



SCHRIFTENREIHE

Institut für Straßenwesen
Technische Universität Braunschweig
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Leutner
Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Wolfgang Arand

STRASSENWESEN

Anja Sörensen

**Zugviskosität von Asphalten
mittels Retardationsversuchen
unter Zugrundelegung
rheologischer Modelle**

Heft 16
Braunschweig, 2000

Inhalt

1	Einleitung und Problemstellung	1
2	Grundlagen der Rheologie	3
2.1	Grundformen rheologischen Verhaltens	3
2.1.1	Elastizität	4
2.1.2	Plastizität	6
2.1.3	Viskosität	7
2.2	Rheologische Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalten	9
2.2.1	Das rheologische Modell von Maxwell	10
2.2.2	Das rheologische Modell von Kelvin	13
2.2.3	Das Burgers-Modell	15
3	Behandlung des Problems in der Literatur	18
4	Untersuchungsmethodik	24
4.1	Zusammensetzungen und Eigenschaften der Asphaltvarianten	24
4.1.1	Baustoffkomponenten	24
4.1.2	Eignungsprüfungen	25
4.1.2.1	Asphaltbeton 0/11	26
4.1.2.2	Gußasphalt 0/11	27
4.1.2.3	Splittmastixasphalt 0/11 S	28
4.2	Herstellung der Probekörper	30
4.3	Versuche zur Bestimmung der Zugviskosität von Asphalten	31
4.3.1	Prozeßgesteuerte Prüfeinrichtung zur Ansprache des thermo-rheologischen Verhaltens von Asphalten	32
4.3.2	Einaxialer Zugversuch	34
4.3.3	Zugrelaxationsversuch	35
4.3.4	Zugretardationsversuch	35
4.3.5	Abkühlversuch	37

4.4	Mathematische und statistische Verfahren	37
4.4.1	Evolutionstrategie	38
4.4.2	Einfache lineare Regression	40
4.4.3	Linearitätstest	41
4.4.4	Signifikanztest	42
5	Untersuchungsergebnisse	44
5.1	Ergebnisse der Zugversuche	44
5.2	Ergebnisse der Retardationsversuche	47
5.2.1	Auswertung mit Hilfe des Modells von Maxwell	48
5.2.2	Auswertung mittels des Burgers-Modells	51
5.3	Kommentierung der ermittelten Zugviskositäten	53
6	Korrelation der ermittelten Zugviskositäten	56
6.1	Proportionalität zwischen den Zugviskositäten λ_z (Maxwell) und λ_1 (Burgers)	57
6.2	Proportionalität zwischen den Zugviskositäten λ_z (Maxwell) und λ_1 (Burgers-Modifizierung: $\lambda_1 = \lambda_2$)	68
6.3	Proportionalität zwischen den Zugviskositäten λ_z (Maxwell) und λ_1 (Burgers-Modifizierung: $E_1 = E_2$)	78
6.4	Proportionalität zwischen den Zugviskositäten λ_z (Maxwell) und λ_1 (Burgers-Modifizierung: $E_1 = E_2$ und $\lambda_1 = \lambda_2$)	88
7	Betrachtungen zu den ermittelten Elastizitätsmoduln	98
8	Interpretation und Schlußfolgerungen	116
9	Zusammenfassung	125
10	Literatur	128

Anhang

9 Zusammenfassung

Das thermo-rheologische Verhalten von Asphaltbeton 0/11, Gußasphalt 0/11 und Splittmastixasphalt 0/11 S wurde mittels Retardationsversuchen bei sechs Prüftemperaturen, nämlich $T = + 20 \text{ °C}$, $T = + 10 \text{ °C}$, $T = \pm 0 \text{ °C}$, $T = - 10 \text{ °C}$, $T = - 20 \text{ °C}$ und $T = - 30 \text{ °C}$, und achtfacher Variation der aufgetragenen Zugspannung prüftechnisch angesprochen.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte unter Anwendung mathematisch-statistischer Methoden, wie beispielsweise der linearen Regressionsanalyse und der Evolutionsstrategie, auf der Grundlage rheologischer Modellvorstellungen von Maxwell und Burgers sowie Modifizierungen des Burgers-Modells durch Gleichsetzen der Parameter Zugviskositäten $\lambda_1 = \lambda_2$ oder Elastizitätsmoduln $E_1 = E_2$ beziehungsweise sowohl Zugviskositäten $\lambda_1 = \lambda_2$ als auch Elastizitätsmoduln $E_1 = E_2$.

Die Auswertung von Retardationsversuchen mit einem linearen Ansatz in Anlehnung an Maxwell ermöglicht auf relativ einfache Weise die Ermittlung der Zugviskosität λ_z von Asphalten. Die hier als Steigungsmaß der Zeit-Dehnungs-Kurve in der Sekundärphase ermittelte Zugviskosität λ_z hängt in starkem Maße von der Prüftemperatur T und der Zugbeanspruchung σ_z ab. Die Zugviskosität λ_z ist bei tiefen Temperaturen um mehrere Zehnerpotenzen größer als bei höheren. Weiterhin wird sie bei höheren Temperaturen stark und bei tiefen Temperaturen weniger stark durch die Zugspannung σ_z beeinflusst.

