Probekörper hergestellt. Bei Mastixproben wurden für jedes Mischungsverhältnis drei Probekörper geprüft. Für die Auswertung werden die Versuchsergebnisse gemittelt. Abbildung 6 zeigt exemplarisch für die Bitumensorte E60/90 die Werte der Durchbiegung nach 60 Sekunden.



**Abbildung 6: E60/90 Durchbiegung nach 60s für die unterschiedlichen Mischungsverhältnisse und Prüftemperaturen**

In Abbildung 6 sieht man die Durchbiegungswerte nach 60 Sekunden in der Mitte des Balkens. Es ist zu erkennen, dass die Durchbiegung bei konstanter Temperatur und zunehmendem Füllergehalt abnimmt. Bei  $-18$  °C beträgt die Durchbiegung nach 60 Sekunden bei reinem Bitumen in der Mitte des Balkens 0,296 mm. Bei gleicher Temperatur und dem größten Mischungsverhältnis Bitumen zu Füller von 1:2,5 be-

trägt die Durchbiegung nur 0,055 mm und ist somit um ca. 5,4-mal kleiner als bei reinem Bitumen. Betrachtet man nun den Einfluss des Füllers bei -12 °C, so ist die Durchbiegung ca. 8,6-mal kleiner als bei reinem Bitumen. Der Einfluss des Füllergehalts auf die Durchbiegung ist somit bei hohen Temperaturen größer als bei niedrigen. Hält man nun das Mischungsverhältnis konstant und betrachtet die Durchbiegung nach 60 Sekunden bei unterschiedlichen Temperaturen so stellt man fest, dass die Durchbiegung bei reinem Bitumen und -12 °C ca. 6-mal größer ist als bei -24 °C. Bei einem Mischungsverhältnis von 1:2,5 ist die Durchbiegung ca. 4,6-mal größer als bei -24 °C. Aus dieser Betrachtungsweise sieht man, dass sowohl die Temperatur als auch der Füllergehalt einen Einfluss auf das Kriechverhalten von Bitumen und zugehöriger Mastix haben. Abbildung 7 zeigt exemplarisch den Verlauf der Durchbiegung für die Bitumensorte E60/90 und zugehöriger Mastix bei -12 °C, -18 °C und -24 °C.



**Abbildung 7: Kriechkurven E60/90 [1:0], [1:1], [1:1,5], [1:2] bei -12 °C, -18 °C und -24 °C**

Abbildung 8 zeigt exemplarisch den Verlauf der Steifigkeit für das Bindemittel E60/90 und zugehöriger Mastix bei den Prüftemperaturen -12 °C, -18 °C und -24 °C. In Abbildung 9 sieht man die Steifigkeitswerte nach 60 Sekunden dargestellt für die unterschiedlichen Mischungsverhältnisse und Temperaturbereiche für alle 3 Bitumensorten. Aus Abbildung 9 erkennt man weiter, dass die Steifigkeit mit steigender Temperatur für alle Mischungsverhältnisse und alle Bitumensorten abnimmt.

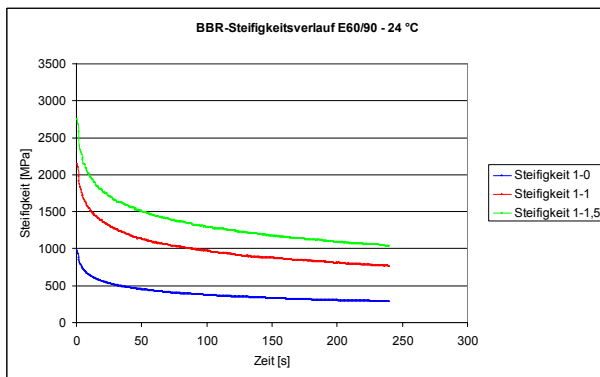
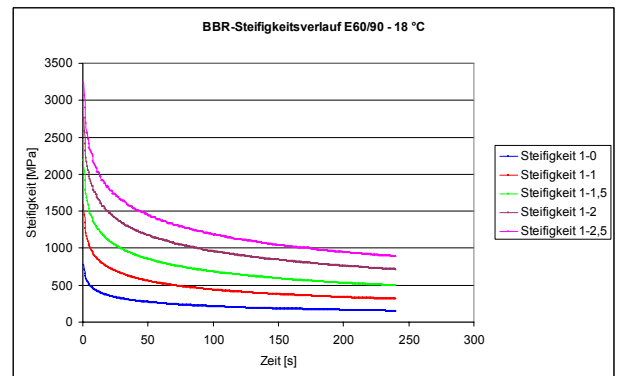
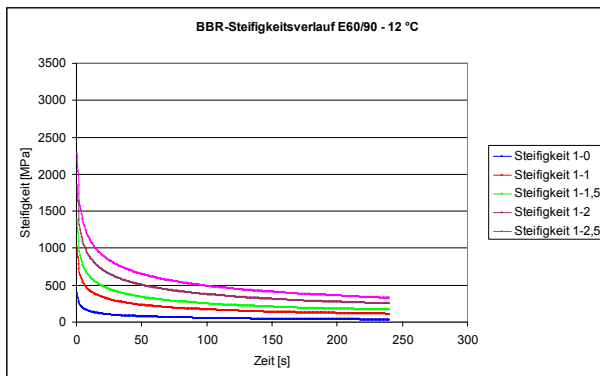


Abbildung 8: Verlauf der Steifigkeit E60/90 [1:0], [1:1], [1:1,5], [1:2], [1:2,5] bei -12 °C, -18 °C und -24 °C

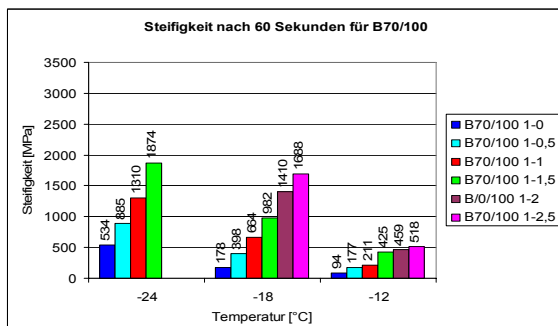
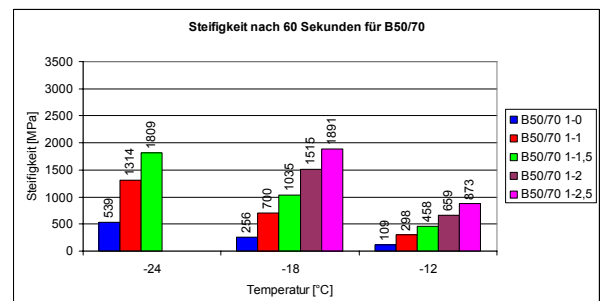
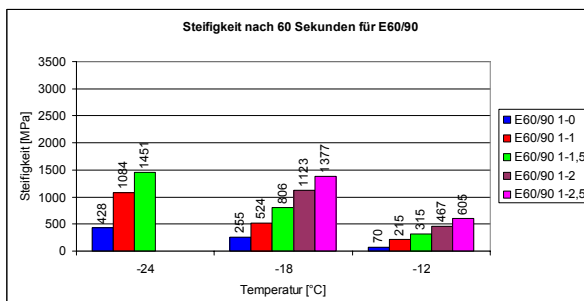


Abbildung 9: Steifigkeit S nach 60 Sekunden E60/90, B50/70, B70/100 [1:0], [1:0,5], [1:1], [1:1,5], [1:2], [1:2,5] bei -12 °C, -18 °C und -24 °C

In den folgenden Tabellen 4 bis 6 werden die Steifigkeitswerte nach 60 Sekunden für jede Bitumensorte zusammengefasst.

**Tabelle 4: Änderung der Steifigkeit in Abhängigkeit vom Füllergehalt für E60/90**

| Steifigkeit E60/90 nach 60 s |        |        |        | Steifigkeit E60/90 nach 60 s<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|------------------------------|--------|--------|--------|----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                           | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                       | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                          | 428    | 255    | 70     | 1:0                                                      | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                          | 1084   | 524    | 215    | 1:1                                                      | 253%   | 205%   | 307%   |
| 1:1,5                        | 1451   | 806    | 315    | 1:1,5                                                    | 339%   | 316%   | 450%   |
| 1:2                          |        | 1123   | 467    | 1:2                                                      |        | 440%   | 667%   |
| 1:2,5                        |        | 1377   | 605    | 1:2,5                                                    |        | 540%   | 884%   |

Bei -18 °C und reinem Bitumen E60/90 beträgt die Steifigkeit 255 MPa. Erhöht man das Mischungsverhältnis auf 1:2,5 so beträgt die Steifigkeit 1377 MPa und ist somit 5,4-mal so groß. Betrachtet man nun das reine Bitumen bei -12 °C und erhöht den Füllergehalt auf 1:2,5 so ist die Steifigkeit ca. 8,8-mal so groß. Der Einfluss des Füllergehalts auf die Steifigkeit ist bei höheren Temperaturen größer als bei niedrigen. In der Tabelle 4 und in Abbildung 9 sieht man, dass sich die Steifigkeit auch mit der Temperatur ändert. Bei reinem Bitumen und -12 °C beträgt die Steifigkeit 70 MPa. Reduziert man die Temperatur von -12 °C auf -24 °C so beträgt die Steifigkeit 428 MPa und ist damit ca. 6-mal höher. Bei einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 ist die Steigerung der Steifigkeit ca. 4,6-mal so groß, wenn man die Temperatur von -12 °C auf -24 °C absenkt.

**Tabelle 5: Änderung der Steifigkeit in Abhängigkeit vom Füllergehalt für B50/70**

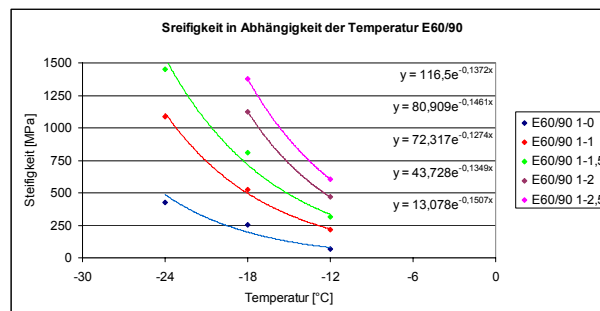
| Steifigkeit B50/70 nach 60 s |        |        |        | Steifigkeit B50/70 nach 60 s<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|------------------------------|--------|--------|--------|----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                           | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                       | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                          | 539    | 256    | 109    | 1:0                                                      | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                          | 1314   | 700    | 298    | 1:1                                                      | 244%   | 273%   | 273%   |
| 1:1,5                        | 1809   | 1035   | 458    | 1:1,5                                                    | 336%   | 404%   | 420%   |
| 1:2                          |        | 1515   | 659    | 1:2                                                      |        | 592%   | 605%   |
| 1:2,5                        |        | 1891   | 873    | 1:2,5                                                    |        | 739%   | 801%   |

Die Werte in Tabelle 5 beziehen sich auf die Bitumensorte B50/70 und sind bei allen Mischungsverhältnissen und Temperaturen größer als bei der Bitumensorte E60/90. Bei -18 °C und reinem Bitumen beträgt die Steifigkeit 256 MPa. Beim größten Mischungsverhältnis und gleicher Temperatur weist die Steigerung der Steifigkeit den Faktor 7,4 auf. Ebenso wie bei der Bitumensorte E60/90 ist der Einfluss des Füllers bei höheren Temperaturen größer.

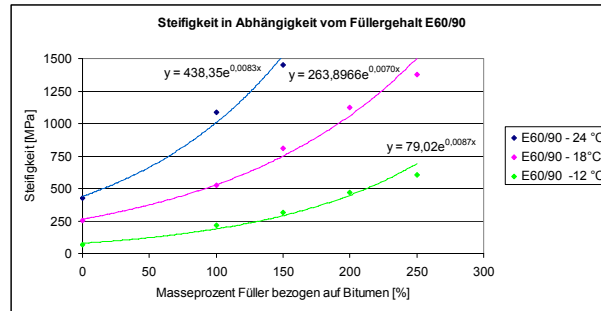
**Tabelle 6: Änderung der Steifigkeit in Abhängigkeit vom Füllergehalt für B70/100**

| Steifigkeit B70/100 nach 60 s |        |        |        | Steifigkeit B70/100 nach 60 s<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                            | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                        | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                           | 534    | 178    | 94     | 1:0                                                       | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:0,5                         | 885    | 398    | 177    | 1:0,5                                                     | 166%   | 224%   | 188%   |
| 1:1                           | 1310   | 664    | 211    | 1:1                                                       | 245%   | 373%   | 224%   |
| 1:1,5                         | 1874   | 982    | 425    | 1:1,5                                                     | 351%   | 552%   | 452%   |
| 1:2                           |        | 1410   | 459    | 1:2                                                       |        | 792%   | 488%   |
| 1:2,5                         |        | 1688   | 518    | 1:2,5                                                     |        | 948%   | 551%   |

Die Werte in der Tabelle 6 beziehen sich auf die Bitumensorte B70/100. Die Änderung der Steifigkeit in Abhängigkeit des Mischungsverhältnis und der Temperatur bei der Bitumensorte B70/100 ist gleich wie bei den anderen zwei Bitumensorten. Die Steifigkeit bei -18 °C und reinem Bitumen beträgt 178 MPa. Beim maximalen Mischungsverhältnis von 1:2,5 beträgt die Steifigkeit 1688 MPa und ist somit ca. 9,5-mal so groß. Die Steifigkeitswerte wurden bei -12 °C, -18 °C und -24 °C bei reinem Bitumen und unterschiedliche Bitumen-Füller Mischungen ermittelt. Unter realen Umständen können sowohl die Temperatur als auch das Mischungsverhältnis unterschiedliche Werte annehmen. Um eine Aussage machen zu können wie sich das Bitumen bei Zwischenwerten verhält, stellt man die Abhängigkeit der Steifigkeit von der Temperatur und dem Mischungsverhältnis in einem Diagramm dar. In der ersten Variante in Abbildung 10 wird jedes Mischungsverhältnis über den Prüfungs-temperaturen dargestellt. In der zweiten Variante in Abbildung 11 werden die Werte für eine Temperatur über den Massenverhältnissen (Massenprozent Füller bezogen auf reines Bitumen) aufgetragen. Aufgrund dieser Diagramme können auch Zwischenwerte interpoliert werden. Exemplarisch werden hier die Diagramme für die Bitumensorte E60/90 dargestellt. Die Diagramme der restlichen Bitumensorten sind in Anhang A dargestellt.

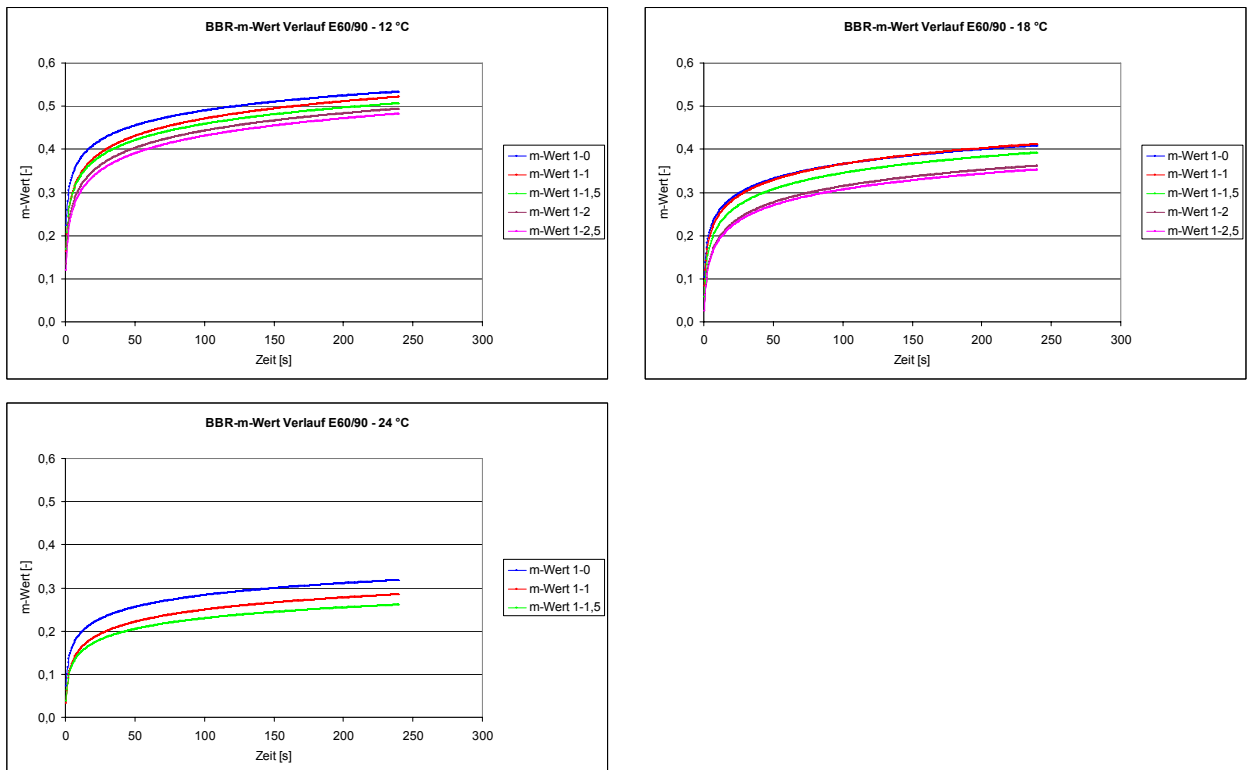


**Abbildung 10: Verlauf der Steifigkeit in Abhängigkeit der Temperatur E60/90**

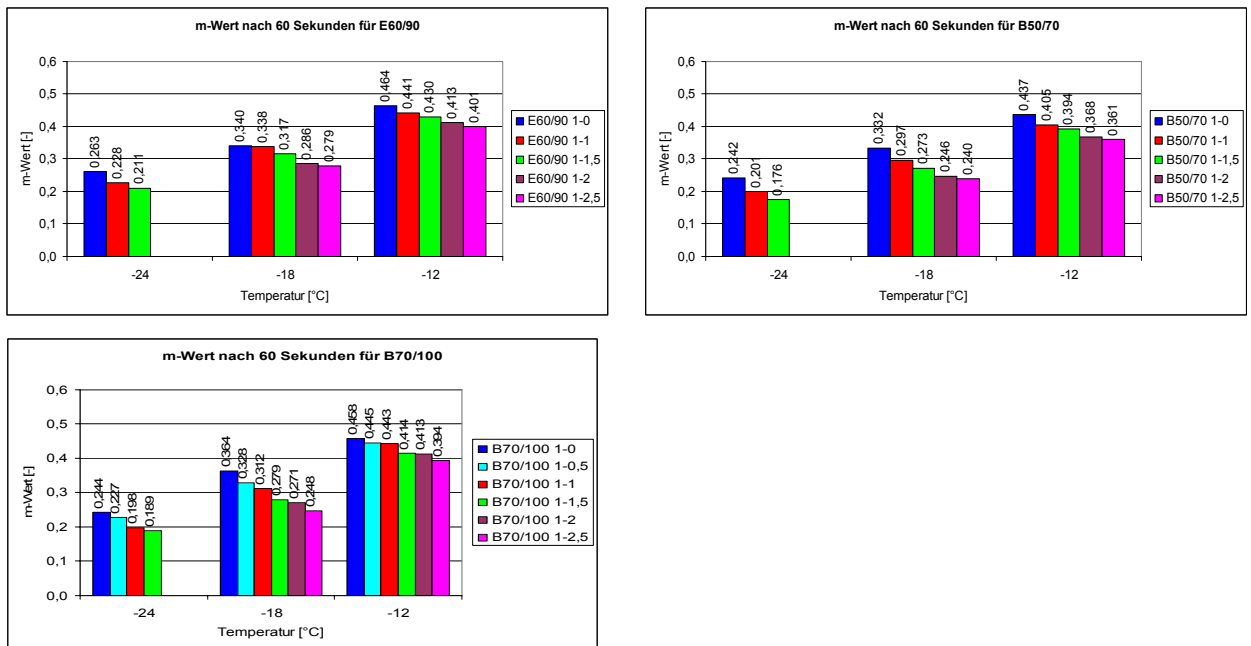


**Abbildung 11: Verlauf der Steifigkeit in Abhängigkeit des Füllergehaltes E60/90**

Als zweiter Parameter wird beim BBR-Versuch der m-Wert bestimmt. Je höher der m-Wert ist, desto besser ist das Tieftemperaturverhalten von Bitumen. Der m-Verlauf für die Bitumensorte E60/90 ist in Abbildung 12 dargestellt.



**Abbildung 12: Verlauf des m-Wertes E60/90 [1:0], [1:1], [1:1,5], [1:2], [1:2,5] bei -12 °C, -18 °C und -24 °C**



**Abbildung 13: m-Wert nach 60 Sekunden E60/90, B50/70, B70/100 [1:0], [1:05], [1:1], [1:1,5], [1:2], [1:2,5] bei -12 °C, -18 °C und -24 °C**

Abbildung 12 zeigt exemplarisch den Verlauf des m-Wertes für das Bindemittel E60/90 und zugehöriger Mastix bei den Prüftemperaturen -12 °C, -18 °C und -24 °C. In Abbildung 13 sieht man die m-Werte nach 60 Sekunden dargestellt für die unterschiedlichen Mischungsverhältnisse und Temperaturbereiche. Aus Abbildung 13 erkennt man, dass der m-Wert bei allen Bitumensorten mit zunehmender Temperatur größer wird. Im Gegensatz dazu wird der m-Wert mit zunehmendem Füllergehalt kleiner. Genau wie bei der Steifigkeit werden für die einzelnen Bitumensorten die Versuchsdaten herangezogen und in den Tabellen 7 bis 9 genauer betrachtet.

**Tabelle 7: Änderung des m-Wertes in Abhängigkeit vom Füllergehalt für E60/90**

| m-Wert E60/90 nach 60 s |        |        |        | m-Wert E60/90 nach 60 s<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|-------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                      | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                  | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                     | 0,263  | 0,34   | 0,464  | 1:0                                                 | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                     | 0,228  | 0,338  | 0,441  | 1:1                                                 | 87%    | 99%    | 95%    |
| 1:1,5                   | 0,211  | 0,317  | 0,43   | 1:1,5                                               | 80%    | 93%    | 93%    |
| 1:2                     |        | 0,286  | 0,413  | 1:2                                                 |        | 84%    | 89%    |
| 1:2,5                   |        | 0,279  | 0,401  | 1:2,5                                               |        | 82%    | 86%    |

Bei -18 °C und reinem Bitumen E60/90 beträgt der m-Wert 0,34 und sinkt bei einem Mischungsverhältnis von 1:2,5 auf den Wert 0,279. Der m-Wert ist somit um ca. 20% geringer als bei reinem Bitumen. Bei -12 °C beträgt die Abnahme des m-Wertes bei einem Mischungsverhältnis von 1:2,5 gegenüber reinem Bitumen laut Tabelle 7 genau 14%. Bei reinem Bitumen und -24 °C beträgt der m-Wert 0,263. Er-

höht man die Temperatur von -24 °C auf -12 °C, so steigt der m-Wert für alle Mischungsverhältnisse um den Faktor 2.

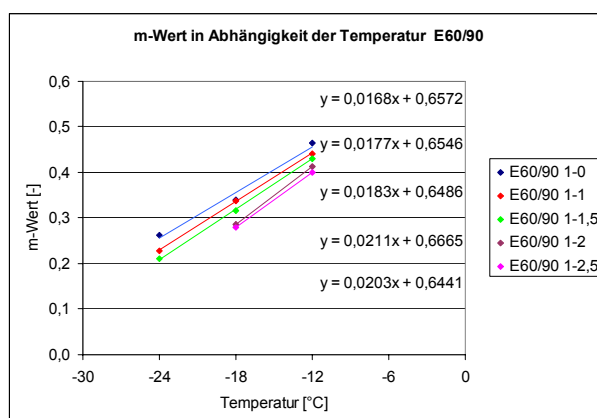
**Tabelle 8: Änderung des m-Wertes in Abhängigkeit vom Füllergehalt für B50/70**

| m-Wert B50/70 nach 60 s |        |        |        | m-Wert B50/70 nach 60 s<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|-------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                      | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                  | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                     | 0,242  | 0,332  | 0,437  | 1:0                                                 | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                     | 0,201  | 0,297  | 0,405  | 1:1                                                 | 83%    | 89%    | 93%    |
| 1:1,5                   | 0,176  | 0,273  | 0,394  | 1:1,5                                               | 73%    | 82%    | 90%    |
| 1:2                     |        | 0,246  | 0,368  | 1:2                                                 |        | 74%    | 84%    |
| 1:2,5                   |        | 0,240  | 0,361  | 1:2,5                                               |        | 72%    | 83%    |

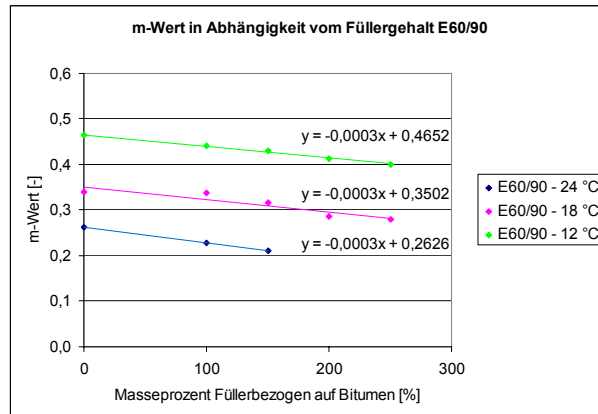
**Tabelle 9: Änderung des m-Wertes in Abhängigkeit vom Füllergehalt für B70/100**

| m-Wert B70/100 nach 60 s |        |        |        | Steifigkeit B70/100 nach 60 s<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|--------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                       | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                        | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                      | 0,244  | 0,364  | 0,458  | 1:0                                                       | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:0,5                    | 0,227  | 0,328  | 0,445  | 1:0,5                                                     | 93%    | 90%    | 97%    |
| 1:1                      | 0,198  | 0,312  | 0,443  | 1:1                                                       | 81%    | 86%    | 97%    |
| 1:1,5                    | 0,189  | 0,279  | 0,414  | 1:1,5                                                     | 77%    | 77%    | 90%    |
| 1:2                      |        | 0,271  | 0,413  | 1:2                                                       |        | 74%    | 90%    |
| 1:2,5                    |        | 0,248  | 0,394  | 1:2,5                                                     |        | 68%    | 86%    |

Sowohl bei der Bitumensorte B50/70 als auch bei der Bitumensorte B70/100 nimmt der m-Wert bei -12 °C und -18 °C von reinem Bitumen bis zum maximalen Mischungsverhältnis von 1:2,5 um ca. 25% ab. Bei -24 °C reduziert sich der m-Wert bei einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 um ca. 30% des Anfangswertes von reinem Bitumen. Erhöht man die Temperatur von -24 °C auf -12 °C, so steigt der m-Wert für alle Mischungsverhältnisse ungefähr um den Faktor 2. Genau wie bei der Steifigkeit wird nun der m-Wert in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Mischungsverhältnis dargestellt (siehe Abbildung 14 und 15).



**Abbildung 14: Verlauf des m-Wertes in Abhängigkeit der Temperatur für E60/90**



**Abbildung 15: Verlauf des m-Wertes in Abhängigkeit des Füllergehaltes für E60/90**

## 3.2 Grundlagen der Rheologie

Rheologie leitet sich von dem griechischen Wort rheos ab, was soviel wie fließen bedeutet. Die Rheologie ist als Wissenschaft vom Fließen von Festkörper, Flüssigkeiten und Gasen zu verstehen. Als Fließen bezeichnet man die Deformation eines Materials unter der Einwirkung äußerer Kräfte. Die Rheologie unterscheidet zwischen drei Grundformen des physikalischen Stoffverhaltens [Scharr].

### Elastizität

Belastet man einen Körper durch eine äußere Kraft, so wird sich dieser verformen. Ein Körper besitzt Elastizität, wenn diese Verformung nach Entlastung sofort und vollständig zurückgeht. Für ideal-elastische Körper (Körper verhältet sich zu 100 % elastisch) gilt das Hookesche Gesetz (Gleichung 4). Es besteht ein proportionaler Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung. Die Steigung der Geraden entspricht dem Elastizitätsmodul. Der E-Modul kann als Materialparameter verwendet werden. Mit Gleichung 5 kann die Spannung pro Flächeneinheit berechnet werden.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{E-Modul [N/mm}^2\text{]} \quad \text{Gleichung 4}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Spannung [N/mm}^2\text{]} \quad \text{Gleichung 5}$$

mit

F..... Belastung [N]

A.... Querschnittsfläche [ mm<sup>2</sup> ]

ε..... Längsdehnung [-]

Das elastische Stoffverhalten kann mit einer Spiralfeder beschrieben werden (Abbildung 16).

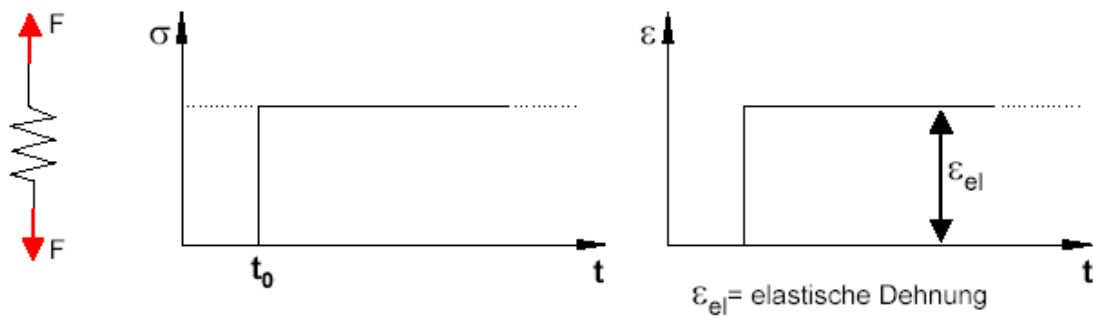


Abbildung 16: Hooke'sche Feder, Kraft-Verformungskurven, [Scharr]

## Plastizität

Plastizität liegt vor, wenn ein Körper belastet durch eine äußere Kraft sich spontan verformt und diese Verformungen nach Entlastung zurückbleiben. Plastisches Verformungsverhalten wird in der Rheologie mit Reibungselementen beschrieben. Ein Reibungselement besteht aus einem masselosen Körper der auf einer ebenen Unterlage ruht und durch eine parallel zur Unterlage gerichtete Kraft belastet wird. Der Körper kommt erst dann in Bewegung, wenn die äußere Kraft die Haftreibung überwindet. Die erzeugte Spannung berechnet sich nach Gleichung 6.

$$\tau = \frac{F}{b \cdot l} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Gleichung 6

mit

$F$ .....Kraft [N]

$b \cdot l$  ....Reibfläche [mm<sup>2</sup>]

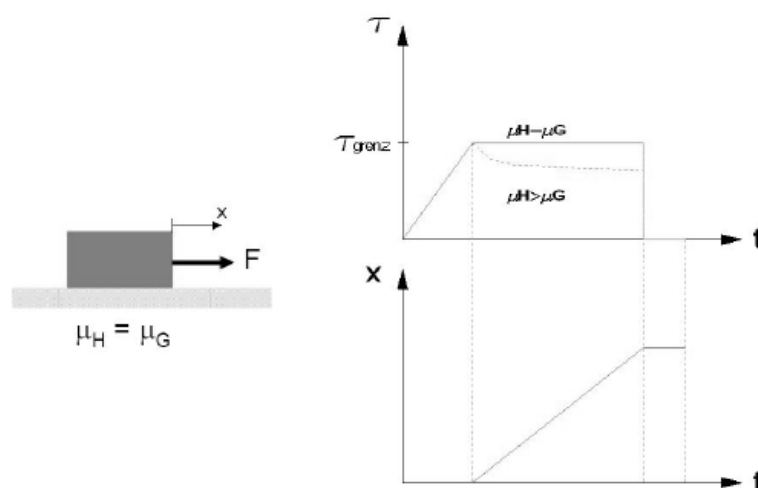


Abbildung 17: St. Venant'sches Reibungselement, Kraft-Verformungskurven [Lanschützer (2007)]

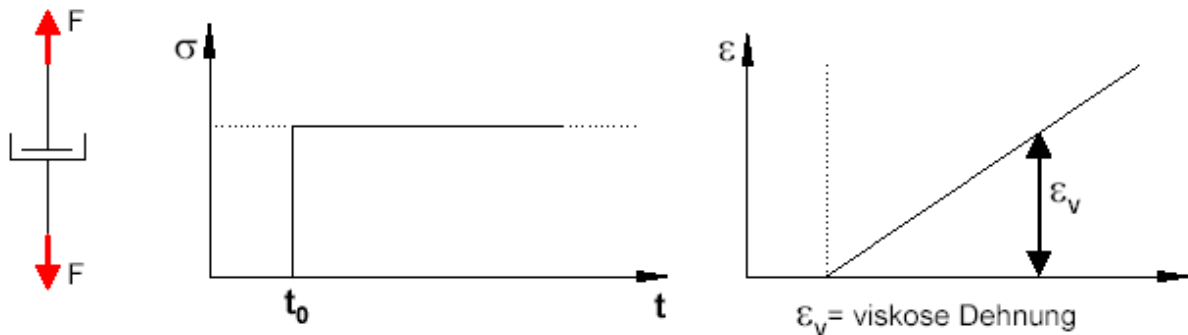
## Viskosität

Ein Körper zeigt viskose Eigenschaften, wenn er durch eine äußere Kraft ins Fließen gerät. Bereits nach Lastaufbringung tritt eine mit der Zeit zunehmende bleibende Verformung auf. Der viskose Körper wird durch ein Dämpfungsglied (Abbildung 18) beschrieben. Das Dämpfungselement besteht aus einem unendlich langen Zylinder welcher mit einer rein viskosen Flüssigkeit gefüllt ist und einem Kolben. Die Dämpfungskonstante im Zylinder ist abhängig von der Viskosität der Flüssigkeit. Bringt man eine konstante Last auf den Kolben so beginnt die Flüssigkeit zu kriechen. Bei einer plötzlichen Belastung verhält sich der Dämpfer starr. Die Spannung ist somit abhängig von der Viskosität der Flüssigkeit und der Belastungsgeschwindigkeit (Gleichung 7).

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad [\text{N/mm}^2] \quad \text{Gleichung 7}$$

mit

$\eta$ ..... Viskosität [ $\text{N}\cdot\text{s}/\text{mm}^2$ ]

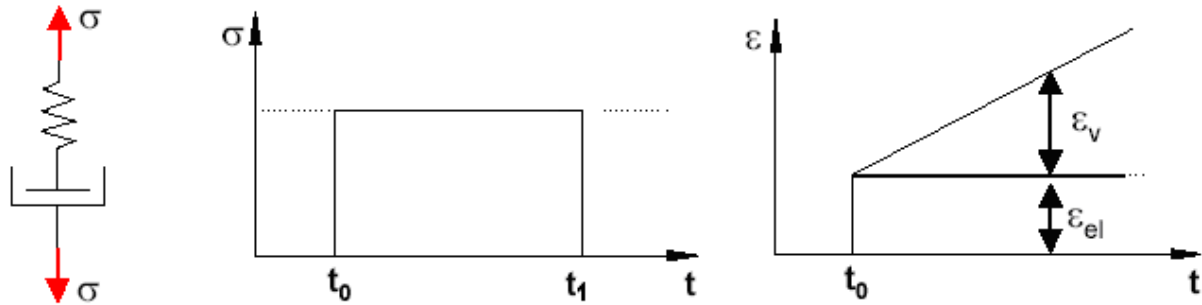


**Abbildung 18: Newton-Körper, Kraft-Verformungskurven, [Scharr]**

Wie stark sich ein Körper elastisch oder viskos verhält hängt auch noch von der Temperatur, der Belastungsgeschwindigkeit, der Belastungsart, der Belastungsdauer und der Belastungshöhe ab.

### 3.3 Das Maxwell-Modell

Reale Stoffe, die gleichzeitig elastische und viskose Eigenschaften aufweisen, können mit Hilfe des Maxwell-Modells (Abbildung 19) beschrieben werden. Das Maxwell-Modell besteht aus einer Feder und einem Dämpfer welche in Serie geschaltet sind.



**Abbildung 19: Maxwell'sches Modell, Kriechkurve, [Scharr]**

Belastet man dieses System durch eine äußere Kraft, so wirkt sowohl auf dem Dämpfer als auch auf der Feder die gleiche Spannung. Es gilt somit  $\varepsilon = \varepsilon^e = \varepsilon^v$ . Die Gesamtverzerrung  $\varepsilon$  zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  setzt sich aus dem elastischen Anteil  $\varepsilon^e$  und dem viskosen Anteil  $\varepsilon^v$  zusammen.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon^e + \varepsilon^v \quad \text{Gleichung 8}$$

Die konstitutive Gleichung zur Ermittlung des elastischen Anteils von  $\varepsilon$  lautet

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E} \quad \text{Gleichung 9}$$

Die konstitutive Gleichung zur Ermittlung des viskosen Anteils von  $\varepsilon$  lautet

$$\dot{\varepsilon}^v = \frac{\sigma}{\eta} \quad \text{Gleichung 10}$$

Der Werkstoffparameter  $\eta$  wird als Zähigkeit bezeichnet und hat die Einheit [Pa s]. Da in Gleichung 10 eine Dehnungsgeschwindigkeit aufscheint, muss die Gleichung 8 nach der Zeit abgeleitet werden:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^v \quad \text{Gleichung 11}$$

Leitet man nun Gleichung 9 nach der Zeit ab und setzt diese und Gleichung 10 in Gleichung 11 ein, wobei  $E$  und  $\eta$  als Konstante angesehen werden so erhält man

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad \text{Gleichung 12}$$

Gleichung 12 ist die Differentialgleichung mit der das viskoelastische Verhalten von Stoffen mit dem Maxwell-Modell beschrieben werden kann. Ermittelt man die Kriechkurve in einem bestimmten Zeitintervall bei konstanter Spannung, so ergibt sich wegen  $\sigma = \sigma^{(0)} = \text{konstant}$ , das  $\dot{\sigma}$  gleich null ist. Unter der Voraussetzung einer konstanten Zähigkeit ergibt die Integration der Gleichung 12 folgenden Ausdruck.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma^{(0)}}{E} \cdot t + c \quad \text{Gleichung 13}$$

Mit der Anfangsbedingung

$$\varepsilon(t=0) = \frac{\sigma^{(0)}}{E} = \varepsilon^e \quad \text{Gleichung 14}$$

ergibt sich die Integrationskonstante zu  $c = \sigma^{(0)}/E$ . Für das Zeitintervall  $0 \leq t < t_1$  gilt somit

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma^{(0)}}{E} + \frac{\sigma^{(0)}}{\eta} \cdot t \quad \text{Gleichung 15}$$

Durch die Gleichung 15 wird die Kriechkurve des Maxwell-Modells beschrieben. Der erste Teil der Gleichung 15 beschreibt den zeitunabhängigen elastischen Anteil der Dehnung. Der zweite Teil der Gleichung 15 beschreibt die zeitabhängige viskose Dehnung. Will man mit dem Maxwell'schen Modell die Relaxationskurve bestimmen geht man von einer konstanten Dehnung aus. Da  $\dot{\varepsilon}$  gleich null ist, erhält man aus Gleichung 12:

$$\dot{\sigma} + \frac{E}{\eta} \cdot \sigma = 0 \quad \text{Gleichung 16}$$

Mit  $E$ =konstant und  $\eta$ =konstant ergibt sich die Lösung der Differentialgleichung zu

$$\sigma(t) = c \cdot e^{\left(-\frac{E}{\eta} \cdot t\right)} \quad \text{Gleichung 17}$$

Die Integrationskonstante  $c = E \cdot \varepsilon^{(0)}$  erhält man aus der Anfangsbedingung  $\sigma(t=0) = \sigma^{(0)} = E \cdot \varepsilon^{(0)}$

Die Relaxationskurve wird durch folgende Gleichung dargestellt

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon^{(0)} \cdot e^{\left(-\frac{E}{\eta} \cdot t\right)} \quad \text{Gleichung 18}$$

Die Spannung strebt beim Maxwell'schen Modell mit zunehmender Zeit asymptotisch gegen Null. Nicht alle Stoffe zeigen in der Realität ein solches Relaxationsverhalten. Dieses Verhalten kann daher als Schwäche des Maxwell'schen Modells angesehen werden. Bei Spannstahl zum Beispiel strebt die Spannung mit wachsender Zeit gegen einen von Null verschiedenen Wert. Weitere Schwächen des Maxwell'schen Modells sind die konstante Kriechgeschwindigkeit während der Belastung und die konstante Verzerrung [Mang/Hofstetter (2000)].

