EMPA

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche
Laboratorio federale di prova dei materiali e di ricerca
Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research

Bestimmung mechanischer Materialkennwerte an bituminösen Baustoffen

Entwicklungen und Erfahrungen der EMPA aufgrund der Forschungsarbeiten FA 4/81, 5/81, 6/81

Détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux de construction bitumineux

Eidgenössisches Departement des Inneren

Forschungsauftrag 4/81, 5/81, 6/81

EMPA Nr. 44994, 44996, 133748
CH-8600 Dübendorf

Juli 1993

ZUSAMMENFASSUNG

Ausgehend von Untersuchungen zur verbesserten *Prüfkörperherstellung im Labor* sowie von konventionellen mechanischen Prüfverfahren - die sich vor allem zu Vergleichszwecken eignen (wie z.B. der Marshall-Versuch) - wurde ein anwendungsbezogenes *neues Prüfverfahren für statische und schwingende Beanspruchung* entwickelt, welches physikalisch besser begründete Materialkennwerte liefert.

Die Untersuchungsergebnisse zur *Prüfkörperherstellung* verdeutlichen den geringeren Praxisbezug der Marshall-Verdichtung. Gleichzeitig zeigen sie aber auch, dass im Bestreben einer praxisnahen Prüfkörperherstellung zwar einige Verbesserungen möglich sind, dass anderseits diesem Anliegen jedoch Grenzen gesetzt sind und gerade deshalb auch die Notwendigkeit der Herstellung von Prüfkörpern vor Ort unter Baustellenbedingungen besteht. Für den *Praktiker* heisst dies, dass trotz aller Eignungsprüfungen im Labor bei wichtigen Bauvorhaben auf einen Probeeinbau nicht verzichtet werden darf.

Als wichtiges Resultat der durchgeführten Arbeiten ist zu werten, dass alle im Zuge der Untersuchung angewandten Prüfverfahren eine etwa vergleichbare, ausreichende Reihung verschiedener Mischungen innerhalb einer (vor allem über den Bindemittelgehalt) abgestuften Mischgutreihe ermöglichen. Die Anwendung all dieser Prüfverfahren zur Ermittlung des relativen optimalen Verhaltens verschiedener Mischungen im Sinne einer Reihung innerhalb von Eignungsprüfungen ist damit gegeben. Bestimmt werden dabei jedoch vorwiegend prüfkörperspezifische Kennwerte.

Das von J. P. Junker gemäss [1] neu entwickelte Prüfverfahren *Biege-Schub-Axial (BSA)* bietet die Möglichkeit, eine rheologische Charakterisierung der bituminösen Beläge im Parameterfeld Frequenz/ Temperatur vorzunehmen und damit bessere Grundlagen für die theoretische Modellbildung und Dimensionierung von Strassenbelägen zu erarbeiten. Die relativ einfach durchzuführende BSA-Prüfung erzeugt verglichem mit dem klassischen Triaxversuch ebenfalls eine triaxiale Beanspruchung, führt im Gegensatz dazu aber an der Mantelfläche des rotationssymmetrischen Prüfkörpers zu keinem konstanten Spannungszustand sondern auf einen der Praxis eher entsprechenden konstanten ebenen Verformungszustand. Vorteilhaft wirkt sich aus, dass mit dem neu entwickelten Prüfverfahren Bohrkerne aus Belägen direkt geprüft werden können.

Zum neu entwickelten Prüfverfahren Biege-Schub-Axial (BSA) wurden mit Blick auf die praktische Umsetzung seitens der EMPA zwischen 1987 und 1993 verschiedene Vorträge und *Publikationen* verfasst, um sowohl für Bohrkerne und Mischgut als auch für bituminöse Bindemittel und Dichtungsmaterialien die neuesten Erkenntnisse hinsichtlich

- Erweiterung und Verfeinerung der Mess- und Prüfmethodik
- Modellierung und Beschreibung des Materialverhaltens
- Vergleich von Materialkennwerten verschiedener bituminöser Materialien

jeweils möglichst rasch dem einschlägigen Fachpublikum zugänglich zu machen. Einige Arbeiten finden sich auch in diesem Bericht. Heute ist das Verfahren soweit eingeführt, dass es auch in internationale vergleichende Labortests zur Ermittlung "dynamischer" Materialkennwerte im Rahmen der RILEM zusammen mit anderen Verfahren, wie z.B. der Trapezmethode oder der Biegeprüfung, miteinbezogen wurde. Diese Vergleichstests sowie die seit Entwicklung der Prüfmethode an der EMPA in anderem Zusammenhang gemachten bisherigen Erfahrungen werden Ausgangspunkt für die methodische Weiterentwicklung innerhalb künftiger Arbeiten sein.

bien pour ce qui e
aux d'étanchéité. (
Aujourd'hui, l'utili
, avec d'autres mé
es essais interlab
s dynamiques des
ratifs ainsi que les
constitueront le po
dans le cadre de tr

RESUME

Une nouvelle méthode d'essai pour les sollicitations statiques et dynamiques ré aux exigences de la pratique et fournissant des valeurs caractéristiques mieux sur le plan physique a été développée à partir d'études réalisées en vue de l'amé de la confection des éprouvettes en laboratoire ainsi que de méthodes d'essa niques conventionnelles qui se prêtent avant tout à un examen comparatif (tel q l'essai Marshall).

Les résultats des études sur la confection des éprouvettes en laboratoire metten dence la faible relation avec la pratique du compactage Marshall. Simultané montrent aussi que quelques améliorations sont possibles pour obtenir des épr de laboratoire davantage conformes à la pratique. Ces améliorations sont tou mitées et la confection d'éprouvettes sur place dans les conditions de chantier une nécessité. Pour le praticien, ceci signifie que, malgré tous les essais de qual de laboratoire, il n'est pas possible de renoncer pour les projets de constructio tants à la réalisation de planches d'essai.

Un résultat que l'on peut qualifier d'important obtenu dans ces travaux est que t méthodes d'essai utilisées dans le cadre de cette étude aboutissent à un classem sant et comparable des différents mélanges à l'intérieur d'une série d'enrobés de sition graduée (se différenciant avant tout par le teneur en liant). Toutes ces r d'essai se prêtent ainsi au classement des différents mélanges quant à leur c ment optimal relatif dans le cadre d'essais de qualification. Les valeurs détermi toutefois avant tout des caractéristiques spécifiques des éprouvettes.

La nouvelle méthode d'essai développée par J. P. Junker [1], dénommée Cisaillement Axial, permet de caractériser les revêtements bitumineux su rhéologique avec une variation des paramètres fréquence/température et d'élab de meilleures bases pour la modélisation théorique et le dimensionner revêtements routiers. Tout comme l'essai triaxial, l'essai Flexion-Cisaillement A est relativement simple à exécuter, provoque lui aussi une sollicitation triaxial la différence de celui-ci, il ne conduit pas à un état de contrainte con l'enveloppe de l'éprouvette à symétrie de révolution mais à un état de déf constant qui correspond mieux à la pratique. Cette nouvelle méthode présent l'avantage de pouvoir soumettre directement à l'essai des carottes prélevé revêtement.

En vue de promouvoir l'utilisation de la nouvelle méthode d'essai Flexion-Cis Axial dans la pratique, l'EMPA a présenté cet essai à travers divers e publications entre 1987 et 1993, ceci afin de diffuser aussi rapidement que dans les milieux spécialisés concernés les connaissances les plus récente domaine

- de l'élargissement et de l'affinement des techniques de mesure et d'essai
- de la modélisation et de la description du comportement des matériaux
- de la comparaison des caractéristiques de différents matériaux bitumine

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1. EINLEITUNG 7

2. GRUNDLEGENDE ENTWICKLUNGEN: EMPA-BERICHT NR. 215 (Referenz [1]) 8

2.1 Allgemeines 8
2.2 Auftrag und Zielsetzung 8
2.3 Methodik und Vorgehen 9
2.4 Ergebnisse 10

3. UNTERSUCHUNG VON BOHRKERNEN UND MISCHGUT MIT B S A 14

3.1 Zielsetzung der Prüfung 14
3.2 Prüfkörperdimensionen 14
3.3 Prüfprinzip 14
3.4 Herstellen der Prüfkörper 16
3.5 Auswertung und Darstellung der Resultate 20
3.6 Spezialfälle 28

4. UNTERSUCHUNG VON BITUMINÖSEN BINDEMITTELN UND DICHTUNGSMATERIALIEN MIT B S A 29

4.1 Zielsetzung der Prüfung 29
4.2 Prüfkörperdimensionen 29
4.3 Prüfprinzip 29
4.4 Herstellen der Prüfkörper 30
4.5 Auswertung und Darstellung der Resultate 31
4.6 Spezialfälle 33

5. NEUE ENTWICKLUNGEN UND ERFAHRUNGEN ZUM B S A 34

5.1 Allgemeines 34
5.2 Mess- und Prüfmethodik 34
5.3 Modellierung und Beschreibung des Materialverhaltens 36
5.4 Vergleich von Materialkennwerten verschiedener bituminöser Materialien 36

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN, AUSBLICK 37

7. REFERENZEN 39

Seite

8. AUSGEWÄHLTE PUBLIKATIONEN ZUR WEITERENTWICKLUNG DES B S A 42

Mess- und Prüfmethodik

Referenz [4] 43

Referenz [8] 52

Referenz [10 65

Referenz [13] 75

Referenz [14] 82

Modellierung und Beschreibung des Materialverhaltens

Referenz [9] 86

Referenz [16] 90

Vergleich von Materialkennwerten verschiedener bituminöser Materialien

Referenz [6] 95

1. EINLEITUNG

Die Bestimmung physikalisch begründeter, für das Verhalten in der Praxis relevanter und als Dimensionierungsgrundlage geeigneter mechanischer Materialkennwerte von bituminösen Baustoffen setzt die Entwicklung spezieller Prüfverfahren voraus, die einfach in der Ausführung, möglichst realistisch hinsichtlich Beanspruchung und Prüfkörperherstellung und gleichzeitig möglichst allgemein in ihrer Aussage sind. Eine solche Prüfmethode wurde zusammen mit den drei thematisch eine Einheit bildenden Forschungsaufträgen

FA 4/81 Bituminöses Mischgut: Herstellen geeigneter Laborprüfkörper und Vergleichen mit Bohrkernen (bewilligt 24. April 1981)

FA 5/81 Physikalische Kennwerte von verdichtetem bituminösem Mischgut, statische mono- und triaxiale Versuche (bewilligt 1. April 1986)

FA 6/81 Physikalische Kennwerte von verdichtetem bituminösem Mischgut, mono- und triaxiale Schwingversuche (bewilligt 24. April 1981)

an der EMPA in der Promotionsarbeit von J. P. Junker [1] entwickelt und zusammen mit anderen Ergebnissen zu den drei Forschungsaufträgen im Detail veröffentlicht und ausführlich diskutiert. Eine Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse jener Arbeit enthält Kapitel 2 "Grundlegende Entwicklungen: EMPA-Bericht NR. 215 (Referenz [1])".

Davon ausgehend wird in den Kapiteln 3 bis 5 eine Übersicht über die weiteren Untersuchungen und Entwicklungen an der EMPA vermittelt, die im Hinblick auf die praktische Anwendung und Erprobung des in [1] vorgeschlagenen Prüfverfahrens BSA (Biege-Schub-Axial) durchgeführt wurden. Diese neuen Untersuchungen und Entwicklungen fanden ihren Niederschlag in zahlreichen in- und ausländischen Publikationen der EMPA. Sie bilden einen wesentlichen Bestandteil der Arbeiten im Zusammenhang mit den drei Forschungsaufträgen und sind daher als Auswahl in Kapitel 8 aufgeführt [4, 6, 8, 9, 10, 13, 14, 16]. Der Bericht beruht auf dem Stand der Erkenntnisse, wie er sich Anfangs 1993 präsentierte, und enthält eine entsprechend aktualisierte Beschreibung des Prüfverfahrens. Es handelt sich um einen Statusbericht, da der internationale Dialog über die geeigneten mechanischen Prüfverfahren zur Ermittlung physikalisch begründeter Materialkenngrössen vermutlich noch einige Zeit in Anspruch nehmen dürfte und an der EMPA die Möglichkeiten des Prüfverfahrens BSA als Basis für einfache und kostengünstige Systemprüfungen von Belägen noch weiter untersucht werden sollen.

2. GRUNDLEGENDE ENTWICKLUNGEN: EMPA-BERICHT NR. 215 (Referenz [1])

2.1 Allgemeines

Die Dissertation J.P. Junker [1] enthält entsprechend der breit und umfassend angesetzten Zielsetzung der Forschungsaufträge FA 4/81, 5/81 und 6/81 umfangreiche Testversuche, die als Grundlage für neue an der EMPA entwickelte Prüfanlagen sowie für die vergleichende Beurteilung der nach dem damaligen Stand der Technik verfügbaren Laborprüfungen dienten. Wie Prof. H. Grob (Altrektor der ETH Zürich und Korreferent der Promotionsarbeit) ausführt, ist es in jener Arbeit gelungen, sowohl die ganze Front der Laborprüfungen um einen wackeren Schritt vorzurücken als auch mit der Entwicklung des Prüfverfahrens BSA eine Methode zu entwickeln, die es erlaubt, über die recht praxisnahe, fast zerstörungsfreie Beanspruchung mit schwingendem Stempel einen Schubmodul abzuleiten, der als charakteristischer Parameter für Berechnungen verwendet werden kann, natürlich unter Berücksichtigung von Temperatur und Belastungszeit. Damit war das wichtigste Ziel der drei Forschungsaufträge erreicht.

Aufgrund der Ergebnisse der Arbeit von J. P. Junker wurden an der EMPA die weiteren Ziele des ursprünglichen sehr umfassenden Konzepts nicht weiter verfolgt, zumal an verschiedensten Stellen in der Schweiz zwischenzeitlich andere Forschungsprojekte mit ähnlichen Problemstellungen im Gange waren und es deshalb im Hinblick auf die Erfordernisse der Praxis am zweckmässigsten erschien, einen neuen Schwerpunkt zu setzen und sich auf die Umsetzung sowie weitere Entwicklung des Prüfverfahrens BSA zu konzentrieren. Beispielsweise wurde die Durchführung von Triaxversuchen in der weiteren Arbeit der EMPA nicht prioritär weiterverfolgt, da wesentliche Aspekte der ursprünglich interessierenden Fragestellungen in der Dissertation S. Huschek [2] am früheren Institut für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau an der ETHZ unter Prof. H. Grob behandelt wurden. Hingewiesen sei zudem auf die Dissertation M. N. Partl [3], welche am Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion der ETHZ unter der damaligen Leitung von Prof. Dr. A. Rösli praktisch gleichzeitig jedoch aus anderer Sicht in Kenntnis der Aktivitäten von J.P. Junker und S. Huschek ebenfalls Fragestellungen der triaxialen Beanspruchung behandelte.

2.2. Auftrag und Zielsetzung

Die Auftragserteilung für die Forschungsaufträge FA 4/81, 5/81 und 6/81 an die EMPA erfolgte durch das Eidgenössische Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement mit Schreiben von Bundesrat Hürlimann vom 24. April 1981 (FA 4/81 und FA 6/81) und von Bundesrat Schlumpf vom 1. April 1986 (FA 5/81).

Allgemein waren umfassende systematische Untersuchungen zur *Prüfkörperherstellung im Labor* durchzuführen. Ausgehend von konventionellen mechanischen Prüfverfahren

(wie Marshall-Versuch), die vor allem für Vergleichszwecke brauchbare Werte liefern, waren insbesondere *neue Prüfverfahren für statische und schwingende Beanspruchung* zu erarbeiten, welche physikalisch besser begründete Werte liefern.

Ein erstes Projekt (FA 4/81) galt der Abklärung, Anwendung und Entwicklung von Methoden zur verbesserten *Herstellung* und Verdichtung geeigneter möglichst praxisnaher *Prüfkörper im Labor* aus verschiedenen häufig verwendeten Mischgutsorten. Durch Berücksichtigung von Mischgutsorten mit einem Grösstkorn über 16 mm war insbesondere nach einem möglichst einfachen Laborverfahren zu suchen, welches die Herstellung von Prüfkörpern mit grösseren Abmessungen als der Marshall-Prüfkörper erlaubt. Es war ein entsprechender Vergleich zwischen Laborprüfkörpern mit auf der Baustelle entnommenen Bohrkernen hinsichtlich konventioneller volumetrischer, mechanischer Kennwerte durchzuführen.

Darauf aufbauend waren in zwei weiteren Projekten (FA 5/81 und FA 6/81) an Bohrkernen und Prüfkörpern aus verschiedenen Mischgutsorten aufgrund mono- und triaxialer *statischer Versuche sowie entsprechender Schwingversuche* physikalisch begründete Kennwerte zu ermitteln und eine geeignete Prüfmethode zu erarbeiten. Die physikalisch begründeten Kennwerte waren zu erfassen in Abhängigkeit von Belastung, Temperatur, Beanspruchungszeit (bzw. Anzahl und Frequenz der Lastwechsel) sowie der volumetrischen Kennwerte. Zusätzlich war die Veränderung der volumetrischen Kennwerte in Funktion der Beanspruchung zu bestimmen (Nachverdichtung).

2.3 Methodik und Vorgehen

Das Arbeitsprogramm von [1] im Rahmen der drei Forschungsprojekte umfasste folgende Schwerpunkte:

- Entnahme einer möglichst praxisentsprechenden, abgestuften Mischgutreihe eines Asphaltbetons AB 16 ab *Aufbereitungsanlage*, in Anlehnung an eine vorgängig erfolgte Eignungsprüfung im Labor, unter Variation des Bindemittelgehalts bei entsprechender Anpassung des Fillergehalts, wobei jeweils eine maximale Lagerungsdichte der Mineralstoffe nach Marshall-Standardverdichtung angestrebt wurde.

- *Prüfkörperherstellung* im Labor unter Variation von Herstellungs-, Verdichtungsart und Prüfkörperabmessungen, wobei jeweils ein Verdichtungsgrad von 100% bezogen auf Marshall-Standard angestrebt wurde. Die Verdichtungsversuche im Labor wurden mit Schlagverdichtung, Gyratorverdichtung, Vibroverdichtung, statischer Druckverdichtung, Walzverdichtung mit Handwalze durchgeführt.

- Erarbeiten von *konventionellen volumetrischen und mechanischen Materialkennwerten*, letztere mittels konventionellen empirisch-technologischen Prüfverfahren (Marshall-Versuche, Spaltzugversuche) sowie konventionellen physikalisch besser begründeten Prüfverfahren (monoaxiale Druck-Bruchversuche, monoaxiale Druck-Kriechversuche, 4-Punkt-Biegung unter Wechsellast).

- Erarbeiten eines *neuen Prüfverfahrens*, mit der Bezeichung *BSA (Biege-Schub-Axial)*, zur Ermittlung physikalisch begründeter Kennwerte an rotationssymmetrischen Prüfkörpern unter Schwingbeanspruchung. Die Mantelfläche der Prüfkörper ist eingeklebt und somit verformungsbehindert, so dass bei Belastung ein mehrachsiger Spannungszustand entsteht, der im Gegensatz zum klassischen Triaxversuch der Situation in der Praxis eher entspricht.

- *Anwendung des BSA* auf verschiedene Mischgutsorten und Vergleich zwischen Laborprüfkörpern und Bohrkernen einschliesslich Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips.

2.4 Ergebnisse

Zusammenfassend ergeben sich aufgrund der Dissertation von J. P. Junker [1] folgende Erkenntnisse:

Die durchgeführten *Verdichtungsversuche* lassen mit Hilfe der ermittelten Verdichtungsparameter und des erforderlichen Verdichtungsaufwandes für verschiedene Verdichtungsgrade deutlich unterschiedliches mechanisches Verhalten innerhalb der untersuchten Mischgutreihe aus fünf Mischungen eines Asphaltbetons AB 16 erkennen. Während im tieferen Temperaturbereich (-10°C...10°C) ein optimales Verhalten bei der Mischung mit der maximalen Lagerungsdichte der Mineralstoffe festzustellen ist, weist im wärmeren Temperaturbereich die etwas bindemittelärmere und damit hohlraumreichere Mischung in allen Prüfverfahren deutlich besseres Verhalten auf.

Bezüglich *Verdichtungsart* konnte festgestellt werden, dass die durch Vibroverdichtung und Walzverdichtung hergestellten Prüfkörper im Prüfverfahren BSA (Biege-Schub-Axial) eher in situ entnommenen Bohrkernen entsprechen als durch Schlagverdichtung hergestellte Prüfkörper. Die statische Druckverdichtung erwies sich als ungeeignet und führte zu Kornzertrümmerungen. In geringem Mass, jedoch vor allem im Feinkornbereich, findet auch bei der Schlagverdichtung im Marshall-Versuch eine Kornverfeinerung statt.

Marshall-Prüfkörper in Standardgrösse und *mit grösseren Abmessungen* (Durchmesser 150 mm) zeigten im Marshall-Versuch gesamthaft ähnliches Verhalten innerhalb der ganzen Mischgutreihe des untersuchten Asphaltbetons AB 16, wobei das Verfahren bei den grösseren Prüfkörpern deutlicher differenzierte.

Die Untersuchung führte zu einer umfassenden vergleichenden *Bewertung von Prüfverfahren*, die in Ergänzung und Differenzierung des bereits vorhandenen Wissens, den Aufwand bei der Prüfkörperherstellung im Labor, die Möglichkeit des Prüfens von Bohrkernen oder Ausschnitten und die Aussagefähigkeit der aus verschiedenen mechanischen Prüfverfahren an Asphalt abgeleiteten Kennwerte berücksichtigte (*Abbildung 2.1*). Insbesondere wurde das Beurteilen und Charakterisieren verschiedener Asphalte im Labor und die Umsetzbarkeit der Kennwerte in Aussagen zum Praxisverhalten getrennt betrachtet.

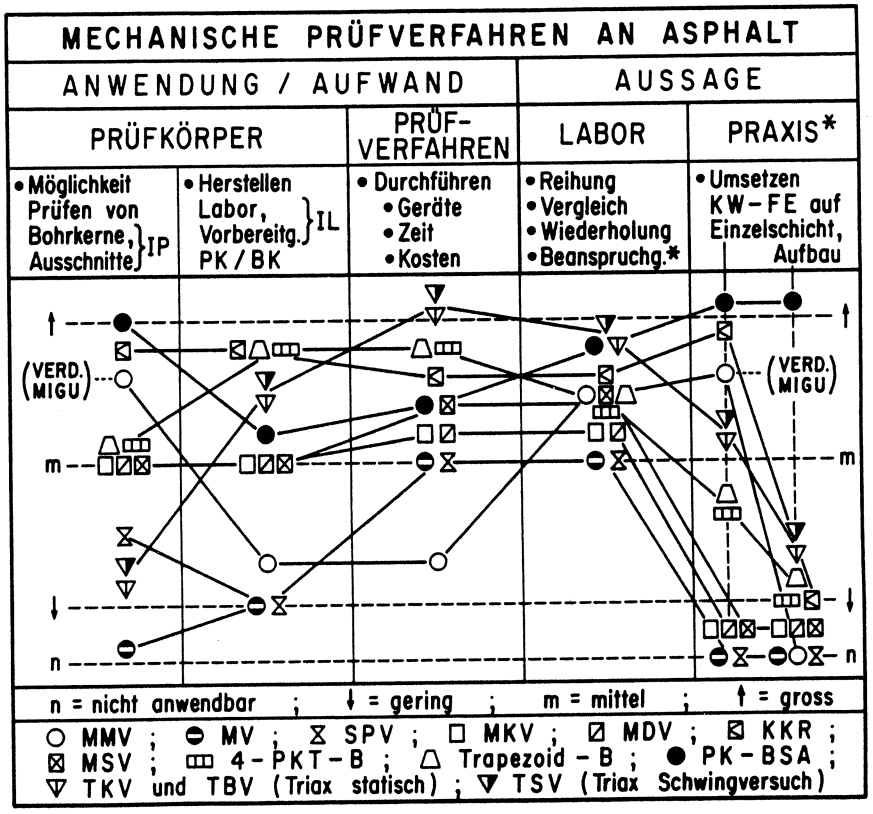


Abbildung 2.1: Mechanische Prüfverfahren an verdichtetem bituminösem Mischgut, an Asphalt [1]; Aufwand und Aussagefähigkeit

Bezeichungen:
IP Initialzustand des Prüfkörpers nach Verdichtung in der Praxis, nach Entnahme aus dem Bauwerk; **IL** Initialzustand des Prüfkörpers nach Herstellung im Labor; **PK** Prüfkörper; **BK** Bohrkern; **KW-FE** Kennwert(e) der Festigkeit; **MMV** Marshall Mehrstufenverdichtung (Variation der Schlagzahl); **MV** Marshall- Versuch; **SPV** Spaltzugversuch; **MKV** Monoaxialer Kriechversuch; **MDV** Monoaxialer Druckversuch; **KKR** Kälte-Kontraktions-Relation; **MSV** Monoaxialer Schwingversuch; **4-PKT-B** Vierpunktbiegung; **Trapezoid-B** Trapezoid-Biegung; **PK-BSA** Biege-Schub-Axial; **TKV** Triaxialer Kriechversuch; **TBV** Triaxialer Bruchversuch (statisch); **TSV** Triaxialer Schwingversuch

Aus den Ergebnissen der durchgeführten vergleichenden Untersuchungen insbesondere mit *konventionellen mechanischen Prüfverfahren* folgt, dass alle in dieser Arbeit angewandten Prüfverfahren eine etwa vergleichbare, ausreichende Reihung verschiedener Mischungen innerhalb einer (vor allem über den Bindemittelgehalt) abgestuften Mischgutreihe ermöglichen (siehe auch *Abbildung 2.1*). Die Anwendung all dieser Prüfverfahren unter der Zielsetzung der Untersuchung des relativen optimalen Verhaltens verschiedener Mischungen im Sinne einer Reihung innerhalb von Eignungsprüfungen ist damit gegeben. Bestimmt werden dabei jedoch vorwiegend prüfkörperspezifische Kennwerte.

Werden aber über diese relative Reihung hinaus, beispielsweise als Ausgangswerte für eine Modellrechnung im Rahmen einer Dimensionierung bituminöser Beläge,

prüfkörperformunabhängige physikalisch begründete Materialkennwerte verlangt, können diese mit dem Prüfverfahren BSA (Biege-Schub-Axial) relativ rasch und einfach ermittelt werden. Durch stufenförmige Erhöhung der Temperatur und jeweilige Variation der Frequenz lässt sich dabei leicht am gleichen Prüfkörper eine rheologische Charakterisierung im Parameterfeld Frequenz/ Temperatur durch Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips vornehmen.

Mit dem *Prüfverfahren Biege-Schub-Axial (BSA)* wurde eine Prüfung entwickelt, die verglichen mit dem klassischen Triaxversuch zwar ebenfalls einen triaxialen Charakter aufweist, im Gegensatz dazu aber an der Mantelfläche des rotationssymmetrischen Prüfkörpers (*Abbildung 2.2*) keinen konstanten Spannungszustand sondern mit Blick auf die Situation in der Belagsebene einen der Praxis eher entsprechenden konstanten Verformungszustand erzeugt. Mit dem neuen Prüfverfahren ist es möglich, in gewissen Grenzen eine annähernd verformungsgesteuerte mehrachsige Beanspruchung aufzubringen. Zudem besteht prinzipiell die Möglichkeit, auch Klimabeanspruchungsgeschichten zu wählen, die mit dem klassischen Triaxversuch nicht oder nur sehr schwer erzeugt werden können, namentlich Beanspruchungen durch Feuchtigkeiten, korrosive Medien oder sehr tiefe Temperaturen.

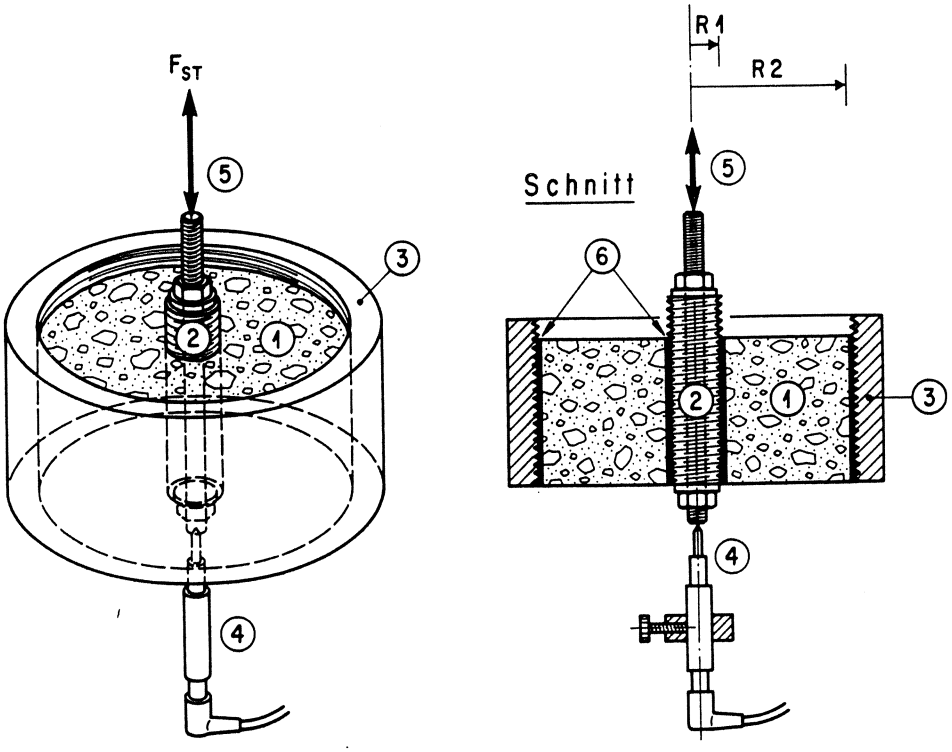


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Prüfanordnung für das Prüfverfahren Biege-Schub-Axial (BSA) aus [1].

Bezeichnungen:
(1) Prüfkörper; (2) Axialer Belastungsstempel mit verschraubter Gewindstange, mit (5) verbunden; (3) Hüllrohr, festes Auflager; (4) Weggeber axial; (5) Kupplung an Kolben der Prüfmaschine (über Gewindestange); (6) Klebeflächen (Epoxidharz); F_{ST} Kraft auf Belastungsstempel; R1, R2 innerer und äusserer Radius des Prüfkörpers

Vorteilhaft wirkt sich aus, dass mit dem neu entwickelten Prüfverfahren nicht nur im Labor hergestellte Prüfkörper sondern auch Bohrkerne aus Belägen direkt geprüft werden können. Die Durchführung ist relativ einfach und erfordert keine radialen Belastungsvorrichtungen. Der Aufwand für die Probenvorbereitung hält sich in Grenzen. Das Prüfverfahren stellt einen ersten Schritt zur praxisbezogenen Prüfung von Belägen und Belagssystemen dar (beispielsweise mit grösseren Belagsstücken, was beim klassischen Triaxversuch schwierig und auch wenig sinnvoll ist) und ermöglicht ferner eine realitätsbezogene Beanspruchung von mehreren Belagsschichten. Hinzu kommt der Vorteil der Schubbeanspruchung, die besonders für Beläge massgebend ist, welche keine ausgeprägte Plattenwirkung zeigen.

Das Prüfverfahren Biege-Schub-Axial (BSA) unterscheidet sich wesentlich von *anderen bekannten Prüfmethoden* für bituminöse Strassenbeläge. Verglichen mit dem bekannten Kragarmversuch (Zweipunktbelastung) liegt der BSA durch die Rotationssymmetrie und die Mehrachsigkeit näher bei der Wirklichkeit. Ähnlich wie dieser weniger praxisnah konzipierte Test und im Gegensatz zur Marshall-Prüfung, beruht der BSA auf einem physikalischen Modell und erlaubt somit Aussagen über Materialeigenschaften und -verhalten mit einer grösseren Allgemeingültigkeit. Gegenwärtig findet im Rahmen der RILEM eine vergleichende Abklärung mit anderen Untersuchungsmethoden an verschiedenen Laboratorien statt [4]. Diese Arbeit sowie die seit Entwicklung der Prüfmethode an der EMPA in anderem Zusammenhang gemachten bisherigen Erfahrungen werden Ausgangspunkt für die methodische Weiterentwicklung innerhalb künftiger Arbeiten sein.

3. UNTERSUCHUNG VON BOHRKERNEN UND MISCHGUT MIT B S A

3.1 Zielsetzung der Prüfung

Bestimmen der mechanischen Materialkennwerte und des Ermüdungsverhaltens von Bohrkernen und laborseitig hergestellten Prüfkörpern aus bituminösem Mischgut.

Simulation einer rotationssymmetrischen Beanspruchung, wie sie lokal durch Radeinwirkung bei flexiblen Belägen näherungsweise erzeugt wird.

3.2 Prüfkörperdimensionen

In der Regel werden Bohrkerne bzw. Prüfkörper aus bituminösem Mischgut mit einem Durchmesser von 140 bis 148 mm und Höhen von 30 bis 80 mm untersucht. Die maximale Korngrösse beträgt 16 mm, in vergleichenden Untersuchungen 22 mm. Grundsätzlich ist auch die Untersuchung von mehrschichtigen Prüfkörpern möglich.

3.3 Prüfprinzip

Bestimmen der mechanischen Materialkennwerte

Der im Aussenzylinder angeleimte Bohrkern bzw. Prüfkörper aus bituminösem Mischgut (Simulation der Plattenwirkung der Fahrbahn) wird durch eine über den zentralen Metallkern (Simulation der Radlast) von 45mm Durchmesser eingeleitete periodische, sinusförmige Schubkraft in axialer Richtung verformt. Die dabei angewandte Kraft und die sich ergebenden Verformungen werden gemessen und daraus der komplexe Schubmodul mitsamt dem elastischen und viskosen Anteil sowie der Phasenverschiebung in Abhängigkeit von Temperatur und Frequenz bestimmt. Die aufgebrachten Kräfte werden niedrig gehalten, damit das Gerüst der Mineralstoffe im Prüfkörper nicht zerstört wird und die Berechnungsmodelle der Viskoelastizitätstheorie angewendet werden können. Die Prüfvorrichtung ist schematisch in *Abbildung 3.1* skizziert und in *Abbildung 3.2* und *Abbildung 3.3* dargestellt. Gegenüber der früheren Versuchsanordnung [1] wurde die Messung durch Applikation von drei externen induktiven Weggebern verfeinert, deren Messanker sich auf ein speziell konstruiertes Messauflager ausserhalb der Klebefuge zwischen Prüfkörper und Metallkern abstützen.

Die Prüfung beginnt normalerweise bei einer Temperatur von -5 °C, die in der Folge stufenweise um 5 °C erhöht wird. Bei jeder Temperaturstufe wird der Prüfkörper jeweils eine Stunde temperiert und das Frequenzspektrum von 0.125 bis 16 Hz anschliessend ausgemessen. Die Messungen erfolgen unter Kontrolle der Temperatur im Prüfkörper und hinsichtlich der Mittellage des Prüfkörpers unter Beibehalten der Geometrie beim Herstellen. Kriechvorgänge während dem Prüfen und die damit

verbundenen Veränderungen des Mineralstoffgerüstes werden so verhindert. Bei jedem festgelegten Paar von Temperatur und Frequenz werden sechs Messungen durchgeführt.

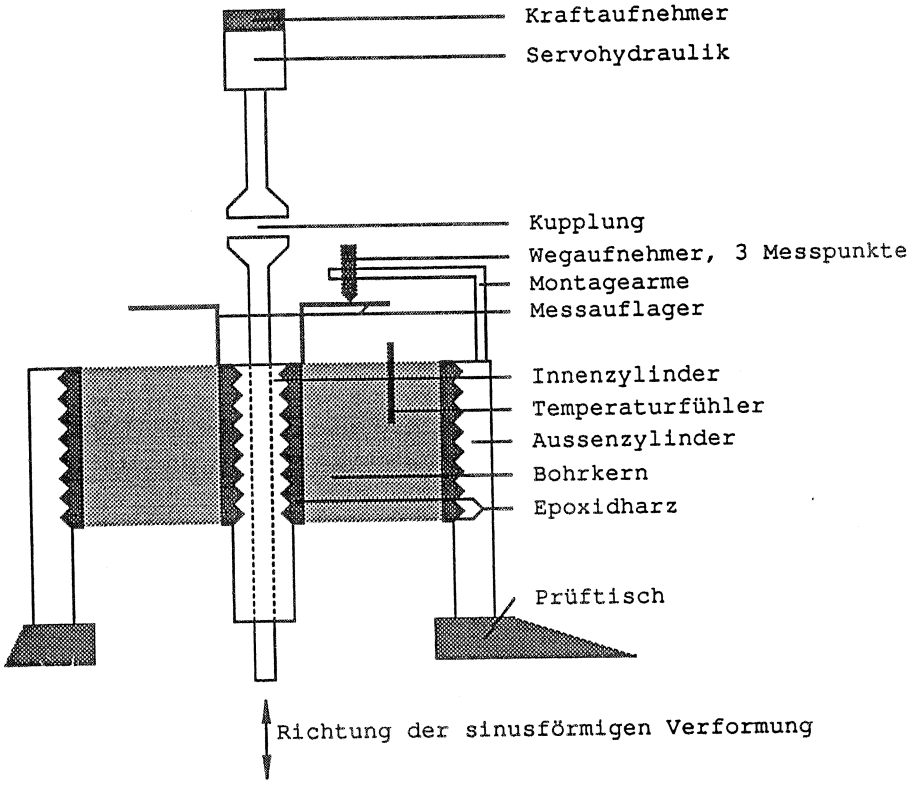


Abbildung 3.1: Prinzip der Prüfvorrichtung (schematisch)

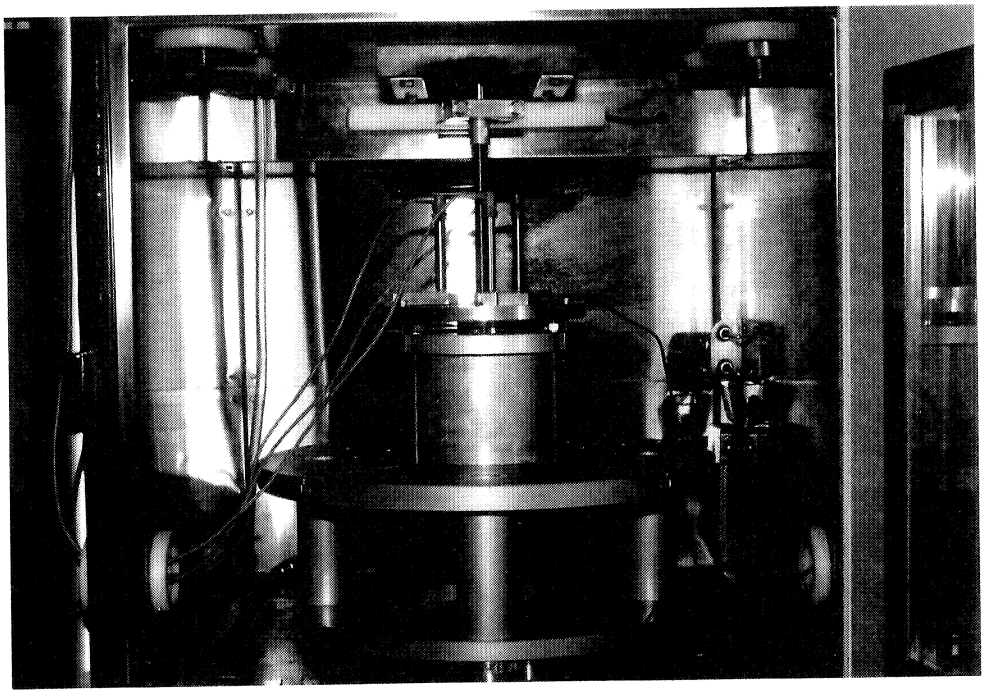


Abbildung 3.2: Gesamtansicht des Prüfaufbaus in der Klimakammer (EMPA-Foto Nr. 98287/24)

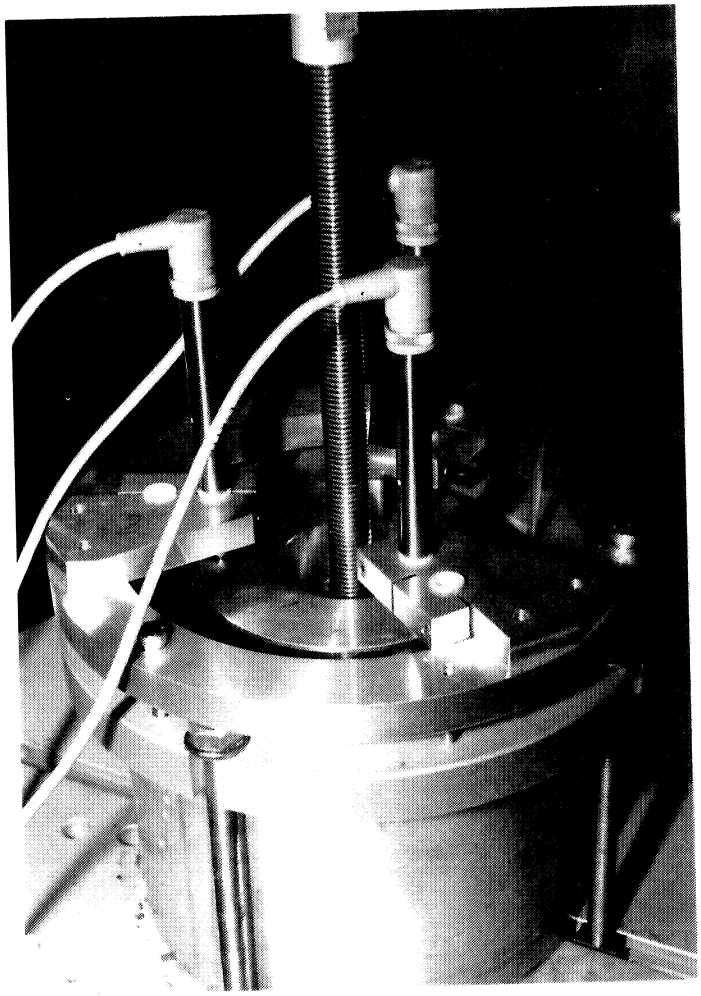


Abbildung 3.3:
Prüfkörpereinbau. Gut erkennbar sind die drei induktiven Weggeber. (EMPA-Foto Nr. 98287/11)

Bestimmen des Ermüdungsverhaltens

Der Bohrkern bzw. Prüfkörper aus bituminösem Mischgut wird durch eine über den zentralen Metallkern wirkende, mit 0.25 Hz schwingende Belastung verformt und dabei sukzessive zerstört. Die Mittellage des Schwingweges des zentralen Metallkerns wird beibehalten und die Zerstörung durch eine einseitige Belastung vermieden. Die Kraft wird gemäss einer sinusförmigen Sollkurve geregelt. Der Sollwert der Kraftamplitude wird proportional zur Höhe des Prüfkörpers festgelegt. Ein Einfluss dieser Höhe auf das Resultat der Ermüdungsprüfung wird somit vermieden. Die sich ergebende Verformung wird gemessen und die Phasenverschiebung zwischen Verformung und Kraft ermittelt. Die Sinusförmigkeit wird beurteilt anhand des Koeffizienten zwischen der gemessenen Verformungsgeschwindigkeit und einer aus der gemessenen Verformung unter der Annahme eines ideal sinusförmigen Schwingweges berechneten.

