Einfluss des Mischprozesses auf die Qualität bituminöser Mischungen

---

Eidgenössisches Departement des Innern, Bern
Forschungsauftrag Nr.26/84

Forschungsstelle : IVT ETH-Zürich, in Zusammenarbeit mit
- EMPA
- Autobahnamt Kt.Bern
- Schweizerischen Mischgutindustrie SMI

Sachbearbeiter : M. Kronig (dipl. Ing ETH)

Oktober 1988

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG 3
RESUME 4

1. EINLEITUNG
   1.1 Situation 5
   1.2 Zielsetzung 6
   1.4 Mischvarianten 7
   1.5 Vorgehen 9

2. VERSUCHSSTRECKE
   2.1 Situation 10
   2.2 Aufbau des Strassenoberbaus 12

3. VORVERSUCH 13

4. MISCHGUTHERSTELLUNG UND EINBAU
   4.1 Mischgutherstellung 15
   4.2 Einbau 16
   4.3 Temperatur und Verdichtungsmessungen 17

5. LABORUNTRERSUCHUNGEN
   5.1 Probeentnahme 20
   5.2 Spaltzugversuch
      5.2.1 Versuchsdurchführung 21
      5.2.2 Resultate 24
   5.3 Marshall-Versuch 28
   5.4 Versuche Prüfkörper-Biege-Schub-Axial (PK-BSA)
      5.4.1 Allgemeines und Versuchsparameter 31
      5.4.2 Prüfeinrichtung 32
      5.4.3 Auswertung 32
         5.4.3.1 Berechnung von Moduln aus Messwerten von Kraft und Weg 32

5.4.3.2 Modul in Abhängigkeit von Temperatur und Frequenz 33
5.4.3.3 Masterkurven 33
5.4.4 Darstellung der Resultate 35
5.4.5 Resultate 36
5.5 Mischgutuntersuchungen
5.5.1 Untersuchungsablauf 38
5.5.2 Dichte und Bindemittelgehalt 38
5.5.3 Raumgewicht Marshall-Prüfkörper 39
5.5.4 Raumgewicht Bohrkerne 41
5.5.5 Hohlraumgehalt und Hohlraumfüllungsgrad 42
5.5.6 Verdichtungsgrad 43
5.5.7 Verdichtungsparameter C 44
5.5.8 Kornverteilung 45
5.6 Analyse der Laborresultate
5.6.1 Spaltzug- und Marshallresultate
5.6.1.1 Einflussfaktoren 46
5.6.1.2 Vergleich Marshall - Spaltzug 47
5.6.1.3 Statistische Analyse 48
5.6.2 Prüfverfahren PK-BSA
5.6.2.1 Zielsetzung 49
5.6.2.2 Aufbereitung der Daten 49
5.6.2.3 Ergebnisse der Prüfung auf das Vorliegen multipler Regression 51
5.6.2.4 Diskussion der Resultate 52
5.6.3 Mischgutuntersuchung
5.6.3.1 Verdichtung 53
5.6.3.2 Bindemittel 56

6. OBERFLÄCHENEIGENSCHAFTEN
6.1 Ebenheitsmessung 57
6.2 Griffigkeitsmessung 59

7. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGE 62

LITERATURVERZEICHNIS 64

BEILAGENVERZEICHNIS 66

ZUSAMMENFASSUNG

Die Qualität bituminöser Mischungen ist massgebend von der Güte des Mischprozesses abhängig. Um die hohen Anforderungen an das Mischgut zu erfüllen, ist eine perfekte Umhüllung der Mineralstoffe durch das Bindemittel und eine möglichst homogene Verteilung von Bindemittel und Mineralstoffteile das angestrebte Ziel der modernen Mischanlagen. Dabei spielen, neben anderen Faktoren, die Mischtemperatur und - aufgrund von theoretischen Überlegungen - die Mischfolge, d.h. die Reihenfolge der Komponentenzugabe, eine wichtige Rolle.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, den Einfluss des Mischprozesses, speziell der Mischfolge und der Mischtemperatur, auf die Qualität einer bituminösen Mischung festzustellen. Zu diesem Zweck wurden auf der kantonalen Hochleistungsstrasse Bern-Biel (Umfahrung Lyss) in einem grosstechnischen Versuch rund 800 Tonnen Mischgut AB 16 eingebaut, dessen Herstellung in drei verschiedenen Varianten der Mischfolge und in drei unterschiedlichen Temperaturen in einer entsprechend steuerbaren Aufbereitungsanlage erfolgte. Das Mischgut und die eingebaute Schicht dieser neun Mischvarianten wurden umfangreichen Untersuchungen unterzogen. Neben der Bestimmung der volumetrischen Materialkennwerte von Mischgut und Bohrkernen, kamen zahlreiche Spaltzug- und Marshallversuche hinzu. An Bohrkernen wurde zur Erhaltung von mechanischen Materialkennwerten das Prüfverfahren "Biege-Schub-Axial" durchgeführt. Das Verdichtungsverhalten wurde beim Einbau mit einer Isotopensonde sowie mit der, aus dem Raumgewicht unterschiedlich verdichteter Marshall-Prüfkörper abgeleiteten, Verdichtungswilligkeit erfasst. Als Oberflächeneigenschaften wurden die Längsebenheit mit dem Winkelmesser und die Griffigkeit mit dem Skiddometer erfasst.

Unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse und der materialtechnischen Randbedingungen, konnte anhand der Versuchsergebnisse festgestellt werde, dass die untersuchten Variationen in der Reihenfolge der Komponentenzugabe keinen Einfluss auf die geprüften Qualitätsmerkmale haben. Der Einfluss der Mischtemperatur hingegen ist klar erkennbar und äussert sich in einem steiferen Verhalten jener Mischungen, welche mit höheren Temperaturen gemischt worden sind. Es zeigte sich, dass diese Veränderung im deformationsmechanischen Verhalten, welche im Zusammenhang mit der Veränderung der Bindemitteleigenschaften während des Mischvorganges steht, je nach Wahl der Mischfolge noch verstärkt werden kann. In Bezug auf das Erreichen einer ausreichenden Verdichtung ergaben sich auch bei den tiefen Temperaturen keine Probleme, während das Erreichen optimaler Oberflächeneigenschaften bei den tiefen Misch- und Einbautemperaturen durch die Reduktion in der Verarbeitbarkeit erschwert wurde.

RESUME

La qualité des enrobés bitumeux dépend principalement de celle du procédé de malaxage. Pour fournir un mélange de haute qualité, un malaxeur moderne doit assurer un enrobage parfait des agrégats minéraux ainsi qu'une répartition homogène du liant et des grains. La température et - théoriquement - la séquence de malaxage, c'est-à-dire l'ordre dans lequel sont rajoutés les composants, y joue un rôle important.
Le but de ce programme de recherche est de déterminer l'influence du procédé de malaxage, spécialement celle de sa séquence et de sa température, sur la qualité d'un enrobé bitumeux. A cet effet, un essai en vraie grandeur a été réalisé sur la route cantonale à grand débit Berne-Bienne (évitement de Lyss). Environ 800 tonnes d'enrobé AB 16 fabriqué en trois séquences et à trois températures différentes y ont été posées. Le mélange ainsi que le revêtement de ces neufs variantes ont fait l'objet d'une analyse complète. Outre la détermination des valeurs volumétriques du mélange et des carottes, de nombreux essais de compression diamétrale et Marshall ont été réalisés. Afin de préserver les caractéristiques mécaniques des carottes, la méthode d'essai "cisaillement-flexion-axial" fut employée. Le comportement durant le compactage fut analysé avec une sonde à radioisotope et l´aptitude au compactage dérivée du poids spécifique apparent d´éprouvettes Marshall de différents degrés de compactage. Comme caractéristiques de surface furent relevées la planéité longitudinale (enregistreur des changements de pente) et la qualité antidérapante (skiddomètre).
En tenant compte des conditions locales et des caractéristiques des matériaux, les résultats de l'essai montrent que l'ordre dans lequel les composants sont ajoutés n'a aucune influence sur les indicateurs de qualité mesurés. L'influence de la température est qant à elle importante; elle se signale par un comportement plus rigide des mélanges optenus à plus haute température. Ce changement de comportement mécanique à la déformation, lié au changement des caractéristiques du liant durant le malaxage, peut encore être amplifié selon la séquence choisie. Le compactage, même à basses températures, ne pose aucun problème, tandis que la réduction de la maléabilité, dûe aux basses températures de malaxage et de pose, nuit aux caractéristiques de surfaces.

1. Einleitung

1.1 Situation

Um aus gegebenen Komponenten ein qualitativ hochwertiges bituminöses Mischgut herzustellen, werden in den modernen Mischanlagen insbesondere die beiden folgenden Ziele angestrebt :

- möglichst perfekte Umhüllung der Mineralstoffe durch das Bindemittel
- möglichst homogene Verteilung von Bindemittel und Mineralstoffteilen

Allgemein darf davon ausgegangen werden, dass bei der heutigen Mischguttechnik beide Ziele in zufriedenstellendem Masse erreicht werden. Es sind deshalb bisher wenig systematische Untersuchungen auf diesem Gebiet durchgeführt worden. Der Praktiker weiss allerdings, dass bei relativ mageren und und grobkörnigen Mischungen Probleme hinsichtlich der Umhüllung der gröberen Mineralstoffteilchen und der Homogenität der Mischung auftreten können. Des weiteren ist bekannt, dass die Mischfolge einen nicht geringen Einfluss auf Umhüllung und Homogenität hat. So wurde die früher übliche Mischfolge :

1. Zugabe aller Mineralstoffteilchen (inklusive Filler),
2. Bindemittelzugabe

weitgehend verlassen zugunsten der Mischfolge :

1. Zugabe von Splitt und Sand,
2. Zugabe von Bindemittel gleichzeitig mit Filler,

oder die vermutlich noch günstigere Mischfolge :

1. Zugabe von Splitt und Sand,
2. Bindemittelzugabe,
3. Fillerzugabe.

Aufgrund theoretischer Überlegungen kann davon ausgegangen werde, dass der Mischprozess in den folgenden Schritten stattfinden sollte :

1. Zugabe des Splittes (> 3 mm)

2. Zugabe des Bindemittels und somit einwandfreie Umhüllung der gröberen Teilchen. Da die Splittoberfläche in der Lage sein muss, die gesamte Bindemittelmenge zu halten, darf die Bindemittelviskosität nicht zu niedrig, d.h. die Mischtemperatur nicht zu hoch sein.

3. Zugabe von Sand und Filler. Diese feinen Mineralstoffteilchen lagern sich dann in den Bindemittelfilm der Splittkörner ein. So wird ein bituminöser Mörtel gebildet, der in sehr homogener Weise in der Mischung verteilt ist.

Diese Mischfolge ist unter der Bezeichnung KGO-Methode bekannt und wird seit einigen Jahren im Ausland vereinzelt - und wie berichtet wird - mit gutem Erfolg praktiziert.

Die bisherigen Erfahrungen haben unter anderem gezeigt, dass nach dieser Mischfolge hergestelltes Mischgut eine bessere Verdichtbarkeit aufweist und somit eine dichtere Lagerung gestattet. Bei sonst gleichen Bedingungen wird ein um ca. 0.8% geringerer Hohlraumgehalt erzielt. Oder anders interpretiert, können bei gleichem Hohlraumgehalt und sonst gleichen Bedingungen ca. 0.3% Bindemittel eingespart werden. Weitere Vorteile liegen möglicherweise darin, dass der Mischvorgang verkürzt und/oder bei etwas niedrigeren Temperaturen erfolgen kann, womit Zeit und Energiekosten eingespart werden könnten.
Die Untersuchungen auf diesem Gebiet sind deshalb besonders interessant, weil vermutlich ohne zusätzliche Kosten allein durch die Wahl der richtigen Mischfolge und Mischtemperatur, durch bessere Umhüllung und bessere Homogenität, eine nennenswerte Qualitätsverbesserung erzielt werden kann. Eine tiefere Temperatur beim Mischvorgang würde neben der Einsparung an Heizkosten zudem eine schonendere Behandlung der Bindemittel ermöglichen, was auch im Zusammenhang mit Recycling-Vorgängen je nach Mischverfahren vorteilhaft sein kann.

1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Forschungsarbeit soll Antworten auf die folgenden Fragen bringen:

1. Mischfolge

   In welchem Masse beeinflussen die vorgeschlagenen Mischfolgen die Qualität bituminöser Mischungen?

2. Mischtemperatur

   Welche Rolle spielt die Mischtemperatur? Gibt es eine optimale Mischtemperatur?

3. Einbau

   Wie wirkt sich das Mischverfahren auf die beim Einbau erzielbare Qualität des Materials und der fertigen Schicht (Oberflächeneigenschaften) aus?

1.4 Mischvarianten

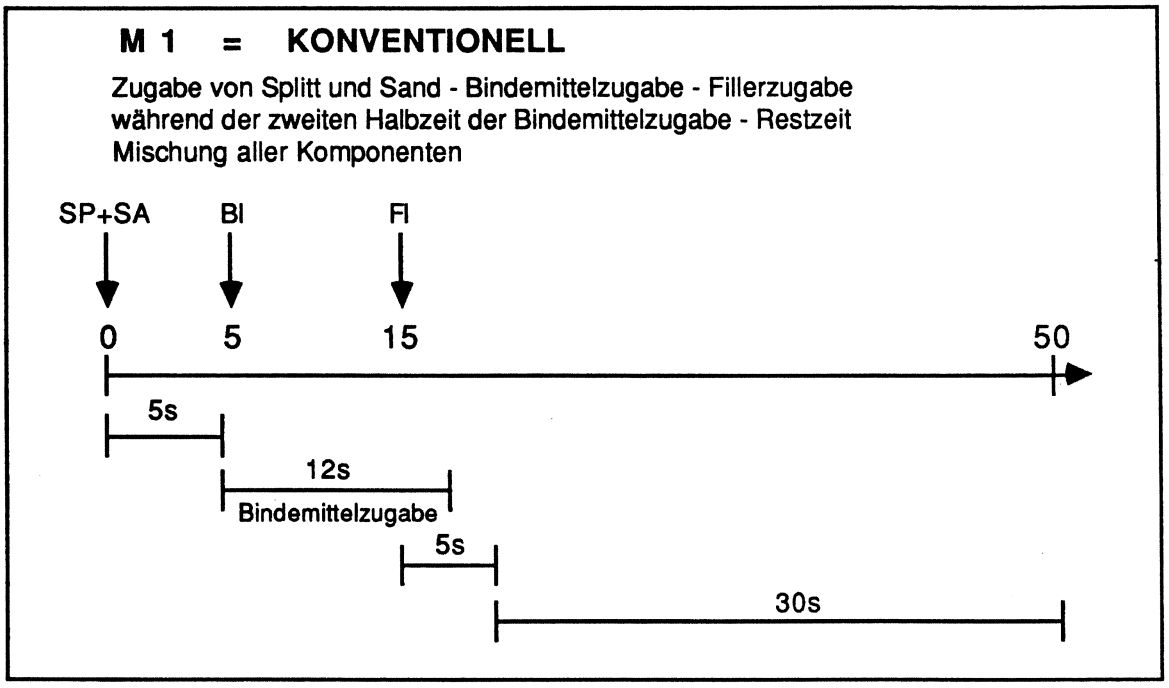
Für den Versuch wurden neun Mischvarianten festgelegt, welche sich aus der Kombination von drei Mischtemperaturen mit drei Mischfolgen ergeben :

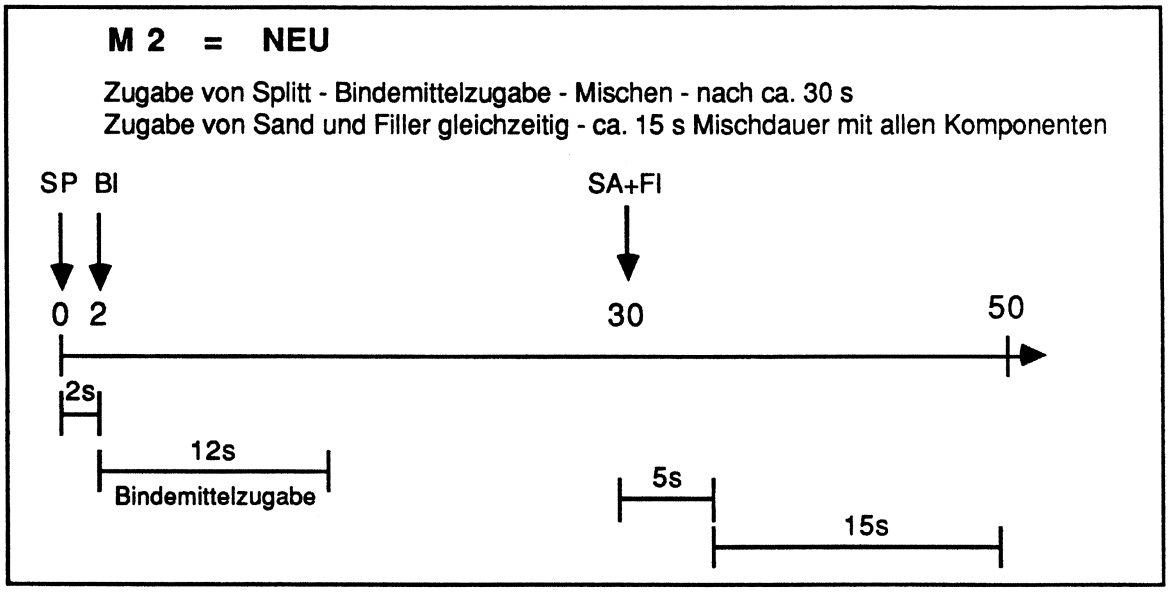
Mischfolge	**M 1 = KONVENTIONELL** Zugabe von Splitt und Sand - Bindemittelzugabe - Fillerzugabe während der zweiten Halbzeit der Bindemittelzugabe - Restzeit Mischung aller Komponenten **M 2 = NEU** Zugabe von Splitt - Bindemittelzugabe - Mischen - nach ca. 30 s Zugabe von Sand und Filler gleichzeitig - ca. 15 s Mischdauer mit allen Komponenten **M 3 = VERGLEICH** Zugabe von Splitt, Sand und Filler - Bindemittelzugabe - Restzeit Mischung aller Komponenten
Mischtemperatur (Solltemperaturen)	**T1 = 170 °C** **T2 = 150 °C** **T3 = 130 °C**
Mischvarianten	

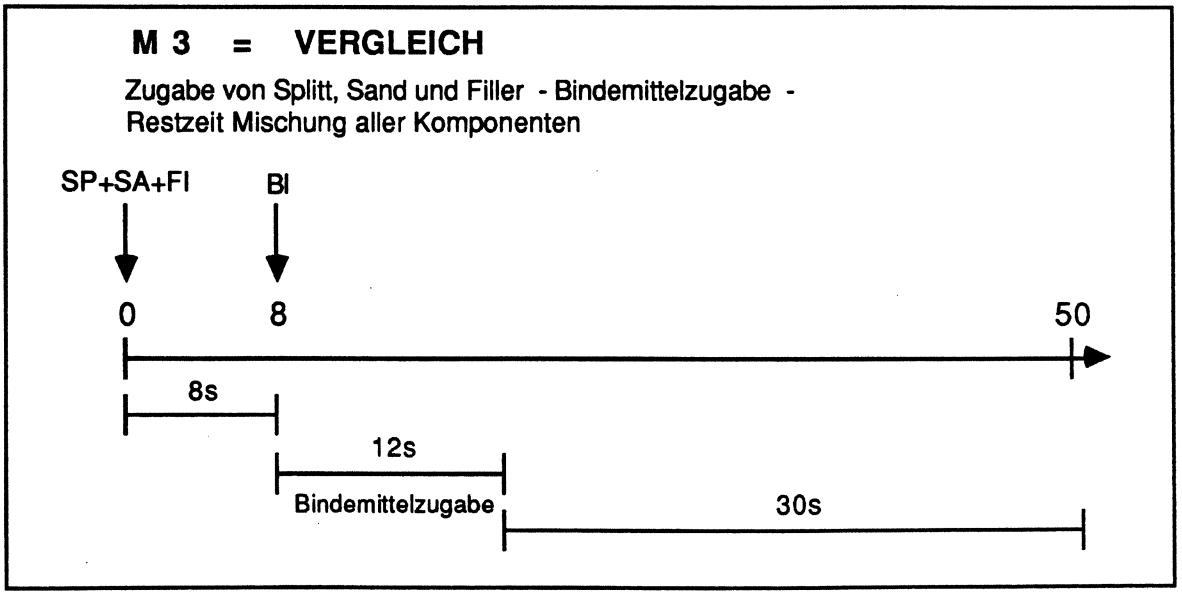
	M1	M2	M3
T1	M1/T1	M2/T1	M3/T1
T2	M1/T2	M2/T2	M3/T2
T3	M1/T3	M2/T3	M3/T3

Die im Bericht benutzten Abkürzungen M1, M2, M3, sowie T1, T2 und T3 beziehen sich auf die obenstehenden Zuordnungen.
Die genaue Reihenfolg der Komponentenzugabe mit den Mischzeiten der drei Mischfolgen ist aus folgender Abbildung 1 zu entnehmen.

Abbildung 1 : Schematische Darstellung der Komponentenzugabe und der Mischzeiten







1.5 Vorgehen

Das Versuchsprogramm umfasst zwei Schwerpunkte :

1. Mischgutherstellung und Einbau der neun Mischvarianten unter Bedingungen der Praxis im Massstab 1 : 1, und

2. Untersuchungen des Mischgutes im Labor und Prüfung der Oberflächeneigenschaften des eingebauten Belages.

Grosses Gewicht lag auf der Versuchsdurchführung unter realen Voraussetzungen. Das Mischgut, ein AB 16 s mit dem Bindemittel B 60/70, wurde an einer in Betrieb stehenden, entsprechend steuerbaren Aufbereitungsanlage hergestellt. Der Einbau erfolgte ohne einschränkende versuchsbedingte Auflagen unter der Aufsicht der örtlichen Bauleitung auf einem rund 900m langen Abschnitt einer Hochleistungsstrasse.
Zielgrössen der Laboruntersuchungen waren volumetrische und mechanische Materialkennwerte. Als Oberflächeneigenschaften wurde die Ebenheit und die Griffigkeit gemessen.

2. Versuchsstrecke

2.1 Situation

Als Versuchsstrecke wurde ein Abschnitt der kantonalen Hochleistungsstrasse (HLS) T6 Bern - Biel ausgewählt. Diese richtungsgetrennte HLS besteht aus zwei Fahrstreifen und einem Standstreifen pro Richtung. Die Versuchsstrecke befindet sich zwischen dem Bundkofenviadukt km 11.8 und dem Talmattviadukt km 12.8 in Fahrtrichtung Biel. Die neun Versuchsfelder haben eine Länge von je etwas mehr als 100 m und erstrecken sich über die Breite beider Fahrstreifen. Das mittlere Längsgefälle beträgt für diesen Abschnitt ca. 2%, das Quergefälle variiert zwische 0 und 4.7%.
Die Lage der Versuchsstrecke ist aus dem Kartenausschnitt in Abbildung 2 zu entnehmen, die Lage der einzelnen Versuchsfelder ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

Abbildung 2 : Situation Versuchsstrecke, M 1:100'000

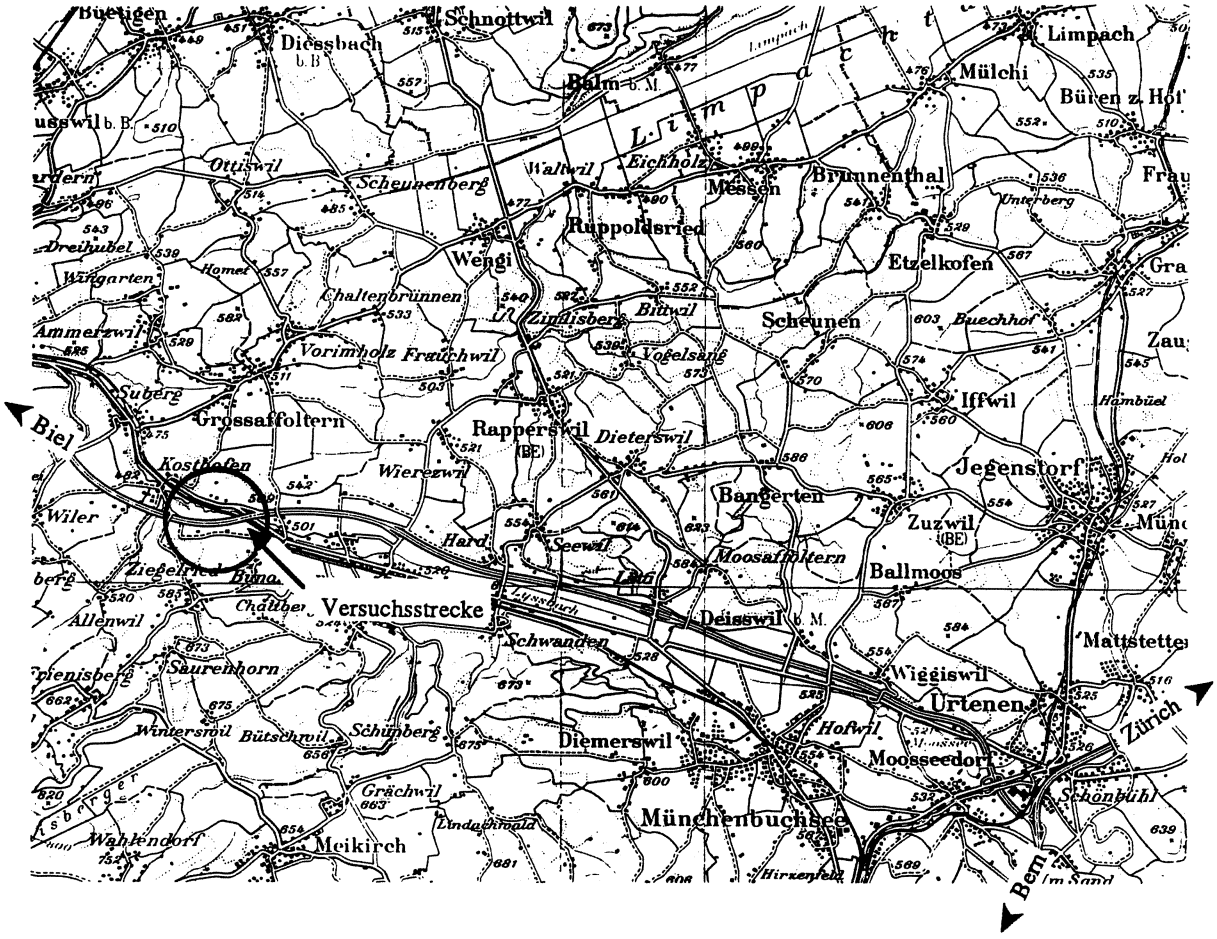
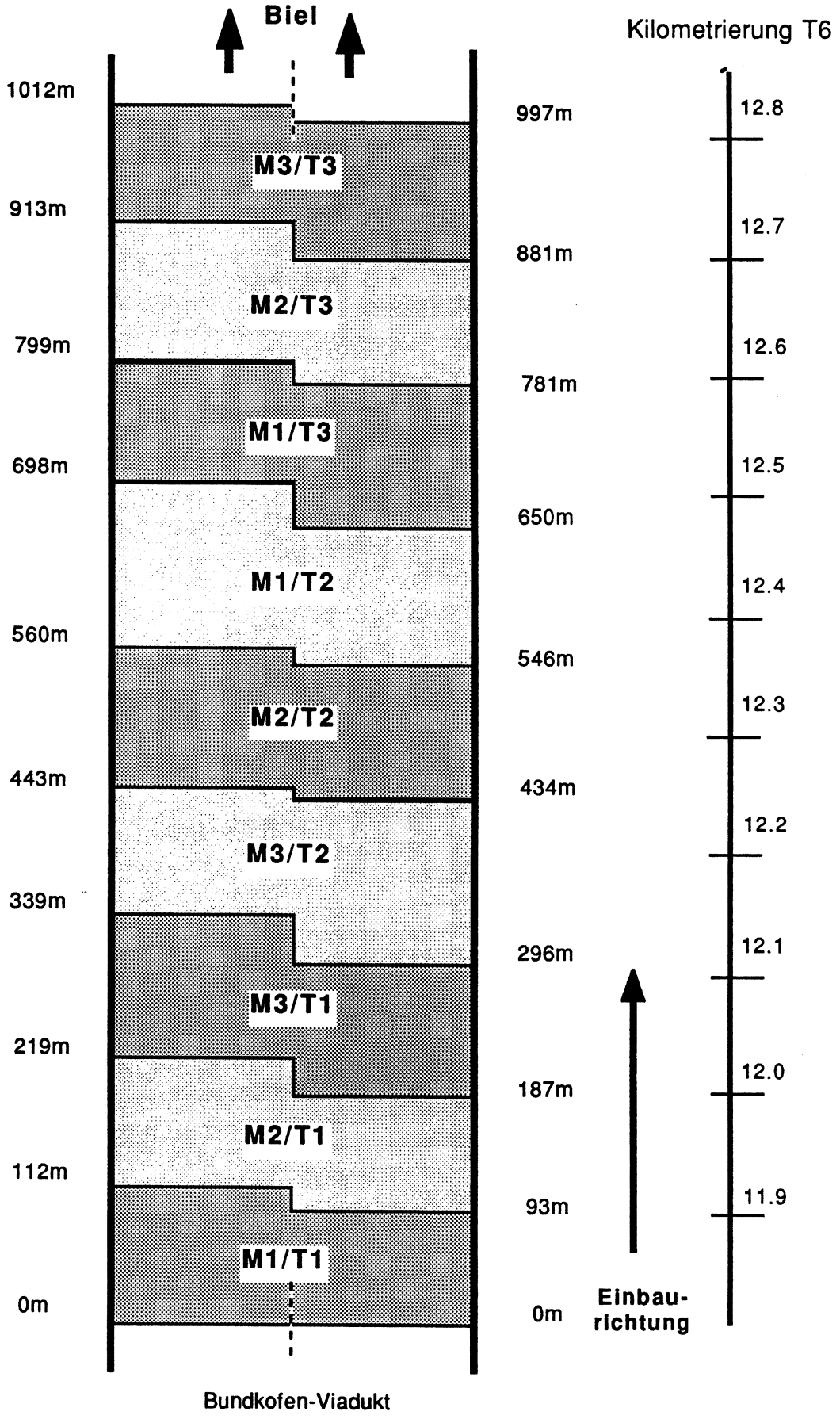


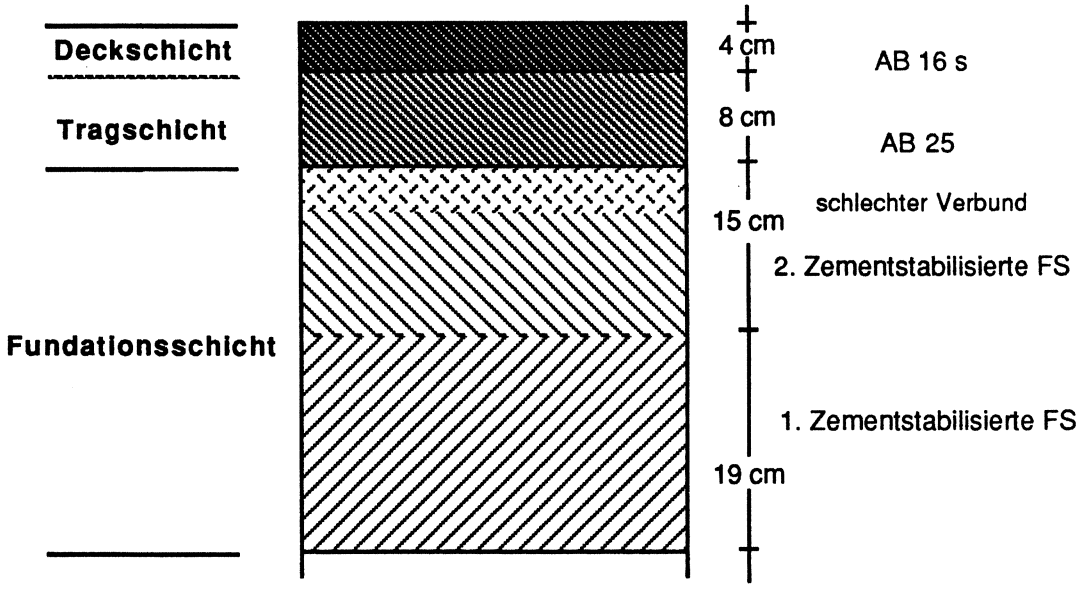
Abbildung 3 : Schema der Versuchsfelder



2.2 Aufbau des Strassenoberbaus

Der Oberbau besteht aus einer zementstabilisierten, zweischichtig eingebauten Fundationsschicht mit einer gesamten Stärke von 34 bis 42 cm, und einem bituminösen Belag mit Trag- und Deckschicht von total 12 cm Dicke. Für die Fundationsschicht wurde neben Kiesmaterialien geringer Qualität auch Ausbruchmaterial aus dem Ligerztunnel der Nationalstrasse N5 verwendet. Da die obersten 5 cm der Zementstabilisierung einen schlechten bis keinen Verbund hatten, wurde die Fundationsschicht vor dem Einbau des bituminösen Belags statisch nachverdichtet.
Auf die 8 cm dicke Tragschicht aus AB 25 wurde das Mischgut der neun Mischvarianten bestehend aus AB16s mit dem Bindemittel B 60/70 als 4 cm dicke Deckschicht eingebaut.

Abbildung 4 : Strassenoberbau



3. Vorversuch

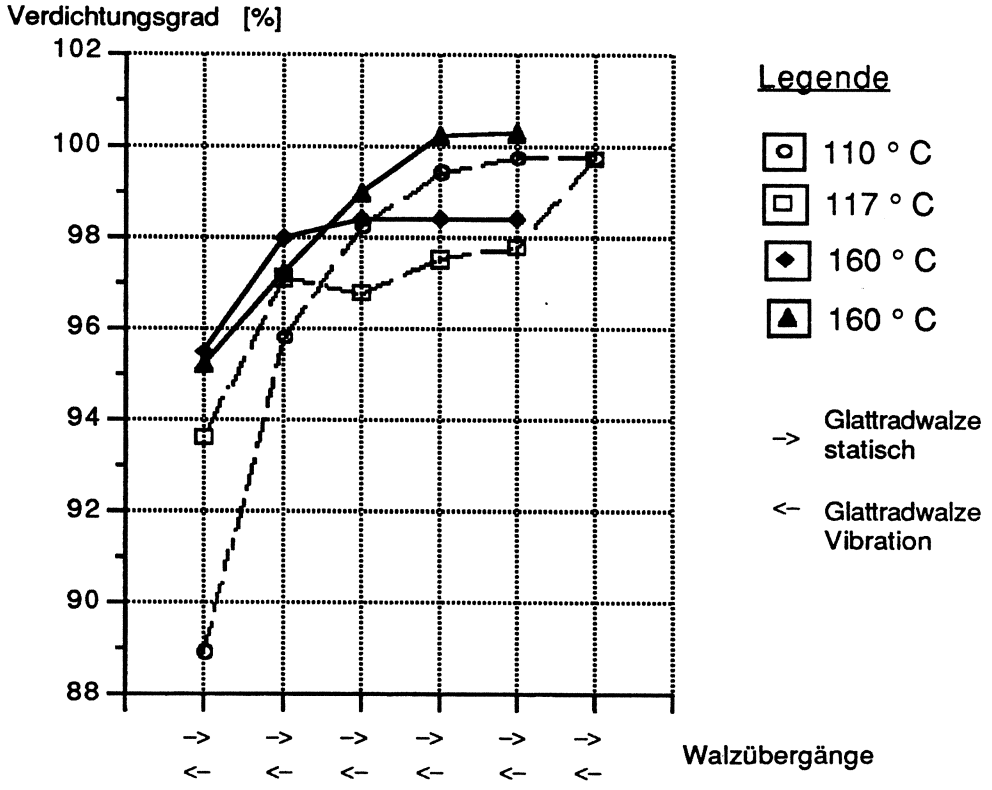
In Anbetracht der Klassierung und des hohen Stellenwertes der ausgewählten Versuchsstrasse, wurde eine minimale Beeinträchtigung der üblichen Standartqualität eines Deckbelages durch den Versuchseinbau als Randbedingung vorausgesetzt. Um die bei jedem Versuch auftretenden Unsicherheiten besser abschätzen zu können, wurde ein Vorversuch durchgeführt.

Konkret hatte dieser Vorversuch den Zweck die Frage abzuklären, ob das Mischgut der vorgeschlagenen Mischvarianten die Anforderungen an einen Hochleistungsstrassenbelag mit starker Verkehrsbelastung in akzeptabler Weise erfüllt. Dabei stand das Erreichen der nötigen Verdichtung bei den tiefen Mischguttemperaturen im Vordergrund.

Um möglichst dieselben Bedingungen wie beim Haupteinbau vorzufinden, wurde der Vorversuch auf dem Standstreifen der Versuchsstrecke durchgeführt. Die Mischgutart und Herstellung, die Einbaudicke und Einbaugeräte sowie die örtlichen Gegebenheiten waren somit für den Probeeinbau und den Haupteinbau dieselben.

Der Einbau erfolgte bei trockener, windstiller Witterung mit Lufttemperaturen zwischen 15°C zu Beginn und 20°C gegen Ende der Arbeiten. Als Mischvarianten wurde M1/T3, also die konventionelle Mischfolge mit der kritischen tiefen Temperatur, sowie M1/T1 als Vergleich ausgewählt. Der Einbau mit dem T3-Mischgut erfolgte auf den ersten 120 m des Stand-

Abbildung 5 : Verdichtungsgrad in Funktion der Walzübergänge



streifens, anschliessend wurde mit der normalen Mischguttemperatur fortgefahren. Beim Einbau wurden die Mischguttemperatur sowie der Verdichtungsvorgang überwacht. Dabei erfolgten je zwei Messungen im Bereich von M1/T3 und M1/T1.
Bei M1/T3 betrug das Mittel der ersten Temperaturmessung im Fertiger 110°C, das Mittel der zweiten Messung 117°C. Bei M1/T1 wurde zweimal 160°C registriert. Die Belagstemperaturen vor der Walze lagen 6 - 8° tiefer als im Fertiger.
Der Verdichtungsablauf wurde während des Einbaus nach jedem zweiten Walzübergang durch Raumgewichtsmessungen mit der Isotopensonde überwacht und registriert. Damit die Resultate der einzelnen Messpunkte miteinander verglichen werden können, war das Verdichtungsgerät (Walztyp) und die Verdichtungsart (statisch / Vibration) bei allen vier Messungen gleich.

Aus der Aufzeichnung des Verdichtungsgrades in Funktion der Walzübergänge in Abbildung 5 wird ersichtlich, dass die niedere Verdichtung des Mischgutes mit den tiefen Temperaturen schon nach vier Doppelwalzübergängen aufgeholt wird und sich dann in den Verdichtungsbereich des Mischgutes, welches mit hoher Temperatur gemischt und eingebaut wurde einpendelt.
Die Resultate dieses Vorversuches lassen den Schluss zu, dass bezüglich der Verdichtung auch bei den tiefen Mischguttemperaturen akzeptable Werte erreicht werden und keine beeinträchtigenden Qualitätseinbussen erwartet werden dürfen.

4. Mischgutherstellung und Einbau

4.1 Mischgutherstellung

Die Produktion des Mischgutes erfolgte im Belagslieferwerk Rubingen AG (BERAG). Als Aufbereitungsanlage konnte nur ein Asphaltmischwerk in Frage kommen, bei welchem die unterschiedlichen Mischfolgen und Mischtemperaturen präzis und ohne lange Umstellzeiten eingestellt und kontrolliert werden können. Diese nötige Flexibilität wird von der Ammann Hot-Stock Anlage der BERAG erreicht. Die nach dem Verfahren des Heissmineralvorrats arbeitende Anlage ist mit einem Zweiwellen-Zwangsmischer ausgerüstet und hat eine Leistung von 3000 t Mischgut pro Tag.
Die Steuerung der Anlage wird von einer Mikroprozessor-Automatik übernommen, welche über Bildschirm im Dialogverkehr bedient wird. Über die Handeingabe-Tastatur kann das Rezept mit den Mineral-, Filler- und Bindemittelgewichten eingegeben und im Rezeptspeicher abgespeichert werden. Zu jedem Rezept können weitere Anlageparameter wie z.B. Feinwägeoptimierung, Toleranzkontrolle, Zykluszeiten, Chargenreduktion entsprechend eingegeben, kontrolliert und gegebenenfalls verändert werden.
Nach erfolgter Dosierung einer Charge werden die bereitliegenden Materialien entsprechend dem gewünschten Mischprogramm zeitrichtig in den Mischer gegeben und gemischt. Nach Ablauf der Mischzeit wird die Mischklappe geöffnet und die fertige Charge auf den Lastwagen verladen.
Weitere technische Angaben über die Aufbereitungsanlage sind aus Beilage 21 zu entnehmen.

Von grosser Bedeutung ist die Kontrolle und Überwachung des Produktionsvorganges. Während der Produktion erfolgt eine Rückmeldung der Daten an den Bildschirm in das Produktionsbild zur laufenden Kontrolle von Soll- und Ist-Wert-Vergleichen der Gewichte und Zyklenzeiten, der Produktionsmengen, der Chargengrösse, des Kunden/Rezept-Totals oder von eventuell auftretenden Störungen. Die Prozessautomatik ist somit selbstüberwachend mit automatischer Störungsanzeige auf Bildschirm und einer optischen und akustischen Signalisation. Für die kontinuierliche Registrierung des Chargen-Protokolls werden die Produktionsdaten an den Protokolldrucker weitergeleitet. Ein solcher Ausdruck pro Charge enthält neben den Mineral-, Filler- und Bindemittelgewichten auch die Mischzeit und die Mischtemperatur.
Die Überprüfung der für den Versuch festgelegten Mischbedingungen war somit gewährleistet.

Das Bindemittel wurde für alle Mischungen mit einer konstanten Temperatur von 158°C zugegeben und die geforderten Mischtemperaturen wurden durch die Variation der Mineraltemperatur erreicht. Nach dem Produktionsstart mit der hohen Mischtemperatur T1 wurden die Temperaturen für T2 und T3 stufenweise reduziert, wobei die letzte Mischfolge einer Temperaturstufe jeweils als erste der folgenden Temperaturstufe übernommen wurde. Die so erreichte Produktionsfolge erklärt die Einbaureihenfolge der Versuchsfelder (Abbildung 3).

4.2 Einbau

Der Einbau fand am 28.Juli 1986 unter idealen äusseren Bedingungen statt. Es herrschte trockenes, sommerlich heisses Wetter mit Lufttemperaturen zwischen 18°C bei Arbeitsbeginn und 32°C am Nachmittag.

Die Transportdistanz vom Standort der Aufbereitungsanlage in Rubigen bis zum Einbau auf der T6 betrug rund 30 Kilometer. Da die Lastwagen für den grössten Teil des Weges die Autobahn benutzen konnten, blieb die Transportzeit mit 20 bis 30 Minuten relativ kurz. Von Arbeitsbeginn weg standen acht Latwagen im Einsatz, ab 14 Uhr wurde auf zehn erhöht. Die Turnuszeit pro Lastwagen betrug etwa 100 Minuten.

Mit dem Einbau der Deckschicht wurde am Bundkofenviadukt mit zwei parallel fahrenden Belagsfertigern um 6 Uhr 20 in Fahrtrichtung Biel gestartet. Der Einbauzug bestand aus zwei Belagsfertigern, einer Kombiwalze 15.7t, zwei Tandem-Glattradwalzen 8 und 9.2t und einer Dreirad-Glattradwalze. Mit der Kombi- und der 8t Tandem-Glattradwalze wurde sowohl statisch als auch mit Vibration verdichtet.

Die rund 90 t Mischgut pro Feld wurden möglichst gleichmässig auf beide Fertiger aufgeteilt. Um 13 Uhr waren mit 540 t sechs Felder eingebaut und um 16 Uhr wurde der Einbau des letzten Feldes abgeschlossen. Das Gesamtgewicht des eingebauten Versuchsmischgutes betrug 810 t.