### 3.3.1 Auswertungsmethodik des Maxwell-Modell

Beim Biegebalkenversuch erfolgt die Belastung der Probe durch einen luftgelagerten Stempel mit einer Last von 980 mN. Mit Hilfe der Biegebalkentheorie kann die Spannung in der Balkenmitte mit folgender Formel berechnet werden.

$$\sigma = \frac{M}{J} \cdot \frac{h}{2} = \frac{3 \cdot P \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [\text{MPa}] \quad \text{Gleichung 19}$$

mit

P...Auflast [N]

l....Abstand zwischen den Auflagern [m]

J...Trägheitsmoment [m<sup>4</sup>]

b...Balkenbreite [m]

h...Balkenhöhe [m]

Der elastische zeitunabhängige Teil der Verzerrung wird bei 0,5 Sekunden festgelegt. Formt man nun Gleichung 9 um und setzt für die Verzerrung den Wert bei 0,5 Sekunden ein so erhält man als ersten Parameter den E-Modul, welcher die Steifigkeit der Feder beschreibt. Je steifer die Feder ist desto größer ist der E-Modul und desto kleiner sind die elastischen Verzerrungen.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon^{(0,5)}} [\text{N/mm}^2] \quad \text{Gleichung 20}$$

Der Balken wird nach einer Belastungszeit von 240 Sekunden wieder entlastet. Zieht man nun von den Gesamtverzerrungen zum Zeitpunkt t=240 Sekunden den elastischen Verzerrungsanteil ab, bleibt nach dem Maxwell'schen Modell nur noch der viskose Verzerrungsanteil übrig.

$$\varepsilon_{\text{viskos}} = \varepsilon^{(240)} - \varepsilon^{(0,5)} \quad \text{Gleichung 21}$$

Der zweite Parameter des Maxwell'schen Modells ist die Zähigkeit  $\eta$  und beschreibt den zeitabhängigen viskosen Teil der Verzerrungen. Die Viskosität wird in diesem Modell durch einen Dämpfer dargestellt.

$$\varepsilon_{\text{viskos}} = \frac{\sigma \cdot t}{\eta} = \varepsilon^{(240)} - \frac{\sigma}{E} \quad \text{Gleichung 22}$$

Durch Umformen der Gleichung 22 erhält man die Viskosität  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\sigma \cdot t}{(\varepsilon^{(240)} - \varepsilon^{(0,5)})} [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad \text{Gleichung 23}$$

Der Abbau der Spannung nach der Entlastung wird mit der Gleichung 17 beschrieben, die man auch in dieser Art darstellen kann.

$$\sigma_{(t)} = \sigma_{(0)} \cdot e^{\left(-\frac{t}{t_R}\right)} \quad \text{Gleichung 24}$$

Die Geschwindigkeit des Spannungsabbaus ist von der Größe der Relaxationszeit abhängig. Die Relaxationszeit wird durch den Quotienten aus Zugviskosität und E-Modul ausgedrückt:

$$t_R = \frac{\eta}{E} [\text{s}] \quad \text{Gleichung 25}$$

Zieht man von der Ausgangsspannung jenen Teil ab der durch Gleichung 24 beschrieben wird, erhält man Gleichung 26.

$$\sigma_{(t)} = \sigma_{(0)} \cdot \left[ 1 - e^{\left( -\frac{t}{t_R} \right)} \right]$$

Gleichung 26

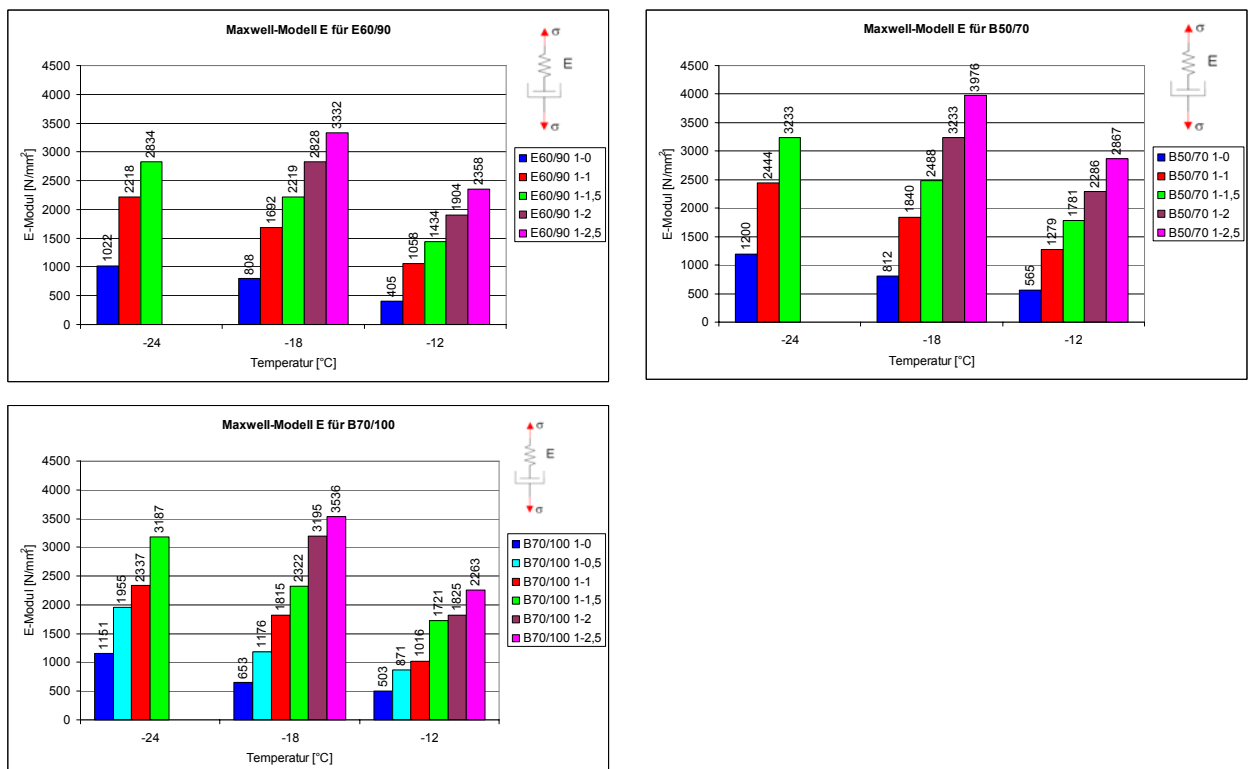
Die Relaxationszeit entspricht der Zeit, in der die Zugspannung in einem auf konstante Länge gedehnten Maxwell-Modell auf 36,8 % ihres Anfangswertes abfällt. Den Wert von 36,8 % erhält man, wenn man in der Gleichung 24 sowohl für die Zeit t und die Relaxationszeit  $t_R$  den gleichen Wert einsetzt [Arand et al. (1988)].

$$\sigma_{(t)} = \sigma_{(0)} \cdot 0,368$$

Gleichung 26

### 3.3.2 Auswertung mit dem Maxwell-Modell

Bei den Versuchen wurden drei Bitumensorten bei unterschiedlichen Temperaturen und Mischungsverhältnissen geprüft. Bei Proben aus reinem Bitumen wurden zwei Probekörper hergestellt. Bei Mastixproben wurden für jedes Mischungsverhältnis drei Probekörper geprüft. Für die Auswertung werden die Versuchsergebnisse gemittelt. Die gemittelten Versuchsergebnisse werden nun für die Bitumensorten E60/90, B50/70 und B70/100 mit zugehöriger Mastix bei den Temperaturen -12 °C, -18 °C und -24 °C dargestellt (Abbildung 20) und kommentiert.



**Abbildung 20: E-Modul aus dem Maxwell-Modell: E60/90, B50/70, B70/100**

Zur Interpretation des E-Moduls werden die Werte nach 0,5 Sekunden Belastung herangezogen. Der E-Modul entspricht im Maxwell-Modell der Federsteifigkeit. In Abbildung 20 erfolgt die Darstellung der Federsteifigkeit für reines Bitumen und zuge-

höriger Mastix bei den Prüftemperaturen -24 °C, -18 °C und -12 °C. Die Diagramme in Abbildung 20 zeigen, unabhängig vom getesteten Bindemittel, die Abnahme der Federsteifigkeit mit zunehmender Temperatur und die Zunahme der Federsteifigkeit mit steigendem Füllergehalt. Die Versuchsdaten der einzelnen Bitumensorten werden in den folgenden Tabellen 10 bis 12 genauer betrachtet.

**Tabelle 10: Änderung der Federsteifigkeit E in Abhängigkeit vom Füllergehalt: E60/90**

| E-Modul nach Maxwell-Modell E60/90 |        |        |        | E-Modul nach Maxwell-Modell E60/90<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|------------------------------------|--------|--------|--------|----------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                                 | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                             | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                                | 1022   | 808    | 405    | 1:0                                                            | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                                | 2218   | 1692   | 1058   | 1:1                                                            | 217%   | 209%   | 261%   |
| 1:1,5                              | 2834   | 2219   | 1434   | 1:1,5                                                          | 277%   | 275%   | 354%   |
| 1:2                                |        | 2828   | 1904   | 1:2                                                            |        | 350%   | 470%   |
| 1:2,5                              |        | 3332   | 2358   | 1:2,5                                                          |        | 413%   | 582%   |

Im folgenden Abschnitt die Werte aus Tabelle 10 verwendet. Beim Maxwell-Modell ist unabhängig von der Bitumensorte die Spannung während der Belastungsphase gleich groß. Laut Gleichung 9 ist die Federsteifigkeit E somit für die Größe der sofortigen Dehnung zum Belastungsbeginn  $t=0$  verantwortlich. Je höher die Federsteifigkeit E ist, desto kleiner wird die Anfangsverformung. Bei reinem Bitumen und -24 °C ist die Federsteifigkeit 1022 N/mm<sup>2</sup> groß. Erhöht man bei gleichem Mischungsverhältnis die Temperatur auf -18 °C, so ist die Federsteifigkeit nur noch 808 N/mm<sup>2</sup> groß. Bei einer Prüftemperatur von -12 °C und reinem Bitumen beträgt die Federsteifigkeit 405 N/mm<sup>2</sup> und ist somit um den Faktor 2,5 geringer als bei -24 °C. Wiederholt man diese Vorgangsweise bei einem Mischungsverhältnis von 1:1,5, dann sinkt die Federsteifigkeit von 2834 N/mm<sup>2</sup> auf 1434 N/mm<sup>2</sup>. Die Federsteifigkeit sinkt somit um den Faktor 2. Mit zunehmender Temperatur sinkt also die Federsteifigkeit. Eine kleine Federsteifigkeit ergibt nach Gleichung 9 große Anfangsverformungen. Bei -24 °C und einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 beträgt die Federsteifigkeit 2834 N/mm<sup>2</sup> und ist somit um 177% größer als bei reinem Bitumen. Bei gleichem Mischungsverhältnis und -18 °C beträgt die Steigerung 175%. Bei -12 °C und einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 beträgt die Steigerung der Federsteifigkeit bezogen auf reinem Bitumen 254%. Bei -12 °C und -18 °C ist die Steigerung der Steifigkeit unabhängig vom Füllergehalt größer als bei -24 °C. Durch die Zugabe von Füller steigt die Federsteifigkeit wodurch kleinere Anfangsverformungen zu erwarten sind.

**Tabelle 11: Änderung der Federsteifigkeit E in Abhängigkeit vom Füllergehalt B50/70**

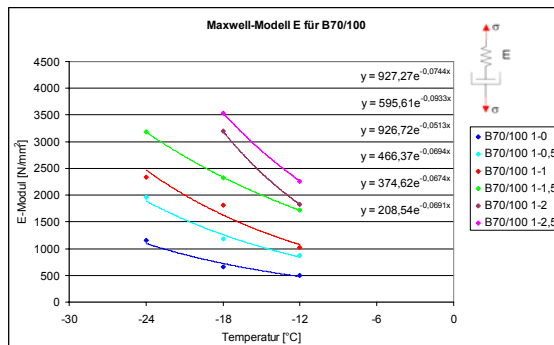
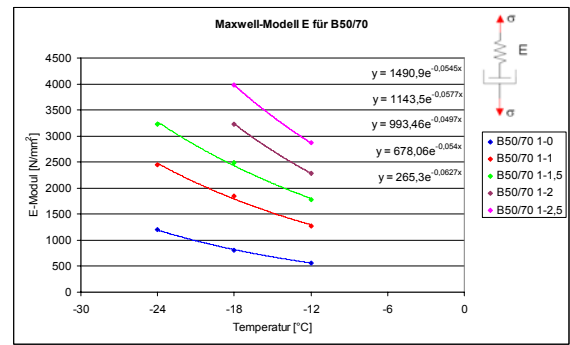
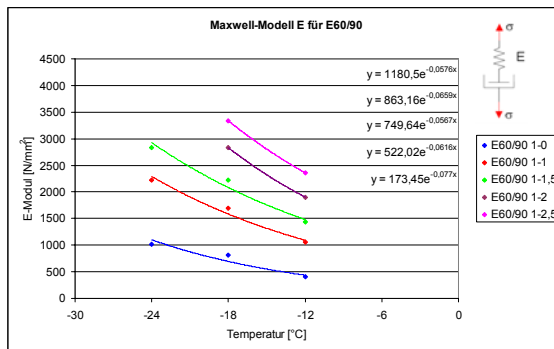
| E-Modul nach Maxwell-Modell B50/70 |        |        |        | E-Modul nach Maxwell-Modell B50/70<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|------------------------------------|--------|--------|--------|----------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                                 | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                             | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                                | 1200   | 812    | 565    | 1:0                                                            | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                                | 2444   | 1840   | 1279   | 1:1                                                            | 204%   | 226%   | 226%   |
| 1:1,5                              | 3233   | 2488   | 1781   | 1:1,5                                                          | 269%   | 306%   | 315%   |
| 1:2                                |        | 3233   | 2286   | 1:2                                                            |        | 398%   | 404%   |
| 1:2,5                              |        | 3976   | 2867   | 1:2,5                                                          |        | 489%   | 507%   |

Im folgenden Abschnitt die Werte aus Tabelle 11 verwendet. Bei -24 °C und reinem Bitumen beträgt die Federsteifigkeit 1200 N/mm<sup>2</sup>. Erhöht man die Temperatur auf -12 °C dann sinkt die Federsteifigkeit um ca. 50%. Durch Zugabe von Füller steigt auch bei dieser Bitumensorte die Federsteifigkeit. Bei -12 °C und -18 °C ist die Steigerung der Steifigkeit unabhängig vom Füllergehalt größer als bei -24 °C.

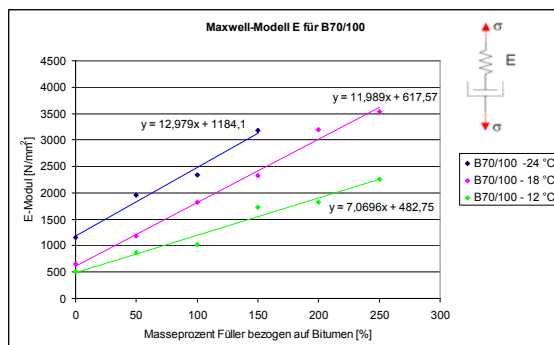
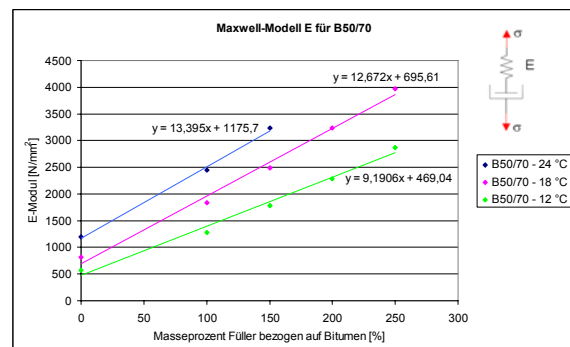
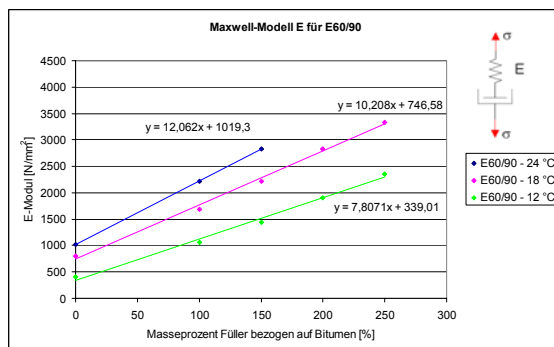
**Tabelle 12: Änderung der Federsteifigkeit E in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B70/100**

| E-Modul nach Maxwell-Modell<br>B70/100 |        |        |        | E-Modul nach Maxwell-Modell<br>B70/100 bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|----------------------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                                     | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                              | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                                    | 1151   | 653    | 503    | 1:0                                                             | 100    | 100%   | 100%   |
| 1:0,5                                  | 1955   | 1176   | 871    | 1:0,5                                                           | 170    | 180%   | 173%   |
| 1:1                                    | 2337   | 1815   | 1016   | 1:1                                                             | 203    | 278%   | 202%   |
| 1:1,5                                  | 3187   | 2322   | 1721   | 1:1,5                                                           | 277    | 356%   | 342%   |
| 1:2                                    |        | 3195   | 1825   | 1:2                                                             |        | 490%   | 363%   |
| 1:2,5                                  |        | 3536   | 2263   | 1:2,5                                                           |        | 542%   | 450%   |

Die Bitumensorte B70/100 zeigt laut Tabelle 12 bei Erhöhung der Temperatur das gleiche Verhalten wie die Bitumensorte B50/70. Bei reinem Bitumen sinkt die Federsteifigkeit um den Faktor 2,2 und bei einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 um den Faktor 1,8. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Federsteifigkeit wodurch größere Anfangsverformungen zu erwarten sind. Bei konstanter Temperatur und Zugabe von Füller steigen die Werte für die Federsteifigkeit auch hier an. Im nächsten Schritt werden die Federsteifigkeiten genauer betrachtet. Zu diesem Zweck werden diese in Abhängigkeit von Prüftemperatur und Füllergehalt dargestellt (Abbildung 21 und 22). Das Verhalten mit zunehmender Temperatur und Füllergehalt wird mit e-Funktionen bzw. linearen Funktionen beschrieben.



**Abbildung 21: Verlauf der Federsteifigkeit E in Abhängigkeit von der Temperatur: B50/70, B70/100, E60/90**



**Abbildung 22: Verlauf der Federsteifigkeit E in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B50/70, B70/100, E60/90**

Der zweite Parameter des Maxwell'schen Modells ist die Zähigkeit  $\eta$  und beschreibt den zeitabhängigen viskosen Teil der Verzerrungen. Die Viskosität wird in diesem Modell durch einen Dämpfer dargestellt. Die Kriechkurve des Maxwell-Modells wird durch die Gleichung 15 beschrieben. Je größer die Zähigkeit wird, desto kleiner wird der viskose Teil der Verzerrungen. Die Berechnung der Zähigkeit erfolgt durch Anwendung der Gleichung 23. Die Spannung und die Zeit sind in dieser Gleichung bei der Auswertung für alle Bitumensorten und zugehöriger Mastix gleich. Der viskose Teil der Verzerrung ändert sich in Abhängigkeit vom Füllergehalt und der Prüftemperatur. Die Abhängigkeit der Viskosität vom Füllergehalt und der Prüftemperatur wird in den nachfolgenden Tabellen 13 bis 15 genauer untersucht. In Abbildung 23 sind die Werte der Viskosität für die Bitumensorten E60/90, B50/70 und B70/100 dargestellt. Bei Betrachtung der Werte stellt man bei allen drei Bindemittelsorten einen Anstieg der Viskosität mit steigendem Füllergehalt fest. Erhöht man die Temperatur, so nimmt die Viskosität der Bitumensorten kontinuierlich ab.

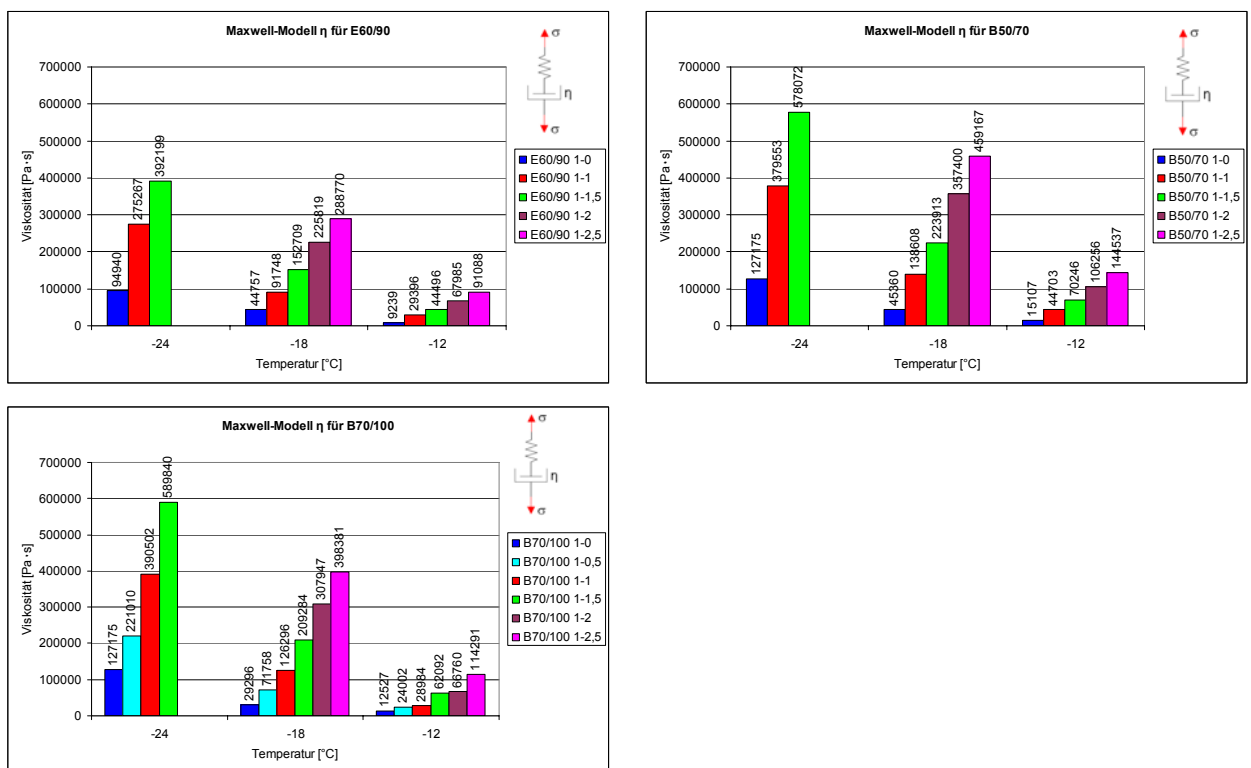


Abbildung 23: Viskosität  $\eta$  aus dem Maxwell-Modell: E60/90, B50/70, B70/100

**Tabelle 13: Änderung der Viskosität  $\eta$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt: E60/90**

| Viskosität nach Maxwell-Modell<br>E60/90 |        |        |        | Viskosität nach Maxwell-Modell<br>E60/90 bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|------------------------------------------|--------|--------|--------|-------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                                       | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                                | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                                      | 94940  | 44757  | 9239   | 1:0                                                               | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                                      | 275267 | 91748  | 29396  | 1:1                                                               | 290%   | 205%   | 318%   |
| 1:1,5                                    | 392199 | 152709 | 44496  | 1:1,5                                                             | 413%   | 341%   | 482%   |
| 1:2                                      |        | 225819 | 67985  | 1:2                                                               |        | 505%   | 736%   |
| 1:2,5                                    |        | 288770 | 91088  | 1:2,5                                                             |        | 645%   | 986%   |

In Tabelle 13 sind die Werte der Viskosität für die Bitumensorte E60/90 bei den unterschiedlichen Füllergehalten und Prüftemperaturen angegeben. Bei -24 °C und einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 beträgt der Wert der Viskosität 392199 Pa·s und ist somit ca. 4-mal so groß wie von reinem Bitumen. Derselbe Vergleich bei -12 °C und einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 zeigt, dass die Viskosität ca. 5-mal so groß ist wie von reinem Bitumen. Bei einem Mischungsverhältnis von 1:2,5 und -12 °C ist der Wert ca. 10-mal so groß wie von reinem Bitumen. Der Wert der Viskosität beträgt bei reinem Bitumen und -12 °C 9239 Pa·s. Verringert man die Temperatur von reinem Bitumen auf -24 °C, dann ist die Viskosität ca. 10-mal höher als bei -12 °C. Bei einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 bewirkt eine Reduzierung der Temperatur von -12 °C auf -24 °C einen Anstieg der Viskosität. Die Viskosität ist ca. 9-mal größer als zuvor. Je viskoser das Bitumen wird, desto weniger fließt es, es wird also dickflüssiger und der Anteil der viskosen Verzerrung wird kleiner.

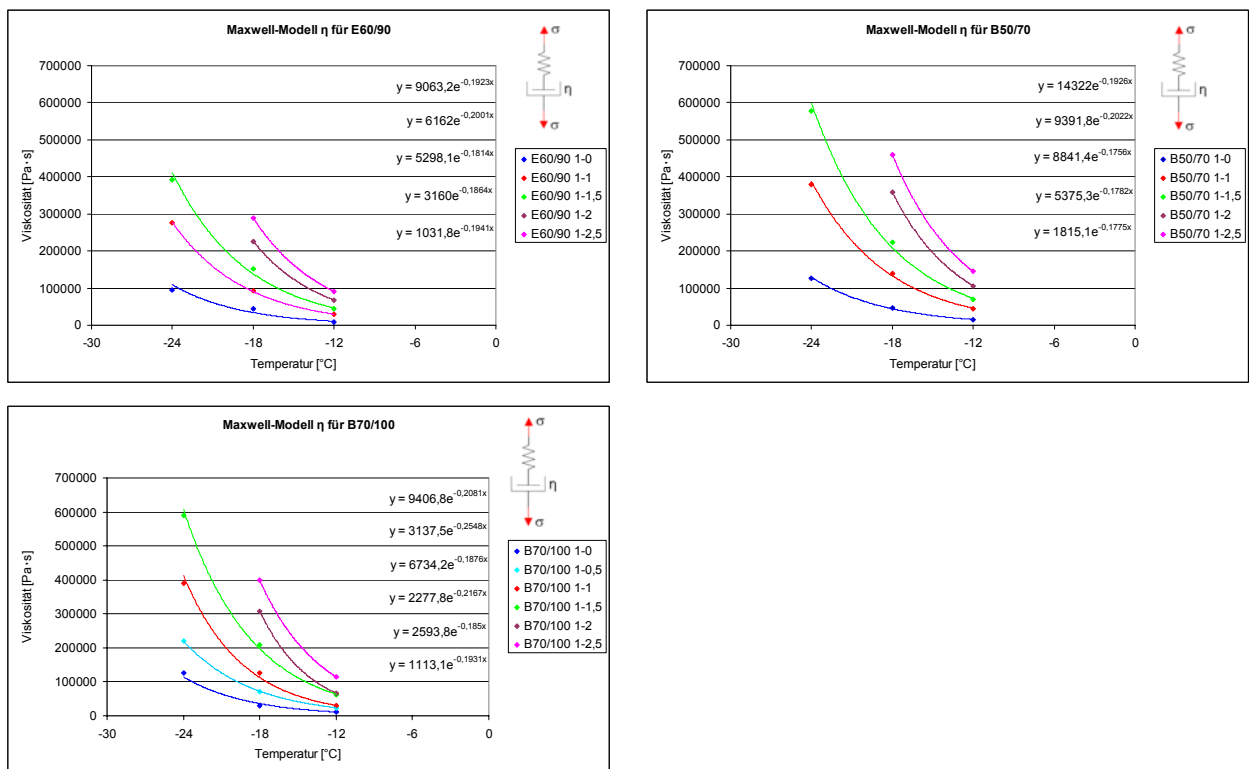
**Tabelle 14: Änderung der Viskosität  $\eta$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B50/70**

| Viskosität nach Maxwell-Modell<br>B50/70 |        |        |        | Viskosität nach Maxwell-Modell<br>B50/70 bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|------------------------------------------|--------|--------|--------|-------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                                       | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                                | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                                      | 127175 | 45360  | 15107  | 1:0                                                               | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                                      | 379553 | 138608 | 44703  | 1:1                                                               | 298%   | 306%   | 296%   |
| 1:1,5                                    | 578072 | 223913 | 70246  | 1:1,5                                                             | 455%   | 494%   | 465%   |
| 1:2                                      |        | 357400 | 106256 | 1:2                                                               |        | 788%   | 703%   |
| 1:2,5                                    |        | 459167 | 144537 | 1:2,5                                                             |        | 1012%  | 957%   |

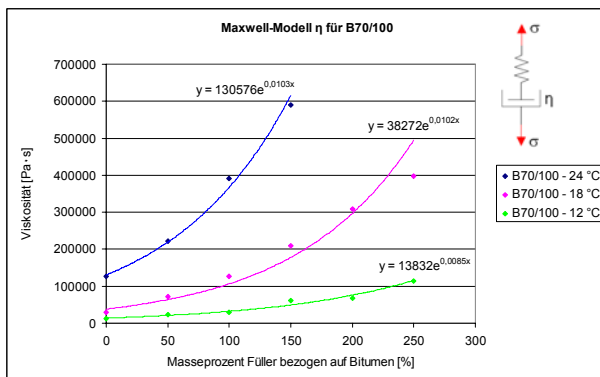
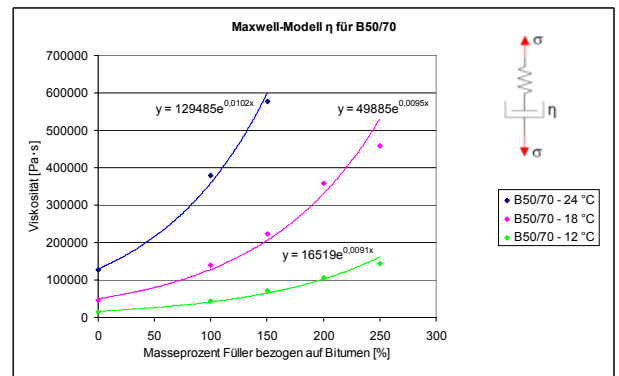
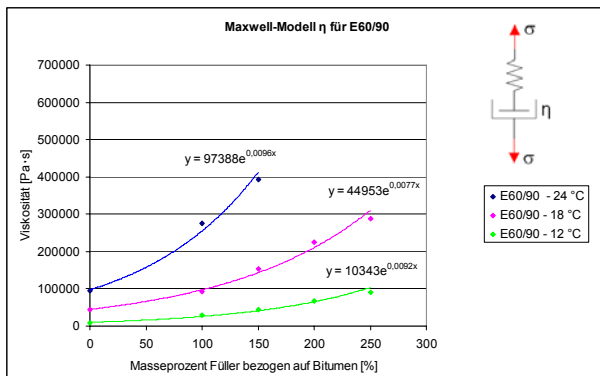
**Tabelle 15: Änderung der Viskosität  $\eta$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B70/100**

| Viskosität nach Maxwell-Modell<br>B70/100 |        |        |        | Viskosität nach Maxwell-Modell<br>B70/100 bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|-------------------------------------------|--------|--------|--------|--------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                                        | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                                 | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                                       | 127175 | 29296  | 12527  | 1:0                                                                | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:0,5                                     | 221010 | 71758  | 24002  | 1:0,5                                                              | 174%   | 245%   | 192%   |
| 1:1                                       | 390502 | 126296 | 28984  | 1:1                                                                | 307%   | 431%   | 231%   |
| 1:1,5                                     | 589840 | 209284 | 62092  | 1:1,5                                                              | 464%   | 714%   | 496%   |
| 1:2                                       |        | 307947 | 66760  | 1:2                                                                |        | 1051%  | 533%   |
| 1:2,5                                     |        | 398381 | 114291 | 1:2,5                                                              |        | 1360%  | 912%   |

Bei der Betrachtung der Werte in Tabelle 14 und 15 stellt man einen Anstieg der Viskosität mit zunehmendem Füllergehalt fest. Bei  $-24\text{ °C}$  und einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 ist die Viskosität ca. 4,5-mal größer als bei reinem Bitumen. Die Steigerung der Viskosität bei gleichen Bedingungen ist bei den Bitumensorten B50/70 und B70/100 nur geringfügig höher als bei der Bitumensorte E60/90. Der Vergleich der Werte der Viskosität in den Tabellen 14 und 15 zeigt einen leicht veränderten Trend bei höheren Temperaturen. Bei der Bitumensorte E60/90 ist bei einem Mischungsverhältnis von 1:2,5 und einer Temperatur von  $-18\text{ °C}$  die Viskosität um 545% höher als bei reinem Bitumen. Im Gegensatz dazu beträgt die Steigerung der Viskosität bei  $-18\text{ °C}$  und maximalen Füllergehalt bei der Bitumensorte B70/100 1250%. Im nächsten Schritt wird die Viskosität genauer betrachtet. Zu diesem Zweck werden diese in Abhängigkeit von Prüftemperatur und Füllergehalt dargestellt (Abbildung 24 und 25). Das Verhalten mit zunehmender Temperatur und Füllergehalt wird mit e-Funktionen beschrieben. Aufgrund dieser Diagramme können auch Zwischenwerte interpoliert werden.



**Abbildung 24: Verlauf der Viskosität  $\eta$  in Abhängigkeit von der Temperatur: B50/70, B70/100, E60/90**



**Abbildung 25: Verlauf der Viskosität  $\eta$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B50/70, B70/100, E60/90**

In Abbildung 26 sind die Relaxationszeiten für die Bitumensorten E60/90, B50/70 und B70/100 dargestellt. Bei Betrachtung der Werte stellt man bei allen drei Bindemittelsorten einen Anstieg der Relaxationszeit mit steigendem Füllergehalt fest. Erhöht man die Temperatur, so nimmt die Relaxationszeit der Bitumensorten ständig ab.

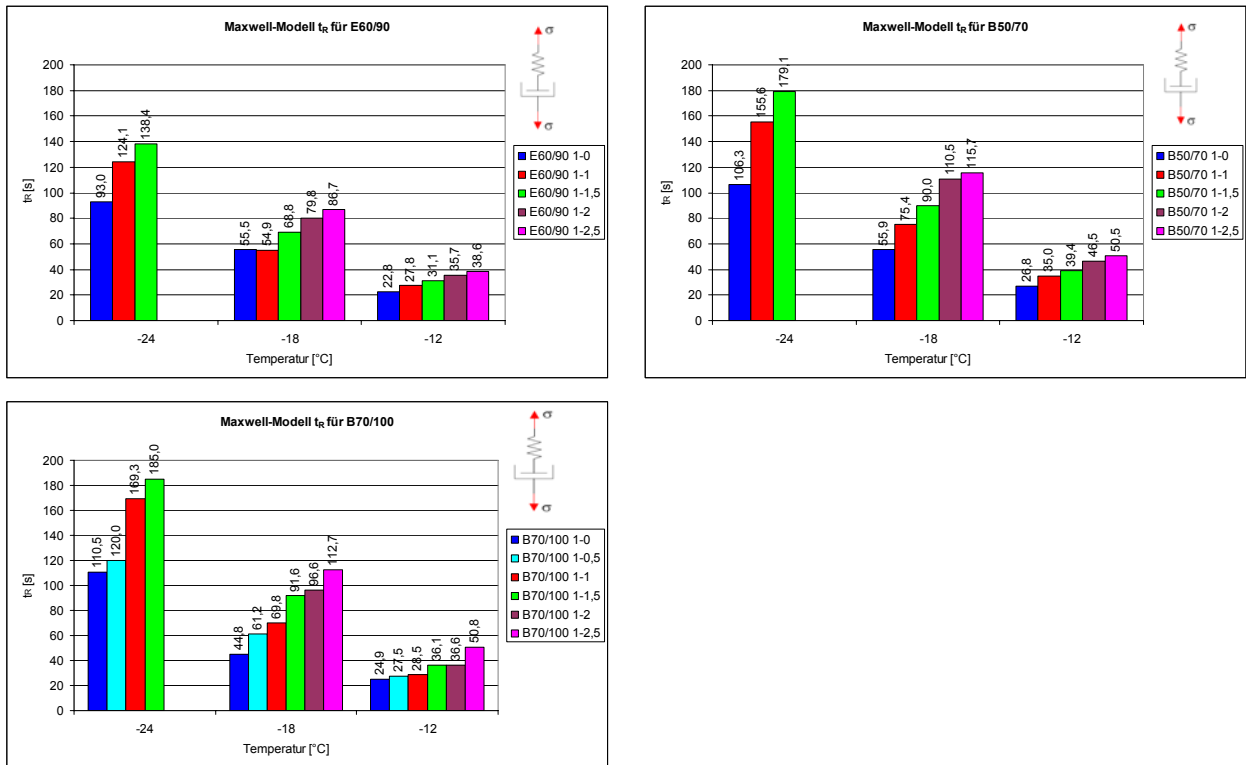


Abbildung 26: Relaxationszeit  $t_R$  aus dem Maxwell-Modell: B50/70, B70/100, E60/90

Tabelle 16: Änderung der Relaxationszeit  $t_R$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt: E60/90

| Relaxationszeit nach Maxwell-Modell E60/90 |        |        |        | Relaxationszeit nach Maxwell-Modell E60/90 bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|--------------------------------------------|--------|--------|--------|---------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                                         | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                                  | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                                        | 93,0   | 55,5   | 22,8   | 1:0                                                                 | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                                        | 124,1  | 54,9   | 27,8   | 1:1                                                                 | 133%   | 99%    | 122%   |
| 1:1,5                                      | 138,4  | 68,8   | 31,1   | 1:1,5                                                               | 149%   | 124%   | 136%   |
| 1:2                                        |        | 79,8   | 35,7   | 1:2                                                                 |        | 144%   | 157%   |
| 1:2,5                                      |        | 86,7   | 38,6   | 1:2,5                                                               |        | 156%   | 170%   |

Im folgenden Abschnitt werden die Werte aus Tabelle 16 verwendet. Aus den vorangegangenen Untersuchungen erkennt man, dass bei gleich bleibender Temperatur und steigendem Füllergehalt sowohl die Federsteifigkeit als auch die Viskosität aller drei Bitumensorten zunimmt. Mit zunehmendem Füllergehalt steigen die Werte der Vis-

kosität schneller als die der Federsteifigkeit. Demnach ist nach Gleichung 25 bei höheren Füllergehalten eine höhere Relaxationszeit zu erwarten. Je viskoser ein Stoff wird, desto weniger fließfähig ist er und desto langsamer erfolgt der Abbau der Spannung. Der Stoff braucht also länger bis er auf 36,8% des Anfangswertes abfällt. Tabelle 16 gibt genau diese Erkenntnis wieder. Bei -24 °C und einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 beträgt die Relaxationszeit 138,4 Sekunden und ist somit ca. 1,5-mal so groß wie bei reinem Bitumen. Bei -12 °C beträgt die Relaxationszeit bei reinem Bitumen 22,8 Sekunden. Erhöht man den Füllergehalt bei derselben Temperatur auf ihr Maximum, beträgt die Relaxationszeit 38,6 Sekunden und ist somit ca. 2-mal so groß wie bei reinem Bitumen. Reduziert man die Temperatur von -12 °C auf -24 °C so steigen die Werte Relaxationszeit bei allen Mischungsverhältnissen um das 4 bis 4,4-fache. Bei niedrigen Temperaturen wird Bitumen also dickflüssiger und somit weniger fließfähig. Das Material wird also viskoser und die Spannung braucht somit länger bis sie auf 36,8% des Anfangswertes abfällt.