3.4 Herstellen der Prüfkörper

Prüfkörper aus Belagsstücken

In das angelieferte Belagsstück wird mit einem Diamanthohlbohrer ein Loch mit dem Durchmesser 50 mm gebohrt. Anschliessend wird in der gleichen Aufspannung mit ei-

nem Diamanthohlbohrer, Innendurchmesser 152 mm, der Bohrkern herausgeschnitten. Die so vorbereiteten Bohrkerne werden auf die gewünschte Schichtdicke geschnitten und bei Bedarf in die einzelnen Schichten getrennt. Ober- und Unterseite des Bohrkerns werden mit einer Paraffinschutzschicht überzogen. Der so vorbereitete Bohrkern wird mit Epoxidharz in den gut gereinigten und entfetteten Aussenzylinder eingeklebt. Ein Metallkern wird im Zentralloch des Bohrkernes ausgerichtet und ebenfalls mit Epoxidharz eingeklebt. Nach dem Aushärten des Epoxidharzes wird die Paraffinschutzschicht an Ober- und Unterseite entfernt. Vor dem Prüfkörpereinbau in die Prüfmaschine erfolgt die Montage einer Gewindestange (Kupplung zur Prüfmaschine) am Metallkern und das Aufkleben der Messauflager auf den Bohrkern (*Abbildungen 3.4...3.9*).

Bohrkerne bzw. Prüfkörper aus bituminösem Mischgut

Die Herstellung dieser Probekörper erfolgt analog zu dem eben beschriebenen Verfahren, wobei jedoch nur die Bohrung des Zentrumsloches vorzunehmen ist. Im Falle der Prüfkörper aus bituminösem Mischgut ist besonders auf die Beschaffenheit der Mantelfläche zu achten, damit beim Verkleben ein guter Verbund mit dem Aussenzylinder gewährleistet ist. Gussasphalt kann direkt in den Aussenzylinder eingegossen werden; danach wird ein Zentrumsloch gebohrt und der Metallkern eingeklebt.

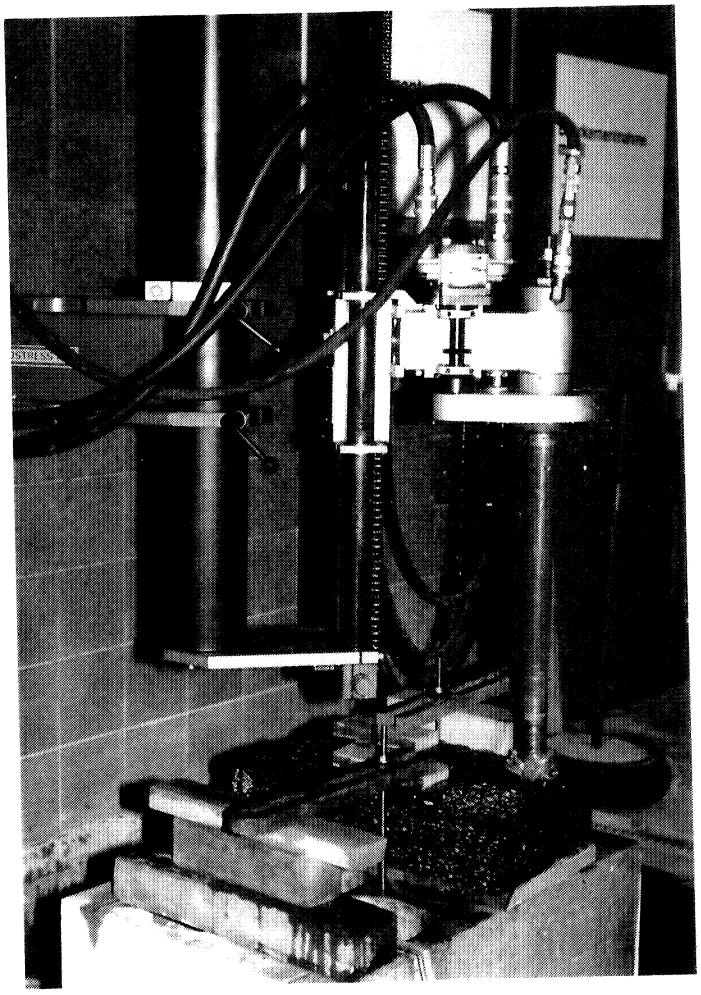


Abbildung 3.4:
Stationäre Bohrmaschine. Bohren des Zentralloches mit dem Durchmesser 50 mm (EMPA-Foto Nr. 98061/35)

Abbildung 3.5: Bohrkerne eines zweischichtigen Belages, die im Schichtverbund geprüft wurden (EMPA-Foto Nr. 98074/30)

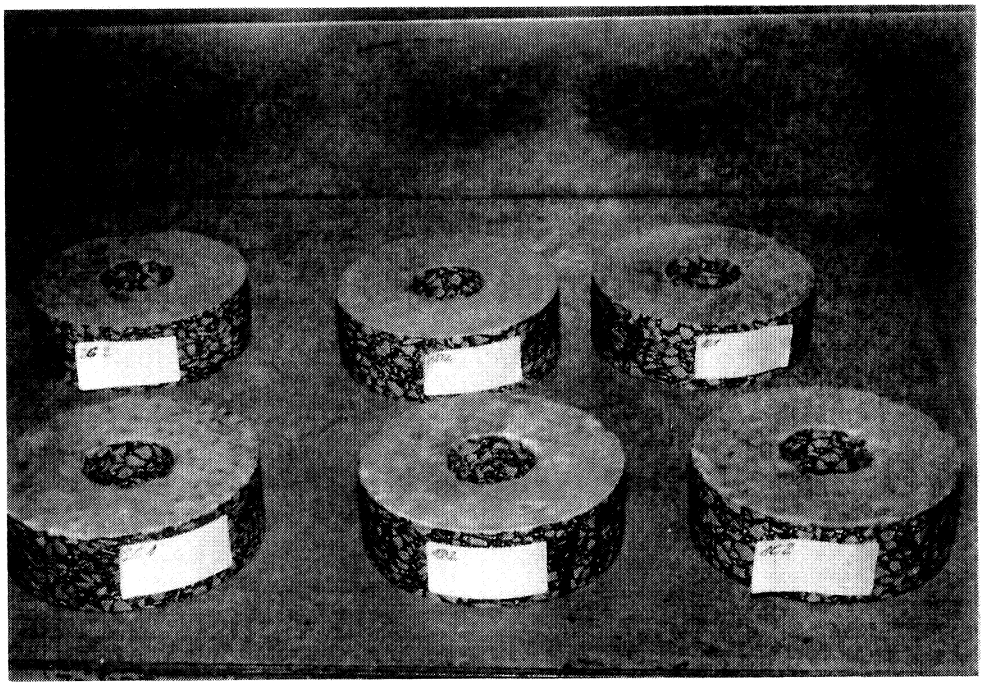


Abbildung 3.6: Bohrkerne eines zweischichtigen Belages, getrennt in einzelne Schichten, mit Paraffinschutzschicht (EMPA-Foto Nr. 98256/1)

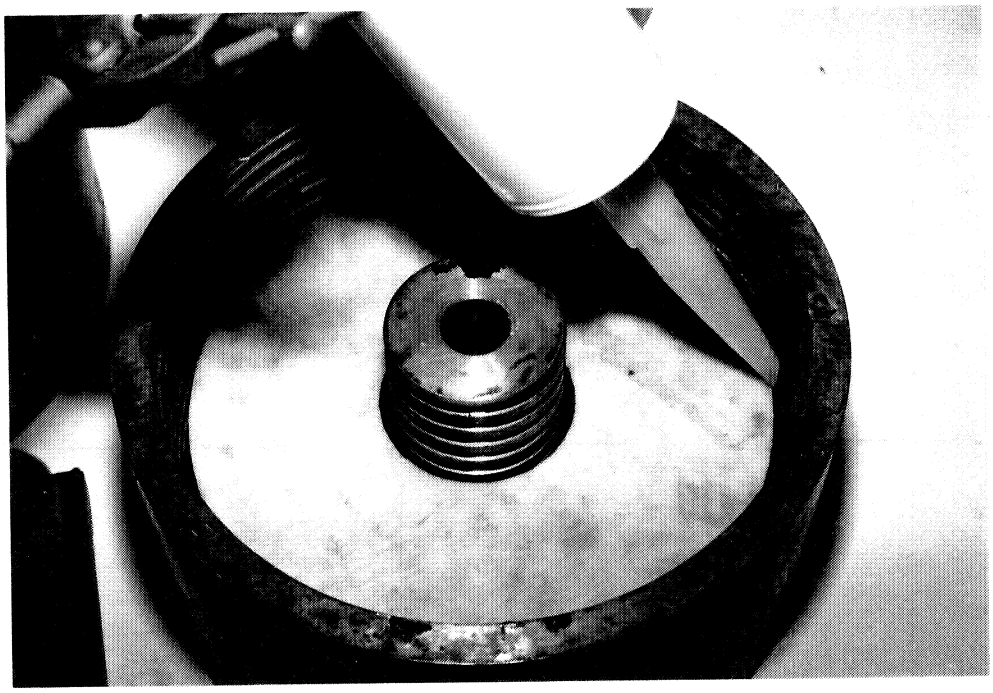


Abbildung 3.7: Einkleben der Bohrkerne und des Metallkernes (EMPA-Foto Nr. 98256/9)

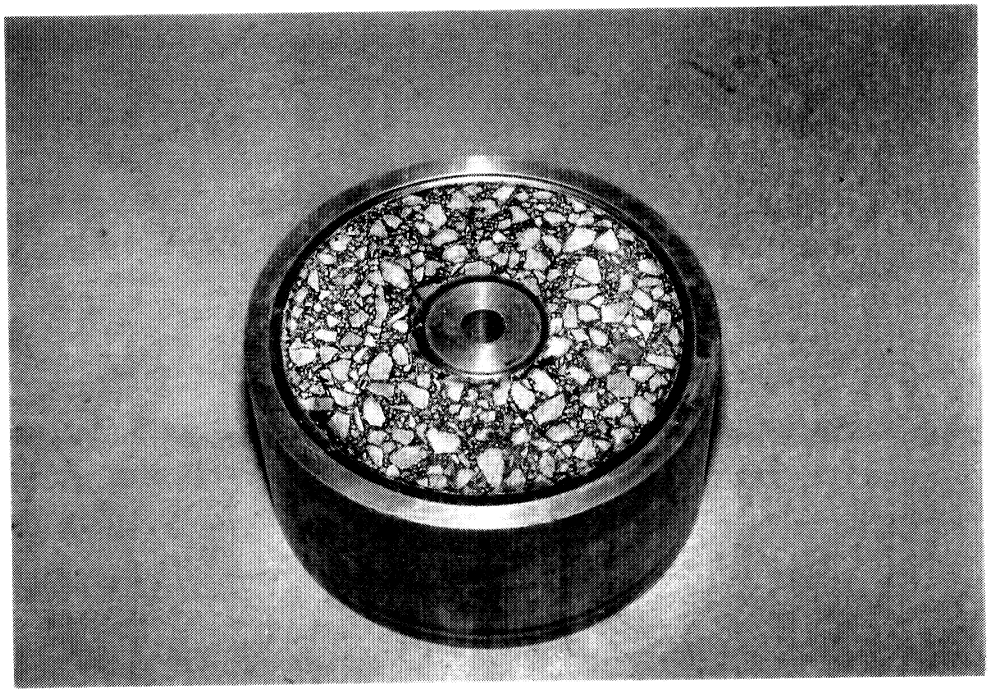


Abbildung 3.8: Eingeklebter Bohrkern nach Entfernen der Paraffinschicht (EMPA-Foto Nr. 98256/11)

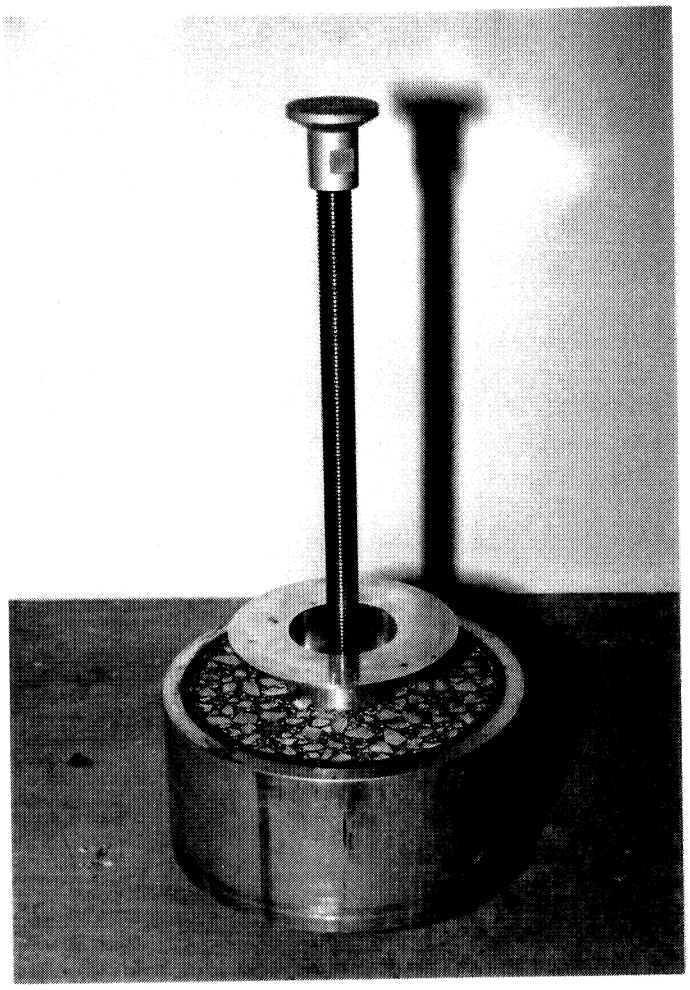


Abbildung 3.9:
Vorbereiteter Prüfkörper für den Einbau in die Prüfmaschine (EMPA-Foto Nr. 98287/33)

3.5 Auswertung und Darstellung der Resultate

Berechnen der Schubmoduln aus Messwerten von Weg und Kraft

Die Vorgabe eines sinusförmigen Sollwertes für die Kraft führt bei linearem mechanischem Verhalten des geprüften Materials (Wegamplitude proportional zur Kraftamplitude) zu einer sinusförmigen Reaktion. Die beiden sinusförmigen Kurven für Kraft und Weg werden auf die Sinus- und Cosinusanteile hin untersucht. Aus diesen Anteilen können Amplituden für Weg und Kraft, sowie für die Phasenverschiebung ϕ zwischen den beiden sinusförmigen Kurven berechnet werden. Der *komplexe Schubmodul* G^* ergibt sich aus dem Verhältnis von Kraft- und Wegamplitude, multipliziert mit einem Faktor, der unter Ausnützung der Rotationssymmetrie, wie in *Abbildung 3.10* dargestellt, durch Finite-Element-Berechnung ermittelt wurde und zur Berücksichtigung der Prüfkörperabmessungen dient.

Aus dem komplexen Schubmodul G^* und der Phasenverschiebung ϕ können der *Verlustmodul* G" (viskoser Anteil: Imaginärteil) und der *Speichermodul* G' (elastischer Anteil: Realteil) nach folgender Beziehung berechnet werden (vgl. *Abbildung 3.11*)

elastischer Anteil (Speichermodul) $$G' = G^* \cdot \cos(\phi) \qquad (3.1)$$

viskoser Anteil (Verlustmodul) $$G'' = G^* \cdot \sin(\phi) \qquad (3.2)$$

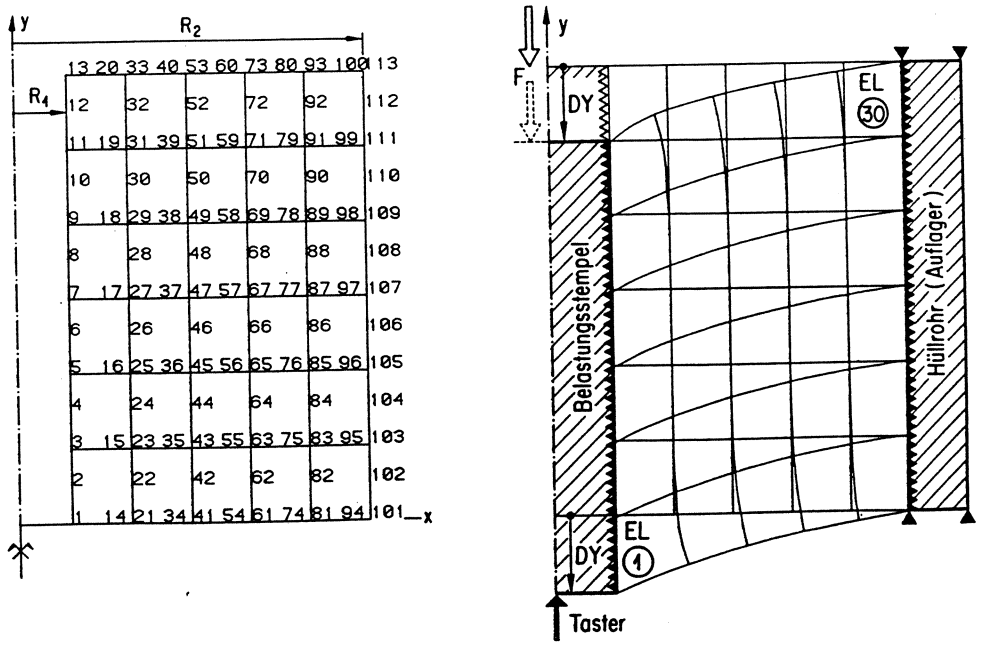


Abbildung 3.10: Finite-Element-Berechnung gemäss [1]. Anordnen der Knoten und Zwischenknoten (links), Verschiebung DY des zentralen Metallkerns (Belastungsstempel) infolge axialer Belastung (Rotationssymmetrie bezüglich y-Achse, halber Querschnitt, Dicke der Klebefläche: 0)

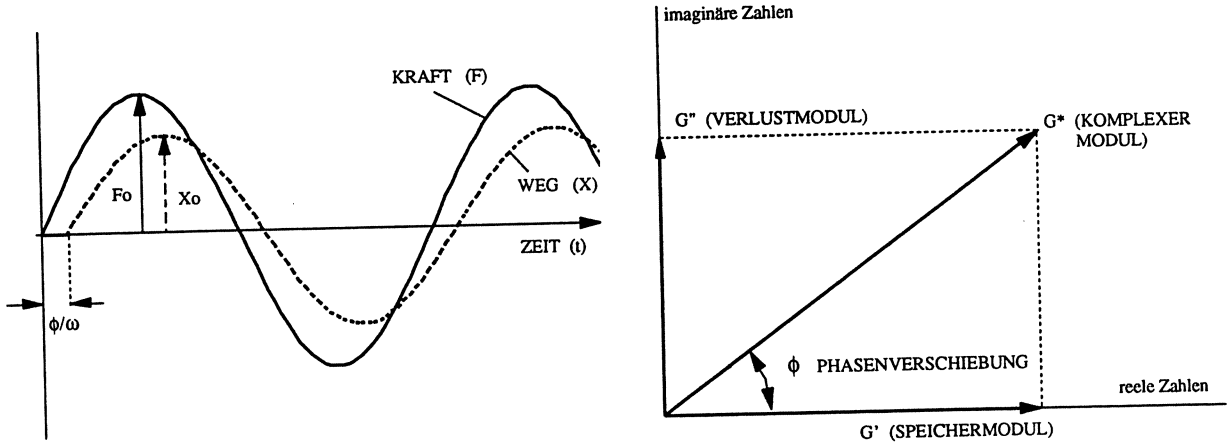


Abbildung 3.11: *Bild links:* Kraft- und Verformungsverlauf bei viskoelastischen Materialien unter sinusförmiger schwingender Beanspruchung (schematisch);
Bild rechts: Vektorielle Darstellung des komplexen Moduls G^*, mit G' als elastischem und G" als viskosem Anteil und der Phasenverschiebung ϕ

Zur Überprüfung der Verlässlichkeit der Werte für den Schubmodul, wird an den Messdaten anhand von ausgezeichneten Kontrollwerten ein Test auf Symmetrie und Sinusförmigkeit der Kurven durchgeführt. Es handelt sich dabei um das Verhältnis der Steigungen bei den Nulldurchgängen, welches 1.0 sein sollte, sowie das Verhältnis zwischen der Steigungen bei einem Nulldurchgang und der Amplitude, welches bei richtiger Normierung ebenfalls 1.0 ergeben sollte (weil die Ableitung eines Sinus den Cosinus ergibt und die Amplitude dabei gleich bleibt). Messfehler beim Bestimmen einzelner Punkte der Schwingungskurve können bei kleiner Amplitude auf die Kontrollwerte einen grossen Einfluss ausüben. Es ergeben sich dann einzelne zufällig erheblich von 1.0 abweichende Kontrollwerte. Solange aber die Schubmodulwerte nicht stark streuen, können diese trotzdem als gesichert angesehen werden.

Schubmodul in Abhängigkeit von Temperatur und Frequenz

Pro Temperatur und Frequenz werden in der Regel sechs Schubmodulwerte bestimmt. Im allgemeinen streuen diese Werte nicht einfach um einen Mittelwert, sondern weisen eine geringe Abhängigkeit von der Dauer der Schwingbelastung auf. Für

- Amplitude von Kraft und Weg
- Phasenverschiebung
- Temperatur im Prüfkörper

wird geprüft, ob die Veränderung der Werte mit der Zeit statistisch signifikant ist. Wo dies zutrifft, wird der Wert dieser Grössen für den Beginn der Schwingbelastung ermittelt und der Materialkennwert im unbelasteten Zustand gewonnen. Ist die Veränderung der Werte mit der Zeit nicht signifikant, wird der Mittelwert als Materialkennwert eingesetzt. Dieser Wert unterscheidet sich nicht statistisch signifikant vom Wert zu Beginn der Schwingbelastung und ist weniger durch den Einfluss einzelner abweichender Messungen beeinflusst.

Als Beispiel sind in *Abbildung 3.12* die Kurvenäste des komplexen Schubmoduls eines Belags für verschiedene Temperaturen und Frequenzen in doppeltlogarithmischer Darstellung zusammengefasst. *Abbildung 3.13* enthält die zugehörige Phasenverschiebung.

Die ermittelten Werte können für mechanische Berechnungen verwendet werden. Die grafische Darstellung ermöglicht das Klassieren der Materialien nach ihren rheologischen Eigenschaften. Der im obigen Beispiel (*Abbildung 3.12* und *Abbildung 3.13*) im Bereich hoher Temperaturen und tiefer Frequenzen linear abfallende Schubmodul deutet auf ein weitgehend viskoses Verhalten hin. Flache, im Bereich hoher Frequenzen wieder eher horizontal verlaufende Kurvenäste würden dagegen auf ein bei hohen Temperaturen vorherrschendes elastisches Verhalten hindeuten.

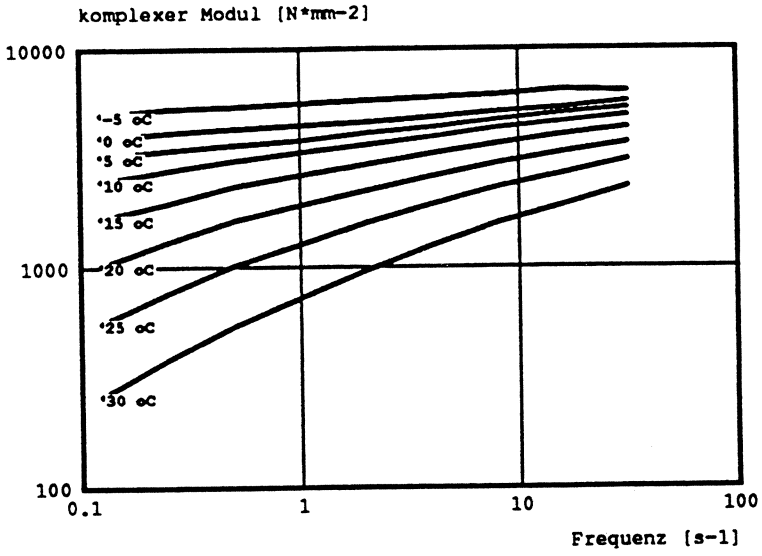


Abbildung 3.12: Komplexer Schubmodul eines Belags in Abhängigkeit der Frequenz für verschiedene Temperaturstufen

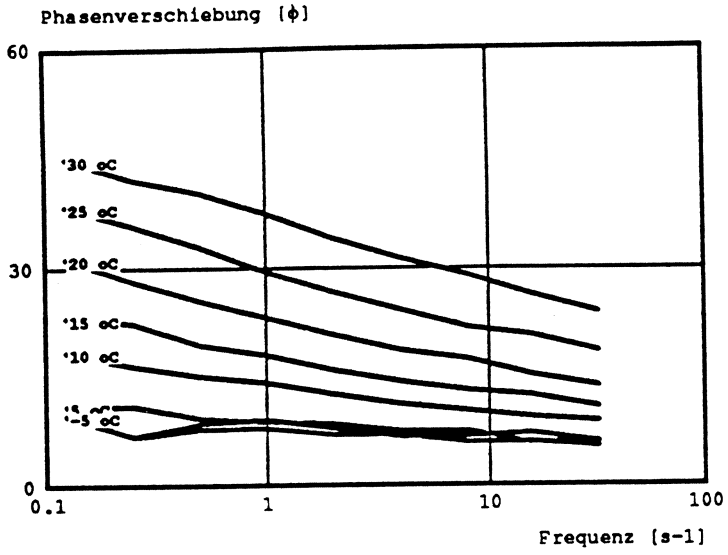


Abbildung 3.13: Phasenverschiebung, ermittelt am Belag von *Abbildung 3.12* in Abhängigkeit der Frequenz für verschiedene Temperaturstufen

Berechnen und Auswerten von Masterkurven

Die bei verschiedenen Temperaturen ermittelten Kurvenstücke des komplexen Schubmoduls in Abhängigkeit der Frequenz können im doppeltlogarithmischen Massstab

durch horizontales Verschieben um den sog. *Shiftfaktor* α_T zur Deckung gebracht und für eine beliebige Referenztemperatur zu einer einzigen Kurve zusammengesetzt werden. Diese Kurve wird als *Masterkurve* für die gewählte Referenztemperatur bezeichnet. Die Verschiebungsfaktoren α_T sind temperaturabhängig und stellen wegen des doppeltlogarithmischen Massstabes in Wirklichkeit Multiplikationsfaktoren dar. Die Frequenzverschiebung zwischen den Kurvenästen wird zweckmässigerweise zwischen Kurven benachbarter Temperaturen ermittelt, weil hier der Bereich, für den die Kurven zur Deckung gebracht werden können, am grössten ist. Die Frequenzverschiebung ergibt sich dann aus dem mittleren horizontalen Abstand der benachbarten Kurvenäste.

Das Verfahren zur Ermittlung der Masterkurve ist schematisch in *Abbildung 3.14* dargestellt. Ein Beispiel einer Masterkurve an einem Bohrkern enthält *Abbildung 3.15*.

Im Zusammenhang mit der Masterkurve können folgende Grössen ermittelt werden:

Komplexer Schubmodul G^*:

Die Masterkurve für den komplexen Schubmodul wird nach einer Formel von G. R. Dobson [7] mittels einer Iteration berechnet. Sein numerischer Ansatz eignet sich gut für bituminöse Materialien.

Phasenverschiebung ϕ:

Nach G. R. Dobson kann die Phasenverschiebung als nur abhängig vom komplexen Modul beschrieben werden. Mittels Regressionsrechnung wird die Phasenverschiebung in Abhängigkeit vom komplexen Modul berechnet.

Schwingungsviskosität η:

Die Schwingungsviskosität η ist definiert als Verlustmodul G" dividiert durch die Kreisfrequenz ω ;(η_0: Grenzwert der Schwingungsviskosität bei tiefen Frequenzen für die Referenztemperatur).

Die Verwendung der *Kreisfrequenz* ω (Frequenz multipliziert mit 2 π) anstelle der Frequenz erweist sich als vorteilhaft, weil die Schwingungsviskosität direkt mit der Kreisfrequenz zusammenhängt.

Grenzwert des komplexen Moduls G_∞:

Die Auswertung der Masterkurve für den komplexen Modul liefert einen Grenzwert für eine gegen unendlich strebende Frequenz. Dieser Grenzwert bestimmt die Lage der horizontalen Asymptote.

Scherempfindlichkeitsparameter b:

Dieser Parameter gibt an, wie schnell die Masterkurve von der diagonalen zur horizontalen Achse übergeht. Er ist somit ein Mass für die Geschwindigkeit des Überganges von viskosem zu elastischem Verhalten. Ein hoher Wert und damit ein rascher Übergang bedeutet, dass zwischen rein viskosem und rein elastischem Verhalten eine nur geringe Frequenzspanne liegt. Gemäss Temperatur-Frequenz-Superpositionsprinzip folgt daraus, dass bei gegebener Frequenz schon eine geringe Temperaturänderung diesen Verhaltenswechsel bewirkt. Ein hoher Wert deutet somit auf ein kleines, ein tiefer Wert dagegen auf ein grosses Schmelzintervall hin. Bei einer rein viskoelastischen Flüssigkeit erfolgt der Übergang rasch und der Wert ist mit b=1.96 sehr hoch, für bituminöse Materialien mit sukzessivem Übergang ist der Scherempfindlichkeitsparameter viel kleiner (bespielsweise b=0.29 [6]).

Die Formel für die Masterkurve gemäss G. R. Dobson [7] lautet:

$$\log_{10} \omega_r^{-b} = \log_{10} (G_r^{-b} - 1) + (20.5 - G_r^{-b}) / 230.3 \qquad (3.3)$$

$$\omega_r = (\eta_0 \cdot \omega \cdot \alpha_T) / G_\infty \qquad (3.4)$$

$$G_r = |G^*| / G_\infty \qquad (3.5)$$

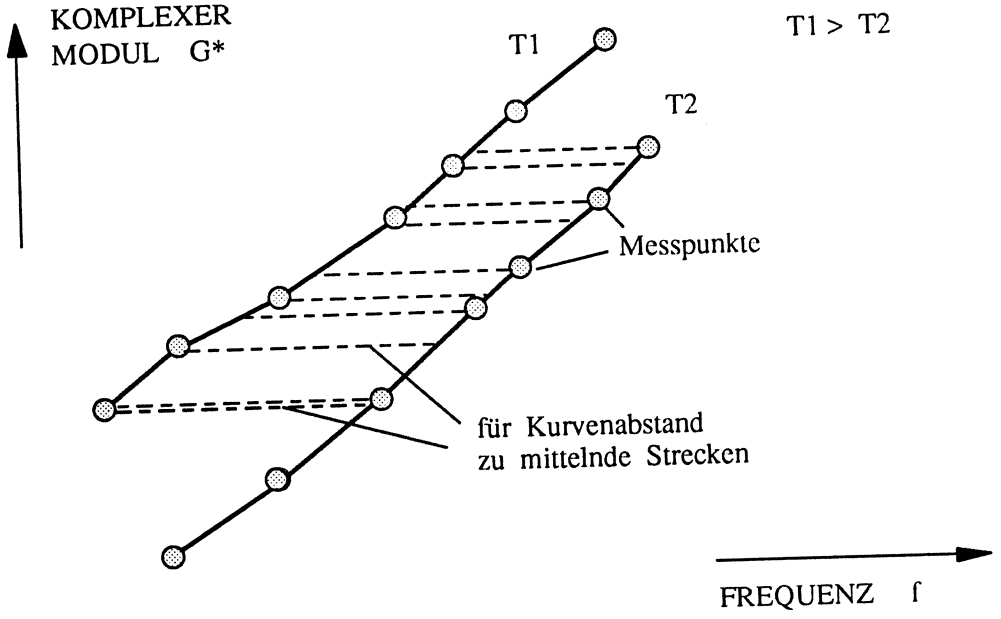


Abbildung 3.14: Ermittlung der Masterkurve (schematisch)

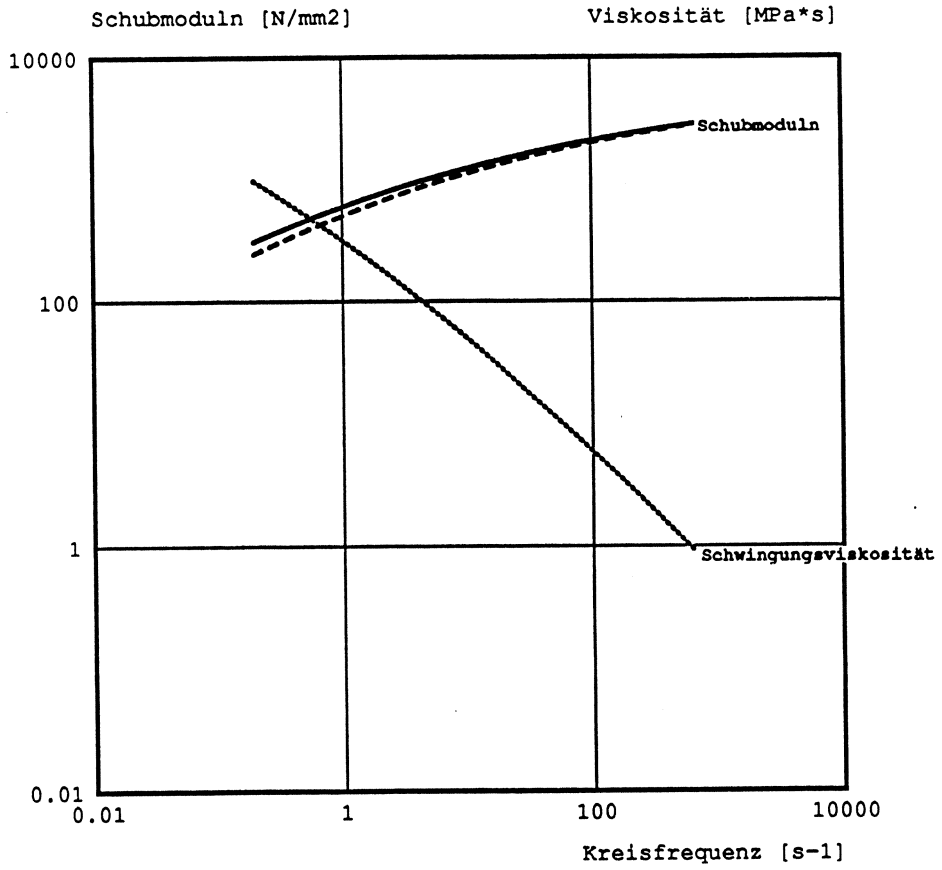


Abbildung 3.15: Masterkurve bei 20°C, ermittelt an einem Bohrkern. Ausgezogene Linie: komplexer Schubmodul G^*; gestrichelte Linie: Speichermodul G'

Ermüdungsverhalten

Grundsätzlich können Ermüdungsversuche auf zwei verschiedene Arten durchgeführt werden [8]:

a) Ermüdungsversuch bei konstanter Temperatur

Die Amplituden der Verformung in Funktion der Zahl der Lastwechsel, die Phasenverschiebung und die relative Verformungsgeschwindigkeit werden ermittelt und dargestellt. Die Temperatur wird konstant gehalten. Charakteristische Grösse zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens ist die Anzahl Lastzyklen bis zum Bruch. *Abbildung 3.16* zeigt als Beispiel das Resultat für die ermittelten Kenngrössen an einem Bohrkern [9,10].