Auf der Grundlage des nichtlinearen Ansatzes nach Burgers wird bei der Auswertung von Retardationsversuchen neben elastischen und viskosen Komponenten der Zeit-Verformungs-Kurven von Asphalten zusätzlich visko-elastisches Verhalten berücksichtigt und so das tatsächliche Verformungsverhalten besser nachgezeichnet als durch den linearen Ansatz nach Maxwell. Das Burgers-Modell ist ein Vier-Parameter-Modell mit den Zugviskositäten λ_1 und λ_2 sowie den Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 als Stoffkenngrößen, mit dessen Hilfe das Zeit-Dehnungs-Verhalten von Asphalten in Retardationsversuchen während der Belastungsphase bis zum Eintritt der Schädigung des Probekörpers beschrieben werden kann. Zur Ermittlung der Zugviskositäten λ_1 und λ_2 und der Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 steht allerdings keine explizite

mathematische Lösung zur Verfügung, so daß zur Approximation auf die Evolutionsstrategie zurückgegriffen wurde, was wiederum die Verfügbarkeit leistungsfähiger Rechner und entsprechender Rechenprogramme voraussetzt.

Die Zugviskosität λ_z steht in sehr engem Zusammenhang zu der auf der Grundlage des Burgers-Modells ermittelten Zugviskosität λ_1 . Der Zusammenhang zwischen der mit dem Maxwell-Modell ermittelten Zugviskosität λ_z und der Zugviskosität λ_1 des Burgers-Modells beziehungsweise seiner Vereinfachungen wurde durch einfach lineare Regressionen beschrieben und sowohl tabellarisch als auch graphisch dargestellt. Durch Anwendung von Linearitäts- und Signifikanztests war es möglich, die festgestellten Korrelationen zu bewerten. Dabei ergaben sich folgende Aussagen:

- Beim Asphaltbeton 0/11 konnte bis auf zwei Ausnahmen ein linearer Zusammenhang zwischen der Zugviskosität λ_z des Maxwell-Modells und der Zugviskosität λ_1 des jeweils untersuchten Burgers-Modells festgestellt werden, lediglich bei der extrem tiefen Prüftemperatur $T = - 30 \text{ }^\circ\text{C}$ muß die Frage nach Linearität für den Fall der Gleichsetzung der Zugviskositäten λ_1 und λ_2 sowie der Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 verneint werden.
- Am Gußasphalt 0/11 wurde Linearität zwischen den Zugviskosität λ_z und λ_1 des unveränderten Burgers-Modells sowie bei Gleichsetzung sowohl der Zugviskosität $\lambda_1 = \lambda_2$ als auch der Elastizitätsmoduln $E_1 = E_2$ bestätigt. Bei den Prüftemperaturen $T = + 20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $T = - 20 \text{ }^\circ\text{C}$ für den Fall gleichgesetzter Zugviskositäten $\lambda_1 = \lambda_2$ sowie $T = + 20 \text{ }^\circ\text{C}$ für die Burgers-Vereinfachung $E_1 = E_2$ konnte ein linearer Zusammenhang nicht ermittelt werden.
- Am Splittmastixasphalt 0/11 S wurde der lineare Zusammenhang zwischen den Zugviskositäten λ_z und λ_1 ohne Ausnahme nachgewiesen.
- Das Steigungsmaß der die Korrelation zwischen den Zugviskositäten λ_z und λ_1 beschreibenden Geraden ist in exakt der Hälfte aller Fälle nicht identisch mit dem gewählten Schätzwert $b_0 = 1$, die verglichenen Zugviskositäten kön-

nen nicht beliebig gegeneinander ausgetauscht werden. Die Zugviskosität λ_1 des nicht-linearen Modells nach Burgers unterliegt im Gegensatz zur Zugviskosität λ_2 des Maxwell-Modells Wechselwirkungen mit den Parametern Elastizitätsmodul E_1 und E_2 sowie der Zugviskosität λ_2 .

Die Frage, ob es ohne Verzicht auf die Genauigkeit der ermittelten Daten möglich ist, das zur Auswertung von Retardationsversuchen an Asphalten herangezogene Vier-Parameter-Modell von Burgers zu vereinfachen, muß verneint werden. Zwar konnte bei allen untersuchten Asphalten für den Fall der Gleichsetzung sowohl der Zugviskositäten $\lambda_1 = \lambda_2$ als auch der Elastizitätsmoduln des Burgers-Modells $E_1 = E_2$ bestätigt werden, daß ein linearer Zusammenhang zwischen der Zugviskosität λ_1 und der Vergleichsgröße λ_2 besteht. Diese Vereinfachungen bedingen jedoch, daß auf die präzise Bestimmung der Stoffkenngrößen Zugviskositäten λ_1 und λ_2 sowie Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 verzichtet wird, ohne den Rechenaufwand entscheidend zu verringern. Auch im Hinblick auf die Ermittlung der Elastizitätsmoduls E_1 muß festgestellt werden, daß vereinfachende Gleichsetzungen im Burgers-Modell zwar zu ähnlichen, jedoch nicht zu beliebig substituierbaren Ergebnissen führen, so daß auch hier aus Gründen der Genauigkeit der Resultate auf derartige Modifizierungen verzichtet werden sollte.