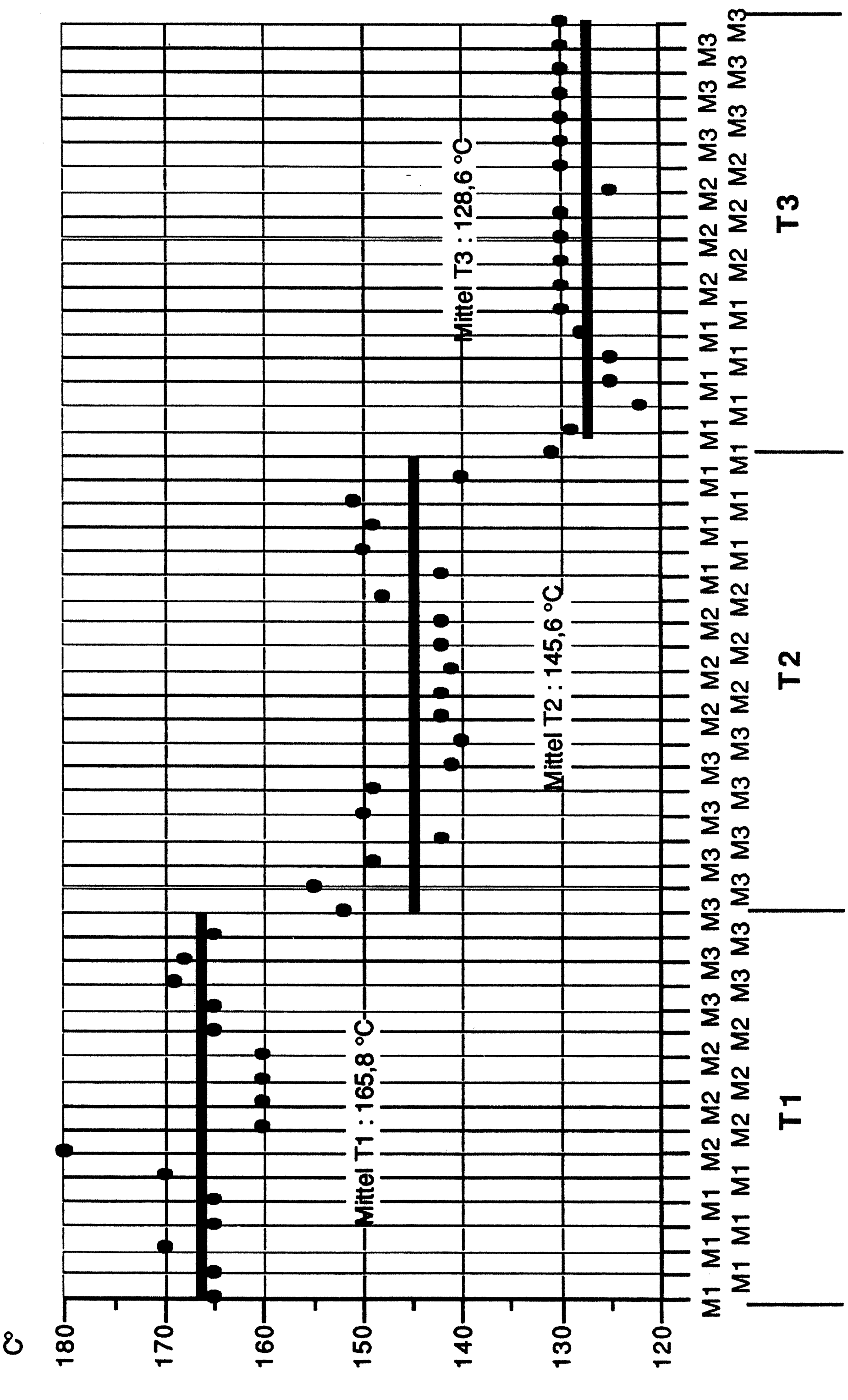
Grosse Aufmerksamkeit wurde der Kennzeichnung der Mischvarianten geschenkt. An der Aufbereitungsanlage wurde die geladene Variante auf dem Lieferschein notiert. Die Lieferscheine wurden auf der Baustelle von den Lastwagenfahrern abgegeben, so dass bei Änderung der Mischvariante die Abgrenzungen der Felder laufend mit Farbe gekennzeichnet und am Fahrbahnrand verpflockt werden konnten.

4.3 Temperatur- und Verdichtungsmessungen

Wie schon im Vorversuch wurden die Mischguttemperaturen nach der Mischung an der Anlage sowie beim Einbau gemessen.
Unmittelbar nachdem das Mischgut den Mischer verlassen hatte, erfolgte auf dem Lastwagen die erste Temperaturmessung mit Einstichfühler. Das Mittel aus mindestens zwei Messungen ist für alle Lastwagen in Abbildung 6 aufgezeichnet. Wie daraus ersichtlich ist, erfolgte der Temperaturwechsel zwischen den Temperaturen T1, T2 und T3 problemlos. Die Streuung innerhalb der einzelnen Temperaturstufen ist bei T1 mit Temperaturunterschieden bis zu 20°C am grössten. Im Mittel sind die gemessenen Temperaturen etwas tiefer als die Solltemperaturen. Mit einem Mittel von 165.8°C bei T1 beträgt die Differenz zur Solltemperatur 4.2°, bei T2 wurde mit 145.6°C eine um 4.4° tiefere mittlere Temperatur gemessen während bei T3 mit einem Mittel von 128.6°C der Sollwert von 130° C annähernd erreicht wurde.
Die Temperaturdifferenz zwischen T1 und T2 blieb mit 20.2°C erhalten, zwischen T2 und T3 fiel sie mit 17°C etwas geringer als vorgesehen aus.
Eine zweite Temperaturmessung auf den an der Baustelle eintreffenden Lastwagen ergab praktisch keine Differenzen zu den ersten Messungen an der Anlage.
Die Temperaturen des Mischgutes vor der Walze lagen je nach Einbaukontinuität und Lufttemperatur resp.Temperatur der Unterlage um 3 bis 8° tiefer als auf dem Lastwagen.

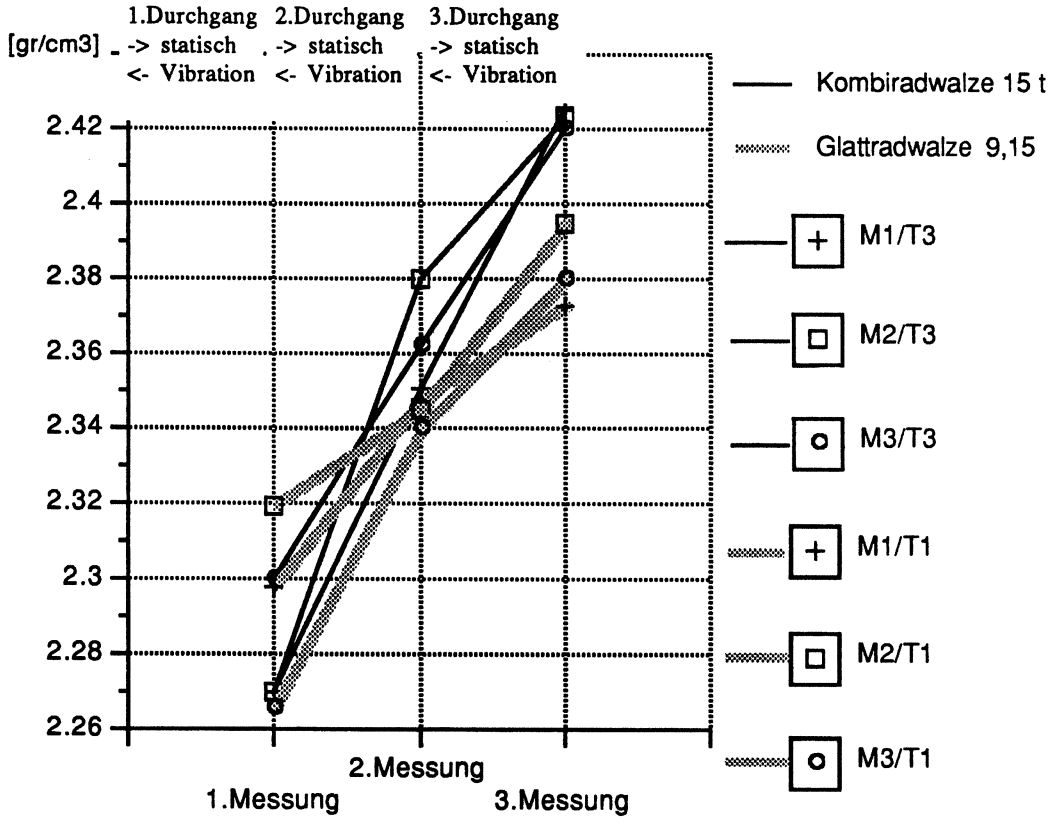
Wie im Vorversuch wurde während des Einbaus mit zwei Raumgewichtsmessungen pro Versuchsfeld der Verdichtungsablauf kontinuierlich registriert. Die Raumgewichtbestimmung erfolgte nach jedem zweiten Walzenübergang mit einer Isotopensonde. Die Messungen wurden solange wiederholt bis das Raumgewicht konstant blieb, was in der Regel nach der 5. Messung der Fall war.
Um das Verdichtungsverhalten verschiedener Mischguttypen direkt miteinander vergleichen zu können, muss von derselben Verdichtungsleistung ausgegangen werden. Gerade das aber wird auf einer Baustelle mit vier Walzentypen, verschiedenen Walzgeschwindigkeiten und der Möglichkeit statisch und mit Vibration zu verdichten zum Problem. Genau dieselben Verdichtungsbedingungen und somit die Möglichkeit eines direkten Vergleiches waren nur bei den drei Mischvarianten der Temperatur T1 vorzufinden. Die ersten drei Messungen fanden hier überall nach je einem statischen Übergang und einem Übergang mit Vibration derselben Tandem-Glattradwalze statt. Ebenfalls unter denselben Bedingungen wurden die Felder M1/T3, M2/T3 und M3/T3 verdichtet. Im Gegensatz zu den Felder mit T1 wurde hier aber von Anfang an die Kombiradwalze 15 t eingesetzt. Die ersten drei Messungen erfolgten auch hier je nach einem statischen Übergang und einem Übergang mit Vibration.

Abbildung 6 : Mischguttemperaturen nach dem Mischprozess



In Abbildung 7 sind die Raumgewichte als Resultate dieser Messungen dargestellt. Klar erkennbar ist der Einfluss des Walztyps. Das mit der Kombiradwalze behandelte Mischgut weist, obwohl es im Vergleich zu T1 bei einer rund 40° tieferen Temperatur verdichtet wurde, die höheren Raumgewichtswerte auf. Dieser Unterschied wird mit zunehmenden Walzübergängen deutlicher. Absolut gesehen erreichen die Raumgewichtswerte der Felder mit der Mischtemperatur T3 und der Verdichtung mit der Kombiradwalze schon nach dem sechsten Walzübergang ein hohes Niveau. Eine klare Aussage über das Verdichtungsverhalten mit dem Einbezug des Einfluss der Mischfolge ist bei dieser kleinen Zahl von Messwerten schlecht möglich.

Abbildung 7 : Resultate der Raumgewichtsmessungen

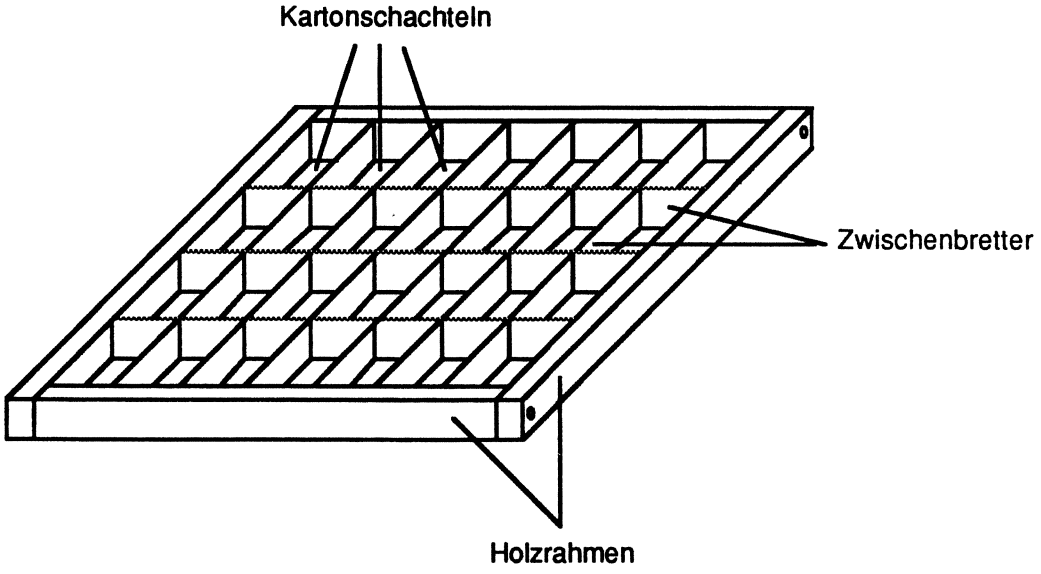


5. Laboruntersuchungen

5.1 Probeentnahme

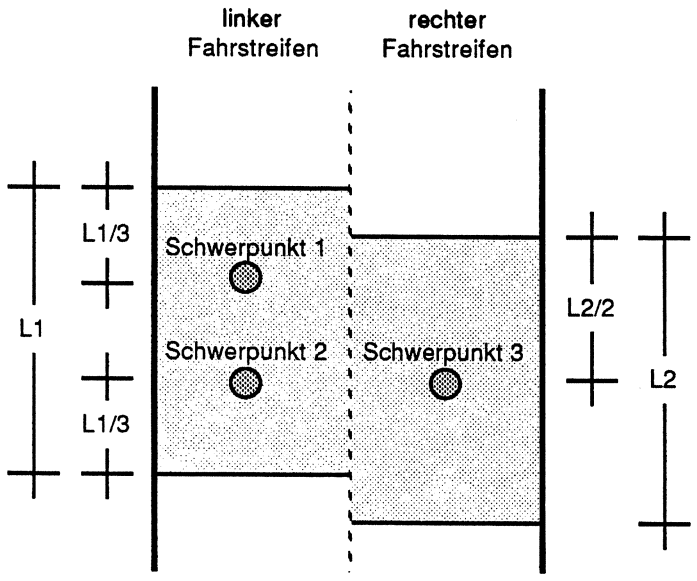
Durch grosszügiges Entgegenkommen der Unternehmung des Belaglieferwerkes konnte das Probemischgut direkt ab Aufbereitungsanlage entnommen werden. Für jede Mischvariante wurde das Mischgut auf einen Anhänger mit Thermomulde geladen und anschliessend in einzelne Portionen aufgeteilt. Dabei kam ein von der EMPA entwickeltes Portionierverfahren zur Anwendung, bei dem das Probemischgut auf 28 Kartonschachteln zu je ca. 27 kg aufgeteilt wird. Das Verfahren hat sich bestens bewährt, zumal der Holzrahmen mit Zwischenbrettern nach Einfüllen und Verteilen des Mischgutes entfernt und unverzüglich für das Portionieren der nächsten Mischung bereitgestellt werden konnte. Somit standen pro Mischvariante rund 750kg Probematerial für die Laboruntersuchungen zur Verfügung.

Abbildung 8: Schema zum Portionierverfahren



Des weiteren wurden für die Spaltzugversuche sowie für das Prüfverfahren Prüfkörper-Biege-Schub-Axial (PK-BSA) pro Versuchsfeld 15 Bohrkerne mit Durchmesser 10 cm, sowie 15 Bohrkerne mit Durchmesser 15 cm entnommen. Die Entnahme erfolgte rund einen Monat nach dem Einbau auf noch nicht unter Verkehr stehender Strasse. Dabei wurden die Bohrungen auf drei Schwerpunkte pro Feld verteilt, deren Anordnung aus Abbildung 9 entnommen werden kann.

Abbildung 9 : **Schema Bohrkernentnahme**



5.2 Spaltzugversuch

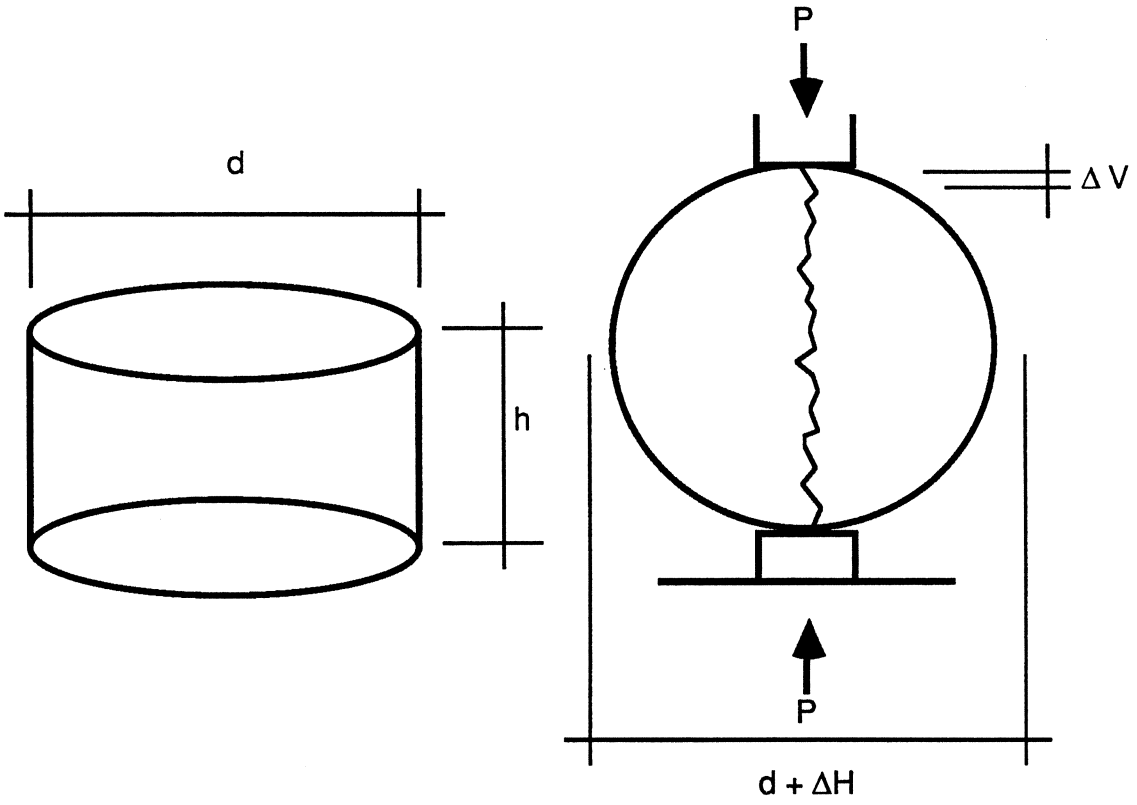
5.2.1 Versuchsdurchführung

Der Spaltzugversuch dient zur Bestimmung des mechanischen Verhaltens bituminöser Beläge. Als indirekte Prüfmethode der Zugfestigkeit ermöglicht der Spaltzugversuch Aussagen über den Spaltzugfestigkeits- und Verformungwiderstand von bituminösen Mischungen. Das Prinzip besteht darin, dass man einen zylindrischen Prüfkörper an diametral entgegengesetzten Stellen des Mantels linienhaft belastet. Zwischen den beiden Lasteinleitstellen entsteht so ein Zugbruch.

Die Spaltzugfestigkeit errechnet sich aus :

$$\sigma = \frac{2P}{\pi h d}$$

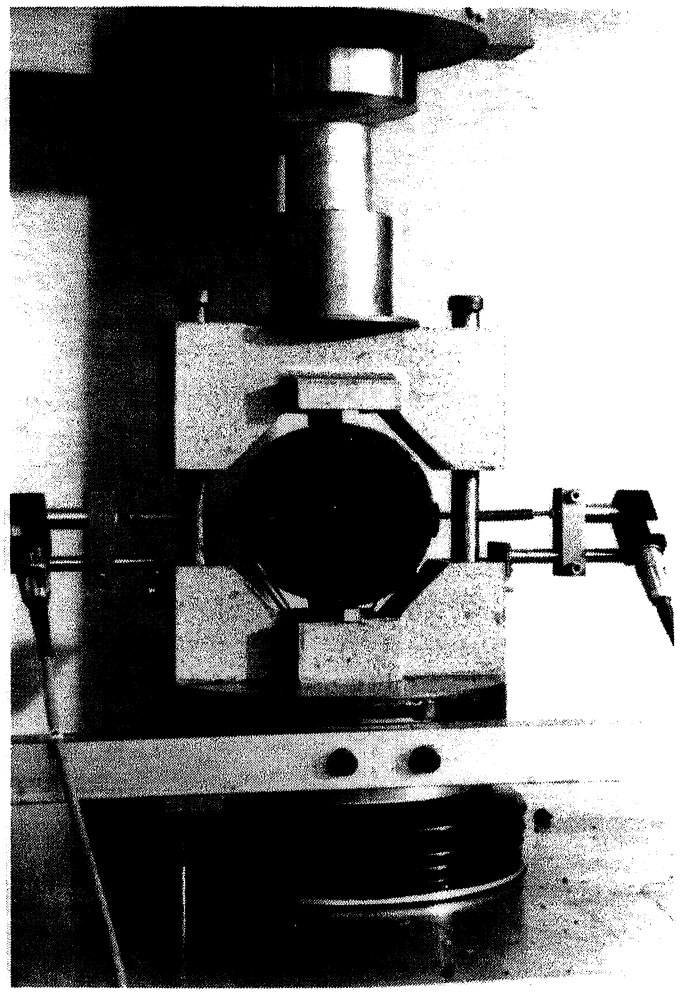
σ = Spaltzugfestigkeit in N/mm^2
P = Bruchlast in N
h = Höhe des Prüfzylinders
d = Durchmesser des Prüfzylinders



Die Versuche wurden weggesteuert auf einer servohydraulischen Presse im Strassenbaulabor des IVT durchgeführt. Gemessen und aufgezeichnet wurde die Bruchlast P, der Weg der vertikalen Verformung ΔV sowie mit zwei zusätzlich angebrachten induktiven Weggebern der Weg der horizontalen Verformung ΔH. Als Grundlage für die Versuchsanordnung und Versuchsbedingungen diente die Forschungsarbeit 27/81, Spaltzugversuch an Asphaltbeton, welche vom Laboratoire des voies de circulation (LAVOC) an der ETH-Lausanne durchgeführt und im Oktober 1984 veröffentlicht wurde [24].

Zielgrössen des Versuches sind mechanische Kennwerte in Funktion der Temperatur. Allgemein treten bei der Festlegung der Versuchstemperaturen für den Spaltzugversuch sehr unterschiedliche Ansichten auf. Für den vorliegenden Versuch wurden die Versuchstemperaturen auf -10°C, +25°C und +45°C festgelegt, welche auch in der Anleitung zur Versuchsdurchführung in der oben genannten Forschungsarbeit vorgeschlagen werden. Ebenfalls wurde die konstante Vorschubgeschwindigkeit der Presse mit 48 mm pro Minute für alle Versuchsreihen beibehalten.

Abbildung 10: Versuchsanordnung für den Spaltzugversuch



Bei einer ersten Betrachtung der Versuchsergebnisse wurde rasch klar, dass nicht alle der gemessenen Grössen mit derselben Gewichtung betrachtet werden dürfen. Eine geringe Aussagekraft haben die Resultate der vertikalen und horizontalen Verformungsmessungen bei der Versuchstemperatur von -10°C. Die sehr kleinen Weganteile liegen nahe an der Mess- und Aufzeichnungsgenauigkeit und werden durch apparativ und bedienungstechnisch bedingte Unregelmässigkeiten stark beeinflusst. Es erschien daher wenig sinnvoll, diese Messgrössen in weitere Analysen und Interpretationen miteinzubeziehen.

Als wichtigste Messgrössen figurieren somit die Spaltzugfestigkeit bei allen drei Versuchstemperaturen, sowie die vertikale Verformung bei den Versuchen mit +25 und +45°C. Die vertikale Verformung ΔV wird dabei nicht in absoluter Grösse dargestellt, sondern in Relation zum Durchmesser d des Prüfkörpers gebracht : ΔV/d.

Als Prüfkörper dienten einerseits Marshall-Prüfkörper, welche aus dem Probemischgut der verschiedenen Mischvarianten nach der Norm SN 671 969b hergestellt wurden, anderseits die Bohrkerne, welche auf die Dicke der Deckschicht planparallel zur Strassenoberfläche geschnitten wurden. Sowohl bei den Marshall-Prüfkörpern als auch bei den Bohrkernen betrug der Durchmesser 10 cm. Die exakten Höhen und Durchmesser aller Probekörper wurden durch mehrere Messungen und Mittelbildungen auf 1/10mm genau bestimmt. Pro Mischvariante und Versuchstemperatur wurden in der Regel fünf Versuche durchgeführt und und davon die Mittelwerte gebildet.

5.2.2 Resultate

Eine erste zusammenfassende Resultatübersicht geben die nachfolgenden Abbildungen 11 bis 13. Die Spaltzugfestigkeiten der Marshall-Prüfkörper und der Bohrkerne werden dabei balkenförmig dargestellt und der Skalierung der linken Achse zugeordnet, die Werte für die vertikale Verformung ΔV/d der einzelnen Mischvarianten sind durch Linien miteinander verbunden und der rechten Achse zugeordnet.

Abbildung 11 : Versuche bei -10°C

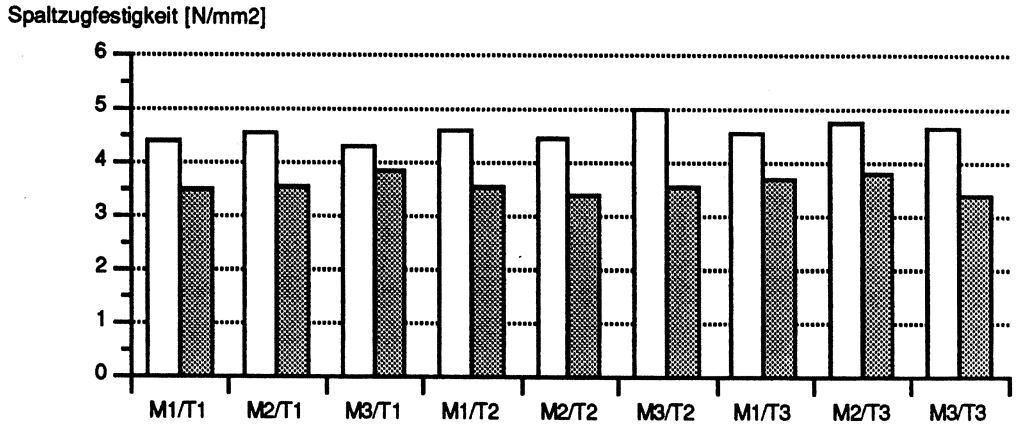


Abbildung 12 : Versuche bei +25°C

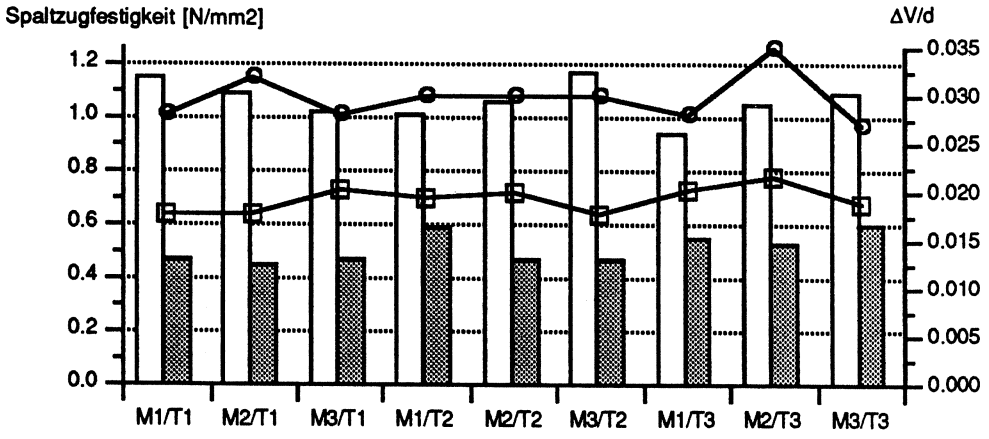
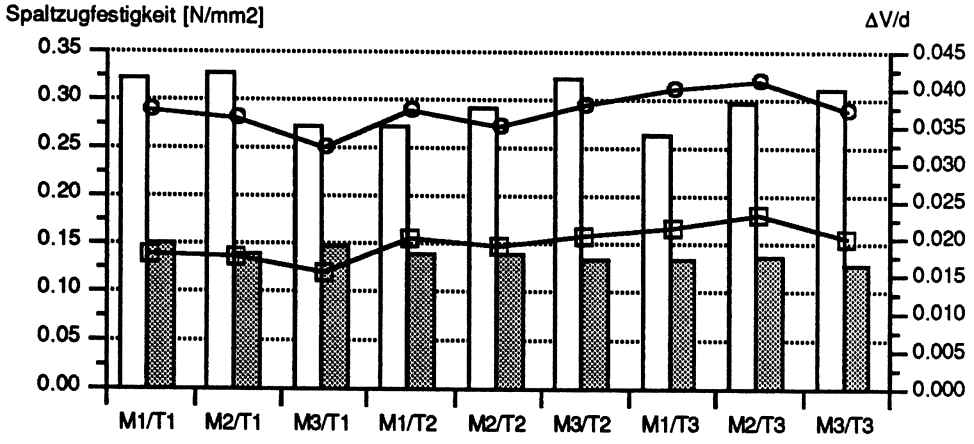
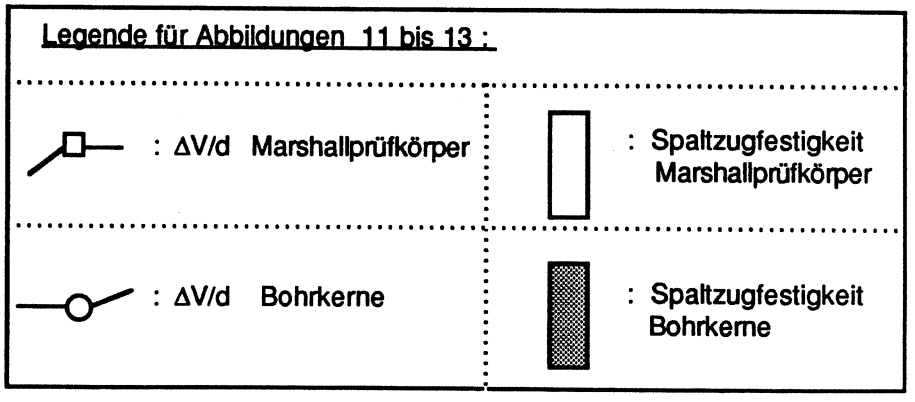


Abbildung 13 : Versuche bei +45°C





Zur detaillierten Analyse der Resultate müssen diese komplexen Darstellungen vereinfacht und die Daten entsprechend den beabsichtigten Analysen gruppiert und miteinander verglichen werden. Für die Betrachtung der Versuchsergebnisse bestehen im vorliegenden Fall verschiedene Vergleichsmöglichkeiten und Darstellungsformen.

Es besteht die Möglichkeit, die Ergebnisse geordnet nach Mischfolge (M1, M2, M3) oder Mischtemperatur (T1, T2, T3) für jede Versuchstemperatur aufzulisten. Eine solche Darstellung erlaubt es, einerseits den Einfluss der Mischfolgen und der Mischtemperaturen getrennt aufzudecken, und anderseits Vergleiche mit denselben Darstellungen der anderen Versuchstemperaturen durchzuführen. Diese Darstellungsart findet man in Beilage 4 und 5.

Neben der grafischen Darstellung sind die Resultate der einzelnen Versuche tabellarisch in Beilage 1, 2 und 3 aufgelistet.

Anhand der Resultate der Spaltzugprüfung an den Marshall-Prüfkörpern lassen sich folgende Aussagen machen :

- Keine der untersuchten Mischungen zeichnet sich durch ein eindeutiges, überragendes positives oder negatives Verhalten aus. Trotzdem kann eine Tendenz erkannt werden, bei der die Mischung M3/T2 die höchste, M1/T3 die tiefste Spaltzugfestigkeit erreicht.

- Der Einfluss der Mischtemperaturen innerhalb derselben Mischfolge ist in etwa gleich stark wie der Einfluss der Mischfolgen innerhalb derselben Mischtemperatur.

- Bei der Spaltzugfestigkeit σ zeigen die Resultate der Versuche bei 25°C und 45°C eine gewisse Übereinstimmung. Innerhalb der Mischfolge M1 weist bei beiden Versuchstemperaturen die Mischungen mit T1 die höheren Festigkeit auf als die Mischungen mit T3. Die Abnahme der Spaltzugfestigkeit bei Abnahme der Mischtemperatur innerhalb derselben Mischfolge wird ebenfalls, wenn auch weniger ausgeprägt, in der Mischfolge M2 deutlich. Bei M3 zeigt sich ein anderes Bild, welches auch mit den Resultaten der -10°C-Versuche übereinstimmt : Die Mischungen mit T1 erreichen die tiefsten, diejenigen mit T2 die höchste Spaltzugfestigkeit.

Werden die einzelnen Mischfolgen innerhalb derselben Mischtemperatur betrachtet, fällt auf, dass bei T2 und T3 die Mischfolge M1 die kleinste und M3 die grösste Festigkeit aufweist. M2 nimmt eine Mittelstellung ein. Diese Aussage gilt für die Versuche bei 25 und 45°C, während sie bei -10°C nur teilweise bestätigt wird. Bei der Mischtemperatur T1 weist die Mischung mit der Mischfolge M3 hingegen bei allen drei Versuchstemperaturen die tiefste Festigkeit auf.

Zusammenfassend kann der Einfluss der Mischtemperatur auf die Spaltzugfestigkeitswerte folgendermassen beschrieben werden:

- bei der Mischfolge M1 : Abnehmende Spaltzugfestigkeit bei abnehmender Mischtemperatur
- bei der Mischfolge M2 : Einfluss der Mischtemperatur ist gering und ohne Tendenz
- bei der Mischfolge M3 : Jeweils tiefste Werte bei der Mischtemperatur T1 und höchste Werte bei T2.

- Bezüglich der vertikalen Verformung kann anhand der Resultate des Versuchs bei 45°C eine klare Aussage gemacht werden : Die Verformung ist, unabhängig von der Mischfolge, bei allen Mischungen mit der Temperatur T1 am kleinsten. Der Einfluss der Mischtemperatur auf die Verformung ist hier grösser als der Einfluss der Mischfolge. Diese Aussage lässt sich etwas abgeschwächt auch auf die Resultate des Versuchs mit 25°C übertragen. Bei -10°C hingegen spielt die Mischtemperatur nicht mehr die entscheidende Rolle, denn hier weisen die Mischungen mit der Mischfolge M3 unabhhängig von der Mischtemperatur die grössten vertikalen Verformungen auf.

Die Versuchsergebnisse der Spaltzugprüfung an den <u>Bohrkernen</u> lassen folgende Feststellungen zu:

- Ein eindeutig positives oder negatives Verhalten, welches sich in allen drei Prüftemperaturen abzeichnen würde, kann nicht erkannt werden. Selbst eine Tendenz, wie das bei den Marshall-Prüfkörpern möglich war, lassen hier die Resultate nicht zu.

- Der Einfluss der Mischtemperaturen innerhalb derselben Mischfolge ist in etwa gleich stark wie der Einfluss der Mischfolgen innerhalb derselben Mischtemperatur.

- Vergleicht man die Werte der Spaltzugfestigkeit der einzelnen Versuchstemperaturen miteinander, resultiert die Feststellung, dass die Mischungen sehr unterschiedlich reagieren. So z.B. erreichen die Mischungen mit der Mischtemperatur T1 bei allen Mischfolgen in den 45°C-Versuchen durchgehend die höchsten Spaltzugfestigkeiten, während dieselben Mischungen in den 25°C - Versuchen die tiefsten Werte verzeichnen.

- Bei Betrachtung der vertikalen Verformung fällt auf, dass die Mischung M2/T3 bei allen Versuchstemperaturen die grössten Werte erreicht. Ansonsten ist auch diese Messreihe durch Uneinheitlichkeit gekennzeichnet.

Die Hoffnung, anhand dieser Resultate einen eindeutigen Einfluss der Mischfolge oder der Mischtemperatur auf die mechanischen Kennwerte der untersuchten Mischvarianten aufzuzeigen, wurde nicht erfüllt. Weder im Vergleich der Mischfolgen und der Mischtemperaturen innerhalb derselben Versuchstemperaturen, noch bei der Gegenüberstellung der Resultate der drei Versuchstemperaturen zeigen sich klare, einheitliche Bilder.

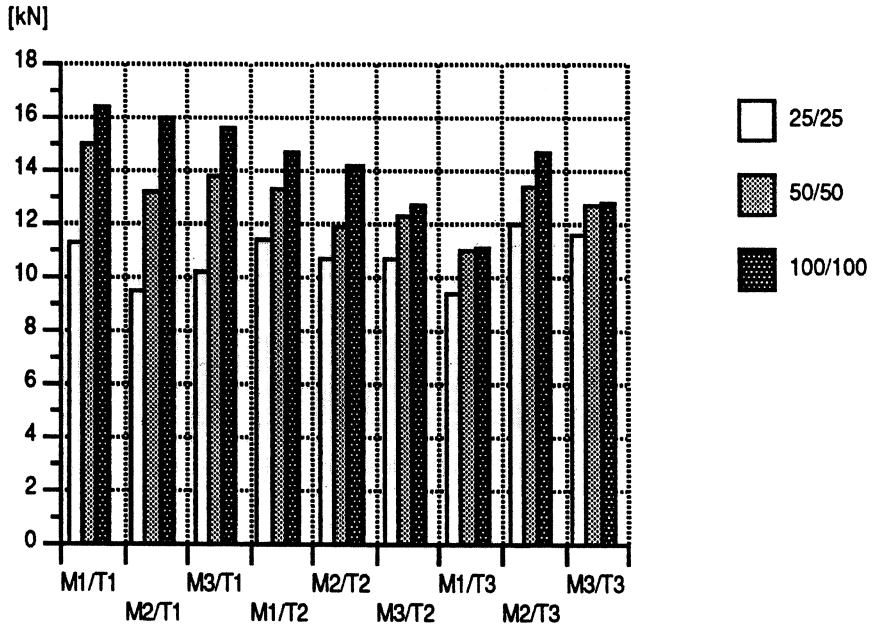
5.3 Marshall-Versuch

Der Marshall-Versuch, eine mechanische Prüfung, bei der die Prüfkörper einer kombinierten Druck- Scherbeanspruchung unterworfen werden, gibt Aufschluss über Stabilität und Verformungsverhalten der Mischungen. Die Versuchsdurchführung erfolgte nach der Norm SN 671 963, wobei neben den nach Norm mit beidseitig 50 Schlägen verdichteten Prüfkörper auch solche mit beidseitig 25 und 100 Schlägen geprüft wurden. Pro Mischvariante resultieren somit drei Resultatgrössen, von welchen die Marshall-Stabilität in Abbildung 14 dargestellt ist.

Ausser der Feststellung, dass die absoluten Stabilitätswerte relativ hoch liegen und dem erwarteten Ergebnis, dass erhöhte Verdichtungsarbeit auch erhöhte Stabilität zur Folge hat, lassen die Resultate in Bezug auf den Einfluss des Mischprozesses folgende Aussagen zu:

- Die Unterschiede in der Stabilität als Folge der unterschiedlichen Verdichtungsarbeit verringern sich deutlich mit abnehmender Mischtemperatur.

Abbildung 14 : Marshall-Stabilität

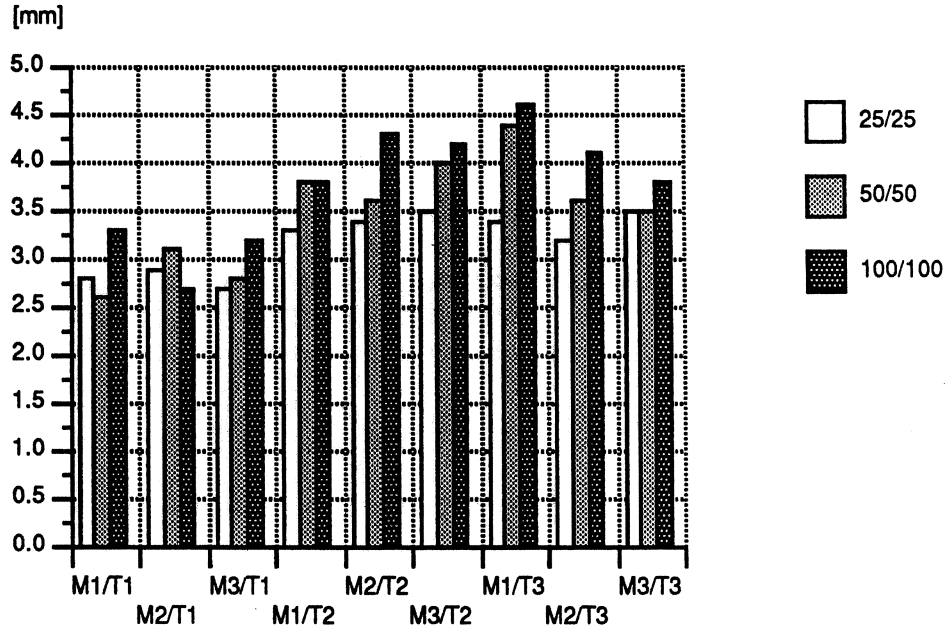


- Innerhalb der Mischfolge M1 zeigt sich eine starke Abnahme der Stabilität bei Abnahme der Mischtemperatur, wobei diese Abnahme bei den höher verdichteten Prüfkörpern deutlicher ausfällt. Diese Tendenz kann für die mit 50 und 100 Schlägen verdichteten Prüfkörper auch in den Mischfolgen M2 und M3 in abgeschwächter Form festgestellt werden. Bei den mit 25 Schlägen verdichteten Prüfkörpern hingegen zeigt sich für diese beiden Mischfolgen ein umgekehrtes Bild. Die Stabilität nimmt hier mit abnehmender Mischtemperatur zu.

- Im Vergleich der Mischungen mit derselben Mischtemperatur zeigen die Mischfolgen bei der Mischtemperatur T1 geringe Auswirkungen, bei den Mischungen mit T2 ist eine leichte Abnahme der Stabilität in der Reihenfolge M1 - M2 - M3 festzustellen. Bei den Mischungen, welche mit der Temperatur T3 gemischt wurden, zeigt die Variante mit der Mischfolge M2, unabhängig der Verdichtung , eine deutlich höhere Stabilität gegenüber den Mischungen mit M1 und M3.

Für den Marshall-Fliesswert präsentiert sich die entsprechende Darstellung wie folgt:

Abbildung 15 : Marshall-Fliesswert



Dazu folgende Feststellungen:

- Die absoluten Fliesswerte liegen relativ hoch.

- Eine erhöhte Verdichtungsarbeit bewirkt, abgesehen von einer Ausnahme, erhöhte Fliesswerte.

- Beim Vergleich der Mischtemperaturen innerhalb derselben Mischfolgen zeigt sich bei der Mischfolge M1 eine deutliche Zunahme der Fliesswertes bei Abnahme der Mischtemperatur. Ein solch deutlicher Zusammenhang kann bei den Mischfolgen M2 und M3 nicht mehr erkannt werden, wenngleich die Mischungen mit T1 in beiden Fällen kleinere Fliesswerte aufweisen als bei den übrigen Temperaturen.

- Vergleicht man die Mischungen mit derselben Mischtemperatur untereinander, wird der geringe Einfluss der Mischfolge deutlich : bei der Mischtemperatur T1 befinden sich die Fliesswerte auf demselben tiefen Niveau, bei T2 liegen sie im Schnitt etwa überall 1mm höher und nur bei T3 zeigt sich ein tendentieller Einfluss der Mischfolge, indem die Fliesswerte der höher verdichteten Prüfkörper in der Reihenfolge M1 - M2 - M3 abnehmen.