Der anfänglich raschen, teilweise reversiblen Abnahme des komplexen Schubmoduls folgt eine Periode relativer Stabilität (*Abbildung 3.16*). Dann beginnt eine erst langsame, sich aber beschleunigende Zerstörung. Die maximale Phasenverschiebung zwischen Weg und Kraft zeigt den Beginn der beschleunigten Zerstörung an. Es ist dies der Moment, wo die Veränderung des Mineralstoffgerüstes sich deutlich auf die Eigenschaften des Materials auszuwirken beginnt.

Die relative Verformungsamplitude nimmt zunächst proportional zur Lastzyklenzahl zu, um dann rascher anzuwachsen. Die Verformungskurve geht dabei angenähert von der sinusförmigen in eine rechteckförmige Kurve über, und die Verformungsgeschwindigkeit weist immer stärkere Schwankungen auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die zunächst lokalen Zerstörungen des Mineralstoffgerüsts sich innerhalb des Bohrkerns auszuweiten beginnen um schliesslich den ganzen Prüfkörper zu erfassen (*Abbildung 3.17*). Ein ähnliches Verhalten wurde übrigens auch in statischen Zug/Druck-Kriechversuchen festgestellt [3] und führte zu der in [11, 12] beschriebenen Modellvorstellung.

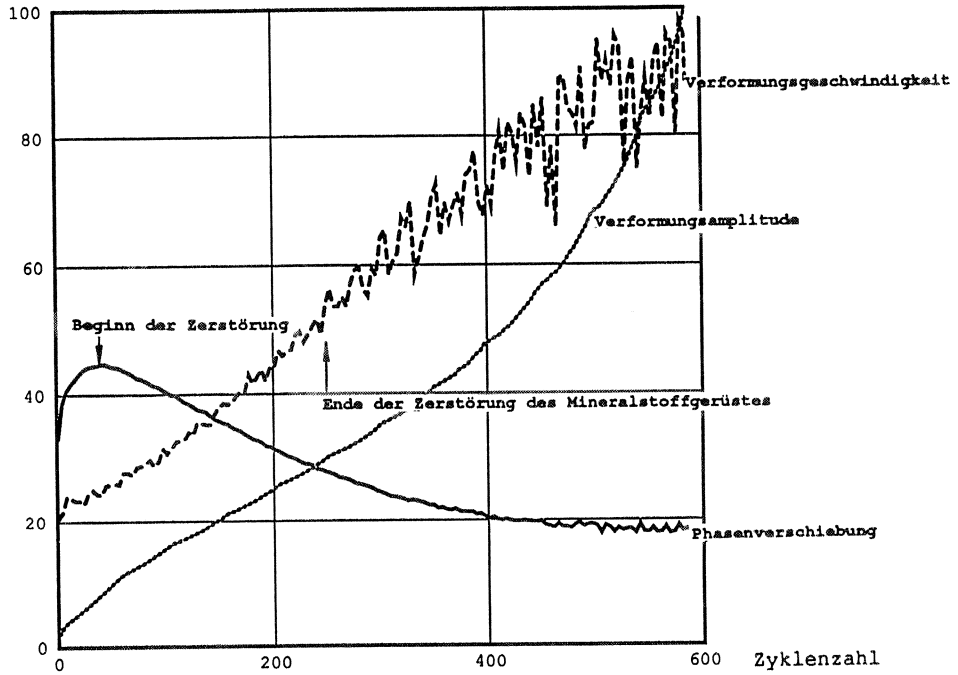


Abbildung 3.16: Resultate einer Ermüdungsprüfung an einem Bohrkern. Dargestellt sind die Verformungsgeschwindigkeit und -amplitude jeweils in % des Maximalwertes sowie die Phasenverschiebung in Winkelgrad

Abbildung 3.17: Prüfkörper nach Ermüdungsversuch (EMPA-Foto Nr. 99961/12)

Die Lastzyklenzahlen bis zum Beginn einer nennenswerten und bis zur völligen Zerstörung des Mineralstoffgerüstes in einem Teil des Bohrkernes liefern eine gute Korrelation; sie sind daher vor allem für den Vergleich verschiedener Materialien gut geeignet.

b) Ermüdungsversuch mit sukzessiver Temperatursteigerung

Die Prüfung ist geeignet für eine rasche vergleichende Beurteilung des Ermüdungsverhaltens. Die Belastung erfolgt in Belastungsblöcken von 150 Zyklen. Jeweils nach Abschluss eines Belastungsblockes wird die Temperatur um 1°C erhöht und nach einer Temperierung von 900s der nächste Belastungsblock aufgebracht. Charakteristische Grösse ist die Temperatur, bei welcher der Ermüdungsbruch erfolgt, bzw. bei welcher eine kritische Verformung (z.B. 2mm) erreicht ist. Beispiele des Verhaltens zweier unterschiedlicher Bohrkerne zeigt *Abbildung 3.18.*

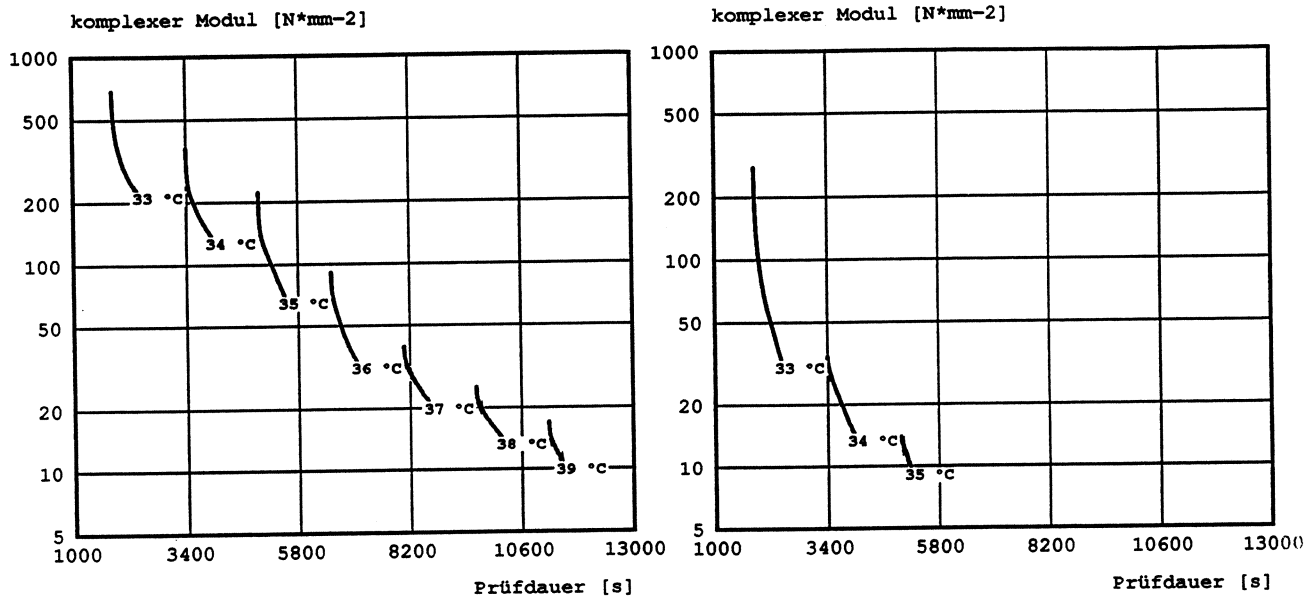


Abbildung 3.18: Ermüdungsverhalten zweier unterschiedlicher Bohrkerne im Ermüdungsversuch mit sukzessiver Temperatursteigerung

3.6 Spezialfälle

Grundsätzlich eignet sich das Prüfverfahren BSA auch zur Untersuchung von speziellen Fragestellungen. Dabei ist jeweils in Vorabklärungen zu prüfen, ob die Dimensionen des Aussen- und Innenzylinders beibehalten werden können oder abgeändert werden müssen. Beispielsweise wurde im Zusammenhang mit einem Auftrag an die EMPA zur Untersuchung von *Fugendichtungsmassen für Fahrbahnübergänge* ein Aussen- und Innenzylinder mit einem Durchmesser von 160 mm und 60 mm verwendet. Das Prinzip des Prüfverfahrens blieb unverändert. Bis heute wurden Belagsprüfkörper mit einem Aussendurchmesser zwischen 100 mm und 300 mm und einem Innendurchmesser zwischen 20 mm und 100 mm untersucht.

4. UNTERSUCHUNG VON BITUMINÖSEN BINDEMITTELN UND DICHTUNGSMATERIALIEN MIT B S A

4.1 Zielsetzung der Prüfung

Bestimmen der mechanischen Materialkennwerte von eingegossenen bituminösen Bindemitteln, Mastix und Fugendichtungsmassen durch Anlegen einer periodischen sinusförmigen Schubkraft.

4.2 Prüfkörperdimensionen

In der Regel besitzen die Prüfkörper aus bituminösem Bindemittel einen Aussendurchmesser von 120 mm, einen Innendurchmesser von 100 mm und eine Füllhöhe von 200 mm.

4.3 Prüfprinzip

Die Prüfvorrichtung ist schematisch in *Abbildung 4.1* skizziert und in *Abbildung 4.2* dargestellt.

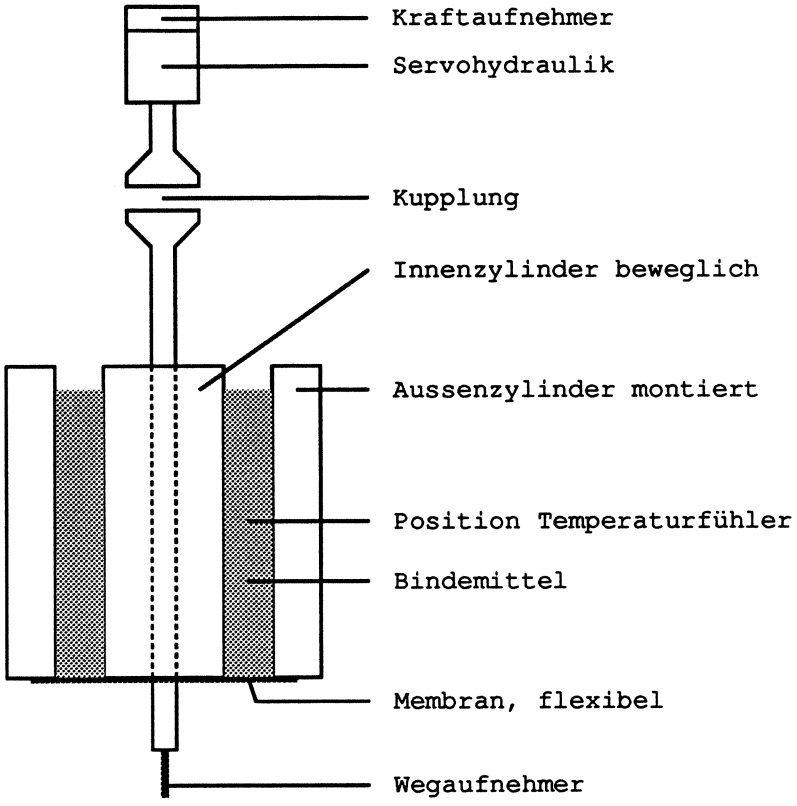


Abbildung 4.1: Prinzip der Prüfvorrichtung (schematisch)

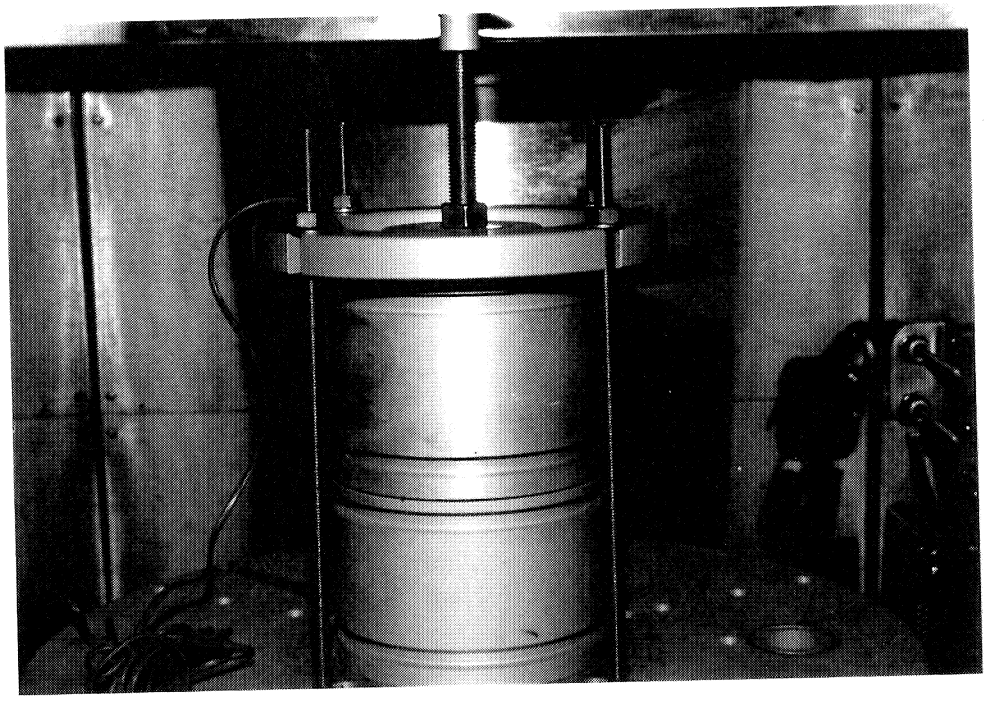


Abbildung 4.2: Prüfkörpereinbau. Gut erkennbar ist das Kabel des Thermoelements zur Temperaturmessung im Bindemittel (EMPA-Foto Nr. 99961/22)

Das in den Spalt zwischen Aussen- und Innenzylinder eingegossene bituminöse Bindemittel wird durch eine über den zentralen Metallkern von 100 mm Durchmesser eingeleitete periodische, sinusförmige Schubkraft in axialer Richtung geschert. Die dabei angewandte Kraft und die sich ergebenden Verformungen werden gemessen und daraus der komplexe Schubmodul mitsamt dem elastischen und viskosen Anteil sowie der Phasenverschiebung in Abhängigkeit von Temperatur und Frequenz bestimmt. Die aufgebrachten Kräfte werden niedrig gehalten, damit das Bindemittel nicht wesentlich erwärmt wird und die Berechnungsmodelle der Viskoelastizitätstheorie angewendet werden können.

Die Prüfung beginnt normalerweise kraftgeregelt bei einer Temperatur von 20 °C, die in der Folge stufenweise um 5 °C gesenkt wird. Bei jeder Temperaturstufe wird das Frequenzspektrum von 0.125 bis 8 Hz ausgemessen. Im hohen Temperaturbereich (von 25 °C bis etwa 40 °C (abhängig von den Bindemitteleigenschaften) wird weggeregelt geprüft.

4.4 Herstellen der Prüfkörper

Das zu untersuchende Bindemittel wird auf die zugehörige vorgeschriebene (je nach Bindemittel unterschiedliche) Verarbeitungstemperatur gebracht. Die Prüfform wird im Ofen auf die gleiche Temperatur aufgewärmt und das Bindemittel in den Spalt zwischen Aussen- und Innenzylinder gegossen bis die Füllhöhe von 200 mm erreicht ist.

Der Aussenzylinder besteht entweder aus einem einzigen hohen Ring (*Abbildung 4.3*, links) oder aus zwei halbhohen Teilringen (*Abbildung 4.2* und *Abbildung 4.3* rechts). Letzteres hat den Vorteil, dass die Füllhöhe bei Materialknappheit leicht halbiert werden kann. Zur Positionierung und Stabilisierung von Aussen- und Innenzylinder während des Einfüllens des Bindemittels wird eine spezielle Stützvorrichtung verwendet (*Abbildung 4.3* links).

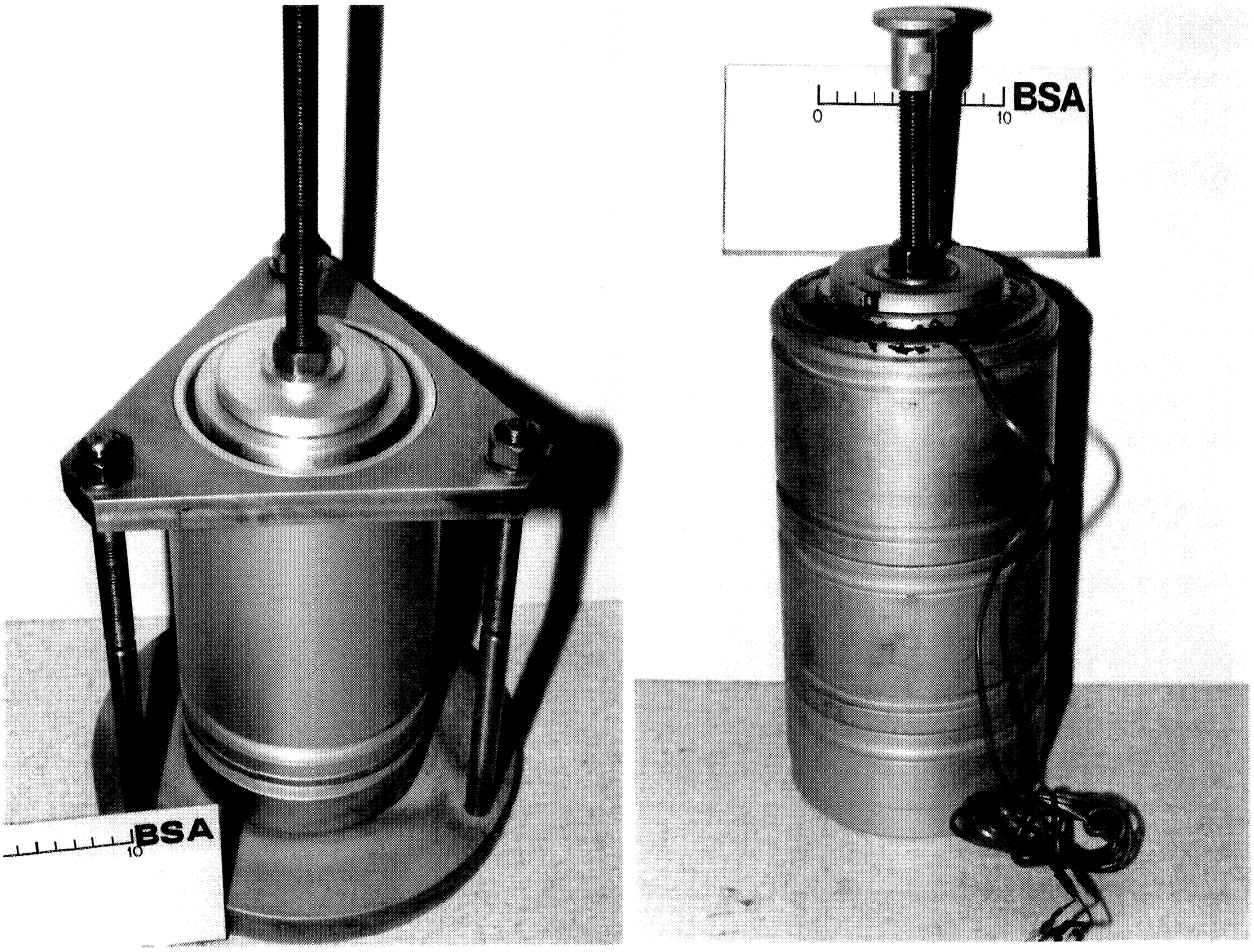


Abbildung 4.3: *Bild links:* Prüfkörperform mit Stützvorrichtung vor dem Einfüllen des Bindemittels; Aussenzylinder bestehend aus einem einzigen hohen Ring (EMPA-Foto Nr. 99961/21)
Bild rechts: Prüfkörper nach dem Einfüllen des Bindemittels und nach Entfernen der Stützvorrichtung; Aussenzylinder bestehend aus zwei halbhohen Teilringen (EMPA-Foto Nr. 99961/16)

4.5 Auswertung und Darstellung der Resultate

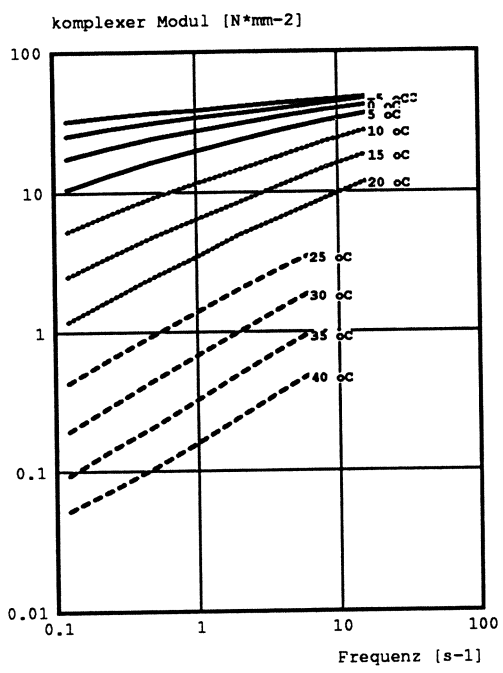
Die Vorgabe eines sinusförmigen Sollwertes für die Kraft führt bei linearem mechanischem Verhalten des geprüften Materials (Wegamplitude proportional zur Kraftamplitude) zu einer sinusförmigen Reaktion. Die beiden sinusförmigen Kurven für Kraft und Weg werden auf die Sinus- und Cosinusanteile hin untersucht. Aus diesen Anteilen

können Amplituden für Weg und Kraft, sowie für die Phasenverschiebung ϕ zwischen den beiden sinusförmigen Kurven berechnet werden. Der *komplexe Schubmodul* G^* ergibt sich aus dem Verhältnis von Kraft- und Wegamplitude, multipliziert mit einem Faktor K, der die Geometrie des Prüfkörpers enthält. Mit R_1 und R_2 für den Innen- und Aussenradius sowie der Höhe H des Prüfkörpers lautet dieser Faktor nach [1]

$$K = \ln(R_2/R_1)/(2\pi H) \qquad (4.1)$$

Aus dem komplexen Schubmodul G^* und der Phasenverschiebung ϕ können mit den Beziehungen (3.1) und (3.2) der Verlustmodul G" und der Speichermodul G' berechnet werden. Im übrigen ist das Vorgehen analog zu dem in Abschnitt 3 beschriebenen Verfahren. Dies gilt namentlich auch für die Bestimmung der Masterkurven.

Als Beispiel sind in *Abbildung 4.4* (links) die Kurvenäste des komplexen Schubmoduls eines Bindemittels für verschiedene Temperaturen und Frequenzen in doppeltlogarithmischer Darstellung zusammengefasst. *Abbildung 4.4 (rechts)* enthält die zugehörige Phasenverschiebung. Die jeweils ausgezogenen Linien zeigen die Ergebnisse der kraftgeregelten Prüfung für die tiefen Temperaturen unter 5 °C, die eng gepunkteten Linien diejenigen der kraftgeregelten Prüfung mit kleinerem dem Temperaturbereich zwischen 10 °C und 20 °C angepasstem Sollwert, die gestrichelten Linien bezeichnen die Resultate der weggeregelten Prüfung im Bereich höherer Temperaturen bis 40 °C.



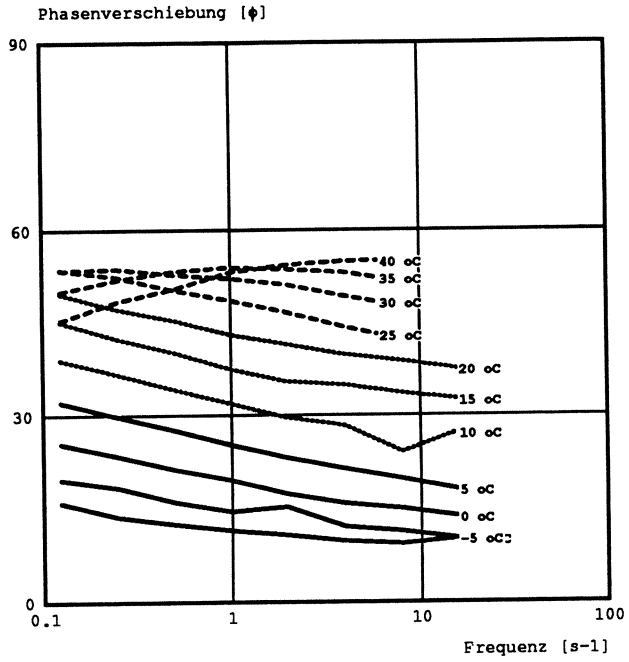


Abbildung 4.4: Komplexer Schubmodul und Phasenverschiebung eines bituminösen Bindemittels in Abhängigkeit der Frequenz für verschiedene Temperaturstufen

4.6 Spezialfälle

Grundsätzlich eignet sich das Prüfverfahren BSA auch zur Untersuchung von speziellen Fragestellungen. Beispielsweise wurden im Zusammenhang mit einem Auftrag an die EMPA mittels BSA *vorfabrizierte Fugendichtungsbänder* untersucht. Das Prüfverfahren wurde aber auch für *Bitumendichtungsbahnen* sowie *Polymerbitumen-Dichtungsbahnen* verwendet [13,14,15]. Dabei ist jeweils in Vorabklärungen zu prüfen, ob die Dimensionen des Aussen- und Innenzylinders beibehalten werden können oder abgeändert werden müssen. Bis heute wurden Prüfkörper aus Bindemittel bzw. Dichtungsmaterialien mit einem Aussendurchmesser zwischen 60 mm und 120 mm und einem Innendurchmesser zwischen 40 mm und 110 mm untersucht.

5. NEUE ENTWICKLUNGEN UND ERFAHRUNGEN ZUM B S A

5.1 Allgemeines

Zum Prüfverfahren Biege-Schub-Axial (BSA) wurden seitens der EMPA verschiedene Vorträge und Publikationen verfasst, um sowohl für Bohrkerne und Mischgut als auch für bituminöse Bindemittel und Dichtungsmaterialien die neuesten Erkenntnisse hinsichtlich

- Erweiterung und Verfeinerung der Mess- und Prüfmethodik [8, 10, 13, 14, 15, 17],
- Modellierung und Beschreibung des Materialverhaltens [9, 10, 16, 23]
- Vergleich von Materialkennwerten verschiedener bituminöser Materialien [6, 18, 19, 22, 23, 24, 26]

jeweils möglichst rasch dem einschlägigen Fachpublikum zugänglich zu machen. Zudem wurde in verschiedenen Veröffentlichungen das Verfahren allgemein kurz vorgestellt [4, 20, 21].

Neben den allgemein zugänglichen Untersuchungen im Rahmen von externen und internen Forschungsarbeiten wurden an der EMPA auch zahlreiche Auftragsuntersuchungen durchgeführt. Dadurch konnten wertvolle Erfahrungen in einem breiten Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten gesammelt und gleichzeitig mit der Umsetzung in die Praxis begonnen werden. Heute ist das Verfahren soweit eingeführt, dass es auch in internationale vergleichende Labortests zur Ermittlung "dynamischer" Materialkennwerte im Rahmen der RILEM zusammen mit anderen Verfahren, wie z.B. der Trapezmethode oder der Biegeprüfung, miteinbezogen wurde [17].

Wichtige Publikationen, welche von 1987 bis 1993 die Anstrengungen der EMPA bezüglich Weiterentwicklung (z.B. Messtechnik) und erweiterter Anwendung des BSA dokumentieren aber auch die internationale Zusammenarbeit sowie die Kontakte mit der Praxis zwecks breiterer Umsetzung belegen, enthält Kapitel 8 (*vgl. Tabelle 5.1*).

5.2 Mess- und Prüfmethodik

Neue Entwicklungen wurden durchgeführt im Bereich der *Deformationsmessung*, indem zur Bestimmung des komplexen Schubmoduls von Bohrkernen und Mischgut gegenüber der früheren Versuchsanordnung [1] zusätzliche externe induktive Weggeber angebracht wurden, deren Messanker sich auf ein speziell konstruiertes Messauflager ausserhalb der Klebefuge zwischen Prüfkörper und Metallkern abstützen [10]. Zudem wurden aus den Erfahrungen im Betrieb wesentliche *softwareseitige Veränderungen* vorgenommen, um die Versuchsdurchführung sowie die Datenauswertung zu optimieren. In Anbetracht der raschen Entwicklung im Elektronikbereich wurde ferner eine *Erneuerung und Modernisierung* der Steuer- und Messelektronik beschlossen, die heute praktisch abgeschlossen ist. Mit der neuen Steuer- und Messelektronik wird insbesondere die Sollwertamplitude mittels Personal-Computer (PC) automatisch erhöht,

solange die sich ergebende Verformung innerhalb des vorgegebenen Bereichs bleibt. Damit lässt sich die Linearität des Verhaltens überprüfen. Durch Auswerten mehrerer Messungen und durch Ausschluss ungenauer Messungen mit sehr kleinen Verformungen wird ein besser abgestütztes Ergebnis erzielt. Verglichen mit der alten Situation konnte die neue Lösung bedeutend kostengünstiger ausgeführt werden, ein Umstand, welcher sich auf die Einführung des Verfahrens in anderen Laboratorien sicher günstig auswirken dürfte.

Bezüglich Entwicklungen zur Prüf- und Auswertungsmethodik ist festzustellen, dass zur Ermittlung der *Masterkurven* mittels BSA heute im allgemeinen das Verfahren nach Dobson [7] angewendet wird und dass erhebliche Erfahrung bezüglich *Ermüdungsprüfung* sowohl mit konstanter Temperatur als auch mit sukzessiver Temperatursteigerung erarbeitet werden konnte [8, 9, 10]. Unter dem Aspekt der Erweiterung und Verfeinerung des BSA sind aber auch die erwähnten Aktivitäten innerhalb von *RILEM* [17] zu sehen, Aktivitäten, die übrigens auch BSA-Prüfungen an zweischichtigen Prüfkörpern im *Schichtverbund* umfassen.

Ziel	Material	Kennwert	Ref.	Datum	in Kap.8 enthalten	Bemerkungen
PM	BK,A	M	[4]	1993	ja	Internat. Zus. arbeit
PM	BK	M	[8]	1990	ja	Methodenbeschrieb
PM,MM	BK	M,E	[10]	1991	ja	Erweiterung Messmethode,
PM	DB	M	[13]	1991	ja	Dichtungsbahnen
PM	DB	M	[14]	1991	ja	DB: SBS, APP, ox. Bit.
PM	DB	M	[15]	1991	-	DB: SBS, APP, ox. Bit.
PM	BK,A	M	[17]	1992	-	RILEM Interlab Test TC 102-BAT, TC 152-PBM
PM	BK	M,E	[20]	1990	-	Methodenbeschrieb
PM	BK	M,E	[21]	1987	-	Methodenbeschrieb
MM	BK	E	[9]	1991	ja	Ermüdungsmechanismus
MM	B,FDM,PB,GA	M	[16]	1993	ja	rheolog. Modellbildung
MU	MG,GA	M	[6]	1990	ja	GA ohne, mit Trinid, mit Polym.
MU	BK	M	[18,26]	1993	-	Polymermodif. N9 (VS)
MU	BK	M,E	[19]	1989	-	Mischprozess
MU	FDM	M	[22]	1989	-	FDM
MU,MM	FDM	M	[23]	1992	-	FDM-Fahrbahnübergänge, Objektverfolgung
MU	B,B+F	M	[24]	1989	-	Filler für bit. Mischgut

Tabelle 5.1: Uebersicht über die veröffentlichten Arbeiten bezüglich Weiterentwicklung und Umsetzung des BSA an der EMPA

Bezeichungen:
PM Prüfmethode; **MM** Mechanismus + Modell; **MU** Materialuntersuchung.
BK Bohrkern; **MG** Mischgut; **B** Bindemittel; **DB** Dichtungsbahn; **FDM** Fugendichtungsmasse; **PB** Polymerbitumen; **GA** Gussasphalt; **A** Asphaltbeton; **B+F** Bitumen/Filler-Mischung.
M Modul; **E** Ermüdung.

5.3 Modellierung und Beschreibung des Materialverhaltens

Wie bereits aus Abschnitt 3.5 im Zusammenhang mit *Abbildung 3.16* ersichtlich, wurden seit Abschluss von FA 4/81, 5/81, 6/81 mit dem BSA weiterführenden Arbeiten zur Erfassung und Beschreibung von *Schädigungsmechanismen* bei Bohrkernen unter zyklischer sinusförmiger Beanspruchung durchgeführt, die es erlaubten, Beginn, Ende sowie Verlauf der Schädigung anhand der Phasenverschiebung, Verformungsgeschwindigkeit und der Abweichung der Verformungskurve vom Sinussignal zu ermitteln und damit Vergleichsgrössen zur Beurteilung der strukturellen Schwächung bituminöser Belagsmaterialien unter Ermüdungsbeanspruchung zu erarbeiten [8, 9, 10].

Ein weiterer Problemkreis besteht in der konkreten Auswertung und Interpretation der Frequenzabhängigkeit des komplexen Moduls mittels viskoelastischer Modelle. Da dies in der Praxis häufig als zu abstrakt und theoretisch angesehen wird, wurden in einer kürzlich publizierten Arbeit für verschiedene Materialien rheologische Zusammenhänge zum BSA mittels vereinfachtem Verfahren modellhaft veranschaulicht und diskutiert [16].

5.4. Vergleich von Materialkennwerten verschiedener bituminöser Materialien

Hierunter fallen angewandte Materialuntersuchungen mit dem BSA an verschiedensten bituminösen Materialien, deren Hauptziel in der vergleichenden Materialwahl und Beurteilung aufgrund der Materialkennwerte aus dem BSA [6, 18, 22, 24, 26] sowie in der Optimierung von Mischprozessen [19] oder in der Verfolgung der Klimabeständigkeit [23] liegt. Entsprechend hoch ist der Anteil an Erfahrung, der durch Auftragsuntersuchungen erarbeitet werden konnte. Zu den untersuchten bituminösen Baustoffen gehören:

Bohrkerne und Mischgut

- Asphaltbeton für Deck- und Tragschichten, z.B. [8, 9, 10, 17, 19, 20]
- Gussasphalt mit und ohne Trinidadzusatz sowie polymermodifizierter Gussasphalt [6]
- Asphaltbeton mit polymermodifizierten Bindemitteln [18]
- Fugendichtungsmassen für Fahrbahnübergänge

Bindemittel und Dichtungsmaterialien

- Bitumen und Bitumen-Filler-Gemische [24]
- Polymermodifizierte Bindemittel; Sorten siehe [25]
- Fugendichtungsmassen z.B. [22]
- Dichtungsbahnen mit APP, SB sowie oxidiertem Bitumen [14, 15]
- Vorfabrizierte Dichtungsbänder

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN, AUSBLICK

Zusammen mit den drei eine thematische Einheit bildenden Forschungsarbeiten FA 4/81, FA 5/81, FA 6/81 wurde an der EMPA eine umfassende Untersuchung auf breiter Basis durchgeführt, deren Resultate und Erkenntnisse 1987 im zugehörigen Bericht [1] veröffentlicht wurden. Ein wesentliches Ziel der Anstrengungen bestand darin, die Lücke zwischen Labor und Praxis auf dem Gebiet der *Prüfkörperherstellung* zu verringern und ein möglichst einfaches anwendungsbezogenes *Prüfverfahren* zu entwickeln, welches die Bestimmung physikalisch begründeter Materialkennwerte gestattet. Mit dem vorgeschlagenen Prüfverfahren *Biege-Schub-Axial (BSA)* steht ein solches Hilfsmittel nunmehr zu Verfügung.

Was die *Prüfkörperherstellung* betrifft, wurde hinsichtlich Verdichtung festgestellt [1], dass die durch Vibroverdichtung und Walzverdichtung hergestellten Prüfkörper im Prüfverfahren BSA (Biege-Schub-Axial) eher in situ entnommenen Bohrkernen entsprechen als durch Schlagverdichtung hergestellte Prüfkörper. Die Untersuchungen zeigen, dass im Bestreben, die Lücke zwischen Labor und Praxis auf dem Gebiet der Prüfkörperherstellung zu verringern zwar einige Verbesserungen möglich sind, dass anderseits diesem Anliegen jedoch Grenzen gesetzt sind und gerade deshalb auch die Notwendigkeit der Herstellung von Prüfkörpern vor Ort unter Baustellenbedingungen besteht. Für den *Praktiker* heisst dies, dass trotz aller Eignungsprüfungen im Labor bei wichtigen Bauvorhaben auf einen Probeeinbau nicht verzichtet werden darf.

Als wichtiges Resultat der durchgeführten Arbeiten [1] ist zu werten, dass alle im Zuge der Untersuchung angewandten Prüfverfahren eine etwa vergleichbare, ausreichende Reihung verschiedener Mischungen innerhalb einer (vor allem über den Bindemittelgehalt) abgestuften Mischgutreihe ermöglichten. Die Anwendung all dieser Prüfverfahren zur Ermittlung des relativen optimalen Verhaltens verschiedener Mischungen im Sinne einer Reihung innerhalb von Eignungsprüfungen ist damit gegeben. Bestimmt werden dabei jedoch vorwiegend prüfkörperspezifische Kennwerte.

Die Untersuchungen im Rahmen der drei Forschungsarbeiten FA 4/81, FA 5/81, FA 6/81 unterstreichen die Bedeutung eines *umfassenden Vorgehens* mit einheitlicher Vergleichsbasis bei der Erarbeitung von Methoden und Erkenntnissen mit grösserer Allgemeingültigkeit; Erkenntnisse, die bei allzu punktuell angelegten Untersuchungen häufig nicht erarbeitet werden können und daher gegebenenfalls wiederholt werden müssen. Nicht zuletzt auch aus dieser Einsicht heraus sind in den letzten Jahren Grossprojekte, wie z.B. SHRP, lanciert worden. In diesem Sinne steht die Arbeit im Rahmen der drei Forschungsprojekte voll in Einklang mit den weltweiten Anstrengungen auf diesem Gebiet und bildet einen aktiven positiven Beitrag der Schweiz zum gegenseitigen internationalen Fachaustausch, beispielsweise im Rahmen der RILEM [4].

Das von J. P. Junker entwickelte und beschriebene Prüfverfahren BSA nach [1] wurde in den Jahren 1987 bis 1993 an der EMPA hinsichtlich Mess- und Prüfmethodik *weiterentwickelt* und durch zahlreiche Arbeiten innerhalb von Forschungs- und Auftragsuntersuchungen breiter abgestützt [6, 8...25]. Die Prüfmethode bietet die Möglichkeit, eine rheologische Charakterisierung bituminöser Beläge und Fugendichtungsmassen im

Parameterfeld Frequenz/ Temperatur vorzunehmen und damit bessere Grundlagen für die theoretische Modellbildung und Dimensionierung zu erarbeiten.

Begünstigt durch die Forschungsarbeiten FA 4/81, FA 5/81, FA 6/81 verfügt die *Abteilung 113 der EMPA* in apparativer Hinsicht nunmehr über eine gute Grundlage, um mono- und triaxiale Untersuchungen bituminöser Beläge und Abdichtungen unter definierten Klimabedingungen sowohl für einmalige als auch wiederholte schwingende Beanspruchung im Rahmen der Materialprüfung durchführen zu können. Mit der Prüfmethode BSA Biege-Schub-Axial besitzt die Abteilung ausserdem ein geeignetes öffentlich zugängliches Prüfverfahren, welches eine realitätsbezogene Beanspruchung auch von mehreren Belagsschichten erlaubt und somit hinsichtlich Systemprüfung weiterentwickelt werden kann und muss. Die Durchführung ist relativ einfach und erfordert keine radialen Belastungsvorrichtungen. Der Aufwand für die Probenvorbereitung hält sich in Grenzen. Hinzu kommt der Vorteil, dass nicht nur im Labor hergestellte Prüfkörper sondern insbesondere auch Bohrkerne aus Belägen direkt geprüft werden können.