**Tabelle 17: Änderung der Relaxationszeit  $t_R$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B50/70**

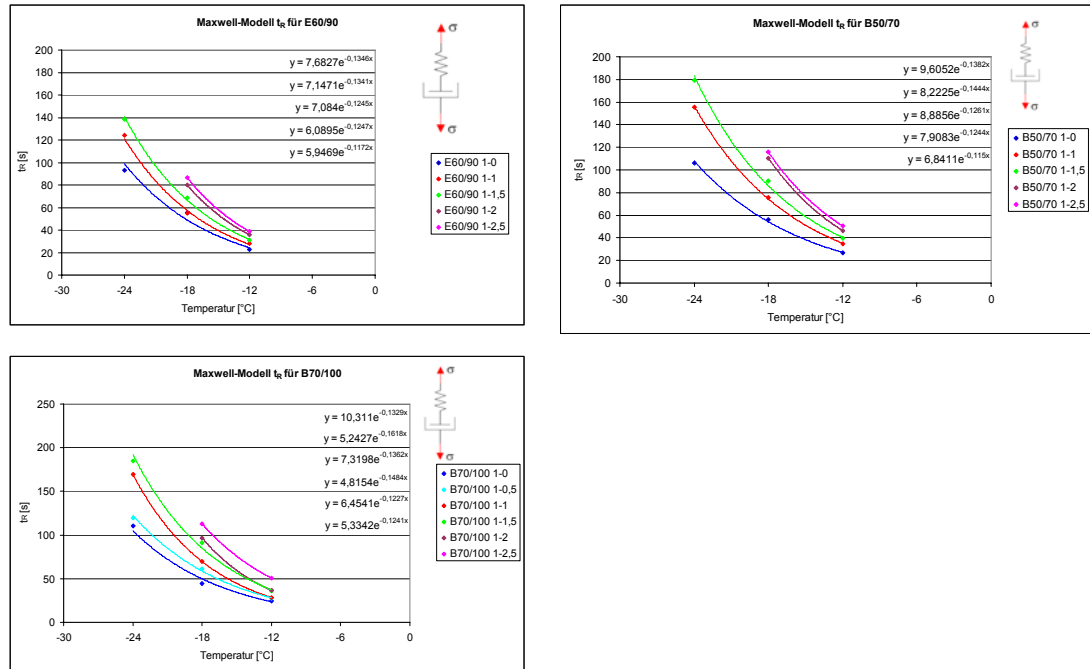
| Relaxationszeit nach Maxwell-Modell<br>B50/70 |        |        |        | Relaxationszeit nach Maxwell-Modell<br>B50/70 bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|-----------------------------------------------|--------|--------|--------|------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                                            | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                                     | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                                           | 106,3  | 55,9   | 26,8   | 1:0                                                                    | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                                           | 155,6  | 75,4   | 35,0   | 1:1                                                                    | 146%   | 135%   | 131%   |
| 1:1,5                                         | 179,1  | 90,0   | 39,4   | 1:1,5                                                                  | 168%   | 161%   | 147%   |
| 1:2                                           |        | 110,5  | 46,5   | 1:2                                                                    |        | 198%   | 174%   |
| 1:2,5                                         |        | 115,7  | 50,5   | 1:2,5                                                                  |        | 207%   | 189%   |

**Tabelle 18: Änderung der Relaxationszeit  $t_R$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B70/100**

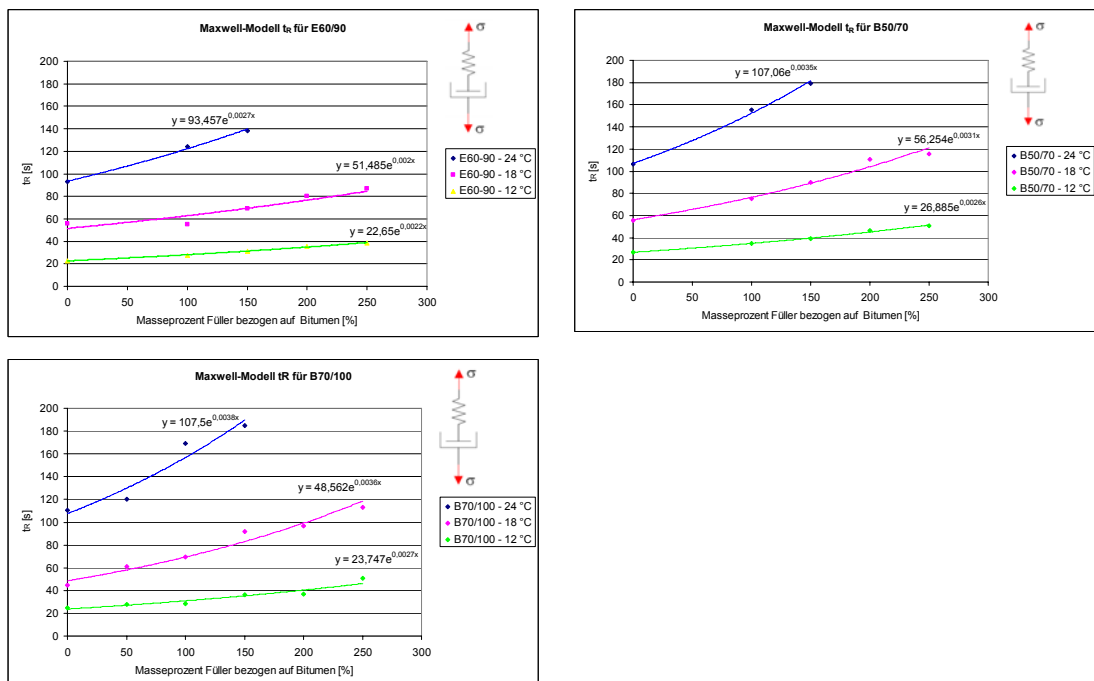
| Relaxationszeit nach Maxwell-Modell<br>B70/100 |        |        |        | Relaxationszeit nach Maxwell-Modell<br>B70/100<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|------------------------------------------------|--------|--------|--------|----------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                                             | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                                         | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                                            | 110,5  | 44,8   | 24,9   | 1:0                                                                        | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:0,5                                          | 120,0  | 61,2   | 27,5   | 1:0,5                                                                      | 109%   | 137%   | 110%   |
| 1:1                                            | 169,3  | 69,8   | 28,5   | 1:1                                                                        | 153%   | 156%   | 114%   |
| 1:1,5                                          | 185,0  | 91,6   | 36,1   | 1:1,5                                                                      | 167%   | 204%   | 145%   |
| 1:2                                            |        | 96,6   | 36,6   | 1:2                                                                        |        | 215%   | 147%   |
| 1:2,5                                          |        | 112,7  | 50,8   | 1:2,5                                                                      |        | 251%   | 204%   |

Bei der Betrachtung der Werte in Tabelle 17 und 18 stellt man einen Anstieg der Relaxationszeit mit zunehmendem Füllergehalt und abnehmender Temperatur fest. Bei -18 °C und einem Mischungsverhältnis von 1:2,5 beträgt die Steigerung der Relaxationszeit bei der Bitumensorte E60/90 56%. Im Gegensatz dazu beträgt die Steigerung der Relaxationszeit bei -18 °C und maximalen Füllergehalt bei den Bitumensorten B50/70 107% und bei der Bitumensorte B70/100 251%. In den nachfolgenden Abbildungen 27 und 28 wird die Relaxationszeit in Abhängigkeit der

Temperatur bzw. des Füllergehaltes dargestellt. Das Verhalten mit zunehmender Temperatur und Füllergehalt wird mit e-Funktionen bzw. linearen Funktionen beschrieben. Aufgrund dieser Diagramme können auch Zwischenwerte interpoliert werden.

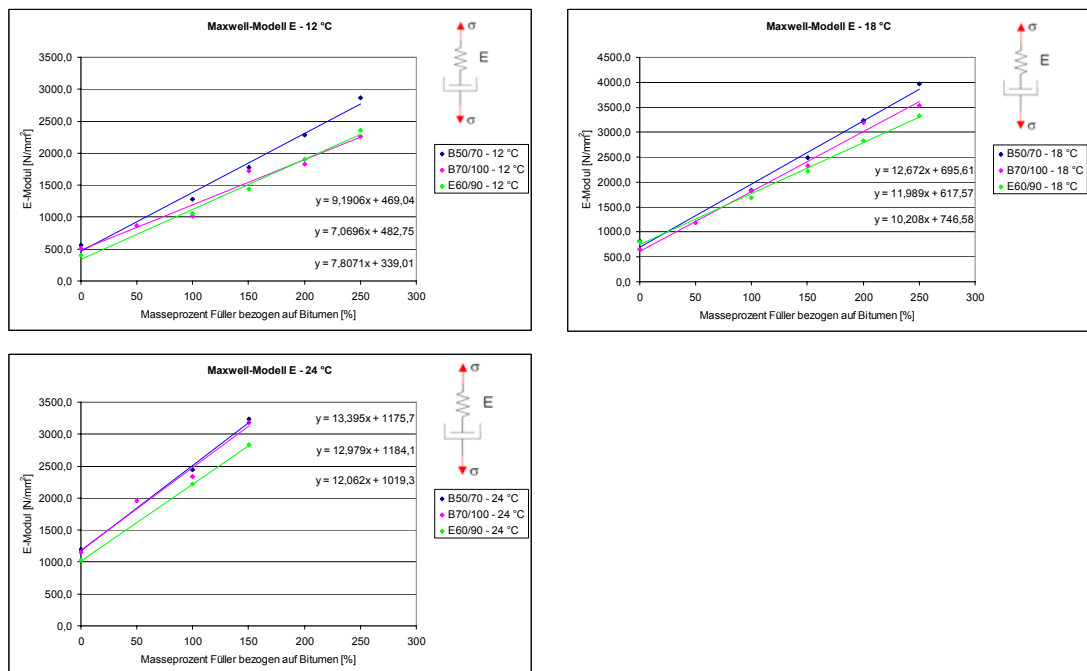


**Abbildung 27: Verlauf der Relaxationszeit  $t_R$  in Abhängigkeit der Temperatur: B50/70, B70/100, E60/90**

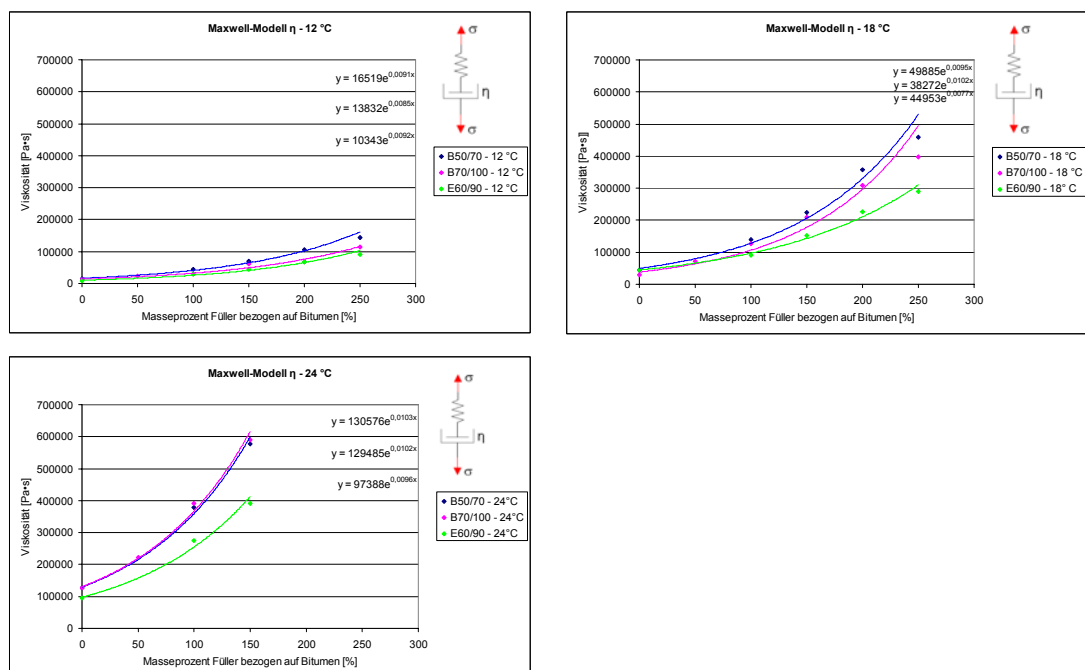


**Abbildung 28: Verlauf der Relaxationszeit  $t_R$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B50/70, B70/100, E60/90**

In den Abbildungen 29 und 30 wird die Federsteifigkeit bzw. die Viskosität der drei Bitumensorten bei jeweils einer Prüftemperatur in Abhängigkeit des Füllergehaltes dargestellt.



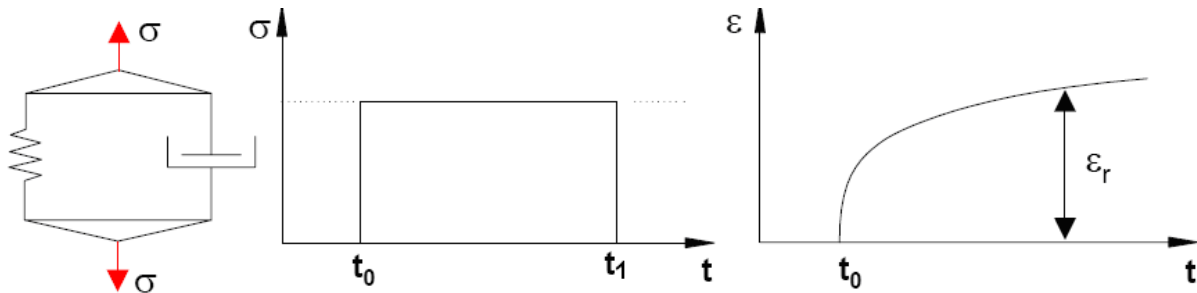
**Abbildung 29: Verlauf der Federsteifigkeit E in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B50/70, B70/100, E60/90 bei -24 °C, -18 °C und -12 °C**



**Abbildung 30: Verlauf der Viskosität in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B50/70, B70/100, E60/90 bei -24 °C, -18 °C und -12 °C**

### 3.4 Das Kelvin-Voigt-Modell

Im Rahmen dieser Diplomarbeit kommt das Kelvin-Voigt-Modell als eigenständiges Auswertungsmodell nicht zum Einsatz. Die Grundlagen dieses Modells werden hier trotzdem kurz erläutert, da im nachfolgenden Abschnitt das Vierparametermodell von Burgers vorgestellt wird, welches eine Kombination aus Maxwell-Modell und Kelvin-Voigt-Modell ist. Das Kelvin-Voigt-Modell besteht ebenso wie das Maxwell-Modell aus einer elastischen Feder und einem viskosen Dämpfer. Im Gegensatz zum Maxwell-Modell sind diese Elemente beim Kelvin-Voigt-Modell parallel angeordnet. Das Kelvin-Voigt-Modell und dessen Kriechkurve sind in Abbildung 31 dargestellt.



**Abbildung 31: Feder-Dämpfer Gedankenmodell, Kriechkurve [Scharr]**

Die parallele Anordnung von Feder und Dämpfer entspricht der Beziehung

$$\sigma = \sigma^e + \sigma^v \quad \text{Gleichung 27}$$

und der Beziehung  $\epsilon^e = \epsilon^v = \epsilon$ .

Die Gleichung 28 und die Gleichung 29 stellen die Grundgleichungen für Feder und Dämpfer dar.

$$\sigma^e = E \cdot \epsilon \quad \text{Gleichung 28}$$

$$\sigma^v = \eta \cdot \dot{\epsilon} \quad \text{Gleichung 29}$$

Die Differentialgleichung mit der das zeitabhängige Materialverhalten mathematisch beschrieben wird ist in Gleichung 30 dargestellt.

$$\dot{\epsilon} + \frac{E}{\eta} \cdot \epsilon = \frac{\sigma}{\eta} \quad \text{Gleichung 30}$$

Die allgemeine Lösung der inhomogenen Differentialgleichung (Gleichung 30) lautet mit  $E = \text{konstant}$  und  $\eta = \text{konstant}$

$$\epsilon(t) = c \cdot e^{\left(-\frac{E}{\eta}t\right)} + \frac{\sigma^{(0)}}{E} \quad \text{Gleichung 31}$$

Aufgrund der parallelen Anordnung von Feder und Dämpfer erhält man die Integrationskonstante mit Hilfe der Anfangsbedingung  $\epsilon(t=0) = 0$ . Einsetzen von  $t=0$  und  $\epsilon=0$  in Gleichung 31 ergibt die Integrationskonstante  $c = -\sigma^{(0)}/E$ . Die Kriechkurve während der Belastungsphase wird durch folgende Formel 32 ausgedrückt:

$$\varepsilon^{(t)} = \frac{\sigma^{(0)}}{E} \cdot \left[ 1 - e^{\left( -\frac{E}{\eta} t \right)} \right] \quad \text{Gleichung 32}$$

Setzt man für die Zeit immer größere Werte ein so wird der Ausdruck  $e^{\left( -\frac{E}{\eta} t \right)}$  immer kleiner und die Dehnung strebt asymptotisch gegen die elastische Dehnung  $\varepsilon^e = \sigma^{(0)}/E$ . Mit Hilfe der Nachgiebigkeitsfunktion

$$J(t) = \frac{1}{E} \cdot \left[ 1 - e^{\left( -\frac{E}{\eta} t \right)} \right] \quad \text{Gleichung 33}$$

kann die Verzerrung  $\varepsilon(t)$  wie folgt dargestellt werden:

$$\varepsilon^{(t)} = c \cdot e^{\left( -\frac{E}{\eta} t \right)}. \quad \text{Gleichung 34}$$

Aufgrund der parallelen Anordnung von Feder und Dämpfer im Kelvin-Voigt-Modell ist bei Entlastungsbeginn  $t_1$  keine spontane Abnahme der Dehnung festzustellen. Somit kann der elastische Anteil, der sich sofort bei der Belastung und bei der Entlastung der Probe einstellt, nicht dargestellt werden. Zum Entlastungsbeginn ist die Dehnung laut Gleichung 32 gleich groß wie in Gleichung 34. Die Integrationskonstante lautet:

$$c = \varepsilon^{(t_1)} \cdot e^{\left( \frac{E}{\eta} t_1 \right)} \quad \text{Gleichung 35}$$

mit

$$\varepsilon^{(t_1)} = \frac{\sigma^{(0)}}{E} \cdot \left[ 1 - e^{\left( -\frac{E}{\eta} t_1 \right)} \right] \quad \text{Gleichung 36}$$

Setzt man Gleichung 35 in Gleichung 34 ein, so kann man den Verzerrungsverlauf für den Zeitraum  $t_1 \leq t \leq \infty$  wie folgt angeben.

$$\varepsilon^{(t)} = \varepsilon^{(t_1)} \cdot e^{\left[ -\frac{E}{\eta} (t - t_1) \right]} \quad \text{Gleichung 37}$$

Gleichung 37 drückt aus, dass die Dehnung nach der Entlastung asymptotisch gegen null strebt. Das Kelvin-Voigt-Modell ist zur mathematischen Beschreibung von Relaxation ungeeignet, da die Relaxationsfunktion  $R(t) = E = \text{konstant}$  ist. [Mang/Hofstetter (2000)].

### 3.5 Das Burgers-Modell

Vergleicht man die Kriechkurve des Maxwell-Modells und des Kelvin-Voigt-Modells mit der Kriechkurve aus unseren Biegebalkenversuchen stellt man fest, dass sie nicht in der Lage sind das reale zeitabhängige Materialverhalten von Bitumen bzw. Mastix wiederzugeben. Um das Materialverhalten besser beschreiben zu können braucht man daher komplexere Materialmodelle wie zum Beispiel das Burgers-Modell. Das Burgers-Modell ist eine Kombination des Maxwell-Modell und des Kelvin-Voigt-Modells. Die Gesamtdehnung setzt sich somit aus den Dehnungsanteilen des Maxwell-Modells und des

Kelvin-Voigt-Modells zusammen. die bereits in Kapitel 3.3 und Kapitel 3.4 beschrieben wurden. Die exakte mathematische Herleitung des Burgers-Modells erfolgte bereits in der Diplomarbeit von [Hofko (2006)]. In dieser Arbeit wird die Formel für Kriechkurve während der Belastungsphase und nach der Entlastung wie folgt angegeben.

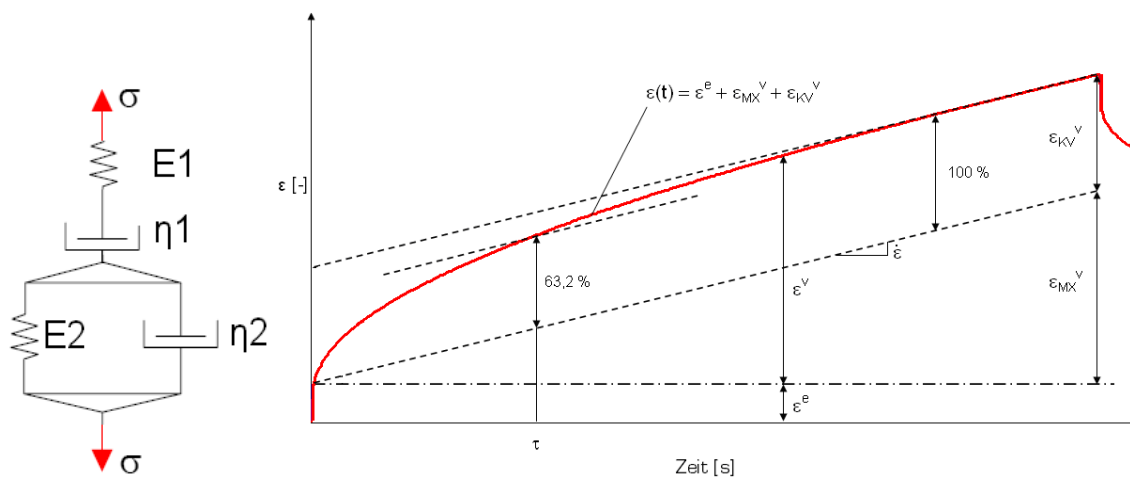
Belastung:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma^{(0)}}{E^e} + \frac{\sigma^{(0)}}{\eta^{MXV}} \cdot t + \frac{\sigma^{(0)}}{E^{KV}} \cdot \left( 1 - e^{\left( -\frac{E^{KV}}{\eta^{KV}} \cdot t \right)} \right) \quad \text{Gleichung 38}$$

Entlastung:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma^{(0)}}{\eta^{MXV}} \cdot t + \frac{\sigma^{(0)}}{E^{KV}} \cdot e^{\left( -\frac{E^{KV}}{\eta^{KV}} \cdot t \right)} \cdot \left( e^{\left( \frac{E^{KV}}{\eta^{KV}} \right)} - 1 \right) \quad \text{Gleichung 39}$$

### 3.5.1 Auswertungsmethodik des Burgers-Modell



**Abbildung 32: Feder-Dämpfer Gedankenmodell nach Burgers, Kriechkurve**

Das Burgers-Modell enthält vier Materialparameter: E1, E2, η1, η2. Die Auswertung der Materialparameter für die Bitumensorten und zugehöriger Mastix erfolgte in Excel. Die Gesamtverformung zum Zeitpunkt t ergibt sich als Summe der drei Elemente:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon^e + \varepsilon_{MX}^V + \varepsilon_{KV}^V \quad \text{Gleichung 40}$$

wobei  $\varepsilon^e$  für den elastischen Verformungsanteil steht,  $\varepsilon_{MX}^V$  steht für den viskosen Verformungsanteil welcher dem Maxwell-Modell zugeschrieben wird und  $\varepsilon_{KV}^V$  ist der viskose Verformungsanteil des Kelvin-Voigt-Modells. Die Spannung wird wie in Gleichung 19 mit Hilfe der Biegebalkentheorie ermittelt. Der elastische Teil der Verzerrung wird wie beim Maxwell-Modell bei 0,5 Sekunden festgelegt. Formt man nun Gleichung 9 um und setzt für die Verzerrung den Wert bei 0,5 Sekunden ein so erhält man als ersten Parameter den E-Modul E1 (Gleichung 20), welcher die Steifigkeit der Feder

des Maxwell'schen Körpers beschreibt. Je steifer die Feder ist, desto größer ist der E-Modul und desto kleiner sind die elastischen Verzerrungen.

$$E1 = \frac{\sigma}{\varepsilon_{(0,5)}} [\text{N/mm}^2] \quad \text{Gleichung 20}$$

Zum Zeitpunkt  $t=240$  Sekunden legt man eine Tangente an den Gesamtverformungsverlauf  $\varepsilon(t)$ , die bis zur Ordinate verlängert wird. Die Steigung der Tangente erhält man, indem man im Zeitbereich von 200 Sekunden bis 240 Sekunden den Gesamtdehnungsverlauf durch eine Gerade annähert und die Geradengleichung nach der Zeit ableitet. Die Steigung der Tangente  $\varepsilon^*$  (siehe Abbildung 32) kann auch wie folgt beschrieben werden.

$$\varepsilon^* = \tan \alpha \quad \text{Gleichung 41}$$

Die Tangente wird nun solange nach unten parallel verschoben bis sie  $\varepsilon^e$  bei 0,5 Sekunden schneidet. Diese Gerade stellt die konstante Kriechgeschwindigkeit des Maxwell-Modells während der Belastungsphase dar. Die Verformung die dem Maxwell-Modell zuzuordnen ist wird durch Gleichung 15 beschrieben.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma^{(0)}}{E} + \frac{\sigma^{(0)}}{\eta} \cdot t \quad \text{Gleichung 15}$$

Der viskose Anteil des Maxwell-Modells wird wie folgt beschrieben

$$\varepsilon_{MX}^v = \frac{\sigma(0)}{\eta} \cdot t \quad \text{Gleichung 42}$$

Weiter gilt folgende Beziehung:

$$\varepsilon^* = \tan \alpha = \frac{\varepsilon_{MX}^v}{\Delta t} = \frac{\sigma}{\eta} \quad \text{Gleichung 43}$$

$\varepsilon_{MX}^v$ , den viskosen Anteil des Maxwell-Modells bei 240 Sekunden, erhält man, indem man die Steigung der Tangente mit 239,5 Sekunden (da die elastische Dehnung bei 0,5 Sekunden festgelegt wurde) multipliziert. Formt man Gleichung 43 um, erhält man als einzige noch fehlende Größe den Parameter  $\eta$

$$\eta = \frac{\sigma \cdot \Delta t}{\varepsilon_{MX}^v} = \frac{\sigma \cdot (t(240) - t(0,5))}{\varepsilon_{MX}^{v(240)}} = \frac{\sigma \cdot 239,5}{\varepsilon_{MX}^{v(240)}} \quad \text{Gleichung 44}$$

Die Zähigkeit  $\eta$  ist der zweite Parameter des Maxwell'schen Modells und beschreibt den zeitabhängigen viskosen Teil der Verzerrungen. Aufgrund der parallelen Anordnung von Feder und Dämpfer im Kelvin-Voigt-Modell gilt  $\varepsilon^e = \varepsilon^v = \varepsilon$ . Damit kann der Dehnungsanteil des Kelvin-Voigt-Modell in Excel wie folgt berechnet werden

$$\varepsilon = \varepsilon_{KV} = \varepsilon_{KV}^v = \varepsilon^{(240)} - \varepsilon^e - \varepsilon_{MX}^{v(240)} \quad \text{Gleichung 45}$$

Der Kelvin-Voigt Anteil des Dehnungsverlaufs während der Belastung wird durch folgende Formel ausgedrückt

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \left[ 1 - e^{\left( -\frac{t}{\tau} \right)} \right] \quad \text{Gleichung 46}$$

Setzt man in Gleichung 46 für  $t$  und  $\tau$  denselben Wert ein reduziert sich die Gleichung auf folgenden Ausdruck.

$$\varepsilon^{(\tau)} = 0,632 \cdot \varepsilon_0 \quad \text{Gleichung 47}$$

Gleichung 45 drückt aus, dass zu diesem Zeitpunkt bereits 63,2 % der Dehnung auftreten. Die Berechnung der Materialparameter  $E_2$  und  $\tau$  des Kelvin-Voigt-Modells erfolgt zu diesem Zeitpunkt. In Excel erhält man den Wert  $\tau$  indem man der Zeitachse solange folgt bis 63,2 % von  $\varepsilon_{KV}$  auftreten. Den Materialparameter  $E_2$  ergibt sich wie folgt:

$$E_2 = \frac{\sigma}{\varepsilon^{KV}} \quad \text{Gleichung 48}$$

Der Materialparameter  $\eta_2$  berechnet sich wie folgt:

$$\eta = E_2 \cdot \tau \quad \text{Gleichung 49}$$

### 3.5.2 Auswertung mit dem Burgers-Modell

Bei den Versuchen wurden drei Bitumensorten bei unterschiedlichen Temperaturen und Mischungsverhältnissen geprüft. Bei Proben aus reinem Bitumen wurden zwei Probekörper hergestellt. Bei Mastixproben wurden für jedes Mischungsverhältnis drei Probekörper geprüft. Für die Auswertung werden die Versuchsergebnisse gemittelt und nach dem Burgers-Modell ausgewertet. Die gewonnenen Parameter werden nun für alle geprüften Bitumensorten und zugehöriger Mastix bei den Temperaturen -12 °C, -18 °C und -24 °C dargestellt (Abbildung 33) und kommentiert.

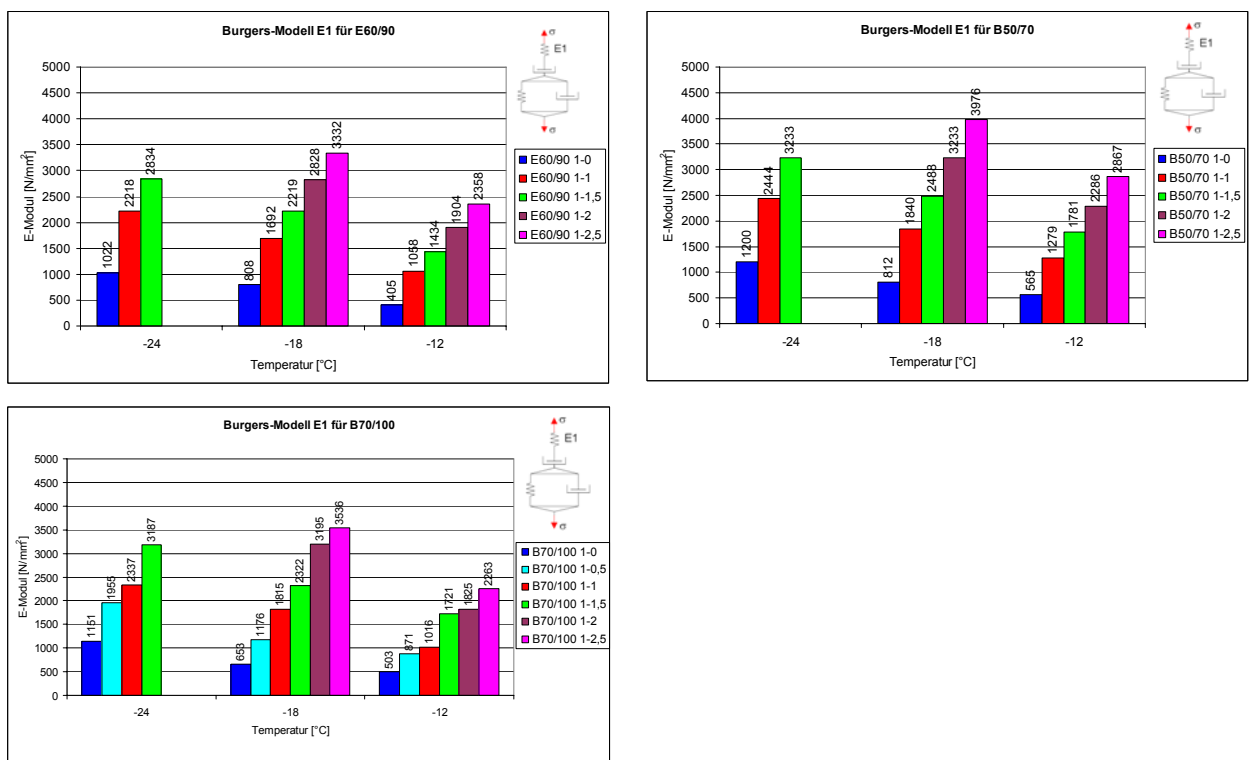


Abbildung 33: E-Modul  $E_1$  nach dem Burgers-Modell: E60/90, B50/70, B70/100

Je steifer die Feder ist desto größer ist der E-Modul  $E_1$  und desto kleiner sind die elastischen Verzerrungen. Die Federsteifigkeit  $E_1$  des Burgers-Modell und die Federsteifigkeit  $E$  des Maxwell-Modells beschreiben den gleichen Teil der Kriechverformung. Da ihre Auswertung zum gleichen Zeitpunkt und nach derselben Formel erfolgt sind ihre Werte identisch. Um das Burgers-Modell vollständig in diesem Kapitel zu beschreiben wird die Auswertung des Parameters  $E_1$  nochmals ausgeführt. In Abbildung 33 erfolgt die Darstellung der Federsteifigkeit für reines Bitumen und zugehöriger Mastix bei den Prüftemperaturen  $-24\text{ °C}$ ,  $-18\text{ °C}$  und  $-12\text{ °C}$ . Die Diagramme in Abbildung 33 zeigen, unabhängig vom getesteten Bindemittel die Abnahme der Federsteifigkeit mit zunehmender Temperatur und die Zunahme der Federsteifigkeit mit steigendem Füllergehalt. Die Versuchsdaten der einzelnen Bitumensorten werden in den Tabellen 19 bis 21 genauer betrachtet.

**Tabelle 19: Änderung der Federsteifigkeit  $E_1$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt: E60/90**

| E1 nach Burgers-Modell E60/90 |        |        |        | E1 nach Burgers-Modell E60/90<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                            | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                        | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                           | 1022   | 808    | 405    | 1:0                                                       | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                           | 2218   | 1692   | 1058   | 1:1                                                       | 217%   | 209%   | 261%   |
| 1:1,5                         | 2834   | 2219   | 1434   | 1:1,5                                                     | 277%   | 275%   | 354%   |
| 1:2                           |        | 2828   | 1904   | 1:2                                                       |        | 350%   | 470%   |
| 1:2,5                         |        | 3332   | 2358   | 1:2,5                                                     |        | 413%   | 582%   |

Beim Burgers-Modell ist unabhängig von der Bitumensorte die Spannung während der Belastungsphase gleich groß. Laut Gleichung 9 ist die Federsteifigkeit  $E_1$  somit für die Größe der sofortigen Dehnung zum Belastungsbeginn  $t=0$  verantwortlich. Je höher die Federsteifigkeit  $E_1$  ist, desto kleiner wird die Anfangsverformung. Bei reinem Bitumen und  $-24\text{ °C}$  ist die Federsteifigkeit  $1022\text{ N/mm}^2$  groß. Erhöht man bei gleichem Mischungsverhältnis die Temperatur, so ist die Federsteifigkeit nur noch  $808\text{ N/mm}^2$  groß. Bei einer Prüftemperatur von  $-12\text{ °C}$  beträgt die Federsteifigkeit  $405\text{ N/mm}^2$  und ist somit um 60% geringer als bei  $-24\text{ °C}$ . Wiederholt man diese Vorgangsweise bei einem Mischungsverhältnis von 1:1,5, dann sinkt die Federsteifigkeit von  $2834\text{ N/mm}^2$  auf  $1434\text{ N/mm}^2$ . Die Federsteifigkeit sinkt somit auf ca. 50% des Anfangswertes. Mit zunehmender Temperatur sinkt also die Federsteifigkeit. Eine kleine Federsteifigkeit ergibt nach Gleichung 9 große Anfangsverformungen. Bei  $-24\text{ °C}$  und einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 beträgt die Federsteifigkeit  $2834\text{ N/mm}^2$  und ist somit um 177% größer als bei reinem Bitumen. Bei gleichem Mischungsverhältnis und  $-18\text{ °C}$  beträgt die Steigerung 175%. Bei  $-12\text{ °C}$  und einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 beträgt die Steigerung der Federsteifigkeit bezogen auf reines Bitumen 254%. Bei hohen Temperaturen ist der Einfluss des Füllers größer als bei niedrigen. Durch die Zugabe von Füller steigt die Federsteifigkeit wodurch kleinere Anfangsverformungen zu erwarten sind.

**Tabelle 20: Änderung der Federsteifigkeit E1 in Abhängigkeit vom Füllergehalt B50/70**

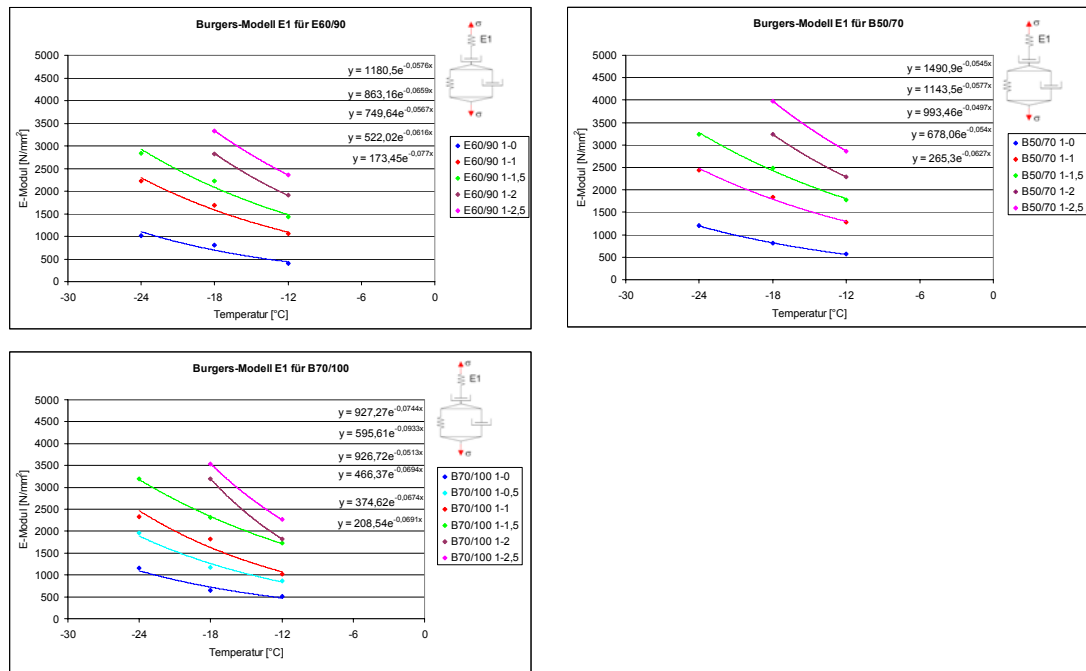
| E1 nach Burgers-Modell B50/70 |        |        |        | E1 nach Burgers-Modell B50/70<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                            | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                        | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                           | 1200   | 812    | 565    | 1:0                                                       | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                           | 2444   | 1840   | 1279   | 1:1                                                       | 204%   | 226%   | 226%   |
| 1:1,5                         | 3233   | 2488   | 1781   | 1:1,5                                                     | 269%   | 306%   | 315%   |
| 1:2                           |        | 3233   | 2286   | 1:2                                                       |        | 398%   | 404%   |
| 1:2,5                         |        | 3976   | 2867   | 1:2,5                                                     |        | 489%   | 507%   |

Bei -24 °C und reinem Bitumen beträgt die Federsteifigkeit 1200 N/mm<sup>2</sup>. Erhöht man die Temperatur auf -12 °C dann sinkt die Federsteifigkeit um ca. 50%. Durch Zugabe von Füller steigt auch bei dieser Bitumensorte die Federsteifigkeit. Der Einfluss von Füller ist auch hier bei höheren Temperaturen größer.