5.4 Versuche Prüfkörper-Biege-Schub-Axial (PK-BSA)

5.4.1 Allgemeines und Versuchsparameter

Die PK-BSA Versuche wurden auf dem Mehrfachprüfstand DYNASPHALT der EMPA durchgeführt. Zielsetzung dieser Prüfung ist das Erarbeiten von realistischen, dh. tatsächlich wirksamen mechanischen Materialkennwerten an Belagsschichten, welche direkt ab Bohrkernen der Strasse entnommen wurden [22]. In einer zweiten Phase wurden an denselben Prüfkörpern Ermüdungsversuche durchgeführt.

Die Mehrstufenversuche PK-BSA umfassen folgende Versuchsparameter :

- Variation der Mischungen, M1/T1 bis M3/T3, mit variabler Anzahl von Prüfkörpern (Borkernen) pro Mischung :

Mischung	*Prüfkörper*	
	Anzahl	Bezeichnung
M1/T1	5	103,104,105,113,123
M2/T1	3	213,214,215
M3/T1	3	305,313,315
M1/T2	5	601,603,605,613,623
M2/T2	3	512,514,515
M3/T2	5	402,403,405,423,425
M1/T3	4	701,703,713,723
M2/T3	4	801,802,803,813
M3/T3	4	901,902,903,913

- Variation der Temperaturstufen von "kalt" nach "warm":

  0°C ' 5°C ' 10°C ' 15°C ' 20°C ' 25°C ' 30°C

- Variation der Frequenz von "schnell" nach "langsam":

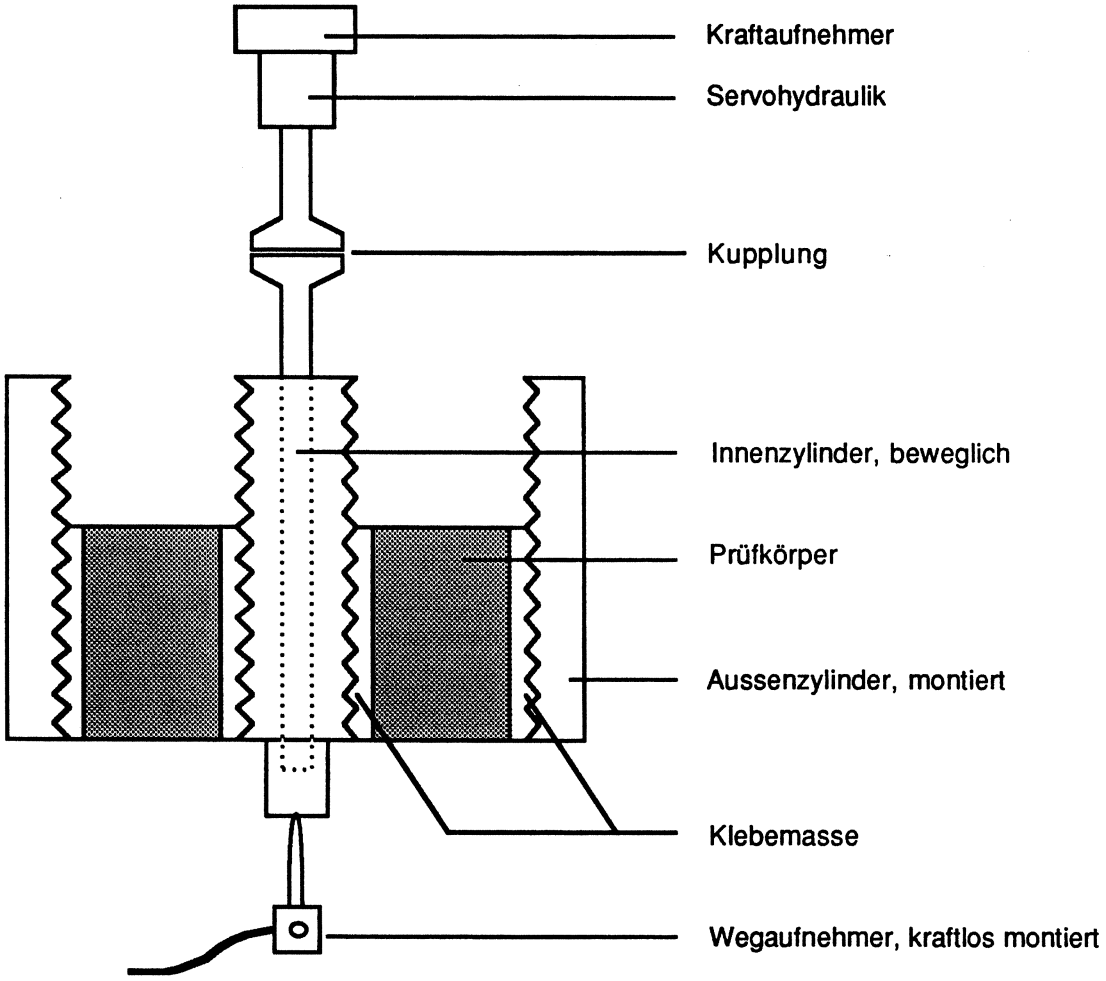
  $32s^{-1}$ ' $16s^{-1}$ ' $8s^{-1}$ ' $4s^{-1}$ ' $2s^{-1}$ ' $1s^{-1}$ ' $0.5s^{-1}$ ' $0.25s^{-1}$ ' $0.125s^{-1}$

Die Ermüdungsprüfung wurde als kraftgesteuerter Versuch mit sinusförmiger Krafteinleitung bei einer Prüftemperatur von 40°C durchgeführt. Die Prüfkörper wurden in Wechsellastgruppen von je 300 Schwingungen mit kurzen Pausen zwischen den einzelnen Lastgruppen bis zum Bruch belastet. Die Tatsache, dass die Ermüdungsprüfung an denselben Prüfkörpern wie die Versuche PK-BSA durchgeführt wurden, dürfte eine geringfügige Reduktion der Zyklenzahl bis zum Bruch bewirken, schmälert aber in keiner Weise die Aussage eines relativen Vergleichs des Ermüdungsverhaltens der einzelnen Mischungen untereinander.

5.4.2 Prüfeinrichtung

Der zwischen der inneren und äusseren Zylinderfläche befindliche Prüfkörper wird durch eine parallel zur Zylinderachse wirkende, sinusförmige Belastung verformt, und so das mechanische Verhalten erfasst. Die Prüfvorrichtung ist in Abbildung 16 skizziert.

Abbildung 16 : Prüfvorrichtung



5.4.3 Auswertung

5.4.3.1 Berechnung von Modulen aus den Messwerten von Weg und Kraft

Die Vorgabe eines sinusförmigen Sollwertes für die Verformung des Prüfkörpers respektive der Kraft führt bei linearem mechanischem Verhalten des geprüften Materials (Wegamplitude) zu einer sinusförmigen Reaktion. Die beiden Schwingungskurven für Kraft und Weg werden auf die Sinus- und Cosinusanteile hin untersucht. Aus diesen Anteilen können die Amplitude

für Weg und Kraft und die Phasenverschiebung Ψ zwischen den beiden Grössen berechnet werden. Das Verhältnis von Kraft- und Wegamplitude ergibt, unter Berücksichtigung der Prüfkörperabmessungen durch einen entsprechenden Faktor, den komplexen Modul G*. Daraus können der Verlustmodul (viskoser Anteil) und der Speichermodul (elastischer Anteil) unter Beizug der Phasenverschiebung ψ nach folgender Formel berechnet werden:

$$\text{Verlustmodul} = G^* * \sin(\psi)$$

$$\text{Speichermodul} = G^* * \cos(\psi)$$

Weitere Kenngrössen wie Schwingungsviskosität und Elastizitätsmodul können aus diesen Grundgrössen abgeleitet werden.

An den Messdaten wird zudem ein Test auf Symmetrie und Sinusförmigkeit der Kurven durchgeführt. Da bei kleinen Amplituden Messfehler beim Bestimmen einzelner Punkte der Schwingungskurven grossen Einfluss auf die Kontrollwerte ausüben, können die Kontrollgrössen erhebliche Abweichungen vom Sollwert von 1.0 aufweisen. Solange die Werte für die Module nicht stark streuen, können sie trotzdem als gesichert behandelt werden.

5.4.3.2 Modul in Abhängigkeit von Temperatur und Frequenz

Pro Paar von Temperatur und Frequenz wurden 6 Modulwerte bestimmt. Zum Teil streuen diese Werte nicht einfach um einen Mittelwert, sondern weisen eine geringe, aber nachweisbare Tendenz auf. Trifft das zu für die Amplitude Kraft und Weg, Phasenverschiebung und Temperatur im Prüfkörper, wird anstelle der Berechnung eine lineare Regression durchgeführt und der Wert dieser Grössen für den Beginn der Schwingbelastung errechnet. Es werden in diesem Fall Materialkennwerte für den unbelasteten Zustand gewonnen. Für alle weiteren Auswertungen werden Mittelwerte resp. Regressionswerte als Messwerte für den ungestörten Prüfkörper eingesetzt.

5.4.3.3 Masterkurven

Untersuchungen und theoretische Ueberlegungen an Kunststoffen haben gezeigt, dass die Kurvenstücke der komplexen Module für verschiedene Temperaturen durch ein horizontales Verschieben meist gut zur Deckung gebracht werden können. Somit kann aus der bestimmten Kurvenschar für jede gewünschte Temperatur die Masterkurve konstruiert werden, indem die anderen Kurvenäste aus jenen der ausgewählten Temperatur verschoben werden. Man erhält dabei für alle Temperaturen Verschiebungsvektoren in Abhängigkeit von der Temperatur. Da

die Darstellung sowohl für Module wie Frequenzen logarithmisch ist, sind diese Verschiebungsvektoren in Wirklichkeit Multiplikationsfaktoren, mit denen die Frequenzen bei der entsprechenden Temperatur multipliziert werden müssen, um die Frequenzen gleich grosser Modulen für die Temperatur der Masterkurve zu erhalten. Die verschiedenen Grössen werden dabei wie folgt ermittelt:

Kreisfrequenz Frequenz multipliziert mit 2π. Es wird in dieser Darstellung die Kreisfrequenz anstelle der Frequenz verwendet, weil die Schwingungsviskosität direkt mit der Kreisfrequenz zusammenhängt.

Komplexer Modul Die Kurve für den komplexen Modul wird nach einer Formel von Dobson mittels einer Iteration berechnet. Sein numerischer Ansatz stellt für bituminöse Materialien einen guten Ansatz dar.

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

Speichermodul Aus den Ausgleichskurven für den komplexen Modul und für die Verschiebungsphasen kann der Speichermodul für jeden gewünschten Punkt mit oben aufgeführten trigonometrischen Funktionen ermittelt werden. So wurde die Masterkurve für den Speichermodul berechnet.

Schwingungsviskosität

Die Schwingungsviskosität ist definiert als Verlustmodul dividiert durch die Kreisfrequenz. Der Verlustmodul wird analog zum Speichermodul berechnet.

Grenzwert des komplexen Moduls

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

Scherempfindlichkeitsparameter b

Dieser Parameter gibt an, wie schnell die Masterkurve von der diagonalen zur horizontalen Asymtote übergeht. Bei einer rein viskoelastischen Flüssigkeit erfolgt der Uebergang rasch und der Wert ist mit 1.96 sehr hoch, für bituminöse Materialien mit fliessendem Uebergang ist der Scherempfindlichkeitsparameter viel kleiner.

5.4.4 Darstellung der Resultate

Die Darstellung der Restultate erfolgt in graphischer und tabellarischer Form. Pro Prüfkörper bestehen folgende fünf Grafiken :

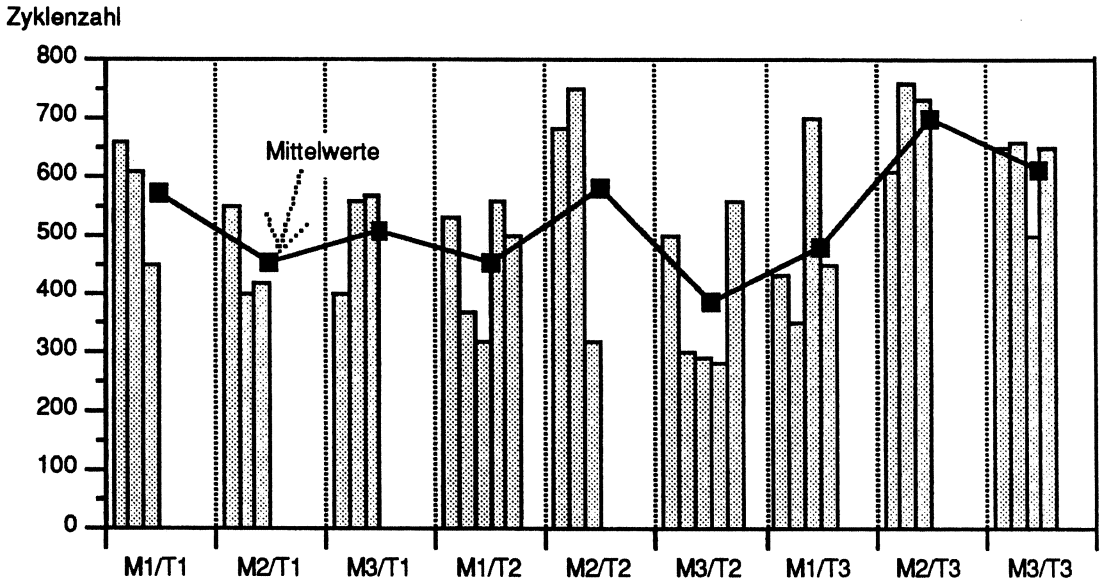
- die Masterkurve mit dem komplexen Schubmodul G* und dem Speichermodul G', sowie die Schwingungsviskosität in Funktion der Kreisfrequenz,
- die Frequenzabhängigkeit des komplexen Moduls für alle Prüftemperaturen,
- die Phase zwischen Kraft und Weg für alle Prüftemperaturen,
- die Streuung der komplexen Module in Funktion der Frequenz für alle Prüftemperaturen,
- und schliesslich die graphische Darstellung der Ermüdungsprüfung mit dem Logarithmus des komplexen Moduls in Funktion der Zeit, resp.der Zyklenzahl, sowie der Kennwert für die Sinusförmigkeit in logarithmischer Darstellung zur Feststellung des Bruchzeitpunktes.

Des weiteren sind für jeden Mehrstufenversuch die Resultate der Einzelversuche tabellarisch aufgelistet. Dabei werden pro Versuchspunkt die Kraft- und Wegamplitude, die Phase, die komplexen Module, Speicher- und Verlustmodule sowie die Prüftemperatur numerisch aufgelistet.
Eine Darstellung aller Grafiken und Tabellen für jeden Prüfkörper würde den Rahmen des Beilagenumfanges sprengen und die Übersichtlichkeit beeinträchtigen. Als Beispiel sind für den Prüfkörper 214 der Mischung M2/T1 alle grafischen und tabellarischen Darstellungsmöglichkeiten in Beilage 9 aufgeführt. Für die übrigen Prüfkörper sind nur die beiden aussagekräftigsten Grafiken, die Masterkurve und die Grafik des Ermüdungsversuches in Beilage 10 dargestellt. Zusätzlich sind für alle Mischvarianten die Mittelwerte des komplexen Schubmoduls G* aller Prüftemperaturen und Frequenzen in Beilage 11 tabellarisch zusammengefasst.

5.4.5 Resultate

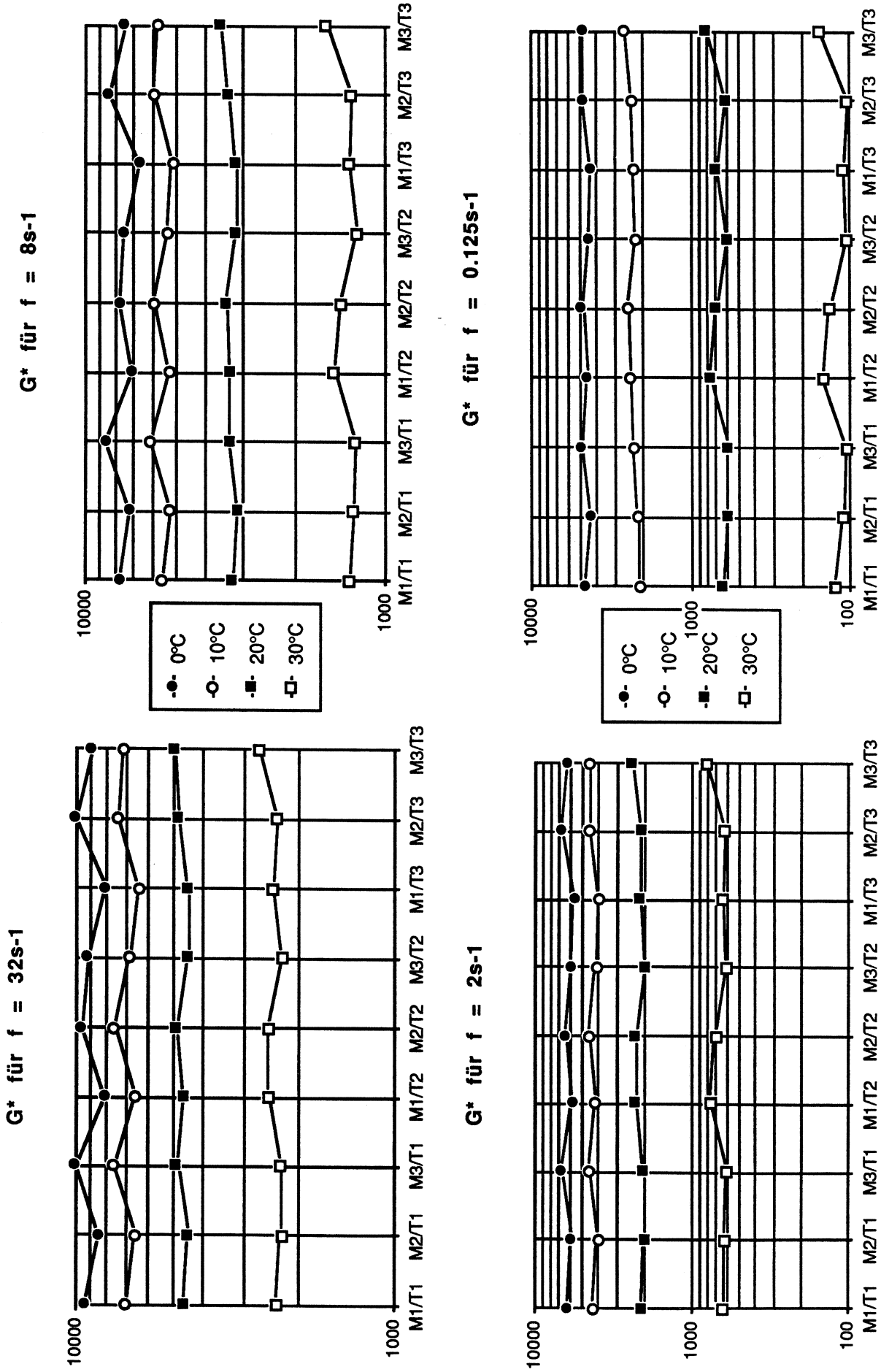
Die Grafiken in Abbildung 17 und 18 sollen eine erste Resultatübersicht geben.
In Abbildung 17 sind die Ergebnisse der Ermüdungsprüfung mit der Zahl der Lastwechsel bis zum Eintreten des Bruches in Balkenform und die Mittelwerte für jede Mischung in einem überlagerten Liniendiagramm dargestellt. Die aus dieser Darstellung hervorgehende Tendenz einer erhöhten Festigkeit der Mischungen M2/T3 und M3/T3 ist auf Grund der kleinen Prüfkörperzahl und der sehr grossen Streuung innerhalb der Mischungen mit grosser Vorsicht zu interpretieren.

Abbildung 17 : Ermüdungsprüfung



In Abbildung 18 sind die Mittelwerte der komplexen Module G* der neun Mischvarianten für die Frequenzen von 32, 8, 2, und 0.125s^{-1} mit den Prüftemperaturen 0, 10, 20 und 30°C im logarithmischen Massstab dargestellt. Dabei fällt das übereinstimmende Verhalten der Mischungen bei verschiedenen Prüftemperaturen innerhalb derselben Prüffrequenz wie auch im Vergleich mit den übrigen Prüffrequenzen auf. Eine sichere Aussage in Bezug auf den Einfluss des Mischprozesses ist jedoch anhand dieser Resultate nur schwer möglich. Die mit den vorliegenden Versuchsparameter direkt bestimmten Modulwerte erweisen sich als zu grob, um ein mischprozessabhängiges Verhalten der Mischungen aufzuzeigen. Die in diesem Fall notwendige weitergehende Resultatanalyse mit dem Einbezug der Masterkurve und damit eines erweiterten Frequenzbereichs und der Berücksichtigung statistischer Aspekte erfolgt bei der zusammenfassenden Analyse der Laborresultate in Kapitel 5.6.

Abbildung 18 : PK-BSA, komplexer Modul G* [N/mm]

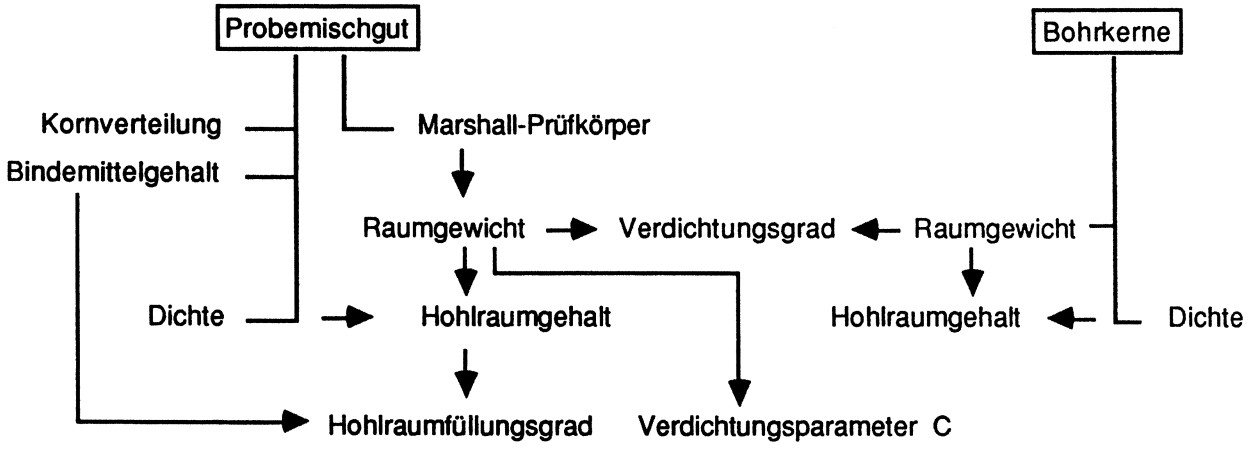


5.5 Mischgutuntersuchungen

5.5.1 Untersuchungsablauf

Die Mischgutuntersuchungen wurden im IVT-Strassenlabor durchgeführt. Die Anordnung sowie die Durchführung der einzelnen Versuche entsprach den Prüfvorschriften der Schweizerischen Normenvereinigung.
In der folgenden Abbildung ist das Vorgehen bei den Laboruntersuchungen schematisch dargestellt.

Abbildung 19 : Schema des Untersuchungsablaufs

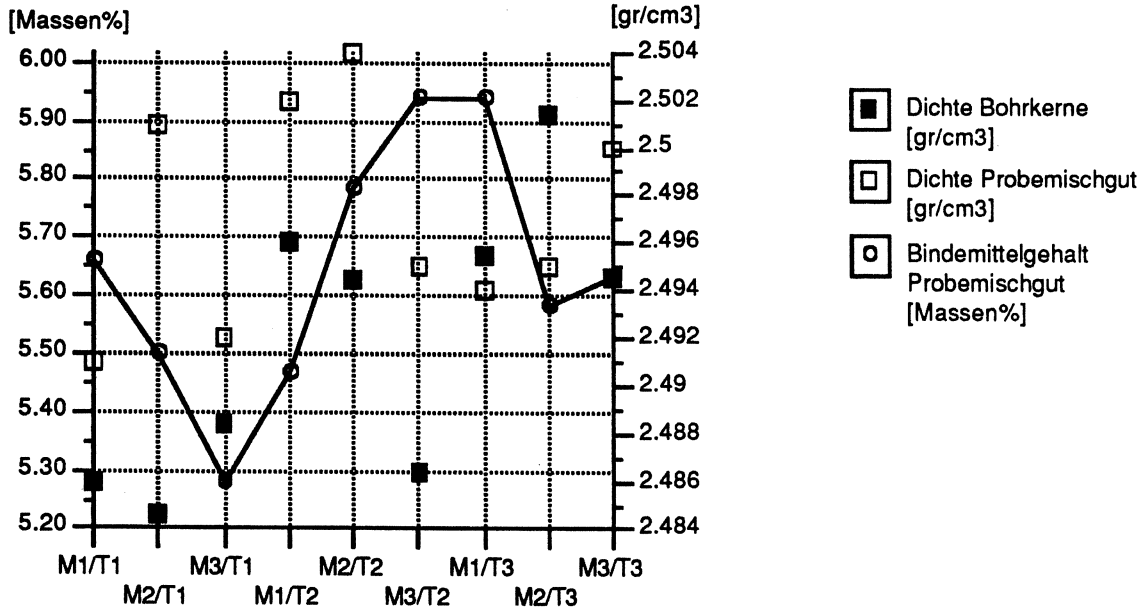


5.5.2 Dichte und Bindemittelgehalt

Bestimmt wurden die Dichte und der Bindemittelgehalt des Probemischgutes sowie die Dichte der Bohrkerne. Bei allen Bestimmungen wurden die Prüfvorschriften der Normen SN 671 965 und SN 671 955 eingehalten. Als Lösungsmittel kam Trichloraethan zur Anwendung. Die Resultate der Dichte- wie auch der Bindemittelgehaltbestimmungen stellen jeweils Mittelwerte von Doppelbestimmungen dar.
Die Dichtewerte der Bohrkerne liegen zwischen 2.484 und 2.501 gr/cm^3, mit einem Mittelwert von 2.492 gr/cm^3, diejenigen des Probemischgutes variieren zwischen 2.491 und 2.504 gr/cm^3 mit einem Mittelwert von 2.497 gr/cm^3. Der Bindemittelgehalt des Probemischgutes variiert zwischen 5.28 Massen-% für M3/T1 und 5.94 Masssen-% für M3/T2 und M1/T3, mit einem Mittelwert von 5.64 Massen-% für alle Mischungen. Die

grösste Abweichung eines Einzelwertes vom Mittelwert beträgt 0.36 Massen-% und die Abweichung des Mittelwertes vom Sollwert von 5.5 beträgt 0.14 Massen-%. Die Streuung des Bindemittelgehaltes der einzelnen Mischvarianten ist somit relativ gross.
In Abbildung 20 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. Die Werte für den Bindemittelgehalt sind dabei mit einer Linie verbunden und der Skalierung der linken, die Dichtewerte für das Probemischgut und der Bohrkerne der Skalierung der rechten Achse zugeordnet.

Abbildung 20 : Dichte und Bindemittelgehalt

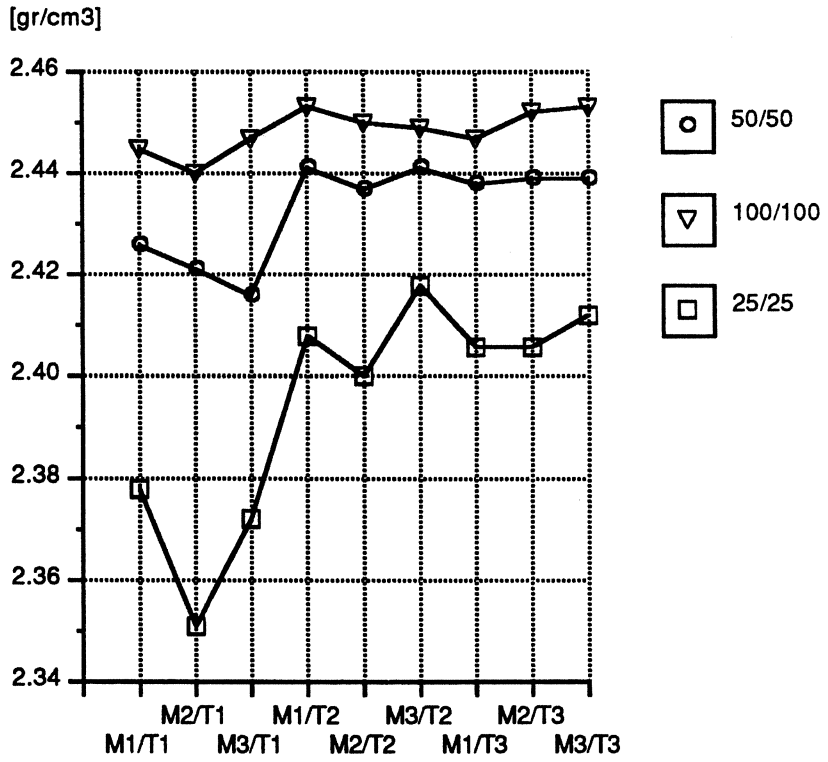


5.5.3 Raumgewicht Marshall-Prüfkörper

Das Raumgewicht wird definiert als Verhältnis der Masse eines Prüfkörpers zu seinem Volumen einschliesslich aller vorhandenen Hohlräume. Die Bestimmung des Raumgewichts erfolgte nach der Methode der Tauchwägung für Prüfkörper mit dichter Struktur und Bindemittel ohne flüchtige Anteile (SN 671 967).
Bestimmt wurde das Raumgewicht von Marshall-Prüfkörpern, welche mit beidseitig 25, 50 und 100 Schlägen verdichtet wurden. Die Resultate für das mittlere Raumgewicht von je drei Marshall-Prüfkörpern sind in Abbildung 21 dargestellt. Bestätigt wird die erwartete Zunahme des Raumgewichts mit zunehmender Verdichtungsarbeit. Interessanter sind die Resultate im

direkten Vergleich der einzelnen Mischvarianten. Die Voraussetzung für einen solchen Vergleich sind hier gegeben, da alle Prüfkörper in derselben Verdichtungsstufe unter denselben genormten Bedingungen verdichtet wurden. Auffallend bei diesem Vergleich sind die tiefen Raumgewichtswerte für die Mischungen mit T1, während die Werte der Mischungen mit T2 und T3 alle in einem höheren Bereich liegen. Aufgewertet wird dieses Ergebniss durch ein durchgehend übereinstimmendes Verhalten der Mischungen in den drei Verdichtungsstufen. Ein Einfluss der Mischtemperatur auf das Raumgewicht und somit auf das Verdichtungsverhalten ist klar ersichtlich.
Die Mischfolge hingegen beeinflusst das Raumgewicht bedeutend schwächer und im Vergleich der drei Verdichtungsstufen auch uneinheitlicher.

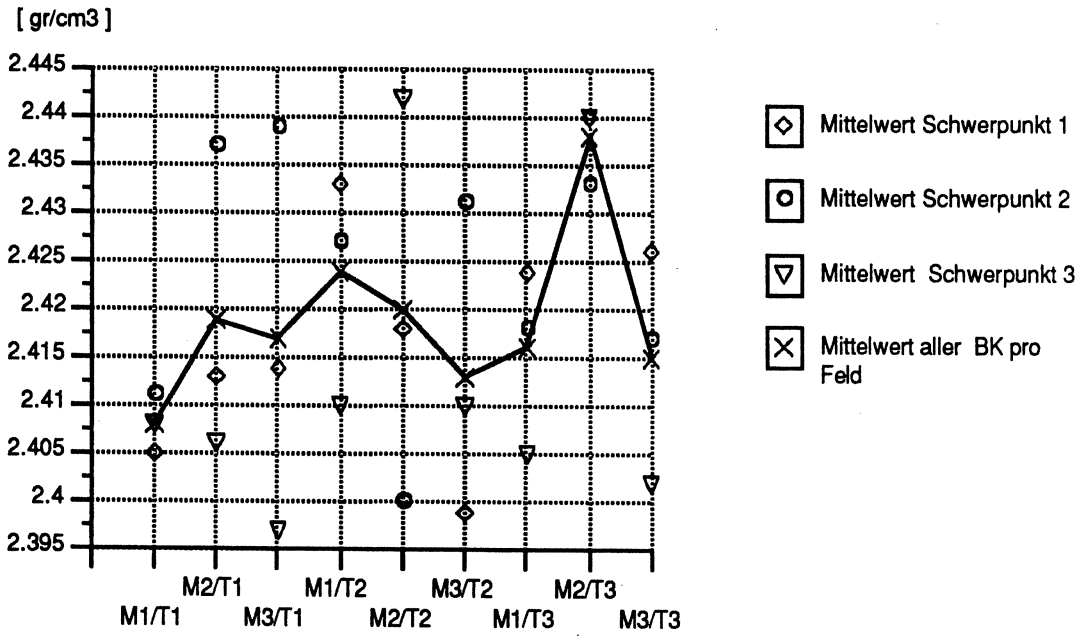
Abbildung 21 : Raumgewicht Marshall-Prüfkörper



5.5.4 Raumgewicht Bohrkerne

Die Raumgewichtsbestimmung der Deckschicht der Bohrkerne wurde nach demselben Verfahren wie bei den Marshall-Prüfkörpern durchgeführt.
Aus den Raumgewichtsmittelwerten der Mischvarianten kann kein direkter Bezug zur Mischtemperatur oder Mischfolge abgeleitet werden. Diese Tatsache mag bei Berücksichtigung der uneinheitlichen Misch- und Verdichtungstemperaturen erstaunen, kann aber durch die ebenfalls unterschiedliche und ausgleichend wirkende Verdichtungarbeit beim Einbau erklärt werden.

Abbildung 22 : Raumgewicht Bohrkerne



Die auffallend grossen Unterschiede innerhalb derselben Felder werden im Zusammenhang mit der uneinheitlichen Verdichtung stehen. Die Streuung der Resultate von Bohrkernen, welche von demselben Schwerpunkt entnommen wurden, ist bedeutend kleiner als die Streuung der Mittelwerte der drei Schwerpunkte innerhalb eines Feldes. Unter diesen schwierigen Voraussetzungen wird die Aussagekraft eines Vergleichs der Mittelwerte der neun Felder beträchtlich reduziert.

5.5.5 Hohlraumgehalt und Hohlraumfüllungsgrad

Aus den massgebenden Werten des Raumgewichtes (RM) und des spezifischen Gewichtes (S) wird der Hohlraumgehalt (H) berechnet :

$$H[\text{Vol-\%}] = \left(1 - \frac{RM}{S}\right) * 100$$

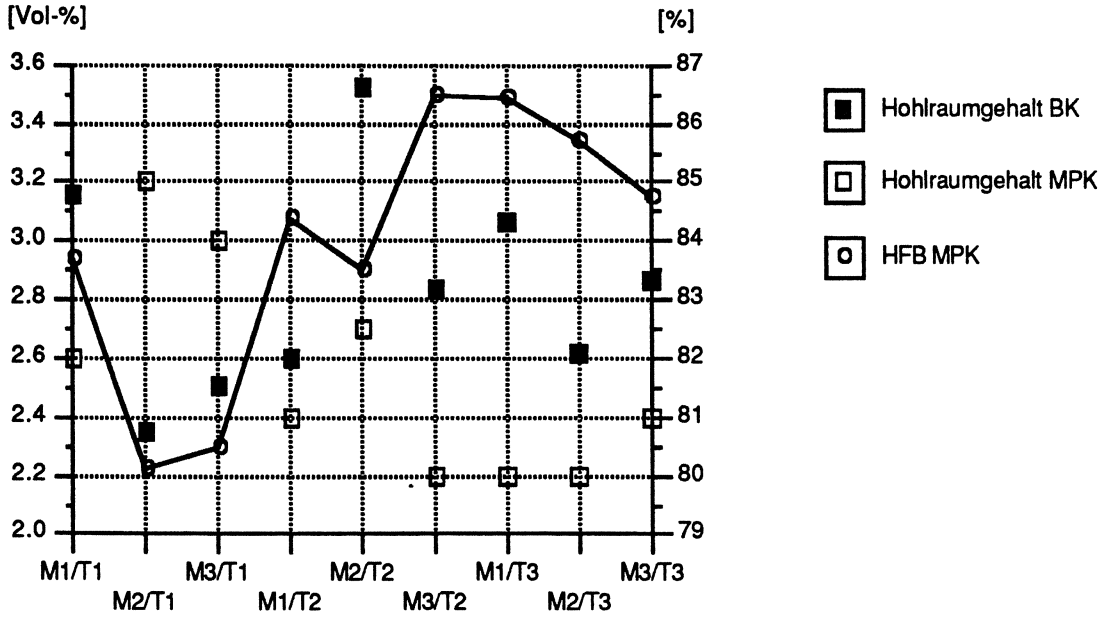
Mit dem Hohlraumgehalt und dem Bindemittelgehalt als volumetrische Grösse lässt sich der Grad der Ausfüllung des bindemittelfrei gedachten Hohlraumes der Mineralmischung mit Bindemittel, resp. bituminösen Mörtel berechnen :

$$HFB[\%] = \frac{B[\text{Vol-\%}]}{HMM} * 100 = \frac{B[\text{Vol-\%}]}{H + B[\text{Vol-\%}]} * 100$$

HFB = Hohlraumfüllungsgrad
B[%] = Bindemittelgehalt in Volumenprozent
HMM = Hohlraumgehalt der Mineralmischung im Marshall-Prüfkörper

Wie aus Abbildung 23 ersichtlich ist, liegt der Hohlraumgehalt der Bohrkerne wie auch jener der Marshall-Prüfkörper in einem tiefen bis sehr tiefen Bereich. Bei den Marshall-Prüfkörpern der Mischungen M2/T1 und M3/T1 fallen die im Vergleich zu den Bohrkernen deutlich höheren Hohlraumgehalte auf. Ein Zusammenhang mit den tiefen Marshall - Raumgewichten dieser beiden Mischungen wird dabei deutlich. Der niedere Hohlraumgehalt der Marshall-Prüfkörper bewirkt mit einem Mittel von 84% einen sehr hohen Hohlraumfüllungsgrad.

Abbildung 23 : Hohlraumgehalt



5.5.6 Verdichtungsgrad

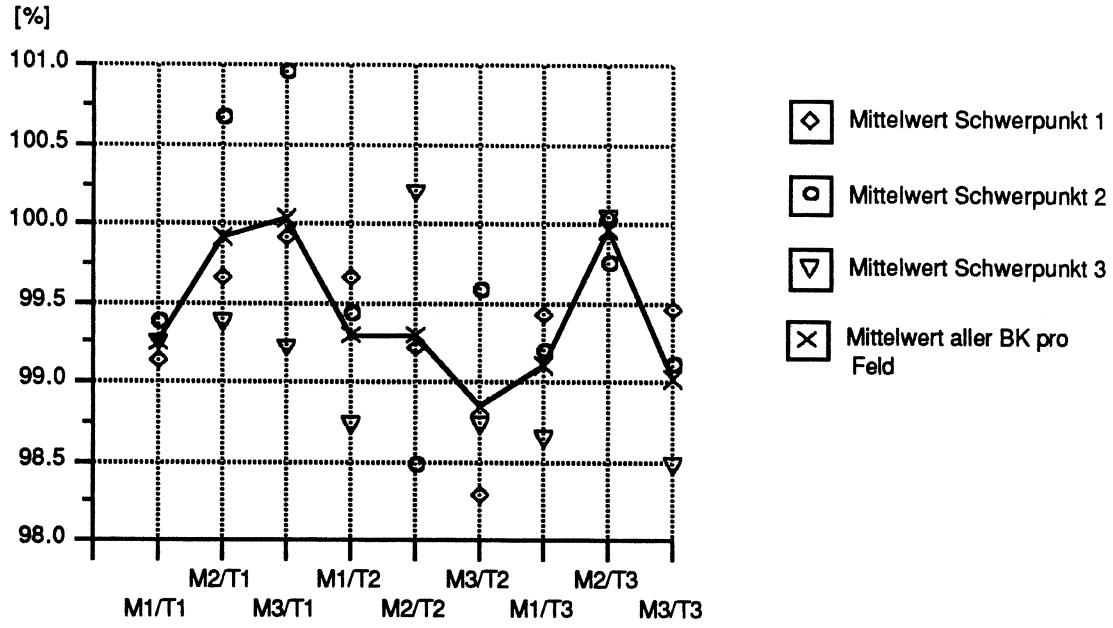
Der Verdichtungsgrad ist definiert als:

$$V = \frac{RM_{BK}}{RM_{MPK}} * 100\ \%$$

RM_{BK} entspricht dabei dem Raumgewicht der Oirginalschicht, also von den der Strasse entnommenen Bohrkernen. RM_{MPK} stellt das mittlere Raumgewicht von drei normgerecht hergestellten Marshallprüfkörpern dar.

Wie aus Abbildung 24 ersichtlich ist, liegt der Verdichtungsgrad bei allen Mischungen in einem hohen Bereich. Die Streuung der Bohrkernraumgewichte wirkt sich in vollem Umfang auf den Verdichtungsgrad aus, was zur Folge hat, dass die Mittelwerte der einzelnen Mischvarianten mit Vorsicht zu interpretieren sind. Der schwache Trend von abnehmendem Verdichtungsgrad mit abnehmender Mischtemperatur wird von der Mischung M2/T3 mit einem Verdichtungsgrad von annähernd 100% brüsk durchbrochen.

Abbildung 24 : Verdichtungsgrad



5.5.7 Verdichtungsparameter C

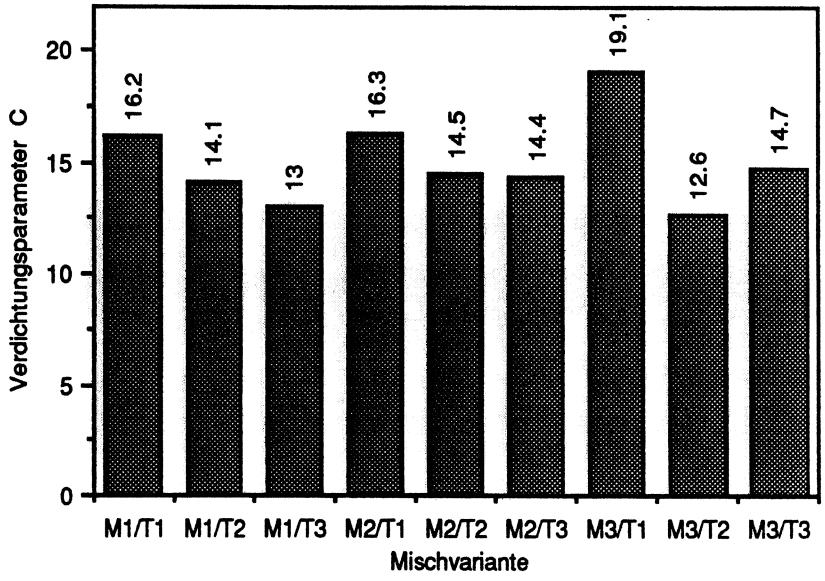
Für jede Mischung kann das Raumgewicht und der dazugehörende Hohlraumgehalt in Funktion der geleisteten Verdichtungsarbeit mit einer Kurve, welche Aussagen über die Verdichtungswilligkeit erlaubt, grafisch dargestellt werden. Durch die mathematische Formulierung dieser Kurve mit Hilfe einer Exponentialfunktion, welche sowohl für das Raumgewicht als auch für den Hohlraumgehalt Gültigkeit hat, besteht die Möglichkeit der Charakterisierung des Kurvenverlaufes durch den Verdichtungsparameter C nach Arand [17].
Zwischen Hohlraumgehalt und Verdichtungsarbeit besteht folgende Beziehung :

$$H_A = H_E + (H_O - H_E) * e^{-\frac{A}{C}} \text{ [Vol.-\%]}$$

H_A = momentaner Hohlraumgehalt
H_E = Endwert des Hohlraumgehaltes
H_O = Hohlraumgehalt vor Beginn der Verdichtung
A = geleistete Verdichtungsarbeit (Anzahl Schläge)
C = Parameter, der den Verdichtungswiderstandes des Mischgutes charakterisiert

Der Verdichtungsparameter C charakterisiert dabei die Geschwindigkeit der Dichtezunahme. Ein grosser Wert für C bedeutet schwer verdichtbar, d.h. grosse Verdichtungsarbeit um ein bestimmtes Dichteniveau zu erreichen, ein kleiner Wert für C bedeutet leicht verdichtbar.
In Abbildung 25 sind die Parameterwerte für jede Mischung in einem Balkendiagramm dargestellt. Des weiteren ist in Beilage 17 der Hohlraumgehalt und das Raumgewicht in Funktion der Verdichtungsarbeit aufgezeichnet.