Laborprüfungen sind unabdingbar. Wichtige grundlegende *prüftechnische Elemente* für das Labor wurden in den drei Forschungsaufträgen FA 4/81, FA 5/81, FA 6/81 im Zusammenhang mit [1] erarbeitet und in der Folge an der EMPA weiterentwickelt und in die Prüfpraxis für verschiedenste bituminöse Materialien umgesetzt [6, 8...25]. Die Frage nach der direkten Beziehung zur Praxis bleibt jedoch noch offen und muss daher in enger Verbindung mit der Beobachtung von Versuchsstrecken weiter abgeklärt werden. Der 1992 an der EMPA abgeschlossene Forschungsauftrag FA 25/78 [5] zeigt allerdings, wie schwierig dies ist und wie wichtig eine lückenlose Dokumentation und Langzeitverfolgung einer solchen Strecke vom Moment des Einbaus ist (hierzu gehört auch die Sicherung von genügend Rückstellproben beim Einbau). Diese wichtige ingenieurmässige Verbindung zwischen Labor und Praxis ist nicht einfach herzustellen; es erscheint daher unumgänglich, das Verhalten in der Praxis über einen Zwischenschritt, die labormässige Systemprüfung, zu erfassen. Hier sind künftig neue Forschungsschwerpunkte zu setzen.

Dübendorf, 2. Juli 1993

EMPA Dübendorf
Strassenbau/Abdichtungen
Der Abteilungsvorsteher:

Dr. M. N. Partl

7. REFERENZEN

[1] J. P. Junker: Entwicklungen zur Bestimmung mechanischer Materialkennwerte an bituminösen Baustoffen, insbesondere an Asphalt. ETH Diss. Nr. 8177, Bericht EMPA Nr. 215 (1987)

[2] S. Huschek: Zum Verformungsverhalten von Asphaltbeton unter Druck. ETH Diss. Nr. 7189 (1983)

[3] M. N. Partl: Zum isothermen Kriechen eines bituminösen Mörtels unter mehrstufiger Belastung. ETH Diss. Nr. 7317, (1983)

[4] H. W. Fritz: RILEM Technical Commitee 101-BAT "Bitumen and Asphalt Testing: Activity report 1987-1992. Materials and Structures 26 (1993), p 111-119

[5] H. W. Fritz, M. Seeberger, M. Partl; Untersuchung stark beanspruchter bituminöser Autobahnbeläge. Forschungsarbeit FA 25/78. Bericht Nr. 256 des Eidgenössischen Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartements, Bundesamt für Strassenbau (1992)

[6] R. Gubler, H. W. Fritz: Evaluation de mélanges d'asphalte coulé avec diverses sortes de liants au moyen d'essais par oscillation axiale et d'essai à la fatigue. RILEM (1990), S 445-453

[7] G. R. Dobson: The Dynamic Mechanical Properties of Bitumen. Proceedings of The Association of Asphalt Paving Technologists. Vol 38 (1969), p 123-135

[8] R.Gubler: Méthode d'essai par oscillation axiale pour la détermination des caractéristiques mécaniques du comportement à la fatigue des asphaltes. Proceedings of the Fourth Int. Symposium held by RILEM on mechanical Tests for Bituminous Mixes, Budapest, 23-25 October 1990, Chapman and Hall, (1990), S 432-444

[9] R.Gubler: Essai de fatigue pour l'évaluation d'un revêtement routier. Proceedings of the Fourth Int. Symposium held by RILEM on mechanical Tests for Bituminous Mixes, Budapest, 23-25 October 1990, Volume II, Hungarian Chemical Society, (1991), S 195-198

[10] R. Gubler: Méthode d'essais par oszillation axiale pour la détermination des caractéristiques mécaniques et du comportement à la fatigue des asphaltes. Journée technique LAVOC-EPFL, Lausanne, 18. September 1990, Tagungsbericht LAVOC (1991), S 73-81

[11] M. Partl, A. Rösli: Näherungsverfahren zur Berechnung der Verformungen von Asphalt unter wechselnder Zug/Druck-Kriechbeanspruchung. Bitumen 46, Nr.1 (1984), S 8-13

[12] M. Partl: Caractérisation et modélisation du fluage des matériaux bitumineux soumis à des charges de traction/compression. Journée technique LAVOC-EPFL, Lausanne, 18. September 1990, Tagungsbericht LAVOC (1991), S 63-71

[13] H. W. Fritz: Forced Vibration Tests on Bitumen- and Polymer-Bitumen Membranes to determine their Essential Properties. Residential seminar held by RILEM on Formulation, Control and Behaviour of Polymer Modified Bitumens either for Waterproofing or for Road Construction, Dubrovnik, 27.-29. September 1988, Tagungsband (1991), S 179-185

[14] H. W. Fritz, O. Neubauer: Forced Vibration Tests on Bitumen and Polymer-Bitumen Membranes to Determine their Fundamental Properties with Respect to Frequently used Polymers. International Symposium on Roofing Technology, Montreal, 17.-19. April 1991, Tagungsband (1991), S 242-245

[15] H. W. Fritz, O. Neubauer: Bitumen and Polymer-Bitumen Membranes: Fundamental Properties with Respect to Frequently Used Polymers. Strasse und Verkehr, Nr.10 (1991), S 624-627

[16] R. Gubler, M. Partl: Description of Polymer-modified Bituminous Materials for Road Construction and Seals by Means of Rheological Models; Cross-Connections Between the Model and Practically Interesting Properties. 5th Eurobitume Congress, Stockholm 16.-18. Juni 1993, Tagungsband (1993), S 235-238

[17] R. Gubler, H. Kienast: RILEM Technical Committee 101-BAT "Bitumen and Asphalt Testing" Interlaboratory Test Program - Part 2: Dynamic Tests. EMPA Nr. 140 720/1, (1992)

[18] B. Schwery, St. Aebersold, Ch. Angst: Long Term Behaviour of the Bituminous Mixes Issued of the Comparative Test Sections Realized in Switzerland, in the Canton of Valais with Different Polymer-modified Bitumen. 5th Eurobitume Congress, Stockholm 16.-18. Juni 1993, Tagungsband (1993), S 867-871

[19] M. Kronig: Einfluss auf die Qualität bituminöser Mischungen. Forschungsarbeit FA 26/84. Schriftenreihe des IVT Nr. 76, (1989)

[20] H. W. Fritz: Berücksichtigen von Materialeigenschaften beim Dimensionieren bituminöser Strassen. Strasse und Verkehr, Nr. 7 (1990), S 400-409

[21] H. W. Fritz: Neue Aspekte bei der Konzeption bituminöser Beläge. Strassenoberbau Internationale Fachtagung, Winterthur, 27. Februar 1987, Tagungsband (1987), S 1-16

[22] S. Hean: Fugendichtungsmasse, Anforderungen und zugehörige Prüfmethoden aufgrund von Laboruntersuchungen. Forschungsarbeit FA 6/90. (noch nicht abgeschlossen)

[23] S. Hean: Fugenproblematik: Konzept zur Objektverfolgung für Fugendichtungsmassen an Fahrbahnübergängen. EMPA Nr. 139 838, (1992)

[24] A. Bernhard, R. Gubler: Filler für bituminöses Mischgut. Forschungsarbeit FA 3/83. Bericht Nr. 172 des Eidgenössischen Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartements, Bundesamt für Strassenbau (1989)

[25]A.-G. Dumont, M. Huet, E. Simond: Ageing of Modified Bitumen Samples from Comparative Test Sections Executed in Switzerland, in the Canton of Valais. 5th Eurobitume Congress, Stockholm 16.-18. Juni 1993, Tagungsband (1993), S 229-234

[26]A.-G. Dumont, B. Schwery, C. Angst: Comparative Test Sections with Different Polymer Modified Bitumens and With Different Polymer Additives. Eurobitume Congress, Madrid October 1989, Tagungsband (1989), S 48-53

8. AUSGEWÄHLTE PUBLIKATIONEN ZUR WEITERENTWICKLUNG DES B S A

Dieses Kapitel enthält wichtige Publikationen, welche die Aktivitäten der EMPA von 1987 bis 1993 bezüglich Weiterentwicklung (z.B. Messtechnik) und erweiterter Anwendung des BSA dokumentieren aber auch die internationale Zusammenarbeit sowie die Kontakte mit der Praxis zwecks breiterer Umsetzung belegen, (*vgl. Tabelle 5.1*):

***Mess- und Prüfmethodik*:**

- Referenz [4]
- Referenz [8]
- Referenz [10]
- Referenz [13]
- Referenz [14]

Modellierung und Beschreibung des Materialverhaltens:

- Referenz [9]
- Referenz [16]

Vergleich von Materialkennwerten verschiedener bituminöser Materialien:

- Referenz [6]

Referenz [4]

Materials and Structures, 1993, **26**, 111–119

RILEM TECHNICAL COMMITTEES
COMMISSIONS TECHNIQUES DE LA RILEM

101-BAT: BITUMEN AND ASPHALT TESTING

Activity report 1987–1992

H. W. FRITZ
EMPA, Ueberlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf, Switzerland

CONTENTS

1. Introduction
2. Fields
3. Goals
4. Members
5. Materials
6. Work accomplished
   6.1 Dubrovnik seminar, September 1988
   6.2 Proceedings of the Dubrovnik seminar
   6.3 Fourth International Symposium, Budapest, October 1990
   6.4 Proceedings of the Budapest symposium
   Volume I, September 1990: RILEM Proceedings 8
   Volume II, November 1991: Moderators' reports, oral presentations, conclusions
   6.5 Revision of RILEM Technical Recommendation BM-1
   6.6 RILEM Technical Recommendation BM-5
   6.7 Trilingual dictionary
7. Former working groups
   7.1 WG 1: Significant tests for sealing and waterproofing materials
   WG 2: Significant tests for polymer modified binder
   7.2 WG 6: Tests for bituminous emulsions
   7.3 WG 3: Significant tests for asphalt pavements
   7.4 WG 4: Significant tests to characterize the aging of bituminous binders for paving asphalts
   7.5 WG 5: Test methods for wax determination
8. Work in progress, active working groups
   8.1 WG A: Polymer–bitumens
   8.2 WG B: Emulsions (bitumens, polymer-bitumens)
   8.2 WG C (former WG 3): Fundamental and significant tests for asphalt pavement materials
   8.3.1 Budapest symposium, October 1990
   8.3.2 Interlaboratory tests
9. Conclusion
10. Proposal for a new bituminous RILEM technical committee, future work
11. Acknowledgements
12. References

1. INTRODUCTION

For millennia natural asphalts have been known and used. During the twentieth century, however, bituminous materials were mainly applied not only in building and construction, but also as sealants and waterproofing materials in tunnels, on bridges, for hydraulic structures and other purposes in civil engineering. Bituminous materials play quite an important role in building construction and an even more important role in road construction and road safety.

The first 'bituminous' RILEM technical committee was founded in 1968, the second and third ones in 1980 and 1987, respectively.

RILEM technical committee TC 101-BAT started its work with the first meeting in Madrid. BAT stands for Bitumen and Asphalt Testing. This denomination reveals that this RILEM technical committee, in fact, concentrates on bitumen and polymer-bitumens as well as on products with these organic binders. Consequently, since 1987 RILEM has abandoned the organic binder material tar and its composite products – this evidently for environmental and health reasons.

In the following, details are stated concerning the working fields, goals, members, kind of materials, working targets, the work already accomplished, i.e. seminars and symposia held, main publications, former and active working groups, the work in progress, a conclusion, necessary future work, and consequently the formation of a new 'bituminous' RILEM technical committee.

0025-5432/93 © RILEM

Referenz [4]

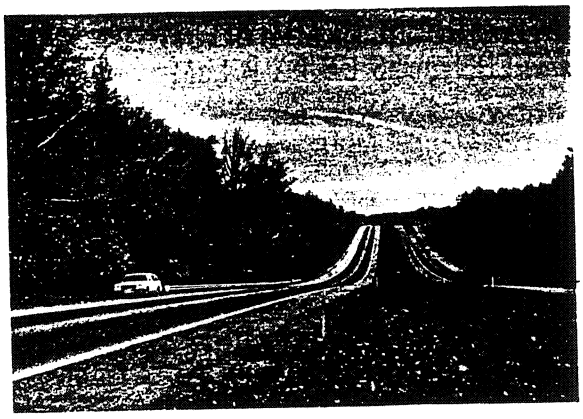


Fig. 1 Optimal bituminous pavement on a main road with separated lanes.

Fig. 3 Waterproofing of a prestressed concrete bridge deck with polymer-bitumen membranes.

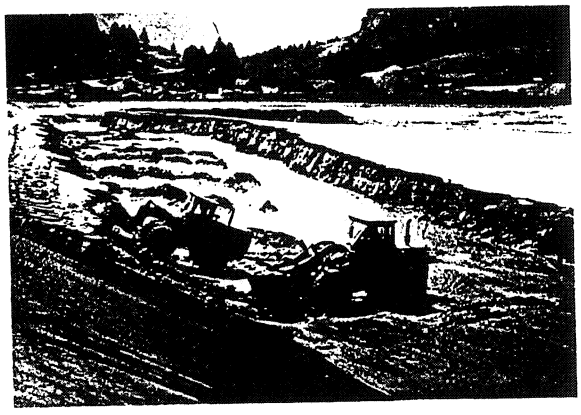


Fig. 2 Impermeable bituminous surfacing in the basin of a hydroelectric plant in the Swiss Alps.

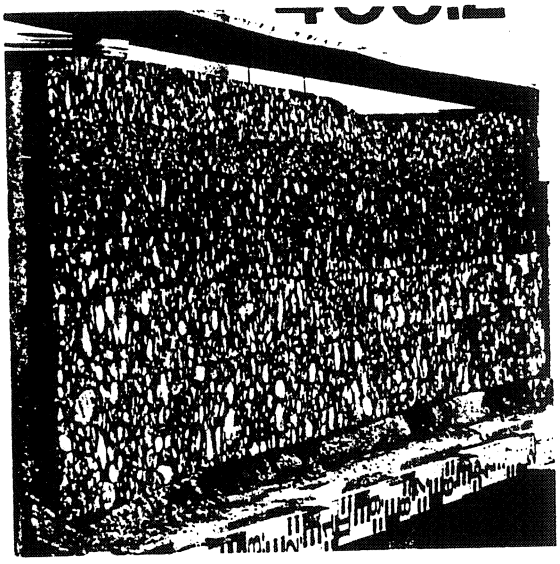


Fig. 4 Excessive rutting of a heavily trafficked bituminous pavement. The cross-section through one wheel path of a cut of a pavement slab shows clearly the main reason for the failure: an inadequate concept of the bituminous pavement structure; with too many courses in the top 150 mm with too-small aggregates in these courses, and insufficient mix design procedures for these layers.

2. FIELDS

The technical committee TC 101-BAT was active in the fields of road construction and waterproofing. Within these fields, most important are bitumens, polymer–bitumens, and the materials produced with these organic binders.

The main fields include especially the pavement and the waterproofing materials (see Figs 1 to 3) and their behaviour *in situ*. These materials and their optimal behaviour are vital factors, for instance for urbanization, trade, industry, or – in other words – for the economical development and prosperity of a country or region.

3. GOALS

The technical committee TC 101-BAT had, amongst others, the following main goals:

(i) to evaluate fundamental and significant tests for polymer-bitumens, bitumens, bitumen emulsions and their composite materials; and

(ii) to elaborate RILEM recommendations concerning the materials mentioned for the following purposes: pavements, roofing, waterproofing and other seals.

One of the main targets was to sufficiently determine and describe the essential characteristics of chosen materials in laboratory tests to facilitate correct prediction of their behaviour *in situ*. This is a very important goal, for sometimes pavements permanently deformed by heavy traffic cause severe problems. In the near future the goal must be to avoid such damage and failure as shown for example in Fig. 4. Such damage mostly occurred because the traditional or

Referenz [4]

routine tests on asphaltic mixes too often do not allow a realistic prediction of the behaviour of the pavement *in situ*. In contrast to these tests, fundamental tests are carried out under a wide range of temperatures and loading conditions. Consequently, one of the main goals was to initiate as quickly as possible the adoption of fundamental and significant tests.

Traditional or routine tests are usually carried out at one temperature and under one loading condition only. Therefore, traditional or routine tests reveal only one singular point in the wide range of temperature and loading conditions occurring *in situ*. Furthermore, the standardization of such routine tests or traditional tests on bitumens and polymer-bitumens and their composites are and will be carried out efficiently on an international scale by the corresponding technical committees, for example in Europe by the Comité Européen de Normalisation (CEN). Consequently, another main goal since 1989 was to stop dealing with routine tests.

4. MEMBERS

Since 1992, TC 101-BAT had 23 active members, one corresponding member, and three additional experts who were active only in Working Groups (so-called WG). Initially, when starting in 1987, this TC had eighteen active members. Due to retirement and job rotation, seven members had to quit TC 101-BAT. Due to this fact and due to a slight increase of the total number of participants, we were fortunate to have representatives in this technical committee from almost all over the world. In fact, sixteen countries were represented, mainly from Europe, but also from overseas and the Near East. This means that specialists originating from countries in Northern, Eastern, Southern, and Western Europe as well as from Canada and Israel collaborated actively.

5. MATERIALS

The materials dealt with are bitumens and polymer-bitumens as binders or essential components for construction and building materials, as well as for waterproofing materials for bridge decks or for roofing. Fig. 3 shows an example of the waterproofing of bridge decks with polymer-bitumen membranes. The main materials the TC dealt with are asphalt pavements and structures for roads, airfields, and for waterproofing in hydraulic structures.

This is an opportunity to repeat the definition of asphalt as it is understood in Europe: every mixture consisting of bitumen and mineral aggregates is called asphalt. However, our North American colleagues use the term 'asphalt cements' (instead of 'bitumens'), which means the organic binder materials themselves. These binders are thermoplastic materials without an exact melting point, but with a wide softening range. From elastic behaviour at temperatures below 0°C

Fig. 5 Cracks in a heavily trafficked bituminous pavement due to insufficient mix design procedure.

these binders soften to a viscous fluid consistency at relatively high temperatures. Depending on the quality of bitumens and polymer-bitumens, they are viscous at temperatures above 100°C. For this reason, asphalt pavements which are not adequately chosen are not resistant enough to heavy loads. In this case, excessive permanent deformations are the result (see Fig. 4). The choice of the binder bitumen (grade and quantity) is in many cases difficult, and frequently done in an empirical manner. If the resulting asphalt pavement is not ductile enough during hard winter conditions, cracks may occur in the pavement (Fig. 5).

As shown above, the behaviour of bitumens and polymer-bitumens and their composites is strongly influenced by environmental conditions, loading time, and load intensity. Consequently, the essential properties have to be determined over wide temperature and frequency ranges.

6. WORK ACCOMPLISHED

6.1 Dubrovnik seminar, September 1988

In September 1988, a seminar was held at Dubrovnik under the title 'Formulation, Control and Behaviour of Polymer Modified Bitumens either for Waterproofing or Road Construction'. More than 100 invited participants contributed to the success of this seminar. The place and time for this event seemed to be well chosen and everyone obviously enjoyed the seminar. Since then the tragic and fatal civil war has destroyed many of the historical places in this beautiful mediaeval city and port, which were at that time still sound and were very much admired indeed.

Referenz [4]

6.2 Proceedings of the Dubrovnik seminar

The proceedings published of the Dubrovnik seminar [1] comprise 330 pages and serve for a state-of-the-art report of Working Group A.

6.3 Fourth International Symposium in Budapest, October 1990

The Fourth International RILEM Symposium was held in Budapest from October 24 to 26, 1990. The subject was 'The Role of Mechanical Tests for Characterization, Design and Quality Control of Bituminous Mixes'. These subjects are still of vital interest. Fig. 5 clearly illustrates the difficulties some specialists have in optimizing bituminous pavement materials. The pavement shown was too brittle during the winter periods. Therefore, more and more cracks occurred. In this case the main reasons for the damage were the low binder content and the hard binder. Consequently, the mix design results did not lead to optimal quality of the pavement.

6.4 Proceedings of the Budapest symposium

The first volume of the proceedings was sent to the participants one month before the symposium. At that time, more than 200 participants were already registered and received this first volume, which was printed and distributed by Chapman & Hall in September 1990. This book, RILEM Proceedings 8 [2], comprises 650 pages. The second volume of the Budapest symposium proceedings [3] was published and distributed by Hungarian colleagues at the end of 1991. The second volume contains all the oral contributions of the Budapest symposium and is available from the Hungarian Chemical Society in Budapest.

6.5 Revision of RILEM Technical Recommendation BM-1

RILEM Technical Recommendation BM-1 'Terminology of hydrocarbon binders' [4] was revised in 1988 and published in 1989.

6.6 RILEM Technical Recommendation BM-5

RILEM Recommendation BM-5 'Recovery method with rotary evaporator of the soluble binder from bituminous mixes' was published as a Draft Recommendation 1988 in *Materials and Structures* and was published as final RILEM Technical Recommendation BM-5 [5] early in 1993.

6.7 Trilingual dictionary

The trilingual English–French–German dictionary of technical terms is related to hydrocarbon binders, hydrocarbon composite materials, processes for removing pavement materials, and for the rehabilitation of asphalt pavements. This trilingual dictionary was published in *Materials and Structures* in May 1992 [6].

7. FORMER WORKING GROUPS

On the occasion of the first meeting in Madrid in 1987 six working groups (WG 1 to 6) were founded in order to cover the main topics. Three of the initially six working groups ceased their activities by 1989 and were dissolved at the Brussels Committee Meeting in 1990.

7.1 WG 1: Significant tests for sealing and waterproofing materials; WG 2: Significant tests for polymer modified binder

These two working groups were important for the preparation of the Dubrovnik seminar in 1988. Due to the leave of members in these working groups, the work was interrupted for certain intervals. For polymer-modified binders the corresponding new working group WG A was founded in 1990 (see section 8.1 below).

7.2 WG 6: Tests for bituminous emulsions

Due to the lack of specialists, this working group was not really active until the formation of the new working group B in 1990 (see section 8.2).

7.3 WG 3: Significant tests for asphalt pavements

Working group 3 was active without any interruption and is still active as WG C (see section 8.3).

7.4 WG 4: Significant tests to characterize the ageing of bituminous binders for paving asphalt

This working group dealt with the subject of ageing of bitumens for paving asphalts. It finished its work by giving brief statements. The main reason for abandoning this topic was that a CEN technical committee already worked in the same field quite efficiently and, furthermore, had initiated additional interlaboratory tests.

7.5 WG 5: Test methods for wax determination

The target of this working group was the elaboration of a new method for wax determination. This is still an important topic, because an excessive amount of waxy components in bituminous binders is frequently deleterious. Unfortunately, the leader of this working group retired in 1989 rather unexpectedly and at the same time another member of the small working group

Referenz [4]

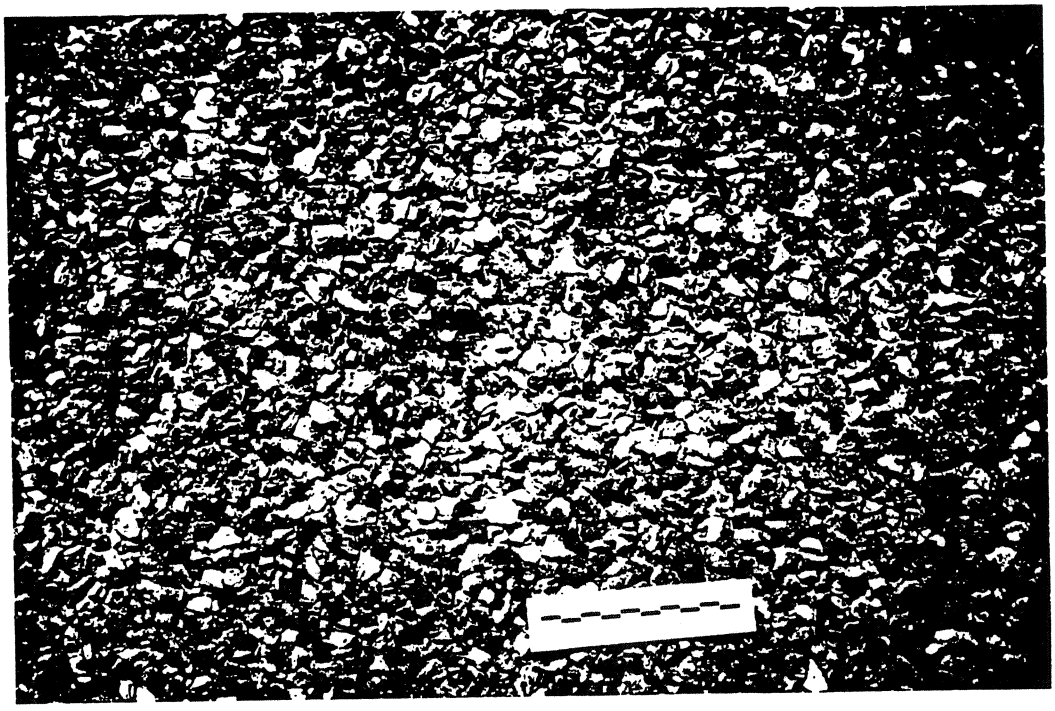


Fig. 6 Detail of a heavily trafficked bituminous pavement with an additional optimal surface treatment with a polymer-bitumen as a binder.

changed his job and had to give up his activities. As a consequence, this working group ceased its work. As a matter of fact, RILEM TC 101-BAT lacked specialists in this field to activate the work. After such adversities this working group was dissolved.

8. WORK IN PROGRESS, ACTIVE WORKING GROUPS

8.1 WG A: Polymer-bitumens

Working group A dealt with the very important subject of performance-orientated test methods for polymer-bitumens. For this reason, this working group was relaunched at the Brussels meeting in 1990. Based on the valuable Dubrovnik seminar Proceedings published early in 1989, the task of the WG was to present a state-of-the-art report in 1993. Based on this state-of-the-art report, necessary future activities will be planned and proposed. Polymer-bitumens play more and more an important role in surface treatments (see Fig. 6) and polymer-asphalts for road construction.

8.2 WG B: Emulsions (bitumens, polymer-bitumens)

Working group B searched for significant tests for emulsions in the field of breaking and adhesion of binders. Due to the difficulties of not having enough experts in the working group, it was only possible to relaunch this working group at the Amsterdam meeting in 1991. The state-of-the-art report has to be published in 1993. Based on this state-of-the-art report, the necessary future activities have to be proposed at that 1993 meeting. Emulsions are still important binders, for example for surface treatments of roads (see Fig. 7).

8.3 WG C (former WG 3): Fundamental and significant tests for asphalt pavement materials

8.3.1 Budapest symposium, October 1990

WG C – which was identical to the former WG 3 – was formed in Madrid in 1987 and continuously worked hard and effectively. It successfully co-operated with our Hungarian colleagues to organize the Budapest symposium in October 1990. This fact and the Budapest symposium proceedings Volumes I and II establish a good basis for the work of the technical committee and the working group in the near future and the nineties.

As far as asphalt materials for all purposes are concerned, a lot of work is still to be done. In the future this working group's main task will be to elaborate a RILEM Recommendation on fundamental tests on pavement materials, as for instance a recommendation concerning the determination of moduli or the fatigue behaviour of these materials for pavement purposes.

Referenz [4]

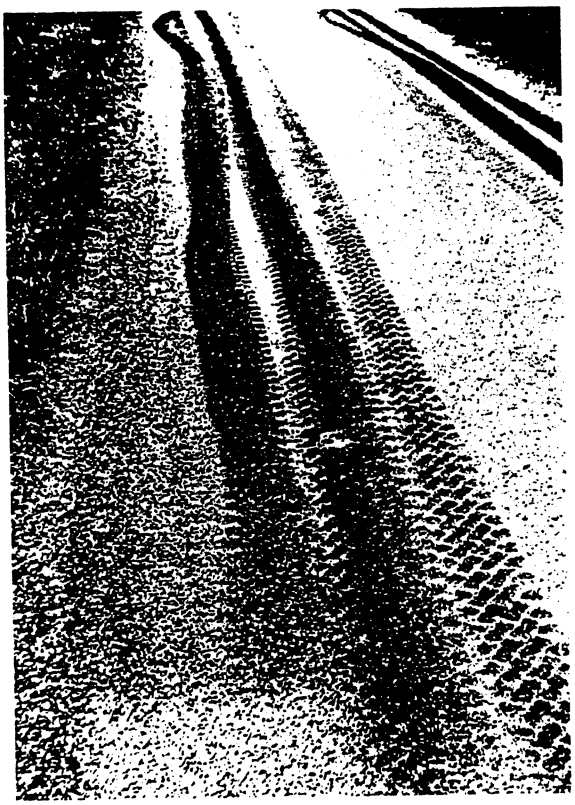


Fig. 7 Inadequate execution of surface treatment with an emulsion as a binder.

8.3.2 Interlaboratory tests

In order to achieve the outlined goals within a couple of years, this working group organized interlaboratory tests in collaboration with an OECD Project. The OECD FORCE Project (FORCE stands for First OECD Road Common Experiment) was mainly based on the tests on the LCPC's circular pavement test track in Nantes. This project was completed and the report was published in Spring 1991 [7]. Altogether 23 laboratories in 17 countries – from North America, Israel, and mainly Europe – promised their participation in the interlaboratory tests. Not all laboratories participated in both parts, but each of these two parts was supported by seventeen laboratories.

Excessive permanent deformation as shown before in Fig. 5 and inadmissible cracking (see Fig. 6) should not occur any more in the near future. This explains the great need to improve the so-called mix design of asphalt pavement materials. Designing asphalt paving mixes, as with other engineering materials designs, is largely a matter of selecting and proportioning materials to adequately obtain the desired qualities and properties in the finished construction. The overall objective is to determine an optimum blend and gradation of aggregates and an optimum asphalt content.

To compare the different optimum mixes designed by the participating laboratories and to improve the mix design procedures it was decided to organize the interlaboratory tests in two parts. Furthermore an important objective was to link the different traditional mix design procedures to fundamental tests on pavement materials by carrying out Parts 1 and 2 of these interlaboratory tests as described below.

Part 1 consisted of the so-called mix design. The laboratories had to evaluate a certain optimum mix for a specific asphalt pavement mixture with specific traffic loads and climatic conditions. For the purpose, the same materials had been sent to 17 of the 23 participants.

In Part 2 the laboratories had to carry out fundamental tests on pavement slabs taken from the LCPC's circular test track in Nantes. Seventeen of the 23 laboratories promised to determine moduli and the fatigue behaviour of the pavements. For this purpose, forced vibration tests have to be carried out. The principle of forced vibration tests is to apply either repeated equal loads or repeated forced displacements on a test specimen (see Fig. 8). Tests on bituminous materials have to be carried out under various precisely maintained temperatures.

For fatigue tests, for example forced vibration tests with imposed displacements and constant temperatures can be carried out. In these cases, the life cycle is usually defined by the numbers of cycles applied until the force registered diminishes to half of the initial values. Fig. 9 schematically shows the coaxial cylinders with a test specimen in place [8]. This kind of shear test allows the determination of the ratio of viscous and elastic moduli as components of the complex modulus in shear as follows. For the complex modulus in shear

$$\vec{G}^* = \vec{G}' + i \cdot \vec{G}''$$

where $\vec{G}^*$ = dynamic shear modulus, $\vec{G}'$ = elastic shear modulus or storage shear modulus and $\vec{G}''$ = viscous shear modulus or loss shear modulus.

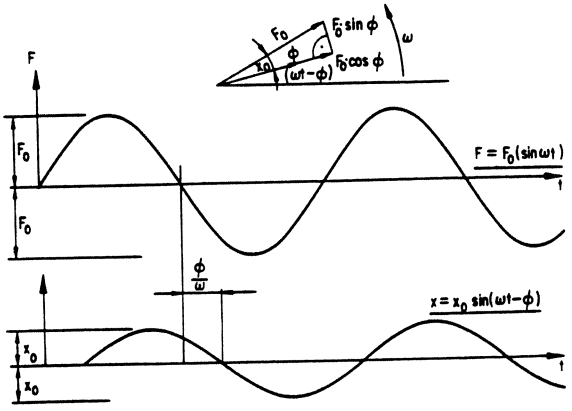


Fig. 8 Forced vibration tests: sinusoidal displacements (x), recorded force (F) and phase angle (ϕ) for viscoelastic materials.

Referenz [4]

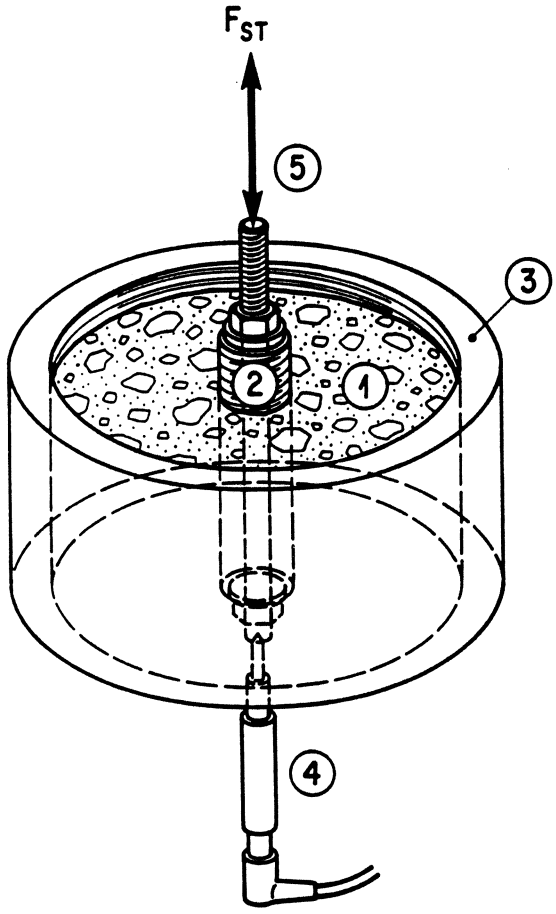


Fig. 9 Schematic view of coaxial cylinders with a test specimen in place for determining the components of the complex modulus in shear. 1, Test specimen; 2, central cylinder; 3, outer cylinder; 4, measurement of displacement; 5, repeatedly applied load.

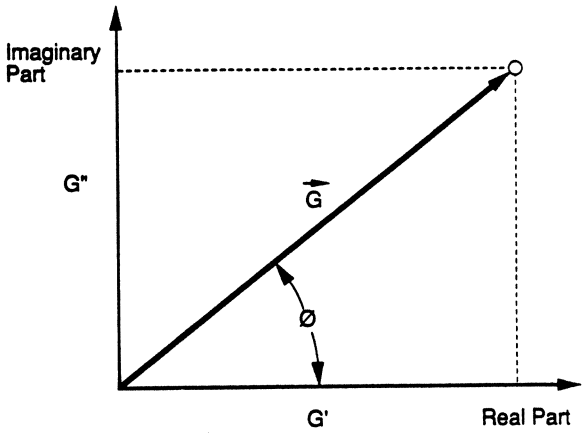


Fig. 10 Complex modulus in shear and its components represented in the imaginary plane.

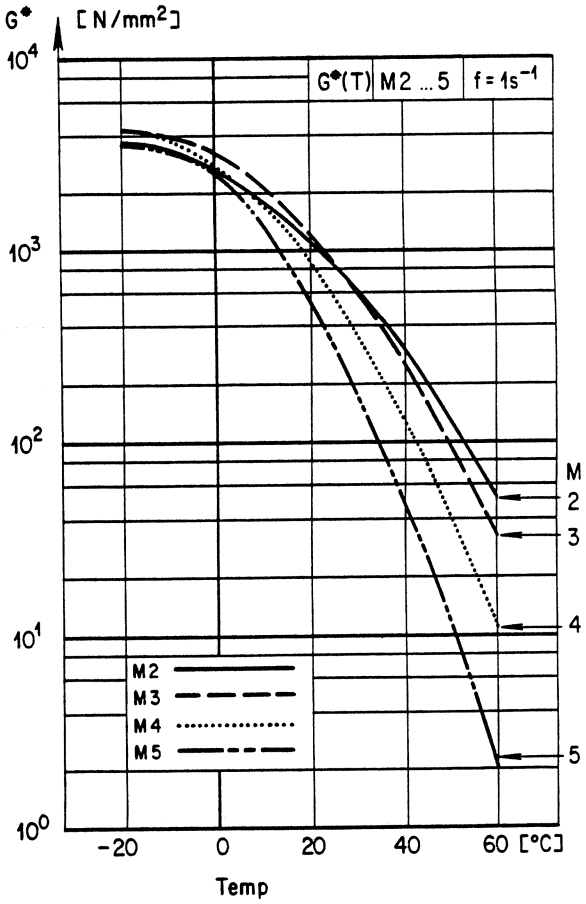


Fig. 11 Complex modulus in shear for the frequency $f = 1\ s^{-1}$ in the temperature range from −20 to 60°C of asphalt concretes (M2–M5 differing only in the binder content: 4.7–5.9 wt%).

The imaginary part of the complex modulus in shear is also called the viscous modulus G''. This viscous modulus is then described by the relationship of its components G' and G^*:

$$G'' = G^* \cdot \sin \phi$$

where ϕ = phase angle. G'' is a measure of the lost energy, which is transformed into heat, observed in the temperature rise of the specimen during the tests at high frequencies.

The real part of the complex modulus in shear (which is the elastic modulus in shear as well) can be presented as

$$G' = G^* \cdot \cos \phi$$

G' is a degree of recoverable energy of displacement and therefore a measure of elasticity. In the plane of the complex numbers the characteristics cited can be represented as shown in Fig. 10. The phase angle ϕ results consequently in $\tan \phi = G''/G'$.

Measuring forced displacements and the forces applied in forced vibration tests allow the characterization of the viscoelastic material behaviour. Such forced vibration tests carried out over wide temperature and frequency ranges, typically from −10°C up

Referenz [4]

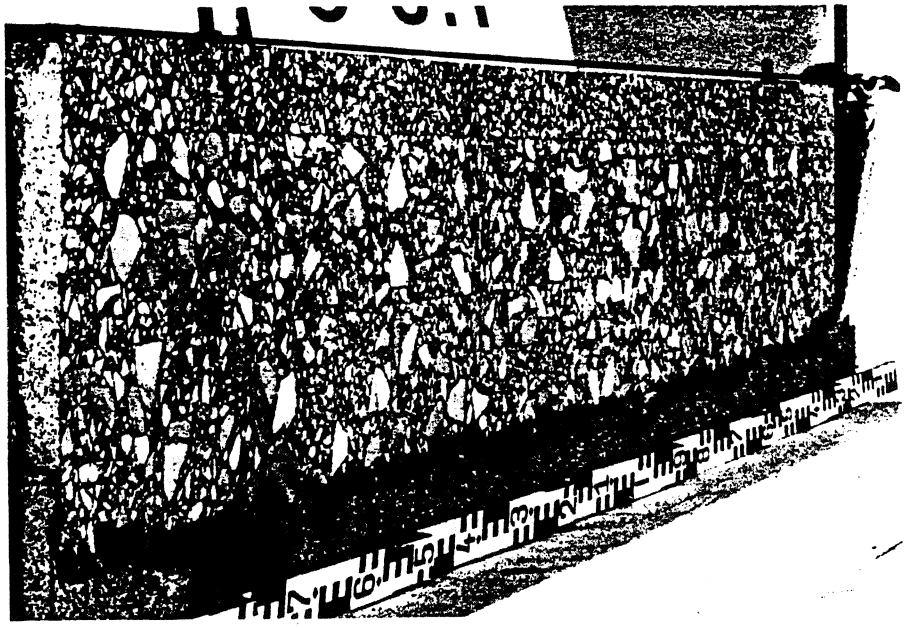


Fig. 12 Cross-section through the wheel path of a slab of a heavily trafficked pavement slab. This cut reveals an ideal concept: as few courses as possible with extremely large maximum size of the crushed aggregates and correct mix design of the asphalt concretes.

to +40°C and between 0.1 and 32 Hz, allows the characterization of bituminous materials (see Fig. 11).