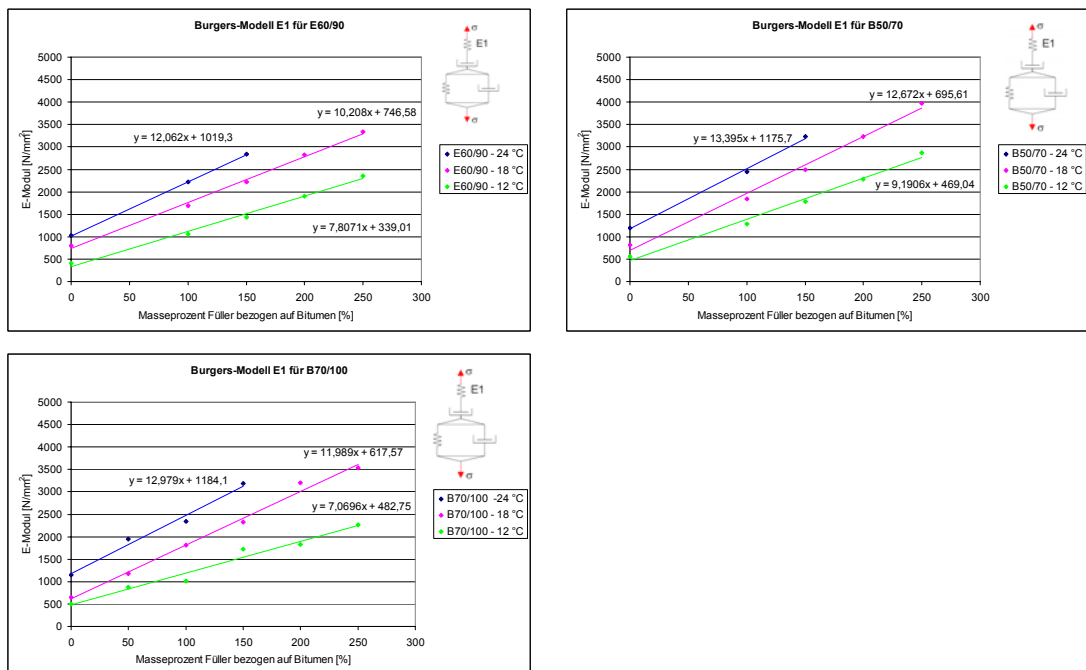
**Tabelle 21: Änderung der Federsteifigkeit E1 in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B70/100**

| E1 nach Burgers-Modell B70/100 |        |        |        | E1 nach Burgers-Modell B70/100<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                             | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                         | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                            | 1151   | 653    | 503    | 1:0                                                        | 100    | 100%   | 100%   |
| 1:0,5                          | 1955   | 1176   | 871    | 1:0,5                                                      | 170    | 180%   | 173%   |
| 1:1                            | 2337   | 1815   | 1016   | 1:1                                                        | 203    | 278%   | 202%   |
| 1:1,5                          | 3187   | 2322   | 1721   | 1:1,5                                                      | 277    | 356%   | 342%   |
| 1:2                            |        | 3195   | 1825   | 1:2                                                        |        | 490%   | 363%   |
| 1:2,5                          |        | 3536   | 2263   | 1:2,5                                                      |        | 542%   | 450%   |

Die Bitumensorte B70/100 zeigt bei Erhöhung der Temperatur das gleiche Verhalten wie die Bitumensorte B50/70. Bei reinem Bitumen sinkt die Federsteifigkeit auf ca. 45% und bei einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 auf ca. 55%. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Federsteifigkeit wodurch größere Anfangsverformungen zu erwarten sind. Bei konstanter Temperatur und Zugabe von Füller steigen die Werte für die Federsteifigkeit auch hier an. Im nächsten Schritt werden die Federsteifigkeiten genauer betrachtet. Zu diesem Zweck werden diese in Abhängigkeit von Prüf-temperatur und Füllergehalt dargestellt. Das Verhalten mit zunehmender Temperatur und Füllergehalt wird mit e-Funktionen bzw. linearen Funktionen beschrieben siehe (Abbildung 34 und 35).



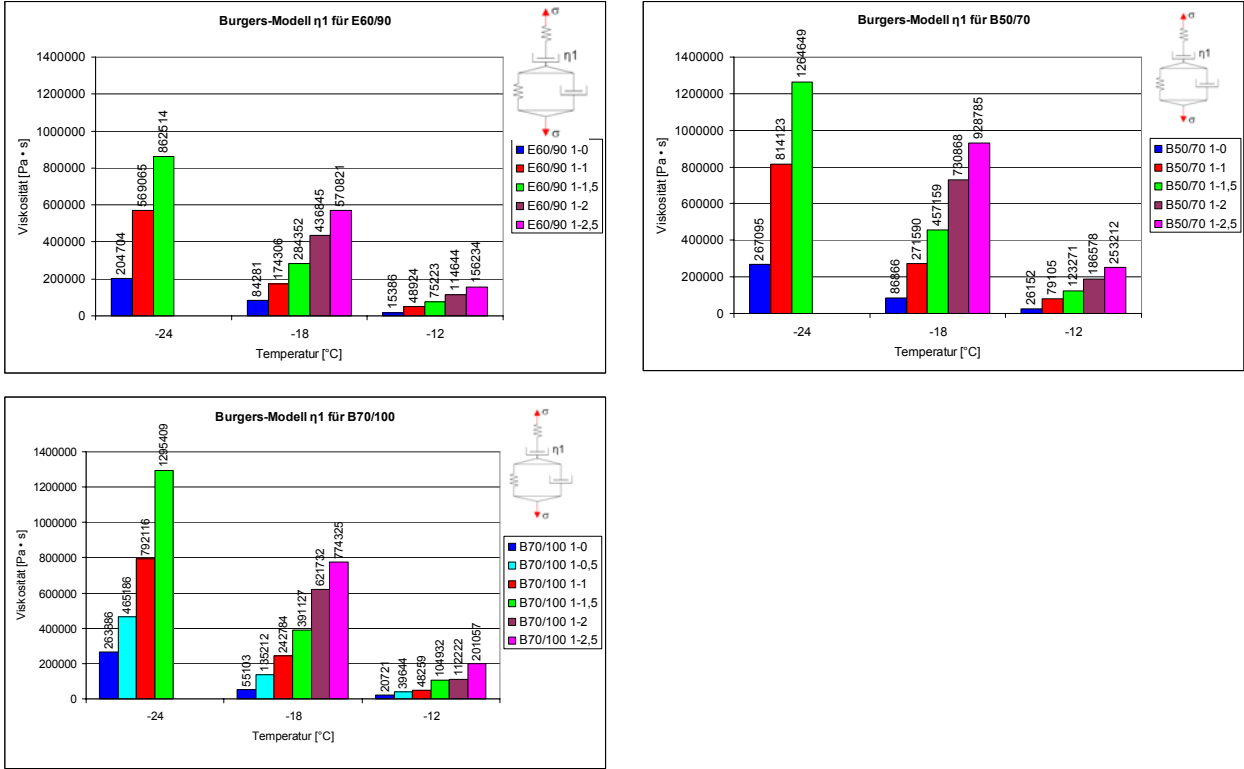
**Abbildung 34: Verlauf der Federsteifigkeit E1 in Abhängigkeit der Temperatur: B50/70, B70/100, E60/90**



**Abbildung 35: Verlauf der Federsteifigkeit E1 in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B50/70, B70/100, E60/90**

Der zweite Parameter des Burgers Modells wird durch einen Dämpfer dargestellt. Die Viskosität  $\eta_1$  beschreibt den viskosen Verformungsanteil  $\epsilon_{MX}^v$  welcher dem Maxwell-

Modell zugeschrieben wird und durch Gleichung 40 beschrieben wird. Je größer die Zähigkeit  $\eta_1$  in dieser Gleichung wird desto kleiner wird der viskose Teil der Verzerrungen. Wie auch beim Maxwell-Modell verändert sich die Viskosität in Abhängigkeit vom Füllergehalt und der Prüftemperatur was in Abbildung 36 gezeigt wird.



**Abbildung 36: Viskosität  $\eta_1$  nach dem Burgers-Modell: E60/90, B50/70, B70/10**

Die Versuchsdaten der einzelnen Bitumensorten werden in den Tabellen 22 bis 24 genauer betrachtet. Auf der linken Seite sieht man die Werte der Viskosität in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis und der Temperatur. Auf der rechten Seite findet man die Zunahme der Viskosität  $\eta_1$  bei zunehmendem Füllergehalt bezogen auf reines Bitumen. In Abbildung 37 und 38 sieht man die Viskosität  $\eta_1$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt und der Temperatur.

**Tabelle 22: Änderung der Viskosität  $\eta_1$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt: E60/90**

| $\eta_1$ nach Burgers-Modell E60/90 |        |        |        | $\eta_1$ nach Burgers-Modell E60/90 bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                                  | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                           | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                                 | 204704 | 84281  | 15386  | 1:0                                                          | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                                 | 569065 | 174306 | 48924  | 1:1                                                          | 278%   | 207%   | 318%   |
| 1:1,5                               | 862514 | 284352 | 75223  | 1:1,5                                                        | 421%   | 337%   | 489%   |
| 1:2                                 |        | 436845 | 114644 | 1:2                                                          |        | 518%   | 745%   |
| 1:2,5                               |        | 570821 | 156234 | 1:2,5                                                        |        | 677%   | 1015%  |

Betrachtet man die Werte in Tabelle 22 in Abhängigkeit des Füllergehaltes stellt man fest, dass die Werte mit zunehmendem Füllergehalt steigen. Je viskoser das Bitumen wird, desto weniger fließt es, es wird also dickflüssiger und der Anteil der viskosen Verzerrung wird kleiner. Bei reinem Bitumen und einer Temperatur von -24 °C beträgt die Viskosität 204704 Pa•s. Erhöht man bei gleicher Temperatur das Mischungsverhältnis von Bitumen zu Füller auf 1:1,5, so beträgt die Steigerung der Viskosität 321%. Bei -12 °C und einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 beträgt die Steigerung 389%. Bei maximalen Füllergehalt und -18 °C beträgt die Steigerung 577% und bei -12 °C 915%. Der Füllergehalt hat somit bei höheren Temperaturen einen größeren Einfluss auf die Viskosität. Bei gleich bleibendem Mischungsverhältnis bewirkt eine Reduzierung der Temperatur eine Erhöhung der Viskosität. Bei reinem Bitumen ist die Viskosität bei -24 °C ca.13-mal größer als bei -12 °C. Die Viskosität ist bei einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 und einer Temperatur von -24 °C ca.11-mal größer als bei -12 °C.

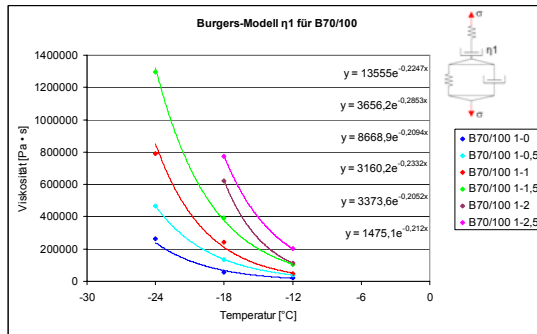
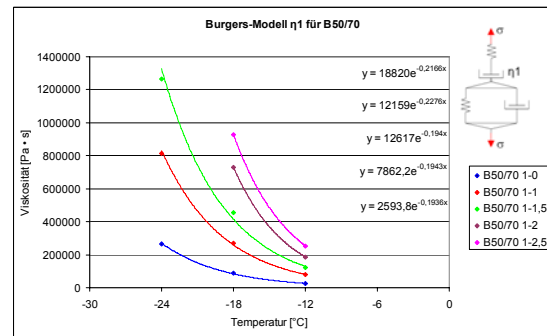
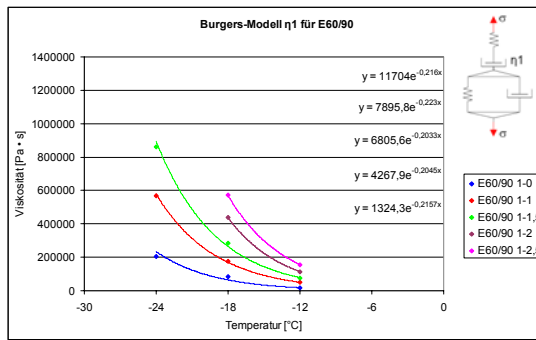
**Tabelle 23: Änderung der Viskosität  $\eta_1$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt B50/70**

| <b><math>\eta_1</math> nach Burgers-Modell B50/70</b> |         |        |        | <b><math>\eta_1</math> nach Burgers-Modell B50/70<br/>bezogen auf Bitumen rein</b> |        |        |        |
|-------------------------------------------------------|---------|--------|--------|------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                                                    | -24 °C  | -18 °C | -12 °C | MV                                                                                 | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                                                   | 267095  | 86866  | 26152  | 1:0                                                                                | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                                                   | 814123  | 271590 | 79105  | 1:1                                                                                | 305%   | 313%   | 302%   |
| 1:1,5                                                 | 1264649 | 457159 | 123271 | 1:1,5                                                                              | 473%   | 526%   | 471%   |
| 1:2                                                   |         | 730868 | 186578 | 1:2                                                                                |        | 841%   | 713%   |
| 1:2,5                                                 |         | 928785 | 253212 | 1:2,5                                                                              |        | 1069%  | 968%   |

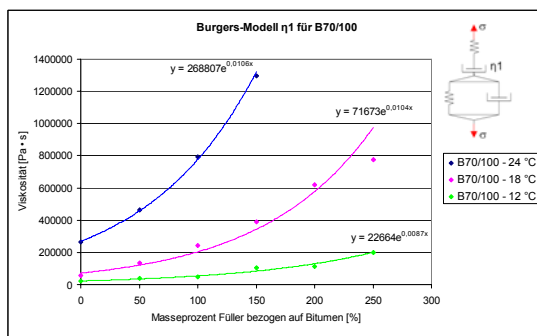
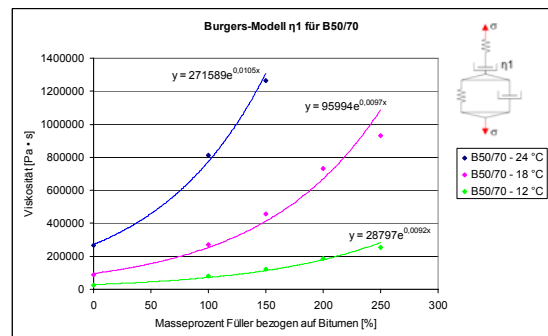
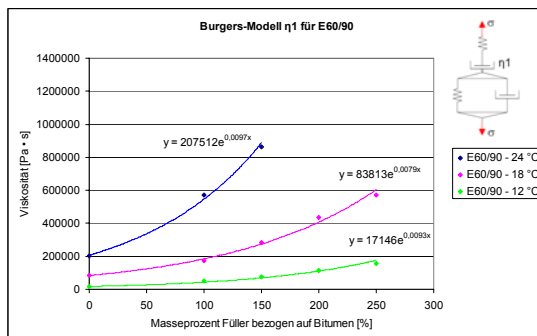
**Tabelle 24: Änderung der Viskosität  $\eta_1$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B70/100**

| <b><math>\eta_1</math> nach Burgers-Modell B70/100</b> |         |        |        | <b><math>\eta_1</math> nach Burgers-Modell B70/100<br/>bezogen auf Bitumen rein</b> |        |        |        |
|--------------------------------------------------------|---------|--------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                                                     | -24 °C  | -18 °C | -12 °C | MV                                                                                  | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                                                    | 263886  | 55103  | 20721  | 1:0                                                                                 | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:0,5                                                  | 465186  | 135212 | 39644  | 1:0,5                                                                               | 176%   | 245%   | 191%   |
| 1:1                                                    | 792116  | 242784 | 48259  | 1:1                                                                                 | 300%   | 441%   | 233%   |
| 1:1,5                                                  | 1295409 | 391127 | 104932 | 1:1,5                                                                               | 491%   | 710%   | 506%   |
| 1:2                                                    |         | 621732 | 112222 | 1:2                                                                                 |        | 1128%  | 542%   |
| 1:2,5                                                  |         | 774325 | 201057 | 1:2,5                                                                               |        | 1405%  | 970%   |

In den Tabellen 23 und 24 erkennt man, dass die Viskosität bei zunehmender Temperatur kleiner wird. Erhöht man den Füllergehalt so steigen auch die Werte der Viskosität bei allen Temperaturen. Bei den Bitumensorten B50/70 und B70/100 ist die Steigerung der Viskosität bei -18 °C und maximalen Füllergehalt größer als bei der Bitumensorte E60/90.



**Abbildung 37: Verlauf der Viskosität  $\eta_1$  in Abhängigkeit der Temperatur: B50/70, B70/100, E60/90**



**Abbildung 38: Verlauf der Viskosität  $\eta_1$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B50/70, B70/100, E60/90**

Der E-Modul E2 der Feder im Kelvin-Voigt-Körper des Burgers-Modells stellt den dritten Parameter dar. Der Parameter E2 bestimmt wie groß die maximale Dehnung des Kelvin-Voigt-Körpers wird. Je größer die Federsteifigkeit E2 wird, desto kleiner wird die maximale mögliche Dehnung. In Abbildung 39 sind die Werte der Federsteifigkeit für die Bitumensorten E60/90, B50/70 und B70/100 in Abhängigkeit vom Füllergehalt und der Prüftemperatur dargestellt.

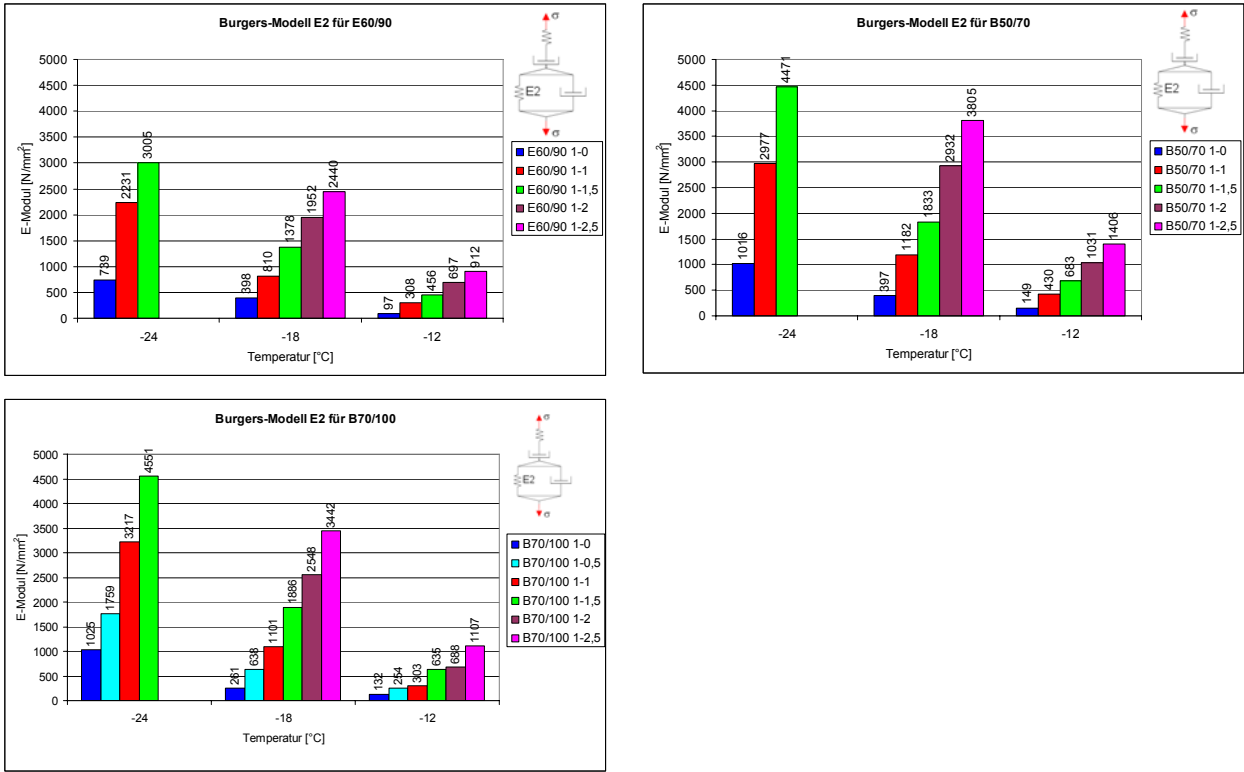


Abbildung 39: Federsteifigkeit E2 nach dem Burgers-Modell: E60/90, B50/70, B70/100

In den Tabellen 25 bis 27 wird der Einfluss des Füllers auf die Federsteifigkeit, für die Bitumensorten E60/90, B50/70 und B70/100 untersucht.

Tabelle 25: Änderung der Federsteifigkeit E2 in Abhängigkeit vom Füllergehalt: E60/90

| E2 nach Burgers-Modell E60/90 |        |        |        | E2 nach Burgers-Modell E60/90<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                            | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                        | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                           | 739    | 398    | 97     | 1:0                                                       | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                           | 2231   | 810    | 308    | 1:1                                                       | 302%   | 203%   | 318%   |
| 1:1,5                         | 3005   | 1378   | 456    | 1:1,5                                                     | 406%   | 346%   | 472%   |
| 1:2                           |        | 1952   | 697    | 1:2                                                       |        | 490%   | 722%   |
| 1:2,5                         |        | 2440   | 912    | 1:2,5                                                     |        | 612%   | 944%   |

Die Größe des Parameters E2 ändert sich in Abhängigkeit der Temperatur und des Füllergehaltes. Je höher der Füllergehalt wird, desto größer werden die Werte der Federsteifigkeit E2. Bei -24 °C und einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 ist die Federsteifigkeit E2 ca.4-mal so groß wie bei reinem Bitumen. Bei gleichem Mischungsverhältnis und -12 °C ist die Federsteifigkeit ca.5-mal so groß. Bei -12 °C und dem maximalen Füllergehalt ist die Federsteifigkeit ca. 9,5-mal größer als bei reinem Bitumen. Bei -18 °C und einem Mischungsverhältnis Bitumen und Füller von 1:2,5 beträgt die Steigerung der Federsteifigkeit nur 512%. Bei höheren Temperaturen ist der Einfluss des Füllers größer als bei niedrigen Temperaturen.

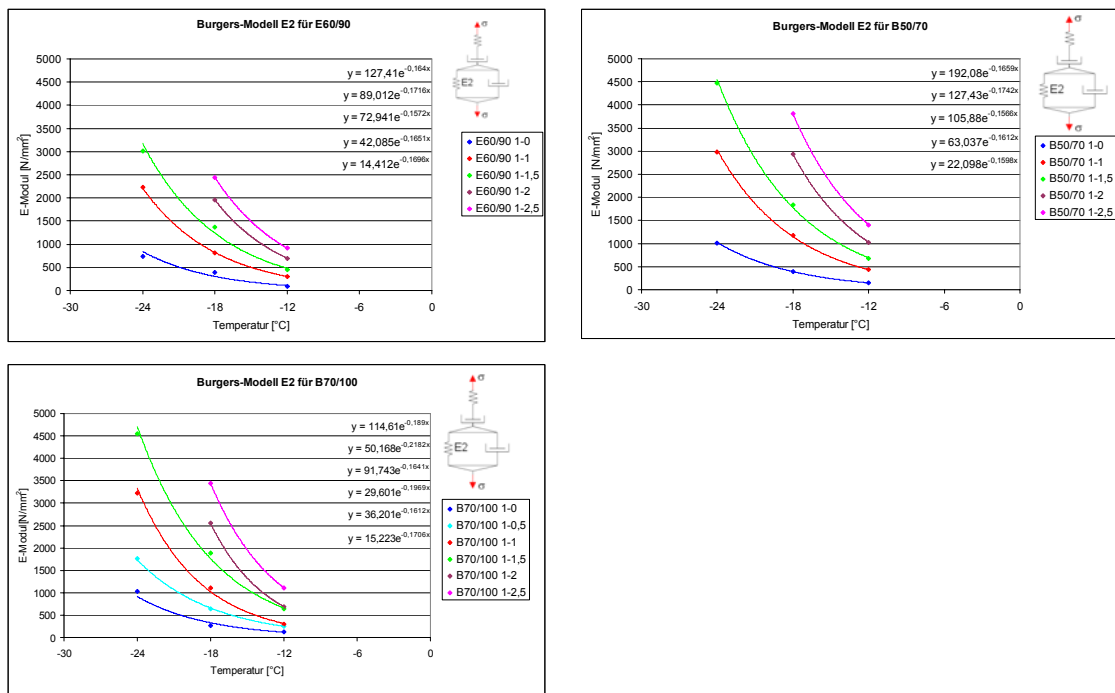
**Tabelle 26: Änderung der Federsteifigkeit E2 in Abhängigkeit vom Füllergehalt B50/70**

| E2 nach Burgers-Modell B50/70 |        |        |        | E2 nach Burgers-Modell B50/70<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                            | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                        | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                           | 1016   | 397    | 149    | 1:0                                                       | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                           | 2977   | 1182   | 430    | 1:1                                                       | 293%   | 298%   | 288%   |
| 1:1,5                         | 4471   | 1833   | 683    | 1:1,5                                                     | 440%   | 462%   | 457%   |
| 1:2                           |        | 2932   | 1031   | 1:2                                                       |        | 738%   | 690%   |
| 1:2,5                         |        | 3805   | 1406   | 1:2,5                                                     |        | 958%   | 942%   |

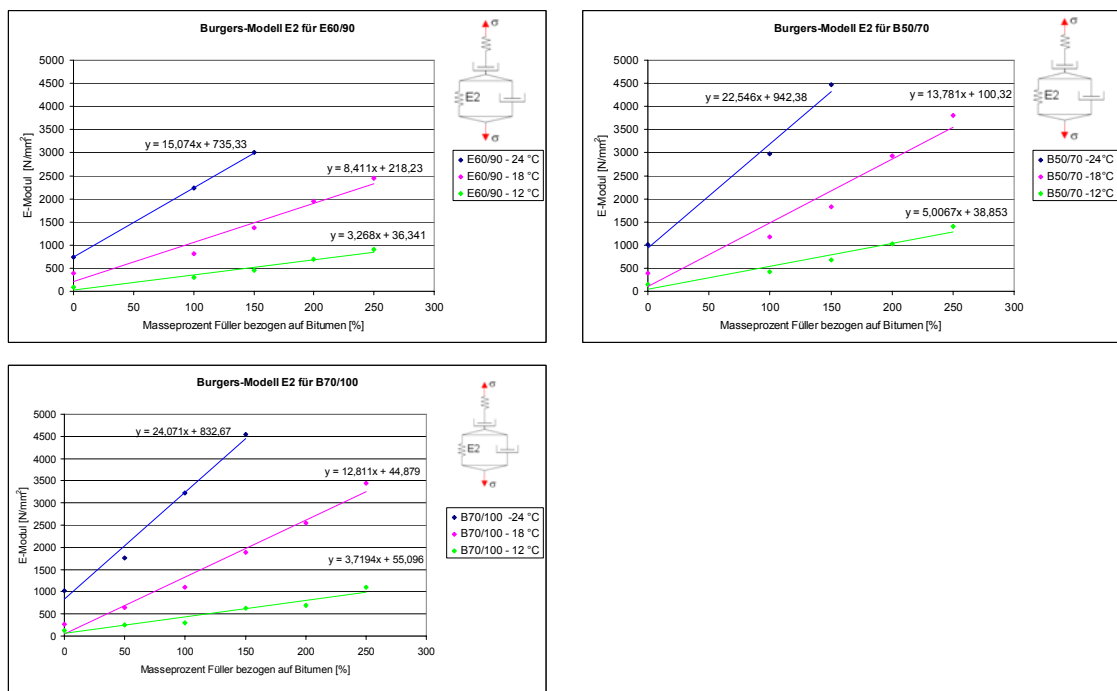
**Tabelle 27: Änderung der Federsteifigkeit E2 in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B70/100**

| E2 nach Burgers-Modell B70/100 |        |        |        | E2 nach Burgers-Modell B70/100<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                             | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                         | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                            | 1025   | 261    | 132    | 1:0                                                        | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:0,5                          | 1759   | 638    | 254    | 1:0,5                                                      | 172%   | 244%   | 192%   |
| 1:1                            | 3217   | 1101   | 303    | 1:1                                                        | 314%   | 422%   | 229%   |
| 1:1,5                          | 4551   | 1886   | 635    | 1:1,5                                                      | 444%   | 722%   | 480%   |
| 1:2                            |        | 2548   | 688    | 1:2                                                        |        | 976%   | 520%   |
| 1:2,5                          |        | 3442   | 1107   | 1:2,5                                                      |        | 1318%  | 837%   |

Die Bitumensorten B50/70 und B70/100 zeigen ein ähnliches Verhalten wie die Bitumensorte E60/90. Eine Abweichung von diesem Verhalten zeigt jedoch bei höheren Temperaturen. Bei -18 °C und maximalen Füllergehalt ist die Steigerung der Federsteifigkeit bei den Bitumensorten B50/70 und B70/100 größer als bei der Bitumensorte E60/90. In Abbildung 40 und 41 ist der Verlauf der Federsteifigkeit in Abhängigkeit der Temperatur und vom Füllergehalt dargestellt.



**Abbildung 40: Verlauf der Federsteifigkeit E2 in Abhängigkeit der Temperatur: B50/70, B70/100, E60/90**



**Abbildung 41: Verlauf der Federsteifigkeit E2 in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B50/70, B70/100, E60/90**

Der vierte Parameter beim Burgers-Modell wird durch den Dämpfer des Kelvin-Voigt-Körpers beschrieben. Je höher die Viskosität  $\eta_2$  ist, desto kleiner wird die Verzerrung. Die Kriechkurve ist während der Belastungsphase also weniger gekrümmt. Mit Hilfe des Parameters  $\eta_2$  kann somit die Krümmung der Dehnungskurve beschrieben werden. In Abbildung 42 sind die Werte der Viskosität  $\eta_2$  für die Bitumensorten E60/90, B50/70 und B70/100 in Abhängigkeit vom Füllergehalt und der Prüftemperatur dargestellt. In den Tabellen 28 bis 30 wird der Einfluss des Füllers auf die Viskosität, für die Bitumensorten E60/90, B50/70 und B70/100 untersucht.

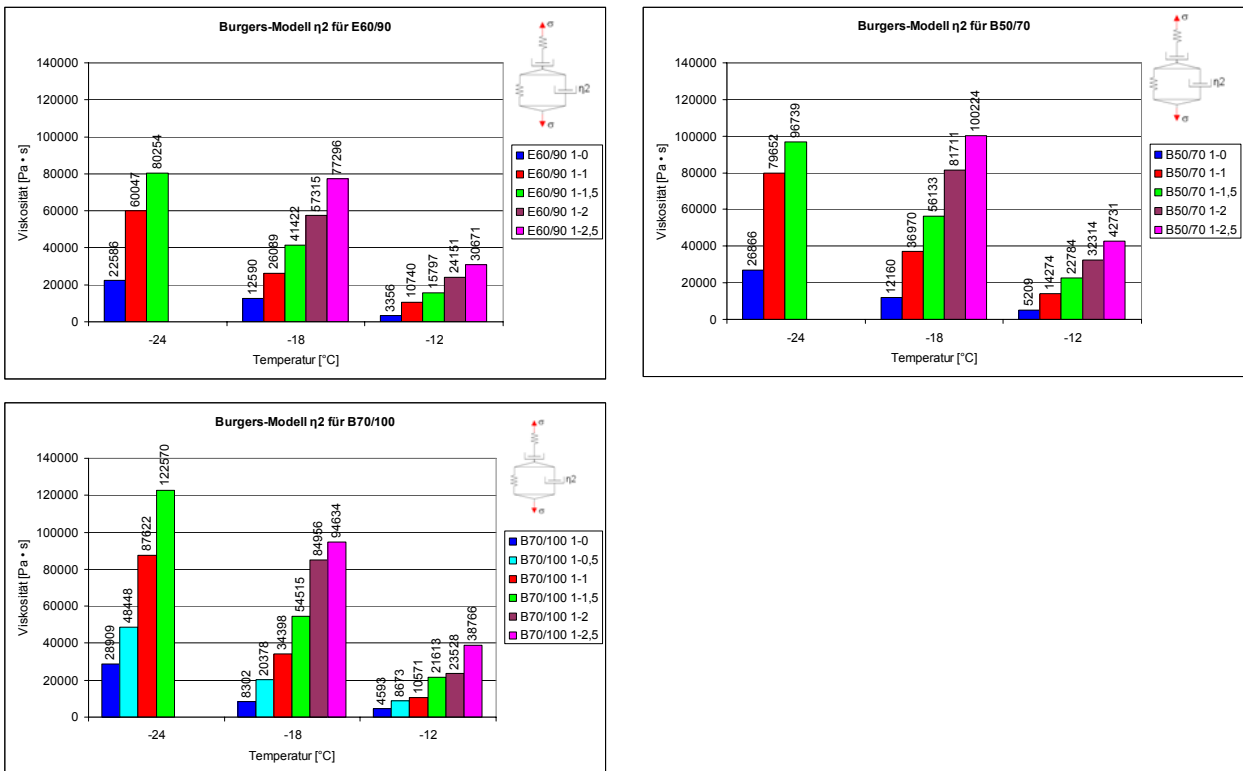


Abbildung 42: Viskosität  $\eta_2$  nach dem Burgers-Modell: E60/90, B50/70, B70/100

Tabelle 28: Änderung der Viskosität  $\eta_2$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt: E60/90

| $\eta_2$ nach Burgers-Modell E60/90 |        |        |        | $\eta_2$ nach Burgers-Modell E60/90<br>bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|-----------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                                  | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                              | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                                 | 22586  | 12590  | 3356   | 1:0                                                             | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                                 | 60047  | 26089  | 10740  | 1:1                                                             | 266%   | 207%   | 320%   |
| 1:1,5                               | 80254  | 41422  | 15797  | 1:1,5                                                           | 355%   | 329%   | 471%   |
| 1:2                                 |        | 57315  | 24151  | 1:2                                                             |        | 455%   | 720%   |
| 1:2,5                               |        | 77296  | 30671  | 1:2,5                                                           |        | 614%   | 914%   |

In Tabelle 28 findet man auf der linken Seite die Werte der Viskosität für die Bitumensorte E60/90 in Abhängigkeit vom Füllergehalt und der Temperatur. Auf der rechten

Seite ist die Zunahme der Viskosität  $\eta$  in Abhängigkeit des Füllergehaltes dargestellt. Bei Steigerung des Füllergehaltes von reinem Bitumen bis zum Maximum erhöht sich die Viskosität um 814%. Bei gleichen Bedingungen und einer Temperatur von -18 °C erhöht sich die Viskosität nur um den Faktor 6.

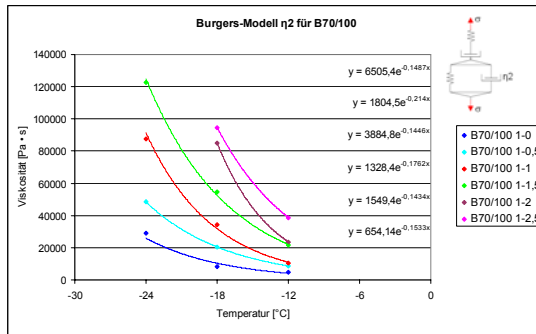
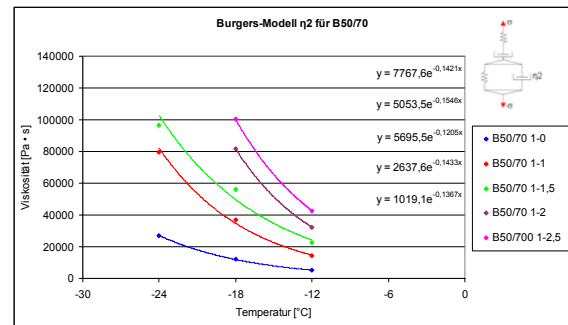
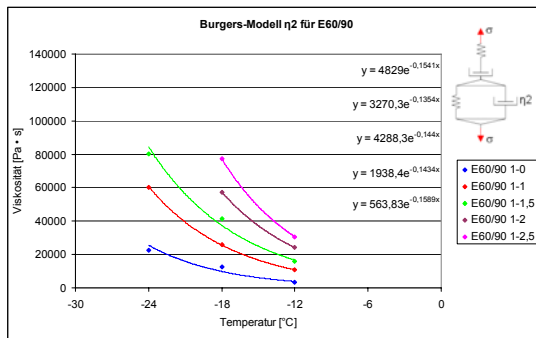
**Tabelle 29: Änderung der Viskosität  $\eta_2$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt B50/70**

| <b><math>\eta_2</math> nach Burgers-Modell B50/70</b> |        |        |        | <b><math>\eta_2</math> nach Burgers-Modell B50/70<br/>bezogen auf Bitumen rein</b> |        |        |        |
|-------------------------------------------------------|--------|--------|--------|------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                                                    | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                                                 | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                                                   | 26866  | 12160  | 5209   | 1:0                                                                                | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1                                                   | 79652  | 36970  | 14274  | 1:1                                                                                | 296%   | 304%   | 274%   |
| 1:1,5                                                 | 96739  | 56133  | 22784  | 1:1,5                                                                              | 360%   | 462%   | 437%   |
| 1:2                                                   |        | 81711  | 32314  | 1:2                                                                                |        | 672%   | 620%   |
| 1:2,5                                                 |        | 100224 | 42731  | 1:2,5                                                                              |        | 824%   | 820%   |

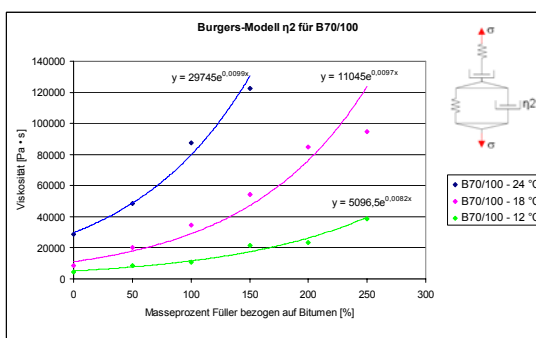
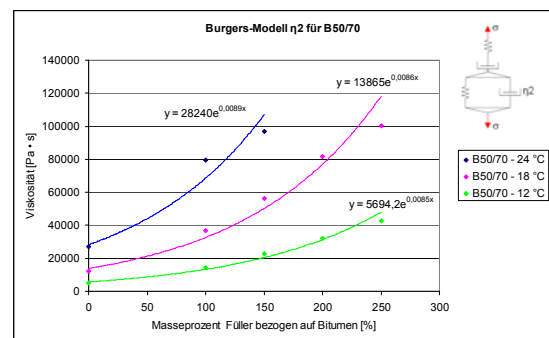
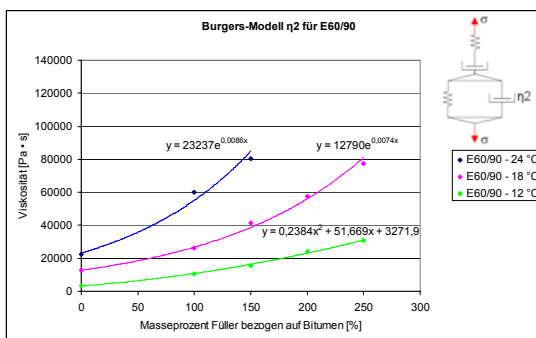
**Tabelle 30: Änderung der Viskosität  $\eta_2$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B70/100**

| <b><math>\eta_2</math> nach Burgers-Modell B70/100</b> |        |        |        | <b><math>\eta_2</math> nach Burgers-Modell B70/100<br/>bezogen auf Bitumen rein</b> |        |        |        |
|--------------------------------------------------------|--------|--------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV                                                     | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV                                                                                  | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0                                                    | 28909  | 8302   | 4593   | 1:0                                                                                 | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:0,5                                                  | 48448  | 20378  | 8673   | 1:0,5                                                                               | 168%   | 245%   | 189%   |
| 1:1                                                    | 87622  | 34398  | 10571  | 1:1                                                                                 | 303%   | 414%   | 230%   |
| 1:1,5                                                  | 122570 | 54515  | 21613  | 1:1,5                                                                               | 424%   | 657%   | 471%   |
| 1:2                                                    |        | 84956  | 23528  | 1:2                                                                                 |        | 1023%  | 512%   |
| 1:2,5                                                  |        | 94634  | 38766  | 1:2,5                                                                               |        | 1140%  | 844%   |

In den Tabellen 29 und 30 sind die Werte der Viskosität  $\eta_2$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt und der Temperatur für die Bitumensorten B50/70 und B70/100 dargestellt. Die Bitumensorten B50/70 und B70/100 zeigen ein ähnliches Verhalten wie die Bitumensorte E60/90. Die Viskosität steigt mit zunehmendem Füllergehalt und sinkt bei steigender Temperatur. In Abbildung 43 und 44 wird die Viskosität  $\eta_2$  in Abhängigkeit von Füllergehalt und der Prüftemperatur dargestellt.