Abbildung 25 : Verdichtungsparameter C

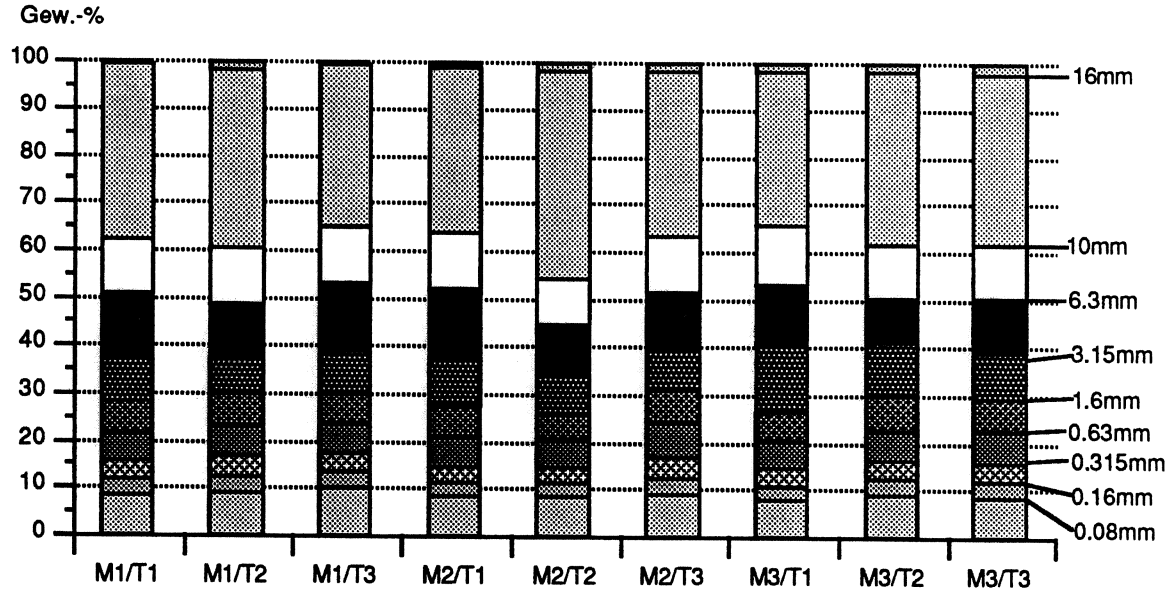


Obwohl hier vor allem der relative Vergleich zwischen den Verdichtungsparameter der neun Mischungen interessiert, muss festgehalten werden, dass die absoluten Werte sehr tief liegen, also alle Mischungen als leicht verdichtbar eingestuft werden können. Trotz der relativ kleinen Streuung, ist eine Tendenz zu höheren C-Werten für Mischungen mit der Mischtemperatur T1 festzustellen. Obwohl der Einfluss der Mischfolge auch hier bedeutend geringer ist, kann eine Tendenz zur Erhöhung der Verdichtungswilligkeit in der Reihenfolge M3 - M2 - M1 festgestellt werden.

5.5.8 Kornverteilung

Aus Abbildung 26 sind die Kornverteilungsbereiche der neun Mischungen ersichtlich. Die Resultate stellen Mittelwerte aus je zwei Siebdurchgängen dar. Die Kornverteilungsbereiche der einzelnen Mischungen liegen innerhalb der von der Norm SN 640 431 für einen AB 16s festgelegten Grenzwerte. Auffallend ist der für diese Belagssorte relativ hohe Fillergehalt. Mit 10 Gewichts-% Filler erreicht die Mischung M1/T3 die obere Grenze des Normbereichs.

Abbildung 26 : Kornverteilungsbereiche mit Wertetabelle



[mm]	M1/T1 [Gew.%]	M1/T2 [Gew.%]	M1/T3 [Gew.%]	M2/T1 [Gew.%]	M2/T2 [Gew.%]	M2/T3 [Gew.%]	M3/T1 [Gew.%]	M3/T2 [Gew.%]	M3/T3 [Gew.%]
>16	0.3	1.4	0.7	1.1	1.7	1.5	1.5	1.4	2.1
16	37.3	37.9	34.5	35.2	43.8	35	32.9	37.2	36.5
10	11.5	11.7	11.6	11.7	10.2	12.1	12.5	11	11
6.3	13.2	11.8	14.2	14.1	9.9	11.7	12.6	9.5	11.5
3.15	9.4	7.4	9.1	10.3	8.2	8.7	13.6	11.1	9.6
1.6	6.4	6.2	6.2	6.7	5.9	6.7	6.2	6.8	6.7
0.63	6.6	7	6.4	6.2	5.6	7.4	6.3	6.7	6.8
0.315	3.9	4.5	4.1	3.7	3.4	4.5	3.8	4.1	4
0.16	3.3	3.3	3.2	2.8	2.7	3.3	2.7	3.3	3.2
0.08	8.1	8.8	10	8.2	8.6	9.1	7.9	8.9	8.6

5.6 Analyse der Laborresultate

5.6.1 Spaltzug- und Marshallresultate

Im Mittelpunkt dieser Analyse steht der Versuch der Abgrenzung und Quantifizierung von Einflussfaktoren, welche die Resultate dieser Versuche in entscheidenden Masse beeinflussen. Zudem besteht die - wenn auch nicht unproblematische - Möglichkeit eines Vergleichs der Spaltzugresultate mit denjenigen des Marshallversuches.
Schliesslich sollen noch mit einer statistischen Analyse die signifikanten Unterschiede zwischen den Spaltzugfestigkeitsresultaten der einzelnen Mischvarianten aufgezeigt und die Ergebnisse unter statistischen Gesichtspunkten bewertet werden.

5.6.1.1 Einflussgrössen

Neben den sepzifischen Materialeigenschaften haben Versuchsanordnung und - durchführung einen direkten Einfluss auf die Grössen der Spaltzugfestigkeitswerte. Auf Grund der analogen Versuchsdurchführung fallen diese Einflussgrössen (z.B. Belastungsgeschwindigkeit, Versuchstemperatur) ausser Betracht. Auch bei den Materialeigenschaften können Bindemittelart und mechanische Eigenschaften des Mineralanteils als Einflussgrössen ausgeschlossen werden.

• Raumgewicht, Hohlraumgehalt
Um einen möglichen Einfluss des Raumgewichtes aufzeigen zu können, wurde die Spaltzugfestigkeit in Funktion des Raumgewichtes dargestellt. Diese Zuordnung erfolgte für die Versuche an den Marshall-Prüfkörper wie auch für die Versuche an den Bohrkernen. Bedingt durch die grosse Streuung der einzelnen Raumgewichtswerte der Bohrkerne wurden hier alle Werte dargestellt, während von den Versuchen an den Marschall-Prüfkörpern die Mittelwerte pro Mischvariante betrachtet wurden. Aus Beilage 7 und 8 wird ersichtlich, dass sowohl bei den Bohrkernen als auch bei den Marshall-Prüfkörpern jeweils bei den -10°C-Versuchen ein Einfluss des Raumgewichts auf die Spaltzugfestigkeit besteht. Ein zunehmendes Raumgewicht bewirkt eine erhöhte Festigkeit, welche sich durch eine höhere Spaltzugfestigkeit äussert. Die Spaltzugfestigkeitsresultate der 25- und 45°C-Versuche hingegen sprechen auf eine Änderung des Raumgewichtes nicht an.
Dieselbe Betrachtung kann mit den Steifigkeitswerten (SM) der Marshall-Prüfung durchgeführt werden. Auch hier stellt sich die Frage des Einflusses der Steifigkeitswerte durch das

Raumgewicht. Werden alle Steifigkeitswerte unabhängig der Verdichtung (25-, 50-, 100-Schläge) betrachtet, so ist eine klare Zunahme der Marshall-Steifigkeit bei Zunahme des Raumgewichts ersichtlich; eine Aussage, welche jedoch für die vorliegende Analyse von geringer Bedeutung ist, da nur der direkte Vergleich innerhalb derselben Verdichtungsstufe von Interesse ist. Bei einer solchen differenzierten Betrachtung aber kann, nicht zuletzt auf Grund der minimalen Streuung der Raumgewichtswerte und der kleinen Zahl der Versuche keine Beeinflussung der Steifigkeit durch das Raumgewicht erkannnt werden.
Durch den direkten Zusammenhang des Hohlramgehaltes mit dem Raumgewicht, welcher für die Bohrkerne wie auch für die Marshall-Prüfkörper in Beilage 10 ersichtlich ist, können die Aussagen über das Raumgewicht auch auf den Hohlraumgehalt ausgeweitet werden.

• Mischfolge, Mischtemperatur
In Bezug auf die Auswirkungen des Mischprozesses stellt sich die Frage, ob sich ein direkter Einfluss der Mischtemperatur oder der Mischfolge aus den Resultaten ableiten lässt.
Wird die Spaltzugfestigkeit der Bohrkerne und der Marshall-Prüfkörper aller neun Mischungen getrennt nach Mischfolge und Mischtemperatur analysiert (Beilage 4 und 5), kann festgestellt werden, dass weder von der Mischtemperatur noch von der Mischfolge bei Marshall-Prüfkörper und Bohrkernen ein durchgehend übereinstimmender Einfluss abgeleitet werden kann. Einzig bei der Versuchsreihe mit 45°C ist, mit Ausnahme der Mischung M3/T1, ein Trend zu höheren Spaltzugfestigkeitswerten bei höheren Mischtemperaturen festzustellen. Bei den vertikalen Verformungen hingegen wird ein klarer Einfluss der Mischtemperatur deutlich (Beilage 11) : Höhere Mischtemperaturen bewirken kleinere Verformungen.
Wird die Stabilität und der Fliesswert der Marshall-Versuche ebenfalls auf die Einflüsse von Mischtemperatur und Mischfolge untersucht, so ergeben sich ähnliche Aussagen. Eine hohe Mischtemperatur bewirkt vor allem bei den stärker verdichteten Prüfkörpern eine höhere Marshall-Stabilität und bei allen Prüfkörpern kleinere Marshall-Fliesswerte. Der Einfluss der Mischfolge auf die Resultate ist, verglichen mit dem Einfluss der Mischtemperatur, deutlich kleiner und ohne Richtung.

5.6.1.2 Vergleich Marshall - Spaltzug

Ein Vergleich von Ergebnissen unterschiedlicher Prüfungen an demselben Objekt kann bezüglich Aussagekraft und Gewichtung von Resultaten wertvolle Informationen liefern. Ein solcher Vergleich, der sich hier zwischen Marshall-Versuch und Spaltzugprüfung anbietet gestaltet sich aber problematisch, da die Marshall-Steifigkeit als Resultat eines empirischen

Prüfverfahrens mit komplizierter Spannungsverteilung im Prüfkörper keine direkte Beziehung zum einfachen Spannungszustand der Spaltzugprüfung hat. Bei einer Gegenüberstellung der vorliegenden Resultate wird dieser Einwand bestätigt, da keine Übereinstimmung der Marshall-Steifigkeit mit der Spaltzugfestigkeit der untersuchten Mischungen vorliegt.
Anders hingegen die Situation beim Vergleich der Marshall-Fliesswerte mit der vertikalen Verformung der Spaltzugprüfung. Verglichen wurden die Marshall-Fliesswerte aller Probekörper (25, 50, 100 Verdichtungsschläge) mit den vertikalen Verformungen $\Delta V/d$ der Spaltzugprüfung bei 25 und 45°C. Bei jeder von diesen sechs Vergleichsmöglichkeiten zeigt sich dasselbe Bild : Mischungen mit hohen Fliesswerten weisen auch grössere vertikale Verformungen beim Spaltzug auf (Beilage 12).
Bei der Frage nach den Ursachen dieses übereinstimmenden Verhaltens wird ein Zusammenhang mit der Mischtemperatur deutlich : Werden die mittleren Fliess- resp. Verformungswerte miteinander verglichen, bewirkt eine höhere Mischtemperatur übereinstimmend eine kleinere Verformung (Beilage 11).
Auffallend ist das durchgehend schlechtere Verhalten der Bohrkerne gegenüber den Marshall -Prüfkörpern. Die Bohrkerne verzeichnen in allen drei Versuchstemperaturen kleinere Spaltzugfestigkeiten sowie die grösseren Verformungen, wobei sich die Unterschiede mit zunehmender Versuchstemperatur vergrössern. Solche Differenzen wurden ebenfalls in Studien, welche sich eingehend mit dem Spaltzugversuch beschäftigen festgestellt und können mit der unterschiedlichen Verdichtungsart erklärt werden [24].

5.6.1.3 Statistische Analyse

Mit einer statistischen Analyse soll untersucht werden, ob sich die mittleren Spaltzugfestigkeitswerte der einzelnen Mischvarianten signifikant voneinander unterscheiden. Mit dem Verfahren nach Student wurde die Hypothese "die Mittelwerte sind gleich" gegen die Alternative "die Mittelwerte sind signifikant verschieden" getestet, wobei für das Signifikanzniveau (Fehler erster Art) 5% angenommen wurde. In Beilage 6 sind die Resultate dieser Analyse grafisch dargestellt. Wie daraus ersichtlich ist, wird die Hypothese bei den Versuchen mit -10°C mehrheitlich angenommen, während sie bei den Versuchstemperaturen von +25°C und +45°C zum grössten Teil abgelehnt wird. Dies bedeutet, dass bei den beiden höheren Versuchstemperaturen zwischen den Spaltzugfestigkeitswerten, welche Mittelwerte einzelner Prüfserien darstellen, mehrheitlich signifikante Unterschiede vorliegen. Vor allem für die Bohrkernresultate, bei welchen die Unterschiede zwischen den einzelnen Mischvarianten sehr klein sind, ist dies eine interessante Aussage, welche mit den geringen Streuungen der Versuchsresultate innerhalb derselben Mischvariante zu begründen ist. Bei Berücksichtigung dieser statistischen Aspekte werden die Resultate der 25- und 45°C-Versuche gegenüber den -10°C-Versuchen aufgewertet.

5.6.2 Prüfverfahren PK-BSA

5.6.2.1 Zielsetzung

Ziel dieser statistischen Auswertung ist es, mögliche Einflüsse auf die ermittelten mechanischen Kennwerte herauszufinden. Als Einflussgrössen in Betracht gezogen werden :

- als geometrische Grösse die Höhe des Prüfkörpers; alle anderen Abmessungen des Prüfkörpers änderten über die ganze Versuchsserie nicht und müssen somit nicht berücksichtigt werden
- als volumetrische Grösse das Raumgewicht
- als Einflussgrössen der Herstellung die Mischtemperatur (T1,T2,T3) und Mischfolge (M1,M2,M3).

Als zu erklärende Zielgrösse wurden die Module der Masterkurve für 20 °C bei Periodenzeiten von 0.01, 1, 100 Sekunden und einem Tag sowie der Scherempfindlichkeitsparameter gewählt. Diese Grössen decken einen wichtigen Bereich der Masterkurve ab und beschreiben ihre Form. Zudem sind sie repräsentativ für gemessene Werte und stellen keine, durch Fehler leicht beeinflussbare extrapolierte Werte dar.

Eine erste Auswertung mit den Werten aller untersuchten Prüfkörper ergab in nur wenigen Fällen signifikante Korrelationen. Ein Problem stellte auch die Wertung der Mischarten und deren Einbezug in eine multiple Regression dar. Nötig wurde damit ein Aufbereiten der Daten.

5.6.2.2 Aufbereiten der Daten

• Bewerten der Mischarten

Den Mischarten mussten unterschiedliche Wertungen zugeordnet werden. Am einfachsten geschieht das mittels einer Modellvorstellung. Man kann beispielsweise die Frage stellen, ob sich statistisch eine bestimmte Reihenfolge der Mischarten nachweisen lässt, indem etwa angenommen wird, Mischart 1 sei besser als 2 und diese wiederum besser als 3. Diese Rangfolge wäre dann das Modell, das es zu prüfen gilt. Mit einer etwas burschikosen Statistik kann dann der Mischart 1 der Wert 3, der Mischart 3 der Wert 1 (den schlechtesten) und der Art 2 der mittlere Wert 2 zugeordnet werden. Dann wird geprüft, ob eine multiple Korrelation zwischen Mischart, Prüfkörperhöhe, Raumgewicht und einem der Zielwerte vorliegt. Resultiert für das Modell eine signifikante positive Korrelation, so kann es als nachgewiesen

angenommen werden. Resultiert eine signifikante negative Korrelation, so gilt das umgekehrte Modell. Ist die Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen der Korrelation kleiner als 95%, so kann keine Korrelation angenommen werden. Ähnlich lässt sich ein Modell formulieren, gemäss dem eine Mischart besser als die andern beiden ist. Eine sich ergebende negative Korrelation dieses Modells ergäbe die Aussage, die Mischart sei schlechter als die beiden andern.

• Ausschluss stark abweichender Prüfkörper

Die Inspektion der Resultate zeigte, dass die Schwierigkeit, gesicherte Korrelationen nachzuweisen, zu einem erheblichen Teil auf das Vorliegen einiger in ihrem Verhalten stark vom Normalen abweichender Prüfkörper zurückzuführen war. Es wurde deshalb eine Liste all jener Prüfkörper erstellt, welche einen stark von der Gruppe abweichenden Wert für den Modul von 0.01 s hatten. Es waren dies die Prüfkörper 313, 424, 512, 603, 701 und 813. Dann wurde untersucht, inwiefern diese Prüfkörper auch sonst Anzeichen für das Vorliegen eines Fehlers aufwiesen. Es ergab sich folgender Befund:

Nr.	zusätzliche Anzeichen
313	extrem niedriges Raumgewicht
424	starke Streuung und extreme Differenz zwischen den Aesten bei -5 und 0 °C
512	starke Streuung
603	abnormes Temperaturverhalten
701	keine
813	Fehler bei der Nummerierung der Probe, Prüfkörper möglicherweise aus einer anderen Gruppe.

Mit einer Ausnahme konnte in jedem der erwähnten Fälle ein oder mehrere Anzeichen für das Vorliegen eines Störeinflusses oder Fehlers gefunden werden. Es wurde deshalb angenommen, die Wahl des Kriteriums für das Erkennen einer Abweichung sei brauchbar und die erwähnten Prüfkörper wurden von der Bewertung ausgeschlossen.

• Ausschluss der Zielgrösse des Moduls für die Periodenzeit von einem Tag

Dieser Modulwert ergab sowohl vor wie nach dem Ausschluss der stark abweichenden Prüfkörper wenig gesicherte Korrelationen. Die Zielgrösse wird deshalb nicht weiter berücksichtigt.

5.6.2.3 Ergebnisse der Prüfung auf das Vorliegen multipler Regression

In einem ersten Schritt wurde der kombinierte Einfluss von Mischtemperatur, Raumgewicht und Prüfkörperhöhe auf die beschriebenen Zielgrössen durchgeführt. Das verwendete Regressionsprogramm errechnete dann den 95%-Bereich für die Zielgrösse, die linearen Koeffizienten der drei Einflussgrössen und ihren 95%-Bereich, sowie die Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen eines Einflusses von jeder der drei Einflussgrössen. Es ergaben sich folgende Wahrscheinlichkeiten für das Vorliegen eines Einflusses auf die Module:

Zielgrösse / % / Einflussgrösse	0.01	1	100
Mischtemperatur	97.4	97.7	96.2
Prüfkörperhöhe	65.8	50.7	47.8
Raumgewicht	87.8	71.3	93.9

ohne Prüfkörperhöhe

Mischtemperatur	97.1	98.5	97.4
Raumgewicht	83.4	79.4	96.2

Auf den ersten Blick ist zu erkennen, dass zwischen Prüfkörperhöhe und den Modulen keine Beziehung besteht. Die Prüfkörperhöhe wurde deshalb ausgeschlossen und nur noch der kombinierte Einfluss der beiden anderen Grössen betrachtet. Für das Raumgewicht ergab sich, wie die obige Tabelle zeigt, in einem Fall eine Wahrscheinlichkeit von über 95% für das Vorliegen einer Korrelation, in den andern Fällen ist keine Korrelation beweisbar.
Im weiteren wurde untersucht, welche Mischfolge kombiniert mit dem Einfluss von Mischtemperatur und Raumgewicht die erhaltenen Modulwerte am besten erklären kann. Es zeigte sich nur für eine einzige Annahme eines Mischfolgeeinflusses eine Tendenz zum Vorliegen einer statischen Signifikanz, nämlich, dass Mischfolge 3 die grössten und Mischfolge 1 die kleinsten Modulwerte liefert.

Die Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen der verschiedenen Korrelationen ergibt sich wie folgt:

Zielgrösse s % / Einflussgrösse	0.01	1	100
Mischtemperatur	98.9	99.6	99.1
Raumgewicht	81.0	85.9	97.5
Mischfolge	87.7	92.7	89.6

Der Einfluss auf den Scherempfindlichkeitsparameter zeigt ein uneinheitliches Bild. Sowohl Mischtemperatur wie Raumgewicht korrelieren einzeln mit diesem Parameter, es ergibt sich aber keine Korrelation bei der Kombination der beiden Einflussgrössen. Ein Einfluss der Mischfolge auf diesen Parameter konnte nicht nachgewiesen werden.

5.6.2.4 Diskussion der Resultate

• Mischtemperatur

Erhöhte Mischtemperatur führt generell zur Vergrösserung der Module, also zu einer Verhärtung. Der Einfluss ist für alle betrachteten Module nachweisbar und zwar unabhängig davon, ob die Mischtemperatur als einzelne Einflussgrösse oder in Zusammenhang mit anderen Einflussgrössen untersucht wird. Die Mischtemperatur stellt den wichtigsten und eindeutigsten Einfluss im betrachteten System dar.

•Mischfolge

Der Einfluss der Mischfolge kann nicht sicher nachgewiesen werden. Die Wahrscheinlichkeit für das Zutreffen des gewählten Modells schwankt um 90%. Trotzdem legt die Untersuchung einen Einfluss nahe. Die statistische Untersuchung weist jedesmal in die gleiche Richtung und favorisiert das gleiche Modell. Ist die sich ergebende Reihenfolge, Mischfolge M3 wirkt am meisten und Mischfolge M1 am wenigsten verhärtend, sinnvoll, so können die Resultate als starker Hinweis für einen entsprechenden untergeordneten Einfluss herangezogen werden.

•Raumgewicht

Der Einfluss des Raumgewichtes ist beim Modul für eine Periodenzeit von 100 s deutlich nachweisbar, er deutet sich für die anderen beiden Module nur an. Dabei ist bei einer Periodenzeit von 0.01 s der Einfluss des Raumgewichtes positiv, d.h ein zunehmendes Raumgewicht und damit auch ein abnehmender Hohlraumgehalt führen zu einem grösseren Modul. Für die beiden anderen Periodenzeiten ist der Einfluss negativ, d.h. der Modul nimmt mit steigendem Raumgewicht und abnehmendem Hohlraumgehalt ab. Physikalisch ist diese Tendenz sinnvoll. Für sehr kurze Belastungszeiten reagieren die Mischungen mit einem hohen Hohlraumfüllungsgrad durch die versteifende Wirkung des Bitumens härter. Für längere Belastungszeiten treten dann die viskosen Eigenschaften des Bindemittels mit einer Steifigkeitsabnahme in den Vordergrund. Mit der gegebenen Prüftemperatur von 20°C gibt es somit eine Belastungszeit, sie liegt nach den vorliegenden Untersuchungen bei etwa 0.1 s, bei welcher sich die beiden Effekte kompensieren und das Raumgewicht des Belages keinen Einfluss hat. Dies erklärt nun auch, warum für die nahe bei diesem Punkt liegenden Belastungszeiten von 0.01 und 1s die Signifikanzgrenze von 95% nicht erreicht wird. Beide Effekte heben sich in wesentlichem Mass auf, was ihren Nachweis erschwert.

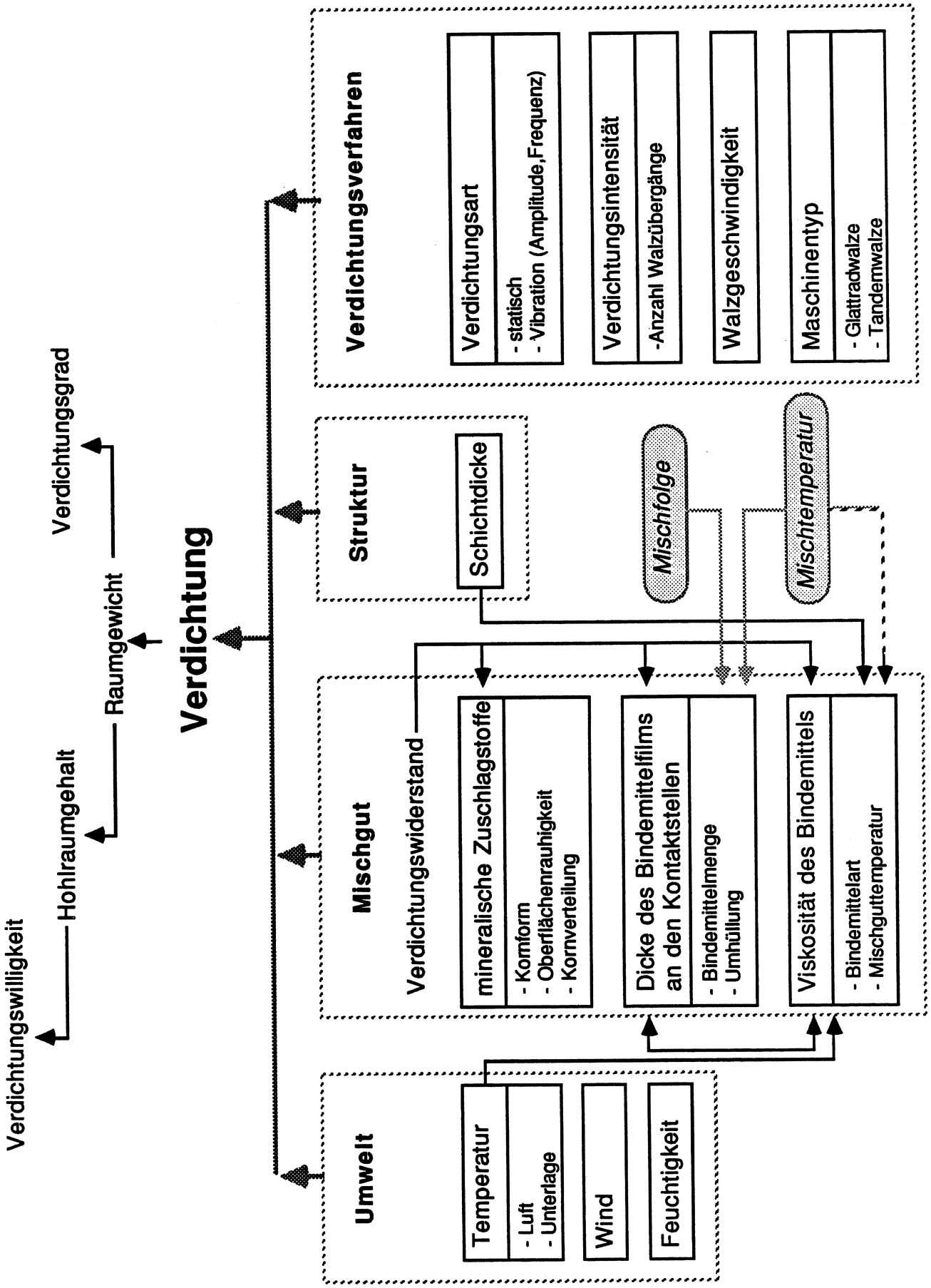
5.6.2 Mischgutuntersuchungen

5.6.2.1 Verdichtung

Durch den direkten Zusammenhang des Raumgewichtes und des Hohlraumgehaltes mit der Verdichtung steht hier die Analyse des Verdichtungsverhaltens im Mittelpunkt. Die Verdichtung, welche entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften einer bituminösen Schicht hat, ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Neben dem Verdichtungsverfahren, den Umwelteinflüssen und der Struktur spielt der Verformungswiderstand des zu verdichtenden Materials eine zentrale Rolle. Dabei kommen der Einfluss der inneren Reibung der mineralischen Zuschlagstoffe (Kornform, Kornabstufung, Oberflächenrauhigkeit), die Dicke des Bindemittelfilms an den Kontaktstellen, sowie die Viskosität des Bindemittels in Funktion der Temperatur zu tragen. Ein Teil dieser Einflussfaktoren kann im vorliegenden Fall als Ursache für ein unterschiedliches Verhalten im Vergleich der verschiedenen Mischvarianten ausgeschlossen werden. Im Rahmen der Untersuchung des Mischprozesses mit der spezifischen Frage des Einflusses der Mischtemperatur und der Mischfolge gilt somit das Hauptaugenmerk dem Bindemittel mit seiner Konsistenz und dem Bindemittelfilm auf der Oberfläche der mineralischen Anteile.

In Abbildung 27 sind neben den Kennwerten die Einflussgrössen auf die Verdichtung mit den Ansatzpunkten für den Mischfolge- und Mischtemperatureinfluss schematisch dargestellt.

Abbildung 27 : Einfluss- und Kenngrössen für die Verdichtung



Die Voraussetzungen für einen Vergleich des Verdichtungsverhaltens innerhalb der Marshall -Prüfkörper sind grundsätzlich verschieden von jenen für einen Vergleich innerhalb der Bohrkerne. Zwischen Bohrkernen und Marshall-Prüfkörpern bestehen grundsätzlich unterschiedliche Verdichtungsbedingungen. Während die Marshall-Prüfkörper alle unter Normbedingungen, d.h. mit einer einheitlichen Temperatur von 155°C und einer klar definierten Verdichtungsarbeit von 25, 50 oder 100 Schlägen verdichtet wurden, haben bei den Bohrkernen neben dem Verdichtungswiderstand des Mischgutes das Verdichtungsverfahren, die Umwelt und die Struktur einen bedeutenden Einfluss. Die Vielzahl der variablen Einflussgrössen bei den Bohrkernen verdeutlicht die Schwierigkeit eines Vergleiches der Mischungen untereinander, besonders unter einer isolierten Betrachtung des Einflusses des Mischprozesses.

• Bohrkerne

Die Dicke der einzubauenden Schicht kann im Zusammenhang mit der temperaturabhängigen Bindemittelviskosität einen Einfluss auf das Verdichtungsverhalten haben. Bedingt durch die raschere Abkühlung des Mischgutes beim Einbau von dünneren Schichten und der damit verbundenen Erhöhung des viskosen Widerstandes wird die Verdichtung erschwert.

Um einen allfälligen Einfluss der Schichtdicke auf die Verdichtung und somit auf das Raumgewicht aufzuzeigen, wurden die Raumgewichtswerte mit den dazugehörenden Bohrkernhöhen, getrennt nach den drei Temperaturen T1, T2, T3 in einem Punktdiagramm dargestellt (Beilage 16). Die Bohrkernhöhen entsprechen bis auf den Schnittverlust von 2-4 mm der Schichtdicke der Deckschicht.

Wie aus Beilage 16 hervorgeht kann bei den Mischungen mit T1 und T2 keine Korrelation zwischen den Raumgewichtwerten und der Bohrkernhöhe festgestellt werden,während bei den Mischungen mit T3, bei Ausschluss einer ausreisserverdächtigen Fünfergruppe (erhöhte Verdichtungsarbeit ?) eine schwache, praktisch unbedeutende Korrelation besteht.

Insgesamt betrachtet kann der Einfluss der Schichtdicke auf die Verdichtung in diesem Fall als gering bezeichnet werden und als Hauptursache eines unterschiedlichen Verdichtungsverhaltens ausgeschlosssen werden.

Der Einsatz von verschiedenen Walztypen, der Einsatz statischer Verdichtung oder Verdichtung mit Vibration, die variable Anzahl Walzübergänge und unterschiedlichen Walzgeschwindigkeiten reduzieren die Möglichkeiten eines Vergleiches zwischen den einzelnen Mischvarianten beträchtlich. Bedingt durch das uneinheitliche Verdichtungsverfahren, welches schon innerhalb der einzelnen Versuchsfelder zu grossen Unterschieden führt, fehlt die für einen solchen Vergleich notwendige Ausgangsbasis. Sinnvolle Aussagen bezüglich des Verdichtungswiderstandes des Mischgutes unter Berücksichtigung der Einflüsse des Mischprozesses sind unter solchen Umständen nur schwer möglich.

• Marshall-Prüfkörper

Auf Grund der einheitlichen Verdichtungsbedingungen im Labor fallen die Einflüsse aus Struktur, Verdichtungsverfahren und Umwelt für die Marshall-Prüfkörper ausser Betracht. Der Einflussbereich auf die Verdichtung und den damit verbundenen Kenngrössen beschränkt sich hier auf den Verdichtungswiderstand des Mischgutes.

Einen wichtigen Einfluss auf den Verdichtungswiderstand hat die Bindemittelmenge. Obwohl der Bindemittelgehalt der neun untersuchten Mischungen um maximal nur 0.6 Gewichtsprozent variiert, geht aus der Darstellung in Beilage 18 hervor, dass der Verdichtungsparameter C durch diese Variation beeinflusst wird. Höherer Bindemittelgehalt bewirkt eine Reduktion des Verdichtungswiderstandes. Durch diese Tatsache werden die Aussagen bezüglich des Einflusses des Mischprozesses auf die Verdichtung, insbesondere auf den Verdichtungsparameter C etwas relativiert. So kann der kleine Verdichtungsparameter der Mischungen M3/T2 und M1/T3 teilweise mit dem etwas höheren Bindemittelgehalt erklärt werden und der höhere Verdichtungswiderstand der Mischung M3/T1 kann mit dem tieferen Bindemittelgehalt in Zusammenhang stehen. Bezüglich des Mischtemperatureinflusses bleibt dennoch die Tendenz bestehen, dass höhere Mischtemperaturen eine Reduktion der Verdichtungswilligkeit bewirken.

5.6.3.2 Bindemittel

Im Zusammenhang mit dem Mischprozess werden zwei Einflussmöglichkeiten deutlich : Der Einfluss der Bindemittelmenge und der Einfluss der mischprozessabhängigen Veränderung der Bindemitteleigenschaften.

Die perfekte Umhüllung der Mineralstoffe durch das Bindemittel ist hauptsachlich von der Bindemittelmenge abhängig. Je kleiner der Bindemittelgehalt, desto schwieriger wird es, die gesamte Mineraloberfläche zu bedecken. Der mittlere Bindemittelgehalt liegt bei den geprüften Mischungen relativ hoch, d.h. die Voraussetzung für eine möglichst vollständige Umhüllung ist bei allen Mischvarianten gegeben. Dieser hohe Bindemittelgehalt könnte bewirkt haben, dass der Einfluss der verschiedenen Mischfolgen und deren Auswirkungen auf die Umhüllung abgeschwächt wurde. Möglicherweise würde der Mischfolgeeinfluss bei einem kritischeren, tieferen Bindemittelgehalt an Bedeutung gewinnen.

Die Veränderung der Bindemitteleigenschaften in Richtung Verhärtung des Bindemittels in Funktion der Mischtemperatur und in Abhängigkeit der Mischzeit wurde schon in mehreren Untersuchungen nachgewiesen [11] [12] [13]. Eine solche Verhärtung kann auch von den hier vorliegenden mechanischen und volumetrischen Materialkennwerten abgeleitet werden. Die Mischungen, welche mit den höheren Temperaturen gemischt wurden, zeigen deutlich kleinere Verformungen (Marshall-Fliesswert, vertikale Verformung Spaltzug) und ein steiferes Verhalten (höhere Modulwerte, höhere Marshall-Stabilität, kleinere Verdichtungswilligkeit).

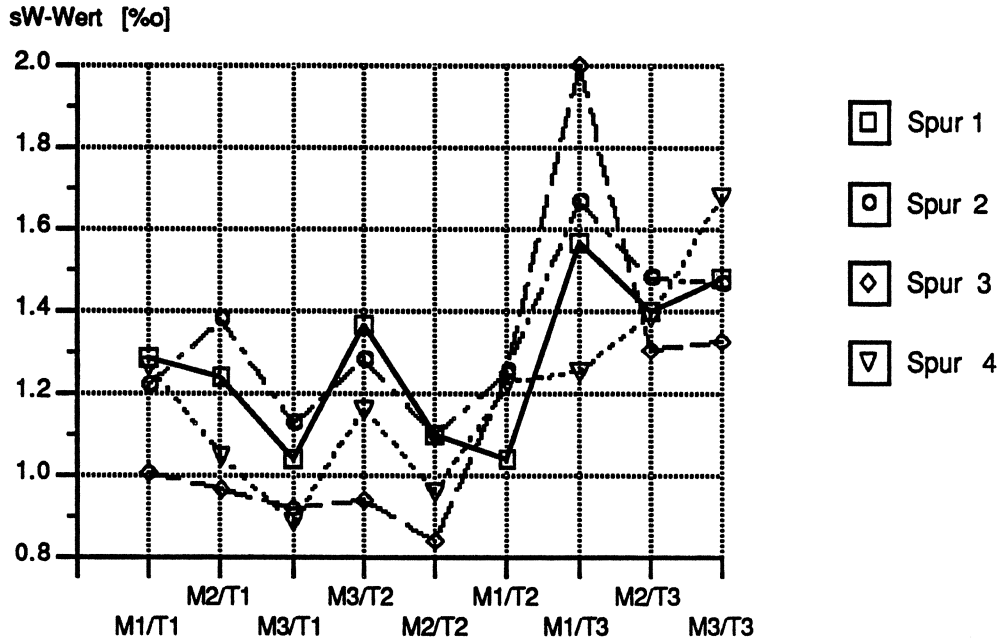
6. Oberflächeneigenschaften

Die Erfassung der Auswirkungen der verschiedenen Mischvarianten auf die erzielbare Qualität der Oberflächeneigenschaften der fertigen Schicht wurde der Forschungsarbeit als Zielsetzung zugrunde gelegt. Zu diesem Zweck wurden auf dem fertigen Belag Ebenheits- und Griffigkeitsmessungen durchgeführt.

6.1 Ebenheitsmessung

Drei Monate nach dem Einbau der Deckschicht führte das IVT auf der T6 Ebenheitsmessungen im Längsprofil nach dem Winkelmessverfahren durch. Als Messgerät wurde das Winkelmessgerät ISETH des IVT eingesetzt. Es beruht auf elektronischer Wegmessung, wobei es in der geometrischen Konzeption und Aufbereitung der Messwerte voll der Norm SN 640 520a entspricht. Die Auswertung und Beurteilung der Messergebnisse erfolgte nach der Norm SN 640 521a. Als kennzeichnender Wert der Ebenheit ist die Standardabweichung (sW) der Winkelwerte (W) definiert. Die Standartabweichung wird mit einem Computer aus 40'000 einzelnen Winkelwerten pro Messkilometer berechnet, welche in digitaler Form auf Magnetband gespeichert werden.
Gemessen wurde die Längsebenheit über die gesamte Einbaulänge zwischen Bundkofen- und Talmattviadukt, wobei je zwei Messspuren im Normal- und Überholstreifen lagen. Um die Längsebenheit der Versuchsfelder direkt miteinander vergleichen zu können, wurde der gesamte Messbereich entsprechend den Längen der Felder unterteilt und für jedes Feld ausgewertet. Die sW-Werte der einzelnen Felder aller vier Messspuren über die ganze Messstrecke aufgezeichnet ergeben folgendes Bild :

Abbildung 28 : sW-Werte



Der mittlere sW-Wert der vier Spuren über alle neun Versuchsfelder beträgt 1.28‰. Dieser Wert liegt unter dem Abnahmewert von 1.8‰ für Strassen mit einer Ausbaugeschwindigkeit gleich und grösser 80 km/h. Die Längsebenheit der gesamten Versuchsstrecke kann als gut bezeichnet werden.

Bei den sW-Werten der einzelnen Felder fallen die höheren Werte der Felder mit T3 auf. Dabei überschreitet das Feld M1/T3 in der dritten Messspur mit einem sW-Wert von 2.0‰ den Abnahmewert knapp. Hingegen liegt das Mittel der vier Spuren für dieses Feld mit sW = 1.6‰ unter dem Abnahmewert.

Um die Einflüsse der drei Mischtemperaturen bzw. Mischfolgen auf die Ebenheit besser hervorzuheben, wurden die Resultate nach Temperaturen und Folge getrennt dargestellt.

Abbildung 29 : sW-Werte nach Temperaturen geordnet

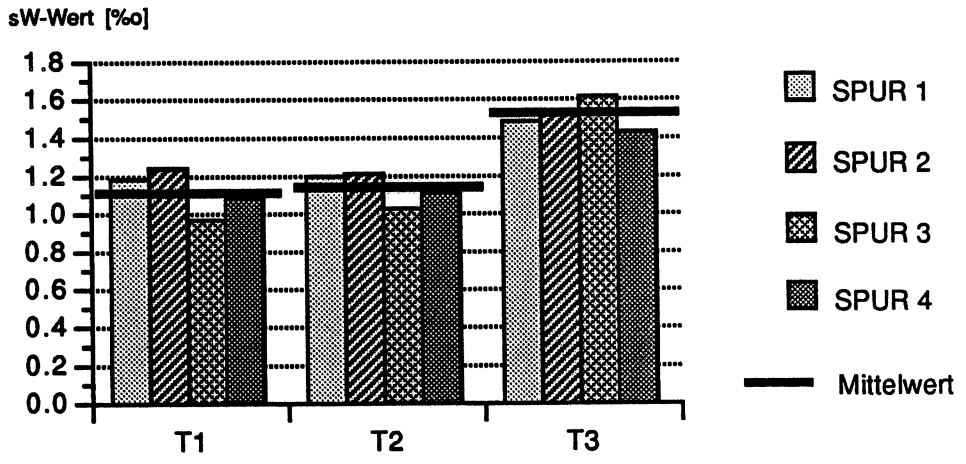
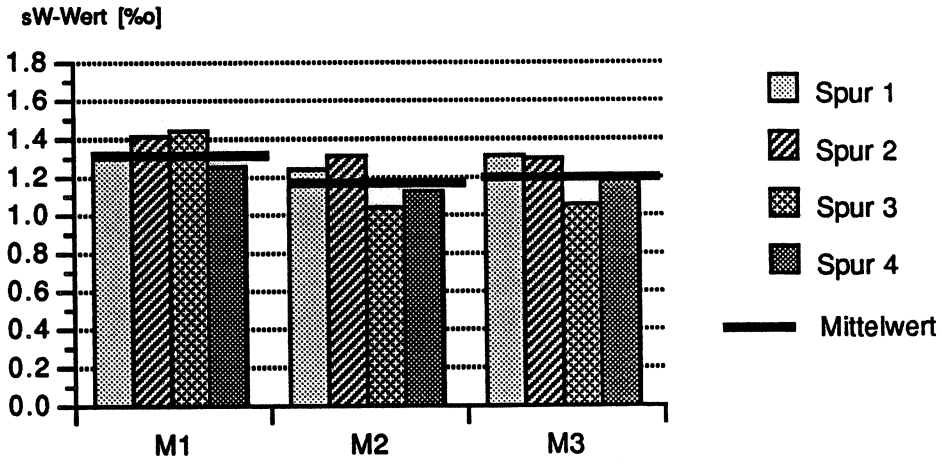


Abbildung 30 : sW-Werte nach Mischfolgen geordnet



Während sich die Mittelwerte der Mischfolgen mit 1.36‰ für M1, 1.18‰ für M2 und 1.22‰ für M3 relativ gering unterscheiden, zeigt sich bei Vergleich der Mittelwerte der Mischtemperaturen ein deutlich höher sW-Wert für T3. Die Versuchsfelder, welche mit der niederen Temperatur gemischt und eingebaut worden sind, weisen eine schlechtere Längsebenheit auf. Der Grund für die Beeinflussung der Längsebenheit liegt hier weniger in einem qualitativen Unterschied des Mischgutes als Folge des Mischprozesses, sondern mehr in der temperaturabhängigen Verarbeitbarkeit des Mischgutes und der gewählten Einbautechnik. Ob schlussendlich neben der Veränderung in der Verarbeitbarkeit auch die Veränderung im Verdichtungsverfahren mit verstärktem Einsatz der Vibration bei den tieferen Temperaturen dieses Resultat beeinflusst hat, bleibt ungewiss.