The results and reports from each laboratory constitute an important basis for the final reports for parts 1 and 2 of the interlaboratory tests as well as for the comments and conclusions of working group C. These publications – planned for spring 1993 – will form an important basis for improving the mix design and the necessary characterization of bituminous materials with fundamental and significant test methods in a decisive manner [9]. Consequently, for this working group these reports are essential to achieve the goals as outlined before.

9. CONCLUSION

The main activities of RILEM TC 101-BAT 'Bitumen and Asphalt Testing' brought the following findings and results:

- The Dubrovnik seminar in 1988 and the Budapest symposium in 1990 with the various proceedings and publications.
- The 1988 revision of RILEM Technical Recommendations BM-1 'Terminology of hydrocarbon binders' and its publication in 1989.
- The draft publication of RILEM Technical Recommendation BM-5 'Recovery method with rotary evaporator of the soluble binder from bituminous mixes' in 1988. The unchanged final publication of this draft as BM-5 is planned by the RILEM general secretariat in 1993.
- The publication of the trilingual dictionary in English–French–German of technical terms related to hydrocarbon binders, hydrocarbon composite materials, processes for removing pavement materials, and for the rehabilitation of asphalt pavements has taken place in *Materials and Structures* in May 1992.
- The formation of working groups was essential and indispensable for making progress within a reasonably short period of time.
- Three main topics are under consideration in the three existing working groups: fundamental and significant tests for asphalt pavement materials, emulsions, and polymer-bitumens. In the three existing working groups decisive work will be accomplished in the near future to optimize bituminous pavements (see Figs 12 and 13), surface treatments and other asphaltic materials.

Fig. 13 Optimal bituminous pavement in the Swiss Alps. Ideal concept of the asphalt pavement and correct mix design.

Referenz [4]

• Regarding waterproofing materials, a working group has not yet been founded. The new bituminous RILEM TC (see below) will decide if a working group in this field will be founded and which topics are to be treated.

10. PROPOSAL FOR A NEW RILEM TECHNICAL COMMITTEE AND FUTURE WORK

In the large field of bituminous materials the permanent involvement of RILEM is appropriate. Technical Committee TC 101-BAT was dissolved by the end of 1992 and for the continuation of its work in the field of bituminous materials a new RILEM Technical Committee TC 152-PBM was formed, and approved by the RILEM General Council in October 1992.

The bituminous RILEM technical committee should not duplicate international standardization work efficiently done for example by CEN, ASTM or ISO. If possible, or if it seems necessary for certain reasons, possible assistance to such organizations will be given, but it is certainly not intended to repeat work which is already in progress within CEN. In order to enable decisive progress in the bituminous field in the near future, the bituminous RILEM technical committee and its working groups have to elaborate fundamental and significant test methods in its fields – this for sufficient characterization of the materials in the laboratories and the optimization of the materials' behaviour *in situ*. This has to be ensured by selecting significant laboratory tests to facilitate reliable prediction of materials' behaviour *in situ*. Such innovative RILEM Technical Recommendations (RTRs) enable international standardization organizations to elaborate new specifications and test methods more quickly.

11. ACKNOWLEDGEMENTS

In closing, the writer as former chairman expresses his thanks to the following members and experts for their co-operative attitude in the tremendous amount of work they have done up to now hoping, at the same time, for a fruitful, effective continuation of the necessary work. The members were: C. D. M. Beverwijk (Netherlands), K. E. Cooper (Great Britain), E. Eustacchio (Austria), L. Francken (Belgium), A. Gómez Saiz (Spain), U. Isacsson (Sweden), I. Ishai (Israel), M. Luminari (Italy), L. Nagy (Hungary), A. Paez (Spain), I. Pallos (Hungary), S. Pallotta (Italy), M. Partl (Switzerland), G. Peroni (Italy), G. Ramond (France, Secretary), O. Ruud (Norway), A. Solc (Croatia), M. Smiljanic (Serbia), O. J. Svec (Canada), G. Svechinsky (Israel), D. Sybilski (Poland), S. Toth (Hungary), R. Urban (Germany), J. Verstraeten (Belgium). The experts were F. Choquet (Belgium), J. Sanchez Caba (Spain), A. Verhasselt (Belgium).

12. REFERENCES

1. Proceedings of RILEM seminar, Dubrovnik, 1988: 'Formulation, Control and Behaviour of Polymer Modified Bitumens Either for Waterproofing or for Road Construction' (The Highway Institute, Kumodraska 257, Belgrade, 1989).
2. RILEM Proceedings 8, Budapest symposium, 'Mechanical Tests for Bituminous Mixes, Characterization, Design and Quality Control', Vol. I (Chapman and Hall, London, 1990).
3. *Ibid.*, Vol. II (Hungarian Chemical Society, Budapest, 1991).
4. RILEM Technical Recommendation BM-1, 'Terminology of hydrocarbon binders' (1989) 237–239.
5. RILEM Technical Recommendation BM-5 (1992), 'Recovery method with rotary evaporator of the soluble binder from bituminous mixes'; Draft Recommendation, *Mater. Struct.* **21** (1988) 151–160.
6. 'English–French–German dictionary of technical terms related to hydrocarbon binders, hydrocarbon composite materials, processes for removing pavement material and for the rehabilitation of asphalt pavements', *Mater. Struct.* **25** (1992) 171–185.
7. 'OECD full-scale pavement test' (Road Transport Research, OECD, Paris, 1991).
8. 'Entwicklungen zur Bestimmung mechanischer Materialkennwerte an bituminösen Baustoffen, insbesondere an Asphalt', Report No. 215 (EMPA, Dübendorf, 1987).
9. 'Interlaboratory Tests . . .', publication foreseen Spring 1993.

Referenz [8]

30 METHODE D'ESSAI PAR OSCILLATION AXIALE POUR LA DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES ET DU COMPORTEMENT À LA FATIGUE DES ASPHALTES

(Axial vibration test procedure to determine the mechanical properties and fatigue behaviour of asphalt)

R. GUBLER
EMPA, Dübendorf, Switzerland

Sommaire

L'article présente les aspects importants de la technologie d'essais développée pour la détermination des modules complexes par l'essai d'oscillation au moyen de la flexion-cisaillement axiale sur des éprouvettes d'asphalte. En particulier, le concept du déroulement de l'essai depuis l'installation de l'éprouvette jusqu'à l'exécution de l'essai, y compris le planning de l'opération, fera l'objet de cette étude. L'utilisation de l'informatique pour obtenir ces résultats sera exposée. L'influence de la charge dynamique sur les caractéristiques de matériaux bitumineux sera démontrée par un exemple et la méthode d'évaluation pour obtenir la valeur spécifique du matériau non chargé seront décrites. Ensuite sont exposées les méthodes dans un domaine de fréquences et de températures étendu et, d'autre part, pour la détermination des effets de fatigue dans le domaine des températures estivales.

Mots-clés: technologie d'essais, essai d'oscillation axiale, flexion-cisaillement axiale, concept de l'essai, détermination du module, essai à la fatigue, méthode d'essai.

1 Introduction

Les aspects caractéristiques de la technologie d'essai sur de l'asphalte pour la détermination des valeurs mécaniques spécifiques sont présentés dans cet article. Ces valeurs peuvent être obtenues par des essais d'oscillation au moyen de la flexion-cisaillement axiale.

Referenz [8]

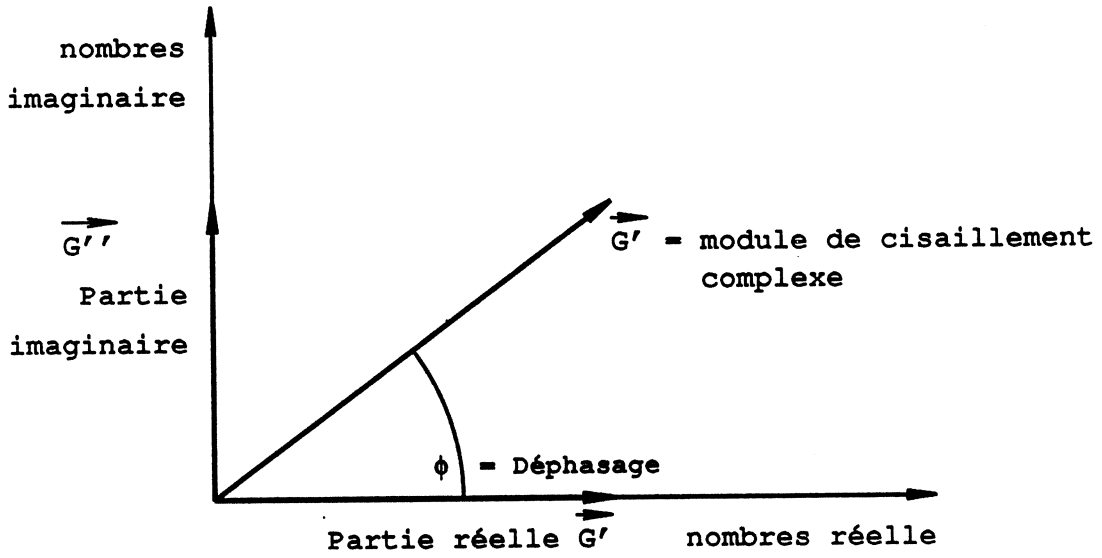


Figure 1. Représentation véktorielle du module complexe avex G' come component élastiques et G'' come component visquex et la déphasage

De cette façon, les composantes visqueuse et élastique du module de cisaillement complexe peuvent être déterminées séparément. La valeur rhéologique représentée par un vecteur peut-être définie par ses composants G'et G". Le module de cisaillement complexe est alors donné par la relation.

$$G = G' + G''$$

La partie réelle du module de cisaillement complexe peut s'écrire:

$$G' = [G] \times \cos \phi$$

G' représente une valeur pour l'énergie de déformation récupérée lors de l'oscillaltion, et donc une valeur pour l'élasticité du matériau. La partie imaginaire sera définie par l'équation:

$$G'' = [G] \times \sin \phi$$

G" est une valeur pour l'énergie de déformation transformée en chaleur non récupérable pendant l'oscillation. Ces relations sont montrées sur la figure 1.

Les buts recherchés lors du développement à l'EMPA d'une installation d'essai appropriée étaient multiples et incluaient les point importants suivants:

Referenz [8]

- mise au point de la technologie d'essai adéquate pour les caractéristiques spécifiques d'essais de matériaux bitumineux.
- exécution d'essais de natures diverses par l'utilisation d'accessoires d'essai interchangeables
- détermination des valeurs physiques spécifiques à partir des carottes prises dans les revêtements, et donc du matériau comme il se trouve in situ (sur les routes).
- détermination exacte des modules complexes, visqueux et élastiques sur une large gamme de valeurs (de 10 à 10'000 $N*mm^{-2}$).
- détermination rationnelle des valeurs spécifiques sur de larges bandes de température et de fréquence.

2 Facteurs d'influence sur le déroulement de l'essai

Une installation d'essais adéquate et bien équipée ne suffit pas à elle seule pour obtenir une détermination exacte des valeurs spécifiques recherchées. Le reproductibilité et l'exactitude des valeurs spécifiques dépendent beaucoup plus du concept de déroulement de l'essai dans son ensemble. Cela concerne des facteurs aussi différents que l'utilisation d'amplificateurs de mesurage, le traitement des éprouvettes, l'influence de l'essai sur les éprouvettes et les méthodes d'évaluation. Il devient donc nécessaire de développer des méthodes d'essais qui puissent garantir une qualité élevée et constante de l'essai.

La connaissance des facteurs d'influence possibles sur les résultats est donc nécessaire pour atteindre le but fixé. Diverses sources d'erreur sont à considérer pour la détermination des valeurs spécifiques mécaniques des asphaltes. Les facteurs d'influence sont indiqués dans la table 1, classés selon le moment de leur apparition durant le déroulement de l'essai.

Referenz [8]

Table 1

Classification chronologique des facteurs d'influence

Type de facteur	Facteurs principaux	Mesures contre les erreurs d'essais
Etat de l'éprouvette	Variation de l'éprouvette, faits antécédents, méthode de fabrication	Recommandation de réception
Paramètres d'essai	Dimensions de l'éprouvette, installation et choix des appareils de mesurage, réglage des amplificateurs de mesurage	Etablissement de la méthode d'ajustage
Influences du déroulement de l'essai	Histoire de l'essai, en particulier de la variation de température. Changement de la structure granulée sous charge mécanique	Projet du déroulement de l'essai
Méthode d'évaluation	Détermination de l'amplitude et des valeurs spécifiques du matériau intact	Evaluation conditionnée

3 Garantie de la qualité de l'essai

Les méthodes développées pour assurer la qualité de l'essai peuvent être classées en quatre catégories dépendant de la méthodique.

Etat de l'éprouvette

L'état des éprouvettes ne peut pas être contrôlé par une amélioration de la méthode d'essai, mais par l'établissement de recommandations relatives à l'extraction ou la production d'éprouvettes. L'essai sur des éprouvettes Marshall livre des résultats erronés car la structure granulée de ces éprouvettes ne correspond pas à celle des carottes provenant d'un revêtement. Les essais sur des éprouvettes fabriquées selon des méthodes de laboratoire ne livrent que des indications comparatives, aussi est-il préférable d'exécuter les essais sur des carottes. Ce problème ne sera pas traité plus avant dans cet article.

Referenz [8]

Concept du déroulement de l'essai

L'organisation du déroulement de l'essai protège l'éprouvette des influences destructives au cours des essais, assure l'acquisition des valeurs spécifiques du matériau intact et garantit une histoire de l'essai clairement définie.

Assistance par l'ordinateur durant l'exécution de l'essai
Cette assistance facilite le réglage de l'installation par l'assistant de laboratoire et évite les erreurs de manipulation. L'ordinateur contrôle tout le déroulement de l'essai, qui se passe selon un plan précis à la seconde près. La température à l'intérieur de l'éprouvette et sa position sont continuellement réglées par l'ordinateur. Les phénomènes exceptionnels sont reconnus et documentés, et toute l'histoire de l'essai est enregistrée dans l'esprit de la Good Laboratory Practice.

Méthode d'évaluation
Les valeurs spécifiques de l'éprouvette intacte sont déterminées durant l'évaluation et contrôlées quant à des erreurs éventuelles.

Les méthodes utilisées vont être exposées de façon détaillée.

3.1 Concept du déroulement de l'essai

Réduction au minimum des contraintes mécaniques sur l'éprouvette. Les carottes prélevées dans le revêtement sont, ainsi que cela est montré sur la figure 2, collées dans les cylindres servant de forme extérieure pour l'éprouvette. Un trou de diamètre intérieur ϕ 50 mm est foré au centre de l'éprouvette et le cylindre intérieur y est collé de façon centrée. Puis l'éprouvette sera mise en place dans l'installation d'essai.

Referenz [8]

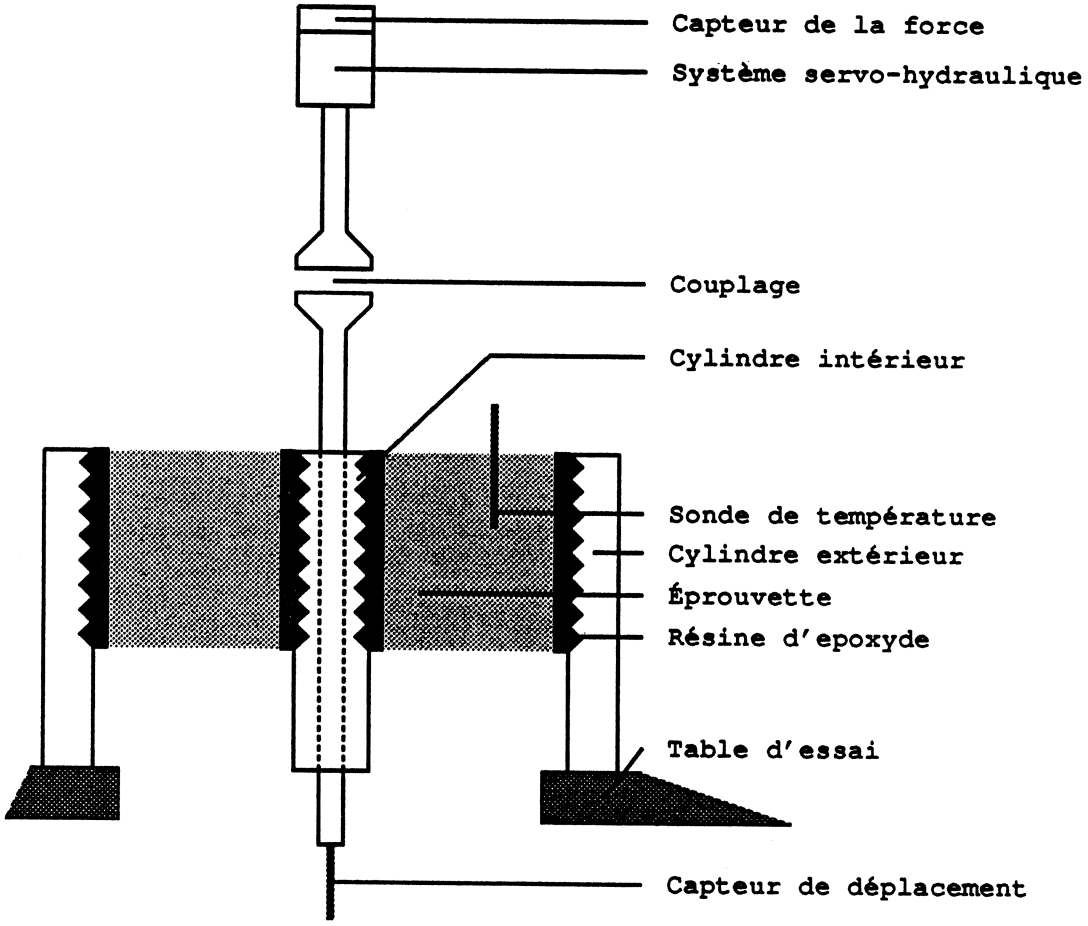


Figure 2. Principe du dispositiv d'essai

La fixation utilisée évite une déformation de l'éprouvette, due à la pression exercée par l'encastrement. Ainsi, la structure du matériau minéral reste elle aussi intacte. La position moyenne de l'éprouvette sera assurée durant toute la durée de l'essai. Les déformations résultant des charges dynamiques d'oscillation sont ainsi symétriques par rapport à la position moyenne et ne comprennent aucun effet non désiré dû au fluage. L'essai se passe sous effort contrôlé, il en résulte un meilleur réglage du comportement et en une moindre dispersion des valeurs mesurées. Les forces mises en jeu pour la détermination des valeurs spécifiques mécaniques sont tenues à un bas niveau afin d'éviter, dans une large mesure, des modifications de la structure du matériau minéral.

Referenz [8]

Organisation du déroulement de l'essai

Un exemple va illustrer la signification du facteur le plus important du déroulement de l'essai. Lors d'un essai préliminaire pour contrôler les caractéristiques d'un asphalte coulé et pour déterminer le paramètre d'essai, l'éprouvette fut refroidie de 25 à 20°C et, à cette température, des mesures furent prises d'abord à 15°C, puis à 20°C. Bien que l'on ait tempéré pendant une heure et que l'on ait obtenu une température également répartie dans toute l'éprouvette, on releva des différences du module de 8 à 15 pour cent, selon les fréquences utilisées. Une telle différence ne pouvait rester inexpliquée. Des répétitions montrèrent que les différences pouvaient être reproduites et qu'elles ne pouvaient provenir que des différences du refroidissement ou de réchauffement. Un programme d'essai, fixe et toujours identique, est donc la condition préalable à la détermination de valeur reproductibles et comparables.

L'essai à hautes températures agit fortement sur la structure du matériau minéral d'un asphalte. Une modification de structure ainsi qu'une modification correspondante de la valeur du module sont les plus prononcées lors de hautes températures d'essai. Il faut donc, lors d'essais mécaniques sur des asphaltes, tout d'abord conduire les essais avec les plus basses températures, puis avec les plus hautes. Les inexactitudes qui pourraient survenir malgré les faibles forces en jeu n'affecteront alors que les valeurs obtenues à la plus haute température.

3.2 Exécution de l'essai avec l'assistance de l'ordinateur

Assistance pendant la mise en place
Les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux dépendent largement de la température. Une détermination optimale des valeurs spécifiques concernées suppose l'existence d'appareillages de mesure adaptés à des forces et déformations très différentes. Les possibilités de réglage très variées qui sont ainsi disponibles s'accompagnent aussi de risques de manipulations erronées. Un logiciel a été développé pour libérer l'assistant de tout calcul de conversion et éviter ce risque. Il ne doit plus que relever la valeur des paramètres d'essai, indiquer quelles valeurs imposées s'appliquent pour l'essai et quel capteur de déplacement devra être monté sur l'éprouvette. L'ordinateur calcule, à partir de ces données, toutes les mises au point nécessaires ainsi que les indications de réglage qui lui seront utiles ultérieurement. Parallèlement, les contradictions possibles entre les paramètres d'essai désirés sont recherchées. Les programmes d'essai qui ne peu-

Referenz [8]

vent être réalisés ou qui endommageraient l'éprouvette seront reconnus à l'avance et ne seront donc pas entamés. Les gaspillages d'éprouvettes et d'essais sur des éprouvettes chargées et avec des structures de matériau minéral modifiées de façon inadmissible seront ainsi évités.

Contrôle du déroulement de l'essai

L'ordinateur contrôle de façon continue la température, la position moyenne de l'éprouvette et aussi pendant l'application de la charge dynamique, la valeur du module. Ce contrôle constitue la base d'un réglage adéquat. Les températures dans l'éprouvette peuvent être exactement maintenues, à 0.2°C près. Les phénomènes de fluage sont évités par le maintien de la position moyenne.

Ainsi l'essai se déroulera automatiquement selon un programme fixe et à la seconde près. Les influences sur les résultats, provenant de déroulements d'essai différents dans leur durée, seront éliminées. Les variations du module, de la température dans l'éprouvette et de sa position moyenne, seront enregistrées et documentées. Cette procédure correspond aux principes de la Good Laboratory Practice, et permet d'obtenir à tout moment l'évaluation de la fiabilité des valeurs déterminées.

Evaluation instantanée

Les valeurs des mesures enregistrées sont évaluées aussitôt après leur relevé. Les représentations graphiques instantanées des valeurs mesurées importantes fournissent à tout moment à l'assistant exécutant l'essai un aperçu de la situation de l'essai.

La force et la déformation sont enregistrées, à chaque oscillation, avec 32 mesures individuelles à intervalles exactement égaux. Cela permet, grâce à une analyse de Fourier, de déterminer avec la meilleure exactitude possible les coefficients sinus et cosinus de son fondamental et, ainsi, d'obtenir par calcul les amplitudes de la force et de la déformation ainsi que les phases intermédiaires. Cette évaluation est faite plusieurs fois pour chaque température et chaque fréquence. Par ailleurs, les déviations des courbes de la force et de la déformation par rapport à la sinusoïde sont déterminées, et enregistrées avec la température de l'éprouvette et la fréquence de charge mesurée.

Referenz [8]

3.3 Méthode d'evolutions développée

Acquisition des valeurs spécifiques obtenues sur le matériau intact. Des recherches détaillées antérieures ont montré que l'essai pouvait causer des modifications réversibles et irréversibles des matériaux bitumineux. La figure 3 montre, à titre d'exemple particulièrement marquant, les résultats obtenus avec un mélange de bitume et de filler.

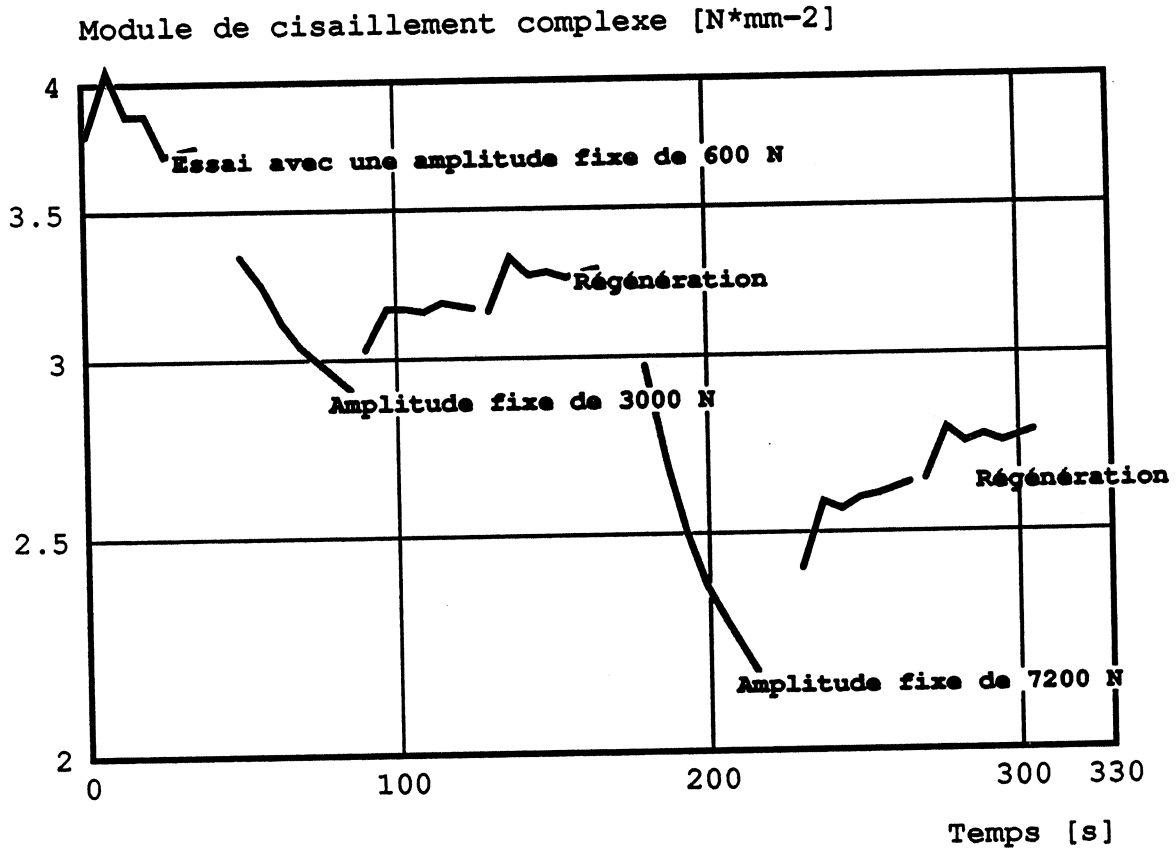


Figure 3. Influence de la charge sur le module complexe à 20 °C d'un mélange de bitume et de filler

Moins nettement, mais fondamentalement de la même façon, des modifications des caractéristiques des éprouvettes ont été relevées sur des matériaux bitumnineux les plus divers. Des modifications irréversibles de l'éprouvette peuvent être largement évitées grâce au concept d'essai dont on vient de parler. Par contre, les modifications réversibles se manifestent, en fonction de la température et de la fréquence des oscillations, déjà avec des amplitudes de la force minimes et nécessaires pour une détermination suffisamment exacte. Elles devront être prises en considération lors de l'évaluation des résultats.

Referenz [8]

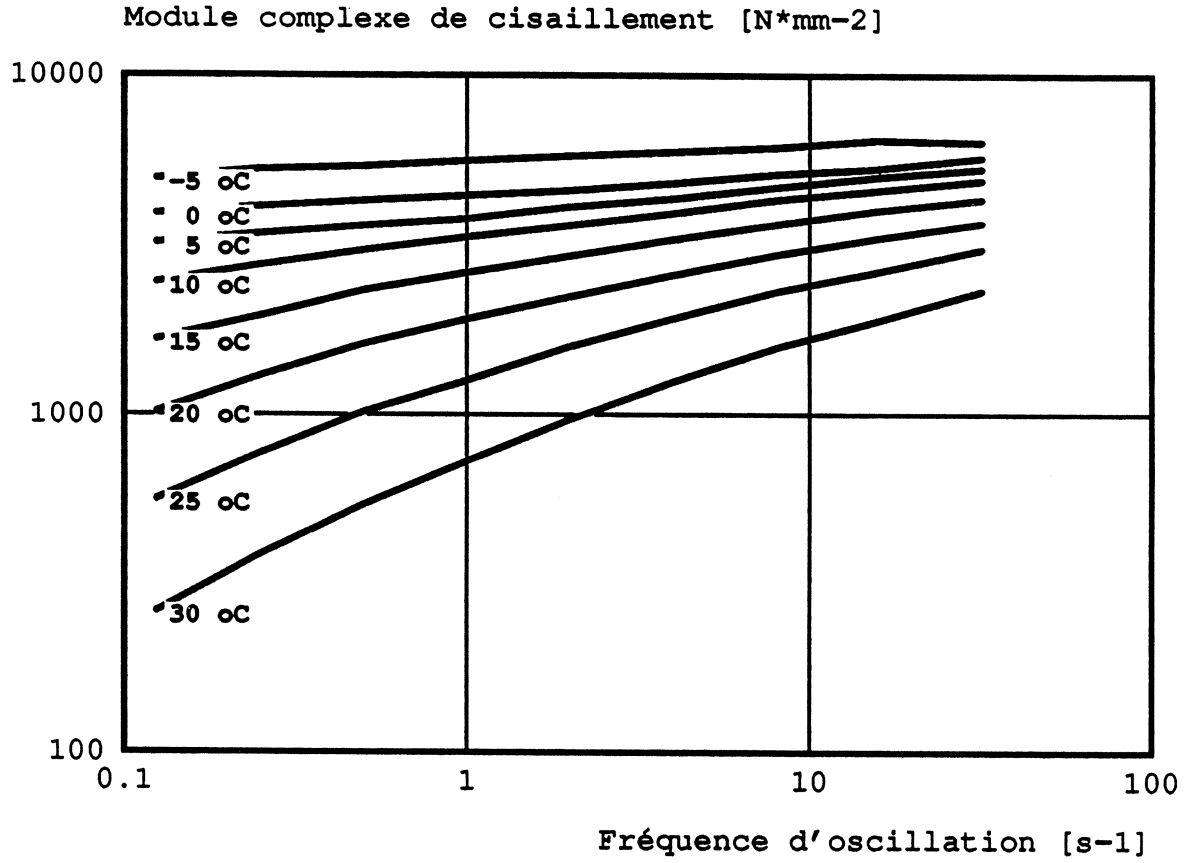
C'est pour ces raisons que, à chaque fois, des essais seront effectués avec les 6 valeurs déterminées et consécutives de l'amplitude de la force, de la déformation et de la phase entre la force et l'amplitude. Cela afin de déterminer une dépendance statistiquement contrôlable avec la durée de la charge dynamique. Si une telle modification des valeurs mesurées est finalement prouvée, la valeur spécifique concernée sera déterminée par une régression linéaire, comme une valeur au moment déterminé où la charge dynamique est appliquée. Les valeurs moyennes seront utilisées lorsqu'aucune dépendance de la durée de charge ne sera statistiquement trouvée.

4 Transposition dans la méthode d'essai

4.1 Détermination des valeurs spécifiques mécaniques

Les méthodes mises au point permettent de déterminer, sur la même carotte et avec une précision suffisante, les valeurs de modules en fonction de la température et de la fréquence dans une bande allant de 10'000 $N*mm^{-2}$ à 100 $N*mm^{-2}$. La température peut varier de -5 à +30°C et la fréquence de 0.1 à 32. Les résultats obtenus peuvent être évalués individuellement à partir de la masse d'informations enregistrées durant l'essai. Les valeurs se plaçant en dehors de la série, par exemple à hautes températures et à basses fréquences, peuvent alors être considérées comme érronées et elles seront éliminées. La figure 4 expose un exemple des valeurs déterminées pour le module complexe en fonction de la température et de la fréquence.

Referenz [8]



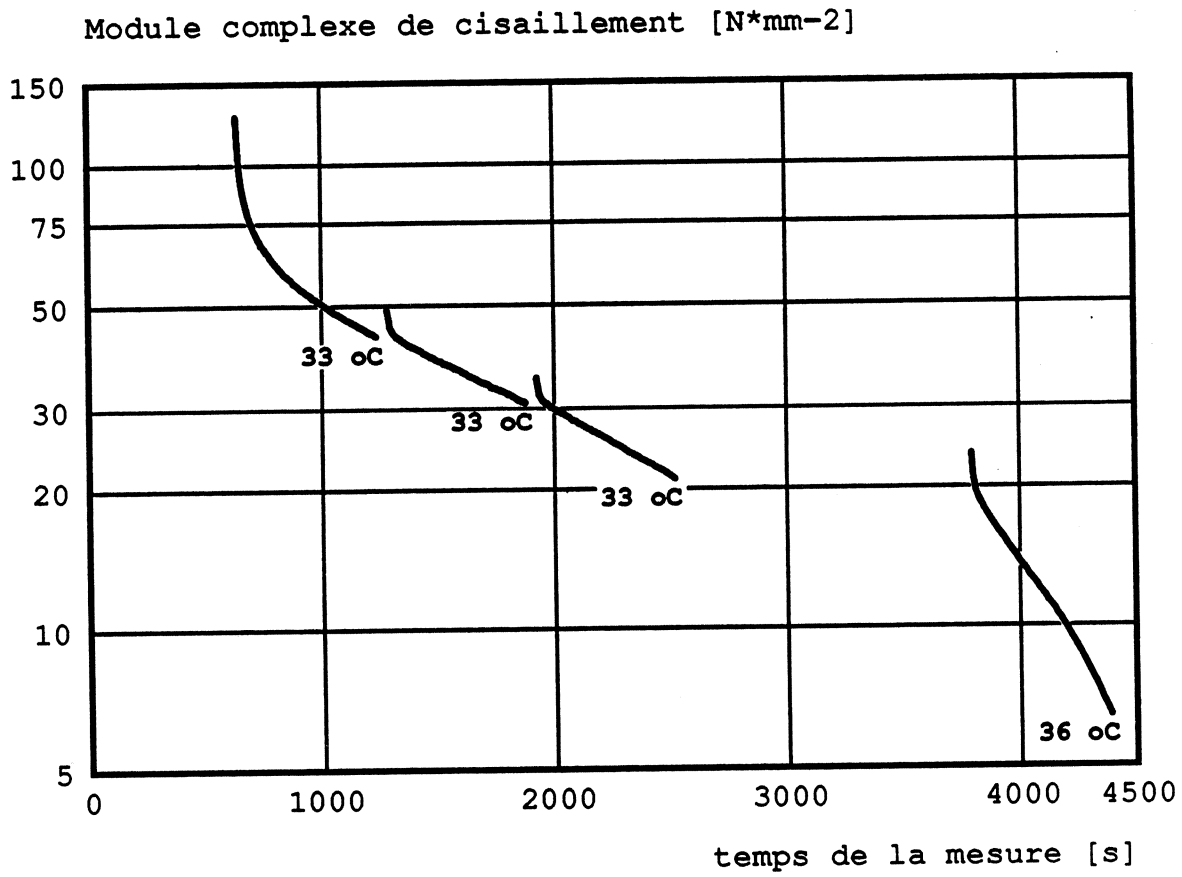
Températures d'essai indiquées

Figure 4. Module complexe pour diverses températures et fréquences, d'une carotte extraite d'un revêtement AB 16

4.2 Essai de fatigue

La possibilité de suivre continuellement la variation du module, avec un choix approprié du capteur de déplacement et le réglage d'un amplificateur de mesurage, ainsi que de déterminer exactement de très petites valeurs des modules (10 $N*mm^{-2}$), permet d'exécuter des essais de fatigue, même avec des températures supérieures à 30°C. Ces essais sont conduits jusqu'à la rupture. Mais même lors de ces essais destructifs, la position moyenne est conservée et la rupture est causée uniquement par la charge dynamique. Selon le type d'essai utilisé, le résultat indique le nombre de cycles de charge (essai à température déterminée), ou la température de rupture (essai à température croissante). La deuxième valeur spécifique, en particulier, permet d'établir une prévision en ce qui concerne la résistance du revêtement testé. La figure 5 montre la relation existant entre le module complexe et la température ainsi que la durée de charge.

Referenz [8]



Température d'essai comme indiquées

Figure 5. Comportement á la fatigue caractérisé par la diminuation du module complexe

5 Conclusions

La méthode d'essai mise au point, permet:

- de déterminer le module de cisaillement complexe de 10 à 10'000 $N*mm^{-2}$, des modules élastiques et visqueux correspondant, avec des dispersions généralement inférieures à 1%, et une reproductibilité inférieure à 5% de la valeur.
- selon l'esprit de la Good Laboratory Practice, d'obtenir un grand nombre de valeurs caractérisent l'essai.
- d'étudier les détails du comportement mécanique, comme la modification de la structure du matériau minéral sous charge.

Referenz [8]

L'article expose les diverses méthodes employées pour atteindre ces buts, et il peut servir de base pour des développements similaires.

Bibliographie

1 William M.L., Landel R.F., Ferry J.D. (1955)
The temperature dependence of relaxation in amorphous polymers and other glassforming liquids
J. Amer. Chem. Soc. 77, p. 3701

2 Dobson G.R. (1969)
Proceedings of the Association of Paving Taring Technologists
Vol. 38, p. 123

3 Junker J.P., Fritz H.W. (1976)
Festigkeitsuntersuchungen an Prüfkörpern aus verdichtetem bituminösem Mischgut
Schlussbericht, Forschungsauftrag 22/75, Eidg. Departement des Innern

4 Gubler R. (1977)
Anforderungen an Strassenbaubitumen
Schlussbericht, Forschungsauftrag 8/77, Eidg. Departement des Innern

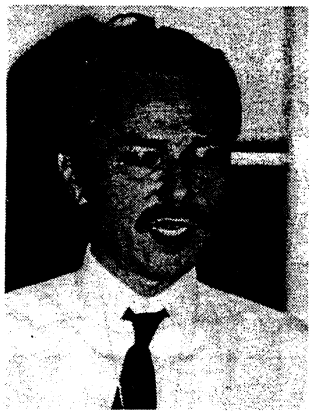
5 Junker J.P. (1987)
Entwicklungen zur Bestimmung mechanischer Materialkennwerte an bituminösen Baustoffen, insbesondere an Asphal
Dissertation, EMPA-Bericht Nr. 215

6 Bernhard A., Gubler R. (1989)
Filler für bituminöses Mischgut, Forschungsauftrag 3/83 des Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartements, Schlussbericht Nr. 172

Referenz [10]

R. Gubler

Méthode d'essai par oscillation axiale pour la détermination des caractéristiques mécaniques et du comportement à la fatigue des asphaltes



Rémy Gubler
Ingénieur chimiste et docteur EPFZ, M. Gubler est ingénieur à la section 113 "Matériaux de construction et étanchéité" de l'EMPA depuis 1976. Il développe les essais de flexion/cisaillement dans le cadre de la thèse de M. Junker. Adjoint scientifique, il s'occupe d'expertises sur les routes et aménagements hydrauliques dans le monde entier.