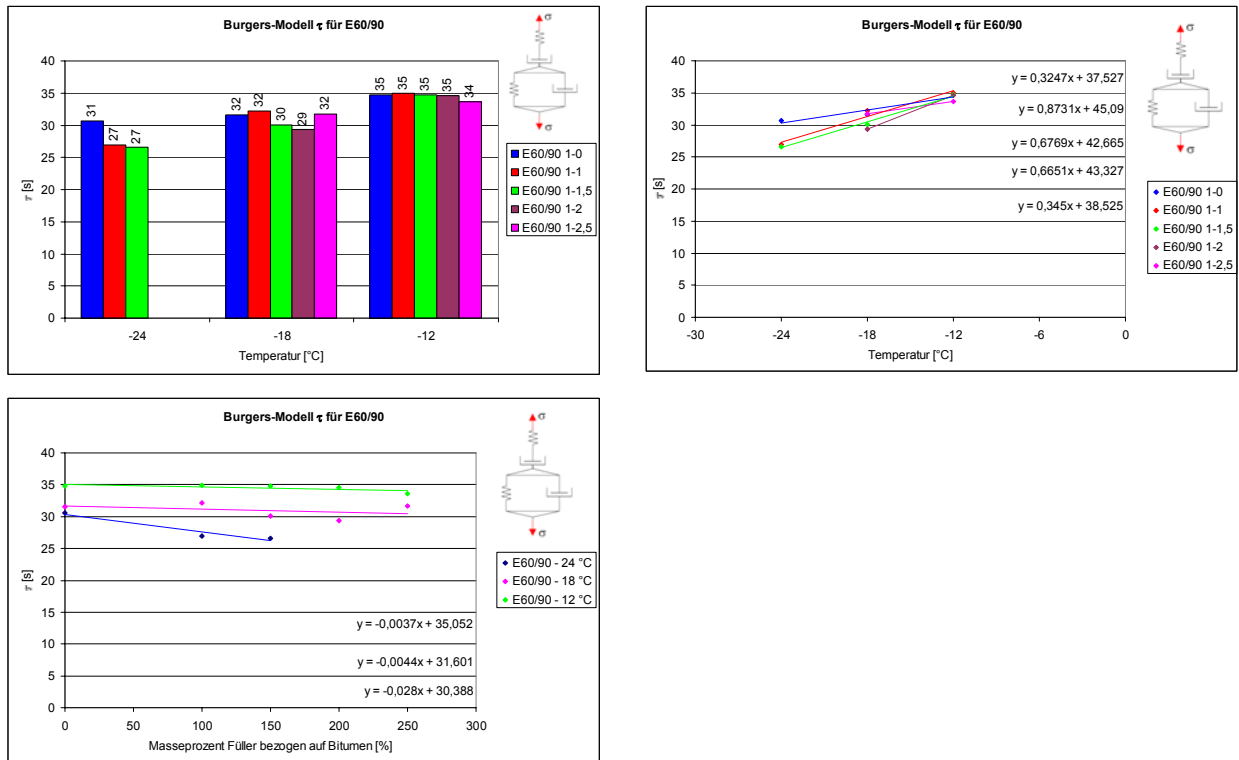


**Abbildung 43: Verlauf der Viskosität  $\eta_2$  in Abhängigkeit der Temperatur: B50/70, B70/100, E60/90**



**Abbildung 44: Verlauf der Viskosität  $\eta_2$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt: B50/70, B70/100, E60/90**

Der Kelvin-Voigt Anteil des Dehnungsverlaufs während der Belastung wird durch Gleichung 44 beschrieben. Setzt man in Gleichung 44 für  $t$  und  $\tau$  denselben Wert ein erhält man Gleichung 45. Gleichung 45 drückt aus, dass zu diesem Zeitpunkt bereits 63,2 % der Dehnung auftreten. Die Berechnung der Materialparameter  $E_2$  und  $\eta_2$  des Kelvin-Voigt-Modells erfolgt zu diesem Zeitpunkt. In Excel erhält man den Wert  $\eta$  indem man der Zeitachse solange folgt bis 63,2 % von  $\varepsilon_{KV}^V$  auftreten. Im Vierparametermodell von Burgers ist  $\tau$  kein eigenständiger Parameter. Da die Berechnung von  $E_2$  und  $\eta_2$  zu diesem Zeitpunkt erfolgt, wird hier exemplarisch  $\tau$  für die Bitumensorte E60/90 angegeben (siehe Abbildung 45).

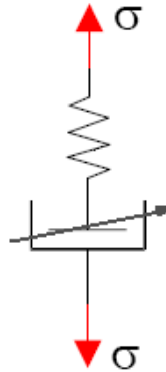


**Abbildung 45:  $\tau$  in Abhängigkeit der Temperatur,  $\tau$  in Abhängigkeit vom Füllergehalt für E60/90**

In Abbildung 45 sieht man, dass der Zeitpunkt  $\tau$ , also jener Zeitpunkt bei dem bereits 63,2 % der Dehnung des Kelvin-Voigt-Körpers auftreten, bei konstanter Temperatur vom Füllergehalt unabhängig ist. Bei höheren Temperaturen nimmt der Wert  $\tau$  leicht höhere Werte an.

### 3.6 Power-Law-Modell

Das Power-Law Modell ist ähnlich dem Maxwell-Modell aufgebaut. Die Grundbausteine des Power-Law Modells sind eine elastische Feder und ein nicht-linearer Dämpfer, wobei Feder und Dämpfer in Serie angeordnet sind (siehe Abbildung 46).



**Abbildung 46: Power-Law Modell [Lanschützer (2007)]**

Die Parameter  $H$  und  $p$  des Modells beschreiben das Kriechverhalten eines Stoffes über die gesamte Versuchszeit. Die Kriechnachgiebigkeit  $J$  ergibt sich aus den Verformungsanteilen der elastischen Feder und dem nicht-linearen Dämpfer. Die Herleitung der Parameter  $H$  und  $p$  aus der Kriechnachgiebigkeit erfolgte bereits in der Diplomarbeit von Herrn Lanschützer und wurde hier übernommen (Gleichung 50 bis 53). Es folgt somit für die Kriechnachgiebigkeit nach Gleichung 50:

$$J = J_0 + J_a \cdot \left(\frac{t}{\tau}\right)^k \quad \left[ \frac{1}{\text{MPa}} \right] \text{ bzw. } \left[ \frac{\text{mm}}{\text{MPa}} \right] \quad \text{Gleichung 50}$$

mit

$$J_0 = \frac{1}{E_0} \quad \text{elastischer Anteil}$$

$$J_a \cdot \left(\frac{t}{\tau}\right)^k \quad \text{viskoser Anteil}$$

$J_a$  initiale Kriechnachgiebigkeit [ $1/\text{MPa}$ ]

$k$  Parameter zur Beschreibung des nicht linearen Dämpfers [-]

$\tau$  charakteristischer Zeitwert zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Kriechprozesses

$t$  Zeit [s]

Durch Ableitung der Kriechnachgiebigkeit  $J$  nach der Zeit  $t$ , erhält man die Kriechrate  $dJ/dt$  wie in Gleichung 51 dargestellt zu:

$$\frac{dJ}{dt} = J_a \cdot k \cdot \frac{t^{k-1}}{\tau^k} \quad [1/\text{MPa}/\text{s}] \quad \text{Gleichung 51}$$

Durch Umformen ergibt sich:

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{J_a}{\tau^k} \cdot k \cdot t^{k-1} \quad [1/\text{MPa}/\text{s}] \quad \text{Gleichung 52}$$

Setzt man

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

und

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

erhält man die Parameter H und p zu:

$$\frac{dJ}{dt} = H \cdot t^p \quad \text{Gleichung 53}$$

### 3.6.1 Auswertungsmethodik des Power-Law-Modell

Die Berechnung der Werte H und p für unsere Versuche erfolgte automatisch durch ein FORTRAN Programm, welches von Dr. Roman Lackner am Institut für Festigkeitslehre programmiert wurde. Im nächsten Schritt wird nun erläutert, wie die Parameter H und p ermittelt werden. Beim Biegebalkenversuch erfolgt die Belastung der Probe durch einen luftgelagerten Stempel mit einer Last von 980 mN. Mit Hilfe der Biegebalkentheorie kann die Spannung in der Balkenmitte nach Gleichung 19 berechnet werden

Die Durchbiegung in der Mitte der Bitumenprobe beim Biegebalkenversuch beträgt nach Gleichung 54.

$$u = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot J} \quad [\text{mm}] \quad \text{Gleichung 54}$$

mit

P...Auflast [N]

l....Abstand zwischen den Auflagern [m]

E...E-Modul [MPa]

J...Trägheitsmoment [mm<sup>4</sup>]

Aus Gleichung 54 wird nun der E-Modul ausgedrückt

$$E = \frac{P \cdot l^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot u} \quad \text{Gleichung 55}$$

Setzt man Gleichung 19 und 55 in Gleichung 9 ein ergibt sich folgender Ausdruck:

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot h}{l^2} \cdot u \quad \text{Gleichung 56}$$

Die Dehnung zu einem bestimmten Zeitpunkt ergibt sich nach Gleichung 56 zu

$$\varepsilon(t) = \frac{6 \cdot h}{l^2} \cdot u(t) \quad \text{Gleichung 57}$$

Die Durchbiegung  $u(t)$  wird beim Biegebalkenversuch automatisch aufgezeichnet und ist somit bekannt.

$$J(t) = \frac{1}{E} = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} = \frac{4 \cdot b \cdot h^3}{P \cdot l^3} \cdot u(t) \quad \text{Gleichung 58}$$

Gleichung 58 beschreibt die Kriechnachgiebigkeit für verschiedene Zeitpunkte. Bei der Durchbiegungsmessung beträgt die Genauigkeit des Wegaufnehmers 1/1000 mm. Da die Verschiebungen mit der Zeit abklingen, wird die Berechnung der Neigung (=Kriechnachgiebigkeitsrate) immer schwieriger und ungenauer. Die Berechnung der Neigung im Messintervall erfolgt nun auf der Basis der Verschiebungsänderung (=d). Es wird also ein Messpunkt mit einer gewissen Anzahl von Datenpunkten links und rechts dieses Punktes betrachtet. Dieses Messintervall wird nun solange vergrößert, bis die Verschiebungsänderung mindestens einer vorgegebenen Größe entspricht. Der Parameter d kann im Inputfile eingestellt werden und stellt somit die Abbruchbedingung für die Vergrößerung des Messintervalls dar. Zwischen die Messpunkte wird, eine Näherungskurve gelegt. Die Funktion  $J = J(t)$  wird durch die quadratische Funktion

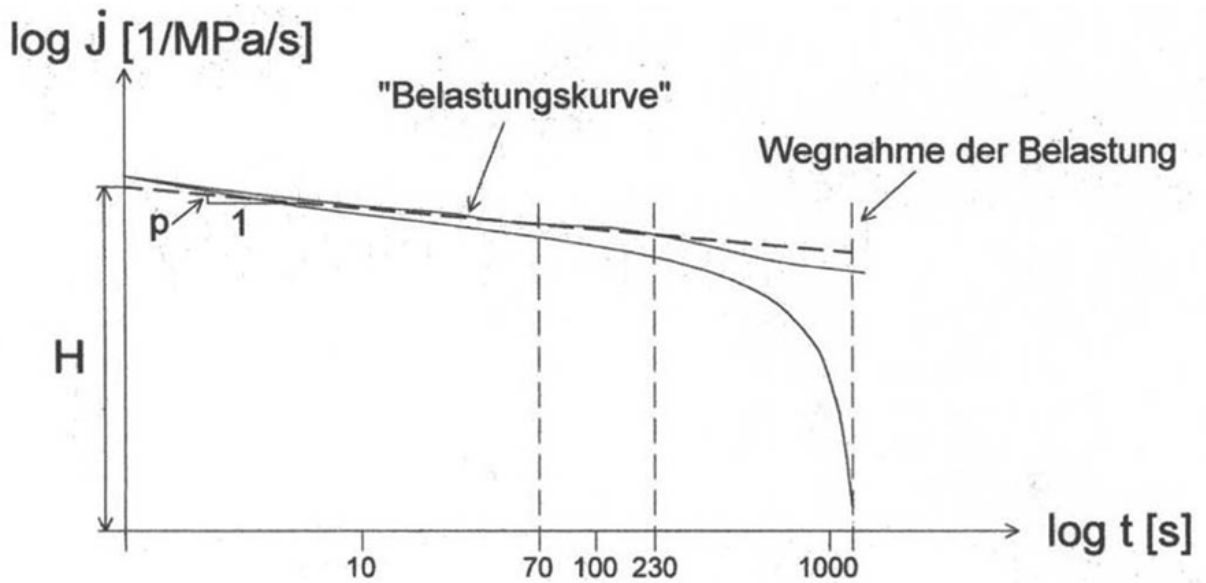
$$J(t) = a + b \cdot t + c \cdot t^2 \quad \text{Gleichung 60}$$

angenähert. Die unbekannten Parameter a, b, und c erhält man durch Minimierung des Fehlers zwischen den n Messpunkten und der quadratischen Funktion innerhalb des Messintervalls. Die Minimierung des Fehlers erhält man durch Anwendung der Gaußschen Minimumbedingung (siehe Gleichung 61).

$$Q = \sum_{i=\frac{n-1}{2}}^{i+\frac{n-1}{2}} [J_i - J^a(t_i)]^2 \rightarrow \text{Minimum} \quad \text{Gleichung 61}$$

Gleichung 61 sagt aus, dass die Summe der Quadrate der vertikalen Abweichung der Messwerte  $J_i$  und der approximierten Werten  $J^a(t_i)$  ein Minimum wird. Mit den errechneten Werten für a, b, und c erhält man durch Ableitung von Gleichung 61 die Nachgiebigkeitsrate zu

$$J^\bullet = \frac{dJ}{dt} = b + 2 \cdot c \cdot t \quad \text{Gleichung 62}$$

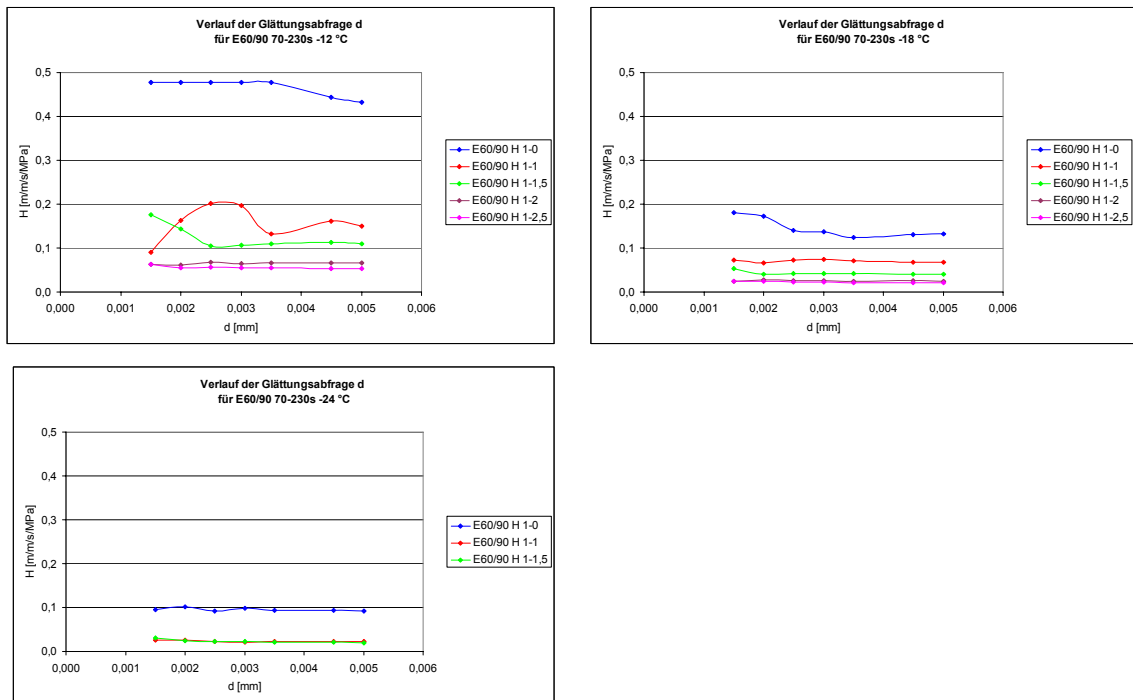


**Abbildung 47: Definition von H-Wert und p-Wert [Hopfgartner (2004)]**

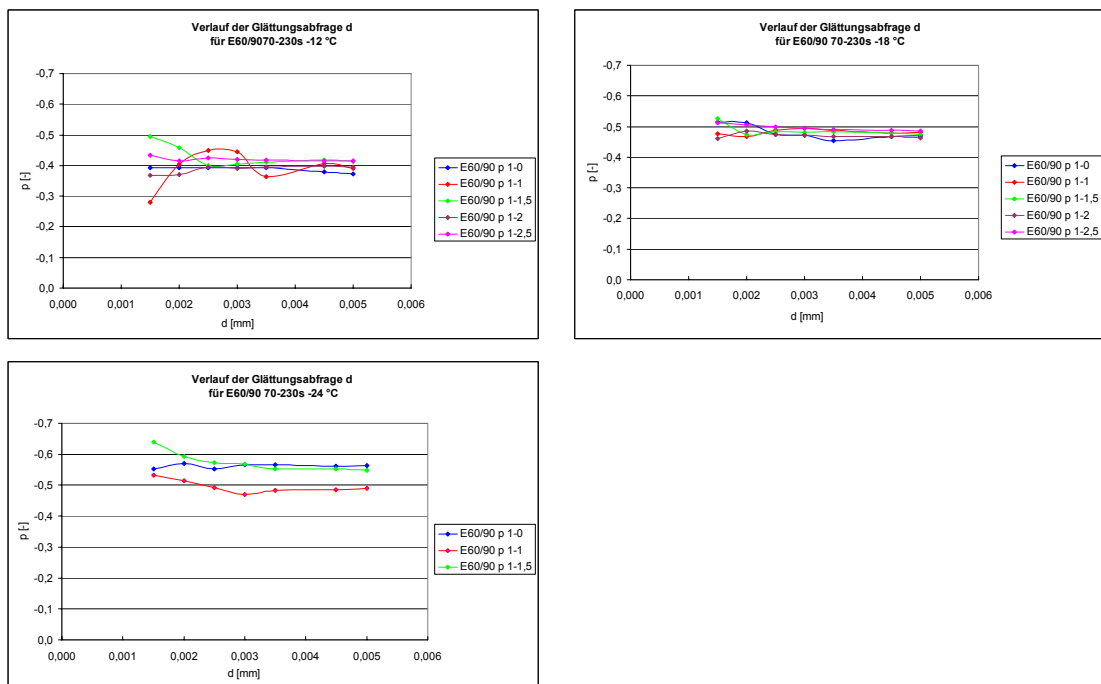
Die Definition der Power-Law Kennwerte H und p ist in Abbildung 47 dargestellt. Die Funktionswerte werden im Zeitintervall 70 und 230 Sekunden durch eine Gerade approximiert und bis zur Ordinate verlängert. Der H-Wert entspricht dem Funktionswert der Geraden zum Zeitpunkt  $t=1$  Sekunde. Der p-Wert entspricht der Steigung der Geraden.

### 3.6.2 Auswertung mit dem Power-Law-Modell

Die Auswertung der Versuchsdaten für die Bindemittelsorten E60/90, B50/70 und B70/100 erfolgt durch Bestimmung der im Power-Law Modell vorgestellten Parameter. Da die Verschiebungen mit der Zeit abklingen, wird die Berechnung der Kriechnachgiebigkeitsrate immer schwieriger und ungenauer. Die Berechnung der Kriechnachgiebigkeitsrate erfolgt nun auf der Basis der Verschiebungsänderung, die im Programm voreingestellt wird. Die H-Werte und die p-Werte wurden für die Bitumen-sorten B50/70, B70/100 und E60/90 bei  $-12^{\circ}\text{C}$ ,  $-18^{\circ}\text{C}$  und  $-24^{\circ}\text{C}$  für die unterschiedlichen Glättungsabfragen ermittelt. Es soll nun exemplarisch für die Bitumen-sorte E60/90 im Zeitintervall 70 bis 230 Sekunden bei den Prüf-temperaturen  $-12^{\circ}\text{C}$ ,  $-18^{\circ}\text{C}$  und  $-24^{\circ}\text{C}$  gezeigt werden wie sich die Parameter H in Abhängigkeit der Glättungsabfrage d verhält (Abbildung 48). Der Parameter p in Abhängigkeit der Glättungsabfrage d ist in Abbildung 49 dargestellt.



**Abbildung 48: H-Werte in Abhängigkeit von der Glättungsabfrage d für E60/90 bei -12 °C, -18 °C und -24 °C im Zeitintervall 70 - 230 Sekunden**



**Abbildung 49: p-Werte in Abhängigkeit von der Glättungsabfrage d für E60/90 bei -12 °C, -18 °C und -24 °C im Zeitintervall 70 - 230 Sekunden**

In den Tabellen 31 und 33 sind die H-Werte und p-Werte für die Bitumensorte E60/90 im Zeitintervall von 70 bis 230 Sekunden bei -12 °C in Abhängigkeit der unterschiedlichen Glättungsabfragen d enthalten. Die Tabellen 32 und 34 geben die prozentuelle Veränderung der Parameter H und p, bezogen auf die H-Werte und p-Werte bei einer Glättungsabfrage von d=0,0035 mm wieder. In Tabelle 32 sieht man, dass die H-Werte für die Mischungsverhältnisse 1:1,5 bis 1:2,5 bei einer Glättungsabfrage von d=0,003 mm um 1% bis 2% von den Bezugswerten bei d=0,0035 mm abweichen. Bei einer Glättungsabfrage von d=0,0025 mm und den gleichen Mischungsverhältnissen beträgt die Abweichung zwischen 1% und 5%. Die Abweichung bei einem Mischungsverhältnis von 1:1,5 und der Glättungsabfrage von d=0,002 mm beträgt 32%. Die Abweichung der H-Werte bei den Glättungsabfragen d=0,0045 mm und d=0,005 mm und den gleichen Mischungsverhältnissen beträgt 1% bis 3%. Die Abweichungen der p-Werte in Tabelle 34 zeigen ein ähnliches Verhalten wie die H-Werte in Tabelle 32. Für die Glättungsabfragen d=0,0025 mm bis d=0,005 mm beträgt die Abweichung der p-Werte für die Mischungsverhältnisse 1:1,5 bis 1:2,5 zwischen 1% und 3%.

**Tabelle 31: H-Werte E60/90 -12 °C für die verschiedenen Glättungsabfragen**

| H-Werte E60/90 -12 °C 70-230s |          |          |          |          |          |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| d                             | 1:0      | 1:1      | 1:1,5    | 1:2      | 1:2,5    |
| 0,0015                        | 0,477060 | 0,091083 | 0,176243 | 0,062187 | 0,062300 |
| 0,0020                        | 0,477060 | 0,162163 | 0,143810 | 0,061727 | 0,054960 |
| 0,0025                        | 0,477060 | 0,202137 | 0,104573 | 0,067127 | 0,057023 |
| 0,0030                        | 0,477060 | 0,197047 | 0,107240 | 0,064923 | 0,055120 |
| 0,0035                        | 0,477060 | 0,132460 | 0,109220 | 0,066213 | 0,054340 |
| 0,0045                        | 0,443510 | 0,161417 | 0,112763 | 0,066440 | 0,053250 |
| 0,0050                        | 0,432715 | 0,149283 | 0,109227 | 0,065770 | 0,053553 |

**Tabelle 32: H-Werte E60/90 -12 °C für die verschiedenen Glättungsabfragen**

| H-Werte E60/90 -12 °C 70-230s<br>bezogen auf d=0,0035 mm |      |      |       |      |       |
|----------------------------------------------------------|------|------|-------|------|-------|
| d                                                        | 1:0  | 1:1  | 1:1,5 | 1:2  | 1:2,5 |
| 0,0015                                                   | 100% | 69%  | 161%  | 94%  | 115%  |
| 0,0020                                                   | 100% | 122% | 132%  | 93%  | 101%  |
| 0,0025                                                   | 100% | 153% | 96%   | 101% | 105%  |
| 0,0030                                                   | 100% | 149% | 98%   | 98%  | 101%  |
| 0,0035                                                   | 100% | 100% | 100%  | 100% | 100%  |
| 0,0045                                                   | 93%  | 122% | 103%  | 100% | 98%   |
| 0,0050                                                   | 91%  | 113% | 100%  | 99%  | 99%   |

**Tabelle 33: p-Werte E60/90 -12 °C für die verschiedenen Glättungsabfragen**

| p-Werte E60/90 -12 °C 70-230s |           |           |           |           |           |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| d                             | 1:0       | 1:1       | 1:1,5     | 1:2       | 1:2,5     |
| 0,0015                        | -0,393770 | -0,280667 | -0,493533 | -0,368340 | -0,434360 |
| 0,0020                        | -0,393770 | -0,403103 | -0,459087 | -0,370887 | -0,414867 |
| 0,0025                        | -0,393770 | -0,449964 | -0,399663 | -0,395777 | -0,424533 |
| 0,0030                        | -0,393770 | -0,444377 | -0,404697 | -0,389870 | -0,419150 |
| 0,0035                        | -0,393770 | -0,364170 | -0,410757 | -0,396130 | -0,418147 |
| 0,0045                        | -0,378256 | -0,405790 | -0,418780 | -0,397660 | -0,414753 |
| 0,0050                        | -0,371755 | -0,390810 | -0,412923 | -0,396160 | -0,416193 |

**Tabelle 34: p-Werte E60/90 -12 °C für die verschiedenen Glättungsabfragen**

| p-Werte E60/90 -12 °C 70-230s<br>bezogen auf d=0,0035 mm |      |      |       |      |       |
|----------------------------------------------------------|------|------|-------|------|-------|
| d                                                        | 1:0  | 1:1  | 1:1,5 | 1:2  | 1:2,5 |
| 0,0015                                                   | 100% | 77%  | 120%  | 93%  | 104%  |
| 0,0020                                                   | 100% | 111% | 112%  | 94%  | 99%   |
| 0,0025                                                   | 100% | 124% | 97%   | 100% | 102%  |
| 0,0030                                                   | 100% | 122% | 99%   | 98%  | 100%  |
| 0,0035                                                   | 100% | 100% | 100%  | 100% | 100%  |
| 0,0045                                                   | 96%  | 111% | 102%  | 100% | 99%   |
| 0,0050                                                   | 94%  | 107% | 101%  | 100% | 100%  |

Die Definition der Power-Law Kennwerte H und p ist in Abbildung 47 dargestellt. Die Funktionswerte werden im Zeitintervall 70 und 230 Sekunden durch eine Gerade approximiert und bis zur Ordinate verlängert. Der H-Wert entspricht dem Funktionswert der Geraden zum Zeitpunkt  $t=1$  Sekunde. Der p-Wert entspricht der Steigung der Geraden. Im nachfolgendem Teil wird exemplarisch für die Bitumensorte E60/90 untersucht wie sich die H und p Werte ändern wenn man das Zeitintervall 70 bis 230 Sekunden verlässt. Die H-Werte und p-Werte wurden für  $d=0,0035$  mm und den angegebenen Zeitbereichen laut Tabelle 35 ermittelt.

**Tabelle 35: Zeitbereich [s] für die Ermittlung von H und p**

| $t_1-t_2$ | $t_1-t_2$ | $t_1-t_2$ | $t_1-t_2$ | $t_1-t_2$ | $t_1-t_2$ | $t_1-t_2$ | $t_1-t_2$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1-230     | 15-230    | 30-230    | 45-230    | 60-230    | 70-230    | 75-230    | 90-230    |
| 1-240     | 15-240    | 30-240    | 45-240    | 60-240    | 70-240    | 75-240    | 90-240    |

Abbildung 50 und 51 zeigen für die Bitumensorte E60/90 die Abhängigkeit von H und p vom Zeitintervall  $t_1$  bis 230 Sekunden.

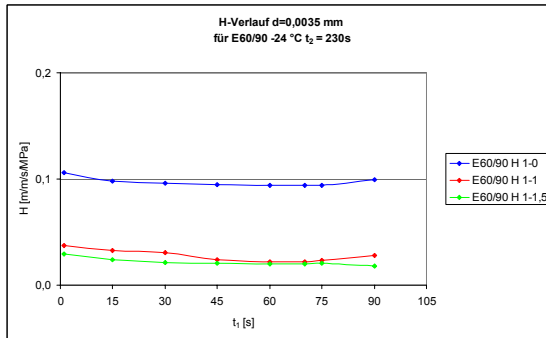
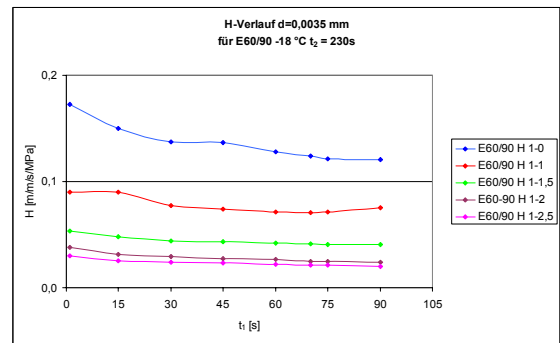
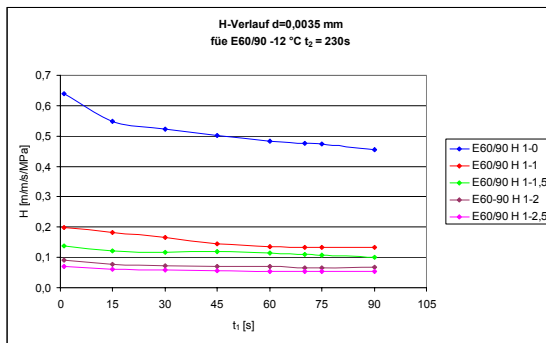


Abbildung 50: H-Verlauf E60/90 im Zeitintervall  $t_1$ -230s für -12 °C, -18 °C und -24 °C

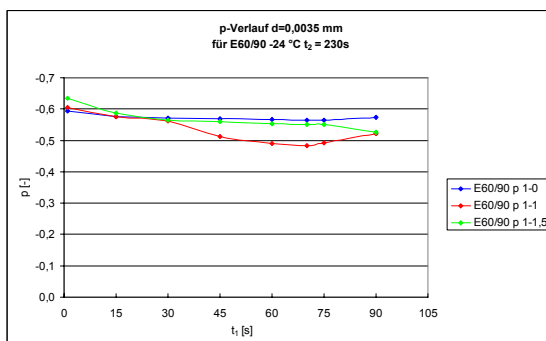
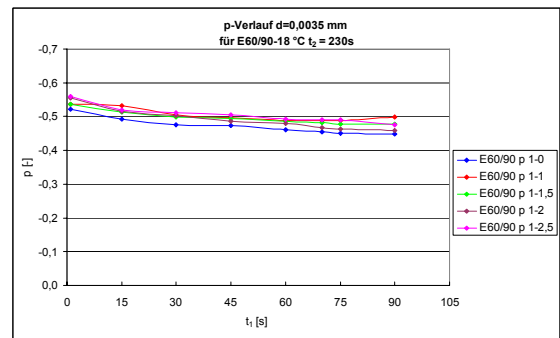
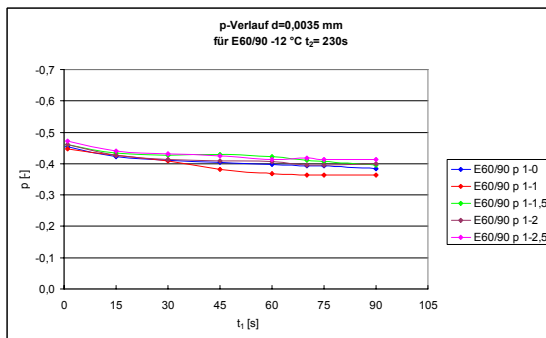


Abbildung 51: p-Verlauf E60/90 im Zeitintervall  $t_1$ -230s für -12 °C, -18 °C und -24 °C

Die Tabellen 36 und 38 zeigen die H-Werte und p-Werte in Abhängigkeit der Mischungsverhältnisse und der Zeitintervalle für die Bitumensorte E60/90 bei -12 °C. In den Tabellen 37 und 39 sind für alle Mischungsverhältnisse die prozentuellen Veränderungen der Parameter H und p in Abhängigkeit der Zeitintervalle angegeben. Die Werte für -18 °C und -24 °C sind im Anhang B enthalten. Als Vergleichswert wurde der Zeitbereich 70 bis 230 Sekunden gewählt. In Tabelle 37 sieht man, dass die Abweichung der H-Werte im Zeitintervall 60 bis 230 Sekunden für alle Mischungsverhältnisse zwischen 1% und 6% liegt. Im Zeitintervall 45 bis 230 Sekunden beträgt die maximale Abweichung 9%. Die maximale Abweichung der H-Werte im Zeitintervall 1 bis 230 Sekunden beträgt 59%. Die großen Unterschiede bei den H-Werten im Zeitbereich 1 bis 230 Sekunden gegenüber den restlichen Berechnungsintervallen ist auf die große Krümmung der Kriechkurve am Anfang der Versuche zurückzuführen. Im Zeitbereich 75 bis 230 Sekunden und 90 bis 230 Sekunden beträgt die maximale Abweichung 7%. Die p-Werte zeigen in Tabelle 39 den gleichen Trend. Die maximale Abweichung der p-Werte für alle Mischungsverhältnisse in den Zeitintervallen 45 bis 230 Sekunden bis 90 bis 230 Sekunden beträgt 5%. Die Parameter H und p zeigen für die Startwerte der Zeitbereiche  $t_1 = 45$  bis 90 Sekunden für alle Mischungsverhältnisse die geringsten Unterschiede auf.