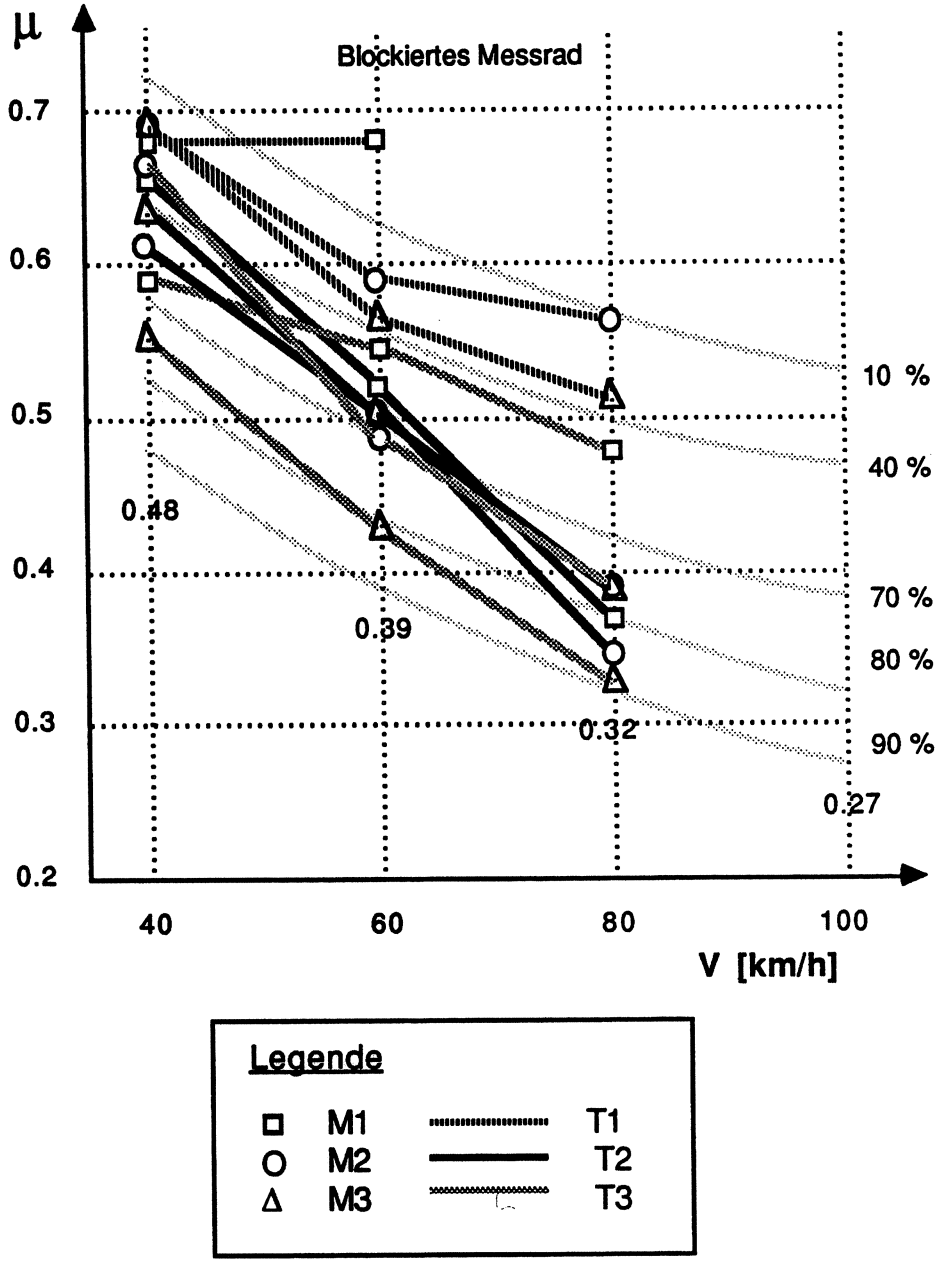
6.2 Griffigkeitsmessung

Ein Monat nach dem Einbau wurde die Griffigkeit auf der Versuchsstrecke mit dem Skiddometer des IVT gemessen. Die Messungen erfolgten in Fahrtrichtung Lyss mit Messgeschwindigkeiten von 40, 60 und 80km/h bei blockiertem Messrad, sowie mit 40km/h und 60km/h bei gebremsten Messrad (Schlupf ca.14%). Die Messbedingungen entsprachen der Norm SN 640 510. Da die einzelnen Versuchsfelder zu kurz sind, um bei normaler Messfahrt aussagekräftige Griffigkeitswerte zu messen, wurden pro Messbedingung mehrere Messfahrten durchgeführt. Die dadurch erhaltene grössere Anzahl von Messwerten erlaubt eine objektive Griffigkeitsbeurteilung für die einzelnen Felder. Um Vergleichswerte zu erhalten, bei denen die örtlichen Gegebenheiten berücksichtigt werden, wurden auf der Gegenfahrbahn mit demselben Deckbelag (AB 16s) Messfahrten mit 40km/h und 60km/h durchgeführt.

Die qualitative Beurteilung der Belagsgriffigkeit erfolgte durch das am IVT angewandte Schema, welches auf der Häufigkeitsverteilung der Skiddometerwerte, der Norm und den Erfahrungen des ISETH beruht. Da es wegen der witterungsbedingten Griffigkeitsschwankungen und der Messgenauigkeit nicht sinnvoll ist, mittels nur eines Richtwertes eine Grenze zwischen dem genügenden und dem ungenügenden Bereich zu legen, wird ein Übergangsbereich verwendet. Angesichts des niedrigen Griffigkeitsniveaus in diesem Bereich (mehr als 85% aller Strassenbeläge haben bessere Griffigkeit) werden die darin befindlichen Messwerte als "schlecht" beurteilt, obwohl sie noch über dem Richtwert der Norm SN 640 511 b liegen. Messwerte, die unter dem Richtwert liegen, werden hingegen als "sehr schlecht" bezeichnet.

Die Messergebnisse sind nachfolgend graphisch in Abbildung 31 und tabellarisch in Beilage 20 dargestellt.

Abbildung 31 : Messergebnisse und Häufigkeitsverteilung der Skiddometerwerte bei blockiertem Messrad



Für die Griffigkeit bei blockiertem Messrad (Normbedingungen) lassen sich in Bezug auf den Mischguttemperatureinfluss folgende Aussagen machen :

- T1 ist für die Griffigkeit eindeutig besser als T2 oder T3.
- Bei T2 bestehen erhebliche Probleme bezüglich Makrotextur (steiler Griffigkeitsabfall mit zunehmender Geschwindigkeit).

- Bei T3 sind die Ergebnisse sehr unterschiedlich. Die starke Streuung der einzelnen Messwerte bei T3, aber auch bei T2 deuten auf inhomogene Verhältnisse hin.

In Bezug auf die Mischfolgen kann folgendes festgehalten werden :

- M1 bietet tendentiell, vor allem bei T1 und T3, bessere Griffigkeit als M2 und M3.
- M3 ist tendentiell am schlechtesten.
- M3/T3 ist bezüglich Griffigkeit eindeutig die schlechteste Kombination im Rahmen der gesamten Versuchsstrecke.

Bei den Messungen mit gebremsten Rad konnten keine wesentlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsfeldern festgestellt werden. Die Mischungen mit T2, sowie wiederum die Kombination M3/T3 bieten eher ungünstige Griffigkeitswerte.
Die Vergleichsmessungen auf der Gegenfahrbahn ergaben befriedigende bis gute Resultate. Im Vergleich zu den Werten auf der Versuchsstrecke sind die Werte der Gegenfahrbahn leicht besser und haben eine deutlich kleinere Streuung. Die sehr starke Griffigkeitsabnahme mit zunehmender Geschwindigkeit deutet auf die geringe Makrotextur des Belages hin.

Aus den Messwerten bei blockiertem Messrad, welches stärker auf die Makrotextur anspricht, kann abgeleitet werden, dass die Felder mit T1 eine offenere Belagstextur aufweisen. Auch hier stellt sich die Frage nach dem Einfluss des Verdichtungsverfahrens auf die Strassenoberflächeneigenschaften. Die Annahme, dass die Verdichtung mit verstärkter Vibration unter den hier vorliegenden Gegebenheiten zu einer geschlosseneren Belagsoberfläche führt, wird durch die Tatsache bekräftigt, dass die Griffigkeitswerte im Anschlussbereich zum Feld M3/T3, in welchem die Mischtemperaturen wieder im Bereich von T1 lagen, wo jedoch immer noch stark mit Vibration verdichtet wurde, nocheinmal tiefer als im Feld M3/T3 lagen.

7. Zusammenfassung und Schlussfolge

In Abbildung 31 sind die wichtigsten Ergebnisse tabellarisch zusammengefasst :

Abbildung 31 : Resultatzusammenfassung

Spaltzug	σ	MPK	Mischtemperatur ↗ ⇒ σ ↗ / Bei Mischungen mit T3 : M3 ⇒ σ ↗ , M1 ⇒ σ ↘
		BK	Unterschiedliches Verhalten ohne Bezug zu Mischfolge oder Mischtemperatur
	ΔV/d	MPK	Mischtemperatur ↗ ⇒ ΔV/d ↘ / Mischfolge ohne Einfluss
		BK	Gleiche Tendenz wie bei den MPK, jedoch in abgeschwächter Form
PK-BSA		BK	Mischtemperatur ↗ ⇒ G* ↗ / Mischfolge : M3 ⇒ G* ↗
Marshall	SM	MPK	Bei mittlerer und hoher Verdichtung : Mischtemperatur ↗ ⇒ SM ↗ / Mischfolge ohne Einfluss
	FM	MPK	Mischtemperatur ↗ ⇒ FM ↘ / Bei Mischungen mit T3 : M3 ⇒ FM ↘ , M1 ⇒ FM ↗
Bindemittelgehalt		Probe=mischgut	relativ hoher Gehalt mit grosser Streuung
Kornverteilung		Probe=mischgut	relativ hoher Fillergehalt
Raumgewicht		MPK	Mischtemperatur ↗ ⇒ RM ↘ / Mischfolge mit schwachem, uneinheitlichem Einfluss
		BK	starke Streuung, Einfluss der unterschiedlichen Verdichtung
Verdichtungs-grad		BK	starke Streuung, Einfluss der unterschiedlichen Verdichtung
Verdichtungs-willigkeit		MPK	Mischtemperatur : T1 ⇒ C ↗ , Mischfolge : M3 ⇒ C ↗ / Einfluss des unterschiedlichen Bindemittelgehalts
Ebenheit			Mischtemperatur : T3 ⇒ sW-Wert ↗ (schlechtere Ebenheit) / Mischfolge ohne Einfluss
Griffigkeit			Mischtemperatur : T1 ⇒ beste Griffigkeit / Mischfolge : geringer Einfluss

MPK : Marshall-Prüfkörper
BK : Bohrkerne
RM : Raumgewicht
C : Verdichtungsparameter

SM : Marshall-Steifigkeit
FM : Marshall-Fliesswert
σ : Spaltzugfestigkeit
ΔV/d : vertikale Verformung

G* : komplexer Modul

zunehmend : ↗
abnehmend : ↘

Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss des Mischprozesses, speziell der Mischfolge und der Mischtemperatur, auf die Qualität bituminöser Mischungen festzustellen. Aufgrund der Resultate, welche aus dem gewählten Untersuchungsprogramm hervorgehen und mit Berücksichtigung der gegebenen Verhältnisse bei der Herstellung und beim Einbau, sowie der vorgegebenen materialtechnischen Voraussetzungen (Materialwahl, Rezeptur) können die in der Einleitung gestellten Fragen wie folgt beantwortet werden :

- Der Einfluss der Mischfolge auf die Qualität des Mischgutes ist kleiner als erwartet. Unter den vorliegenden realen Verhältnissen mit praxisbedingten Streuungen in der Herstellung und im Einbau, bleibt die geprüfte Variation in der Mischfolge ohne eindeutigen, mischfolgeabhängigen Einfluss. Einzig im Zusammenhang mit dem Einfluss der Mischtemperatur kann ein Bezug zur Mischfolge hergestellt werden. Die Qualitätsmerkmale werden jedoch von keiner der drei geprüften Mischfolgetypen in entscheidendem Masse beeinflusst.

- Der Einfluss der Mischtemperatur ist, verglichen mit dem Einfluss der Mischfolge klar stärker und in engen Zusammenhang mit den Veränderungen der Bindemitteleigenschaften während des Mischprozesses zu stellen. Höhere Mischtemperaturen bewirken eine Verhärtung des Bindemittels, welche sich in einem steiferen Verhalten des Mischgutes äussert. Diese Wirkung der Mischtemperatur wird dabei von der Mischfolge beeinflusst. Die verhärtende Wirkung der höheren Mischtemperaturen wird, im Gegensatz zu den Mischfolgen M1 und M2, durch die Mischfolge M3 verstärkt.
  Die Mischungen, welche mit der tiefen Temperatur T3 gemischt wurden, zeigen kein abnormes Verhalten. Dies deutet darauf hin, dass die Umhüllung auch bei der Mischtemperatur um die 130 Grad gewährleistet ist. Ein eindeutiger Beitrag der Mischfolge zu diesem Ergebnis konnte nicht nachgewiesen werden.

- Die Längsebenheit und die Griffigkeit als Kriterien der Oberflächeneigenschaften der eingebauten Deckschicht zeigen eine Abhängigkeit zur Misch- und somit zur Einbautemperatur. Durch die Reduktion der Verarbeitbarkeit bei der Temperatur T3 wurde das Erreichen optimaler Oberflächeneigenschaften erschwert. Unter diesen speziellen Verhältnissen scheinen die Oberflächeneigenschaften in verstärkerem Masse von den Auswirkungen der gewählten Einbautechnik abhängig zu sein.

Literaturverzeichnis

[1] Huschek S., Tinic C. : Influence of the Mix Process on the Quality of Bituminous Mixes. Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Switzerland.

[2] Gerlach E. : Die Mischvorgänge bei bituminösen Strassenbaustoffen. VDI - Zeitschrift, Bd. 81 Nr.27, 1937.

[3] Ohlson K.-G., übersetzt von Kohler G. : Theorie und Arbeitsweise der KGO-Methode.Bitumen 1/1984, S.14.

[4] Rode F. : Das KGO-Verfahren: Praxiserfahrung mit einem neuen Mischprinzip für die Herstellung von bituminösem Mischgut. DieAsphaltstrasse 3/1983, S.106.

[5] Tunnicliff D. G. : Laboratory Studies of the Mixing Process. Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists Tecnical Sessions, Volume 28, 1959, S.74.

[6] Junghänel A. : Der Mischprozess beim Asphaltrecycling. Die Asphaltstrasse 7/1985, S.323.

[7] Junghänel A. : Die Herstellung bituminöser Mischgüter für den Srassenbau. Das stationäre Mischwerk 4/1981, S.23.

[8] Melik-Bagdasarow M.S., Kononow W.N., Fainberg E.S., deutsch überarbeitet von Junghänel A. : Die optimale Mischzeit für die Aufbereitung von Asphaltbeton-gemischen. Das stationäre Mischwerk 3/1978, S.42.

[9] Ward J.E., Warren B.W., : Ross Count Method of Determing Mixing Time for Bituminous Mixtures. Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists Tecnical Sessions, Volume 28, 1959, S.53.

[10] Burnett W.C. : Recuced Mixing Time for Asphalt Concrete : Practical Field Experience. New York, State Dept. of Transportation, Albany, RR 68-8, 1968.

[11] Muggler M.R.: Veränderung der Bitumeneigenschaften während der Verarbeitung und im fertigen Belag. Strasse und Verkehr 6/1970, S. 342.

[12] Hveem F. H. : Effect of Time and Temperature on Hardening of Asphalts. HRB Special Report 54, 1959, p.13.

[13] Bright R.,Reynolds E.T. : Effect of Mixing Temperature on Hardening of Asphalt Binder in Hot Bituminous Concrete. HRB Bull. 353, 1962, p.20.

[14] Schmidt M.: Thermische Beanspruchung beim Einbau der bituminösen Tragschicht. Strasse und Autobahn 5/1979, S.224.

[15] Heukelom W. : Ein neues Diagramm zur Veranschaulichung des Einflusses der Temperatur auf das mechanische Verhalten von Bitumen. Bitumen 5/1970, S.117.

[16] Neumann H.J. : Über die Grundlagen des Haftens von Bitumen an Mineralstoffen. Bitumen 8/1971, S.238.

[17] Arand W.: Verdichtung - mathematisch-analytisch betrachtet. Bitumen, Teere, Asphalte, Peche 25/1974, S.427.

[18] Schellenberg K.: Die Problematik des Verdichtungsgrades. Bitumen 1/1970, S.4.

[19] Schmidt H.: Beziehungen zwischen Verdichtungsgrad und Stabilität bei Asphaltbetondeckschichten. Bitumen 8/1965, S.221.

[20] Johnson E.M., übersetzt von Kawohl W.J.: Die Entwicklung des Asphalt-Oberbaus in den USA. Bitumen 2/1971, S.39.

[21] Blumer M.: Entwicklungen und Tendenzen im schweizerischen Asphaltstrassenbau. Bitumen 5/1981, S.140.

[22] Junker J. : Entwicklung zur Bestimmung mechanischer Materialkennwerte an bituminösen Baustoffen, insbesondere Asphalt. EMPA Bericht Nr.215, 1987.

[23] Fritz H.W., Messmer W. : Bituminöse Beläge - Optimierung mit Marshall-Versuch. Eidgenössisches Departement des Inneren, Bern, Forschungsauftrag 9/75, 1981.

[24] Assef-Vaziri A.H., Pigois M.L., Dumont A.G.: Essai de compression diamétrale appliqué aux enrobés hydrocarbonés. Laboratoire des voies de circulation (LAVOC), EPFL, Travail de recherche 27/81, 1984.

[25] Huet J. : Recherche d'un essai global pour le contrôle de la qualité des bétos hydrocarbonés. Compression diamétrale. Conférence Européenne des Associations d'asphalteurs routiers. Munich, 1973.

[26] AIPCR, Comité technique des essais de materiaux routiers : Essai de compression diamétrale, projet de mode opératoire. 1986.

[27] Müller F.: Anwendung der Spaltzugfestigkeit im bituminösen Strassenbau. Die Strasse 2/1970, S.83.

Beilagenverzeichnis

Beilage	**1**	Tabellarische Resultatzusammenfassung der Spaltzug- und der Marshallprüfung
Beilage	**2**	Resultate der Spaltzugprüfung an Marshall-Prüfkörpern (MPK)
Beilage	**3**	Resultate der Spaltzugprüfung an Bohrkernen (BK)
Beilage	**4**	Einfluss der Mischtemperatur auf die Spaltzugfestigkeit
Beilage	**5**	Einfluss der Mischfolg auf die Spaltzugfestigkeit
Beilage	**6**	Statistische Analyse der Spaltzugfestigkeitsresultate
Beilage	**7**	Einfluss des Raumgewichtes auf die Spaltzugfestigkeit der Marshall-Prüfkörper
Beilage	**8**	Einfluss des Raumgewichtes auf die Spaltzugfestigkeit der Bohrkerne
Beilage	**9**	Tabellarische Resultatzusammenfassung der Mischgutuntersuchungen
Beilage	**10**	Korrelation Hohlraumgehalt - Raumgewicht (Bohrkerne und Marshall-Prüfkörper)
Beilage	**11**	Einfluss der Mischtemperatur auf den Marshall-Fliesswert FM und auf die vertikale Verformung $\Delta V/d$ der Spaltzugprüfung
Beilage	**12**	Korrelation Marshall-Fliesswert FM - vertikale Verformung $\Delta V/d$ Spaltzug
Beilage	**13**	PK-BSA : Darstellungsübersicht
Beilage	**14**	PK-BSA : Masterkurven, Ermüdungsversuch
Beilage	**15**	PK-BSA : Komplexer Schubmodul G*
Beilage	**16**	Korrelation Raumgewicht - Bohrkernhöhen
Beilage	**17**	Raumgewicht und Hohlraumgehalt in Funktion der Schlagzahl
Beilage	**18**	Einfluss der Bindemittelgehaltes auf den Verdichtungsparameter
Beilage	**19**	Tabellarische Resultatzusammenfassung der Ebenheitsmessungen
Beilage	**20**	Tabellarische Resultatzusammenfassung der Griffigkeitsmessungen
Beilage	**21**	Technische Angaben zum Belaglieferwerk Rubigen AG

Beilage 1

Tabellarische Resultatzusammenfassung der Spaltzug- und Marshallprüfung

Spaltzugprüfung

Mischung	*Marshall-Prüfkörper* -10°C σ [N/mm2]	ΔV / d	+25°C σ [N/mm2]	ΔV / d	+45°C σ [N/mm2]	ΔV / d	*Bohrkerne* -10°C σ [N/mm2]	ΔV / d	+25°C σ [N/mm2]	ΔV / d	+45°C σ [N/mm2]	ΔV / d
M1/T1	4.378	0.0060	1.156	0.0179	0.321	0.0180	3.519	0.009	0.467	0.028	0.151	0.037
M2/T1	4.569	0.0060	1.086	0.0177	0.329	0.0174	3.534	0.009	0.447	0.032	0.138	0.036
M3/T1	4.319	0.0070	1.017	0.0204	0.272	0.0154	3.839	0.010	0.467	0.028	0.148	0.032
M1/T2	4.579	0.0063	1.008	0.0195	0.271	0.0199	3.563	0.010	0.591	0.030	0.140	0.037
M2/T2	4.474	0.0067	1.057	0.0201	0.291	0.0191	3.380	0.010	0.466	0.030	0.138	0.035
M3/T2	5.007	0.0067	1.169	0.0179	0.323	0.0202	3.541	0.009	0.472	0.030	0.132	0.038
M1/T3	4.561	0.0065	0.942	0.0202	0.263	0.0216	3.715	0.009	0.551	0.028	0.132	0.040
M2/T3	4.761	0.0062	1.055	0.0217	0.297	0.0232	3.784	0.011	0.534	0.035	0.135	0.041
M3/T3	4.667	0.0067	1.089	0.0189	0.312	0.0200	3.424	0.010	0.605	0.027	0.127	0.037

Marshallprüfung

Mischung	Verdichtung : 25/25 SM [kN]	FM [mm]	SM/FM	Verdichtung : 50/50 SM [kN]	FM [mm]	SM/FM	Verdichtung : 100/100 SM [kN]	FM [mm]	SM/FM
M1/T1	11.3	2.8	4.0	15.0	2.6	5.7	16.4	3.3	5.0
M2/T1	9.5	2.9	3.3	13.2	3.1	4.3	16.0	2.7	6.0
M3/T1	10.2	2.7	3.7	13.8	2.8	4.9	15.6	3.2	4.9
M1/T2	11.4	3.3	3.5	13.3	3.8	3.5	14.7	3.8	3.9
M2/T2	10.7	3.4	3.2	11.9	3.6	3.3	14.2	4.3	3.3
M3/T2	10.7	3.5	3.0	12.3	4.0	3.0	12.7	4.2	3.1
M1/T3	9.4	3.4	2.7	11.0	4.4	2.5	11.1	4.6	2.4
M2/T3	12.0	3.2	3.7	13.4	3.6	3.7	14.7	4.1	3.6
M3/T3	11.6	3.5	3.3	12.7	3.5	3.7	12.8	3.8	3.4

Beilage 2

Resultate der Spaltzugprüfung an MPK

M1 / T1

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T1 ; 1	-10	40.5	4.162	0.55	0.06	0.0054
M1/T1 ; 2	-10	40.0	4.090	0.56	0.08	0.0055
M1/T1 ; 3	-10	43.5	4.455	0.6	0.05	0.0059
M1/T1 ; 4	-10	46.0	4.675	0.65	0.09	0.0064
M1/T1 ; 5	-10	44.3	4.510	0.68	0.09	0.0067
Minimum		40.0	4.090	0.55	0.05	0.0054
Maximum		46.0	4.675	0.68	0.09	0.0067
Mittelwert		**42.85**	**4.378**	**0.61**	**0.07**	**0.006**
Standardabweichung		2.55	0.246	0.056	0.018	0.0006
Variationskoeffizient		5.9%	5.6%	9.3%	24.5%	9.3%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T1 ; 6	25	10.7	1.094	2.00	0.30	0.0197
M1/T1 ; 7	25	11.3	1.139	1.69	0.26	0.0167
M1/T1 ; 8	25	11.8	1.206	1.69	0.30	0.0167
M1/T1 ; 9	25	11.4	1.162	1.88	0.30	0.0185
M1/T1 ; 10	25	11.4	1.164	1.81	0.32	0.0179
Minimum		10.7	1.094	1.69	0.26	0.0167
Maximum		11.8	1.206	2.00	0.32	0.0197
Mittelwert		**11.32**	**1.153**	**1.81**	**0.3**	**0.0179**
Standardabweichung		0.396	0.041	0.132	0.022	0.001
Variationskoeffizient		3.5%	3.5%	7.3%	7.4%	7.3%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T1 ; 11	45	3.07	0.310	1.75	0.46	0.0173
M1/T1 ; 12	45	3.38	0.338	1.88	0.44	0.0185
M1/T1 ; 13	45	3.10	0.312	1.88	0.54	0.0185
M1/T1 ; 14	45	3.00	0.304	2.00	0.54	0.0197
M1/T1 ; 15	45	3.42	0.342	1.63	0.42	0.0161
Minimum		3.00	0.304	1.63	0.42	0.0161
Maximum		3.42	0.342	2.00	0.54	0.0197
Mittelwert		**3.19**	**0.321**	**1.83**	**0.48**	**0.018**
Standardabweichung		0.192	0.017	0.142	0.057	0.001
Variationskoeffizient		6.0%	5.4%	7.7%	11.8%	7.7%

M1 / T2

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T2 ; 1	-10	42.0	4.274	0.58	0.05	0.0057
M1/T2 ; 2	-10	50.0	5.055	0.69	0.06	0.0068
M1/T2 ; 3	-10	44.5	4.556	0.68	0.06	0.0067
M1/T2 ; 4	-10	42.0	4.253	0.60	0.07	0.0059
M1/T2 ; 5	-10	46.5	4.759	0.64	0.07	0.0063
Minimum		42.0	4.253	0.58	0.05	0.0057
Maximum		50.0	5.055	0.69	0.07	0.0068
Mittelwert		**45**	**4.579**	**0.64**	**0.06**	**0.0063**
Standardabweichung		3.373	0.339	0.048	0.008	0.0005
Variationskoeffizient		7.5%	7.4%	7.5%	13.5%	7.5%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T2 ; 6	25	9.5	0.965	2.00	0.38	0.0197
M1/T2 ; 7	25	9.9	1.001	1.81	0.40	0.0179
M1/T2 ; 8	25	10.3	1.043	2.13	0.34	0.0210
M1/T2 ; 9	25	9.6	0.975	2.00	0.38	0.0197
M1/T2 ; 10	25	10.3	1.054	1.94	0.36	0.0191
Minimum		9.5	0.965	1.81	0.34	0.0179
Maximum		10.3	1.054	2.13	0.40	0.0210
Mittelwert		**9.92**	**1.008**	**1.98**	**0.37**	**0.0195**
Standardabweichung		0.377	0.04	0.116	0.023	0.001
Variationskoeffizient		3.8%	3.9%	5.9%	6.1%	5.9%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T2 ; 11	45	2.77	0.281	1.94	0.46	0.0191
M1/T2 ; 12	45	2.67	0.269	2.13	0.60	0.021
M1/T2 ; 13	45	2.60	0.264	1.75	0.54	0.0173
M1/T2 ; 14	45	2.25	0.229	2.25	0.64	0.0222
M1/T2 ; 15	45	3.17	0.313	2.00	0.56	0.0197
Minimum		2.25	0.229	1.75	0.46	0.0173
Maximum		3.17	0.313	2.25	0.64	0.0222
Mittelwert		**2.69**	**0.271**	**2.01**	**0.56**	**0.0199**
Standardabweichung		0.333	0.03	0.19	0.068	0.002
Variationskoeffizient		12.4%	11.2%	9.4%	12.1%	9.4%

Resultate der Spaltzugprüfung an MPK

M2 / T1

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T1 ; 1	-10	43.5	4.345	0.63	0.06	0.0062
M2/T1 ; 2	-10	46.5	4.707	0.66	0.02	0.0065
M2/T1 ; 3	-10	47.5	4.773	0.67	0.04	0.0066
M2/T1 ; 4	-10	43.0	4.351	0.63	0.05	0.0062
M2/T1 ; 5	-10	46.5	4.669	0.68	0.04	0.0067
Minimum		43.0	4.345	0.63	0.02	0.0062
Maximum		47.5	4.773	0.68	0.06	0.0067
Mittelwert		**45.4**	**4.569**	**0.65**	**0.04**	**0.0064**
Standardabweichung		2.012	0.205	0.023	0.015	0
Variationskoeffizient		4.4%	4.5%	3.5%	35.3%	3.5%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T1 ; 6	25	10.4	1.048	2.00	0.30	0.0197
M2/T1 ; 7	25	11.1	1.109	1.69	0.28	0.0167
M2/T1 ; 8	25	11.0	1.094	1.88	0.26	0.0185
M2/T1 ; 9	25	10.1	1.013	2.00	0.36	0.0197
M2/T1 ; 10	25	11.7	1.167	1.38	0.26	0.0136
Minimum		10.1	1.013	1.38	0.26	0.0136
Maximum		11.7	1.167	2.00	0.36	0.0197
Mittelwert		**10.86**	**1.086**	**1.79**	**0.29**	**0.0177**
Standardabweichung		0.627	0.059	0.262	0.041	0.003
Variationskoeffizient		5.8%	5.4%	14.6%	14.2%	14.6%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T1 ; 11	45	3.3	0.330	1.75	0.48	0.0173
M2/T1 ; 12	45	3.0	0.301	1.88	0.50	0.0185
M2/T1 ; 13	45	3.1	0.310	1.75	0.44	0.0173
M2/T1 ; 14	45	3.4	0.343	1.75	0.42	0.0173
M2/T1 ; 15	45	3.6	0.362	1.69	0.62	0.0167
Minimum		3.0	0.301	1.69	0.42	0.0167
Maximum		3.6	0.362	1.88	0.62	0.0185
Mittelwert		**3.29**	**0.329**	**1.76**	**0.49**	**0.0174**
Standardabweichung		0.238	0.025	0.07	0.078	0.001
Variationskoeffizient		7.2%	7.5%	4.0%	15.9%	4.0%

M1 / T3

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T3 ; 1	-10	48.0	4.833	0.66	0.07	0.0065
M1/T3 ; 2	-10	48.3	4.882	0.70	0.06	0.0069
M1/T3 ; 3	-10	44.5	4.497	0.60	0.04	0.0059
M1/T3 ; 4	-10	43.5	4.387	0.65	0.08	0.0064
M1/T3 ; 5	-10	41.5	4.206	0.68	0.06	0.0067
Minimum		41.5	4.206	0.60	0.04	0.0059
Maximum		48.25	4.882	0.70	0.08	0.0069
Mittelwert		**45.15**	**4.561**	**0.66**	**0.06**	**0.0065**
Standardabweichung		2.924	0.29	0.038	0.015	0.0004
Variationskoeffizient		6.5%	6.4%	5.7%	23.9%	5.7%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T3 ; 6	25	9.8	0.993	2.06	0.40	0.0203
M1/T3 ; 7	25	9.9	1.003	1.94	0.40	0.0191
M1/T3 ; 8	25	9.5	0.964	2.06	0.32	0.0203
M1/T3 ; 9	25	9.0	0.912	2.19	0.40	0.0216
M1/T3 ; 10	25	8.2	0.837	2.00	0.38	0.0197
Minimum		8.2	0.837	1.94	0.32	0.0191
Maximum		9.9	1.003	2.19	0.40	0.0216
Mittelwert		**9.28**	**0.942**	**2.05**	**0.38**	**0.0202**
Standardabweichung		0.698	0.068	0.093	0.035	0.001
Variationskoeffizient		7.5%	7.3%	4.5%	9.1%	4.5%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T3 ; 11	45	2.42	0.246	2.19	0.60	0.0216
M1/T3 ; 12	45	2.80	0.285	2.00	0.50	0.0197
M1/T3 ; 13	45	2.52	0.255	2.31	0.64	0.0228
M1/T3 ; 14	45	2.67	0.271	2.06	0.56	0.0203
M1/T3 ; 15	45	2.55	0.260	2.38	0.62	0.0235
Minimum		2.42	0.246	2.00	0.50	0.0197
Maximum		2.80	0.285	2.38	0.64	0.0235
Mittelwert		**2.59**	**0.263**	**2.19**	**0.58**	**0.0216**
Standardabweichung		0.145	0.015	0.161	0.055	0.002
Variationskoeffizient		5.6%	5.7%	7.4%	9.5%	7.4%

Resultate der Spaltzugprüfung an MPK

M2 / T2

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T2 ; 1	-10	41.5	4.194	0.76	0.06	0.0075
M2/T2 ; 2	-10	45.0	4.575	0.70	0.03	0.0069
M2/T2 ; 3	-10	45.5	4.654	0.69	0.05	0.0068
M2/T2 ; 4	-10	38.5	4.224	0.61	0.05	0.0060
M2/T2 ; 5	-10	46.5	4.724	0.63	0.04	0.0062
Minimum		38.5	4.194	0.61	0.03	0.0060
Maximum		46.5	4.724	0.76	0.06	0.0075
Mittelwert		**43.4**	**4.474**	**0.68**	**0.05**	**0.0067**
Standardabweichung		3.324	0.248	0.06	0.011	0.001
Variationskoeffizient		7.7%	5.5%	8.8%	24.8%	8.8%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T2 ; 6	25	10.6	1.075	1.88	0.26	0.0185
M2/T2 ; 7	25	10.3	1.040	2.00	0.32	0.0197
M2/T2 ; 8	25	10.7	1.094	2.25	0.42	0.0222
M2/T2 ; 9	25	10.3	1.045	2.06	0.36	0.0203
M2/T2 ; 10	25	10.2	1.031	2.00	0.38	0.0197
Minimum		10.2	1.031	1.88	0.26	0.0185
Maximum		10.7	1.094	2.25	0.42	0.0222
Mittelwert		**10.42**	**1.057**	**2.04**	**0.35**	**0.0201**
Standardabweichung		0.217	0.026	0.135	0.061	0.001
Variationskoeffizient		2.1%	2.5%	6.6%	17.5%	6.6%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T2 ; 11	45	2.85	0.287	1.75	0.54	0.0173
M2/T2 ; 12	45	2.82	0.284	1.94	0.48	0.0191
M2/T2 ; 13	45	2.97	0.300	1.94	0.52	0.0191
M2/T2 ; 14	45	2.77	0.280	2.19	0.48	0.0216
M2/T2 ; 15	45	2.97	0.303	1.88	0.48	0.0185
Minimum		2.77	0.280	1.75	0.48	0.0173
Maximum		2.97	0.303	2.19	0.54	0.0216
Mittelwert		**2.88**	**0.291**	**1.94**	**0.50**	**0.0191**
Standardabweichung		0.091	0.010	0.160	0.028	0.002
Variationskoeffizient		3.2%	3.5%	8.2%	5.7%	8.2%

M2 / T3

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T3 ; 1	-10	44	4.506	0.48	0.03	0.0047
M2/T3 ; 2	-10	48.0	4.912	0.65	0.04	0.0064
M2/T3 ; 3	-10	45.0	4.605	0.69	0.08	0.0068
M2/T3 ; 4	-10	48.0	4.839	0.63	0.07	0.0062
M2/T3 ; 5	-10	48.5	4.945	0.70	0.05	0.0069
Minimum		44.0	4.506	0.48	0.03	0.0047
Maximum		48.5	4.945	0.70	0.08	0.0069
Mittelwert		**46.7**	**4.761**	**0.63**	**0.05**	**0.0062**
Standardabweichung		2.049	0.195	0.089	0.021	0.001
Variationskoeffizient		4.4%	4.1%	14.1%	38.4%	14.1%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T3 ; 6	25	9.6	0.980	2.25	0.46	0.0222
M2/T3 ; 7	25	10.2	1.035	2.31	0.40	0.0228
M2/T3 ; 8	25	11.0	1.122	2.13	0.34	0.0210
M2/T3 ; 9	25	10.5	1.075	2.38	0.40	0.0235
M2/T3 ; 10	25	10.6	1.062	1.94	0.38	0.0191
Minimum		9.6	0.980	1.94	0.34	0.0191
Maximum		11.0	1.122	2.38	0.46	0.0235
Mittelwert		**10.38**	**1.055**	**2.20**	**0.40**	**0.0217**
Standardabweichung		0.522	0.052	0.173	0.043	0.002
Variationskoeffizient		5.0%	5.0%	7.8%	10.9%	7.8%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T3 ; 11	45	3.15	0.321	1.88	0.74	0.0185
M2/T3 ; 12	45	3.05	0.311	2.13	0.64	0.0210
M2/T3 ; 13	45	3.02	0.306	2.56	0.64	0.0252
M2/T3 ; 14	45	2.62	0.268	2.88	0.68	0.0284
M2/T3 ; 15	45	2.72	0.277	2.31	0.70	0.0228
Minimum		2.62	0.268	1.88	0.64	0.0185
Maximum		3.15	0.321	2.88	0.74	0.0284
Mittelwert		**2.91**	**0.297**	**2.35**	**0.68**	**0.0232**
Standardabweichung		0.227	0.023	0.386	0.042	0.004
Variationskoeffizient		7.8%	7.7%	16.4%	6.2%	16.4%

Resultate der Spaltzugprüfung an MPK

M3 / T1

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T1 ; 1	-10	40.0	3.964	0.75	0.03	0.0074
M3/T1 ; 2	-10	43.0	4.220	0.71	0.04	0.0070
M3/T1 ; 3	-10	44.5	4.470	0.68	0.06	0.0067
M3/T1 ; 4	-10	46.0	4.507	0.69	0.05	0.0068
M3/T1 ; 5	-10	45.0	4.433	0.63	0.04	0.0062
Minimum		40.0	3.964	0.63	0.03	0.0062
Maximum		46.0	4.507	0.75	0.06	0.0074
Mittelwert		**43.7**	**4.319**	**0.69**	**0.04**	**0.0068**
Standardabweichung		2.335	0.227	0.044	0.011	0.0004
Variationskoeffizient		5.3%	5.3%	6.3%	25.9%	6.3%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T1 ; 6	25	10.4	1.046	2.00	0.36	0.0197
M3/T1 ; 7	25	10.0	0.997	2.19	0.36	0.0216
M3/T1 ; 8	25	10.1	1.015	2.06	0.38	0.0203
M3/T1 ; 9	25	10.2	1.014	1.94	0.26	0.0191
M3/T1 ; 10	25	10.1	1.011	2.13	0.30	0.0210
Minimum		10.0	0.997	1.94	0.26	0.0191
Maximum		10.4	1.046	2.19	0.38	0.0216
Mittelwert		**10.16**	**1.017**	**2.06**	**0.33**	**0.0204**
Standardabweichung		0.152	0.018	0.100	0.050	0.001
Variationskoeffizient		1.5%	1.8%	4.8%	15.1%	4.8%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T1 ; 11	45	2.85	0.286	1.69	0.48	0.0167
M3/T1 ; 12	45	2.85	0.282	1.63	0.46	0.0161
M3/T1 ; 13	45	2.85	0.284	1.50	0.46	0.0148
M3/T1 ; 14	45	2.45	0.239	1.44	0.36	0.0142
M3/T1 ; 15	45	2.67	0.267	1.56	0.44	0.0154
Minimum		2.45	0.239	1.44	0.36	0.0142
Maximum		2.85	0.286	1.69	0.48	0.0167
Mittelwert		**2.73**	**0.272**	**1.56**	**0.44**	**0.0154**
Standardabweichung		0.176	0.020	0.100	0.047	0.001
Variationskoeffizient		6.5%	7.3%	6.4%	10.7%	6.4%

M3 / T2

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T2 ; 1	-10	44.75	4.537	0.65	0.04	0.0064
M3/T2 ; 2	-10	51.50	5.207	0.68	0.07	0.0067
M3/T2 ; 3	-10	50.00	5.108	0.68	0.06	0.0067
M3/T2 ; 4	-10	50.50	5.16	0.7	0.03	0.0069
M3/T2 ; 5	-10	49.75	5.022	0.69	0.04	0.0068
Minimum		44.75	4.537	0.65	0.03	0.0064
Maximum		51.50	5.207	0.7	0.07	0.0069
Mittelwert		**49.30**	**5.007**	**0.68**	**0.05**	**0.0067**
Standardabweichung		2.630	0.271	0.019	0.016	0
Variationskoeffizient		5.3%	5.4%	2.8%	34.2%	2.8%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T2 ; 6	25	10.3	1.053	2.06	0.42	0.0203
M3/T2 ; 7	25	11.4	1.160	1.81	0.30	0.0179
M3/T2 ; 8	25	11.0	1.123	1.81	0.30	0.0179
M3/T2 ; 9	25	12.2	1.244	1.75	0.24	0.0173
M3/T2 ; 10	25	12.4	1.265	1.63	0.28	0.0161
Minimum		10.3	1.053	1.63	0.24	0.0161
Maximum		12.4	1.265	2.06	0.42	0.0203
Mittelwert		**11.46**	**1.169**	**1.81**	**0.31**	**0.0179**
Standardabweichung		0.865	0.087	0.157	0.067	0.002
Variationskoeffizient		7.5%	7.5%	8.7%	21.8%	8.7%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T2 ; 11	45	3.15	0.322	2.25	0.54	0.0222
M3/T2 ; 12	45	3.12	0.318	2.25	0.58	0.0222
M3/T2 ; 13	45	3.30	0.335	1.56	0.40	0.0154
M3/T2 ; 14	45	3.12	0.317	1.88	0.52	0.0185
M3/T2 ; 15	45	3.20	0.323	2.31	0.66	0.0228
Minimum		3.12	0.317	1.56	0.40	0.0154
Maximum		3.30	0.335	2.31	0.66	0.0228
Mittelwert		**3.18**	**0.323**	**2.05**	**0.54**	**0.0202**
Standardabweichung		0.074	0.007	0.323	0.095	0.003
Variationskoeffizient		2.3%	2.2%	15.7%	17.6%	15.7%

Resultate der Spaltzugprüfung an MPK

M3 / T3

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T3 ; 1	-10	44.50	4.532	0.68	0.04	0.0067
M3/T3 ; 2	-10	45.00	4.570	0.68	0.04	0.0067
M3/T3 ; 3	-10	41.00	4.203	0.69	0.02	0.0068
M3/T3 ; 4	-10	49.00	4.938	0.69	0.05	0.0068
M3/T3 ; 5	-10	50.25	5.091	0.64	0.04	0.0063
Minimum		41.00	4.203	0.64	0.02	0.0063
Maximum		50.25	5.091	0.69	0.05	0.0068
Mittelwert		**45.95**	**4.667**	**0.68**	**0.04**	**0.0067**
Standardabweichung		3.718	0.352	0.021	0.011	0.0002
Variationskoeffizient		8.1%	7.5%	3.1%	28.8%	3.1%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T3 ; 6	25	10.7	1.086	1.88	0.28	0.0185
M3/T3 ; 7	25	10.9	1.108	1.88	0.32	0.0185
M3/T3 ; 8	25	10.6	1.070	1.94	0.36	0.0191
M3/T3 ; 9	25	10.7	1.088	1.75	0.26	0.0173
M3/T3 ; 10	25	10.8	1.092	2.13	0.36	0.0210
Minimum		10.6	1.070	1.75	0.26	0.0173
Maximum		10.9	1.108	2.13	0.36	0.0210
Mittelwert		**10.74**	**1.089**	**1.92**	**0.32**	**0.0189**
Standardabweichung		0.114	0.014	0.138	0.046	0.001
Variationskoeffizient		1.1%	1.2%	7.2%	14.4%	7.2%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T3 ; 11	45	2.95	0.299	2.19	0.62	0.0216
M3/T3 ; 12	45	2.92	0.296	2.00	0.58	0.0197
M3/T3 ; 13	45	3.17	0.319	1.94	0.54	0.0191
M3/T3 ; 14	45	3.10	0.314	2.13	0.62	0.0210
M3/T3 ; 15	45	3.32	0.334	1.88	0.58	0.0185
Minimum		2.92	0.296	1.88	0.54	0.0185
Maximum		3.32	0.334	2.19	0.62	0.0216
Mittelwert		**3.09**	**0.312**	**2.03**	**0.59**	**0.0200**
Standardabweichung		0.165	0.016	0.129	0.033	0.001
Variationskoeffizient		5.3%	5.0%	6.4%	5.7%	6.4%