0. RESUME

L'article présente les aspects importants de la technique d'essai développée pour la détermination des modules complexes par l'essai d'oscillation au moyen de la flexion-cisaillement axiale sur des éprouvettes d'asphalte. En particulier le concept du déroulement de l'essai depuis l'installation de l'éprouvette jusqu'à l'exécution de l'essai, y compris le planning de l'opération est l'objet de cette étude. L'utilisation de l'informatique pour obtenir ces résultats est exposée. L'influence de la charge dynamique sur les caractéristiques de matériaux bitumineux est démontrée par un exemple et la méthode d'évaluation pour obtenir la valeur spécifique du matériau non chargé est décrite. Ensuite, sont exposées les méthodes dans un domaine de fréquences et de températures étendu et, d'autre part,pour la détermination des effets de fatigue dans le domaine des températures estivales.

1. INTRODUCTION

Cet exposé aborde certains aspects de la technique d'essai destinée à la détermination des caractéristiques mécaniques des asphaltes. Un article présenté lors du symposium RILEM à Budapest en 1990 en constitue la base. Les améliorations apportées à cette méthode d'essai depuis cette première présentation ont été intégrées dans cet exposé. De plus, il traite d'une application intéressante de l'essai de fatigue et d'une nouvelle méthode d'évaluation. Les buts recherchés lors du développement à l'EMPA d'une installation d'essai appropriée étaient multiples et incluaient les points importants suivants:

- mise au point de la technique d'essai adéquate pour les caractéristiques spécifiques d'essais de matériaux bitumineux,
- exécution d'essais de natures diverses par l'utilisation d'accessoires d'essai interchangeables,
- détermination des valeurs physiques spécifiques à partir de carottes prélevées dans les revêtements, et donc du matériau prélevé in situ (sur les routes),
- détermination exacte des modules complexes, visqueux et élastiques sur une large gamme de valeurs (de 10 à 10'000 $N.mm^{-2}$),
- détermination rationnelle des valeurs spécifiques sur de larges bandes de température et de fréquence.

Referenz [10]

R. Gubler

Méthode d'essai par oscillation axiale pour la détermination des caractéristiques mécaniques et du comportement à la fatigue des asphaltes

2. FACTEURS D'INFLUENCE SUR LE DEROULEMENT DE L'ESSAI

Une installation d'essais adéquate et bien équipée ne suffit pas à elle seule pour obtenir une détermination exacte des valeurs spécifiques recherchées: La reproductibilité et l'exactitude des valeurs spécifiques dépendent beaucoup plus du concept de déroulement de l'essai dans son ensemble. Cela concerne des fateurs aussi différents que l'utilisation d'amplificateurs de mesurage, le traitement des éprouvettes, l'influence de l'essai sur les éprouvettes et les méthodes d'évaluation. Il devient donc nécessaire de développer des méthodes d'essais qui puissent garantir une qualité élevée et constante de l'essai.

La connaissance des facteurs d'influence possible sur les résultats est donc nécessaire pour atteindre le but fixé. Diverses sources d'erreurs sont à considérer dans la détermination des valeurs spécifiques mécaniques des asphaltes. Les facteurs d'influence sont indiqués dans le tableau 1, classés selon le moment de leur apparition durant le déroulement de l'essai.

Type de facteur	Facteurs principaux	Mesures contre les erreurs d'essais
Etat de l'éprouvette	Variation de l'éprouvette - faits antécédents, - méthode de fabrication	Recommandation de réception
Paramètres d'essai	Dimensions de l'éprouvette - installation et choix des appareils de mesure, - réglage des amplificateurs de mesure	Etablissement de la méthode d'ajustage
Influence du déroulement de l'essai	Histoire de l'essai, en particulier de la variation de température. Changement de la structure granulée sous charge mécanique	Projet du déroulement de l'essai
Méthode d'évaluation	Détermination de l'amplitude et des valeurs spécifiques du matériau intact	Evaluation conditionnée

Tableau 1
Classification chronologique des facteurs d'influence

3. GARANTIE DE LA QUALITE DE L'ESSAI

Les méthodes développées pour assurer la qualité de l'essai peuvent être classées en quatre catégories dépendant de la méthode.

Etat de l'éprouvette

L'état des éprouvettes ne peut pas être contrôlé par une amélioration de la méthode d'essai, mais par l'établissement de recommandations relatives au prélèvement ou à la fabrication des éprouvettes. L'essai sur des éprouvettes Marshall livre des résultats erronés car la structure granulée de ces éprouvettes ne correspond pas à celle des carottes provenant d'un revêtement. Les essais sur des éprouvettes fabriquées selon des méthodes de laboratoire ne livrent que des indications comparatives, aussi est-il préférable d'exécuter les essais sur des carottes. Ce problème ne sera pas traité plus avant dans cet article.

Referenz [10]

R. Gubler

Méthode d'essai par oscillation axiale pour la détermination des caractéristiques mécaniques et du comportement à la fatigue des asphaltes

Concept du déroulement de l'essai

L'organisation du déroulement de l'essai protège l'éprouvette des influences destructives au cours des essais, assure l'acquisition des valeurs spécifiques du matériau intact et garantit une histoire de l'essai clairement définie.

Assistance par l'ordinateur durant l'exécution de l'essai

Cette assistance facilite le réglage de l'installation par l'assistant de laboratoire et évite les erreurs de manipulations. L'ordinateur contrôle tout le déroulement de l'essai qui se passe selon un plan précis à la seconde près. La température à l'intérieur de l'éprouvette et sa position sont continuellement réglées par l'ordinateur. Les phénomènes exceptionnels sont reconnus et documentés et toute l'histoire de l'essai est enregistrée dans l'esprit de la Good Laboratory Practice.

Méthode d'évaluation

Les valeurs spécifiques de l'éprouvette intacte sont déterminées durant l'évaluation et contrôlées quant à des erreurs éventuelles. Les méthodes utilisées vont être exposées en détail.

3.1 Concept du déroulement de l'essai

Réduction au minimum des contraintes mécaniques sur l'éprouvette. Les carottes prélevées dans le revêtement sont, ainsi que cela est montré sur la figure 1, collées dans les cylindres servant de forme extérieure pour l'éprouvette. Un trou de diamètre intérieur Ø 50 mm est foré au centre de l'éprouvette et le cylindre intérieur y est collé de façon centrée, puis l'éprouvette est mise en place dans l'installation d'essai.

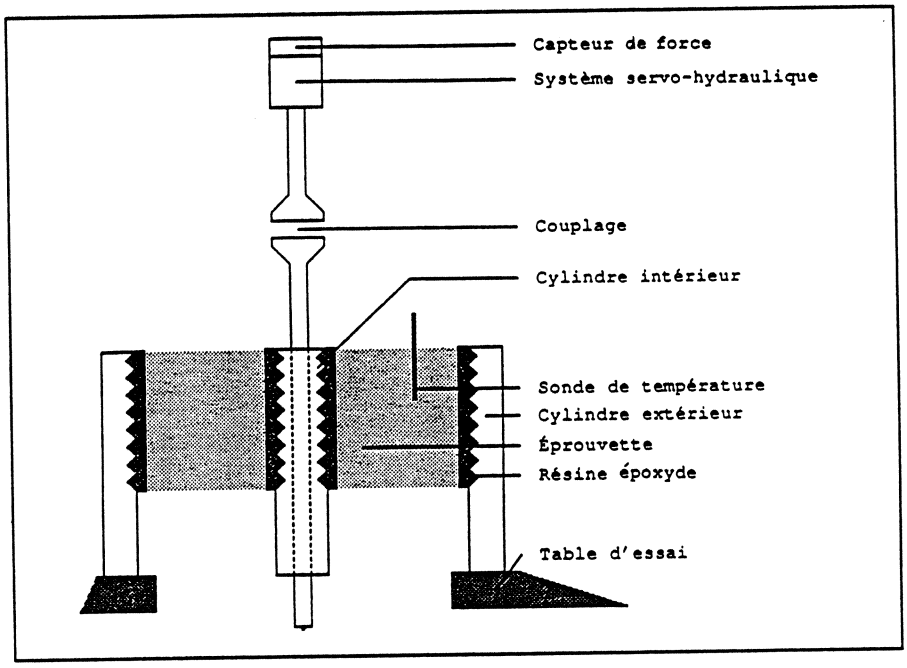


Figure 1
Principe du dispositif d'essai

Referenz [10]

R. Gubler

Méthode d'essai par oscillation axiale pour la détermination des caractéristiques mécaniques et du comportement à la fatigue des asphaltes

La fixation utilisée évite une déformation de l'éprouvette due à la pression exercée par l'encastrement. Ainsi, la structure du matériau minéral reste elle aussi intace. La position moyenne de l'éprouvette sera assurée durant toute la durée de l'essai. Les déformations résultant des charges dynamiques d'oscillation sont ainsi symétriques par rapport à la position moyenne et ne comprennent aucun effet non désiré dû au fluage. L'essai se passe sous effort contrôlé, il en résulte un meilleur réglage du comportement et une moindre dispersion des valeurs mesurées. Les forces mises en jeu pour la détermination des valeurs spécifiques mécaniques sont tenues à un bas niveau afin d'éviter, dans une large mesure, des modifications de la structure du matériau minéral.

Mesure de la déformation

Cette mesure est difficile et peut conduire à des erreurs. A basse température, le module de la colle est bien plus bas que celui de l'éprouvette. Cela signifie qu'une partie importante de la déformation totale provient de la déformation de la colle. Cette influence est corrigée par calcul, mais celui-ci ne peut être plus exact que les données utilisées. Il est difficile de déterminer exactement les rayons extérieur et intérieur moyens de l'éprouvette. L'épaisseur de la masse de colle, dont dépend proportionnellement sa déformation, est donc mal connue. D'autre part, le module de la colle dépend de divers facteurs tels que la durée de son durcissement, les proportions exactes de ses deux composants, la température et la fréquence d'essai. Une estimation de l'erreur possible a montré que celle-ci pouvait atteindre dans le cas le plus défavorable (erreur maximale sur l'épaisseur de la colle associée à un module élevé de l'éprouvette) 30 % de la valeur du module).

Pour des raisons géométriques, environ 70 % de cette erreur est due à la colle du trou intérieur. Pour éliminer cette erreur, on a développé un nouveau système de mesure pour déterminer la somme de la déformation de l'éprouvette et de la déformation de la colle (figure 2). L'erreur se réduit alors à 8 % dans le cas le plus défavorable.

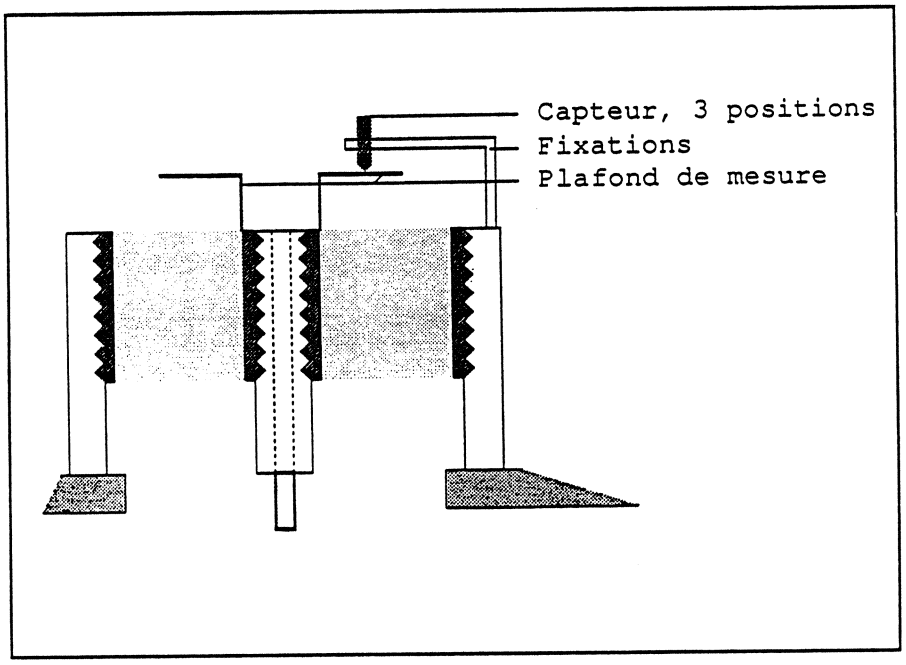


Figure 2
Mesure de déplacement de la déformation

Referenz [10]

R. Gubler

Méthode d'essai par oscillation axiale pour la détermination des caractéristiques mécaniques et du comportement à la fatigue des asphaltes

Organisation du déroulement de l'essai

Un exemple va illustrer la signification du facteur le plus important du déroulement de l'essai. Lors d'un essai préliminaire pour contrôler les caractéristiques d'un asphalte coulé et déterminer le paramètre d'essai, l'éprouvette a été refroidie de 25 à 20 °C et, à cette température, des mesures ont été prises d'abord à 15 °C puis à 20 °C. Bien que l'on ait tempéré l'éprouvette pendant une heure et que l'on ait obtenu une température répartie également dans toute l'éprouvette, on a relevé des différences du module de 8 à 15 pour cent, selon les fréquences utilisées. Une telle différence ne pouvait rester inexpliquée. Des répétitions ont montré que les différences pouvaient être reproduites et qu'elles ne pouvaient provenir que des différences de refroidissement ou de réchauffement. Un programme d'essai, fixe et toujours identique, est donc la condition préalable à la détermination de valeurs reproductibles et comparables.

L'essai à hautes températures agit fortement sur la structure du matériau minéral d'un asphalte. Une modification de structure ainsi qu'une modification correspondante de la valeur du module sont les plus prononcées lors de hautes températures d'essai. Lors d'essais mécaniques sur des asphaltes, il faut donc tout d'abord conduire les essais aux plus basses températures puis aux plus hautes. Les inexactitudes qui pourraient survenir malgré les faibles forces en jeu n'affecteront alors que les valeurs obtenues à la plus haute température.

3.2 Exécution de l'essai avec l'assistance de l'ordinateur

Assistance pendant la mise en place

Les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux dépendent des valeurs spécifiques concernées: cela suppose l'existence d'appareillages de mesure adaptés à des forces et des déformations très différentes. Les possibilités de réglage trés variées qui sont ainsi disponibles s'accompagnent aussi de risques de manipulations erronées. Un logiciel a été développé pour libérer l'assistant de tout calcul de conversion et éviter ce risque. Il ne doit plus que relever la valeur des paramètres d'essai, indiquer quelles valeurs imposées s'appliquent pour l'essai et quel capteur de déplacement devra être monté sur l'éprouvette. A partir de ces données, l'ordinateur calcule toutes les mises au point nécessaires ainsi que les indications de réglage qui lui seront utiles ultérieurement. Parallèlement, les contradictions possible entre les paramètres d'essai désirés sont recherchées. Les programmes d'essai qui ne peuvent être utilisés ou qui endommageraient l'éprouvette seront reconnus à l'avance et ne seront donc pas entamés. Les gaspillages d'éprouvettes et d'essais sur des éprouvettes chargées et avec des structures de matériau minéral modifiées de façon inadmissible seront ainsi évités.

Contrôle du déroulement de l'essai

L'ordinateur contrôle de façon continue la température, la position moyenne de l'éprouvette et également la valeur du module pendant l'application de la charge dynamique. Ce contrôle constitue la base d'un réglage adéquat. Les températures dans l'éprouvette peuvent être maintenues exactement, à 0.2 °C près. Les phénomènes de fluage sont évités par le maintien de la position moyenne.

Ainsi l'essai se déroulera automatiquement selon un programme fixe et à la seconde près. Les influences sur les résultats, provenant de déroulements d'essai différents dans leur durée, seront éliminées. Les variations du module, de la température dans l'éprouvette et de sa position moyenne, seront enregistrées et documentées. Cette procédure correspond aux principes de la "Good Laboratory Practice", et permet d'obtenir à tout moment l'évaluation de la fiabilité des valeurs déterminées.

Evaluation instantanée

Les valeurs des mesures enregistrées sont évaluées aussitôt après leur relevé. Les représentations graphiques instantanées des valeurs mesurées importantes fournissent à tout moment à l'assistant exécutant l'essai, un aperçu de la situation de l'essai.

Referenz [10]

R. Gubler

Méthode d'essai par oscillation axiale pour la détermination des caractéristiques mécaniques et du comportement à la fatigue des asphaltes

La force et la déformation sont enregistrées à chaque oscillation, avec 32 mesures individuelles à intervalles exactement égaux. Une analyse de Fourier permet de déterminer avec la meilleure exactitude possible les coefficients sinus et cosinus du fondamental et, ainsi, d'obtenir par calcul les amplitudes de la force et de la déformation ainsi que les phases intermédiaires. Cette évaluation est faite plusieurs fois pour chaque température et chaque fréquence. Par ailleurs, les déviations des courbes de la force et de la déformation par rapport à la sinusoïde sont déterminées et enregistrées avec la température de l'éprouvette et la fréquence de charge mesurée.

3.3 Méthode d'évaluation développée

Acquisition des valeurs spécifiques obtenues sur le matériau intact

Des recherches détaillées antérieures ont montré que l'essai pouvait causer des modifications réversibles et irréversibles des matériaux bitumineux. La figure 3 montre, à titre d'exemple particulièrement marquant, les résultats obtenus avec un mélange de bitume et de filler.

Moins nettement, mais fondamentalement de la même façon, des modifications des caractéristiques des éprouvettes ont été relevées sur des matériaux bitumineux les plus divers. Des modifications irréversibles de l'éprouvette peuvent être largement évitées grâce au concept d'essai dont on vient de parler. Par contre, les modifications réversibles se manifestent, en fonction de la température et de la fréquence des oscillations, déjà avec des amplitudes de la force minimes et nécessaires pour une détermination suffisamment exacte. Elles devront être prises en considération lors de l'évaluation des résultats. C'est pour ces raisons que, à chaque fois, des essais seront effectués avec les 6 valeurs déterminées et consécutives de l'amplitude de la force, de la déformation et de la phase entre la force et l'amplitude, cela afin de déterminer une dépendance statistiquement contrôlable avec la durée de la charge dynamique. Si une telle modification des valeurs mesurées est finalement prouvée, la valeur spécifique concernée est déterminées par une régression linéaire, comme une valeur au moment déterminé où la charge dynamique est appliquée. Les valeurs moyennes sont utilisées lorsqu'aucune dépendance de la durée de charge n'est statistiquement trouvée.

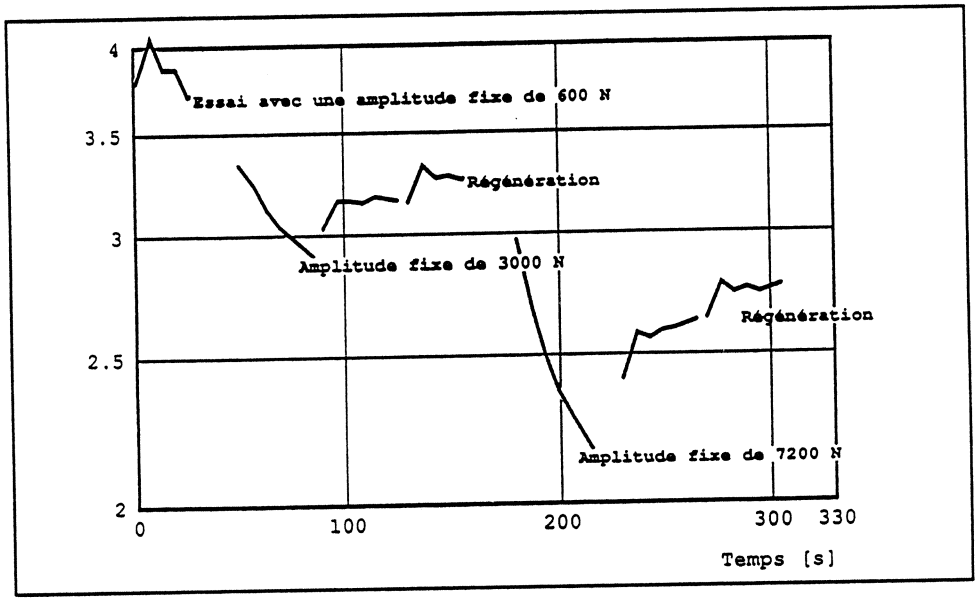


Figure 3
Module de cisaillement complexe [N.mm²]
Influence de la charge à 20 °C d'un mélange de bitume et de filler

Referenz [10]

R. Gubler

Méthode d'essai par oscillation axiale pour la détermination des caractéristiques mécaniques et du comportement à la fatigue des asphaltes

4. TRANSPOSITION DANS LA METHODE D'ESSAI

4.1 Détermination des valeurs spécifiques mécaniques

Les méthodes mises au point permettent de déterminer, sur la même carotte et avec une précision suffisante, les valeurs de modules en fonction de la température et de la fréquence dans une bande allant de 10'000 $N.mm^{-2}$ à 100 $N.mm^{-2}$. La température peut varier de -5 à +30 °C et la fréquence de 0.1 à 32 unité H_2. Les résultats obtenus peuvent être évalués individuellement à partir de la masse d'informations enregistrées durant l'essai. Les valeurs se plaçant en dehors de la série, par exemple à hautes températures et à basse fréquences, peuvent alors être considérées comme érronées et elles seront éliminées. La figure 4 expose un exemple des valeurs déterminées pour le module complexe en fonction de la température et de la fréquence.

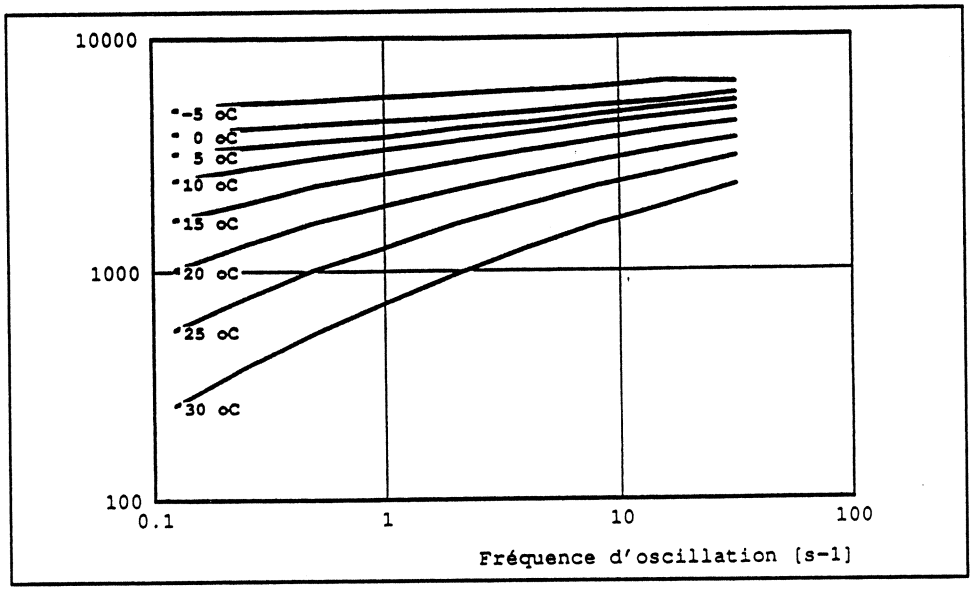


Figure 4
Module de cisaillement complexe [N.mm²], à diverses températures et fréquences, d'une carotte extraite d'un revêtement AB 16

4.2 Essai de fatigue

La possibilité de suivre continuellement la variation du module, avec un choix approprié du capteur de déplacement et le réglage d'un amplificateur de mesure, ainsi que de déterminer exactement de très petites valeurs des modules (10 $N.mm^{-2}$), permet d'exécuter des essais de fatigue, même avec des températures supérieures à 30 °C.

Résultats de l'essai de fatigue

L'EMPA a réalisé un nombre relativement élevé d'essais de fatigue à haute température qui permettent de suivre l'évolution de diverses valeurs caractéristiques, telles que le module, le genre de déformation et le déphasage. La force appliquée étant sinusoïdale, la déformation est au commencement elle aussi sinusoïdale. Avec la progression de la destruction de la structure du matériau minéral, on constate une déviation par rapport à la forme sinusoïdale. Cette déviation, qui peut être mesurée, donne une information sur l'état du matériau minéral. Sur la figure 5, après une période initiale, on constate un changement assez rapide, cela signifie que la destruction finale de la structure des matériaux peut être bien définie. Mais la courbe de déphasage montre que la destruction commence bien avant. Le

Referenz [10]

R. Gubler

Méthode d'essai par oscillation axiale pour la détermination des caractéristiques mécaniques et du comportement à la fatigue des asphaltes

maximum du déphasage définit le commencement, et le changement rapide de sa forme, la destruction finale de la structure du matériau minéral.

La figure 6 montre que ces deux points, exprimés par le nombre de cycles, sont fortement liés. La corrélation avec le module et surtout le nombre de cycles nécessaire pour atteindre une déformation prescrite est moins bonne. Les deux valeurs diffèrent aussi plus nettement que, par exemple, le nombre de cycles jusqu'à réduction du module de 50 %.

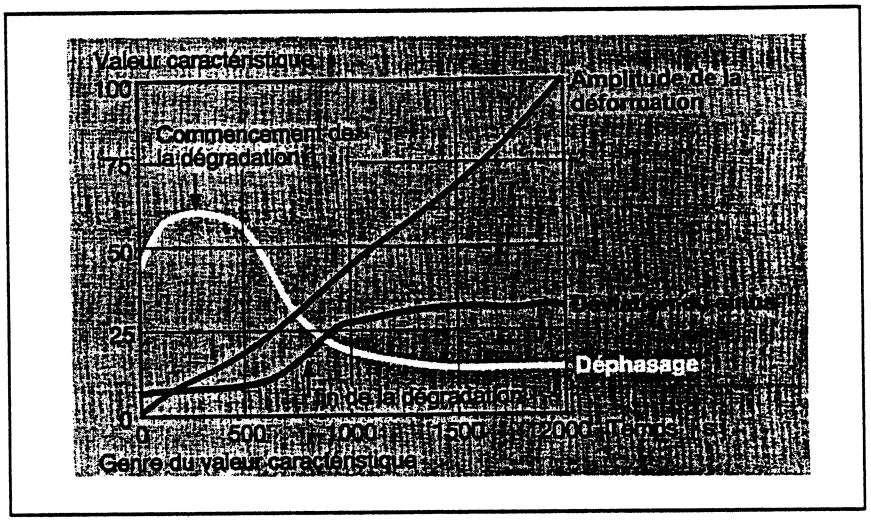


Figure 5
Effet du test de fatigue sur la structure granulée

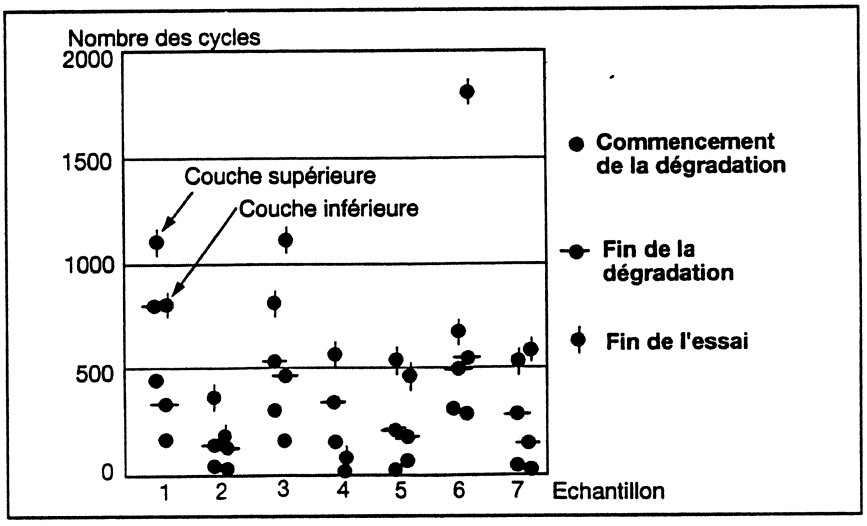


Figure 6
Résultats de l'essai de fatigue

Referenz [10]

R. Gubler

Méthode d'essai par oscillation axiale pour la détermination des caractéristiques mécaniques et du comportement à la fatigue des asphaltes

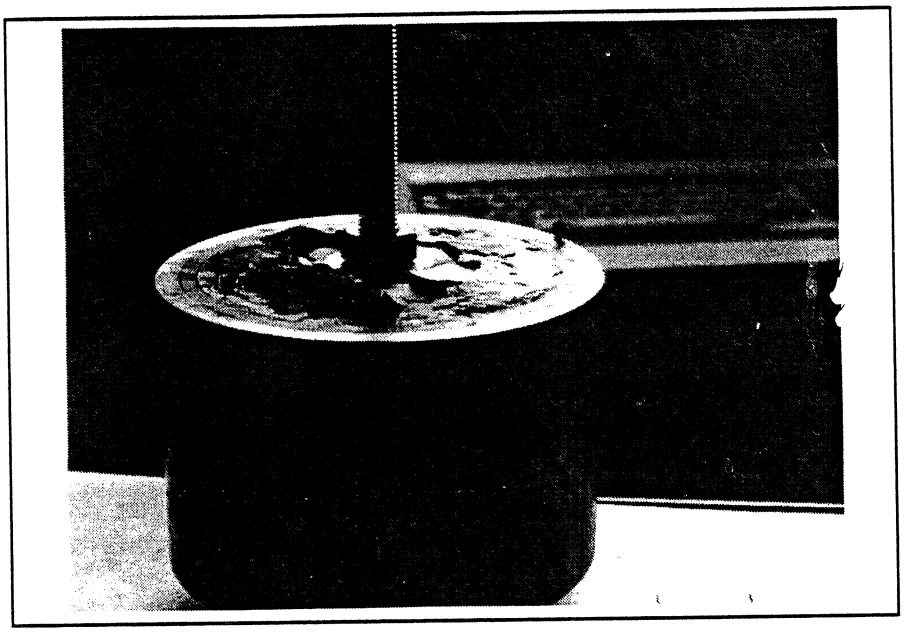


Figure 7
Etat d'une éprouvette après l'essai de fatigue

5. CONCLUSIONS

La méthode d'essai mise au point permet :

- de déterminer le module de cisaillement complexe de 10 à 10'000 $N.mm^{-2}$, des modules élastiques et visqueux correspondant, avec des dispersions généralement inférieures à 1 % et une reproductibilité inférieure à 5 % de la valeur;
- selon l'esprit de la "Good Laboratory Practice", d'obtenir un grand nombre de valeurs caractérisant l'essai;
- d'étudier les détails du comportement mécanique, comme la modification de la structure du matériau minéral sous charge et les processus qui se déroulent pendant l'essai de fatigue.

L'article expose les diverses méthodes employées pour atteindre ces buts et il peut servir de base pour des développements similaires.

Referenz [10]

R. Gubler

Méthode d'essai par oscillation axiale pour la détermination des caractéristiques mécaniques et du comportement à la fatigue des asphaltes

BIBLIOGRAPHIE

William M.L., Landel R.F., Ferry J.D. (1955)
The temperature dependence of relaxation in amorphous polymers and other glassforming liquids
J. Amer. Chem. Soc. 77, p. 3701

Dobson G.R. (1969)
Proceedings of the Association of Paving Taring Technologists
Vol. 38, p. 123

Junker J.P., Fritz H.W. (1976)
Festigkeitsuntersuchungen an Prüfkörpern aus verdichtetem bituminösem Mischgut
Schlussbericht, Forschungsauftrag 22/75, Eid. Departement des Innern

Gubler R. (1977)
Anforderung an Strassenbaubitumen
Schlussbericht, Forschungsauftrag 8/77, Eid. Departement des Innern

Junker J.P. (1987)
Entwicklungen zur Bestimmung mechanischer Materialkennwerte an bituminösen Baustoffer, insbesondere an Asphal
Dissertation, EMPA-Bericht Nr. 215

Bernhard A., Gubler R. (1989)
Filler für bituminöses Mischgut, Forschungsauftrag 3/83 des Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartements, Nr. 172

Gubler R. (1990)
Filler d'essais par oscillation axiale pour la détermination des caractéristiques mécaniques et du comportement à la fatigue des asphaltes
Proceedings of the fourth international RILEM Symposium, Budapest 1990

Referenz [13]

Forced Vibration Tests on Bitumen- and Polymer-Bitumen Membranes to determine their Essential Properties

H.W. Fritz, EMPA, CH-8600 Dübendorf

SUMMARY

Fundamental tests are necessary to describe sufficiently the behaviour of factory made and reinforced bitumen- and polymer-bitumen membranes. Their mechanical properties are heavily influenced by environmental conditions, loading time and load intensity. Consequently the essential properties have to be determined over wide temperature and frequency ranges.

Forced vibration tests were carried out on bitumen- and polymer-bitumen membranes in the temperature range from -10 °C to 40 °C and at frequencies between 0.1 and 32 Hz.

The characteristics determined allow a comparison of the properties of the two tested materials. Their behaviour differed significantly at high temperatures and low frequencies.

These forced vibration tests allow the determination of the essential properties and thus enable a description of the behaviour of bitumen- and polymer-bitumen membranes under realistic environmental and loading conditions.

A INTRODUCTION

Factory made and reinforced bituminous membranes are frequently used for roofing or waterproofing. In Switzerland, these sheetings are delivered in the form of rolls and consist of bitumens or polymer-bitumens with a reinforcement of suitable mats, fabrics etc. During the past ten years more and more polymer-bitu-

Referenz [13]

mens have been used. Nowadays in Switzerland, factory made and reinforced polymer-bitumen sheetings are mostly applied as waterproofing material on bridges.

B MATERIALS

Reinforced Membranes are flexible or semiflexible roof coverings or waterpoofing layers reinforced with felts, mats, fabrics or chopped fibres. Their primary function is the exclusion of water.

In Switzerland, reinforced bitumen membranes or reinforced polymer-bitumen membranes are normally obtained by applying factory made sheetings of these materials. Bitumen membranes and polymer-bitumen membranes are understood here to be a portion of the corresponding factory made and reinforced materials.

This paper describes test results from a bitumen membrane consisting of a blown bitumen with a jute fabric and a polymer-bitumen membranes consisting of a bitumen modified by an atactic polypropylene and reinforced with a polymer fleece.

Traditional tests were carried out on the binders themselves. For the two tests a) Penetration at 25 °C (Pen) and b) Softening Point by the Ring and Ball Method (R & B) the mean values are reported in table 1.

Table 1

Results from traditional tests on the bituminous coatings

	Pen 10^{-1} mm	R & B °C
Bitumen	19	115
Polymer-Bitumen	36	152

Referenz [13]

C FORCED VIBRATION TESTS

The principle of forced vibration tests consists of applying repeated and equal loads or forced displacements on a test specimen. Tests on bituminous materials have to be carried out under different, but precisely maintained temperatures.

Forced vibration tests were carried out on bitumen- and polymer-bitumen membranes over wide temperatur and frequency ranges typically from -10 to +40 °C and between 0.1 and 32 Hz.

The forced sinusoïdal displacements and the measured forces are drawn schematically in Figure 1.

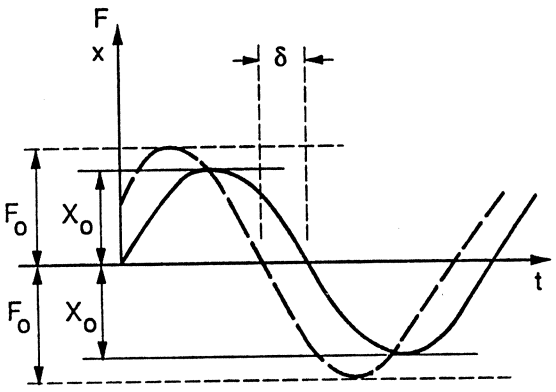


Figure 1

Forced vibration tests: sinusoïdal displacements (x), recorded force (F) and phase angle (δ)

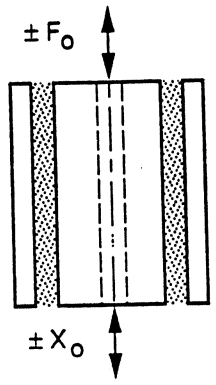


Figure 2

Schematical section of the set-up with test specimen (dotted areas)

The forced displacements and the associated measurements enable the characterization of the viscoelastic materials. Figure 2 schematically shows a vertical section ot the coaxial cylinders with a test specimen in place. This kind of shear test allows the determinations of the complex moduli and other important characteristics as follows:

Referenz [13]

$\vec{G}^* = \vec{G}' + i\,\vec{G}''$ Complex Modulus in Shear

$|\vec{G}^*|$ dynamic shear modulus

G' elastic or storage shear modulus

G'' viscous or loss shear modulus

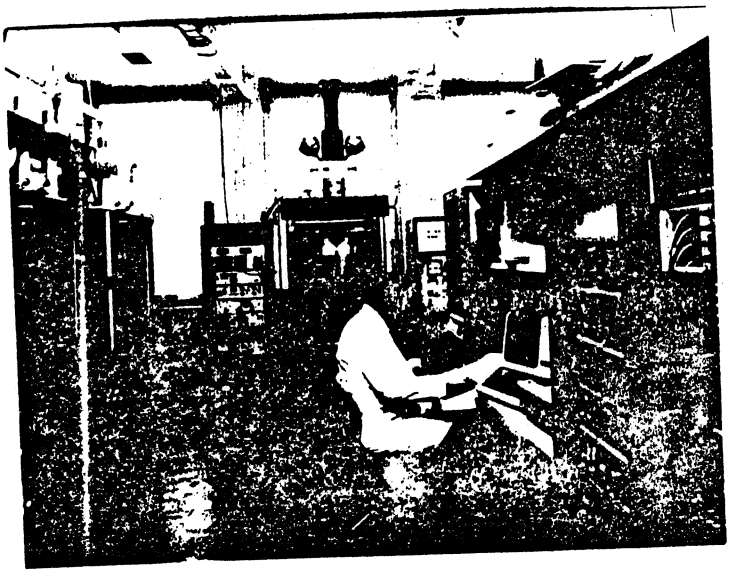
δ phase angle $\tan\delta = \frac{G''}{G'}$

η' dynamic visosity $= \frac{G''}{\omega}$

D MEASUREMENTS, MASTER CURVES

Figure 3 shows the electronic part (computer, terminal, plotter and laser printer) on the right and a part of the servohydraulic test machine with climatic chambers on the left.

Figure 3
Electronic (right) and mechanical (left) equipment at the EMPA for forced vibration tests on bituminous materials



The enormous amount of data needed explains the necessity to automate the test procedure, the collection of data, their evaluation and presentation (see Figures 4 and 5). This includes the calculation and presentation of the master curves (Figures 6 and 7). The WLF-equation [1], [2] enables a shifting of the curves for each modulus and the different temperatures in such a manner as to obtain a unique curve (master curve) for one reference

Referenz [13]

temperature (for ex. 20 °C). The master curves for the different test specimens allow a direct comparison of the two materials tested.