**Tabelle 36: H-Werte E60/90 -12 °C für die verschiedenen Zeitintervalle**

| <b>H-Werte E60/90 -12 °C d=0,0035 mm</b> |          |          |          |          |          |
|------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $t_1$ -230                               | 1:0      | 1:1      | 1:1,5    | 1:2      | 1:2,5    |
| 1                                        | 0,638190 | 0,197903 | 0,138293 | 0,090443 | 0,070507 |
| 15                                       | 0,549185 | 0,182140 | 0,121390 | 0,077537 | 0,060457 |
| 30                                       | 0,521630 | 0,166147 | 0,117480 | 0,072323 | 0,057953 |
| 45                                       | 0,501485 | 0,143820 | 0,118707 | 0,070427 | 0,056113 |
| 60                                       | 0,483965 | 0,135527 | 0,115350 | 0,069617 | 0,053077 |
| 70                                       | 0,477060 | 0,132460 | 0,109200 | 0,066213 | 0,054340 |
| 75                                       | 0,473380 | 0,132607 | 0,107510 | 0,065700 | 0,052707 |
| 90                                       | 0,454320 | 0,132073 | 0,100750 | 0,067180 | 0,052820 |

**Tabelle 37: H-Werte E60/90 -12 °C für die verschiedenen Zeitintervalle**

| <b>H-Werte E60/90 -12 °C d=0,0035 mm<br/>bezogen auf 70-230 s</b> |      |      |       |      |       |
|-------------------------------------------------------------------|------|------|-------|------|-------|
| $t_1$ -230                                                        | 1:0  | 1:1  | 1:1,5 | 1:2  | 1:2,5 |
| 1                                                                 | 134% | 149% | 127%  | 137% | 130%  |
| 15                                                                | 115% | 138% | 111%  | 117% | 111%  |
| 30                                                                | 109% | 125% | 108%  | 109% | 107%  |
| 45                                                                | 105% | 109% | 109%  | 106% | 103%  |
| 60                                                                | 101% | 102% | 106%  | 105% | 98%   |
| 70                                                                | 100% | 100% | 100%  | 100% | 100%  |
| 75                                                                | 99%  | 100% | 98%   | 99%  | 97%   |
| 90                                                                | 95%  | 100% | 92%   | 101% | 97%   |

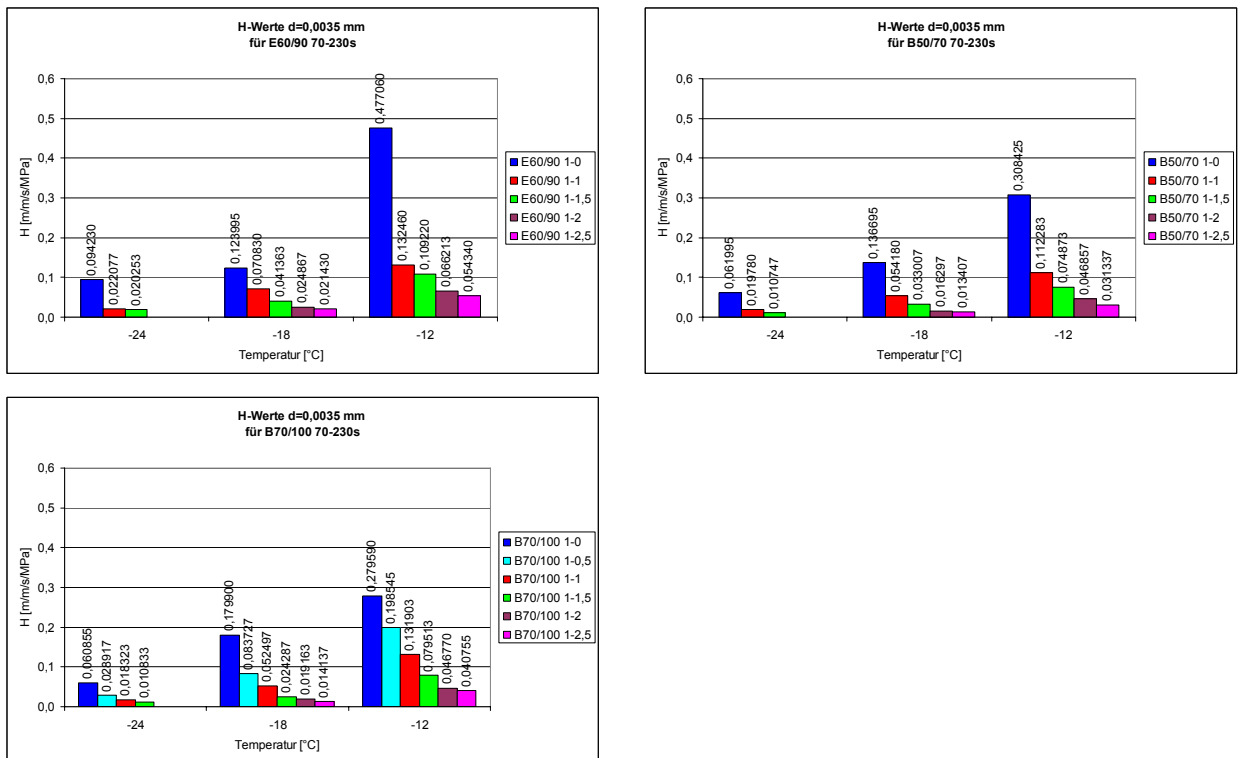
**Tabelle 38: p-Werte E60/90 -12 °C für die verschiedenen Zeitintervalle**

| <b>p-Werte E60/90 -12 °C d=0,0035 mm</b> |            |            |              |            |              |
|------------------------------------------|------------|------------|--------------|------------|--------------|
| <b>t<sub>1</sub>-230</b>                 | <b>1:0</b> | <b>1:1</b> | <b>1:1,5</b> | <b>1:2</b> | <b>1:2,5</b> |
| 1                                        | -0,453650  | -0,445990  | -0,460723    | -0,460247  | -0,472400    |
| 15                                       | -0,421970  | -0,427563  | -0,433103    | -0,427730  | -0,439930    |
| 30                                       | -0,411480  | -0,409513  | -0,426240    | -0,413447  | -0,431303    |
| 45                                       | -0,403605  | -0,380673  | -0,428090    | -0,408317  | -0,424837    |
| 60                                       | -0,396585  | -0,368663  | -0,421677    | -0,406067  | -0,413693    |
| 70                                       | -0,393770  | -0,364170  | -0,410757    | -0,396130  | -0,418147    |
| 75                                       | -0,392250  | -0,364410  | -0,406887    | -0,394757  | -0,412210    |
| 90                                       | -0,384255  | -0,363580  | -0,395197    | -0,399107  | -0,412703    |

**Tabelle 39: p-Werte E60/90 -12 °C für die verschiedenen Zeitintervalle**

| <b>p-Werte E60/90 -12 °C d=0,0035 mm</b> |            |            |              |            |              |
|------------------------------------------|------------|------------|--------------|------------|--------------|
| <b>bezogen auf 70-230 s</b>              |            |            |              |            |              |
| <b>t<sub>1</sub>-230</b>                 | <b>1:0</b> | <b>1:1</b> | <b>1:1,5</b> | <b>1:2</b> | <b>1:2,5</b> |
| 1                                        | 115%       | 122%       | 112%         | 116%       | 113%         |
| 15                                       | 107%       | 117%       | 105%         | 108%       | 105%         |
| 30                                       | 104%       | 112%       | 104%         | 104%       | 103%         |
| 45                                       | 102%       | 105%       | 104%         | 103%       | 102%         |
| 60                                       | 101%       | 101%       | 103%         | 103%       | 99%          |
| 70                                       | 100%       | 100%       | 100%         | 100%       | 100%         |
| 75                                       | 100%       | 100%       | 99%          | 100%       | 99%          |
| 90                                       | 98%        | 100%       | 96%          | 101%       | 99%          |

In Abbildung 52 sind die H-Werte in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis und der Prüftemperatur für die getesteten Bitumensorten E60/90, B50/70 und B70/100 angegeben. Unabhängig von der getesteten Bitumensorte nehmen die H-Werte mit zunehmender Temperatur zu. Erhöht man bei den Versuchen schrittweise den Füllergehalt, dann nehmen die H-Werte bei allen Temperaturen ab.



**Abbildung 52: H-Werte B50/70, B70/100, E60/90 für d = 0,0035 mm und t = 70-230 s**

In den Tabellen 40, 42 und 44 sind die H-Werte in Abhängigkeit vom Füllergehalt für die Bitumensorten E60/90, B50/70 und B70/100 dargestellt. Bei -12 °C und -18 °C beträgt die Abnahme des H-Wertes bei einem Mischungsverhältnis von 1:2,5 ca. 80% bis 90% gegenüber reinem Bitumen. Der Parameter H in Abhängigkeit der Temperatur ist in den Tabellen 41, 43 und 45 dargestellt. Als Bezugspunkt für die Berechnung wird die Temperatur -12 °C herangezogen. Bei allen geprüften Bitumensorten sinkt der H-Wert bei Abkühlung von -12 °C auf -24 °C auf ca. 15% bis 20% des Anfangswertes ab.

**Tabelle 40: Abnahme der H-Werte bei steigendem Füllergehalt; E60/90**

| H-Werte E60/90 |          |          |          | H-Werte E60/90 bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|----------------|----------|----------|----------|-----------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV             | -24 °C   | -18 °C   | -12 °C   | MV                                      | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0            | 0,094230 | 0,123995 | 0,477060 | 1:0                                     | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1            | 0,022077 | 0,070830 | 0,132460 | 1:1                                     | 23%    | 57%    | 28%    |
| 1:1,5          | 0,020253 | 0,041363 | 0,109220 | 1:1,5                                   | 21%    | 33%    | 23%    |
| 1:2            |          | 0,024867 | 0,066213 | 1:2                                     |        | 20%    | 14%    |
| 1:2,5          |          | 0,021430 | 0,054340 | 1:2,5                                   |        | 17%    | 11%    |

**Tabelle 41: Abnahme der H-Werte bei sinkender Temperatur; E60/90**

| H-Werte E60/90 |          |          |          | H-Werte E60/90 bezogen auf<br>-12 °C |        |        |        |
|----------------|----------|----------|----------|--------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV             | -24 °C   | -18 °C   | -12 °C   | MV                                   | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0            | 0,094230 | 0,123995 | 0,477060 | 1:0                                  | 20%    | 26%    | 100%   |
| 1:1            | 0,022077 | 0,070830 | 0,132460 | 1:1                                  | 17%    | 53%    | 100%   |
| 1:1,5          | 0,020253 | 0,041363 | 0,109220 | 1:1,5                                | 19%    | 38%    | 100%   |
| 1:2            |          | 0,024867 | 0,066213 | 1:2                                  |        | 38%    | 100%   |
| 1:2,5          |          | 0,021430 | 0,054340 | 1:2,5                                |        | 39%    | 100%   |

**Tabelle 42: Abnahme der H-Werte bei steigendem Füllergehalt; B50/70**

| H-Werte B50/70 |          |          |          | H-Werte B50/70 bezogen auf<br>Bitumen rein |        |        |        |
|----------------|----------|----------|----------|--------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV             | -24 °C   | -18 °C   | -12 °C   | MV                                         | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0            | 0,061995 | 0,136695 | 0,308425 | 1:0                                        | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1            | 0,019780 | 0,054180 | 0,112283 | 1:1                                        | 32%    | 40%    | 36%    |
| 1:1,5          | 0,010747 | 0,033007 | 0,074873 | 1:1,5                                      | 17%    | 24%    | 24%    |
| 1:2            |          | 0,016297 | 0,046857 | 1:2                                        |        | 12%    | 15%    |
| 1:2,5          |          | 0,013407 | 0,031337 | 1:2,5                                      |        | 10%    | 10%    |

**Tabelle 43: Abnahme der H-Werte bei sinkender Temperatur; B50/70**

| H-Werte B50/70 |          |          |          | H-Werte B50/70 bezogen auf<br>-12 °C |        |        |        |
|----------------|----------|----------|----------|--------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV             | -24 °C   | -18 °C   | -12 °C   | MV                                   | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0            | 0,061995 | 0,136695 | 0,308425 | 1:0                                  | 20%    | 44%    | 100%   |
| 1:1            | 0,019780 | 0,054180 | 0,112283 | 1:1                                  | 18%    | 48%    | 100%   |
| 1:1,5          | 0,010747 | 0,033007 | 0,074873 | 1:1,5                                | 14%    | 44%    | 100%   |
| 1:2            |          | 0,016297 | 0,046857 | 1:2                                  |        | 35%    | 100%   |
| 1:2,5          |          | 0,013407 | 0,031337 | 1:2,5                                |        | 43%    | 100%   |

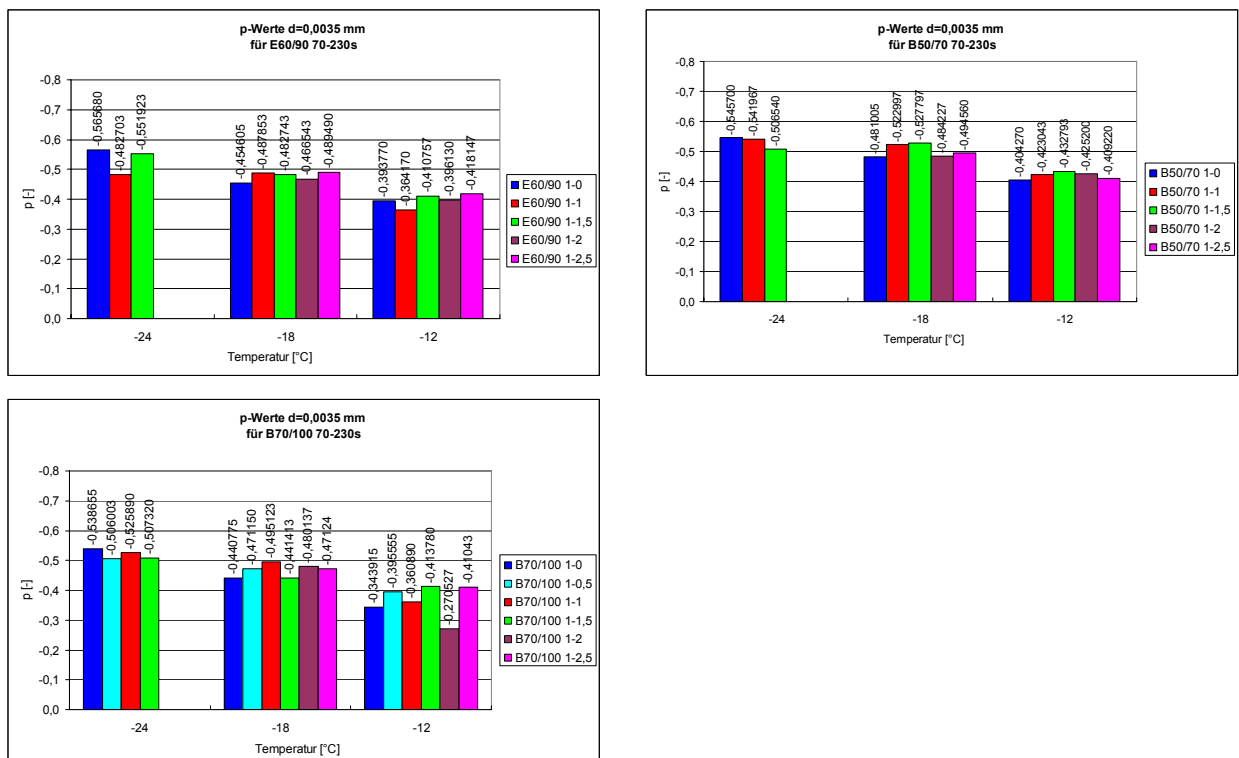
**Tabelle 44: Abnahme der H-Werte bei steigendem Füllergehalt; B70/100**

| H-Werte B70/100 |          |          |          | H-Werte B70/100 bezogen auf<br>Bitumen rein |        |        |        |
|-----------------|----------|----------|----------|---------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV              | -24 °C   | -18 °C   | -12 °C   | MV                                          | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0             | 0,060855 | 0,179900 | 0,279590 | 1:0                                         | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:0,5           | 0,028917 | 0,083727 | 0,198545 | 1:0,5                                       | 48%    | 47%    | 71%    |
| 1:1             | 0,018323 | 0,052497 | 0,131903 | 1:1                                         | 30%    | 29%    | 47%    |
| 1:1,5           | 0,010833 | 0,024287 | 0,079513 | 1:1,5                                       | 18%    | 14%    | 28%    |
| 1:2             |          | 0,019163 | 0,046770 | 1:2                                         |        | 11%    | 17%    |
| 1:2,5           |          | 0,014137 | 0,040755 | 1:2,5                                       |        | 8%     | 15%    |

**Tabelle 45: Abnahme der H-Werte bei sinkender Temperatur; B70/100**

| H-Werte B70/100 |          |          |          | H-Werte B70/100 bezogen auf -12 °C |        |        |        |
|-----------------|----------|----------|----------|------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV              | -24 °C   | -18 °C   | -12 °C   | MV                                 | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0             | 0,060855 | 0,179900 | 0,279590 | 1:0                                | 22%    | 64%    | 100%   |
| 1:0,5           | 0,028917 | 0,083727 | 0,198545 | 1:0,5                              | 15%    | 42%    | 100%   |
| 1:1             | 0,018323 | 0,052497 | 0,131903 | 1:1                                | 14%    | 0%     | 100%   |
| 1:1,5           | 0,010833 | 0,024287 | 0,079513 | 1:1,5                              | 14%    | 31%    | 100%   |
| 1:2             |          | 0,019163 | 0,046770 | 1:2                                |        | 41%    | 100%   |
| 1:2,5           |          | 0,014137 | 0,040755 | 1:2,5                              |        | 35%    | 100%   |

Der zweite Parameter im Power-Law Modell ist der p-Wert. Der Parameter p beschreibt den Einfluss des nichtlinearen Dämpfers im Modell. In Abbildung 51 sind die p-Werte der geprüften Bitumensorten in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis und der Temperatur dargestellt. Die p-Werte sind Temperaturabhängig. Bei höheren Temperaturen nehmen die p-Werte für alle Mischungsverhältnisse ab. Der p-Wert zeigt, abgesehen von kleinen Schwankungen, einen konstanten Verlauf in Abhängigkeit vom Füllergehalt.



**Abbildung 51: p-Werte B50/70, B70/100, E60/90 für d = 0,0035 mm und t=70-230 s**

Die genaue Gegenüberstellung der Zahlenwerte für die geprüften Bitumensorten in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis ist in den Tabellen 46, 48 und 50 angegeben. Bei Erhöhung des Füllergehaltes von reinem Bitumen auf ein Mischungsverhältnis von 1:1,5 schwanken die p-Werte um ca. 5% bis 20%. Dieser Trend gilt für alle getesteten Bitumensorten. In den Tabellen 47, 49 und 51 werden die p-Werte in Abhängigkeit der Prüftemperatur dargestellt. Als Bezugspunkt für die Berechnung werden die Werte bei -12 °C verwendet. Mit sinkender Temperatur steigen die p-Werte für alle Bitumensorten an. Die Steigerung der p-Werte bei -24 °C beträgt ungefähr 15% bis 50% bezogen auf die Werte bei -12 °C.

**Tabelle 46: Abnahme der p-Werte bei steigendem Füllergehalt; E60/90**

| p-Werte E60/90 |           |           |           | p-Werte E60/90 bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV             | -24 °C    | -18 °C    | -12 °C    | MV                                      | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0            | -0,565680 | -0,454605 | -0,393770 | 1:0                                     | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1            | -0,482703 | -0,487853 | -0,364170 | 1:1                                     | 85%    | 107%   | 92%    |
| 1:1,5          | -0,551923 | -0,482743 | -0,410757 | 1:1,5                                   | 98%    | 106%   | 104%   |
| 1:2            |           | -0,466543 | -0,396130 | 1:2                                     |        | 103%   | 101%   |
| 1:2,5          |           | -0,489490 | -0,418147 | 1:2,5                                   |        | 108%   | 106%   |

**Tabelle 47: Abnahme der p-Werte bei sinkender Temperatur; E60/90**

| p-Werte E60/90 |           |           |           | p-Werte E60/90 bezogen auf -12 °C |        |        |        |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------|--------|--------|--------|
| MV             | -24 °C    | -18 °C    | -12 °C    | MV                                | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0            | -0,565680 | -0,454605 | -0,393770 | 1:0                               | 144%   | 115%   | 100%   |
| 1:1            | -0,482703 | -0,487853 | -0,364170 | 1:1                               | 133%   | 134%   | 100%   |
| 1:1,5          | -0,551923 | -0,482743 | -0,410757 | 1:1,5                             | 134%   | 118%   | 100%   |
| 1:2            |           | -0,466543 | -0,396130 | 1:2                               |        | 118%   | 100%   |
| 1:2,5          |           | -0,489490 | -0,418147 | 1:2,5                             |        | 117%   | 100%   |

**Tabelle 48: Abnahme der p-Werte bei steigendem Füllergehalt; B50/70**

| p-Werte B50/70 |           |           |           | p-Werte B50/70 bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV             | -24 °C    | -18 °C    | -12 °C    | MV                                      | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0            | -0,545700 | -0,481005 | -0,404270 | 1:0                                     | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:1            | -0,541967 | -0,522997 | -0,423043 | 1:1                                     | 99%    | 109%   | 105%   |
| 1:1,5          | -0,506540 | -0,527797 | -0,432793 | 1:1,5                                   | 93%    | 110%   | 107%   |
| 1:2            |           | -0,484227 | -0,425200 | 1:2                                     |        | 101%   | 105%   |
| 1:2,5          |           | -0,494560 | -0,409220 | 1:2,5                                   |        | 103%   | 101%   |

**Tabelle 49: Abnahme der p-Werte bei sinkender Temperatur; B50/70**

| p-Werte B50/70 |           |           |           | p-Werte B50/70 bezogen auf -12 °C |        |        |        |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------|--------|--------|--------|
| MV             | -24 °C    | -18 °C    | -12 °C    | MV                                | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0            | -0,545700 | -0,481005 | -0,404270 | 1:0                               | 135%   | 119%   | 100%   |
| 1:1            | -0,541967 | -0,522997 | -0,423043 | 1:1                               | 128%   | 124%   | 100%   |
| 1:1,<br>5      | -0,506540 | -0,527797 | -0,432793 | 1:1,<br>5                         | 117%   | 122%   | 100%   |
| 1:2            |           | -0,484227 | -0,425200 | 1:2                               |        | 114%   | 100%   |
| 1:2,<br>5      |           | -0,494560 | -0,409220 | 1:2,<br>5                         |        | 121%   | 100%   |

**Tabelle 50: Abnahme der p-Werte bei steigendem Füllergehalt; B70/100**

| p-Werte B70/100 |           |           |           | p-Werte B70/100 bezogen auf Bitumen rein |        |        |        |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|------------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV              | -24 °C    | -18 °C    | -12 °C    | MV                                       | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0             | -0,538655 | -0,440775 | -0,343915 | 1:0                                      | 100%   | 100%   | 100%   |
| 1:0,<br>5       | -0,506003 | -0,471150 | -0,395555 | 1:0,<br>5                                | 94%    | 107%   | 115%   |
| 1:1             | -0,525890 | -0,495123 | -0,360890 | 1:1                                      | 98%    | 112%   | 105%   |
| 1:1,<br>5       | -0,507320 | -0,441413 | -0,413780 | 1:1,<br>5                                | 94%    | 100%   | 120%   |
| 1:2             |           | -0,480137 | -0,270527 | 1:2                                      |        | 109%   | 79%    |
| 1:2,<br>5       |           | -0,471240 | -0,410430 | 1:2,<br>5                                |        | 107%   | 119%   |

**Tabelle 51: Abnahme der p-Werte bei sinkender Temperatur; B70/100**

| p-Werte B70/100 |           |           |           | p-Werte B70/100 bezogen auf -12 °C |        |        |        |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|------------------------------------|--------|--------|--------|
| MV              | -24 °C    | -18 °C    | -12 °C    | MV                                 | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0             | -0,538655 | -0,440775 | -0,343915 | 1:0                                | 157%   | 128%   | 100%   |
| 1:0,<br>5       | -0,506003 | -0,471150 | -0,395555 | 1:0,<br>5                          | 128%   | 119%   | 100%   |
| 1:1             | -0,525890 | -0,495123 | -0,360890 | 1:1                                | 146%   | 137%   | 100%   |
| 1:1,<br>5       | -0,507320 | -0,441413 | -0,413780 | 1:1,<br>5                          | 123%   | 107%   | 100%   |
| 1:2             |           | -0,480137 | -0,270527 | 1:2                                |        | 177%   | 100%   |
| 1:2,<br>5       |           | -0,471240 | -0,410430 | 1:2,<br>5                          |        | 115%   | 100%   |

Die Parameter H und p werden in den nachfolgenden Abbildungen 53 und 54 in Abhängigkeit der Prüftemperatur dargestellt. Die H-Werte werden als logarithmische Größen dargestellt. Der Verlauf des H-Wertes bzw. des p-Wertes über der Temperatur wird durch lineare Funktionen dargestellt.

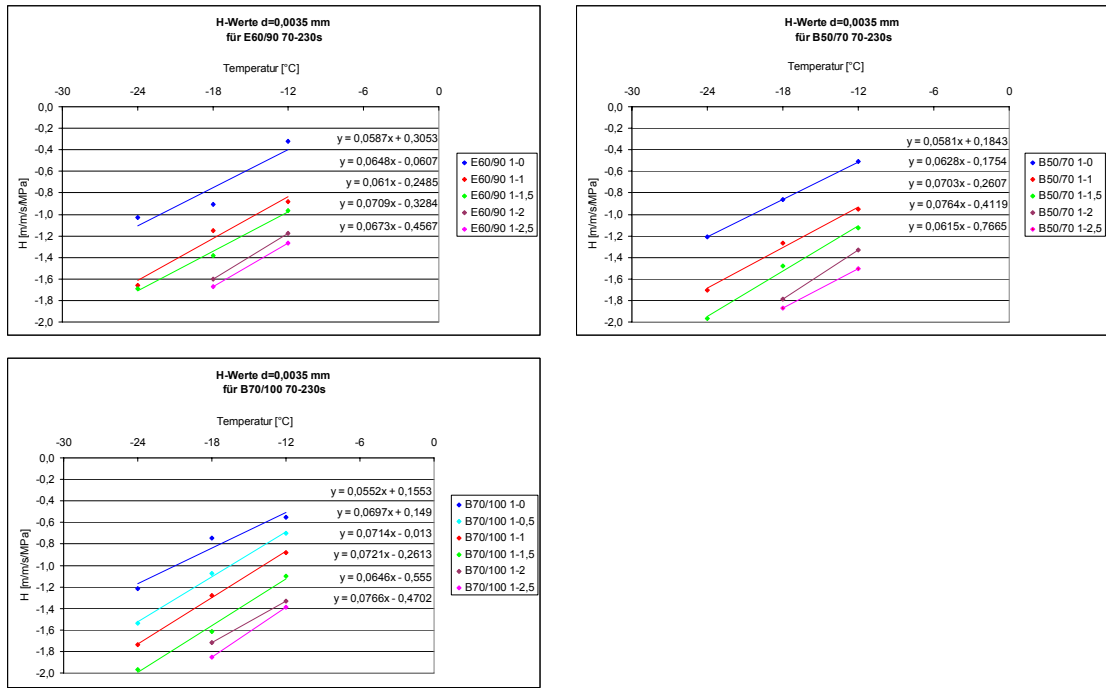
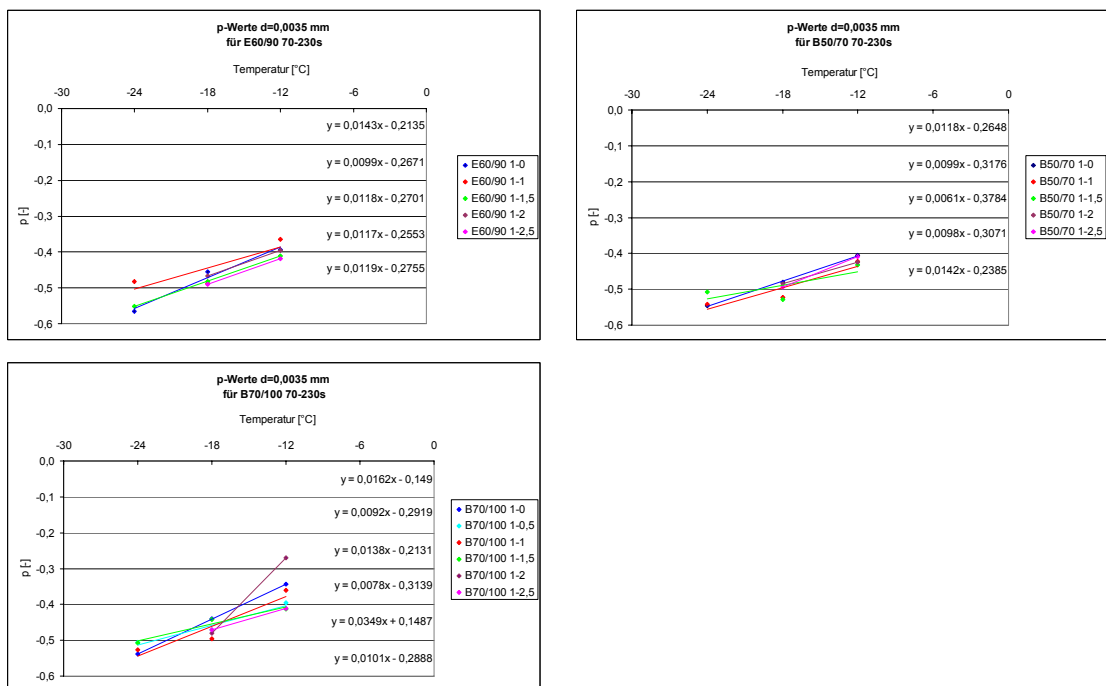


Abbildung 53: H-Verlauf in Abhängigkeit der Temperatur: B50/70, B70/100, E60/90



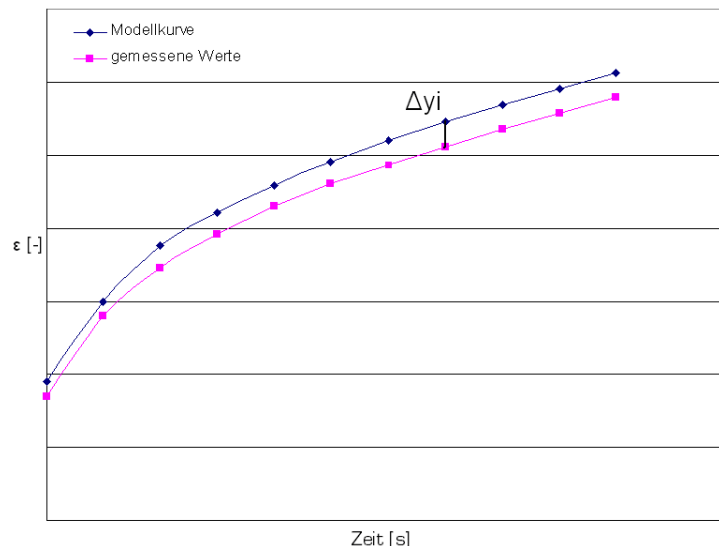
**Abbildung 54: p-Verlauf in Abhängigkeit der Temperatur: B50/70, B70/100, E60/90**

## 4. GEGENÜBERSTELLUNG VON MODELL UND VERSUCH

Mit Hilfe des BBR-Versuchs wurden die Bitumensorten B70/100, B50/70 und E60/90 und zugehöriger Mastix bei -12 °C, -18 °C und -24 °C untersucht. Trägt man die Dehnung der einzelnen BBR-Versuche über der Zeit auf, erhält man für jede Probe die Kriechkurve. In diesem Kapitel soll nun exemplarisch für das Maxwell-Modell und das Burgers-Modell gezeigt werden, wie gut die Kriechkurven dieser beiden Modelle (=Modellkurve) die Kriechkurven der BBR-Versuche wiedergeben.

### 4.1 Auswertungsmethodik der Gegenüberstellung

In Abbildung 55 sieht man, dass die Modellkurve für jeden Messpunkt  $i$  um einen Betrag  $\Delta y_i$  von den gemessenen Versuchswerten abweichen kann.



**Abbildung 55: Gegenüberstellung Modellkurve und der gemessenen Werte**

Der normierte Abstand für den Punkt  $i$  berechnet sich nach Formel 62:

$$\Delta y_{norm,i} = \frac{\sqrt{(y_{mess,i} - y_{mod,i})^2}}{y_{mod,i}} \quad \text{Gleichung 62}$$

Multipliziert man  $y_{norm,i}$  mit dem Faktor 100 erhält man die prozentuelle Abweichung. Um die Kriechkurve von Modell und Versuch miteinander zu vergleichen, werden die normierten Abstände  $y_{norm,i}$  laut Gleichung 63 für die gesamte Versuchsdauer aufsummiert.

$$S_y = \sum_{i=0}^n \Delta y_{norm,i} \quad \text{Gleichung 63}$$

Dividiert man Gleichung 63 durch die Anzahl der Messpunkte (=n) erreicht man eine Unabhängigkeit von den Messpunkten. Dieser Wert stellt die mittlere, relative

Abweichung der Messpunkte von der Modellkurve dar und ist in Gleichung 64 angegeben.

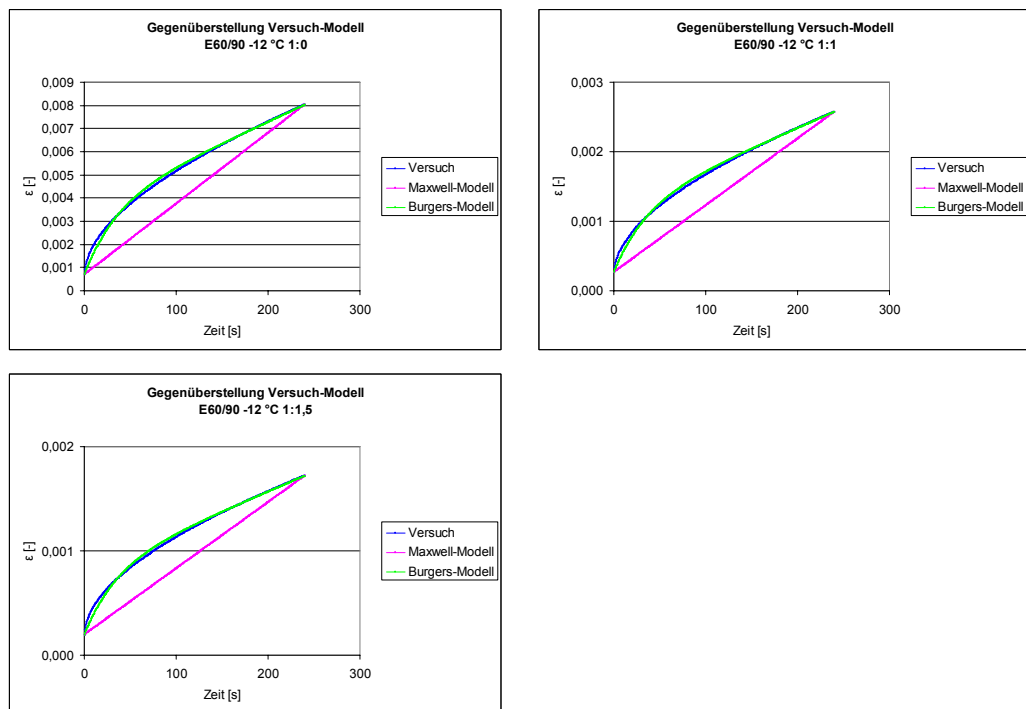
$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=0}^n \sqrt{(y_{\text{mess},i} - y_{\text{mod},i})^2}}{n} \cdot 100 \quad [\%]$$

Gleichung 64

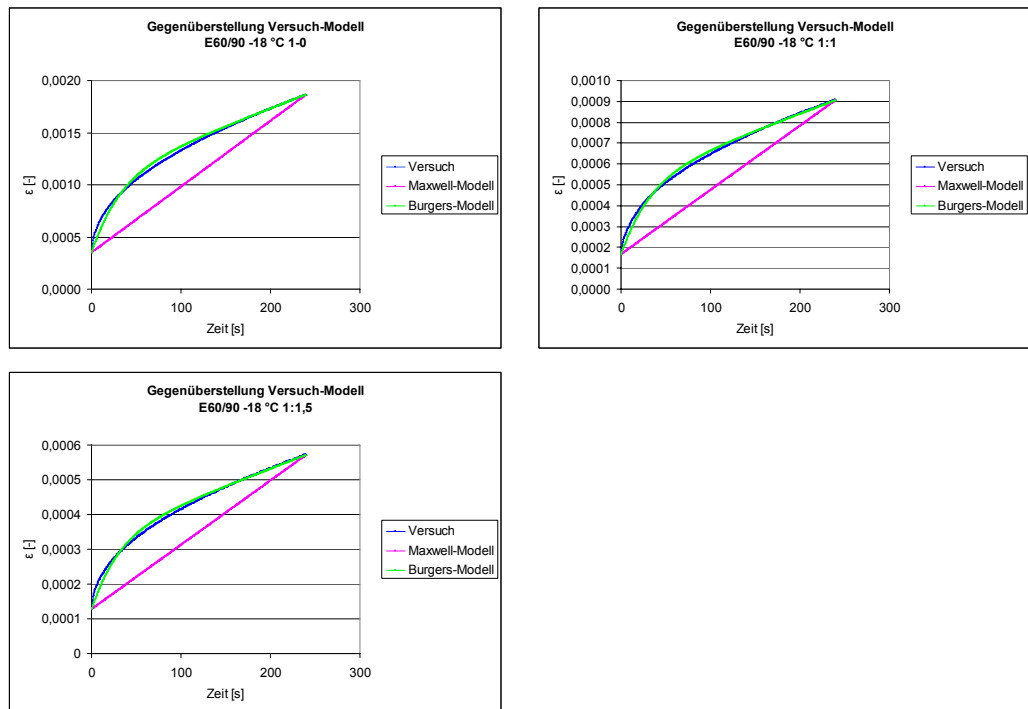
[Hofko (2006)]

#### 4.1.1 Auswertung der Kurzzeitkriechversuche

Die Beurteilung des Tieftemperaturverhaltens von Bitumen und Mastix erfolgt am Bending Beam Rheometer. Die Prüfvorschriften für diesen Versuch sind in der ÖNORM EN 14771 geregelt. Bei den Kurzzeitversuchen beträgt die Belastungsdauer somit 240 Sekunden. In Abbildung 56 und 57 sind exemplarisch die Kriechkurven für die Bitumensorte E60/90 bei -12 °C und -18 °C und den Mischungsverhältnissen 1:0, 1:1 und 1:1,5 dargestellt. Die mittlere prozentuelle Abweichung für die jeweiligen Bitumensorten ist in den nachfolgenden Tabellen 52 bis 54 angegeben. Wie man in Abbildung 56 und 57 sieht, stellt das Burgers-Modell das Kriechverhalten der Versuche gut dar. Das Maxwell-Modell kann aufgrund der konstanten Kriech-geschwindigkeit die Kriechkurve der BBR-Versuche nicht ausreichend genug beschreiben.



**Abbildung 56: Gegenüberstellung Versuch - Modell für E60/90 1:0, 1:1, 1:1,5 bei -12 °C**



**Abbildung 57: Gegenüberstellung Versuch - Modell für E60/90 1:0, 1:1, 1:1,5 bei -18 °C**

**Tabelle 52: mittlere prozentuelle Abweichung; E60/90**

| Maxwell-Modell |        |        |        | Burgers-Modell |        |        |        |
|----------------|--------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------|
| MV             | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV             | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0            | 27,1%  | 30,9%  | 36,8%  | 1:0            | 2,3%   | 2,6%   | 3,0%   |
| 1:1            | 22,4%  | 31,4%  | 34,0%  | 1:1            | 1,7%   | 2,3%   | 2,7%   |
| 1:1,5          | 22,5%  | 27,9%  | 33,8%  | 1:1,5          | 1,8%   | 2,2%   | 2,7%   |
| 1:2            |        | 29,3%  | 31,8%  | 1:2            |        | 2,6%   | 2,7%   |
| 1:2,5          |        | 26,0%  | 31,8%  | 1:2,5          |        | 2,7%   | 2,7%   |

**Tabelle 53: mittlere prozentuelle Abweichung; B50/70**

| Maxwell-Modell |        |        |        | Burgers-Modell |        |        |        |
|----------------|--------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------|
| MV             | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV             | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0            | 25,3%  | 31,6%  | 36,7%  | 1:0            | 2,0%   | 2,5%   | 3,1%   |
| 1:1            | 20,5%  | 27,6%  | 34,8%  | 1:1            | 1,6%   | 2,3%   | 2,8%   |
| 1:1,5          | 19,7%  | 26,2%  | 32,6%  | 1:1,5          | 1,5%   | 2,3%   | 2,7%   |
| 1:2            |        | 24,1%  | 30,9%  | 1:2            |        | 2,2%   | 2,5%   |
| 1:2,5          |        | 23,2%  | 29,9%  | 1:2,5          |        | 1,9%   | 2,5%   |

**Tabelle 54: mittlere prozentuelle Abweichung; B70/100**

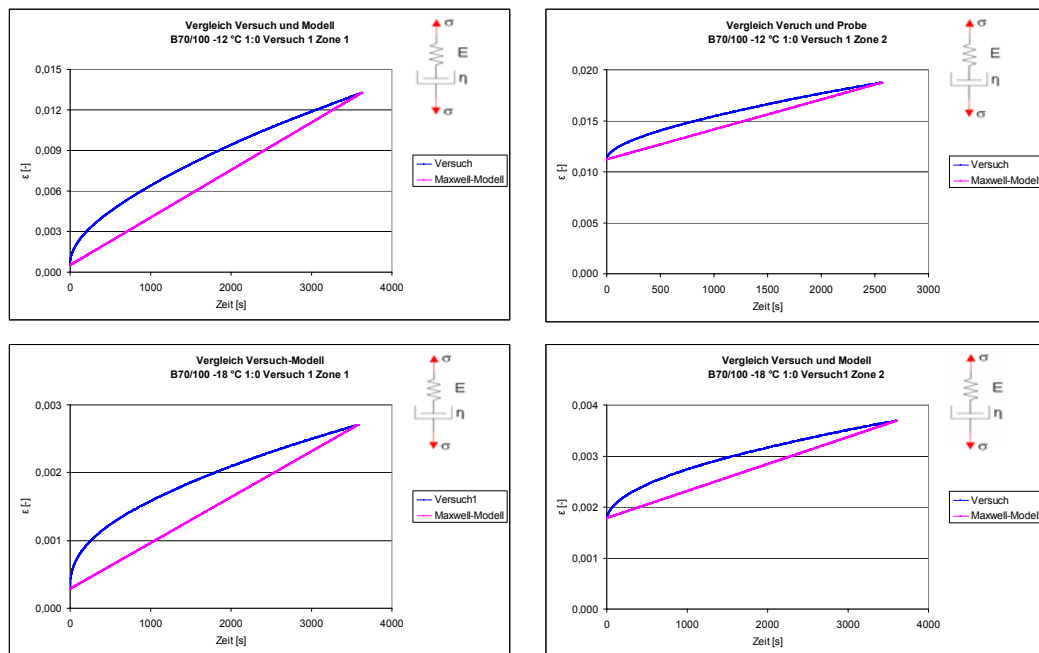
| Maxwell-Modell |        |        |        | Burgers-Modell |        |        |        |
|----------------|--------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------|
| MV             | -24 °C | -18 °C | -12 °C | MV             | -24 °C | -18 °C | -12 °C |
| 1:0            | 23,9%  | 35,3%  | 35,3%  | 1:0            | 2,0%   | 2,8%   | 3,0%   |
| 1:1            | 19,2%  | 27,9%  | 36,4%  | 1:1            | 1,4%   | 2,4%   | 3,1%   |
| 1:1,5          | 17,7%  | 25,2%  | 32,3%  | 1:1,5          | 1,5%   | 3,4%   | 2,6%   |
| 1:2            |        | 23,9%  | 31,3%  | 1:2            |        | 2,4%   | 2,7%   |
| 1:2,5          |        | 22,5%  | 28,5%  | 1:2,5          |        | 1,7%   | 2,6%   |

Das Burgers-Modell ist aufgrund der Serienschaltung eines Maxwell-Körpers und eines Kelvin-Voigt-Körpers besser in der Lage das Kriechverhalten unserer Bitumen bzw. Mastixproben wiederzugeben. Die mittlere prozentuelle Abweichung beträgt für die drei Bitumensorten B50/70, B70/100 und E60/90 beim Burgers-Modell ca. 2% bis 3%. Bei -12 °C ist die Abweichung unabhängig vom Füllergehalt um ca. 1 % höher als bei -24 °C. Mit zunehmendem Füllergehalt wird die prozentuelle Abweichung geringer. Die Abweichungen beim Maxwell-Modell sind ungefähr um den Faktor 10 größer als beim Burgers-Modell. Das Maxwell-Modell liefert somit eine gute Übereinstimmung an den Anfangs und Endpunkten der Kriechkurve, beschreibt den Verlauf während der Belastungsphase jedoch unzureichend.