Beilage 3

Resultate der Spaltzugprüfung an BK

M1 / T1

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T1 ; 1	-10	27.0	3.696	0.93	0.06	0.009
M1/T1 ; 2	-10	27.2	3.706	1.00	0.10	0.010
M1/T1 ; 3	-10	25.5	3.380	0.85	0.11	0.008
M1/T1 ; 4	-10	24.8	3.381	1.04	0.10	0.010
M1/T1 ; 5	-10	25.2	3.434	1.03	0.11	0.010
Minimum		24.8	3.380	0.85	0.06	0.008
Maximum		27.2	3.706	1.04	0.11	0.010
Mittelwert		**25.94**	**3.519**	**0.97**	**0.10**	**0.009**
Standardabweichung		1.09	0.167	0.08	0.019	0.001
Variationskoeffizient		4.2%	4.8%	8.2%	19.1%	8.3%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T1 ; 6	25	3.55	0.442	3.00	0.90	0.029
M1/T1 ; 7	25	4.10	0.520	2.63	0.72	0.026
M1/T1 ; 8	25	3.75	0.485	3.13	0.76	0.031
M1/T1 ; 9	25	3.25	0.420	2.69	0.92	0.026
M1/T1 ; 10	25	3.60	0.466	3.13	0.94	0.031
Minimum		3.25	0.420	2.63	0.72	0.026
Maximum		4.10	0.520	3.13	0.94	0.031
Mittelwert		**3.65**	**0.467**	**2.92**	**0.85**	**0.028**
Standardabweichung		0.31	0.039	0.241	0.101	0.002
Variationskoeffizient		8.5%	8.3%	8.3%	11.9%	8.2%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T1 ; 11	45	0.875	0.134	4.00	1.87	0.039
M1/T1 ; 12	45	1.075	0.152	3.81	1.71	0.037
M1/T1 ; 13	45	1.025	0.145	4.00	1.19	0.039
M1/T1 ; 14	45	1.125	0.161	3.56	1.61	0.035
M1/T1 ; 15	45	1.100	0.163	3.75	1.31	0.037
Minimum		0.875	0.134	3.56	1.19	0.035
Maximum		1.125	0.163	4.00	1.87	0.039
Mittelwert		**1.040**	**0.151**	**3.82**	**1.54**	**0.037**
Standardabweichung		0.099	0.012	0.185	0.282	0.002
Variationskoeffizient		9.6%	7.9%	4.8%	18.3%	4.9%

M1 / T2

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T2 ; 1	-10	19.2	3.141	0.96	0.07	0.009
M1/T2 ; 2	-10	21.7	3.706	1.03	0.08	0.010
M1/T2 ; 3	-10	19.7	3.601	0.86	0.06	0.008
M1/T2 ; 4	-10	19.6	3.630	1.25	0.10	0.012
M1/T2 ; 5	-10	19.5	3.738	0.94	0.12	0.009
Minimum		19.2	3.141	0.86	0.06	0.008
Maximum		21.7	3.738	1.25	0.12	0.012
Mittelwert		**19.94**	**3.563**	**1.01**	**0.09**	**0.010**
Standardabweichung		1.001	0.242	0.148	0.024	0.001
Variationskoeffizient		5.0%	6.8%	14.7%	28.0%	14.6%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T2 ; 6	25	2.80	0.544	3.44	0.61	0.033
M1/T2 ; 7	25	3.10	0.610	3.13	0.81	0.030
M1/T2 ; 8	25	3.05	0.618	2.81	0.51	0.027
Minimum		2.80	0.544	2.81	0.51	0.027
Maximum		3.10	0.618	3.44	0.81	0.033
Mittelwert		**2.98**	**0.591**	**3.13**	**0.64**	**0.030**
Standardabweichung		0.161	0.041	0.315	0.153	0.003
Variationskoeffizient		5.4%	6.9%	10.1%	23.7%	10.1%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T2 ; 11	45	0.750	0.131	3.88	1.05	0.038
M1/T2 ; 12	45	0.850	0.148	3.69	0.99	0.036
M1/T2 ; 13	45	0.875	0.148	4.00	1.25	0.039
M1/T2 ; 14	45	0.725	0.123	4.38	1.39	0.043
M1/T2 ; 15	45	0.950	0.150	3.25	0.95	0.032
Minimum		0.725	0.123	3.25	0.95	0.032
Maximum		0.950	0.150	4.38	1.39	0.043
Mittelwert		**0.830**	**0.140**	**3.84**	**1.13**	**0.037**
Standardabweichung		0.093	0.012	0.415	0.187	0.004
Variationskoeffizient		11.1%	8.7%	10.8%	16.6%	10.9%

Resultate der Spaltzugprüfung an BK

M1 / T3

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T3 ; 1	-10	25.1	3.791	0.90	0.03	0.009
M1/T3 ; 2	-10	26.3	3.950	0.94	0.09	0.009
M1/T3 ; 3	-10	24.0	3.665	1.09	0.02	0.011
M1/T3 ; 4	-10	24.9	3.804	0.84	0.07	0.008
M1/T3 ; 5	-10	22.0	3.367	0.85	0.08	0.008
Minimum		22.0	3.367	0.84	0.02	0.008
Maximum		26.3	3.950	1.09	0.09	0.011
Mittelwert		**24.46**	**3.715**	**0.92**	**0.06**	**0.009**
Standardabweichung		1.601	0.219	0.101	0.031	0.001
Variationskoeffizient		6.5%	5.9%	10.9%	53.7%	10.9%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T3 ; 6	25	2.95	0.500	2.88	0.54	0.028
M1/T3 ; 7	25	3.20	0.572	2.81	0.62	0.027
M1/T3 ; 8	25	3.40	0.584	2.94	0.62	0.029
M1/T3 ; 9	25	3.10	0.547	3.00	0.63	0.029
Minimum		2.95	0.500	2.81	0.54	0.027
Maximum		3.40	0.584	3.00	0.63	0.029
Mittelwert		**3.16**	**0.551**	**2.91**	**0.60**	**0.028**
Standardabweichung		0.189	0.037	0.081	0.042	0.001
Variationskoeffizient		6.0%	6.8%	2.8%	7.0%	2.8%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M1/T3 ; 11	45	0.750	0.128	4.69	1.35	0.046
M1/T3 ; 12	45	0.750	0.129	3.75	1.07	0.036
M1/T3 ; 13	45	0.775	0.141	3.75	1.07	0.036
M1/T3 ; 14	45	0.750	0.135	4.25	1.17	0.041
M1/T3 ; 15	45	0.700	0.127	4.00	1.15	0.039
Minimum		0.700	0.127	3.75	1.07	0.036
Maximum		0.775	0.141	4.69	1.35	0.046
Mittelwert		**0.745**	**0.132**	**4.09**	**1.16**	**0.04**
Standardabweichung		0.027	0.006	0.395	0.115	0.004
Variationskoeffizient		3.70%	4.50%	9.70%	9.90%	9.70%

M2 / T1

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T1 ; 1	-10	27.0	3.603	0.8	0.06	0.008
M2/T1 ; 2	-10	24.0	3.336	0.94	0.08	0.009
M2/T1 ; 3	-10	23.8	3.286	0.81	0.06	0.008
M2/T1 ; 4	-10	28.5	3.832	1.19	0.08	0.012
M2/T1 ; 5	-10	26.5	3.615	1.04	0.06	0.01
Minimum		23.8	3.286	0.80	0.06	0.008
Maximum		28.5	3.832	1.19	0.08	0.012
Mittelwert		**25.96**	**3.534**	**0.96**	**0.07**	**0.009**
Standardabweichung		2.021	0.224	0.164	0.011	0.002
Variationskoeffizient		7.8%	6.3%	17.2%	16.1%	17.1%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T1 ; 6	25	3.00	0.434	3.25	0.88	0.032
M2/T1 ; 7	25	3.05	0.447	3.31	0.97	0.032
M2/T1 ; 8	25	3.00	0.435	3.44	0.94	0.034
M2/T1 ; 9	25	3.35	0.471	3.00	0.90	0.029
M2/T1 ; 10	25	3.10	0.448	3.44	0.76	0.034
Minimum		3.00	0.434	3.00	0.76	0.029
Maximum		3.35	0.471	3.44	0.97	0.034
Mittelwert		**3.10**	**0.447**	**3.29**	**0.89**	**0.032**
Standardabweichung		0.146	0.015	0.181	0.081	0.002
Variationskoeffizient		4.7%	3.3%	5.5%	9.1%	5.5%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T1 ; 11	45	0.800	0.126	4.19	1.32	0.041
M2/T1 ; 12	45	0.900	0.145	3.75	1.22	0.037
M2/T1 ; 13	45	0.875	0.138	3.06	0.97	0.030
M2/T1 ; 14	45	0.900	0.141	4.06	1.05	0.040
M2/T1 ; 15	45	0.925	0.141	3.56	1.27	0.035
Minimum		0.800	0.126	3.06	0.97	0.030
Maximum		0.925	0.145	4.19	1.32	0.041
Mittelwert		**0.880**	**0.138**	**3.72**	**1.17**	**0.036**
Standardabweichung		0.048	0.007	0.447	0.149	0.004
Variationskoeffizient		5.5%	5.3%	12.0%	12.8%	11.9%

Resultate der Spaltzugprüfung an BK

M2 / T2

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T2 ; 1	-10	23.7	3.556	1.59	0.1	0.015
M2/T2 ; 2	-10	21.7	3.134	1.03	0.04	0.010
M2/T2 ; 3	-10	23.2	3.534	0.81	0.08	0.008
M2/T2 ; 4	-10	23.6	3.433	0.84	0.04	0.008
M2/T2 ; 5	-10	20.2	3.245	0.88	0.04	0.009
Minimum		20.2	3.134	0.81	0.04	0.008
Maximum		23.7	3.556	1.59	0.10	0.015
Mittelwert		**22.48**	**3.380**	**1.03**	**0.06**	**0.01**
Standardabweichung		1.506	0.185	0.324	0.028	0.003
Variationskoeffizient		6.7%	5.5%	31.5%	47.1%	31.5%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T2 ; 6	25	3.05	0.477	3.38	0.97	0.033
M2/T2 ; 7	25	2.85	0.460	3.00	0.75	0.029
M2/T2 ; 8	25	2.80	0.461	2.94	0.86	0.029
Minimum		2.80	0.460	2.94	0.75	0.029
Maximum		3.05	0.477	3.38	0.97	0.033
Mittelwert		**2.90**	**0.466**	**3.11**	**0.86**	**0.03**
Standardabweichung		0.132	0.010	0.239	0.11	0.002
Variationskoeffizient		4.6%	2.0%	7.7%	12.8%	7.6%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T2 ; 11	45	0.950	0.145	3.50	1.20	0.034
M2/T2 ; 12	45	0.850	0.137	3.38	0.94	0.033
M2/T2 ; 13	45	0.850	0.139	3.69	0.78	0.036
M2/T2 ; 14	45	0.825	0.136	3.13	0.92	0.030
M2/T2 ; 15	45	0.825	0.132	4.06	1.15	0.039
Minimum		0.825	0.132	3.13	0.78	0.030
Maximum		0.950	0.145	4.06	1.20	0.039
Mittelwert		**0.860**	**0.138**	**3.55**	**1.00**	**0.035**
Standardabweichung		0.052	0.005	0.349	0.174	0.003
Variationskoeffizient		6.0%	3.5%	9.8%	17.4%	9.8%

M2 / T3

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T3 ; 1	-10	25.3	4.097	0.96	0.07	0.009
M2/T3 ; 2	-10	23.0	3.712	1.41	0.08	0.014
M2/T3 ; 3	-10	22.8	3.630	1.13	0.09	0.011
M2/T3 ; 4	-10	24.3	3.851	1.01	0.09	0.01
M2/T3 ; 5	-10	23.0	3.632	1.33	0.12	0.013
Minimum		22.8	3.630	0.96	0.07	0.009
Maximum		25.3	4.097	1.41	0.12	0.014
Mittelwert		**23.68**	**3.784**	**1.17**	**0.09**	**0.011**
Standardabweichung		1.085	0.197	0.197	0.019	0.002
Variationskoeffizient		4.6%	5.2%	16.8%	20.8%	17.0%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T3 ; 6	25	3.75	0.501	3.63	1.05	0.035
M2/T3 ; 7	25	3.90	0.533	4.00	1.10	0.039
M2/T3 ; 8	25	4.05	0.567	3.13	0.86	0.030
Minimum		3.75	0.501	3.13	0.86	0.030
Maximum		4.05	0.567	4.00	1.10	0.039
Mittelwert		**3.90**	**0.534**	**3.59**	**1.00**	**0.035**
Standardabweichung		0.15	0.033	0.437	0.127	0.004
Variationskoeffizient		3.8%	6.2%	12.2%	12.6%	12.1%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M2/T3 ; 11	45	0.675	0.131	4.31	1.09	0.042
M2/T3 ; 12	45	0.750	0.147	3.56	0.94	0.035
M2/T3 ; 13	45	0.725	0.137	3.81	1.40	0.037
M2/T3 ; 14	45	0.675	0.131	4.75	1.12	0.046
M2/T3 ; 15	45	0.650	0.130	4.75	1.04	0.046
Minimum		0.650	0.130	3.56	0.94	0.035
Maximum		0.750	0.147	4.75	1.40	0.046
Mittelwert		**0.695**	**0.135**	**4.24**	**1.12**	**0.041**
Standardabweichung		0.041	0.007	0.541	0.172	0.005
Variationskoeffizient		5.9%	5.3%	12.8%	15.4%	12.7%

Resultate der Spaltzugprüfung an BK

M3 / T1

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T1 ; 1	-10	21.7	3.700	1.01	0.10	0.010
M3/T1 ; 2	-10	22.5	3.759	1.31	0.15	0.013
M3/T1 ; 3	-10	23.2	3.948	0.86	0.06	0.008
M3/T1 ; 4	-10	23.1	3.849	0.84	0.05	0.008
M3/T1 ; 5	-10	23.3	3.937	1.25	0.04	0.012
Minimum		21.7	3.700	0.84	0.04	0.008
Maximum		23.3	3.948	1.31	0.15	0.013
Mittelwert		**22.76**	**3.839**	**1.05**	**0.08**	**0.010**
Standardabweichung		0.669	0.109	0.218	0.045	0.002
Variationskoeffizient		2.9%	2.8%	20.6%	56.6%	20.6%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T1 ; 6	25	3.60	0.510	3.00	0.76	0.029
M3/T1 ; 7	25	3.15	0.434	2.94	0.85	0.029
M3/T1 ; 8	25	3.10	0.432	2.88	0.73	0.028
M3/T1 ; 9	25	3.40	0.471	2.63	0.72	0.026
M3/T1 ; 10	25	3.45	0.487	2.94	0.76	0.029
Minimum		3.10	0.432	2.63	0.72	0.026
Maximum		3.60	0.510	3.00	0.85	0.029
Mittelwert		**3.34**	**0.467**	**2.88**	**0.76**	**0.028**
Standardabweichung		0.21	0.034	0.145	0.051	0.001
Variationskoeffizient		6.3%	7.2%	5.0%	6.7%	5.0%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T1 ; 11	45	0.900	0.154	3.00	0.99	0.029
M3/T1 ; 12	45	0.850	0.152	3.25	0.82	0.032
M3/T1 ; 13	45	0.925	0.155	3.38	1.04	0.033
M3/T1 ; 14	45	0.800	0.143	3.50	1.04	0.034
M3/T1 ; 15	45	0.775	0.138	3.13	0.95	0.03
Minimum		0.775	0.138	3.00	0.82	0.029
Maximum		0.925	0.155	3.50	1.04	0.034
Mittelwert		**0.850**	**0.148**	**3.25**	**0.97**	**0.032**
Standardabweichung		0.064	0.008	0.198	0.091	0.002
Variationskoeffizient		7.50%	5.10%	6.10%	9.40%	6.10%

M3 / T2

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T2 ; 1	-10	21.0	3.547	0.93	0.05	0.009
M3/T2 ; 2	-10	22.7	3.685	0.98	0.04	0.010
M3/T2 ; 3	-10	21.6	3.601	0.9	0.04	0.009
M3/T2 ; 4	-10	22.2	3.508	1.23	0.05	0.012
M3/T2 ; 5	-10	21.0	3.363	0.75	0.04	0.007
Minimum		21.0	3.363	0.75	0.04	0.007
Maximum		22.7	3.685	1.23	0.05	0.012
Mittelwert		**21.7**	**3.541**	**0.96**	**0.04**	**0.009**
Standardabweichung		0.748	0.120	0.175	0.005	0.002
Variationskoeffizient		3.4%	3.4%	18.2%	12.4%	18.1%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T2 ; 6	25	2.55	0.467	2.94	0.75	0.029
M3/T2 ; 7	25	2.50	0.467	3.31	0.49	0.032
M3/T2 ; 8	25	2.60	0.482	2.94	0.77	0.029
Minimum		2.50	0.467	2.94	0.49	0.029
Maximum		2.60	0.482	3.31	0.77	0.032
Mittelwert		**2.55**	**0.472**	**3.06**	**0.67**	**0.03**
Standardabweichung		0.050	0.009	0.214	0.156	0.002
Variationskoeffizient		2.0%	1.8%	7.0%	23.3%	7.1%

Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T2 ; 11	45	0.850	0.133	3.94	1.27	0.038
M3/T2 ; 12	45	0.825	0.135	3.88	1.04	0.038
M3/T2 ; 13	45	0.825	0.131	4.06	0.92	0.04
M3/T2 ; 14	45	0.900	0.131	4.06	1.02	0.04
M3/T2 ; 15	45	0.875	0.131	3.75	1.07	0.037
Minimum		0.825	0.131	3.75	0.92	0.037
Maximum		0.900	0.135	4.06	1.27	0.04
Mittelwert		**0.855**	**0.132**	**3.94**	**1.06**	**0.038**
Standardabweichung		0.033	0.002	0.131	0.128	0.001
Variationskoeffizient		3.8%	1.4%	3.3%	12.0%	3.3%

Resultate der Spaltzugprüfung an BK

M3 / T3

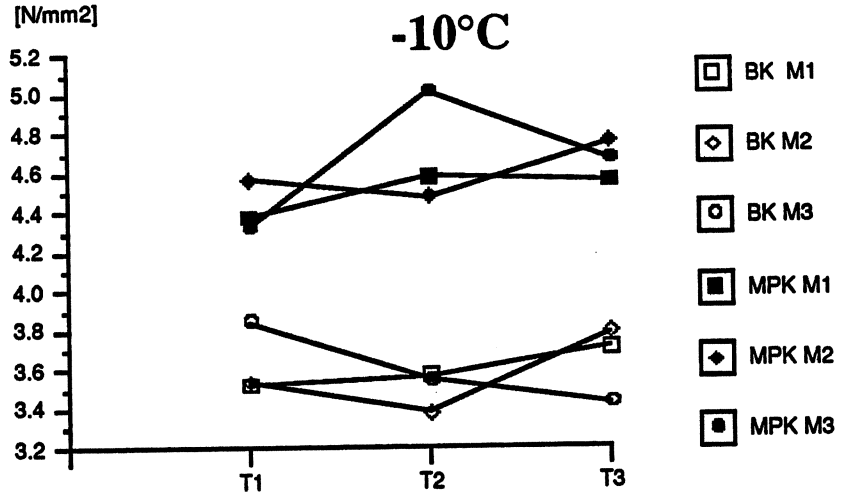
Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T3 ; 1	-10	18.7	3.217	0.98	0.13	0.01
M3/T3 ; 2	-10	20.3	3.302	1.3	0.07	0.013
M3/T3 ; 3	-10	20.8	3.47	1.03	0.08	0.01
M3/T3 ; 4	-10	21.4	3.629	0.79	0.06	0.008
M3/T3 ; 5	-10	21.2	3.501	0.94	0.05	0.009
Minimum		18.7	3.217	0.79	0.05	0.008
Maximum		21.4	3.629	1.3	0.13	0.013
Mittelwert		**20.48**	**3.424**	**1.01**	**0.08**	**0.01**
Standardabweichung		1.08	0.164	0.186	0.031	0.002
Variationskoeffizient		5.3%	4.8%	18.5%	39.9%	18.4%

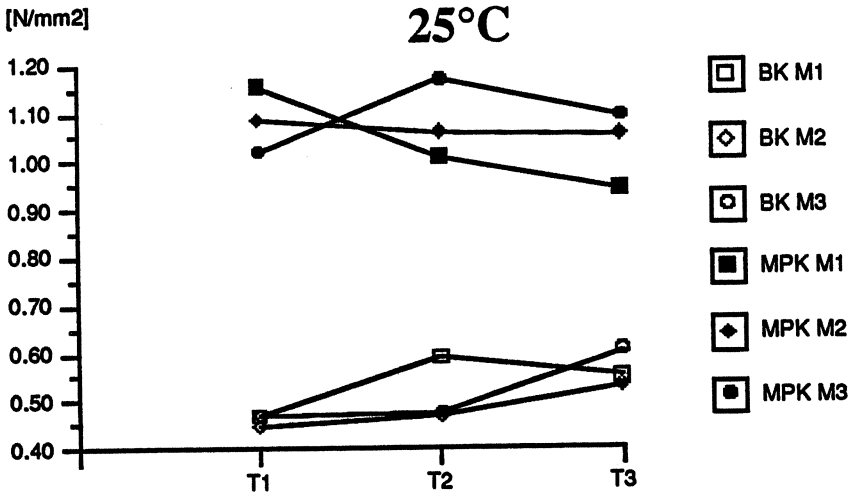
Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T3 ; 6	25	3.5	0.611	2.63	0.64	0.026
M3/T3 ; 7	25	4.0	0.599	2.81	0.60	0.028
Minimum		3.5	0.599	2.63	0.60	0.026
Maximum		4.0	0.611	2.81	0.64	0.028
Mittelwert		**3.75**	**0.605**	**2.72**	**0.62**	**0.027**
Standardabweichung		0.354	0.008	0.127	0.028	0.001
Variationskoeffizient		9.4%	1.4%	4.7%	4.6%	4.7%

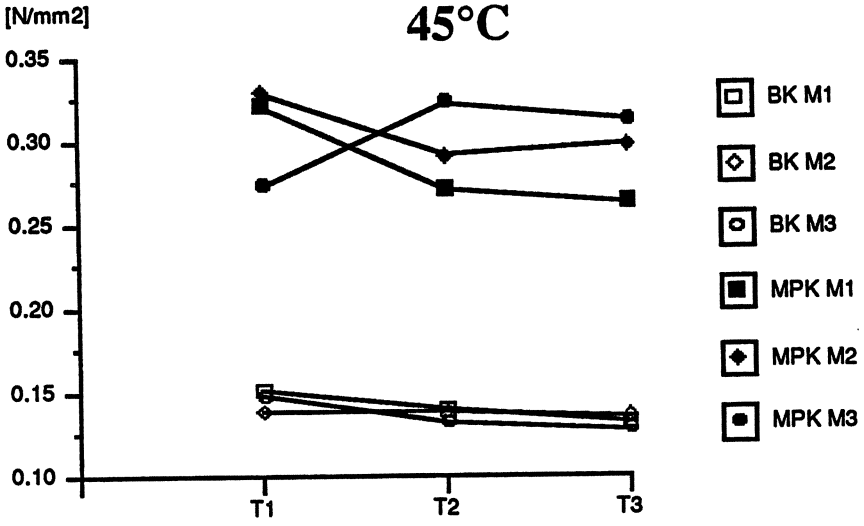
Probekörper Mischung ; Nr	Temperatur [°C]	P [kN]	σ [N/mm2]	ΔV [mm]	ΔH [mm]	ΔV/d
M3/T3 ; 11	45	0.825	0.122	4.06	1.14	0.040
M3/T3 ; 12	45	0.825	0.121	3.56	1.19	0.035
M3/T3 ; 13	45	0.875	0.130	3.44	0.95	0.034
M3/T3 ; 14	45	0.875	0.125	3.88	1.04	0.038
M3/T3 ; 15	45	0.925	0.135	3.63	1.04	0.036
Minimum		0.825	0.121	3.44	0.95	0.034
Maximum		0.925	0.135	4.06	1.19	0.040
Mittelwert		**0.865**	**0.127**	**3.71**	**1.07**	**0.037**
Standardabweichung		0.042	0.006	0.252	0.094	0.003
Variationskoeffizient		4.8%	4.6%	6.8%	8.8%	6.8%

Beilage 4

Einfluss der Mischtemperatur auf die Spaltzugfestigkeit

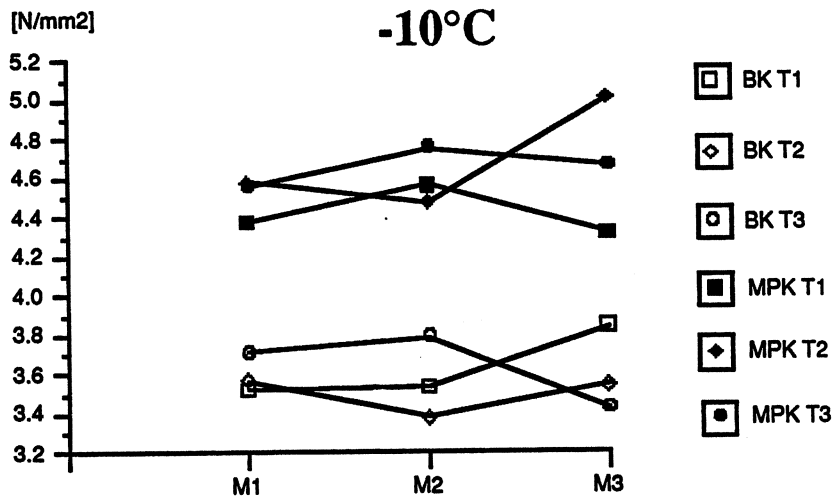


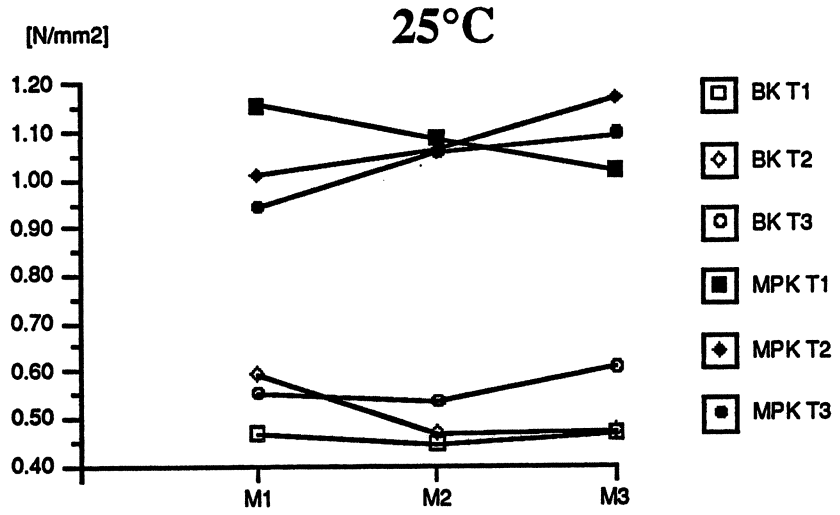


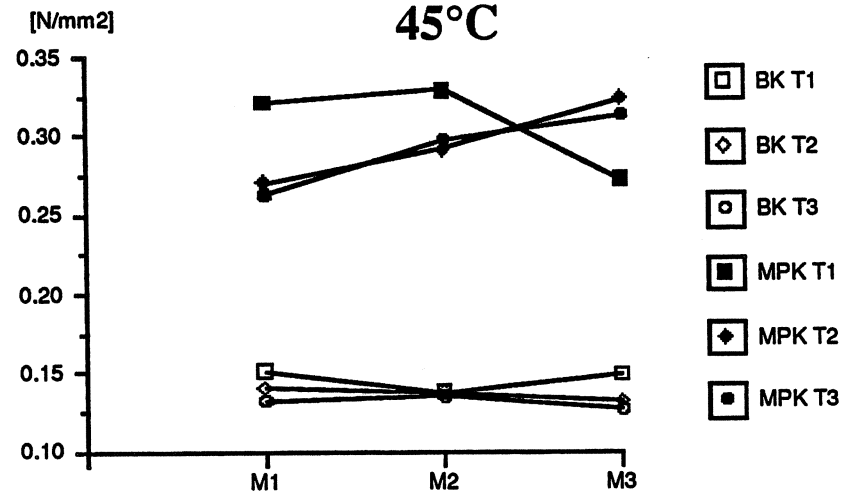


Beilage 5

Einfluss der Mischfolge auf die Spaltzugfestigkeit

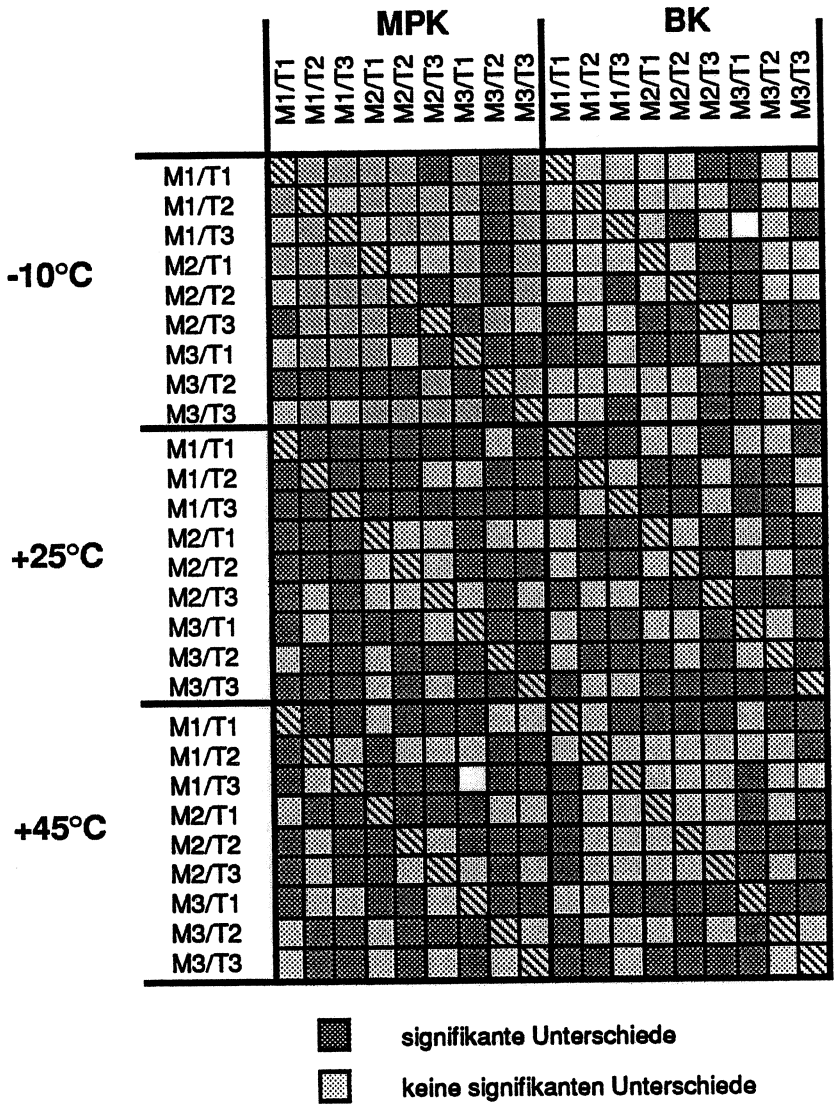






Beilage 6

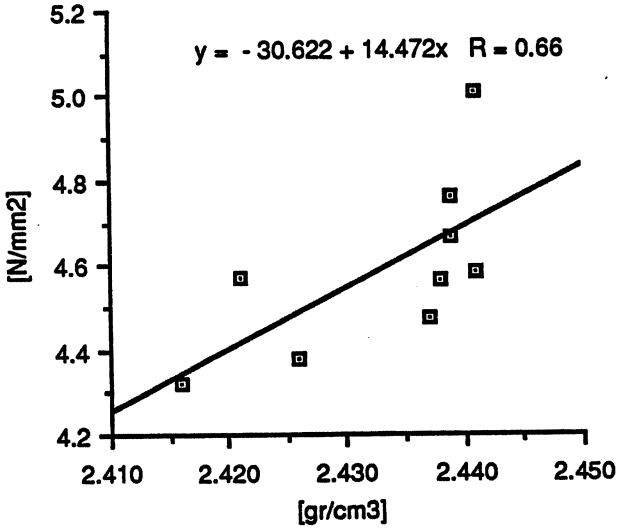
Statistische Analyse der Spaltzugfestigkeitsresultate



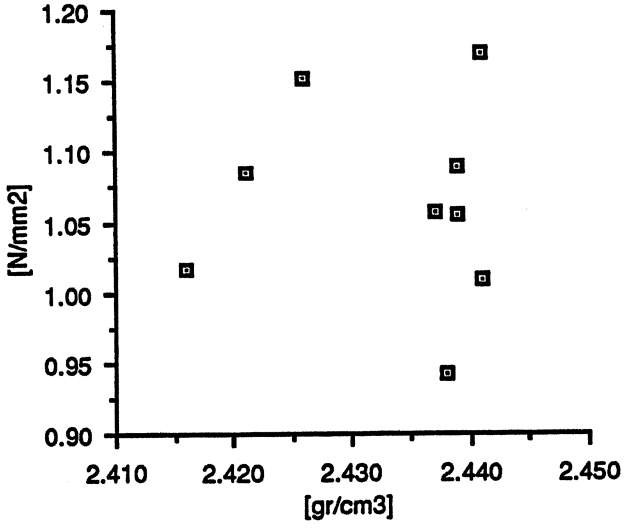
Beilage 7

Einfluss des Raumgewichtes auf die Spaltzugfestigkeit der Marshall-Prüfkörper

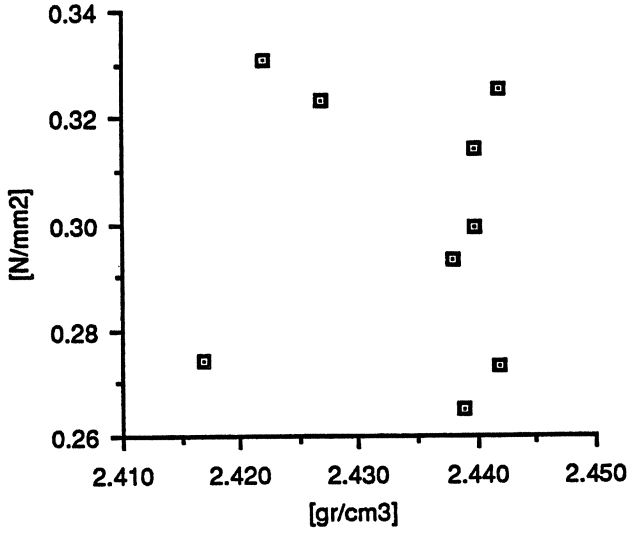
-10°C



25°C



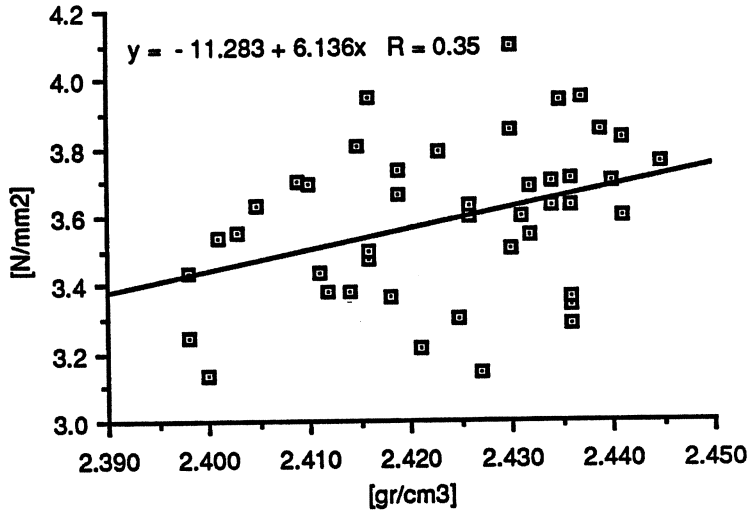
45°C



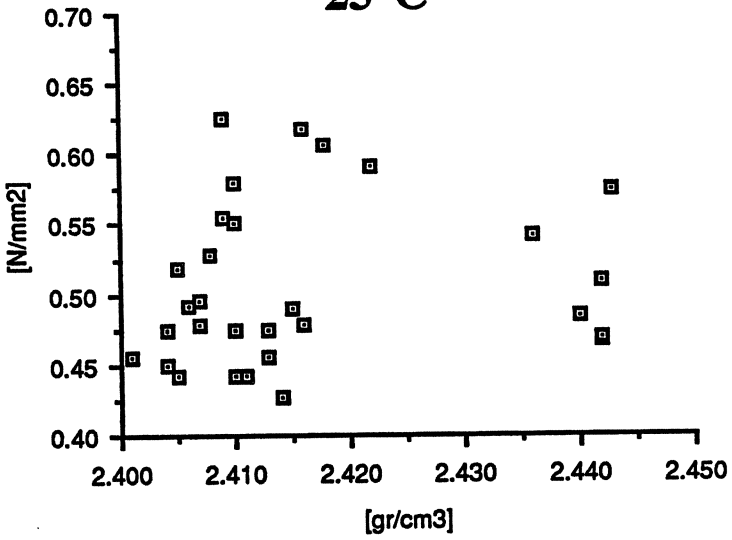
Beilage 8

Einfluss des Raumgewichtes auf die Spaltzugfestigkeit der Bohrkerne

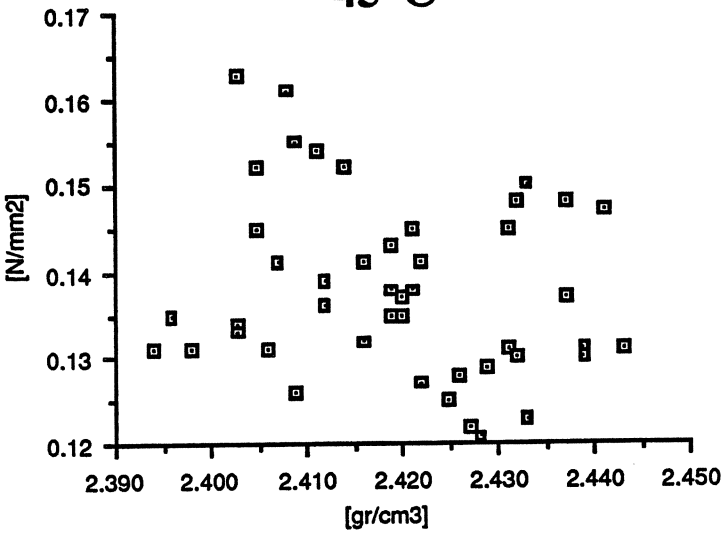
-10°C



25°C



45°C



Beilage 9

Tabellarische Resultatzusammenfassung der Mischgutuntersuchung

Probemischgut / Marshall-Prüfkörper

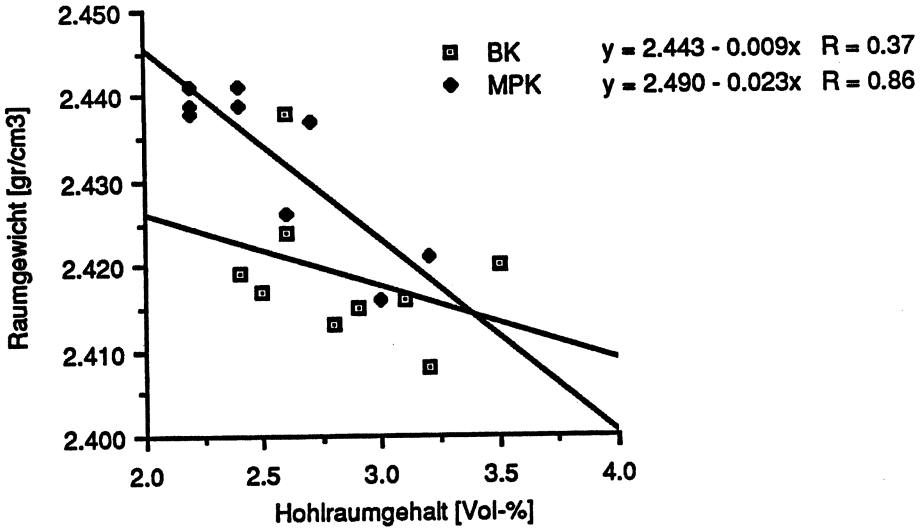
Mischung	Dichte [gr/cm3]	Bindemittel-gehalt [Gew - %]	Rohdichte 25*25 [gr/cm3]	Rohdichte 50*50 [gr/cm3]	Rohdichte 100*100 [gr/cm3]	Hohlraumgehalt 25*25 [Vol - %]	Hohlraumgehalt 50*50 [Vol - %]	Hohlraumgehalt 100*100 [Vol - %]	HFB [%]	Verdichtungs-parameter C
M1/T1	2.491	5.66	2.378	2.426	2.445	4.5	2.6	1.8	84	16.2
M2/T1	2.501	5.50	2.351	2.421	2.440	6.0	3.2	2.4	80	16.3
M3/T1	2.492	5.28	2.372	2.416	2.447	4.8	3.0	1.8	81	19.1
M1/T2	2.502	5.47	2.408	2.441	2.453	3.8	2.4	2.0	84	14.1
M2/T2	2.504	5.78	2.400	2.437	2.450	4.2	2.7	2.2	84	14.5
M3/T2	2.495	5.94	2.418	2.441	2.449	3.1	2.2	1.8	86	12.6
M1/T3	2.494	5.94	2.406	2.438	2.447	3.5	2.2	1.9	86	13
M2/T3	2.495	5.58	2.406	2.439	2.452	3.6	2.2	1.7	86	14.4
M3/T3	2.500	5.63	2.412	2.439	2.453	3.5	2.4	1.9	85	14.7

Bohrkerne

Mischung	Dichte [gr/cm3]	Hohlraum-gehalt Vol. - %	Rohdichte Sch. 1 [gr/cm3]	Rohdichte Sch. 2 [gr/cm3]	Rohdichte Sch. 3 [gr/cm3]	Rohdichte Mittel [gr/cm3]	Verdichtungsgrad Sch. 1 [%]	Verdichtungsgrad Sch. 2 [%]	Verdichtungsgrad Sch. 3 [%]	Verdichtungsgrad Mittel [%]
M1/T1	2.486	3.2	2.405	2.411	2.408	2.408	99.1	99.4	99.3	99.3
M2/T1	2.484	2.4	2.413	2.437	2.406	2.419	99.7	100.7	99.4	99.9
M3/T1	2.488	2.5	2.414	2.439	2.397	2.417	99.9	101.0	99.2	100.0
M1/T2	2.496	2.6	2.433	2.427	2.410	2.424	99.7	99.4	98.7	99.3
M2/T2	2.494	3.5	2.418	2.400	2.442	2.420	99.2	98.5	100.2	99.3
M3/T2	2.486	2.8	2.399	2.431	2.410	2.413	98.3	99.6	98.7	98.9
M1/T3	2.495	3.1	2.424	2.418	2.405	2.416	99.4	99.2	98.6	99.1
M2/T3	2.501	2.6	2.440	2.433	2.440	2.438	100.0	99.8	100.0	100.0
M3/T3	2.494	2.9	2.426	2.417	2.402	2.415	99.5	99.1	98.5	99.0