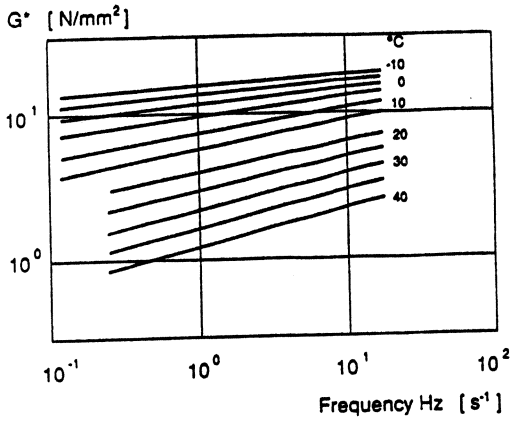


Figure 4

Dynamic shear moduli G* of the polymer-bitumen membrane

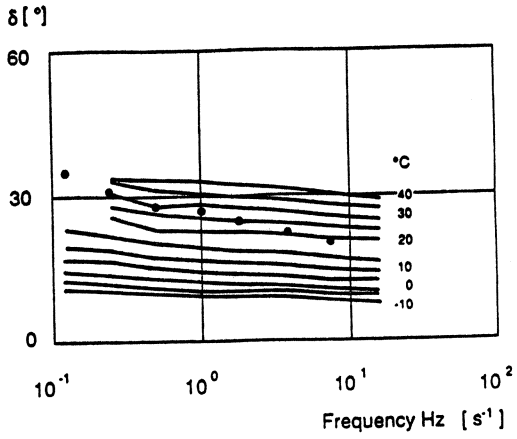


Figure 5

Phase angle δ of the polymer-bitumen membrane (-) and the bitumen membrane (•) at 20 °C

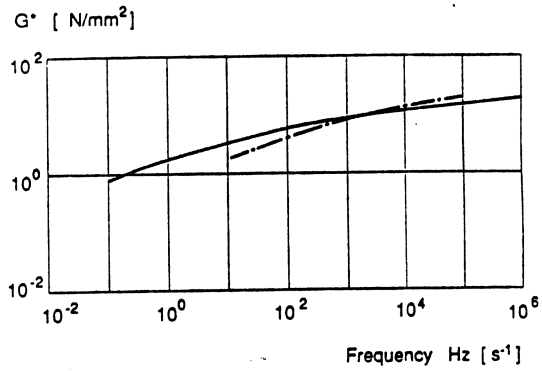


Figure 6

Master curves for the dynamic shear moduli G* of the polymer-bitumen membrane (-) and the bitumen membrane (-.-) (reference temperature 20 °C)

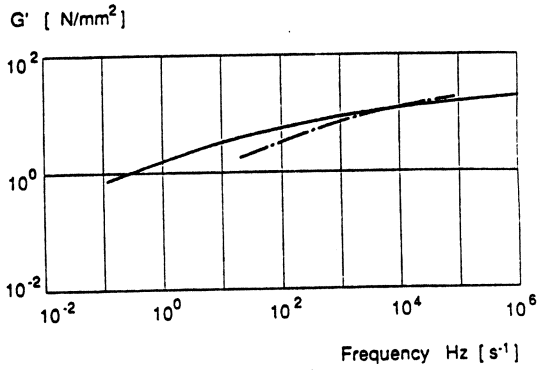


Figure 7

Master curves for the elastic shear moduli G' of the polymer-bitumen membrane (-) and the bitumen membrane (-.-) (reference temperature 20 °C)

Referenz [13]

E RESULTS

The bitumen- and polymer-bitumen membranes described were tested as described above.

A comparison of the two different master curves leads to the following observations:

G*, G'

- almost equal for both materials at high frequencies
- significantly higher for the polymer-bitumen membrane than for the bitumen membrane
- the curves are significantly more curved for the bitumen membrane than for the polymer-bitumen membrane (higher temperature susceptibility of the bitumen membrane than for the polymer-bitumen membrane)

This last conclusion is drawn from the phase angles δ too, shown as a function of frequency and for different temperatures (see Figure 5). Especially at temperatures above 15 °C and/or low frequencies the bitumen membrane ist significantly more temperature susceptible than the polymer-bitumen membrane.

F CONCLUSIONS

The forced vibration tests described above allow the determination of essential properties and thus enable a realistic description of the behaviour of bitumen- and polymer-bitumen membranes.

The characteristics determined allow a comparison of the properties of the two tested materials and lead to the following conclusions: Compared with the bitumen membranes, the polymer-bitumen membranes show

- significantly higher dynamic and elastic moduli at high temperatures and/or slow load applications (static load),
- significantly lower temperature susceptibility.

Referenz [13]

LITERATURE

[1] M.L. Williams, R.F. Landel and J.D. Ferry: The temperature dependence of relaxation mechanismus in amorphous polymers and other glass-forming liquids
J. Amer. Chem. Soc. 77, 3701 (1955)

[2] Ferry, J.D.: Viscoelastic properties of polymers
John Wiley and sons INC., New York 1970

Referenz [14]

FORCED VIBRATION TESTS ON BITUMEN AND POLYMER-BITUMEN MEMBRANES TO DETERMINE THEIR FUNDAMENTAL PROPERTIES WITH RESPECT TO FREQUENTLY USED POLYMERS

H.W. FRITZ and O. NEUBAUER
Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA)
Duebendorf, Switzerland

Fundamental tests are necessary to adequately describe the behavior of factory-made, reinforced bitumen and polymer-bitumen membranes. Their mechanical properties are essentially influenced by environmental conditions, loading time and loading intensity. Consequently, the fundamental properties have to be determined over wide temperature and frequency ranges.

The forced vibration tests allow the determination of the fundamental properties such as complex moduli and thus enable a description in physical terms of the behavior of bitumen and polymer-bitumen membranes under realistic environmental loading conditions.

The characteristics determined by forced vibration tests allow a comparison of the properties of the tested materials. Bitumen- and polymer-bitumen membranes were tested which were modified with atactic polypropylene (APP) and styrene-butadiene-styrene (SBS). Their behavior differed significantly at high temperatures and low frequencies.

A method for measuring SBS in polymer-bitumen quantitatively is included to suggest behavior of prefabricated polymer-bitumen membranes and polymer content. A diagram was developed in which the original SBS percentage of a SBS-bitumen mix can be found.

The results of the mechanical tests described combined with the determinations of polymer percentage is considered an important element in optimizing polymer-bitumen behavior for various applications.

KEYWORDS

Bitumen membrane, dynamic mechanical analysis, forced vibration test, high-pressure liquid-chromatography, polymer-bitumen membrane, styrene-butadiene-styrene content.

INTRODUCTION

Factory-made, reinforced bituminous membranes are frequently used for roofing or waterproofing. In Switzerland, these materials are delivered in the form of rolls and consist of bitumens or polymer-bitumens with a reinforcement of suitable mats, fabrics etc. During the past 10 years, the usage of polymer-bitumens has continuously increased. In Switzerland, factory-made and reinforced polymer-bitumen sheets are applied mostly as waterproofing material on bridges.

MATERIALS

Reinforced membranes are flexible or semiflexible roof coverings or waterproofing layers reinforced with felts, mats, fabrics or chopped fibers. Their primary function is to prevent water penetration in buildings, i.e., the exclusion of water. In Switzerland, reinforced bitumen membranes or reinforced polymer-bitumen membranes are normally obtained from factory-made sheetings of these materials.

This paper describes test results from a bitumen membrane consisting of a blown and oxidized bitumen with a jute fabric, and a polymer-bitumen membrane consisting of a bitumen modified by either atactic polypropylene or styrene-butadiene-styrene and reinforced with a polymer fleece.

Traditional tests were carried out on the binders themselves. For the penetration at 25°C (Pen) and the softening point by the ring and ball method (R & B) the mean values are reported in Table 1.

FORCED VIBRATION TESTS

The principle of forced vibration tests consists of applying either repeated equal loads or repeated forced displacements on a test specimen. Tests on bituminous materials have to be carried out under various, but precisely maintained temperatures.

Forced vibration tests were carried out on bitumen and polymer-bitumen membranes over wide temperature and frequency ranges typically from −10°C up to +40°C and between 0.1 and 32 Hz (see Figure 1).

The forced displacements and the resulting material behavior enable the characterization of the viscoelastic materials. Figure 2 schematically shows a vertical section of the coaxial cylinders with a test specimen in place. This kind of shear test allows the determination of the ratio of viscous modulus and elastic modulus as components of the complex modulus in shear as follows.

Complex modulus in shear $\vec{G}^* = \vec{G}' + i\,\vec{G}''$

- G^* dynamic shear modulus
- G' elastic modulus or storage shear modulus
- G'' viscous modulus or loss shear modulus
- $\emptyset$ phase angle

The imaginary part of the complex modulus in shear is also called the viscous modulus G''. This viscous modulus is then described by the relationship of its components G' and G^*.

Referenz [14]

$$G'' = G^* \cdot \sin(\emptyset)$$

G'' is a degree of the lost energy, which is transformed into heat, observed in the temperature rise of the specimen during the test at high frequencies.

The real part of the complex modulus in shear (which is the elastic modulus in shear as well) can be presented as

$$G' = G^* \cdot \cos(\emptyset)$$

G' is a degree of recoverable energy of displacement and therefore a measure of elasticity.

MEASUREMENTS

The goal of the development of such a test method was to be able to efficiently measure physical values such as the complex modulus in shear, viscous modulus, elastic modulus and phase angle of different kinds of bituminous materials over a wide range of temperature and frequency.

During the test, there is no need to use more than one specimen for a complete series of measurements. Mechanical strain is minimized and there is no flow (creeping) allowed of the specimen throughout the test because a computerized procedure always resets the equipment to the initial conditions. In this procedure, during the time when the temperature is changed to another level and the specimen adapts the new temperature, a computer always controls displacement of the centered metallic body (see Figure 2) and invokes the hydraulics to keep it in initial position. Initial position is the position before any loading ocurs.

The test series repeated 14 times with the same specimen resulting in less then 1 percent standard deviation, and less than 5 percent when the test was repeated with two to three different specimens. However, the same test procedure was used.

Automating the test procedure, greatly facilitates the collection of data, its evaluation, presentation, calculation and presentation of the master curves. The WLF-equation [1,2] enables a shifting of the curves for each modulus and for the different temperatures in such a manner as to obtain a unique curve for one reference temperature (e.g., 20°C). The master curves for the different test specimens allow a direct comparison of the materials tested.

RESULTS OF FORCED VIBRATION TESTS

A comparison of the different master curves of the bitumen and polymer-bitumen membranes described leads to the following interpretation.

The dynamic shear modulus G* and the elastic modulus G' are:

- Almost equal, for the three materials at high frequencies.
- Significantly higher for the polymer-bitumen membrane than for the bitumen membrane.
- Significantly more curved at the curves for the bitumen membrane than for the polymer-bitumen membrane (e.g., higher temperature susceptibility of the bitumen membrane than for the polymer-bitumen membrane).

This last conclusion is drawn from the phase angles $\emptyset$ too, shown as a function of frequency and for different temperatures (see Figure 3). Especially for temperatures above 15°C and/or low frequencies, the bitumen membrane is significantly more temperature dependent than the polymer-bitumen membrane.

The forced vibration tests described above allow the determination of essential properties and thus enable a realistic description of the behavior of bitumen and polymer-bitumen membranes.

MEASUREMENTS OF SBS IN SBS-MODIFIED BITUMENS BY MEANS OF HIGH-PRESSURE LIQUID-CHROMATOGRAPHY

This study was performed to determine a method for measuring SBS in SBS-modified bitumens.

Four different SBS and six bitumens of different penetration grade were combined to produce commonly used mixes in the range of 3 to 30 percent SBS. Some SBS contents of these mixes were measured by high-pressure, liquid-chromatography.

The integration of the peak areas of the chromatographs is computed as percentage of the total peak areas and then plotted against the original SBS percentage of the mix. A diagram was developed in which the original SBS percentage of a SBS-bitumen mix can be found: A vertical line is erected on the X-axis at the value of SBS percentage found by the regression equation and this point is connected horizontally to the Y-axis. The value of original SBS percentage is thus obtained.

MATERIALS

SBS Polymers

A polymer-bitumen manufacturer supplied four SBS polymers numbered from one to four for this work. SBS 1 was delivered with some oil content. However, in this paper, only the percentage of SBS is discussed.

Bitumen

Different penetration graded bitumens of crude oil of various origins were used to prepare the SBS-bitumen mixes (see Table 2).

EXECUTION OF MEASUREMENTS

Detecting the Chromatographs

The measurements were performed with the high-pressure, liquid-chromatography apparatus. Chromatographs of bitumen and SBS-bitumen mixes are detected exclusively with newly distilled tetrahydrofuran.

Mobile Phase		**Tetrahydrofuran**	
Flow rate		1 ml/min.	
UV detector			
Low-pressure mercury source		254 nm	
Flame ionization detector			
heating range		6	
flame	H2	140	
	air	0	
cleaning flame		H2	600
		02	300
injection volume		20 µl	

Referenz [14]

PREPARING THE SOLUTIONS OF SBS AND STRAIGHT-RUN BITUMEN

In this paper the term molecular mass is used exclusively for the formerly used expression molecular weight.

Defined quantities are taken from the above-mentioned SBS-polymers and bitumens in a 25ml calibrated, graduated cylinder and dissolved in tetrahydrofuran without mixing it previously. The total mass of SBS and bitumen is 0.5g. Only solutions prepared on the same day are measured.

RESULTS

Molecular Mass Determination of Polystyrene Calibration Standard

A mix of polystyrene calibration standards was prepared which contained all polystyrene calibration standards with their differing molecular mass in the same quantity in a single sample.

To check the retention time of the ultraviolet detector and the flame ionization detector, dichloromethane was used as solvent. The chromatographs obtained with the ultraviolet detector and flame ionization detector show that the retention times of each polystyrene calibration standard are similar.

Molecular mass of SBS is assumed to be between 2,750,000 g/mol. and 35,000 g/mol. (83 = molecular mass of dichloromethane). The molecular mass of the solvent dichloromethane used is easily detected by the ultraviolet detector, but is not visible by the flame ionization detector. Therefore, only the data of the flame ionization detector are used for the interpretation of the chromatographs. This makes it easier for the laboratory assistant to control the baseline for peak calculations.

PERCENT SBS IN BITUMEN

The percentage of SBS measured in the bituminous mixes conforms to the range expected in industrial products for road construction and waterproofing materials. Figure 4 summarizes all the results of the measurements of SBS in bitumen (plotted on the X-axis) vs. the added SBS-percent (Y-axis).

The computer produced a curve representing the cubic regression equation [y = b0 + b1X + b2X*X + b3X*X*X] which fit slightly better than the quadratic one. Two other dotted lines are drawn representing confidence limits at the 95th percentile.

From this diagram, the original SBS percentage of a SBS-bitumen mix is found when a vertical line is erected on the X-axis at the value of SBS percentage found by the regression equation; this point is connected horizontally to the Y-axis. The value of original SBS percentage can then be recorded. Table 3 shows the chromatography determinations of SBS in straight-run bitumen.

REPRODUCIBILITY OF THE MEASUREMENT OF THE SBS PERCENTAGE

Based on the results of the measurements of SBS in bitumen as shown in Figure 4, the confidence limits at the 95th percentile represent an acceptable accuracy at the present time. The measurements already performed show thE SBS percentage of a bituminous mix can in all probability be determined to an accuracy of 1 percent.

CONCLUSIONS

The characteristics determined by the forced vibration test allow a comparison of the properties of the tested materials and lead to the following conclusions.

Compared with the bitumen membranes, the polymer-bitumen membranes show:

- Significantly higher dynamic and elastic moduli at high temperatures and/or low frequencies, i.e., slow-load applications (static load).
- Significantly lower temperature susceptibility.

High-pressure, liquid-chromatography may be used to determine the SBS percentage in modified bitumen. It is easy to run and gives reasonably accurate results very rapidly. This makes it suitable for supervising a continuous production of SBS-modified bitumen.

A method of analyzing the percentage of atactic polypropylene (APP) is still in evaluation.

Investigation of the polymer percentage in combination with the determination of the mechanical properties is considered an important element in optimizing polymer-bitumen behavior for various applications.

REFERENCES

[1] M.L. williams, R.F. Landel and D.J. Ferry, The temperature dependence of the relaxation mechanism in amorphous polymers and other glass-forming liquids, J. Amer. Chem. Soc., 77, 3701, 1955.

[2] D.J. Ferry, Viscoelastic properties of polymers, John Wiley and Sons Inc., New York, 1970.

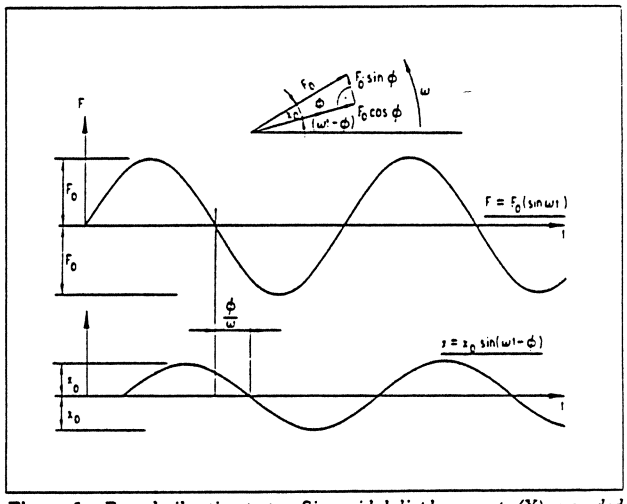


Figure 1 Forced vibration tests—Sinusoidal displacements (X), recorded force (F) and phase angle (Ø).

Referenz [14]

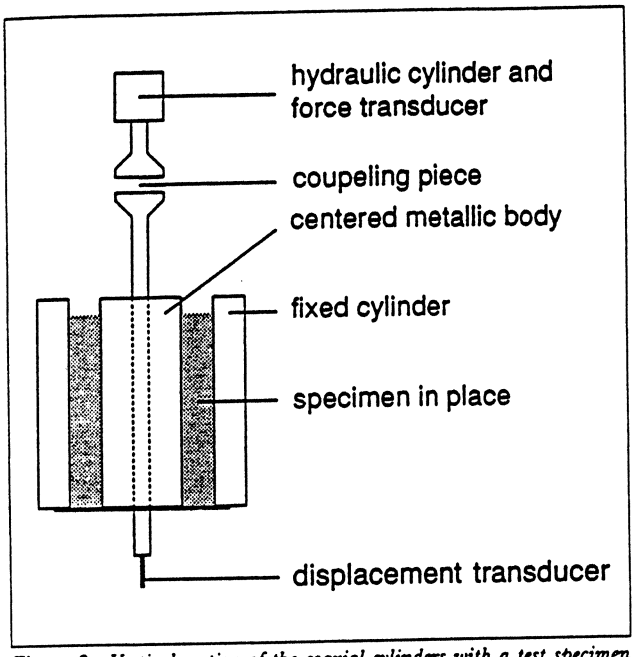


Figure 2 Vertical section of the coaxial cylinders with a test specimen in place.

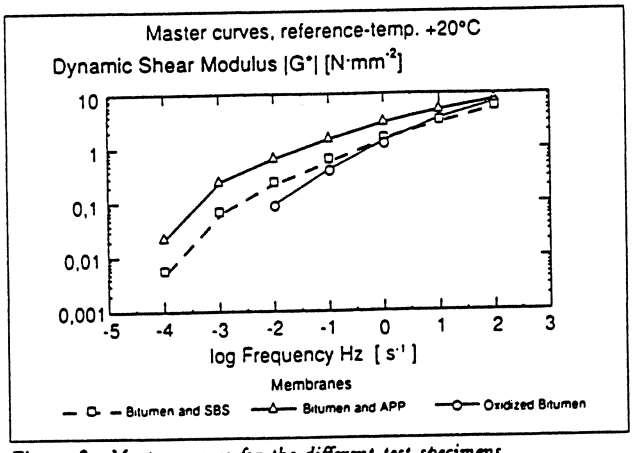


Figure 3 Master curves for the different test specimens.

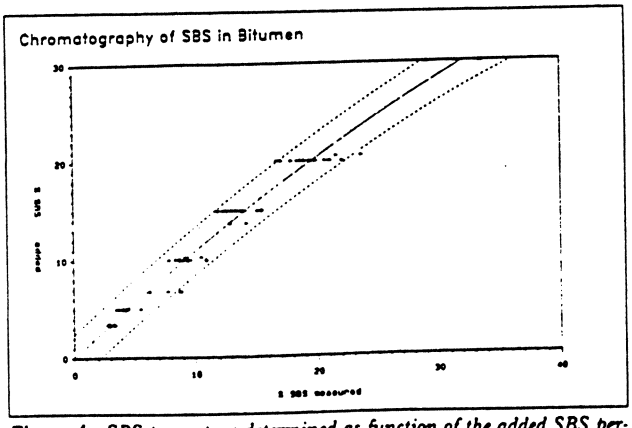


Figure 4 SBS percentage determined as function of the added SBS percentage with the regression line and the confidence limits at the 95th percentile.

	Ring and Ball	Penetration
Oxidized Bitumen	116°C	19 10^{-1}mm
Polymer-Bitumen modified by APP	152°C	36 10^{-1}mm
Polymer-Bitumen modified by SBS	120°C	39 10^{-1}mm

Table 1 Results of traditional tests on the bituminous coatings.

Bitumen	Penetration range at 25°C	Origin of crude oil
1	B 180/220	Venezuela
2	B 180/220	Near East
3	B120/150	Unknown
4	B 80/100	Arabia heavy
5	B 80/100	Safaniyah (Near East)
6	B 60/70	Unknown

Table 2 Bitumens used to prepare the SBS-bitumen mixes.

Chromatography determinations of SBS in straightrun bitumen					
Number of Determinations	%-SBS added	Mean %-SBS obtained	Minimal Value	Maximal Value	Standard-deviation
6	3.4	3.03	2.74	3.37	0.3
9	5.0	4.18	3.49	5.49	0.6
4	6.8	7.90	6.24	8.89	1.2
14	10.0	9.28	7.82	10.96	0.9
2	10.3	9.82	9.16	10.47	0.9
2	13.7	13.56	12.89	14.22	0.9
12	15.0	13.64	11.87	15.51	1.2
14	20.0	19.16	16.66	22.00	1.5
2	20.5	22.56	21.54	23.58	1.4
8	30.0	31.57	28.81	33.73	1.9

Table 3 Number of determinations, added SBS percentage, SBS obtained, mean value, minimal value, maximal value, standard deviation.

Referenz [9]

R. GUBLER /EMPA/CH/

ESSAI DE FATIGUE POUR L'EVALUATION D'UN REVETEMENT ROUTIER

Appréciation d'un revêtement routier au moyen d'essais de fatigue

---

Revêtement examiné

Afin de réunir des informations pour une proposition de réparation d'un revêtement routier, deux couches portantes du revêtement existant ont été soumises à des essais de fatigue. Pour ces essais, on avait procédé au prélèvement de 8 carottes.

Principe d'essai

La fatigue dynamique présente un déroulement typique qui permet de suivre de manière précise la destruction du squelette minéral. Le cours de cette destruction se reconnaît aisément à l'écart de la courbe de déformation par rapport à la courbe sinusale attendue. Les différentes études effectuées à l'EMPA ont montré que pour la fatigue dynamique, le déphasage maximal entre le déplacement et la force marque le début d'une telle destruction mesurable. C'est à dire que ce déphasage maximal coïncide avec le premier écart nettement reconnaissable de la courbe de déformation par rapport à la forme sinusale.

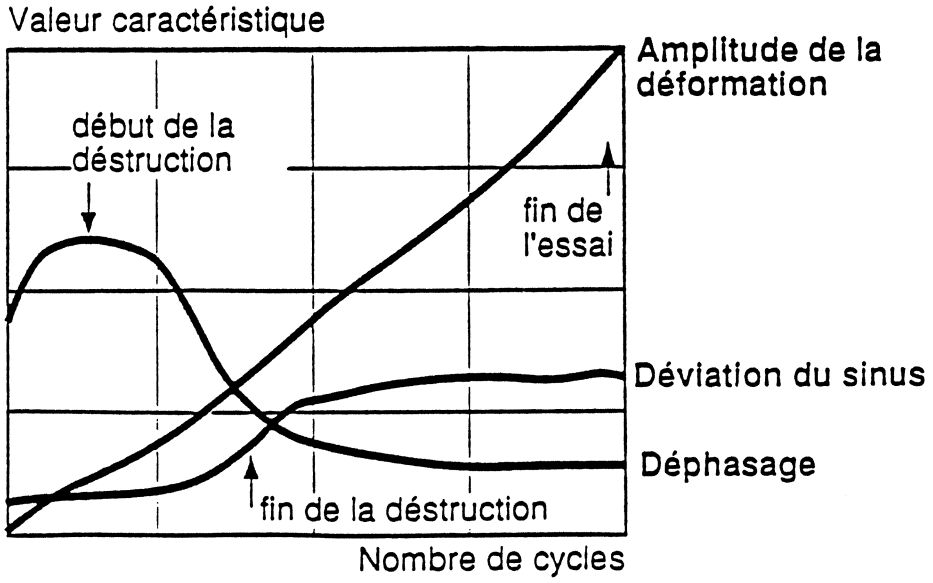


Figure 1: Effet du test de fatigue sur la le squelette mineral

Referenz [9]

Avec la poursuite de la sollicitation, la destruction du squelette minéral devient toujours plus nette. L'écart de la courbe de déformation par rapport à la forme sinusale augmente progressivement puis s'accroît ensuite rapidement. La courbe de déformation prend une forme approximativement rectangulaire. C'est là le moment où le squelette minéral est détruit à l'intérieur d'une enveloppe de rupture. La partie la plus intérieure de l'éprouvette collée au noyau métallique central n'a plus aucune liaison portante avec la partie extérieure. Seul l'engrènement des grains grossiers empêche que la partie centrale de l'éprouvette ne soit arrachée.

Par la suite, cet engrènement continue à s'affaiblir jusqu'au dépassement du domaine de mesure qui provoque l'arrêt automatique de l'essai. Le moment de l'arrêt de l'essai ne fournit que peu d'informations comme le montrent les résultats. La présence fortuite d'engrènements de gros grains peut en effet prolonger notablement la durée de vie d'une éprouvette.

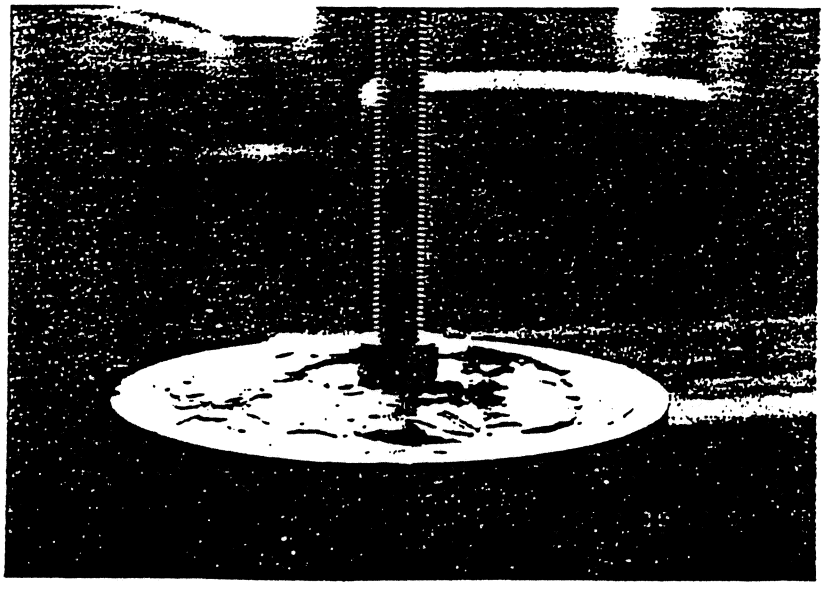


Figure 2: Etat final de l'éprouvette

Referenz [9]

Programme d'essai

L'examen du comportement à la fatigue est effectué à haute température. L'essai commence à 33° C, puis la température est augmentée par palier de 1°. A chaque palier de température, l'éprouvette est sollicitée dynamiquement durant 600 s à une fréquence de 0.25 s^{-1}, ce qui correspond à 150 cycles par température d'essai.

Résultats d'une série d'essais

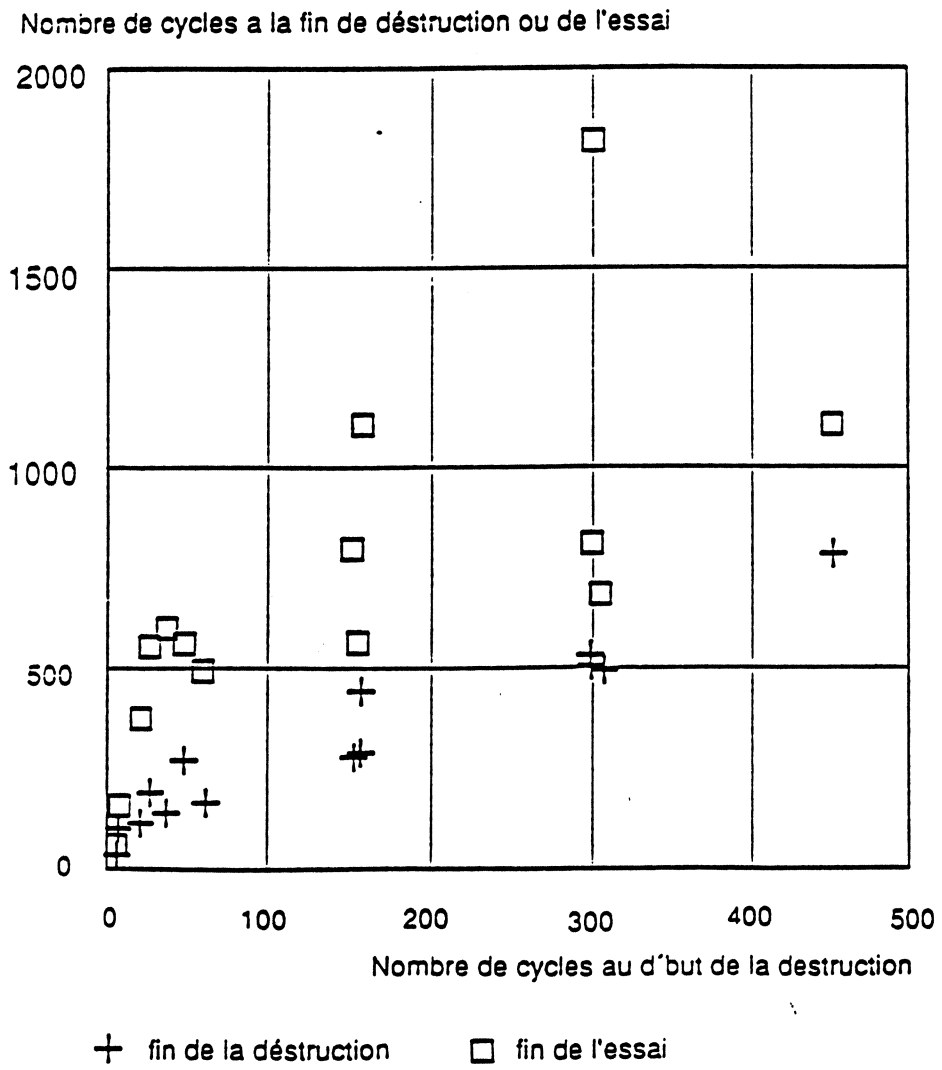
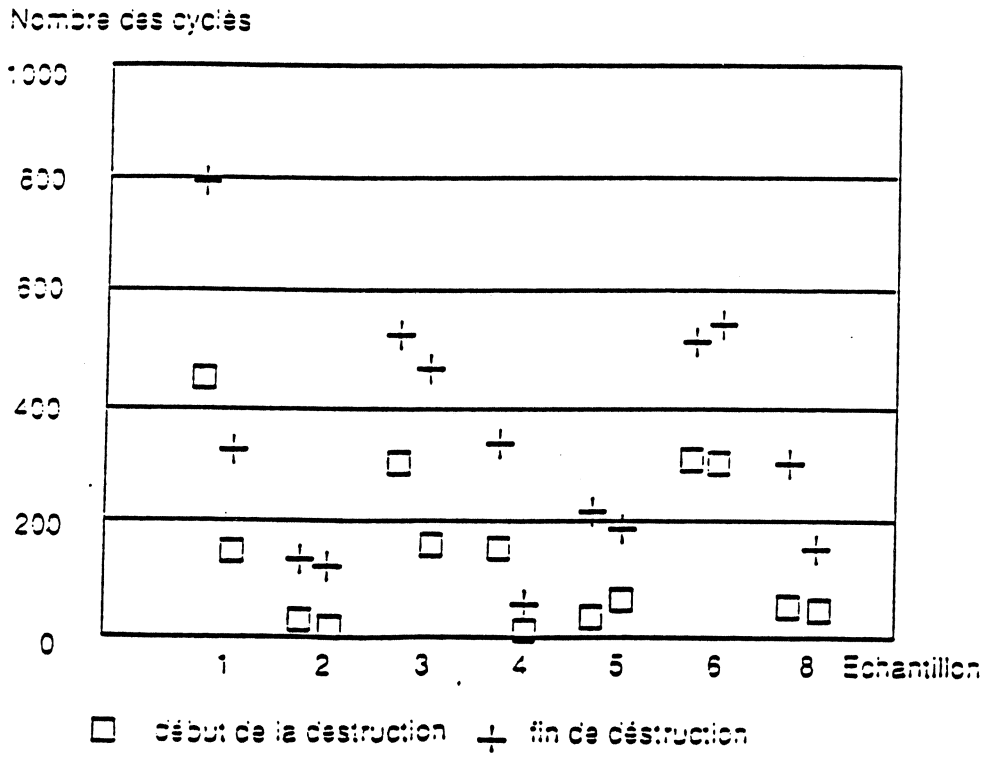


Figure 3: Correlation entre les etapes de l'essai

Referenz [9]

La figure 3 donne une représentation graphique des résultats d'essai. On voit clairement la bonne corrélation qui existe entre le début de la destruction du squelette minéral et l'apparition d'une surface de rupture continue. La corrélation de ces résultats avec le moment de l'interruption de l'essai est moins bonne.



Couche supérieure à gauche, inférieure à droit

Figure 4: Resultats de l'essai de fatique

Il est intéressant et surprenant de constater qu'il existe une relation nette entre les deux couches du revêtement examinées. Cette relation doit avoir une origine commune qui pourrait être une modification des caractéristiques du matériau in situ provoquée par les caractéristiques locales du sous-sol ou de la couche portante inférieure sous-jacente ou encore par le climat.

Referenz [16]

1.44 Summary

DESCRIPTION OF POLYMER-MODIFIED BITUMINOUS MATERIALS FOR ROAD CONSTRUCTION AND SEALS BY MEANS OF RHEOLOGICAL MODELS.
CROSS-CONNECTIONS BETWEEN THE MODEL AND PRACTICALLY INTERESTING PROPERTIES

R. GUBLER, Dr. sc. nat., ETH, and
M. PARTL, Dr. sc. techn., Ing. dipl. ETH/SIA

EMPA Dübendorf, Switzerland

Modified and non-modified bituminous binders as well as the corresponding bituminous materials can often be adequately described as viscoeleastic solids or liquids. They may then be characterized by rheological models that contain only springs and dashpots. Usually models with few components are employed, e.g. Burger's model with four components: two springs and two dashpots. These models have the advantage of being clear and comprehensible but are able to describe the behaviour of bituminous binders in general only poorly. As shown in the article, this model forecasts a rapid transition, dependent on the frequency, from viscous to elastic behaviour, which is in disagreement with the empirical observations.

Burger's model may be generalized mathematically. The newly created model is composed of a series of simple partial models that are describable as viscoelastic solids. The individual partial models consist of one dashpot and one spring that are connected in parallel (Voigt-model) or a liquid. The series of such partial models which adequately describe the binder are worked out for the case of a regular paring grade bitumen.

However, in this generalization the clarity and comprehensibility are lost. Such models with many components are represented by means of a novel procedure and thus the behaviour of bituminous binders is reduced to a comprehensible number of patterns. This is attained by plotting the numerical constants for dashpots and springs for the partial models of the multi-component model in an elasticity-viscosity diagram. In this diagram, there appear groups of points. The mathematical investigation shows that the multiplicity of possible points is reduced, since only some of the partial models represented by points shows any considerable contribution to the rheological behaviour. Hence such diagrams may be reduced to a few types. Such types can form the basis of a classification for bituminous building materials according to rheological criteria.

In the third part it is shown how the measured values obtained for various bituminous binders and materials may be well described with the methods developed. The measured values are plotted in the elasticity-viscosity diagrams and it will be shown how the various different diagrams enable statements to be made about the behaviour in practice. A preliminary classification of bituminous materials will be worked out, starting from these examples.

1.44 Résumé

DESCRIPTION AU MOYEN DE MODELES RHEOLOGIQUES DES MATERIAUX BITUMINEUX MODIFIES PAR DES POLYMERES DESTINES A LA CONSTRUCTION ROUTIERE ET AUX ETANCHEITES. RELATIONS ENTRE MODELE ET CARACTERISTIQUES PRATIQUES IMPORTANTES

R. GUBLER, Dr sc. nat. EPFZ
M. PARTL, Dr sc. techn. EPFZ

EMPA Dübendorf, Suisse

Les liants bitumineux modifiés et non modifiés ainsi que les matériaux bitumineux correspondants peuvent souvent être décrits avec une précision suffisante comme des corps solides ou des liquides visco-élastiques. Il est alors possible de les caractériser au moyen de modèles rhéologiques comprenant uniquement des ressorts et des amortisseurs. D'habitude on utilise pour cela des modèles ne comportant qu'un petit nombre de membres, tels que, par exemple, le modèle de Burger avec quatre membres, deux ressorts et deux amortisseurs. Ces modèles présentent l'avantage d'être simples et compréhensibles, mais ils ne fournissent en général qu'une mauvaise description du comportement des liants bitumineux. Comme le montre le présent article, ce type de modèles prédit une transition rapide du comportement visqueux au comportement élastique en fonction de la fréquence, ce qui est en contradiction avec les constatations empiriques.

Le modèle de Burger peut être généralisé mathématiquement. Le modèle ainsi obtenu se compose d'une série de modèles partiels simples pouvant être décrits comme des corps solides visco-élastiques (modèle de Voigt) ou des liquides. Le modèle partiel simple se compose d'un amortisseur et d'un ressort montés en parallèle. Des séries de tels modèles partiels décrivant de manière correcte le liant ont été déterminées pour le cas d'un bitume de construction routière courant.

Cette généralisation a cependant lieu aux dépens de la clarté et de l'évidence. Ces modèles comportant de nombreux membres peuvent toutefois être rendus clairs par à un nouveau mode de présentation grâce auquel le comportement des liants bitumineux se réduit à un nombre de types restreint. Ceci s'effectue en reportant les constantes numériques des amortisseurs et des ressorts des modèles partiels sur un diagramme élasticité-viscosité. On obtient alors sur le diagramme des groupes de points. L'analyse mathématique montre que le nombre des groupes de points possibles est restreinte car seule une partie des modèles partiels représentés par des points contribue pour une part importante au comportement rhéologique. Ainsi le nombre de diagrammes peut être ramené à quelques types. Ces types peuvent constituer la base d'un classement des matériaux de construction bitumineux selon des critères rhéologiques.