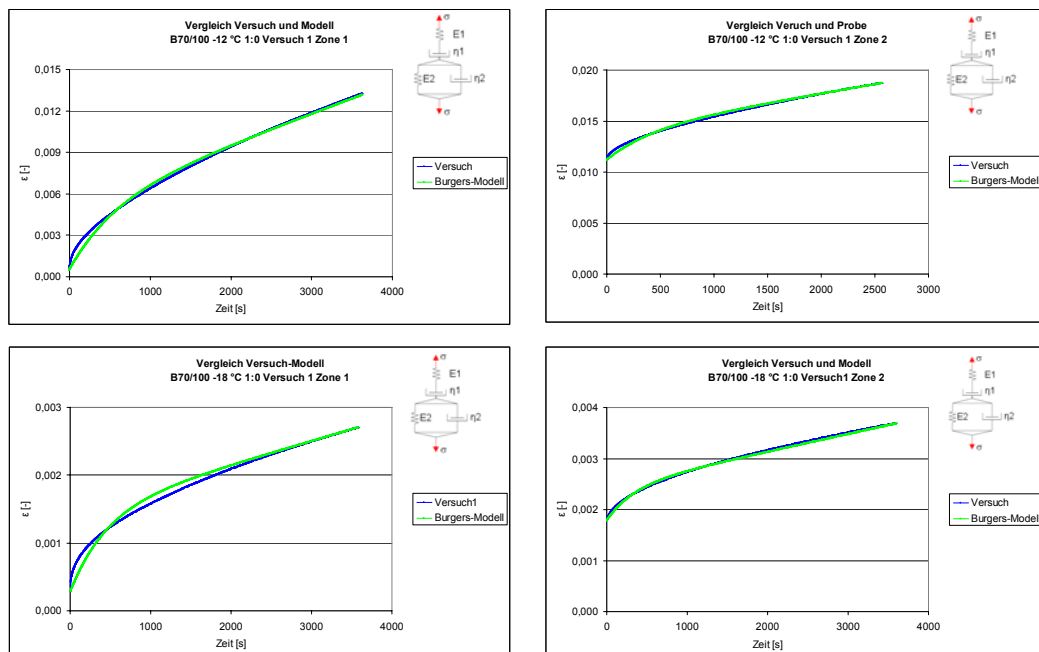
#### **4.1.2 Auswertung der Langzeitkriechversuche**

Als Erweiterung zu den Standardkriechversuchen mit einer Belastungsdauer von 240 Sekunden wurden auch Langzeitkriechversuche durchgeführt. Für die Langzeitkriechversuche wurde nur die Bitumensorte B70/100 verwendet. Für diese Versuche wurde die neue Software BBRw 3.10 verwendet, mit der auch Versuche mit einer Versuchszeit größer als 240 Sekunden möglich sind. Im Rahmen der Diplomarbeit wurden je zwei Probekörper aus reinem Bitumen B70/100 hergestellt und bei -12 °C und -18 °C geprüft. Im Gegensatz zu den Standardversuchen wurde die Lagerungsdauer der Bitumenproben im Ethanolbad auf 24 Stunden erhöht. Durch die längere Lagerung der Bitumenprobe im Ethanolbad kommt es zu einer Umordnung der Moleküle wodurch die Steifigkeit des Bitumens erhöht wird [Basu et al. (1998)]. Dieser Vorgang wird auch als 'physical hardening' bezeichnet. In der ersten Versuchsreihe erfolgt die Belastung des Probekörpers nach Abbildung 2 und in der zweiten Versuchsreihe nach Abbildung 3. In der ersten Versuchsreihe wird die Probe bei -12 °C und -18 °C für eine Stunde mit einer Prüfkraft von 980 mN belastet, gefolgt von einer Entlastungsphase von zwei Stunden bei 200 mN. Nach Ablauf dieser Entlastungsphase wird die Probe wieder für eine Stunde mit 980 mN belastet. Da laut ÖNORM EN 14771 der Versuch bei einer Durchbiegung von mehr als 5 mm abgebrochen wird musste die Prüfkraft bei -12 °C für beide Versuchreihen während der zweiten Belastungsphase vorzeitig reduziert werden. In der zweiten Versuchsreihe wird die Probe für eine Stunde mit 980 mN belastet. Nach dieser Stunde wird die Prüfkraft auf 1960 mN erhöht. Nach Ablauf der zwei Stunden erfolgt eine Entlastung auf 200 mN für zwei Stunden. Anhand des Maxwell-Modells und des Burgers-Modell soll nun festgestellt werden wie gut die Kriechkurven der Langzeitversuche nachgebildet werden. Um die Belastungsphasen während der einzelnen Versuche zu unterscheiden wird die erste Belastungsphase als Zone 1 bezeichnet und die zweite als Zone 2. In Abbildung 58

sind die Kriechkurven des Maxwell-Modells den Kriechkurven der Versuchsreihe 1 bei -12 °C und -18° gegenübergestellt. In der nach-folgenden Abbildung 59 werden die Kriechkurven der Versuchsreihe 1 dem Burgers-Modell gegenübergestellt.



**Abbildung 58: Gegenüberstellung Versuch 1 – Maxwell-Modell bei -12 °C und -18 °C für B70/100 in beiden Belastungsphasen**



**Abbildung 59: Gegenüberstellung Versuch 1 – Burgers-Modell bei -12 °C und -18 °C für B70/100 in beiden Belastungsphasen**

Das Burgers-Modell ist aufgrund der Serienschaltung eines Maxwell Körper und eines Kelvin-Voigt Körpers besser in der Lage die Kriechkurve der BBR-Versuche nachzubilden. Die Modellparameter und die mittlere prozentuelle Abweichung für die Bitumensorte B70/100, in der ersten Versuchsreihe sind in den nachfolgenden Tabellen 55 und 56 angegeben.

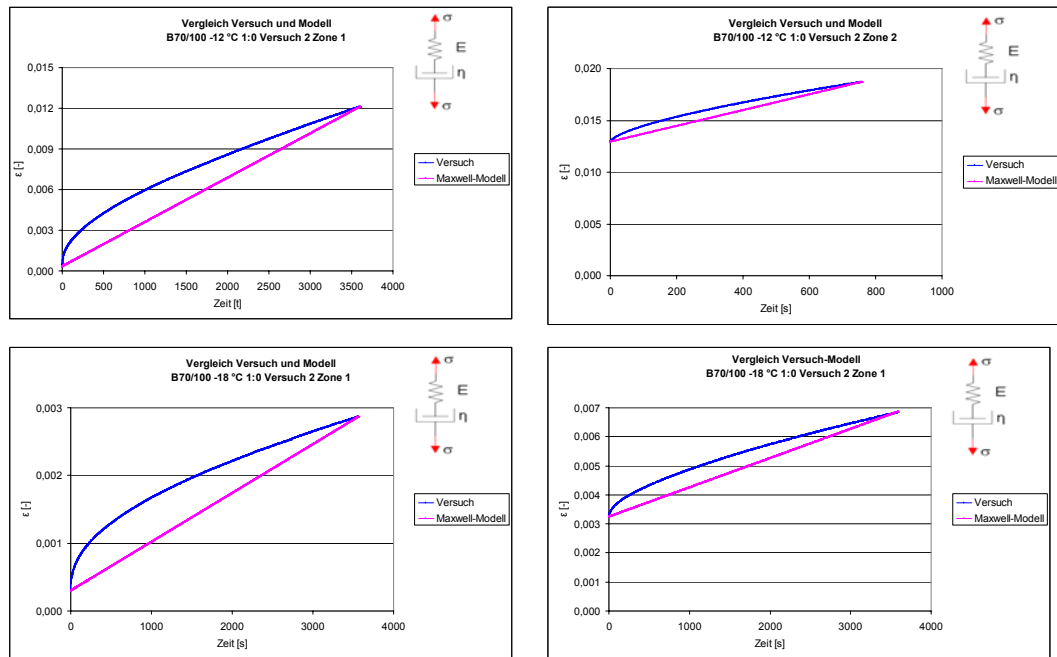
**Tabelle 55: Gegenüberstellung Versuch 1 – Maxwell-Modell bei -12 °C und -18 °C für B70/100 in beiden Belastungsphasen**

| Maxwell-Modell |                 |                        |          |                |
|----------------|-----------------|------------------------|----------|----------------|
| Zone           | Temperatur [°C] | E [N/mm <sup>2</sup> ] | η [Pa·s] | Abweichung [%] |
| 1              | -12             | 576                    | 80375    | 50,8           |
| 2              | -12             | 567                    | 96235    | 6,5            |
| 1              | -18             | 992                    | 418200   | 48,2           |
| 2              | -18             | 1125                   | 533420   | 11,3           |

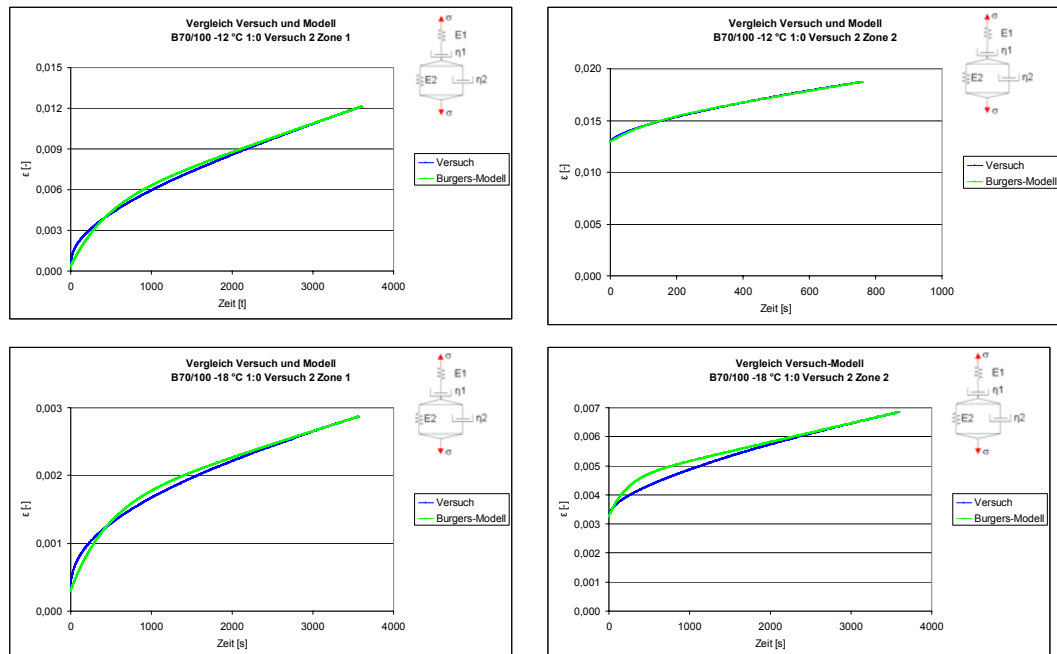
**Tabelle 56: Gegenüberstellung Versuch 1 – Burgers-Modell bei -12 °C und -18 °C für B70/100 in beiden Belastungsphasen**

| Burgers-Modell |                 |                         |           |           |                         |                |
|----------------|-----------------|-------------------------|-----------|-----------|-------------------------|----------------|
| Zone           | Temperatur [°C] | E1 [N/mm <sup>2</sup> ] | η1 [Pa·s] | E2 [Pa·s] | η2 [N/mm <sup>2</sup> ] | Abweichung [%] |
| 1              | -12             | 576                     | 128899    | 59        | 33954                   | 7,6            |
| 2              | -12             | 567                     | 155437    | 98        | 42510                   | 0,7            |
| 1              | -18             | 992                     | 812986    | 241       | 106757                  | 6,7            |
| 2              | -18             | 1125                    | 812511    | 431       | 146227                  | 0,8            |

Beim Maxwell-Modell beträgt die Abweichung zum Versuch während der ersten Belastungsphase ca. 50% und ist somit ungefähr doppelt so groß wie bei den Kurzzeitkriechversuchen (siehe Tabelle 54). In der zweiten Belastungsphase beträgt die Abweichung des Maxwell-Modells zum Versuch zwischen 6% und 11%. Der E-Modul E des Maxwell-Modells und der E-Modul E1 des Burgers-Modells sind bei einer Temperatur von -18 °C bei gleicher Biegespannung ca. doppelt so groß wie bei den Kurzzeitkriechversuchen (siehe Tabelle 12 und 21). Aufgrund der längeren Lagerung der Bitumenrobe im Ethanolbad ist die Durchbiegung der Probe nur halb so groß wie bei den Kurzzeitkriechversuchen, womit die höhere Federsteifigkeit zu erklären ist. Bei -12 °C gibt es keinen Unterschied bei der Durchbiegung zwischen dem Kurzzeitkriechversuch und dem Langzeitkriechversuch, wodurch die Federsteifigkeiten ungefähr gleich groß sind. Bei weiteren Untersuchungen müsste die Probenanzahl für jede Versuchsreihe erhöht werden, um eine bessere Aussagekraft der Versuchsdaten zu erhalten und mögliche Fehlversuche ausschließen zu können. Beim Burgers-Modell ist die Abweichung in der Zone 1 ca. 7% groß und ist somit doppelt so groß wie bei den Kurzzeitkriechversuchen (siehe Tabelle 54). In der zweiten Belastungsphase beträgt die Abweichung ca. 1%. Die Langzeitkriechkurven der zweiten Versuchsreihe sind in Abbildung 60 und 61 dargestellt.



**Abbildung 60: Gegenüberstellung Versuch 2 – Maxwell-Modell bei -12 °C und -18 °C für B70/100 in beiden Belastungsphasen**



**Abbildung 61: Gegenüberstellung Versuch 2 – Burgers-Modell bei -12 °C und -18 °C für B70/100 in beiden Belastungsphasen**

In Abbildung 60 sind die Kriechkurven des Maxwell-Modells den Kriechkurven der Versuchsreihe 2 bei -12 °C und -18° gegenübergestellt. In der nachfolgenden Abbildung 61 werden die Kriechkurven der Versuchsreihe 2 dem Burgers-Modell

gegenübergestellt. In der zweiten Belastungsphase wurde die Prüfkraft von 980 mN auf 1960 mN erhöht. Da laut ÖNORM EN 14771 der Versuch bei einer Durchbiegung von mehr als 5 mm abgebrochen wird musste die Prüfkraft bei -12 °C für beide Versuchreihen während der zweiten Belastungsphase vorzeitig reduziert werden. Die Modellparameter und die mittlere prozentuelle Abweichung für die Bitumensorte B70/100 ist in den nachfolgenden Tabellen 57 und 58 angegeben.

**Tabelle 57: Gegenüberstellung Versuch 2 – Maxwell-Modell bei -12 °C und -18 °C für B70/100 in beiden Belastungsphasen**

| Maxwell-Modell |                 |                        |               |                |
|----------------|-----------------|------------------------|---------------|----------------|
| Zone           | Temperatur [°C] | E [N/mm <sup>2</sup> ] | $\eta$ [Pa·s] | Abweichung [%] |
| 1              | -12             | 908                    | 86425         | 62,52          |
| 2              | -12             | 833                    | 74131         | 3,88           |
| 1              | -18             | 954                    | 392656        | 47,32          |
| 2              | -18             | 1523                   | 561171        | 9,03           |

**Tabelle 58: Gegenüberstellung Versuch 2 – Burgers-Modell bei -12 °C und -18 °C für B70/100 in beiden Belastungsphasen**

| Burgers-Modell |                 |                         |                 |                         |                 |                |
|----------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|----------------|
| Zone           | Temperatur [°C] | E1 [N/mm <sup>2</sup> ] | $\eta_1$ [Pa·s] | E2 [N/mm <sup>2</sup> ] | $\eta_2$ [Pa·s] | Abweichung [%] |
| 1              | -12             | 908                     | 136144          | 66                      | 27996           | 8,22           |
| 2              | -12             | 833                     | 104246          | 338                     | 39679           | 0,24           |
| 1              | -18             | 954                     | 747028          | 232                     | 101695          | 6,11           |
| 2              | -18             | 1523                    | 875291          | 442                     | 95252           | 2,87           |

Beim Maxwell-Modell beträgt die Abweichung zum Versuch während der ersten Belastungsphase ca. 50% bei -18 °C und ca. 60% bei -12 °C und ist somit ungefähr doppelt so groß wie bei den Kurzzeitkriechversuchen (siehe Tabelle 54). In der zweiten Belastungsphase beträgt die Abweichung zum Versuch zwischen 4% und 9%. Beim Burgers-Modell beträgt die Abweichung der Kriechkurven zum Versuch bei -12 °C ca. 8% und ist somit ca. doppelt so hoch wie bei den Kurzzeitversuchen (siehe Tabelle 54). Der E-Modul E des Maxwell-Modells und der E-Modul E1 des Burgers-Modells sind bei einer Temperatur von -12 °C ca. 900 N/mm<sup>2</sup> groß und somit etwa doppelt so groß als bei den Kurzzeitkriechversuchen (siehe Tabelle 12 und 21). Bei -18 °C ergibt sich ebenfalls eine Verdopplung der Federsteifigkeit von Kurzzeit auf Langzeitkriechversuch. Aufgrund des 'physical hardening' ist die Bitumenprobe weniger fließfähig und die Werte für die Viskosität steigen für alle Versuche und Temperaturen an. Bei -18 °C beträgt der Wert der Viskosität  $\eta_1$  747028 Pa·s für die erste Belastungsphase. Bei den Kurzzeitkriechversuchen ist die Viskosität  $\eta_1$  bei -18 °C und reinem Bitumen 55103 Pa·s (siehe Tabelle 24) groß und somit ca. 14-mal kleiner als bei den Langzeitkriechversuchen.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Ziel dieser Diplomarbeit war es das Kriechverhalten von Bitumen und Mastix bei tiefen Temperaturen anhand von Materialparametern zu beschreiben. Zur Beurteilung des Kriechverhaltens wurden in Rahmen dieser Diplomarbeit Versuche am Bending Beam Rheometer (BBR) durchgeführt. Bei der Versuchsdurchführung nach ÖNORM EN 14771 wurden die Standardbitumensorten B50/70, B70/100 und das polymermodifizierte Bitumen E60/90 bei  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$  getestet. Die Prüfung der Bitumensorten erfolgte an Probekörper aus reinem Bitumen und Mastixprobekörpern. Für die Mastixuntersuchungen wurde Kalksteinmehl als Füller verwendet. Weiters wurden zu den Versuchen nach ÖNORM EN 14771 Langzeitkriechversuche für die Bitumensorte B70/100 durchgeführt. Die Auswertung der BBR-Versuche erfolgte anhand der Steifigkeit  $S$  und des  $m$ -Wertes. Je geringer die Steifigkeit und je höher der  $m$ -Wert ist, desto besser ist das Tieftemperaturverhalten von Bitumen. Aufgrund der Versuchsdaten erkennt man, dass die Steifigkeit mit zunehmendem Füllergehalt zunimmt und mit steigender Temperatur abnimmt. Diese Aussage ist für alle drei geprüften Bitumensorten gültig. Der Füllergehalt hat bei höheren Temperaturen einen stärkeren Einfluss auf die Zunahme der Steifigkeit als bei niedrigen Temperaturen. Der zweite Parameter beim BBR-Versuch ist der  $m$ -Wert. Der  $m$ -Wert entspricht der Steigung der Tangente der Kriechkurve zum Zeitpunkt  $t=60$  Sekunden. Je höher der  $m$ -Wert ist, desto besser können Spannungen abgebaut werden. Unabhängig von der geprüften Bitumensorte steigt der  $m$ -Wert mit zunehmender Temperatur und sinkt mit zunehmendem Füllergehalt. Der Einfluss des Füllergehaltes ist bei höheren Temperaturen größer als bei niedrigeren Temperaturen.

Im weiteren Verlauf der Diplomarbeit erfolgt eine Einführung in die Rheologie. Aufbauend auf diesen Grundlagen werden das Maxwell-Modell, das Kelvin-Voigt-Modell, das Burgers-Modell und das Power-Law-Modell vorgestellt. Das Maxwell-Modell besteht aus einer Feder und einem Dämpfer, welche in Serie geschaltet sind. Der erste Parameter dieses Modells ist die Federsteifigkeit  $E$ . Die Federsteifigkeit ist verantwortlich für den elastischen Dehungsanteil. Je höher die Federsteifigkeit  $E$  wird, desto kleiner ist die Anfangsverformung. Die Auswertung der Versuche zeigt, dass die Federsteifigkeit mit zunehmendem Füllergehalt steigt und mit zunehmender Temperatur abnimmt. Der Einfluss des Füllergehaltes ist bei höheren Temperaturen größer als bei niedrigen Temperaturen. Der zweite Parameter beim Maxwell-Modell ist die Viskosität  $\eta$ . Je größer die Viskosität des Dämpfers wird, desto kleiner ist der viskose Anteil der Dehnung. Mit zunehmender Viskosität wird das Bitumen dickflüssiger und somit weniger fließfähig. Für alle drei Bitumensorten steigt die Viskosität mit zunehmendem Füllergehalt und sinkt bei steigender Temperatur. Die Kriechkurve des Maxwell-Modells stimmt bei Belastungsbeginn und bei Belastungsende sehr gut mit dem Kriechverlauf des BBR-Versuchs überein. Das Maxwell-Modell ist aufgrund der konstanten Kriechgeschwindigkeit des Dämpfers nicht in der Lage den gekrümmten Teil des Kriechverlaufs nachzubilden. Die Relaxationszeit  $t_R$  entspricht der Zeit, in der die Zugspannung des Maxwell-Modells auf 36,8% des Anfangswertes abfällt. Unabhängig von der Bitumensorte steigt die Relaxationszeit  $t_R$  mit zunehmendem Füllergehalt und sinkt bei steigender Temperatur. Je viskoser das Bitumen wird, desto geringer ist die Fließfähigkeit und desto länger braucht die Spannung bis sie auf 36,8% des Anfangswertes abfällt.

Das zweite rheologische Modell, das in der Diplomarbeit näher behandelt wird ist das Burgers-Modell. Das Burgers-Modell entsteht durch Serienschaltung eines Maxwell-Modells und des Kelvin-Voigt-Modells. Dieses Modell wird durch die vier Materialparameter  $E_1$ ,  $\eta_1$ ,  $E_2$  und  $\eta_2$  beschrieben. Die Materialparameter  $E_1$  und  $\eta_1$  werden dem Maxwell-Modell zugeordnet und zeigen das gleiche Verhalten wie es bereits für die Parameter  $E$  und  $\eta$  beim Maxwell-Modell beschrieben wurde. Der dritte Parameter des Burgers-Modell ist die Federsteifigkeit  $E_2$ . Je größer die Federsteifigkeit  $E_2$  wird, desto kleiner ist die maximale mögliche Dehnung des Kelvin-Voigt-Körpers. Mit zunehmendem Füllergehalt wird die Federsteifigkeit größer, wogegen sie mit steigender Temperatur kleiner wird. Der vierte Parameter im Burgers-Modell ist die Viskosität  $\eta_2$ . Je niedriger die Viskosität ist, desto stärker krümmt sich der Dehnungsverlauf in der Anfangsphase. Die Viskosität  $\eta_2$  nimmt mit steigendem Füllergehalt zu und mit zunehmender Temperatur ab. Die Kriechkurve des Burgers-Modell zeigt sowohl bei den Kurzzeitkriechversuchen nach ÖNORM EN 14771 als auch bei den Langzeitkriechkurven eine gute Übereinstimmung mit den Kriechkurven der BBR-Versuche. Zur Verbesserung der Aussagekraft der Langzeitkriechversuche wäre es sinnvoll, die Versuchsanzahl zu erhöhen. Eine weitere Möglichkeit wäre es, die Langzeitkriechversuche für verschiedene Bitumensorten und zugehöriger Mastix durchzuführen. Aufgrund dieser Untersuchungen könnte man feststellen, wie sich die Steifigkeitszunahme bei längerer Lagerung im Ethanol in Abhängigkeit vom Füllergehalt und der Bitumensorte ändert.

Die Grundelemente des Power-Law Modells sind eine elastische Feder und ein nicht linearer Dämpfer, wobei Feder und Dämpfer in Serie angeordnet sind. Die Modellparameter  $H$  und  $p$  beschreiben das Kriechverhalten der Probekörper über die gesamte Versuchszeit. Die Ermittlung der Materialparameter  $H$  und  $p$  erfolgt automatisch, wobei die Glättungsabfrage und das Zeitintervall manuell eingestellt werden können. Im ersten Teil wird der Einfluss der Glättungsabfrage  $d$  auf die Materialparameter untersucht. Es zeigt sich, dass sich ab einem Wert  $d=0,0035$  mm die Materialparameter nur noch geringfügig unterscheiden. Eine weitere Untersuchung ergab, dass der optimale Bereich für die Ermittlung der Parameter im Zeitintervall von 45 bis 230 Sekunden liegt. Unabhängig von der getesteten Bitumensorte nehmen die  $H$ -Werte mit zunehmender Temperatur zu. Erhöht man bei den Versuchen schrittweise den Füllergehalt, dann nehmen die  $H$ -Werte bei allen Temperaturen ab. Bei Erhöhung der Temperaturen nehmen die  $p$ -Werte geringfügig ab. Der  $p$ -Wert zeigt unabhängig vom der Bitumensorte und Füllergehalt einen konstanten Verlauf.

## 6. LITERATURVERZEICHNIS

- [Mang/Hofstetter (2000)] H. Mang, G. Hofstetter: Festigkeitslehre, Springer-Verlag, Wien, 2001
- [Bartsch (2001)] H.-J. Bartsch: Taschenbuch mathematischer Formeln, Carl Hanser Verlag, München 2001
- [Arand et al. (1988)] W. Arand, S. Dörschlag, P. Pohlmann: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 558, Technische Universität Braunschweig, 1988
- [Arand/Lorenzl (1995)] W. Arand, Lorenzl: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 696 Technische Universität Braunschweig, 1995
- [Lackner et al. (2005)] R. Lackner, M. Spiegel, R. Blab, J. Eberhardsteiner, 2005: Is low-temperature creep of asphalt mastic independent of filler shape and mineralogy? - Arguments from multiscale analysis. Journal of Minerals in Civil Engineering [ASCE], Volume 17, number 5, pp 485-491
- [Litzka et al. (1998)] J. Litzka, R. Strobl, F. Pass, H. Augustin: Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung, Heft 9 Mitteilungen des Institutes für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, 1998
- [Gier (2004)] S. Gier: Rheologie und einfache Modelle elastischer Flüssigkeiten, 2004
- [Hase (2002)] M. Hase: Grundlagen der Rheologie
- [Scharr] G. Scharr: Leichtbau-Werkstoffe, Universität Rostock
- [Schreiber (1997)] L. Schreiber: Skript zur Vorlesung, Einführung in die Plastizitätstheorie, Institut für Mechanik, Universität Kassel, 1997
- [Basu et al. (1998)]: Basu, A. Marasteanu, M. O. Hesp, S. A. M.: Time-Temperature Superposition and Physical Hardening Effects in Low-Temperature Asphalt Binder Grading, National Academy Press, 1998
- [Lu et al. (2003)] X. Lu, u. Isacsson, J. Ekblad: Influence of polymer modification on low temperature behaviour of bituminous binders and mixtures, Material and Structures, Vol. 36, 2003
- [Roy (2001)] S. D. Roy, S. Hesp: Low-Temperature Binder Specification Development: Thermal Stress Restrained Specimen Testing of Asphalt Binders and Mixtures, paper No. 01-207. 2001
- [Marasteanu/Anderson (2001)] M. O. Marasteanu, D. Anderson: Techniques for Determining Errors in Asphalt Binders Rheological Data, Paper No. 01-3282, 2001
- [ÖNORM EN 14771 (2005)] Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Biegekriechfestigkeit – Biegebalkenrheometer [BBR], 2005
- [Lanschützer (2007)] J. Lanschützer: Statisches Kriechverhalten von bitumonösen Werkstoffen, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2007

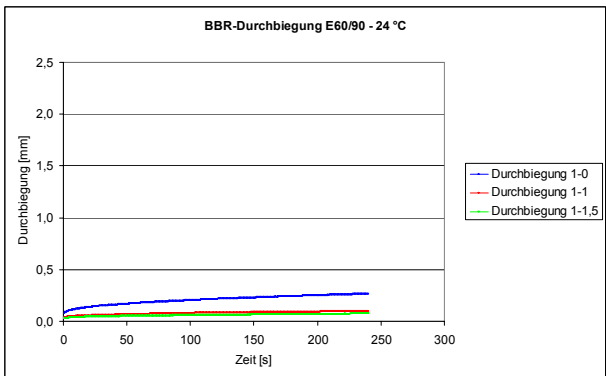
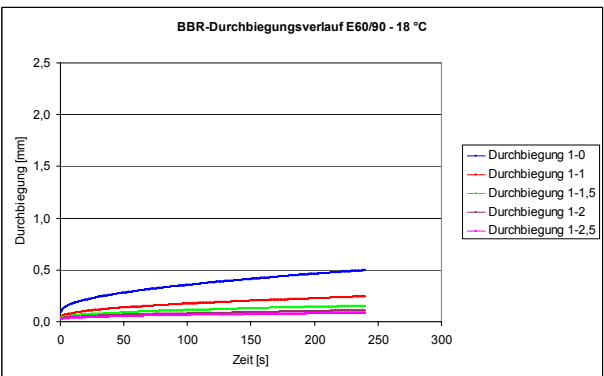
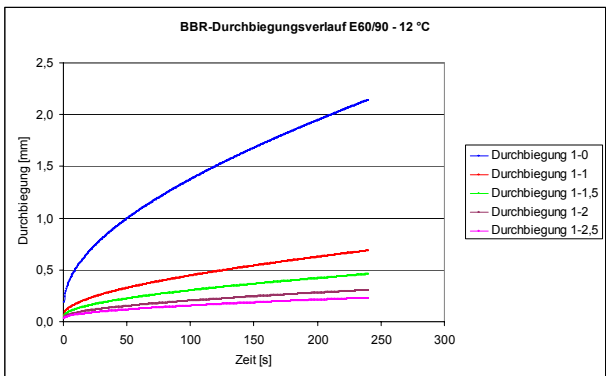
[Hopfgartner (2004)] M. Hopfgartner: Projektarbeit am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, 2004

[Hofko (2006)] B. Hofko: Diplomarbeit, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, 2006

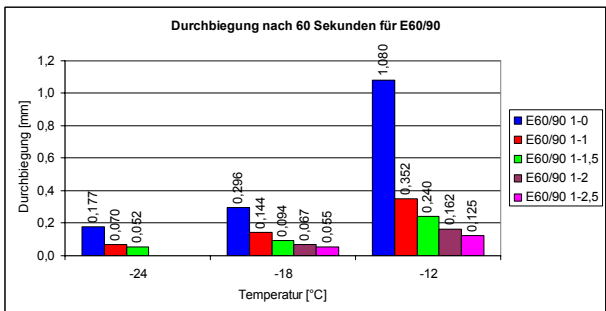
# 7. ABBILDUNGEN UND DIAGRAMME

E60/90

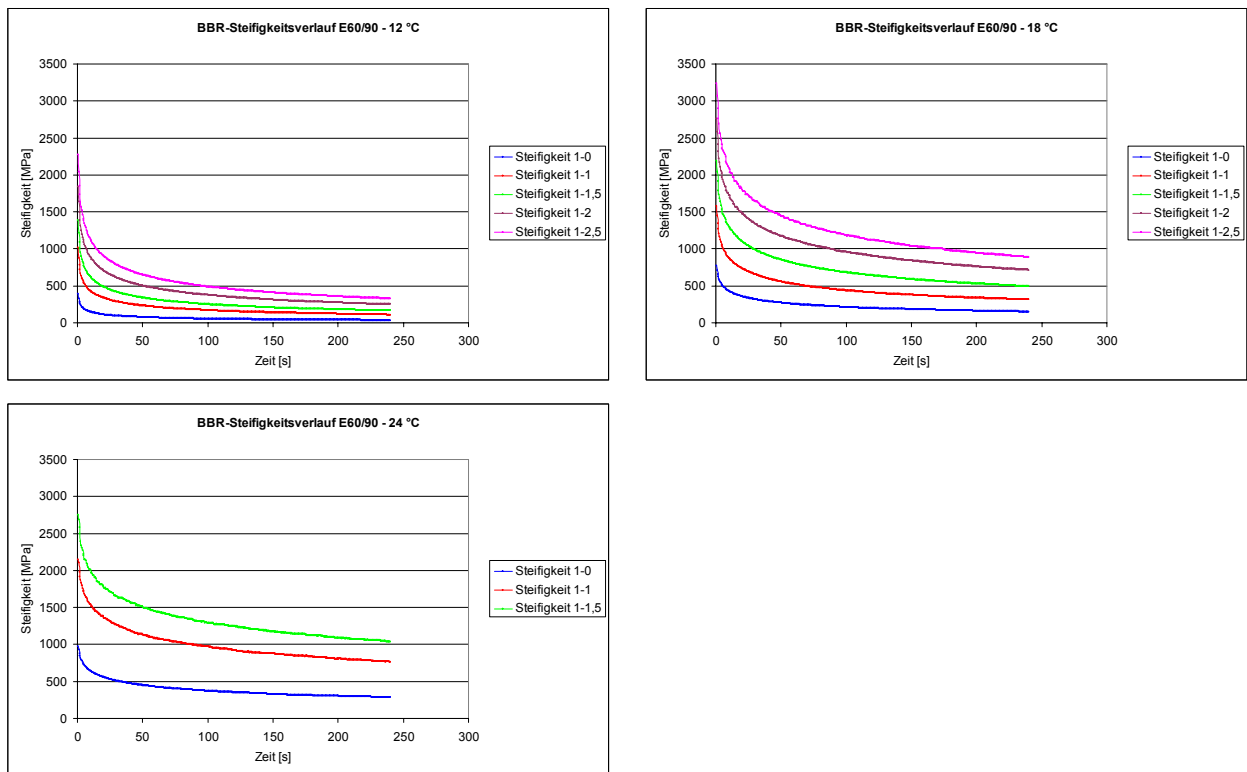
Kriechkurven:



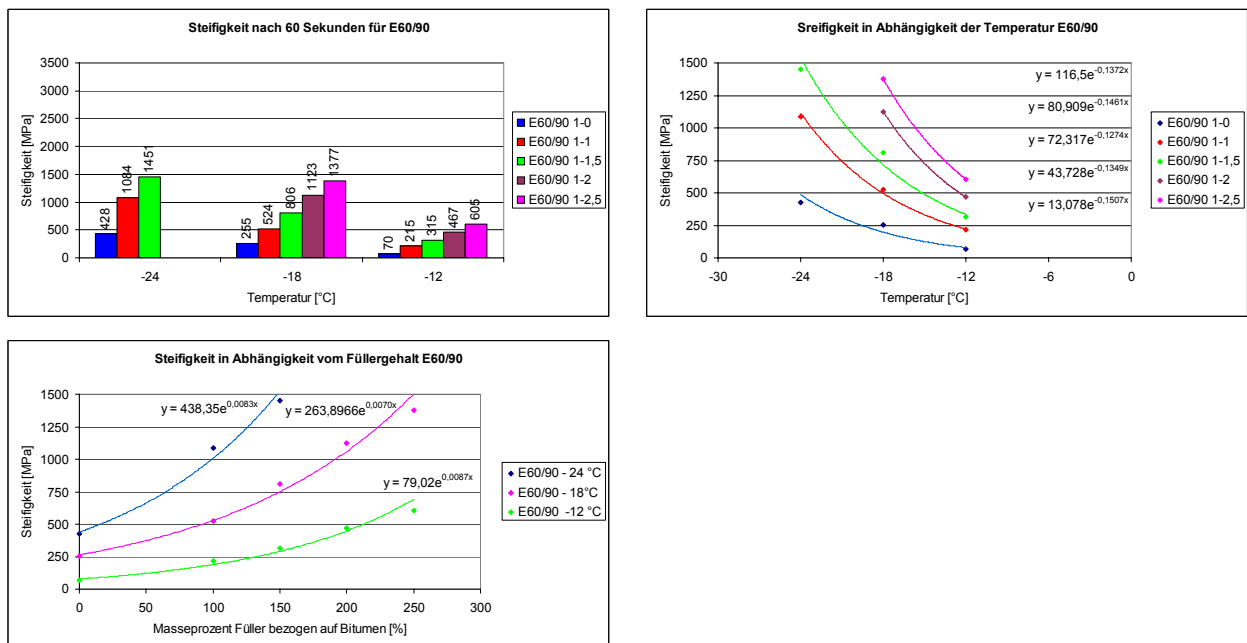
Durchbiegung nach 60 Sekunden:



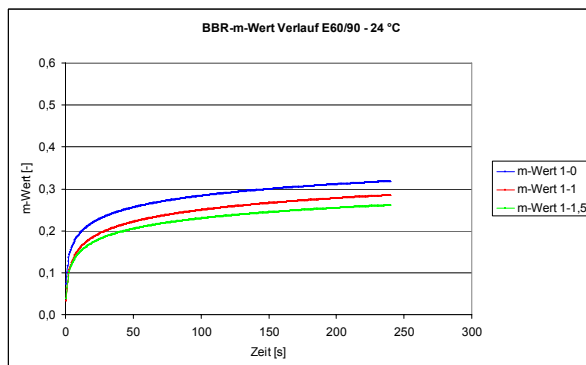
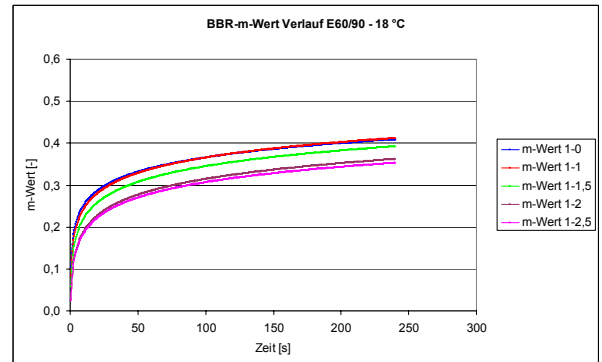
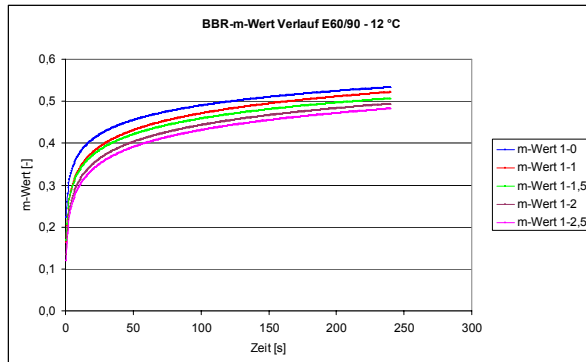
Steifigkeitskurven:



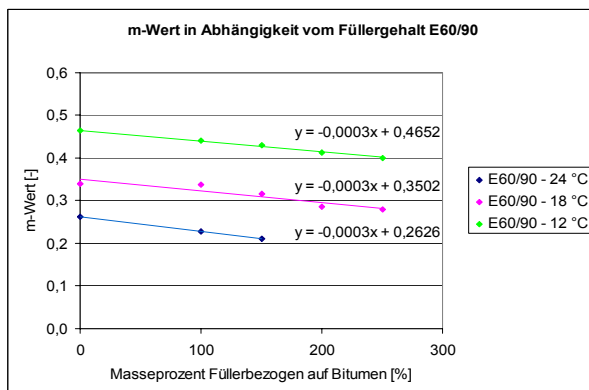
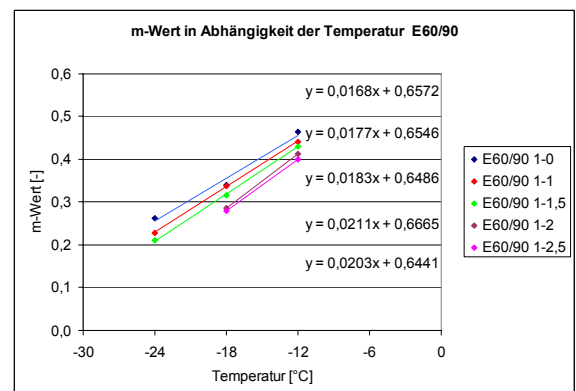
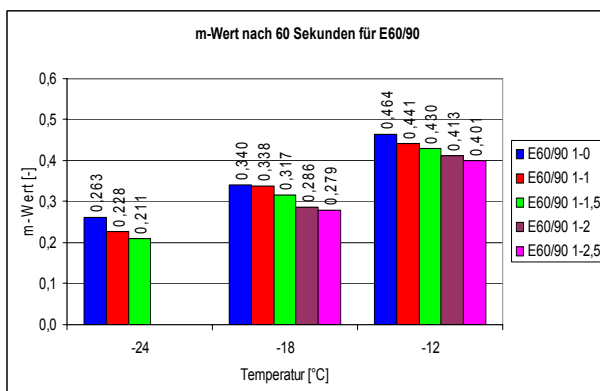
Steifigkeit nach 60 Sekunden:



## m-Wert-Kurven:

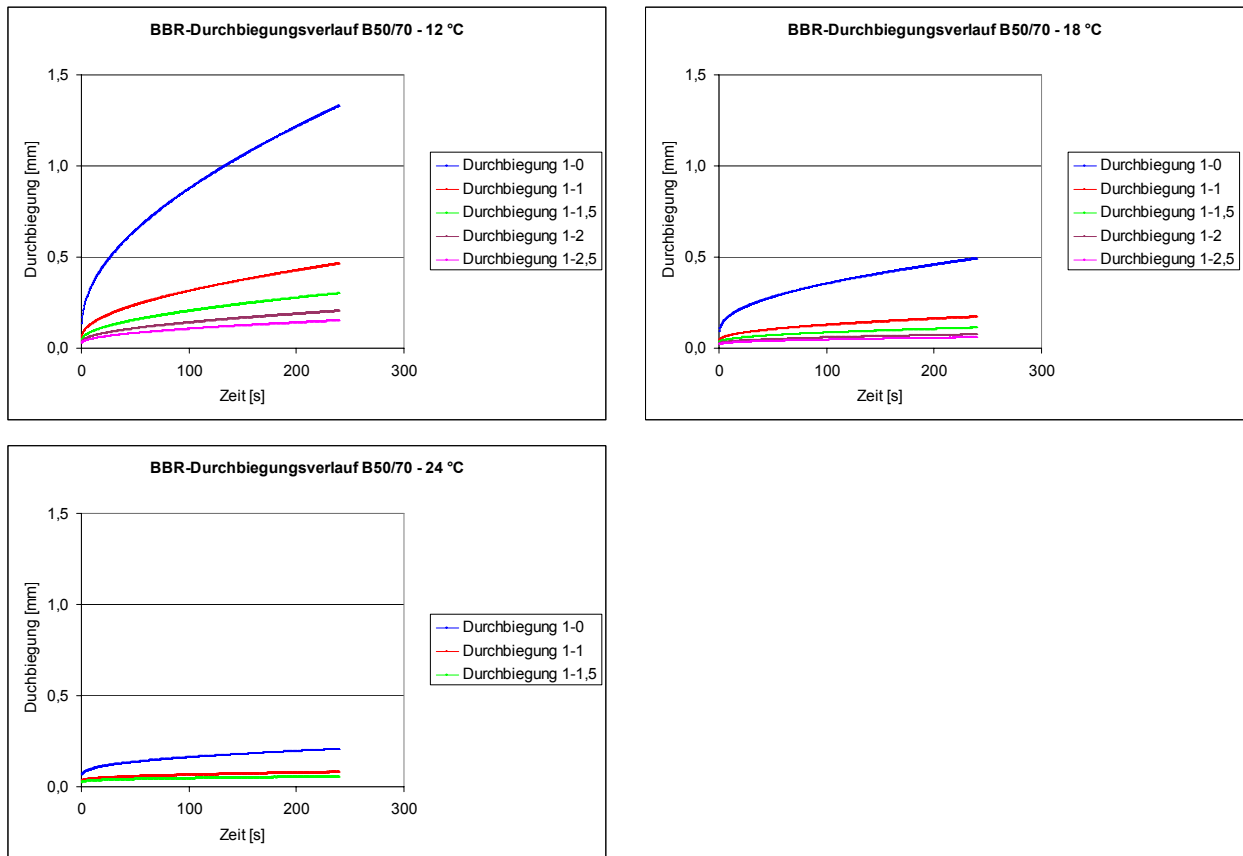


## m-Wert nach 60 Sekunden:

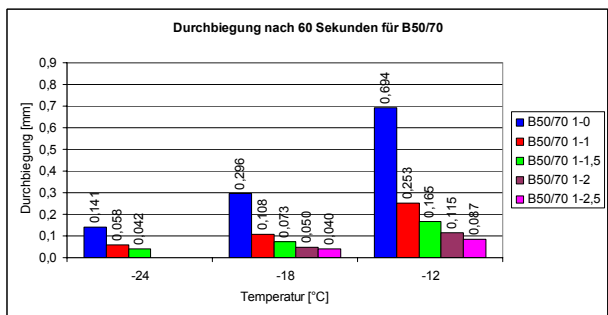


B50/70:

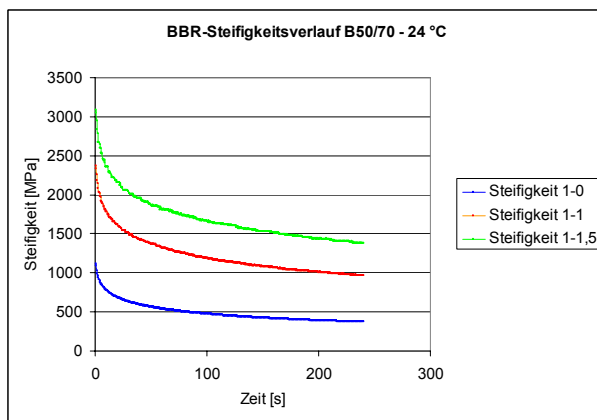
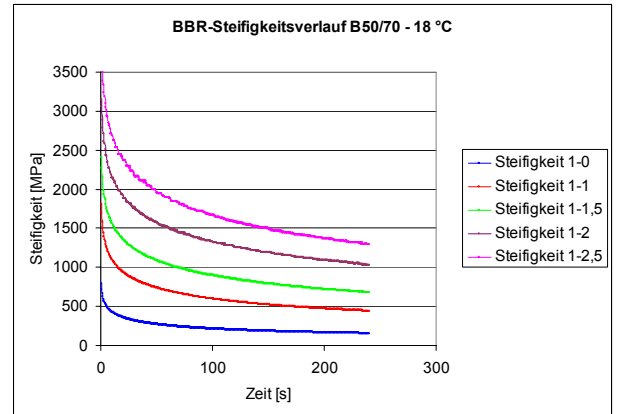
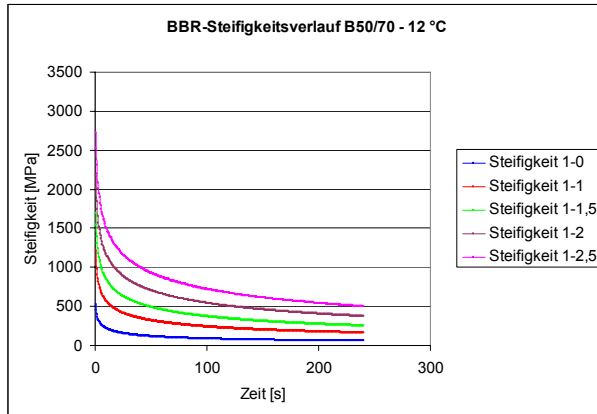
Kriechkurven:



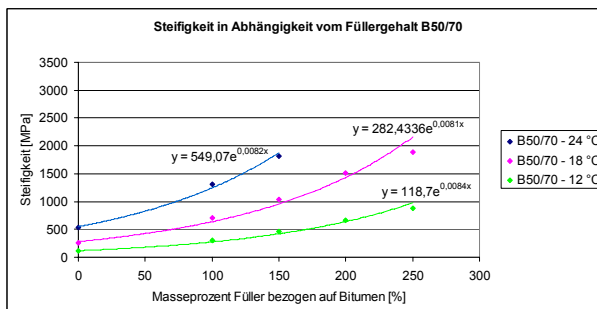
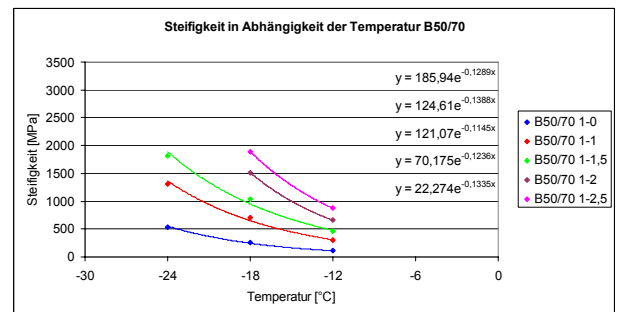
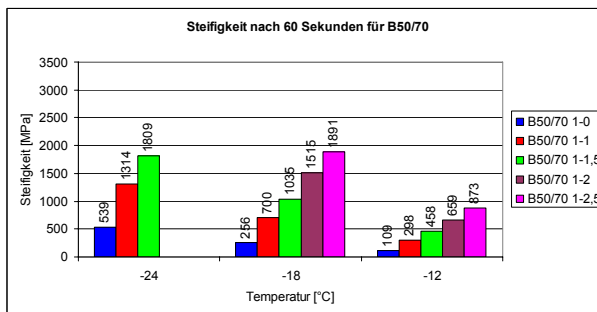
Durchbiegung nach 60 Sekunden:



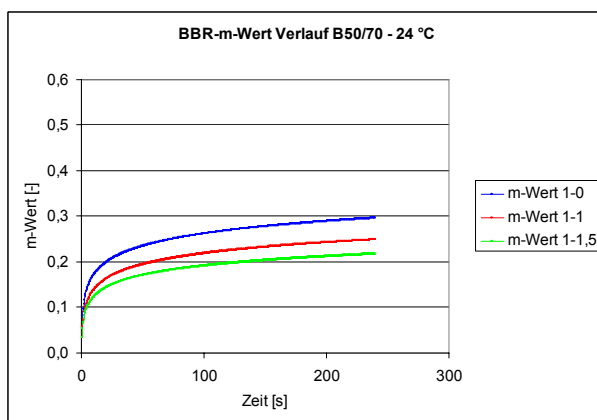
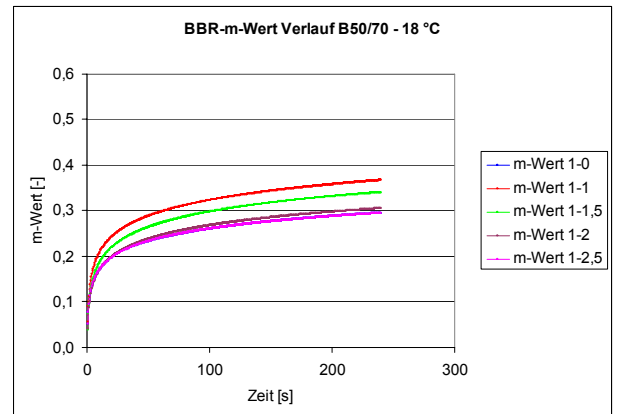
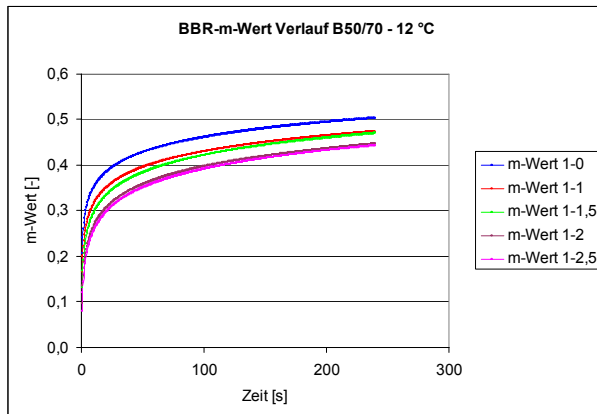
## Steifigkeitskurven:



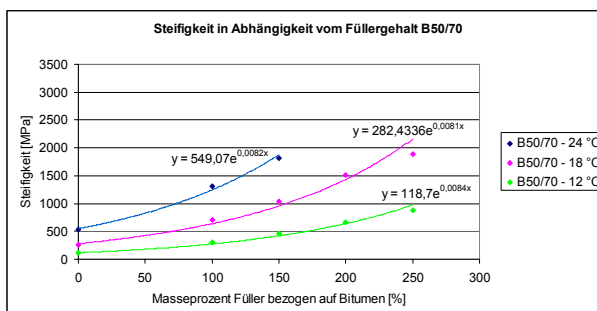
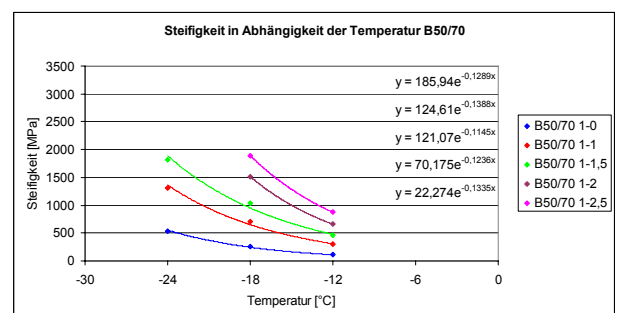
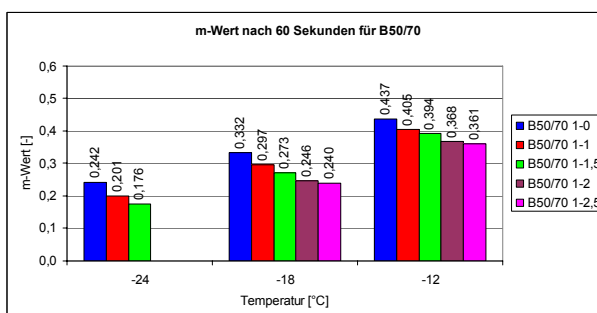
## Steifigkeit nach 60 Sekunden:



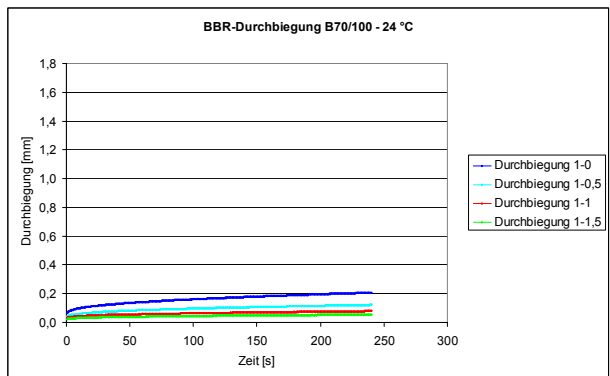
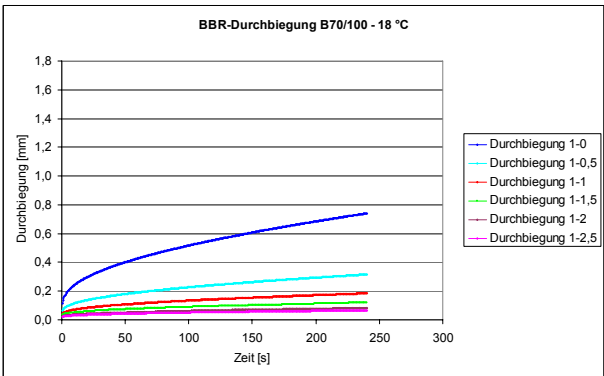
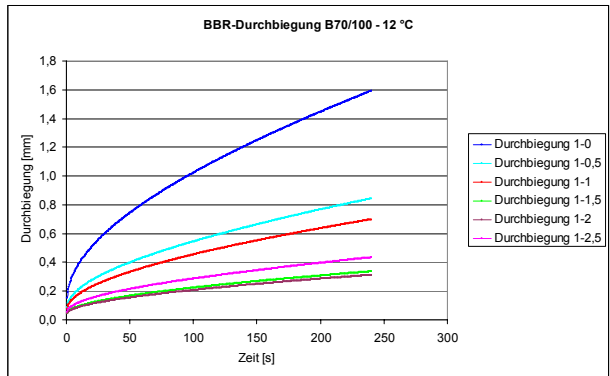
## m-Wert-Kurven:



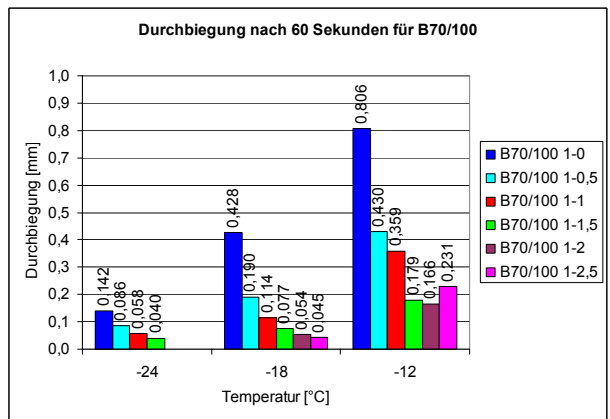
## m-Wert nach 60 Sekunden:



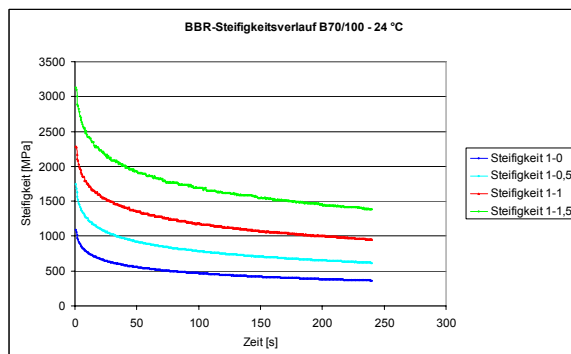
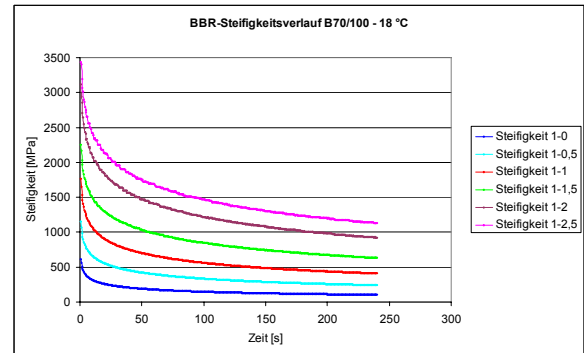
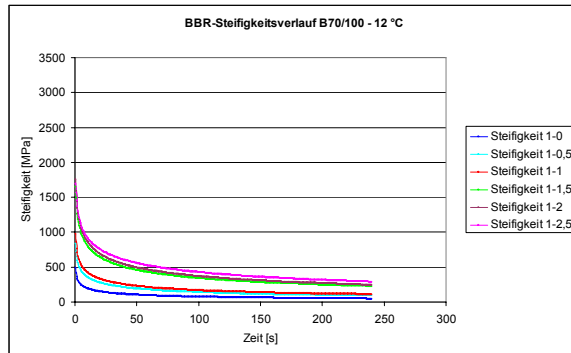
Steifigkeitskurven:



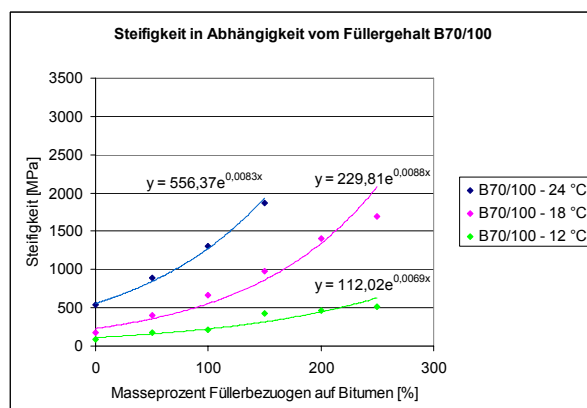
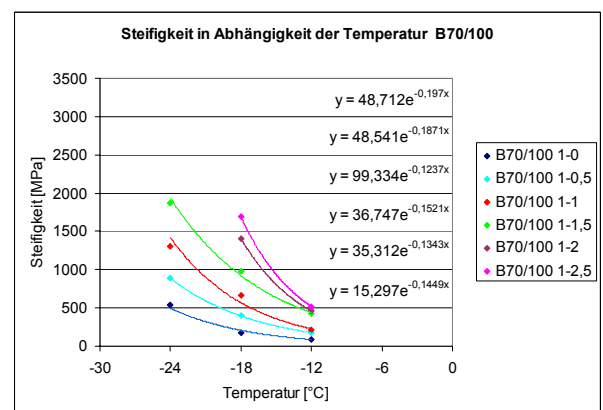
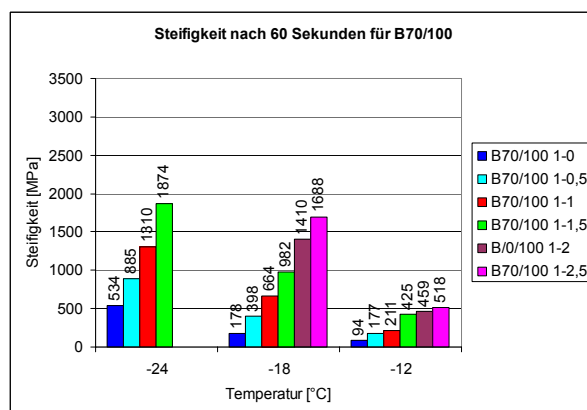
Durchbiegung nach 60 Sekunden:



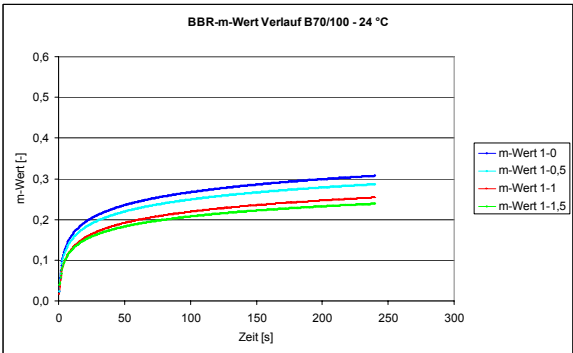
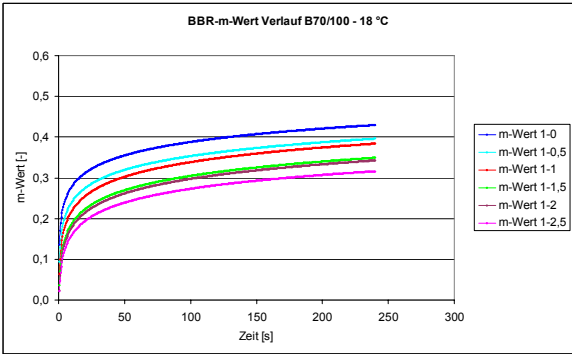
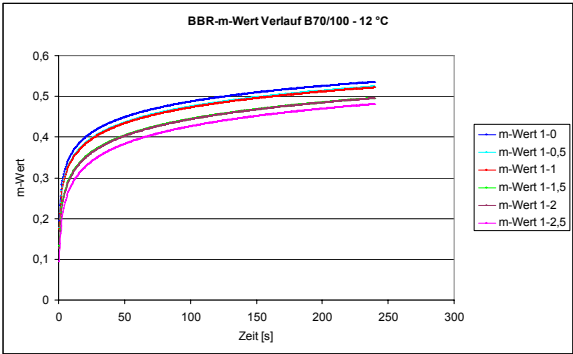
## Steifigkeitskurven:



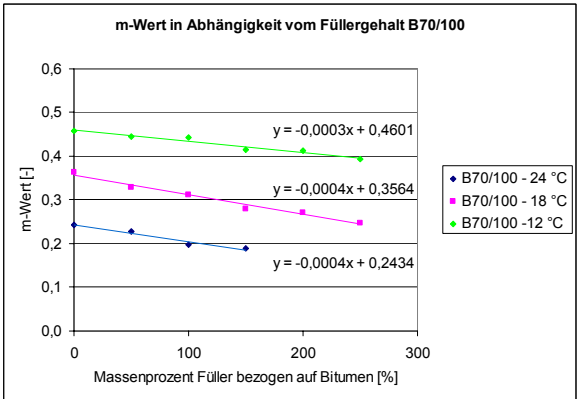
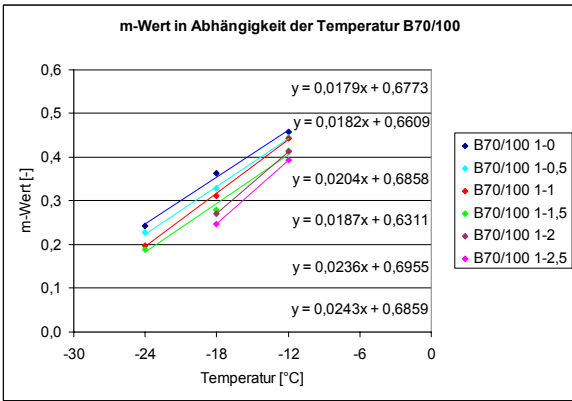
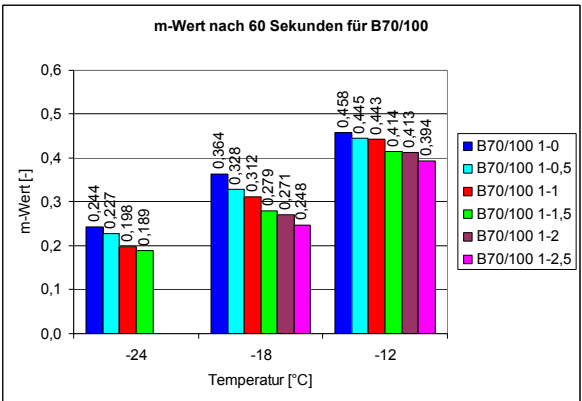
## Steifigkeit nach 60 Sekunden:



m-Wert-Kurven:



m-Wert nach 60 Sekunden:



## 8. ANHANG B: TABELLEN

**Tabelle 59: H-Werte E60/90 -18 °C für die verschiedenen Zeitintervalle**

| H-Werte E60/90 -18 °C d=0,0035 mm |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| t1-230                            | 1:0      | 1:1      | 1:1,5    | 1:2      | 1:2,5    |
| 1                                 | 0,172345 | 0,090110 | 0,053220 | 0,037977 | 0,030213 |
| 15                                | 0,150050 | 0,090150 | 0,047673 | 0,031513 | 0,025007 |
| 30                                | 0,137185 | 0,077043 | 0,044263 | 0,029603 | 0,023913 |
| 45                                | 0,136450 | 0,074310 | 0,043590 | 0,027360 | 0,023267 |
| 60                                | 0,128215 | 0,071203 | 0,041897 | 0,026510 | 0,021733 |
| 70                                | 0,123995 | 0,070830 | 0,041363 | 0,024867 | 0,021430 |
| 75                                | 0,121050 | 0,071027 | 0,040420 | 0,024450 | 0,021423 |
| 90                                | 0,120705 | 0,075037 | 0,040670 | 0,023767 | 0,019960 |

**Tabelle 60: H-Werte E60/90 -18 °C für die verschiedenen Glättungsabfragen**

| H-Werte E60/90 -18 °C d=0,0035 mm<br>bezogen auf 70-230 s |      |      |       |      |       |
|-----------------------------------------------------------|------|------|-------|------|-------|
| t1-230                                                    | 1:0  | 1:1  | 1:1,5 | 1:2  | 1:2,5 |
| 1                                                         | 139% | 127% | 129%  | 153% | 141%  |
| 15                                                        | 121% | 127% | 115%  | 127% | 117%  |
| 30                                                        | 111% | 109% | 107%  | 119% | 112%  |
| 45                                                        | 110% | 105% | 105%  | 110% | 109%  |
| 60                                                        | 103% | 101% | 101%  | 107% | 101%  |
| 70                                                        | 100% | 100% | 100%  | 100% | 100%  |
| 75                                                        | 98%  | 100% | 98%   | 98%  | 100%  |
| 90                                                        | 97%  | 106% | 98%   | 96%  | 93%   |

**Tabelle 61: H-Werte E60/90 -24 °C für die verschiedenen Zeitintervalle**

| H-Werte E60/90 -24 °C d=0,0035 mm |          |          |          |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|
| t1-230                            | 1:0      | 1:1      | 1:1,5    |
| 1                                 | 0,106320 | 0,037543 | 0,029560 |
| 15                                | 0,097760 | 0,032617 | 0,023837 |
| 30                                | 0,096245 | 0,030583 | 0,021267 |
| 45                                | 0,095000 | 0,024107 | 0,020743 |
| 60                                | 0,093680 | 0,022280 | 0,020103 |
| 70                                | 0,094230 | 0,022077 | 0,020253 |
| 75                                | 0,094010 | 0,023153 | 0,020403 |
| 90                                | 0,099580 | 0,028083 | 0,017803 |

**Tabelle 62: H-Werte E60/90 -24 °C für die verschiedenen Zeitintervalle**

| H-Werte E60/90 -24 °C d=0,0035 mm<br>bezogen auf 70-230 s |      |      |       |
|-----------------------------------------------------------|------|------|-------|
| t1-230                                                    | 1:0  | 1:1  | 1:1,5 |
| 1                                                         | 113% | 170% | 146%  |
| 15                                                        | 104% | 148% | 118%  |
| 30                                                        | 102% | 139% | 105%  |
| 45                                                        | 101% | 109% | 102%  |
| 60                                                        | 99%  | 101% | 99%   |
| 70                                                        | 100% | 100% | 100%  |
| 75                                                        | 100% | 105% | 101%  |
| 90                                                        | 106% | 127% | 88%   |

**Tabelle 63: p-Werte E60/90 -18 °C für die verschiedenen Zeitintervalle**

| p-Werte E60/90 -18 °C d=0,0035 mm |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| t1-230                            | 1:0       | 1:1       | 1:1,5     | 1:2       | 1:2,5     |
| 1                                 | -0,522285 | -0,536777 | -0,536543 | -0,554813 | -0,560110 |
| 15                                | -0,493050 | -0,532203 | -0,513173 | -0,515373 | -0,520240 |
| 30                                | -0,474750 | -0,504260 | -0,498100 | -0,502620 | -0,511140 |
| 45                                | -0,473705 | -0,497183 | -0,494757 | -0,486803 | -0,505447 |
| 60                                | -0,461325 | -0,488653 | -0,486550 | -0,480500 | -0,492137 |
| 70                                | -0,454605 | -0,487853 | -0,482743 | -0,466543 | -0,489490 |
| 75                                | -0,450115 | -0,488170 | -0,478813 | -0,462713 | -0,489427 |
| 90                                | -0,449355 | -0,499033 | -0,478740 | -0,458420 | -0,475613 |

**Tabelle 64: p-Werte E60/90 -18 °C für die verschiedenen Glättungsabfragen**

| p-Werte E60/90 -18 °C d=0,0035 mm<br>bezogen auf 70-230 s |      |      |       |      |       |
|-----------------------------------------------------------|------|------|-------|------|-------|
| t1-230                                                    | 1:0  | 1:1  | 1:1,5 | 1:2  | 1:2,5 |
| 1                                                         | 115% | 110% | 111%  | 119% | 114%  |
| 15                                                        | 108% | 109% | 106%  | 110% | 106%  |
| 30                                                        | 104% | 103% | 103%  | 108% | 104%  |
| 45                                                        | 104% | 102% | 102%  | 104% | 103%  |
| 60                                                        | 101% | 100% | 101%  | 103% | 101%  |
| 70                                                        | 100% | 100% | 100%  | 100% | 100%  |
| 75                                                        | 99%  | 100% | 99%   | 99%  | 100%  |
| 90                                                        | 99%  | 102% | 99%   | 98%  | 97%   |

**Tabelle 65: p-Werte E60/90 -24 °C für die verschiedenen Zeitintervalle**

| <b>p-Werte E60/90 -24 °C d=0,0035 mm</b> |           |           |           |
|------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| t1-230                                   | 1:0       | 1:1       | 1:1,5     |
| 1                                        | -0,593275 | -0,605497 | -0,634383 |
| 15                                       | -0,575440 | -0,575293 | -0,588207 |
| 30                                       | -0,571520 | -0,563113 | -0,564410 |
| 45                                       | -0,568915 | -0,513333 | -0,559537 |
| 60                                       | -0,565680 | -0,490390 | -0,552653 |
| 70                                       | -0,564060 | -0,482703 | -0,551923 |
| 75                                       | -0,564045 | -0,493343 | -0,551337 |
| 90                                       | -0,573250 | -0,521477 | -0,526733 |

**Tabelle 66: p-Werte E60/90 -24 °C für die verschiedenen Zeitintervalle**

| <b>p-Werte E60/90 -24 °C d=0,0035 mm<br/>bezogen auf 70-230 s</b> |      |      |       |
|-------------------------------------------------------------------|------|------|-------|
| t1-230                                                            | 1:0  | 1:1% | 1:1,5 |
| 1                                                                 | 105% | 125% | 115%  |
| 15                                                                | 102% | 119% | 107%  |
| 30                                                                | 101% | 117% | 102%  |
| 45                                                                | 101% | 106% | 101%  |
| 60                                                                | 100% | 102% | 100%  |
| 70                                                                | 100% | 100% | 100%  |
| 75                                                                | 100% | 102% | 100%  |
| 90                                                                | 102% | 108% | 95%   |

**Tabelle 67: Bezeichnung der geprüften Probekörper für E60/90**

| <b>geprüfte Probekörper E60/90</b> |               |         |         |         |         |         |
|------------------------------------|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Temperatur<br>[°C]                 | Proben<br>Nr. | 1:0     | 1:1     | 1:1,5   | 1:2     | 1:2,5   |
| -12                                | 1             | 3043005 | 3071401 | 3071404 | 3071407 | 3071410 |
|                                    | 2             | 3043006 | 3071402 | 3071405 | 3071408 | 3071411 |
|                                    | 3             |         | 3071403 | 3071406 | 3071409 | 3071412 |
| -18                                | 1             | 3050607 | 3071501 | 3071504 | 3071507 | 3071510 |
|                                    | 2             | 3050608 | 3071502 | 3071505 | 3071508 | 3071511 |
|                                    | 3             |         | 3071503 | 3071506 | 3071509 | 3071512 |
| -24                                | 1             | 3050705 | 3070910 | 3070913 |         |         |
|                                    | 2             | 3050706 | 3070911 | 3070914 |         |         |
|                                    | 3             |         | 3070912 | 3070915 |         |         |

**Tabelle 68: Bezeichnung der geprüften Probekörper für B50/70**

| geprüfte Probekörper B50/70 |     |         |         |         |         |         |
|-----------------------------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| Temperatur<br>[°C]          | Nr. | 1:0     | 1:1     | 1:1,5   | 1:2     | 1:2,5   |
| -12                         | 1   | 3072101 | 3072103 | 3072106 | 3072109 | 3072112 |
|                             | 2   | 3072102 | 3072104 | 3072107 | 3072110 | 3072113 |
|                             | 3   |         | 3072105 | 3072108 | 3072111 | 3072114 |
| -18                         | 1   | 3071701 | 3071703 | 3071706 | 3071709 | 3071712 |
|                             | 2   | 3071702 | 3071704 | 3071707 | 3071710 | 3071713 |
|                             | 3   |         | 3071705 | 3071708 | 3071711 | 3071714 |
| -24                         | 1   | 3071801 | 3071803 | 3071806 |         |         |
|                             | 2   | 3071802 | 3071804 | 3071807 |         |         |
|                             | 3   |         | 3071805 | 3071808 |         |         |

**Tabelle 69: Bezeichnung der geprüften Probekörper für B70/100**

| geprüfte Probekörper B70/100 |     |         |         |         |         |
|------------------------------|-----|---------|---------|---------|---------|
| Temperatur<br>[°C]           | Nr. | 1:0     | 1:0,5   | 1:1     | 1:1,5   |
| -12                          | 1   | 3043007 | 3051301 | 3051303 | 3051306 |
|                              | 2   | 3043008 | 3051302 | 3051304 | 3051307 |
|                              | 3   |         |         | 3051305 | 3051308 |
| -18                          | 1   | 3050605 | 3070801 | 3070804 | 3070807 |
|                              | 2   | 3050606 | 3070802 | 3070805 | 3070808 |
|                              | 3   |         | 3070803 | 3070806 | 3070809 |
| -24                          | 1   | 3050707 | 3070901 | 3070904 | 3070907 |
|                              | 2   | 3050708 | 3070902 | 3070905 | 3070908 |
|                              | 3   |         | 3070903 | 3070906 | 3070909 |

**Tabelle 69: Bezeichnung der geprüften Probekörper für B70/100**

| geprüfte Probekörper B70/100 |     |         |         |
|------------------------------|-----|---------|---------|
| Temperatur<br>[°C]           | Nr. | 1:2     | 1:2,5   |
| -12                          | 1   | 3051311 | 3051315 |
|                              | 2   | 3051312 | 3051316 |
|                              | 3   | 3051313 |         |
| -18                          | 1   | 3070810 | 3070813 |
|                              | 2   | 3070811 | 3070814 |
|                              | 3   | 3070812 | 3070815 |

**Tabelle 70: Bezeichnung der geprüften Probekörper für B70/100**

| <b>geprüfte Probekörper B70/100 - Langzeitversuche</b> |            |               |         |
|--------------------------------------------------------|------------|---------------|---------|
| T [°C]                                                 | Proben Nr. | Versuchsreihe | 1:0     |
| -12                                                    | 1          | 1             | 5033001 |
|                                                        | 2          | 2             | 5033002 |
| -18                                                    | 1          | 1             | 5040101 |
|                                                        | 2          | 2             | 5040102 |