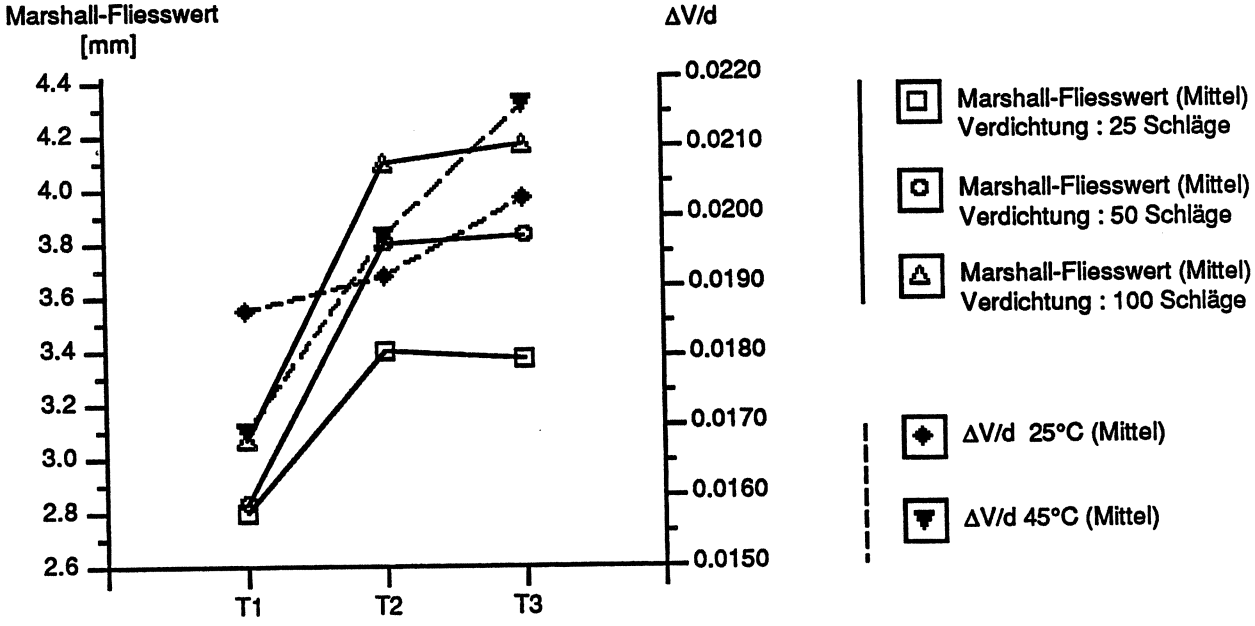
Beilage 10

Korrelation Hohlraumgehalt - Raumgewicht (Bohrkerne und Marshall-Prüfkörper)



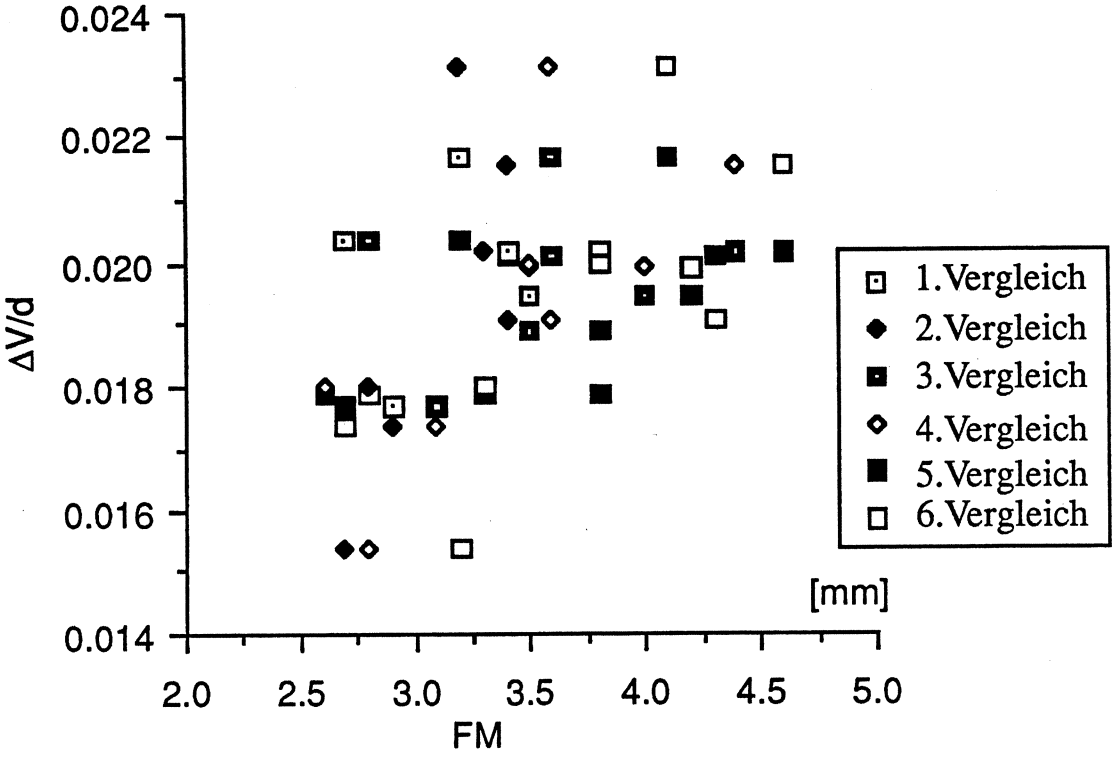
Beilage 11

Einfluss der Mischtemperatur auf den Marshall-Fliesswert FM und die vertikale Verformung ΔV/d der Spaltzugprüfung (Mittelwerte)



Beilage 12

Korrelation Marshall-Fliesswert FM - vertikale Verformung ΔV/d Spaltzug

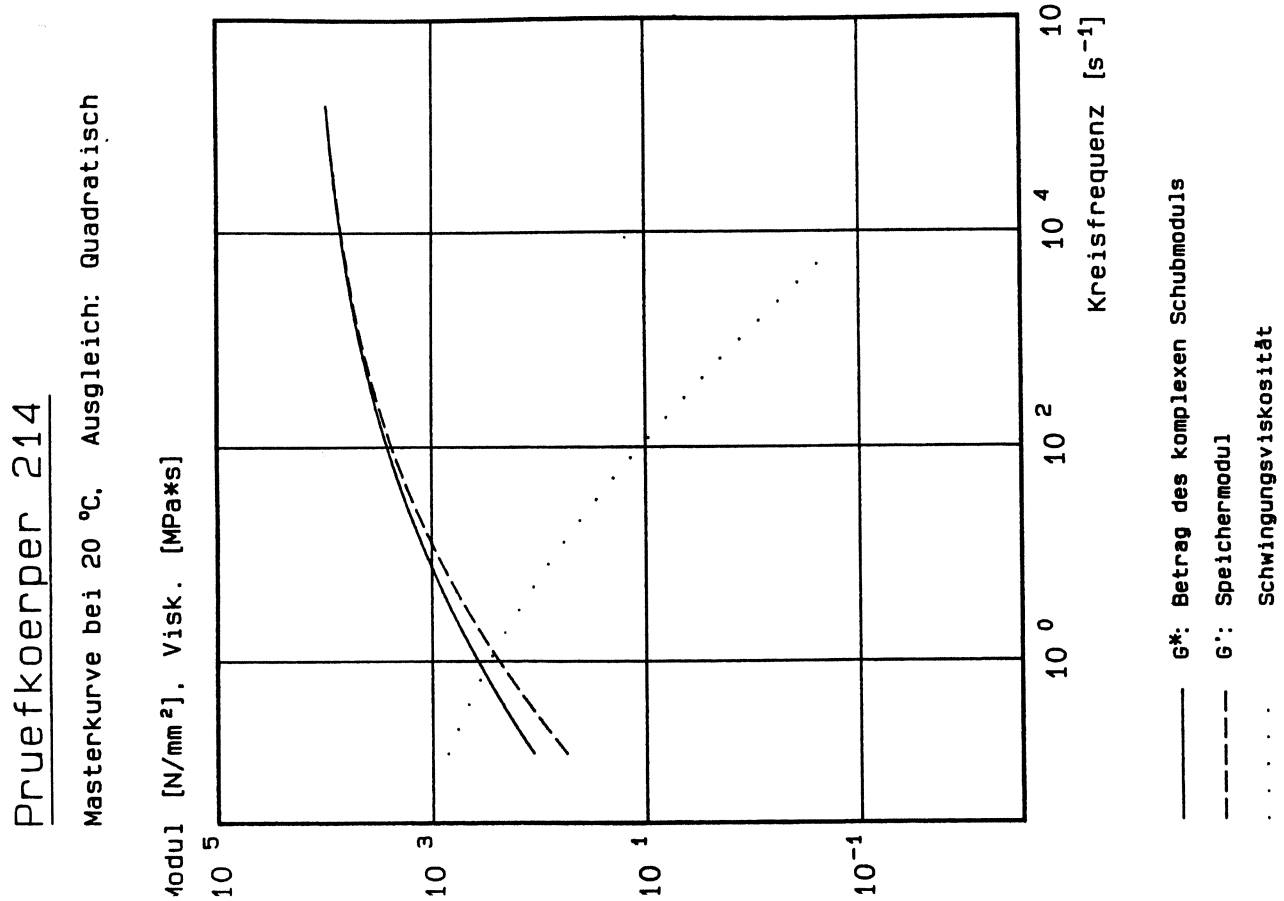


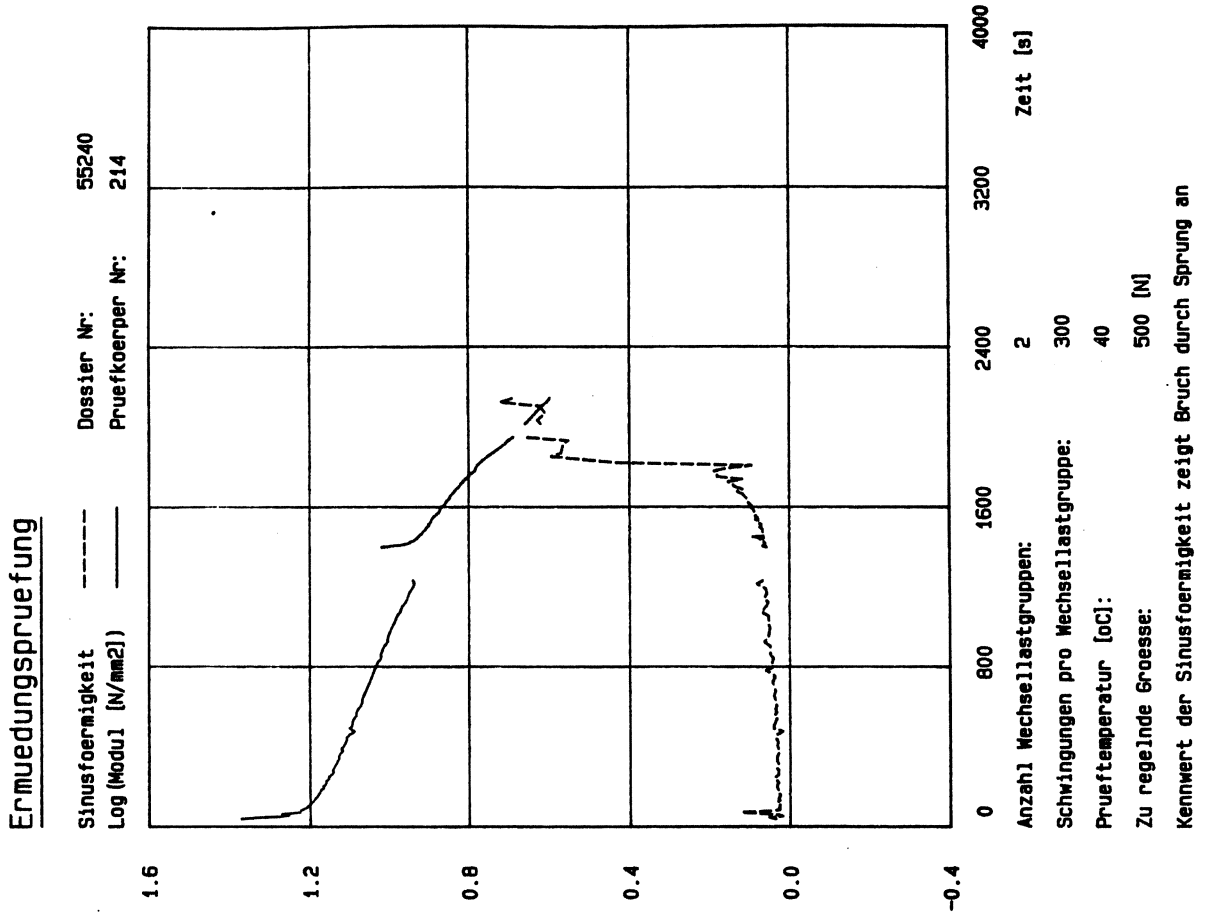
Legende

1. Vergleich : FM (Verdichtung 25/25)	—	ΔV/d (25°C)	y = 0.017 + 8.28e-4x	R = 0.19
2. Vergleich : FM (Verdichtung 25/25)	—	ΔV/d (45°C)	y = 0.003 + 0.005x	R = 0.69
3. Vergleich : FM (Verdichtung 50/50)	—	ΔV/d (25°C)	y = 0.017 + 7.40e-4x	R = 0.31
4. Vergleich : FM (Verdichtung 50/50)	—	ΔV/d (45°C)	y = 0.009 + 0.003x	R = 0.73
5. Vergleich : FM (Verdichtung 100/100)	—	ΔV/d (25°C)	y = 0.015 + 0.001x	R = 0.56
6. Vergleich : FM (Verdichtung 100/100)	—	ΔV/d (45°C)	y = 0.009 + 0.003x	R = 0.74

Beilage 13

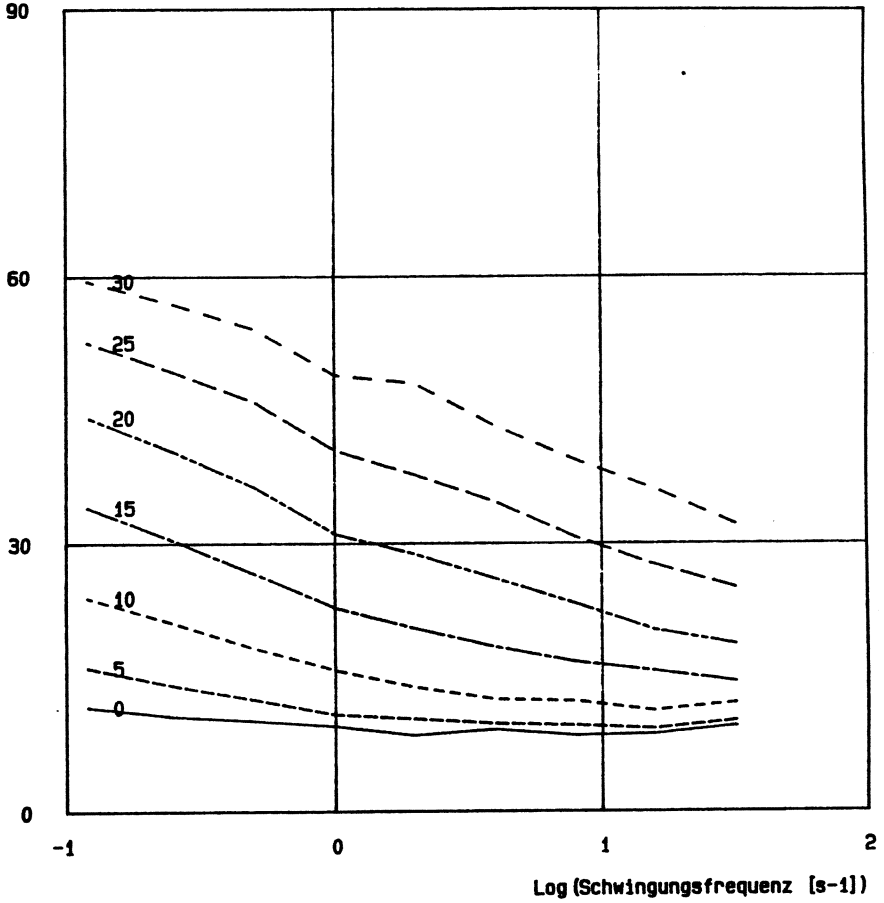
PK-BSA : Darstellungsübersicht, Prüfkörper 214, M2/T1





Phase zwischen Kraft und Weg

Dossier Nr: 55240
Pruefkoerper Nr: 214

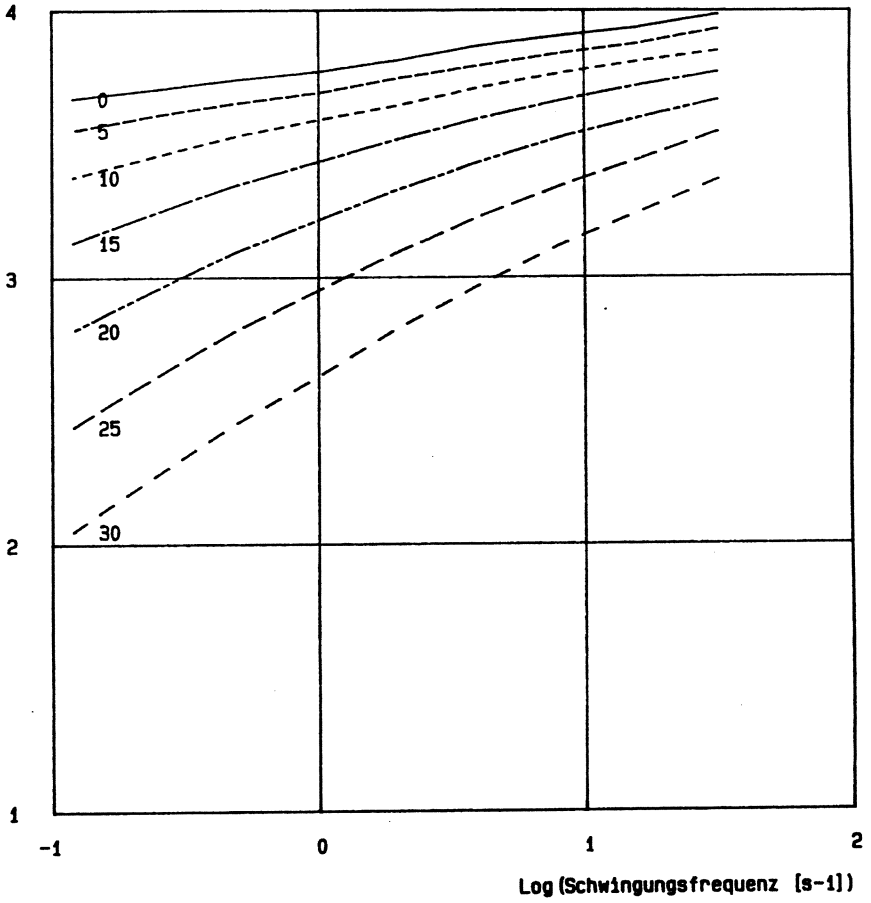


Prueftemperaturen: gemaess Beschriftung [oC]

Art der Regelung: Kraft

Frequenzabhaengigkeit des komplexen Moduls

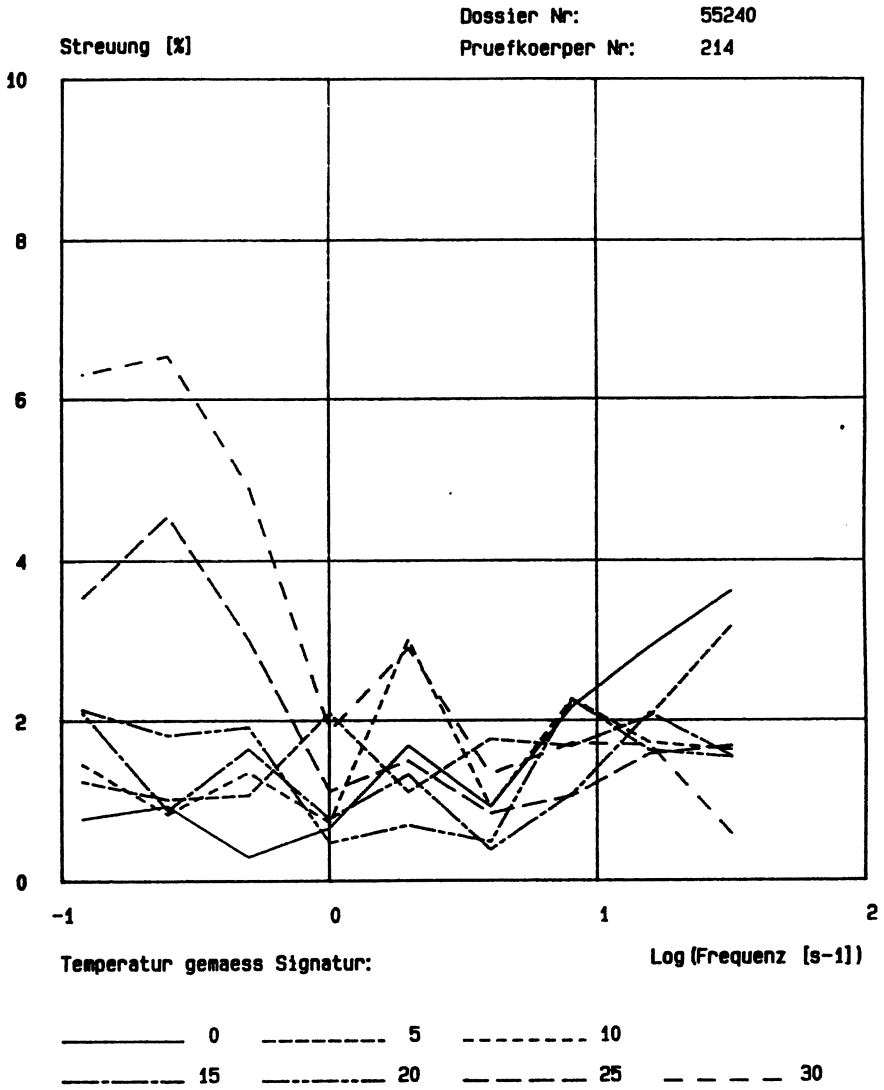
Dossier Nr: 55240
Pruefkoerper Nr: 214



Prueftemperaturen: gemaess Beschriftung [oC]

Art der Regelung: Kraft, 12.5 N/mm Pruefkoerperhoehe

Streuung der komplexen Module



28. Juni 1988 08:12:58

AUSWERTUNG VON: P1D2N
VERSUCHSNUMMER: 23
DOSSIERNUMMER: 55240.0
PRUEFKOERPERNUMMER: 214
MESSBEREICHE:
F= 2.000 X= 0.200
MISCHGUTSORTE: AB16 s
BINDEMITTEL: B80/100
RADIUS KERN: 22.5
RADIUS KOERPER: 76.0
HOEHE: 40.0
KRAFTREGELUNG
TEMPERATUREINSTELLUNG: 0 GRAD
FREQUENZEINSTELLUNG: 32.317 MESSUNG: 31.882 S-1
TEMPERATURMESSUNG LAUFENDES MITTEL

ZEIT	AMPLITUDEN KRAFT [N]	AMPLITUDEN WEG [mm]	PHASE [o]	MODULE [N/mm2] KOMPLEXER	MODULE [N/mm2] SPEICHER	MODULE [N/mm2] VERLUST	TEMP [oC]
7221.	632.	0.123E-02	9.61	0.973E+04	0.959E+04	0.162E+04	-0.03
FREQUENZEINSTELLUNG:	16.057	MESSUNG:	15.739 S-1				
7270.	576.	0.125E-02	8.68	0.866E+04	0.856E+04	0.131E+04	-0.09
FREQUENZEINSTELLUNG:	8.099	MESSUNG:	8.053 S-1				
7319.	556.	0.130E-02	8.51	0.807E+04	0.799E+04	0.120E+04	-0.10
FREQUENZEINSTELLUNG:	4.039	MESSUNG:	3.994 S-1				
7369.	550.	0.141E-02	9.17	0.738E+04	0.728E+04	0.118E+04	-0.04
FREQUENZEINSTELLUNG:	2.010	MESSUNG:	1.969 S-1				
7420.	544.	0.158E-02	8.52	0.651E+04	0.644E+04	965.	-0.02
FREQUENZEINSTELLUNG:	1.000	MESSUNG:	0.998 S-1				
7479.	541.	0.173E-02	9.57	0.590E+04	0.581E+04	980.	-0.09
FREQUENZEINSTELLUNG:	0.506	MESSUNG:	0.502 S-1				
7542.	541.	0.185E-02	10.2	0.552E+04	0.543E+04	974.	-0.09
FREQUENZEINSTELLUNG:	0.252	MESSUNG:	0.249 S-1				
7623.	539.	0.200E-02	10.7	0.508E+04	0.499E+04	944.	-0.01
FREQUENZEINSTELLUNG:	0.124	MESSUNG:	0.124 S-1				
7738.	539.	0.217E-02	11.8	0.469E+04	0.459E+04	961.	-0.09

FREQUENZEINSTELLUNG: 32.317 MESSUNG: 31.863 S-1

ZEIT	AMPLITUDEN KRAFT [N]	AMPLITUDEN WEG [mm]	PHASE [o]	MODULE [N/mm2] KOMPLEXER	MODULE [N/mm2] SPEICHER	MODULE [N/mm2] VERLUST	TEMP [oC]
10853.	631.	0.138E-02	10.2	0.861E+04	0.847E+04	0.153E+04	5.15
FREQUENZEINSTELLUNG:	16.057	MESSUNG:	15.733 S-1				
10902.	580.	0.145E-02	9.27	0.755E+04	0.746E+04	0.122E+04	5.08
FREQUENZEINSTELLUNG:	8.099	MESSUNG:	8.051 S-1				
10951.	558.	0.152E-02	9.67	0.693E+04	0.684E+04	0.117E+04	5.16
FREQUENZEINSTELLUNG:	4.039	MESSUNG:	3.993 S-1				
11001.	549.	0.166E-02	9.85	0.622E+04	0.613E+04	0.107E+04	5.17
FREQUENZEINSTELLUNG:	2.010	MESSUNG:	1.969 S-1				
11052.	546.	0.185E-02	10.4	0.556E+04	0.547E+04	0.100E+04	5.04
FREQUENZEINSTELLUNG:	1.000	MESSUNG:	0.998 S-1				
11111.	543.	0.208E-02	10.9	0.492E+04	0.483E+04	933.	5.08
FREQUENZEINSTELLUNG:	0.506	MESSUNG:	0.502 S-1				
11174.	542.	0.227E-02	12.6	0.451E+04	0.440E+04	987.	5.08
FREQUENZEINSTELLUNG:	0.252	MESSUNG:	0.249 S-1				
11255.	541.	0.251E-02	14.2	0.407E+04	0.395E+04	996.	5.09
FREQUENZEINSTELLUNG:	0.124	MESSUNG:	0.124 S-1				
11370.	541.	0.285E-02	16.2	0.357E+04	0.343E+04	0.100E+04	5.14
TEMPERATUREINSTELLUNG:	10 GRAD						
FREQUENZEINSTELLUNG:	32.317	MESSUNG:	31.860 S-1				
14485.	631.	0.167E-02	12.2	0.714E+04	0.697E+04	0.151E+04	10.22
FREQUENZEINSTELLUNG:	16.057	MESSUNG:	15.733 S-1				
14534.	582.	0.170E-02	11.3	0.647E+04	0.634E+04	0.127E+04	10.11
FREQUENZEINSTELLUNG:	8.099	MESSUNG:	8.049 S-1				
14583.	559.	0.181E-02	12.4	0.584E+04	0.570E+04	0.125E+04	10.17
FREQUENZEINSTELLUNG:	4.039	MESSUNG:	3.993 S-1				
14633.	550.	0.202E-02	12.6	0.514E+04	0.502E+04	0.112E+04	10.20
14684.	545.	0.234E-02	14.0	0.440E+04	0.427E+04	0.107E+04	10.20
FREQUENZEINSTELLUNG:	1.000	MESSUNG:	0.998 S-1				
14743.	544.	0.263E-02	15.9	0.390E+04	0.375E+04	0.107E+04	10.18
FREQUENZEINSTELLUNG:	0.506	MESSUNG:	0.502 S-1				
14806.	543.	0.300E-02	18.4	0.341E+04	0.324E+04	0.108E+04	10.27
FREQUENZEINSTELLUNG:	0.252	MESSUNG:	0.249 S-1				
14887.	538.	0.352E-02	21.2	0.288E+04	0.269E+04	0.104E+04	10.11
FREQUENZEINSTELLUNG:	0.124	MESSUNG:	0.124 S-1				
15002.	542.	0.428E-02	24.0	0.239E+04	0.218E+04	972.	10.14
TEMPERATUREINSTELLUNG:	15 GRAD						
FREQUENZEINSTELLUNG:	32.317	MESSUNG:	31.859 S-1				
18117.	626.	0.199E-02	14.6	0.594E+04	0.575E+04	0.150E+04	15.21
FREQUENZEINSTELLUNG:	16.057	MESSUNG:	15.734 S-1				
18166.	580.	0.208E-02	15.8	0.525E+04	0.505E+04	0.142E+04	15.12
FREQUENZEINSTELLUNG:	8.099	MESSUNG:	8.048 S-1				
18215.	560.	0.230E-02	16.8	0.460E+04	0.440E+04	0.133E+04	15.19
FREQUENZEINSTELLUNG:	4.039	MESSUNG:	3.993 S-1				
18265.	550.	0.263E-02	18.5	0.394E+04	0.373E+04	0.125E+04	15.23
FREQUENZEINSTELLUNG:	2.010	MESSUNG:	1.969 S-1				
18316.	545.	0.313E-02	20.6	0.329E+04	0.308E+04	0.116E+04	15.10
FREQUENZEINSTELLUNG:	1.000	MESSUNG:	0.998 S-1				
18375.	541.	0.376E-02	22.9	0.272E+04	0.250E+04	0.106E+04	15.18
FREQUENZEINSTELLUNG:	0.506	MESSUNG:	0.502 S-1				
18438.	541.	0.455E-02	26.7	0.224E+04	0.201E+04	0.101E+04	15.12
FREQUENZEINSTELLUNG:	0.252	MESSUNG:	0.249 S-1				
18519.	541.	0.576E-02	30.4	0.177E+04	0.153E+04	898.	15.11

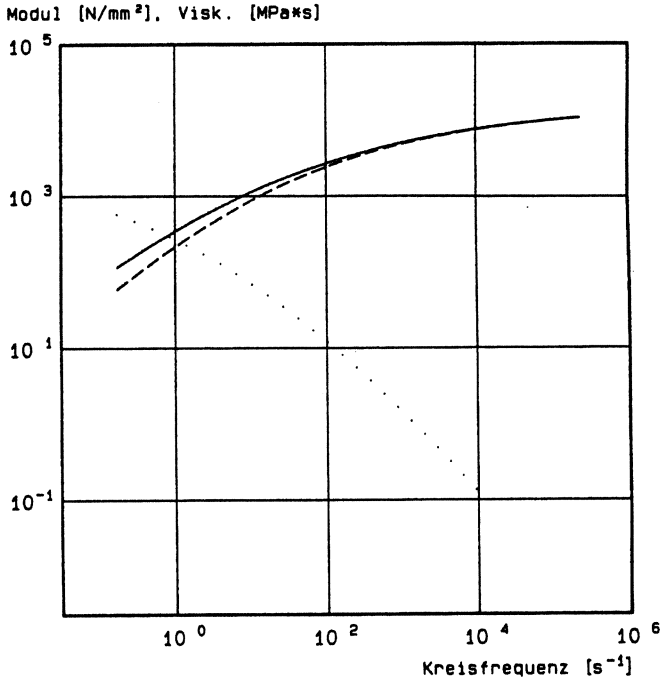
ZEIT	AMPLITUDEN KRAFT [N]	AMPLITUDEN WEG [mm]	PHASE [o]	MODULE [N/mm2] KOMPLEXER	MODULE [N/mm2] SPEICHER	MODULE [N/mm2] VERLUST	TEMP [oC]
18634.	540.	0.750E-02	34.1	0.136E+04	0.113E+04	762.	15.21
TEMPERATUREINSTELLUNG: 20 GRAD							
FREQUENZEINSTELLUNG: 32.317		MESSUNG: 31.856 S-1					
21749.	627.	0.253E-02	18.8	0.467E+04	0.442E+04	0.151E+04	20.23
FREQUENZEINSTELLUNG: 16.057		MESSUNG: 15.734 S-1					
21798.	580.	0.277E-02	20.4	0.396E+04	0.371E+04	0.138E+04	20.23
FREQUENZEINSTELLUNG: 8.099		MESSUNG: 8.047 S-1					
21847.	559.	0.315E-02	23.3	0.335E+04	0.308E+04	0.132E+04	20.23
FREQUENZEINSTELLUNG: 4.039		MESSUNG: 3.993 S-1					
21897.	552.	0.384E-02	26.1	0.271E+04	0.244E+04	0.119E+04	20.28
FREQUENZEINSTELLUNG: 2.010		MESSUNG: 1.969 S-1					
21948.	545.	0.483E-02	28.9	0.213E+04	0.186E+04	0.103E+04	20.17
FREQUENZEINSTELLUNG: 1.000		MESSUNG: 0.998 S-1					
22007.	541.	0.619E-02	31.1	0.165E+04	0.141E+04	850.	20.17
FREQUENZEINSTELLUNG: 0.506		MESSUNG: 0.501 S-1					
22070.	542.	0.813E-02	36.4	0.126E+04	0.101E+04	746.	20.24
FREQUENZEINSTELLUNG: 0.252		MESSUNG: 0.249 S-1					
22151.	541.	0.113E-01	40.4	907.	691.	589.	20.25
FREQUENZEINSTELLUNG: 0.124		MESSUNG: 0.124 S-1					
22266.	541.	0.161E-01	44.2	633.	454.	441.	20.13
TEMPERATUREINSTELLUNG: 25 GRAD							
FREQUENZEINSTELLUNG: 32.317		MESSUNG: 31.851 S-1					
25381.	625.	0.334E-02	25.1	0.354E+04	0.320E+04	0.150E+04	25.18
FREQUENZEINSTELLUNG: 16.057		MESSUNG: 15.730 S-1					
25430.	581.	0.398E-02	27.7	0.276E+04	0.244E+04	0.128E+04	25.19
FREQUENZEINSTELLUNG: 8.099		MESSUNG: 8.046 S-1					
25479.	561.	0.480E-02	30.7	0.220E+04	0.189E+04	0.113E+04	25.25
25529.	550.	0.615E-02	34.7	0.169E+04	0.139E+04	959.	25.14
FREQUENZEINSTELLUNG: 2.010		MESSUNG: 1.969 S-1					
25580.	545.	0.826E-02	37.8	0.124E+04	983.	762.	25.09
FREQUENZEINSTELLUNG: 1.000		MESSUNG: 0.998 S-1					
25639.	544.	0.115E-01	40.5	895.	681.	582.	25.12
FREQUENZEINSTELLUNG: 0.506		MESSUNG: 0.501 S-1					
25702.	542.	0.160E-01	45.9	638.	444.	458.	25.19
FREQUENZEINSTELLUNG: 0.252		MESSUNG: 0.249 S-1					
25783.	540.	0.238E-01	49.3	429.	279.	325.	25.19
FREQUENZEINSTELLUNG: 0.124		MESSUNG: 0.124 S-1					
25898.	538.	0.369E-01	52.6	276.	168.	219.	25.19
TEMPERATUREINSTELLUNG: 30 GRAD							
FREQUENZEINSTELLUNG: 32.317		MESSUNG: 31.853 S-1					
29013.	625.	0.505E-02	32.2	0.234E+04	0.198E+04	0.124E+04	30.22
FREQUENZEINSTELLUNG: 16.057		MESSUNG: 15.731 S-1					
29062.	579.	0.630E-02	36.2	0.174E+04	0.140E+04	0.103E+04	30.13
FREQUENZEINSTELLUNG: 8.099		MESSUNG: 8.046 S-1					
29111.	560.	0.802E-02	39.4	0.132E+04	0.102E+04	836.	30.15
FREQUENZEINSTELLUNG: 4.039		MESSUNG: 3.993 S-1					
29161.	551.	0.112E-01	43.2	930.	678.	637.	30.24
FREQUENZEINSTELLUNG: 2.010		MESSUNG: 1.969 S-1					
29212.	545.	0.161E-01	48.0	640.	428.	476.	30.21
FREQUENZEINSTELLUNG: 1.000		MESSUNG: 0.998 S-1					
29271.	540.	0.239E-01	48.9	426.	280.	322.	30.34
FREQUENZEINSTELLUNG: 0.506		MESSUNG: 0.501 S-1					
29334.	544.	0.357E-01	54.1	287.	168.	233.	30.15
29415.	541.	0.555E-01	56.9	184.	101.	154.	30.13
FREQUENZEINSTELLUNG: 0.124		MESSUNG: 0.124 S-1					
29530.	542.	0.915E-01	59.5	112.	56.7	96.2	30.21
TEMPERATUREINSTELLUNG: 30 GRAD							

Beilage 14

PK-BSA : Masterkurven, Darstellung Ermüdungsversuch

Pruefkoerper 105 M1/T1

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

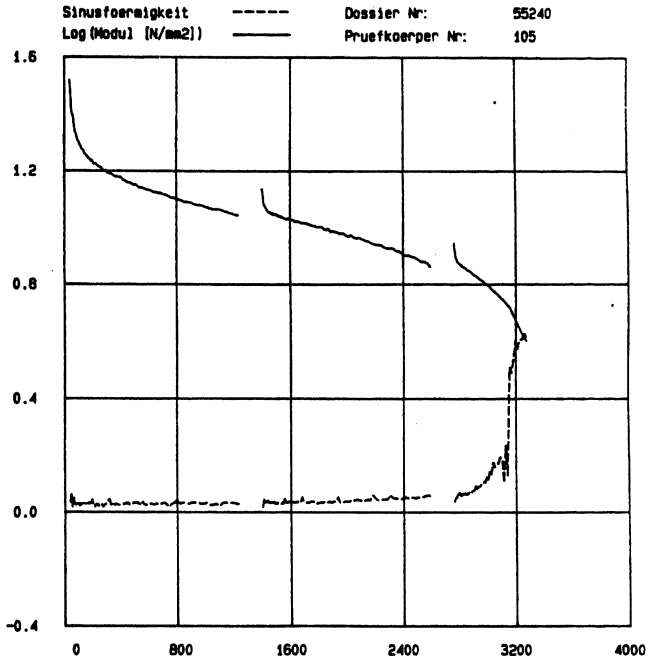


——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

– – – – – G': Speichermodul

. . . . . Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 3

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

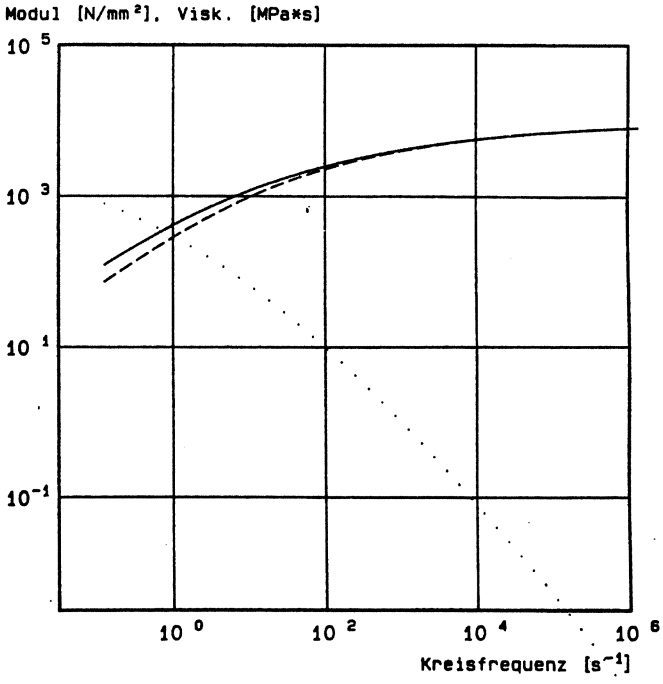
Pruefteemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 525

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 113 M1/T1

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

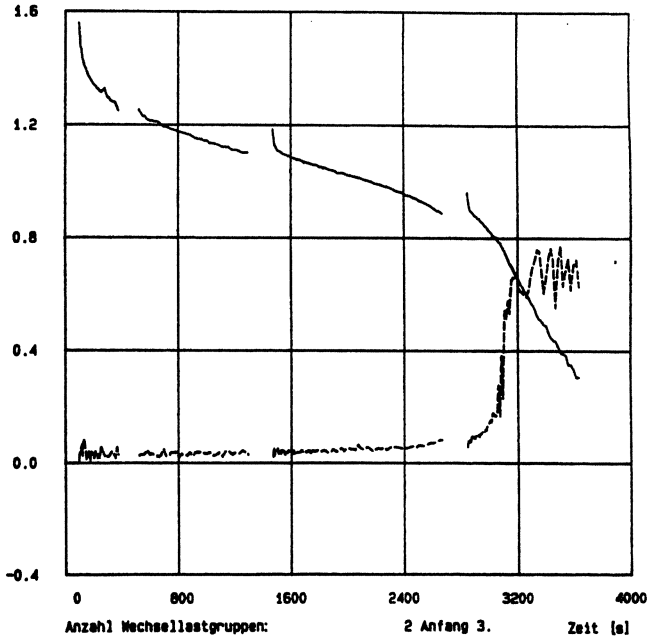


——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

– – – – – G': Speichermodul

. . . . . Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 2 Anfang 3.

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

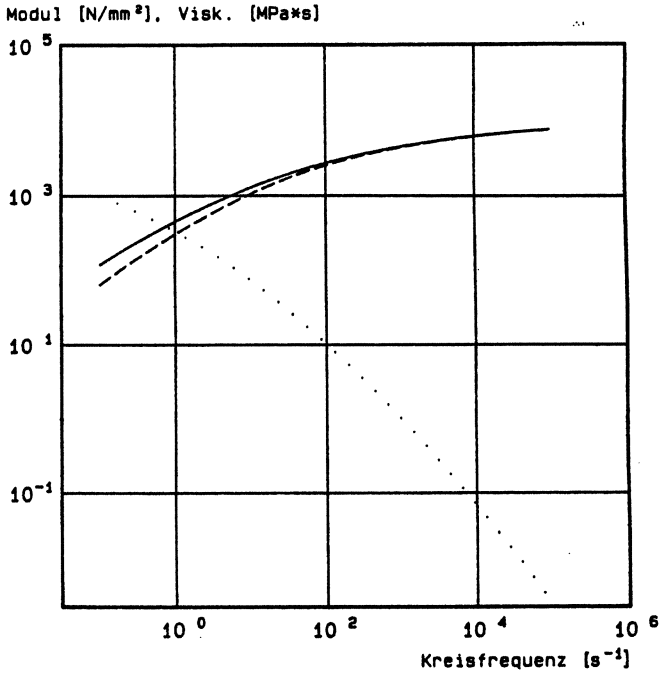
Pruefteemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 460

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 123 M1/T1

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

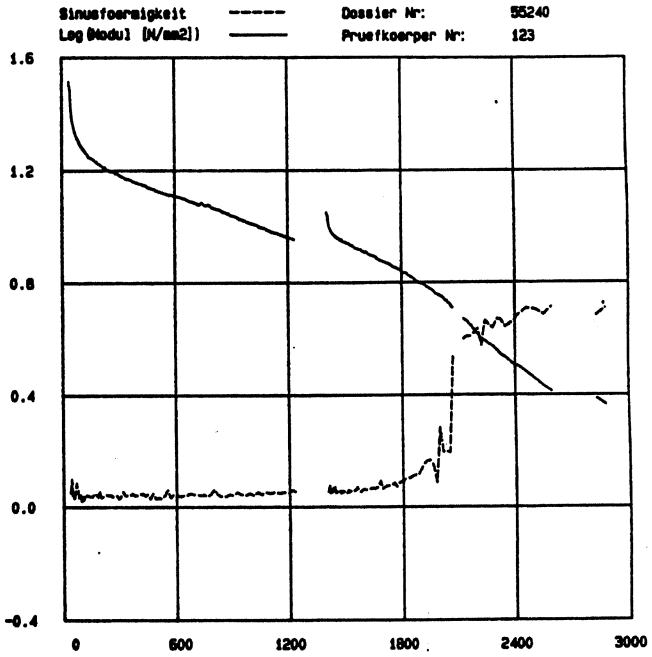


G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

G': Speichermodul

Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 2 Anfang 3.