La troisième partie montre comment la méthode développée permet une bonne description des valeurs de mesure obtenues sur différents liants et matériaux bitumineux. Les valeurs de mesure sont reportées sur les diagrammes élasticité-viscosité et il est montré comment les différents diagrammes permettent d'émettre un pronostic sur le comportement en pratique. Un classement provisoire des matériaux bitumineux est effectué à partir de ces exemples.

Referenz [16]

1.44 Paper

DESCRIPTION OF POLYMER-MODIFIED BITUMINOUS MATERIALS FOR ROAD CONSTRUCTION AND SEALS BY MEANS OF RHEOLOGICAL MODELS.
CROSS-CONNECTIONS BETWEEN THE MODEL AND PRACTICALLY INTERESTING PROPERTIES

R. GUBLER, Dr. sc. nat ETH and
M. PARTL, Dr. sc. techn., ing. dipl ETH/SIA

EMPA Dübendorf, Switzerland

1 Description of problem

Bituminous binders show a complex rheological behaviour and hence cannot be described by simple models. In practice, they are employed as components in construction materials, whose mechanical properties are determined by the bituminous binders used, the other components and the interactions between all components. Consequently, the behaviour of bituminous construction materials may also only be described correctly by advanced models. In quite a number of cases the bituminous binder dominates at least the kind of behaviour shown, while the other components essentially cause a mere stiffening.

The complexity of the behaviour of bituminous construction materials makes it difficult to understand and predict the behaviour of an object from the results of measurements. Popular, but oversimplified models, such as Burger's, with two springs and two dashpots, are easily understandable, but do not describe the behaviour of bitumen satisfactorily. Complex models, such as the Dobson approach [1], succeed in describing the behaviour of a paving grade bitumen satisfactorily, but their physical meaning is difficult to understand. When such models are used on polymer modified bitumen and bituminous construction materials there is a risk of incorrect assessment of the effect of changes in the model because of lack of transparency.

Thus any approximation that simplifies the understanding of the behaviour of bituminous construction materials is of importance and above all the relation between the results of measurements and possible predictions of the behaviour in practice. Such approximation can help to improve the interpretation of measurement results with respect of the expected behaviour and therefore reduce the risk of errors. The present work presents a simple procedure for the graphic representation of complex rheological models and for the prediction of properties relevant in practice from the characteristics of the graph.

2 Field of application

In this article, the behaviour of viscoelastic solids and liquids is investigated. Plastic behaviour, fatigue phenomena and flow anomalies such as thixotropy are not dealt with.

In particular, the dependence of the complex modulus and the phase shift on the frequency of cyclic loading is examined. The transfer of measurement data for various temperatures to a master curve that describes solely this frequency dependence is a well-known evaluation procedure [1,2] and hence will not be treated here further.

3 Description of the rheological behaviour by models

3.1 Example of a simple model

Figure 1 shows the model according to Burger already mentioned. This model is an attempt to describe the real behaviour of a substance by a simple model consisting of two springs and two dashpots.

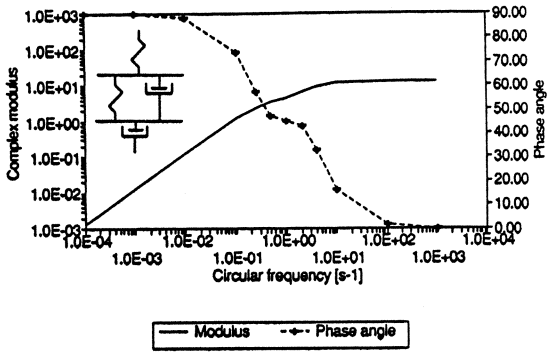


Figure 1: Mechanical model according to Burger and its behaviour

Each spring is assigned a stiffness as elastic constant (definition in [2], page 17) and each dashpot a coefficent of viscosity. Once these coefficients are assigned, the behaviour of the model may be calculated for any desired loading. In particular, the behaviour may be calculated under cyclic loading as a function of frequency and compared with measurement. Figure 1 shows the result of such a calculation, compared with the typical result of a measurement. The difference is evident: the transition from viscous behaviour (diagonals) into elastic behaviour (horizontal lines) is rapid in the model, whereas measurement shows viscoeleastic behaviour in a broader frequency range.

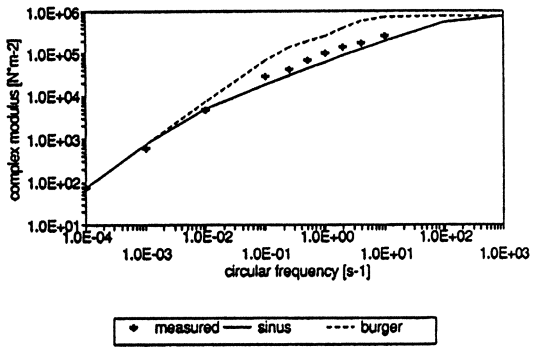


Figure 2: Comparison of measured data for a paving grade bitumen with Burger's model and the author's sinusoidal approach

3.2 Generalized models

In order to describe the behaviour of bitumen, models are necessary which can describe a viscoelastic behaviour in a broad frequency range. Such a model is the generalized Voigt model, which is built up of a series of viscoelastic solids according to Voigt. It may be shown that this model can also describe any viscoelastic liquid: when a stiffness in one of the components must simply be assigned the value zero. This model does in fact describe every possible viscoelastic behaviour; it thus has the required generality.

The model consists of a large series of components, each of which possesses a stiffness and a coefficent of viscosity and is thus described by a large series of number pairs. It is hence characterized by poor transparency. In addition, the mathematical evaluation of measured data involves great effort.

Referenz [16]

1.44

3.3 The elasticity-viscosity diagram

Each Component is described by an stiffness and a coefficent of viscosity. The components property may be represented graphically in a diagram by entering a corresponding point. In principle, this diagram may be filled with points as desired until the best approximation is obtained between model and measured data. Used in this way, the diagram is of no great help: it merely represents the result of the analytical treatement according the generalized Voigt model.

4 The elasticity-viscosity straight line

With this concept, the behaviour of bitumen and in some cases that of bituminous construction materials may be described by a simple and transparent approximation.

4.1 Simplification of the diagram

Equivalent components

It is obvious that two springs with a stiffness 2k connected in series behave identically to one spring of stiffness k. It can be shown that the same equivalence applies between two Voigt bodies and a corresponding Voigt body with the two coefficients one half as great.

Using this equivalence, a series of points with the same ratio between stiffness and the coefficent of viscosity can always be combined to one point representing a multiplicity of equal components.

Weighted points on the elasticity-viscosity line

Allowing nonintegral multiplicities, this points can be situated on a straight line connecting a string and a dashpot as extreme components.

4.2 Simulation material properties by calculating a point density

In a rheological model, one usually does not calculate with a nonintegral multiplicity of components. Hence the weighted points have again to be approximated by a series of components, e.g. points on the elasticity-viscosity line.

4.3 Search for suitable components by simulation

A linear, a sinusoidal, an exponential and a hyperbolic distribution of points were investigated. Figures 3 to 7 show the results. The designations originate from the fact that the points from the corresponding curve are projected onto the elasticity-viscosity line, a simple procedure for generating such groups of points mathematically.

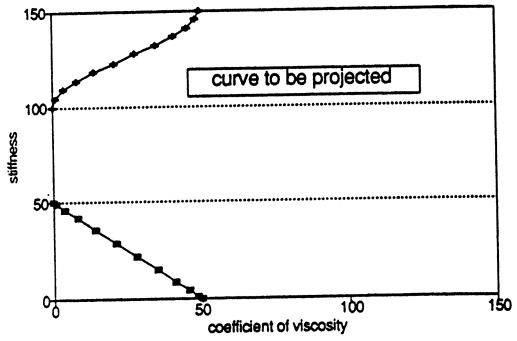


Figure 3: Construction of the elasticity-viscosity-diagram using a sinusoidal approach

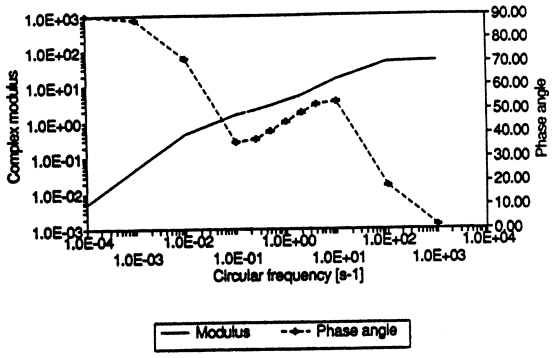


Figure 4: Modulus and phase angle calculated bei the linear approach

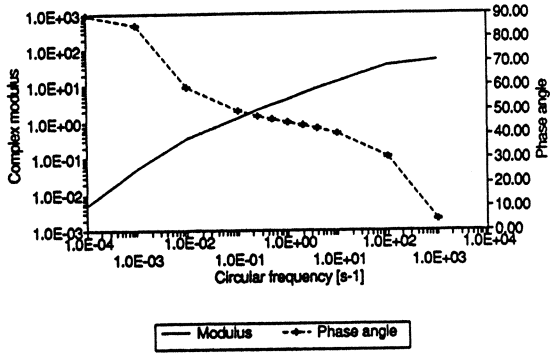


Figure 5: Modulus and phase angle calculated bei the sinusoidal approach

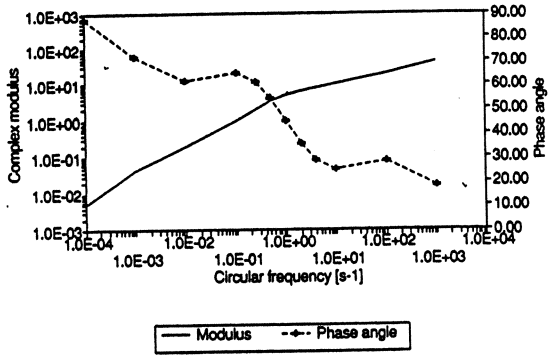


Figure 6: Modulus and phase angle calculated bei the exponential approach

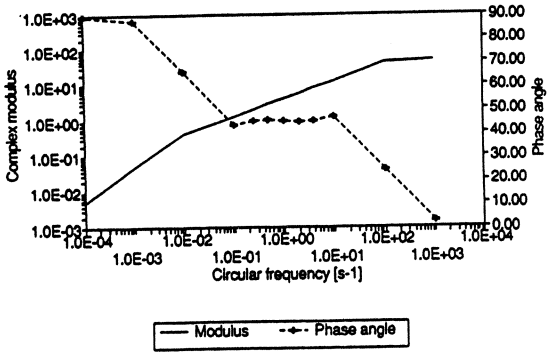


Figure 7: Modulus and phase angle calculated bei the hyperbolic approach

Referenz [16]

1.44

In all the examples shown, the distribution was choosen symmetrical to simplify calculation and comprises a spring and a dashpot. As soon as this is no longer the case, the behaviour changes clearly. Viscoelastic solids, such as heavily modified binders, may thus be modelled.

5 Mathematical treatement

5.1 Software

The calculations were carried out by means of the spreadsheet calculation software Quattro Pro, version 3.0.

5.2 Procedure

The material behaviour was approximated with a 12 component model consisting of Voigt bodies in series, corresponding to 12 points on the elasticity-viscosity line. These bodies were calculated analytically and from these results, the behaviour of the overall model calculated. This yields:

- the deformation of each individual Voigt body over one cycle, and
- the deformation of the overall model exactly corresponding to the deformation measured in a real test.

The evaluation of this simulated measurement data was accomplished by determining the fractions of sine and cosine in the sinusoidal deformation curve. From the coefficients, the complex modulus and phase shift may be determined (in practice, taking into account geometric factors).

This procedure of calculating the deformation curve with the aid of a model has the advantage that the individual contributions of the components accrue in the form of a table and may also be examined graphically.

5.3 Determination of the amplitude and phase shift for the individual Voigt bodies

The calculation was carried out as usual, using t for time and w for frequency. Let the force be:

K(t) = K0*sin(w*t)

Let the displacement be described by the amplitude W0 and the phase shift p, i.e.

W(t) = W0*sin(w*t-p)

then the force required to produce this deformation in the model with stiffnes constant F and coefficient of viscosity R becomes:
K(t) = F*W0*sin(w*t-p) + R*W0*w*cos(w*t-p)
Setting w*t=0 with K(t)=0 yields
tan(p)=R*w/F
and for w*t=Pi/2
W0 = K0/(F*cos(p) + R*w*sin(p))

5.4 Modelling the overall system

For each of the 12 components, the deformation curve was calculated in this way over exactly one cycle from the predetermined coefficients for springs and dashpots and from the varying oscillation frequency w for 64 measurement points. Since the deformations of the Voigt bodies connected in series are additive, the deformation of the model over one cycle may be easily calculated by summation.

5.5 Calculating the distribution of 12 components to simulate the material properties

The algorithms used for calculating the coefficients of the individual components are presented in table 1. In addition, a possibility was created of moving the viscosity-elasticity line in order to be able to investigate solids as well as viscoelastic liquids. To achieve this, the straight line is either raised on the right hand side, so that each component receives a non-zero elastic constant, or displaced above to the right, so that pure spring components no longer arise.

type of approach	mathematical formula
	y=50*n/11, n=0 to 5
linear	x=50*n/11, n=0 to 5
sinusoidal	x=50-25*(1+cos(n*Pi/11))
exponential	x=50-50*(1-(exp(n-5.5)-0.000743*(5.5-n)))
hyperbolic	x=50-50*(1.5-5.5/(11-n))

Table 1: Used algorithms to simulate different behaviour

6. Comparison with results from practice

Various construction materials (data from EMPA-Reports) may be compared with the rheological behaviour calculated using different distributions of points. Further details of calculations are given in table 2. In this connection, it is not an exact fit of the curves and the calculation of coefficients that is interesting, but rather an optimal allocation of types to measured master curves of the complex modulus.

Material type	curve type	temperature	G* [N*mm-2]
Paving Grade Bitumen	more sinusoidal than burger	10	0.75
Poured Asphalt	flatter than sinusoidal	5	9000
Modified Bitumen	sinusoidal solid	10	100
Joint Seal	linear solid	-5	50

Table 2: Approach, approximativ temperature of the master curve und asymptotic values used in calculations

6.1 Paving grade bitumens

Paving grade bitumens, data from [3], are situated between the sinusoidal and the Burger's model (figure 2). It should be possible to achieve a good approximation for different bitumens by superposing the two models. The used proportion would classify bitumens with respect of rheological behaviour.

Referenz [16]

1.44

6.2 Poured asphalt

Poured asphalt follows closely a purely sinusoidal behaviour (figure 8). It is somewhat flatter than the shown approximation. This could be overcome by using more components.

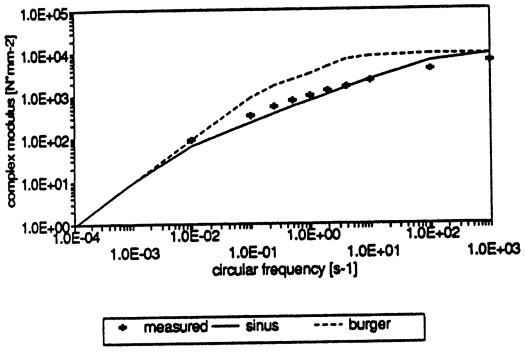


Figure 8: Comparison of measured data for a poured asphalt with Burger's model and the sinusoidal approach

6.3 Polymer-modified bitumen

This special polymer-modifed bitumen is very well described by the representation, shown below, of a viscoelastic solid with sinusoidal distribution of the points.

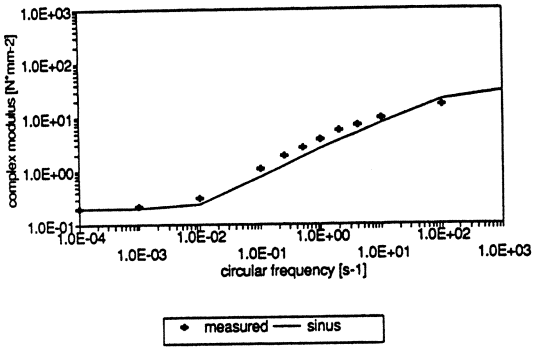


Figure 9: Comparison of measured data for a polymer-modified bitumen with Burger's model and the sinusoidal approach

6.4 Sealing compounds

In order to be able to model this material, one must move the elasticity-viscosity line to the right. It then no longer has even a single purely elastic component. Theoretically, such a component must be expected. In this case we see the drawback of an approximation by 12 Voigt components: the extremely low weight of such a component cannot be well approximated. The procedure is nevertheless sufficient to classify the material based on the available measurement data.

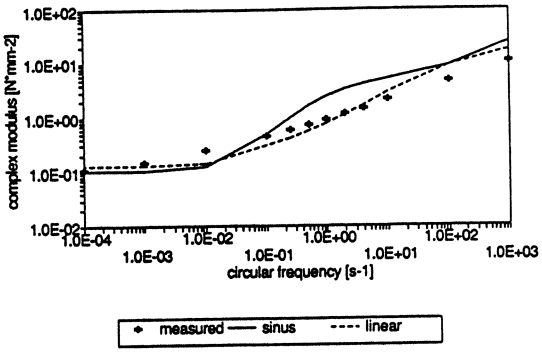


Figure 10: Comparison of measured data for a joint seal with Burger's model and the sinusoidal approach

7. Conclusions

It has been succeeded in allocating bituminous construction materials of various kinds and modifications to calculation procedures used to determine the corresponding distribution of points on an elasticity-viscosity line. The properties of the bituminous construction materials may thus be reduced to readily calculated distributions of points. According to preliminary investigations, only three types of distribution appear to be important: sinusoidal (the most important), Burger's (corresponding to this model) and linear. Borderline cases may be well described in this scheme by superposition.

8. Literature

[1] Dobson, The Dynamic Mechanical Properties of Bitumen, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol 38, page 123, 1969

[2] J.D.Ferry, Viscoelastic Properties of Polymers, John Wiley & Sons, 1970

[3] R. Gubler, H.W.Fritz, FA 8/77, Anforderungen an Strassenbaubitumen, 1977

Referenz [6]

31 EVALUATION DE MÉLANGES D'ASPHALTE COULÉ AVEC DIVERSES SORTES DE LIANTS AU MOYEN D'ESSAIS PAR OSCILLATION AXIALE ET D'ESSAI À LA FATIGUE

(Evaluation of cast asphalt mixes with various binders by axial vibration and fatigue testing)

R. GUBLER and H.W. FRITZ
EMPA, Dübendorf, Switzerland

Sommaire

L'action de liants sur les caractéristiques de revêtements fut étudiée en déterminant le module complexe de cisaillement et le comportement à la fatigue par des essais d'oscillation. L'établissement de courbes maîtresses pour une température de 20 °C, et leur évaluation, permettent d'obtenir les valeurs spécifiques qui sont instructives pour l'appréciation de mélanges d'asphalte coulé. Les divers asphaltes coulés qui furent testés sont évalués.

Mots-clés: module complexe, essai d'oscillation axiale, essai à la fatigue, asphalte coulé, modification des liants, courbes maîtresses.

Introduction

La mise en place de divers mélanges d'asphalte coulé fut envisagée dans le cadre de travaux de remplacement d'un vieux revêtement en asphalte coulé. Un bitume-polymère ou un asphalte coulé avec addition de Trinidad furent prévus, en plus d'un asphalte coulé au bitume routier normal B 40/50.

Les effets des liants sur les propriétés du revêtement furent étudiés au moyen d'essais par oscillation axiale et d'essais à la fatigue.

Buts

Les essais prévus doivent permettre d'obtenir des informations sur les propriétés du revêtement dans la zone allant des températures d'hiver à celles d'été. La fonction liant le module complexe avec la température et la fréquence, les relations entre ces données et des essais à la fatigue sous des températures estivales constituent la base de ces informations.

Referenz [6]

Table 1. Matériaux testés

Asphalte coulé avec du bitume routier	2 mélanges
Asphalte coulé avec addition de Trinidad	2 mélanges
Asphalte coulé avec du bitume-polymère	5 mélanges

Etablissement du programme d'essai adéquat

Une gamme aussi large que possible de paramètres d'essai fut donc choisie pour l'exécution des essais dynamiques. La force fut prise comme valeur consignée pour des raisons de technique d'essai. La grandeur de l'amplitude de la force qui restait à choisir fut fixée à 12.5 $N*mm^{-1}$, soit proportionnelle à la hauteur de l'éprouvette cylindrique de 150 mm de diamètre. La charge sur des éprouvettes de hauteurs différentes reste ainsi identique. Le programme d'essai ci-dessous indique les fréquences et les températures utilisées:

Température	-5 à +35°C, par étapes de 5°C
Fréquence	0.125 s^{-1} à 32 s^{-1}, avec redoublement à chaque étape

Ensuite, l'essai de fatigue fut exécuté, afin de déterminer le module à des températures de 45°C. L'amplitude de la force de 20 $N*mm^{-1}$ comme grandeur de référence détermina la hauteur de l'éprouvette. L'essai conduit à une fréquence de 0.25 s^{-1}.

La figure 1 montre l'installation utilisée pour les essais sur les asphaltes coulés.

Le mélange d'asphalte coulé est versé dans le cylindre extérieur. Un trou central est ensuite percé dans l'éprouvette refroidie et le noyau central y est introduit et collé. Cette façon de procéder est nécessaire car le coulage de l'asphalte dans le cylindre extérieur avec un noyau central déjà en place ne donnerait pas d'adhérence suffisante de l'asphalte sur ce noyau, du fait de la trop petite surface extérieure de celui-ci. Les grains glissent pendant l'essai le long du noyau et il en résulte la formation d'une masse bitumineuse sur sa surface qui agit comme une surface de glissement. Un tel phénomène n'a jamais été observé sur le cylindre extérieur. Le coulage est donc une méthode qui se justifie en comparaison avec la fabrication d'une carotte et de son collage.

Referenz [6]

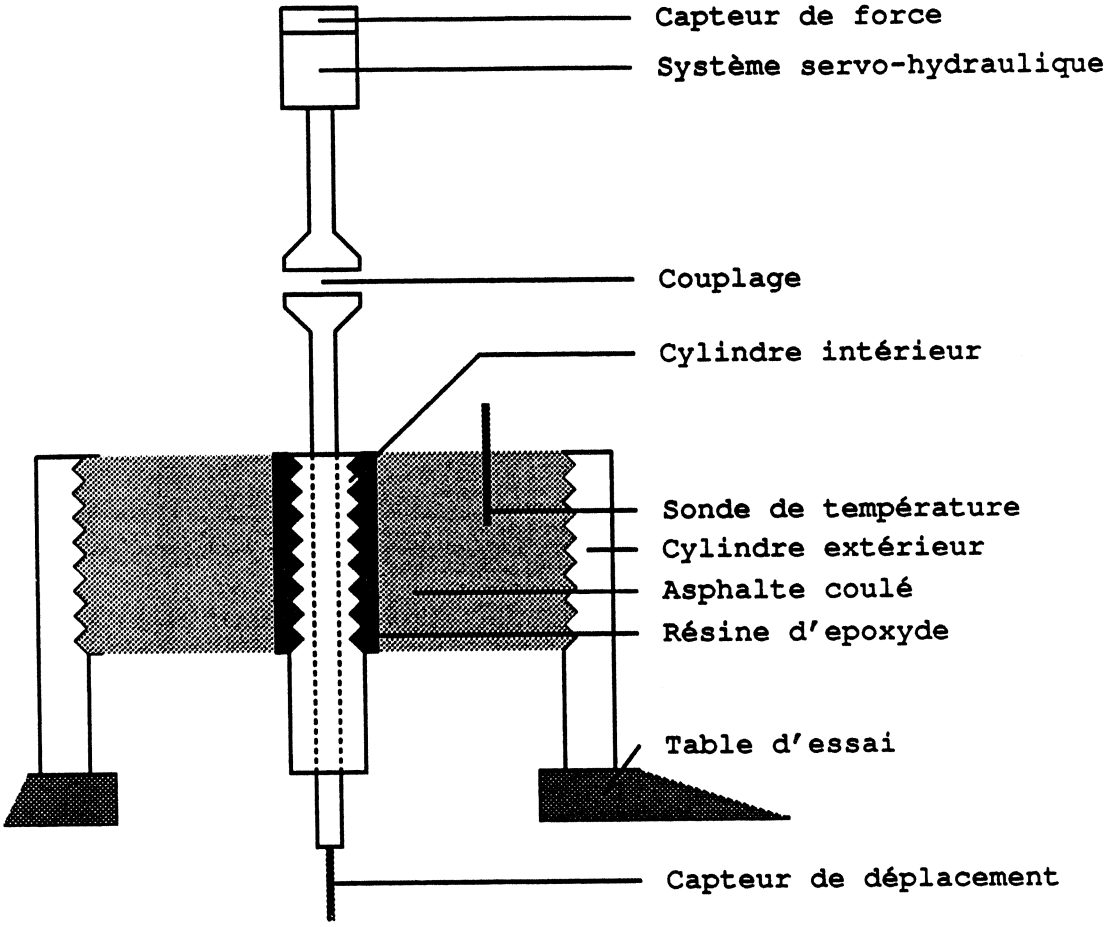


Figure 1. Principe du dispositiv d'essai

Résultat de l'essai

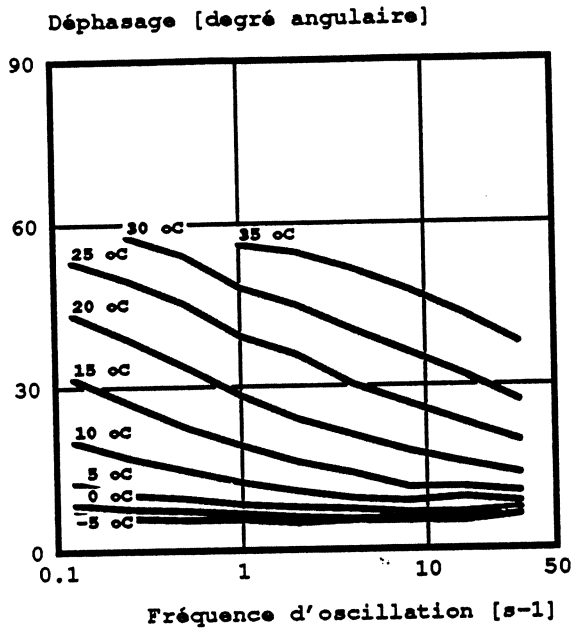
Les figures 2 et 3 montrent les modules complexes ainsi déterminés pour un asphalte coulé avec du bitume routier normal et un asphalte coulé avec du bitume-polymère.

Méthodes d'évaluation

Etablissement des courbes maîtresses de modules.

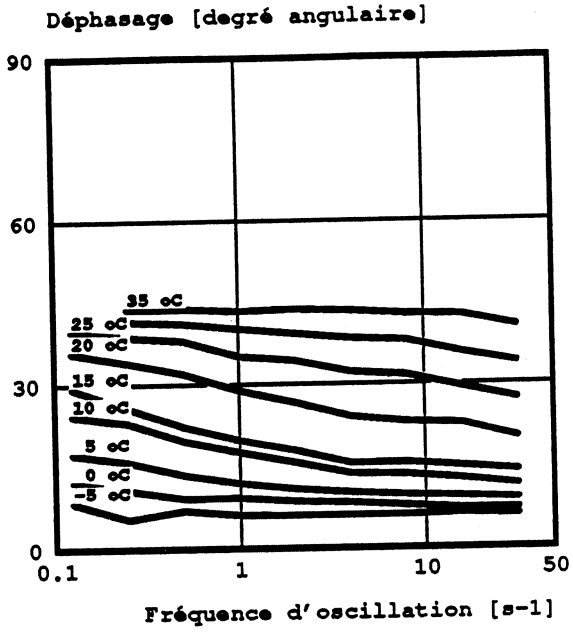
Six mesures sont prises pour chaque essai déterminé par les paramètres de température et de fréquence. Leur évaluation donne des valeurs dépendantes de la température et de la fréquence pour le module complexe et pour ses composantes élastiques et visqueuses. Dans le but d'obtenir, à partir de ces nombreuses données, les informations recherchées, des courbes maîtresses pour la température 20 °C furent établies en utilisant les principes connus de la recherche rhéologique sur les matières plastiques [1]. La figure 4 montre la superposition des courbes secondaires sur la courbe maîtresse.

Referenz [6]



Températures d'essai indiquées

Figure 2. Courbes de déphasage d'un asphalte coulé avec bitume routier B40/50



Températures d'essai indiquées

Figure 3. Courbes de déphasage d'un asphalte coulé avec bitume-polymère

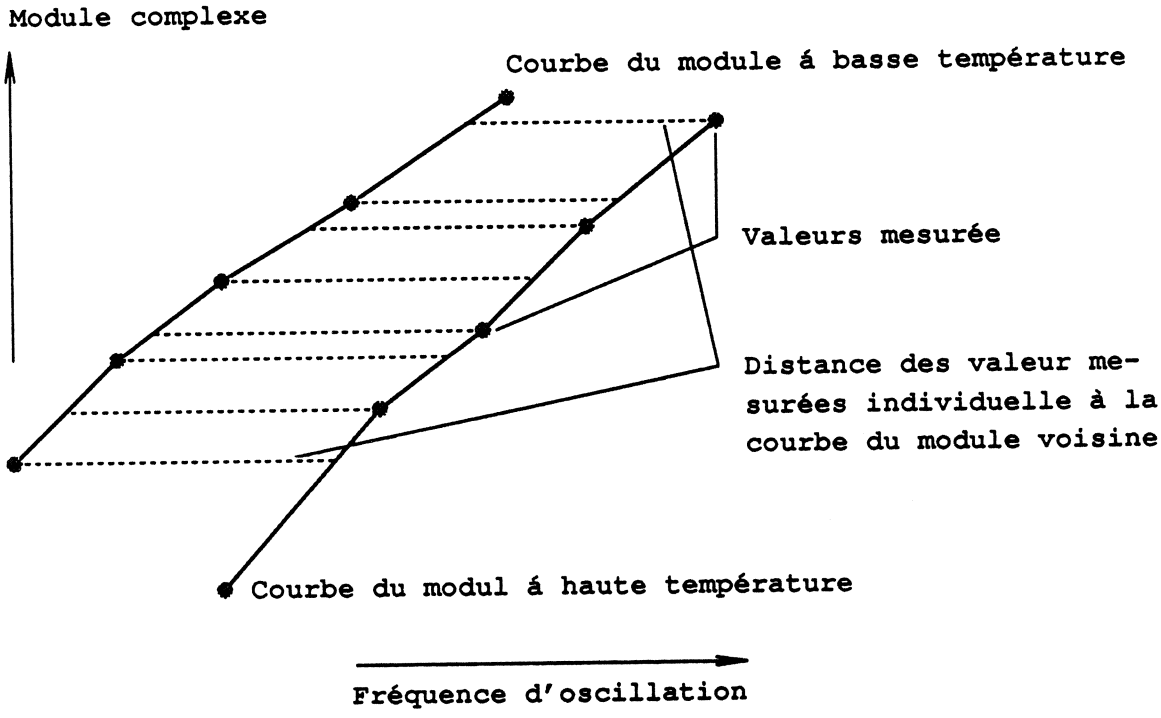


Figure 4. Détermination des distance entre les courbes comme moyenne des distances individuelles

Referenz [6]

Les travaux des recherches de l'EMPA cités [3 à 6] et ceux qui ont succédé, ont montré que les courbes des modules complexes à différentes températures peuvent être superposées par une translation horizontale. Les vecteurs de translation nécessaires dépendent de la température. Comme la représentation des modules ainsi que celle des fréquences est à l'échelle logarithmique, les vecteurs de translation correspondent en fait à des facteurs de multiplication avec lesquels les fréquences devront être multipliées pour égaliser l'influence de la température. On peut démontrer de façon théorique que les facteurs de multiplication des fréquences correspondent à un facteur de rapport des composant visqueux d'un modèle rhéologique dont tous les membres présentent la même dépendance de la température.

Evaluation mathématique des courbes maîtresses

Un modèle a été proposé dans la référence [2] pour les courbes maîtresses des bitumes, qui décrit une transition graduelle et continue du comportement élastique au comportement visqueux lors d'une réduction de la fréquence. Ce comportement se rencontre généralement avec les matériaux bitumineux et il vaut aussi pour les asphaltes coulés. Les courbes maîtresses seront dans ce modèle définies par 3 valeur spécifiques:

- la valeur limite d'un comportement purement élastique
  Elle représente la valeur du module complexe pour une fréquence infiniment haute.

  le paramètre b de réponse au cisaillement
  Cette valeur indique la vitesse à laquelle le comportement élastique passe au comportement visqueux. Les valeurs élevées correspondent à une transition rapide, les valeurs basses à une transition lente.

- la valeur limite de la viscosité dynamique avec un comportement uniquement visqueux
  Elle correspond à la mesure relevée pour une fréquence d'oscillation égale à $0s^{-1}$.

Evaluation de l'essai à la fatigue

L'essai de fatigue à hautes températures fut conduit jusqu'au dépassement d'une amplitude d'oscillation de 2 mm. L'asphalte coulé, avec sa haute teneur en liants, ne se rompt pas sous l'effet d'une telle déformation. La mesure du module et l'étude des courbes de déformation indiquent toutefois une destruction importante de la structure du matériau minéral. Le temps déterminé pour ce processus fut converti en un nombre de cycles.

Referenz [6]

Valeurs spécifiques choisies comme base d'appréciation

Les valeurs spécifiques obtenues furent étudiées en ce qui concerne leur qualification comme base d'une appréciation du mélange examiné. Les valeurs spécifiques choisies permettent de formuler les remarques suivantes:

Valeur limite pour un comportement uniquement élastique.
La valeur représente une extrapolation des mesures aux plus basses températures et elle définit bien les propriétés mécaniques à de très basses températures.

Déphasage minimal
Cette valeur obtenue en prenant la moyenne des déphasages à des températures de -5°C avec des fréquences supérieures à 1 s^{-1}, indique le comportement aux basses températures mais elle ne représente plus une extrapolation car elle est basée sur des valeurs mesurées. Une valeur basse correspond à un comportement presque uniquement élastique pour lequel on ne peut plus s'attendre à une relaxation.

Paramètre de réponse au cisaillement b

La valeur indique la vitesse du passage d'un comportement élastique à une comportement visqueux. Une valeur élevée, et donc un passage rapide, signifie qu'entre un comportement purement visqueux et un comportement purement élastique on ne trouve qu'une petite variation de la fréquence. Il s'ensuit, selon le principe de superposition température-fréquence, que pour une fréquence donnée la charge provoque ce changement de comportement déjà avec une modification minime de température. Par conséquent, une valeur élevée indique un petit intervalle de fusion, et inversement une petite valeur résulte en un grand intervalle.

Rapport des modules de courbes maîtresses

Le rapport des modules pour de grandes périodes au module déterminé pour la période 0.01 s montre la tendance existante d'une diminution du module lors des charges de longue durée, et cela permet de faire une constatation au sujet de la durabilité.

Déphasage d'un jour des courbes maîtresses

Le déphasage pour une période de un jour indique la partie restante du comportement élastique pour des charges de longue durée et, selon le principe de superposition température-fréquence, aussi à de hautes températures. Il constitue donc une mesure de la capacité du revêtement à redevenir élastique après un changement.

Referenz [6]

Nombre de cycles jusqu'à la rupture

L'examen visuel de l'éprouvette après l'essai à la fatigue montre que les plus gros gravillons furent repoussés hors de la masse initiale de l'éprouvette. La valeur indique donc la résistance au déplacement des gravillons ainsi que la résistance à un rattachement dans la structure du matériau minéral. Cette valeur précise donc aussi un aspect de la durabilité.

Résultats des recherches

Les valeurs spécifiques importantes de mélanges d'asphalte coulé, avec des modifications de diverses sortes, sont exposées dans la table 2.

Table 2. Récapitulatif des valeurs spécifiques

Adjuvant/Modification	sans	avec Trinidad	avec polymère
Valeur limite élastique $N*mm^{-2}$	9'640	11'200	12'300
Paramètre de réponse au cisaillement	0.29	0.25	0.20
Déphasage à -5°C en degrés circulaires	5.1	5.3	6.8
Rapports des modules au module pour 0.01 s avec une période de 100 s	63	76	62
avec une période de 1000 s	445	490	327
avec une période de 1 jour	34'000	36'000	14'000
Déphasage de la courbe maîtresse de 1 jour en degrés circulaires	86.5	85.3	74
Nombre de cycles de fatigue	30	28	37

Appréciation des mélanges d'asphalte coulé

Asphalte coulé avec du bitume routier B 40/50

Le mélange d'asphalte coulé, avec du bitume B 40/50, fut utilisé comme matériau de référence. Le comportement des asphaltes coulés de cette sorte est bien connu à partir de l'expérience pratique déjà acquise. Les divergences positives et négatives résultant de l'effet d'adjuvants peuvent, grâce à une comparaision avec ce mélange, être

Referenz [6]

rapportées à l'expérience pratique acquise. Cela permet une meilleure évaluation. Deux mélanges avec du bitume B 40/50 furent testés. Les valeurs spécifiques obtenues concordaient de façon satisfaisante. Cela démontre qu'ils pouvaient être pratiquement utilisés comme matériau de référence.

Asphalte coulé avec addition de Trinidad

Les valeurs spécifiques de ces deux mélanges sont identiques et correspondent à celles des mélanges avec du bitume routier B 40/50.

Asphalte coulé avec du bitume-polymère

Ce groupe de cinq mélanges présente, malgré quelques différence entre les mélanges, un comportement bien reconnaissable et différent de celui des mélanges avec du bitume routier normal. Le déphasage dans la zone des basses températures est nettement plus grand que celui des mélanges avec du bitume routier normal, et laisse ainsi prévoir un comportement favorable aux basses températures. Le rapport du module pour une période de 0.01 s avec le module de la même courbe maîtresse pour une période de 100 s est comparable à celui du mélange de référence. Par contre, le rapport avec de grandes périodes diminue nettement. Cela concorde entièrement avec la plus petite valeur du paramètre de réponse au cisaillement b et laisse prévoir de meilleures propriétés mécaniques aux températures estivales. Le déphasage avec une période de un jour est plus petit, et la part d'élasticité restante plus grande qu'avec le mélange de référence. Un meilleur retour à la forme initiale après chargement à haute température est à prévoir.

Le meilleur comportement lors d'essais de fatigue concorde avec ces observations. Des valeurs individuelles plus élevée du nombre de cycles sont atteintes. La valeur moyenne est nettement plus haute que celle des mélanges avec du bitume routier ou que celle des mélanges avec adjonction de Trinidad. Les différences entre les éprouvettes des différents mélanges sont, en fait, importantes. L'un des mélanges avait le même nombre de cycles que l'asphalte coulé non modifié.

Conclusions

La comparaison des modules à des températures et fréquences données, déterminés sur divers mélanges d'asphalte coulé, permet d'établir des prévisions relatives aux exigences pratiques. Une analyse détaillée de toutes les valeurs d'essais obtenues permet de définir des différences

Referenz [6]

marquantes entre les différents mélanges d'asphalte coulé. Ces résultats et les conclusions qu'on peut en tirer ont été largement commentés dans l'évaluation présentée précédemment.

Les modules à 35°C et 0.125 s^{-1}. pris isolément, n'indiquent aucune tendance. Dans la zone des températures moyennes, les modules d'asphaltes coulés avec bitume-polymère sont plus petits que ceux de l'asphalte coulé non modifié. Le grand déphasage à -5°C indique, par comparaison, un meilleur comportement aux basses températures des asphaltes coulés avec bitume-polymère.