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

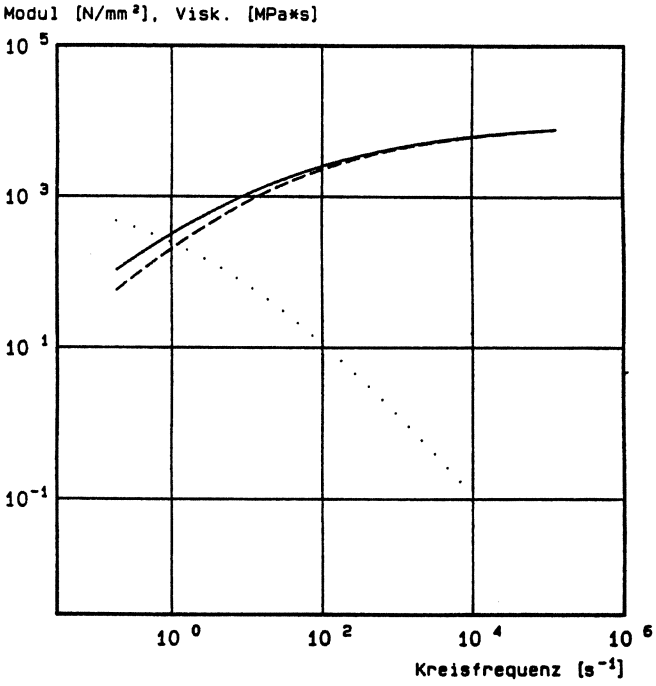
Pruefteperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 460 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 213 M2/T1

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

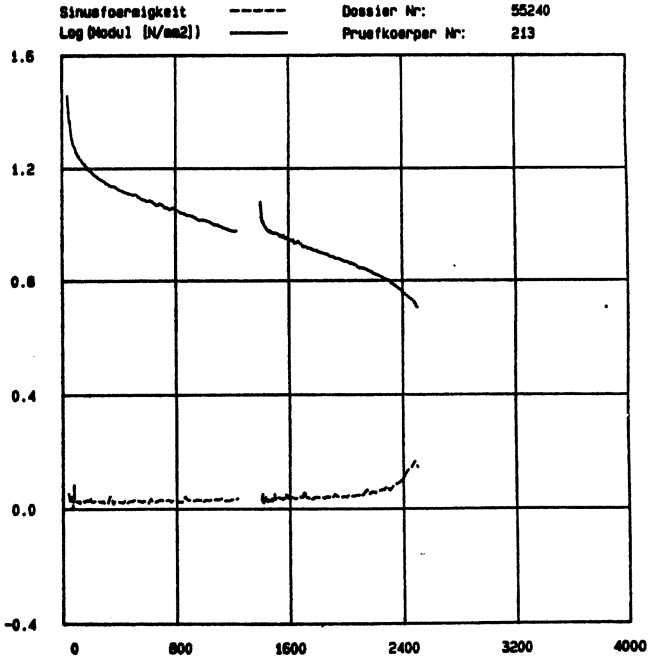


G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

G': Speichermodul

Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 2

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

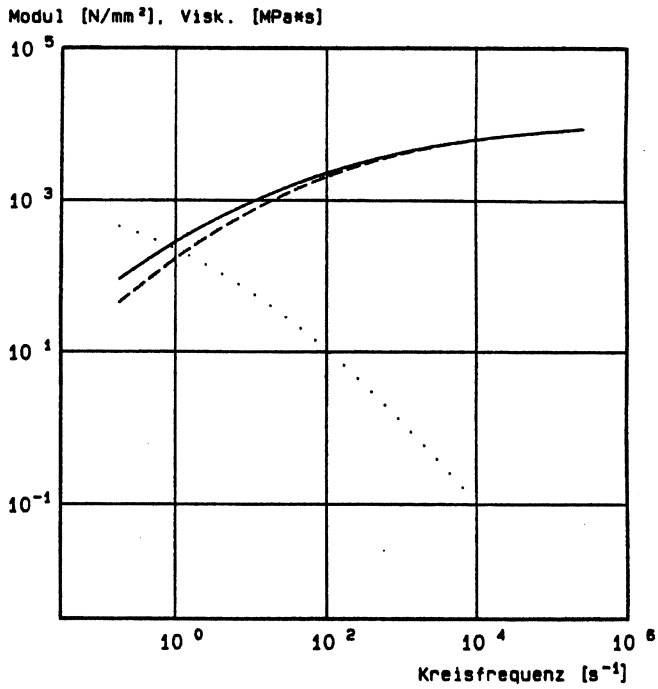
Pruefteperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 550 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 215 M2/T1

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

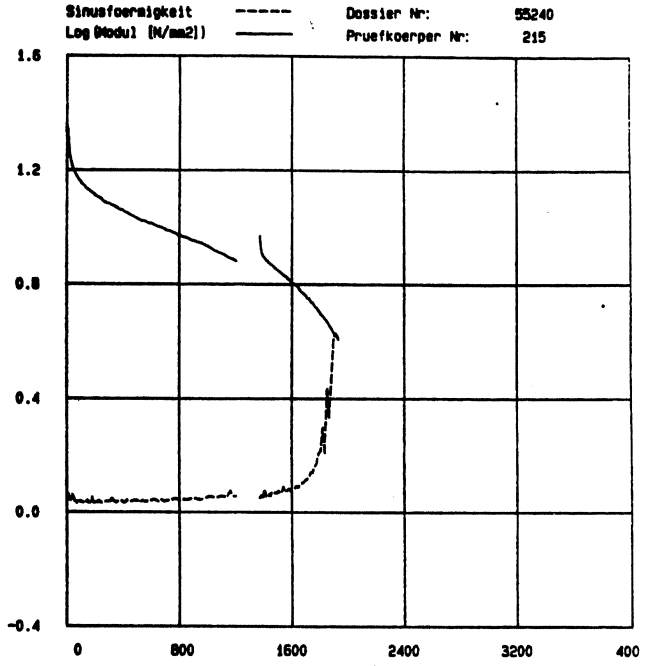


——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

– – – – – G': Speichermodul

. . . . . Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 2

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

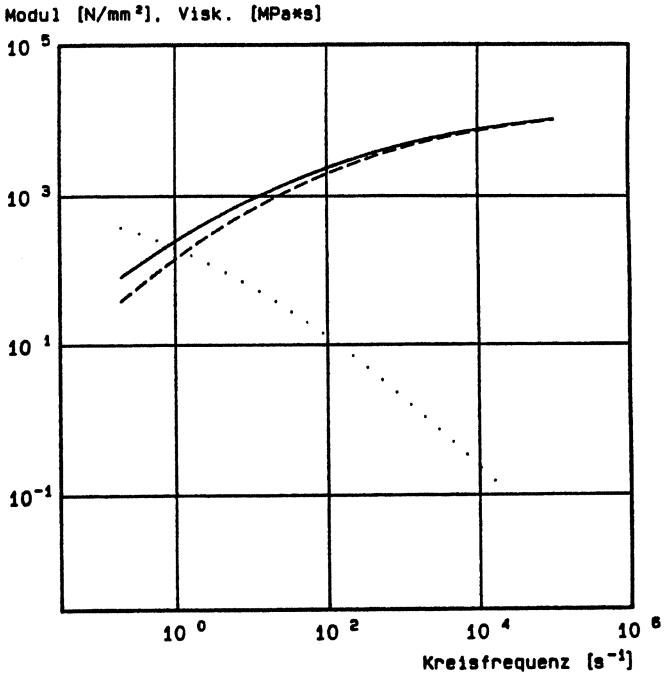
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 525 N

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 305 M3/T1

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

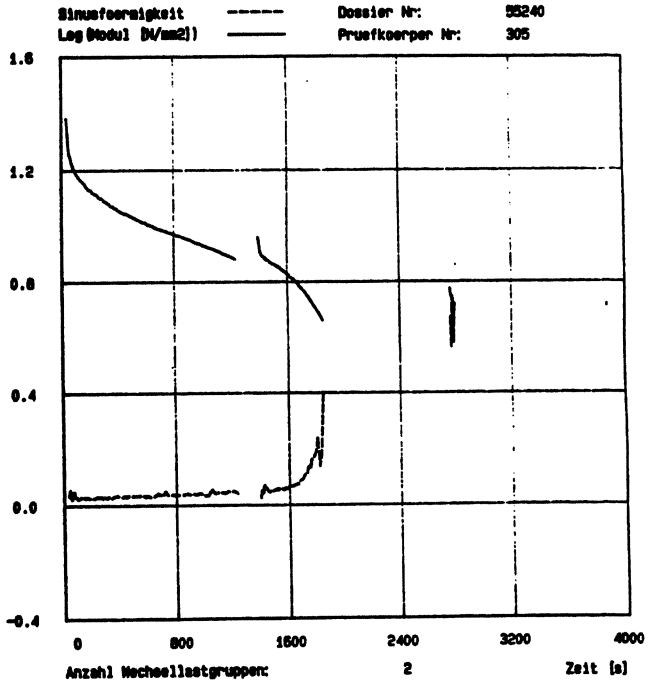


——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

– – – – – G': Speichermodul

. . . . . Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 2

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

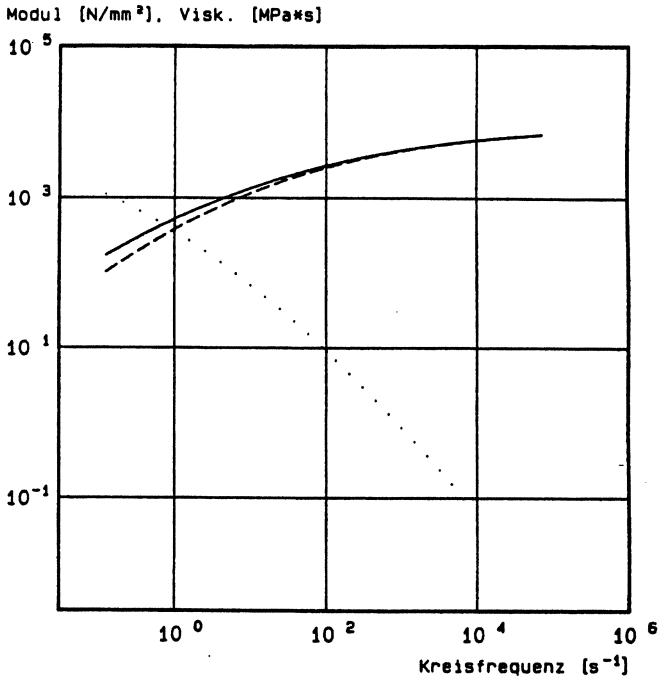
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 458

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 313 M3/T1

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

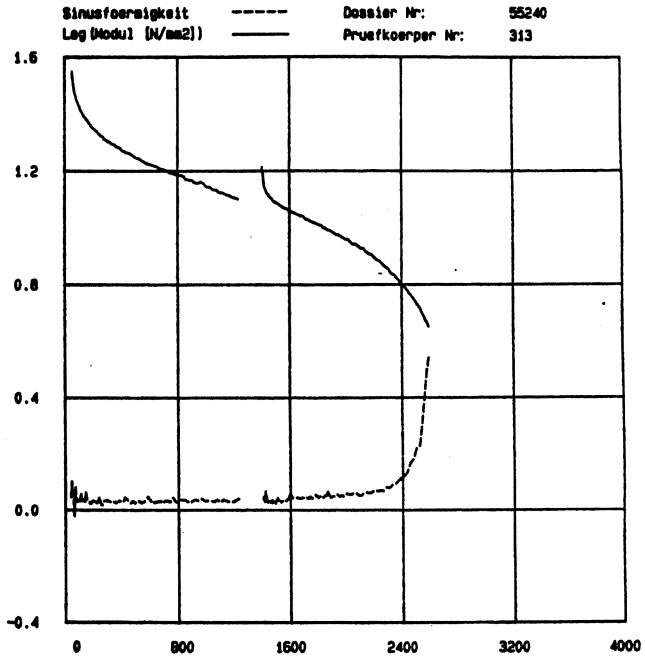


G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

G': Speichermodul

Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 2

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

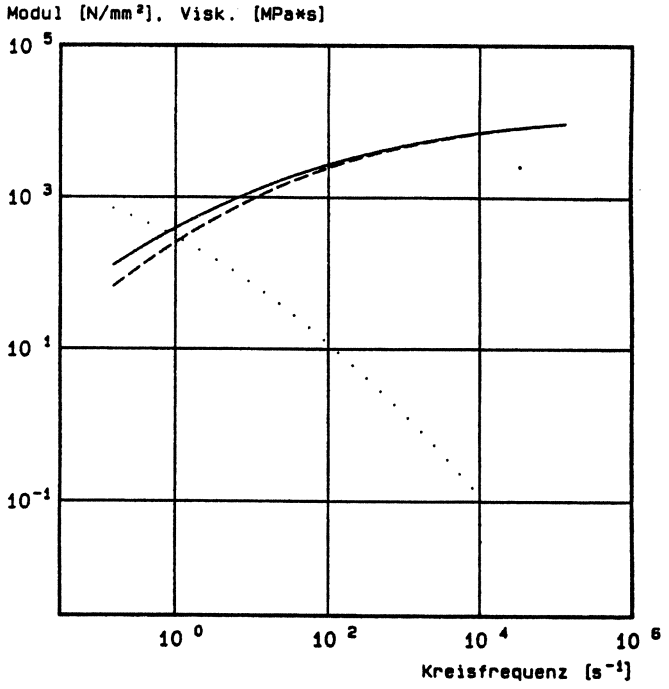
Pruefteemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 500 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 315 M3/T1

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

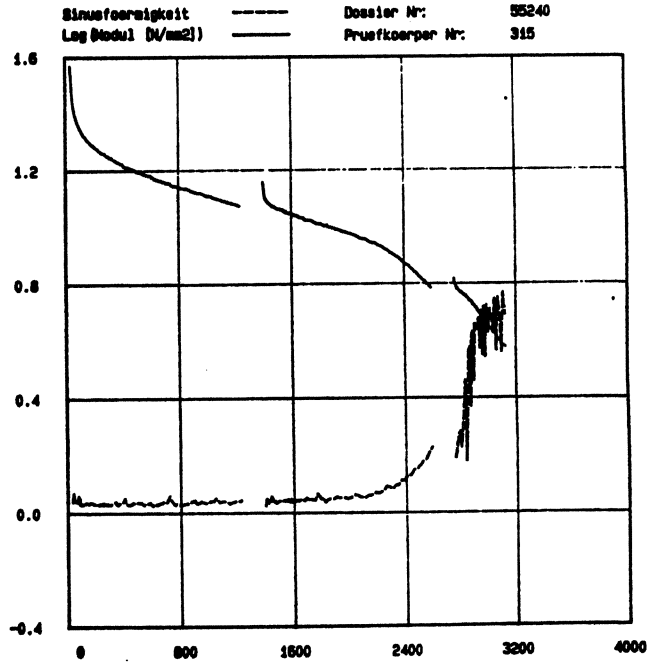


G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

G': Speichermodul

Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 3

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

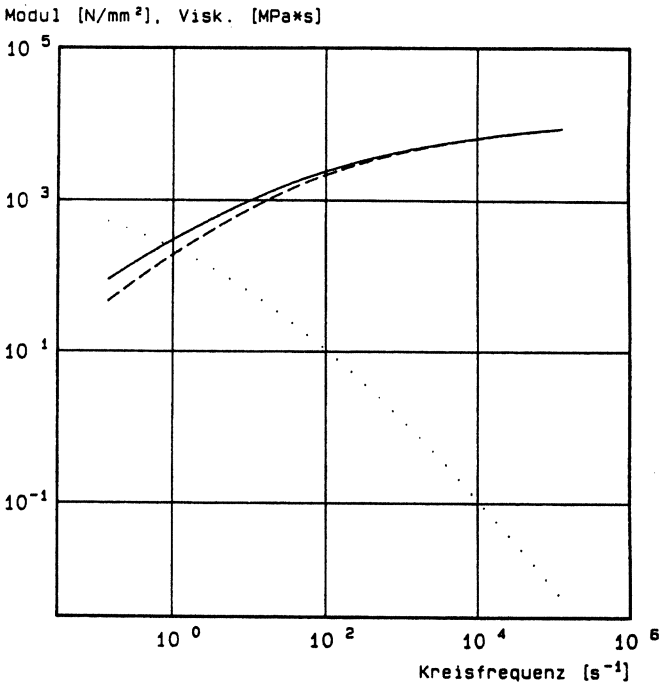
Pruefteemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 400 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 402 M3/T2

Masterkurve bei 20 °C. Ausgleich: Quadratisch



——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

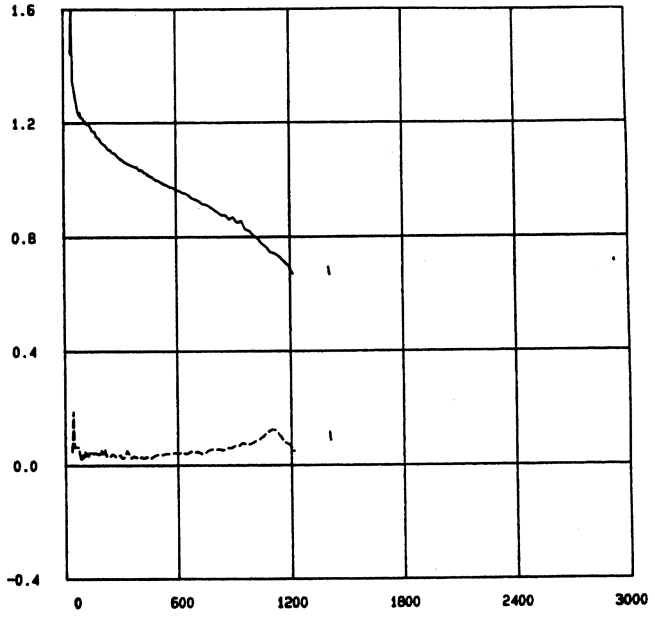
– – – – – G': Speichermodul

. . . . . Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung

Sinusfoermigkeit ----- Dossier Nr: 55240

Log (Modul [N/mm2]) ——— Pruefkoerper Nr: 402



Anzahl Wechsellastgruppen: 1 + Anfang 2.

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

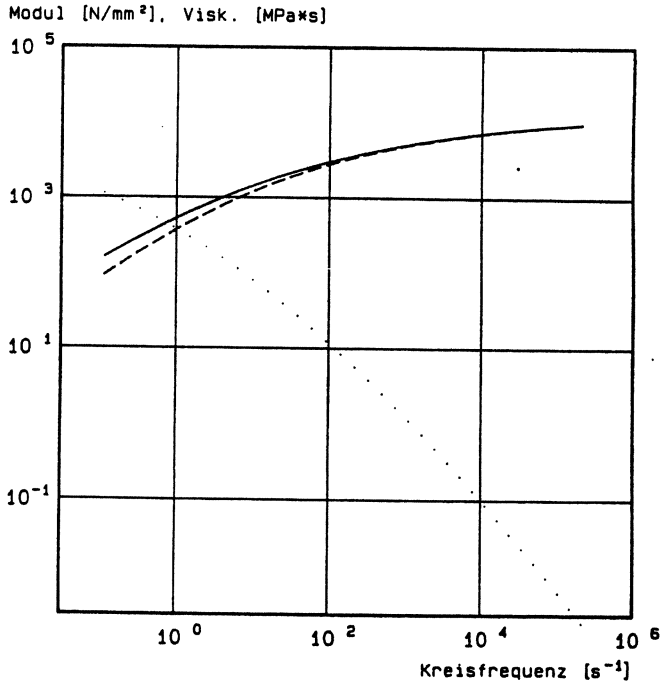
Pruefteemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 425 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 424 M3/T2

Masterkurve bei 20 °C. Ausgleich: Quadratisch



——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

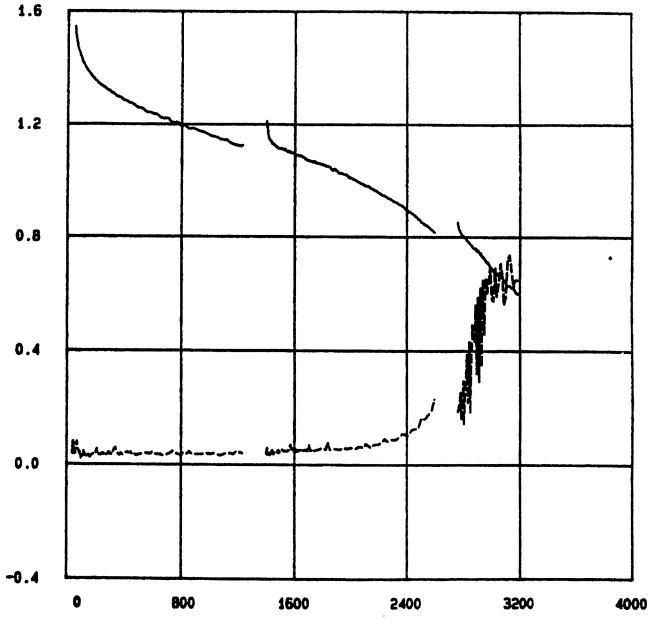
– – – – – G': Speichermodul

. . . . . Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung

Sinusfoermigkeit ----- Dossier Nr: 55240

Log (Modul [N/mm2]) ——— Pruefkoerper Nr: 424



Anzahl Wechsellastgruppen: 2 + Anfang 3.

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

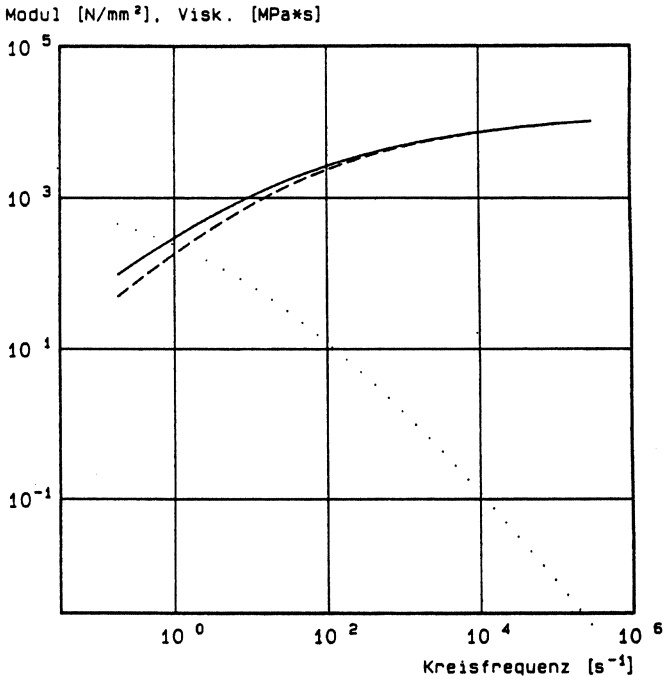
Pruefteemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 460 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 403 M3/T2

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

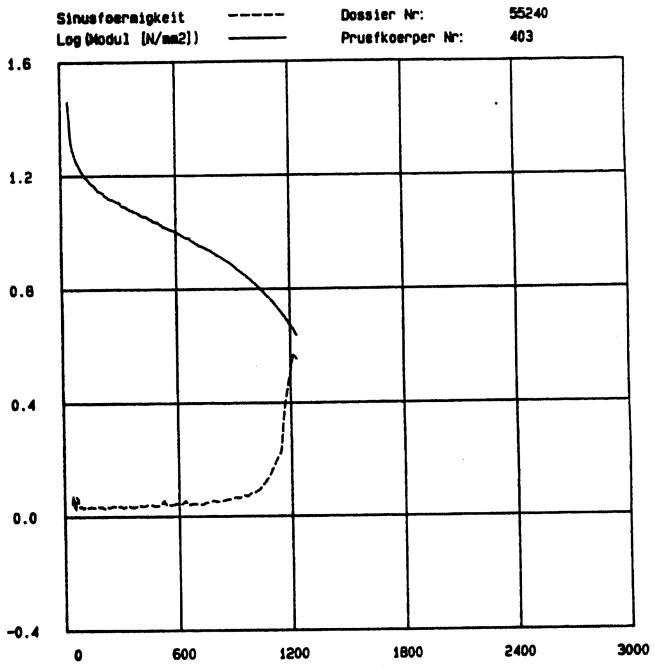


G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

G': Speichermodul

Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 1

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

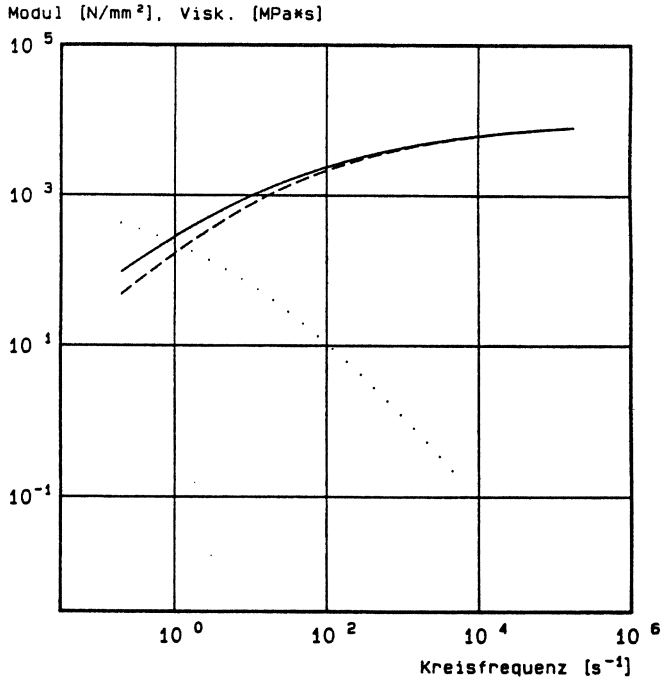
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 438 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 405 M3/T2

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

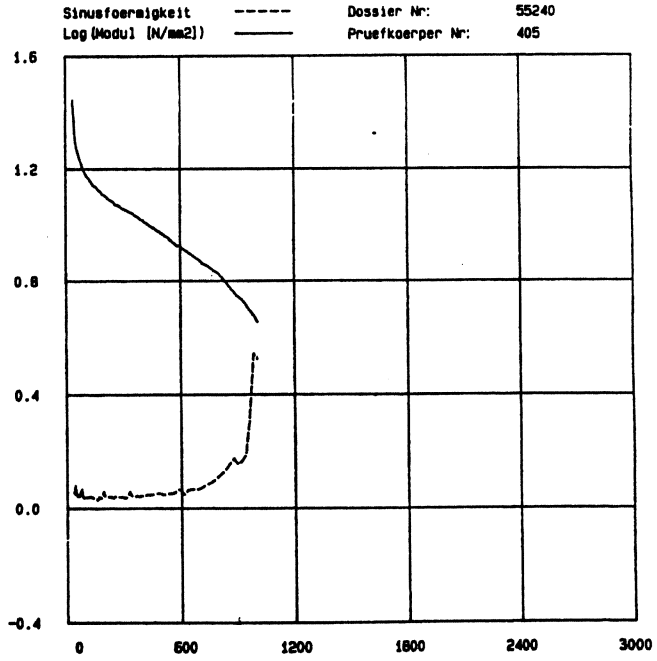


G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

G': Speichermodul

Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 1

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

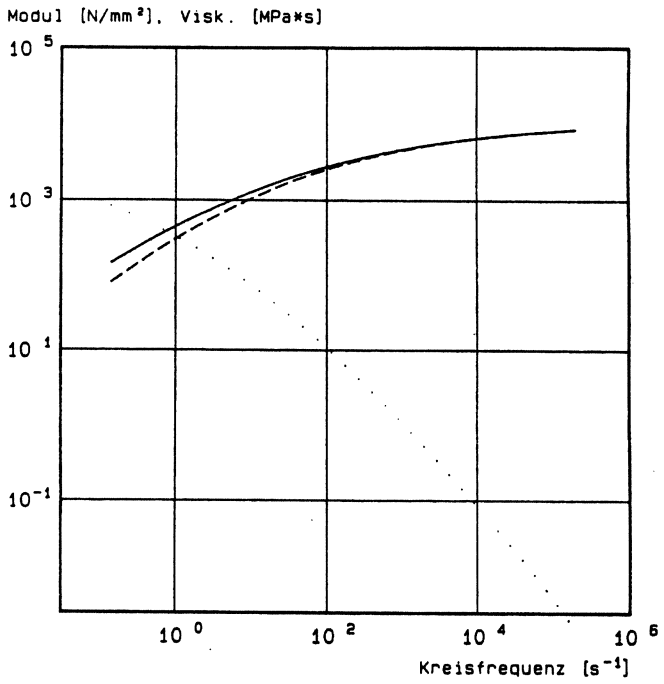
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 425 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 423 M3/T2

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

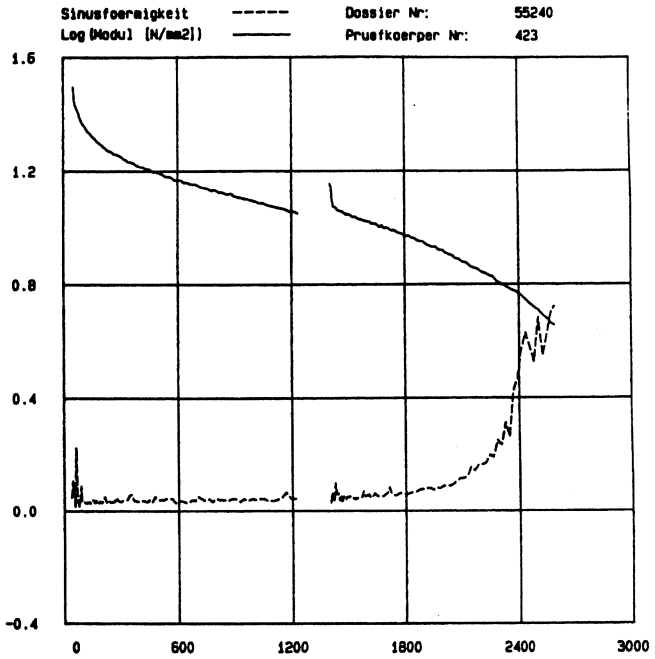


G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

G': Speichermodul

Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 2

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

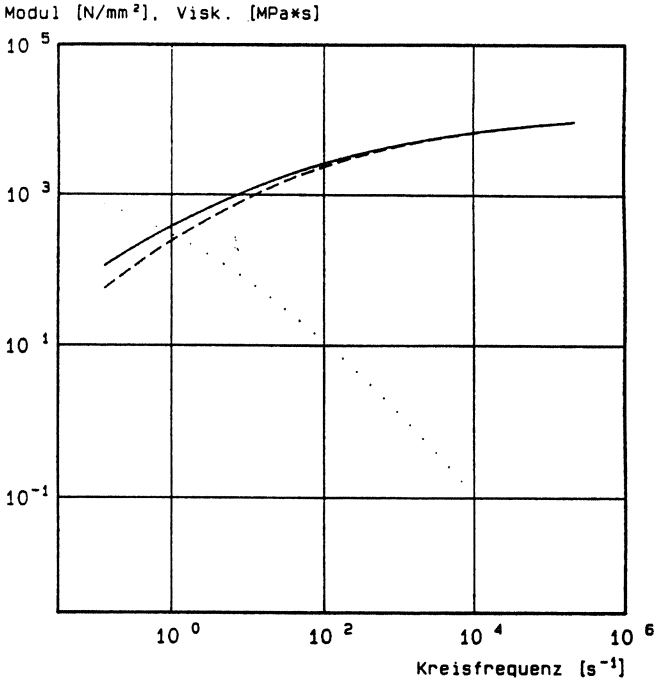
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 488 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 515 M2/T2

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

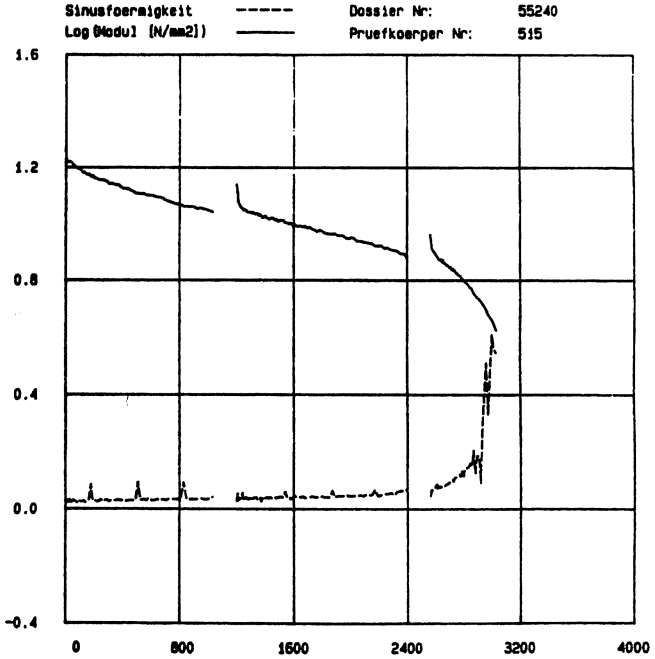


G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

G': Speichermodul

Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 3

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

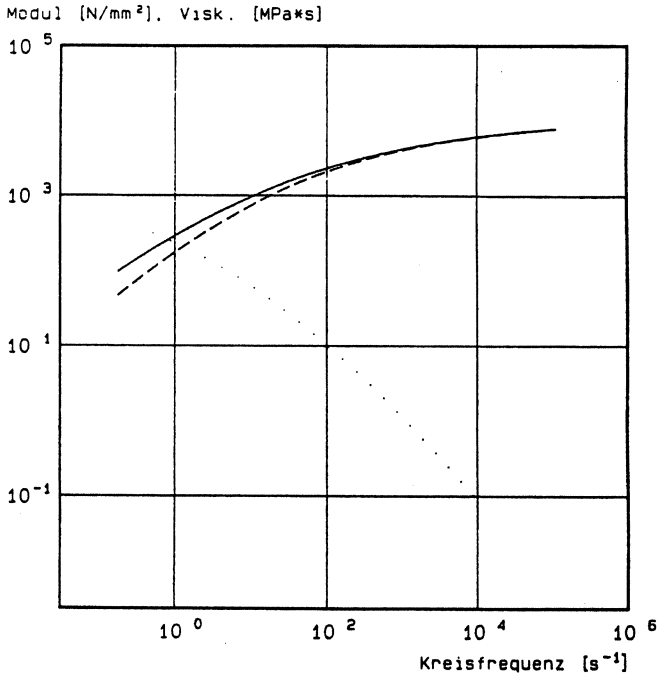
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 445 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 512 M2/T2

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

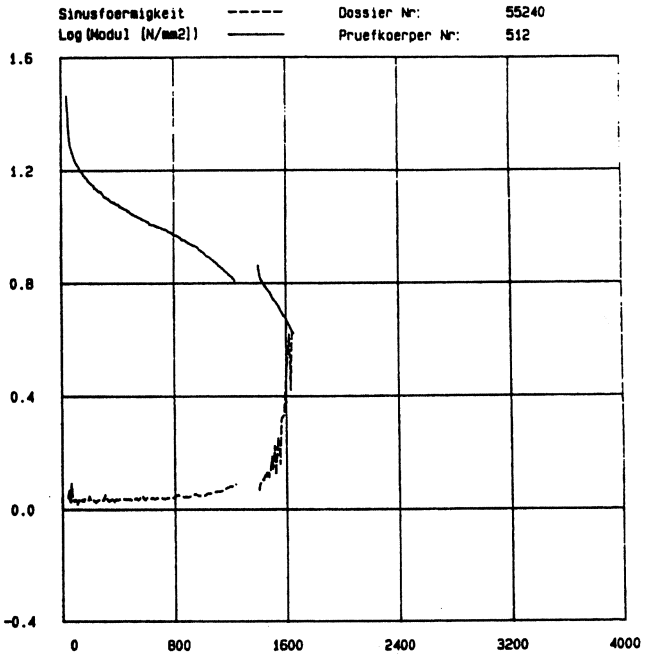


——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

– – – – – G': Speichermodul

Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 2

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

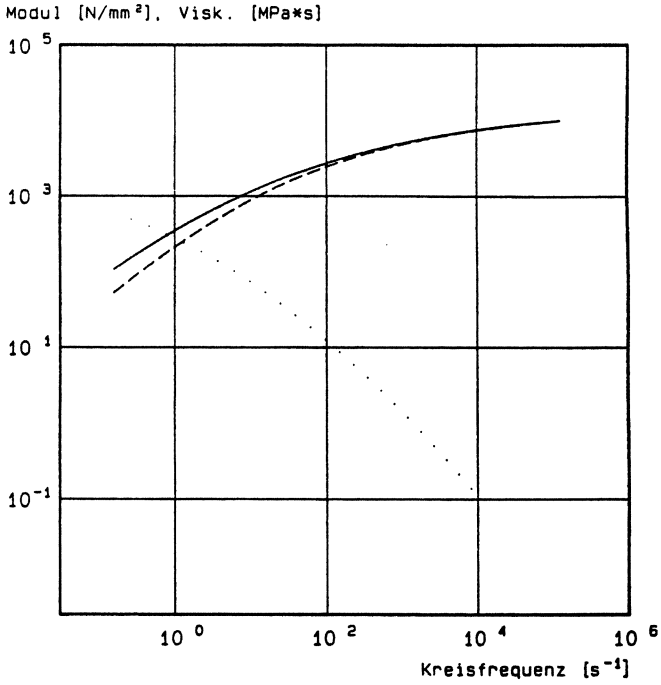
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 475 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 514 M2/T2

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

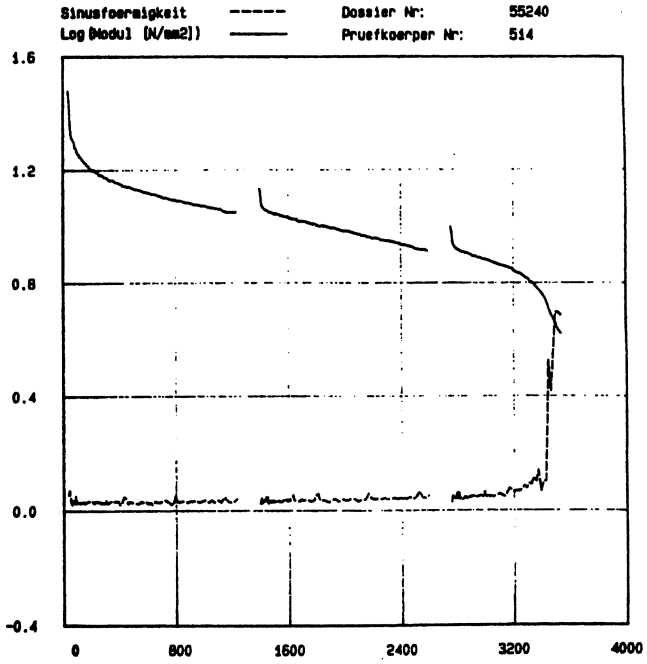


——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

– – – – – G': Speichermodul

Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 3

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

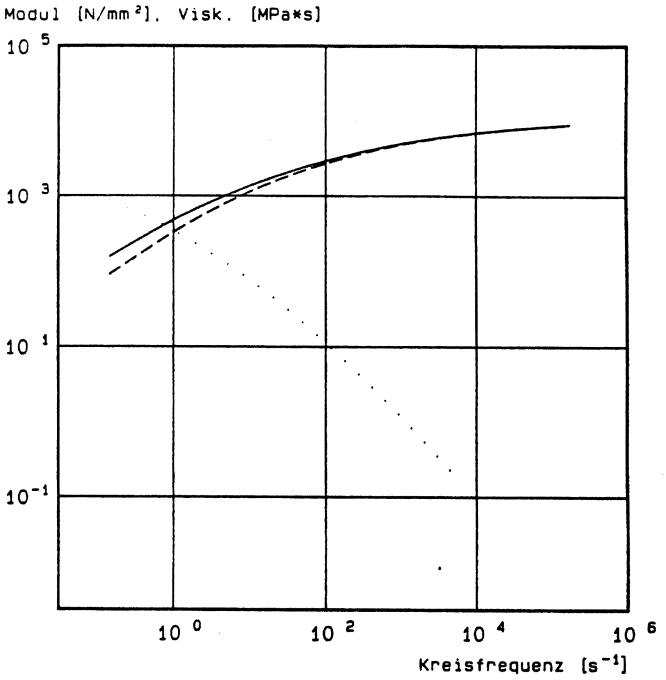
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 463 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 601 M1/T2

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch



——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

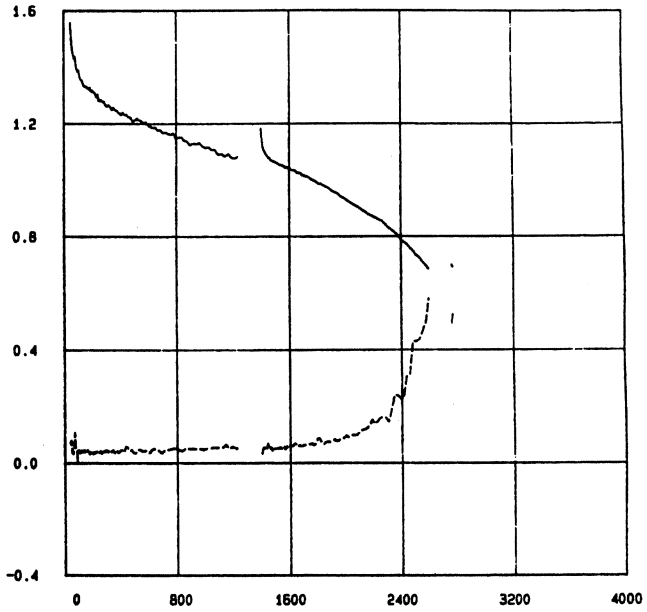
– – – – – G': Speichermodul

· · · · · Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung

Sinusfoermigkeit ----- Dossier Nr: 55240

Log (Modul [N/mm2]) ——— Pruefkoerper Nr: 601



Anzahl Wechsellastgruppen: 2

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

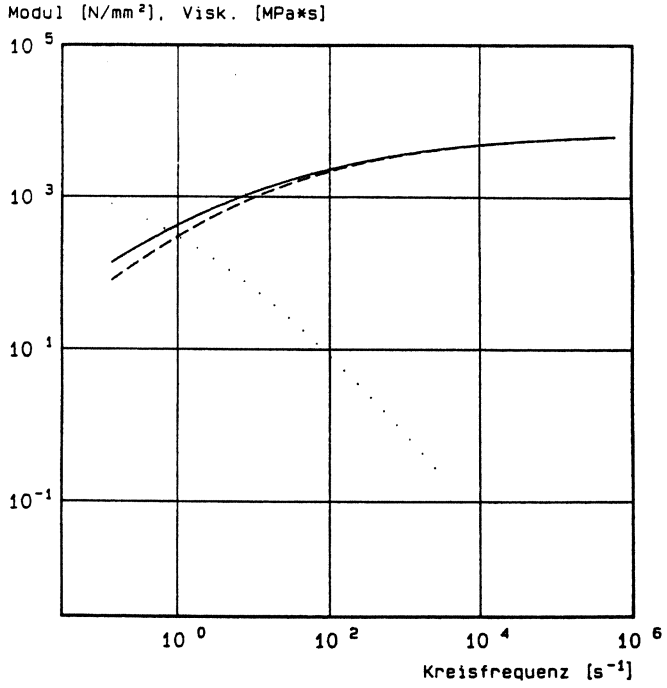
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 413 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 603 M1/T2

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch



——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

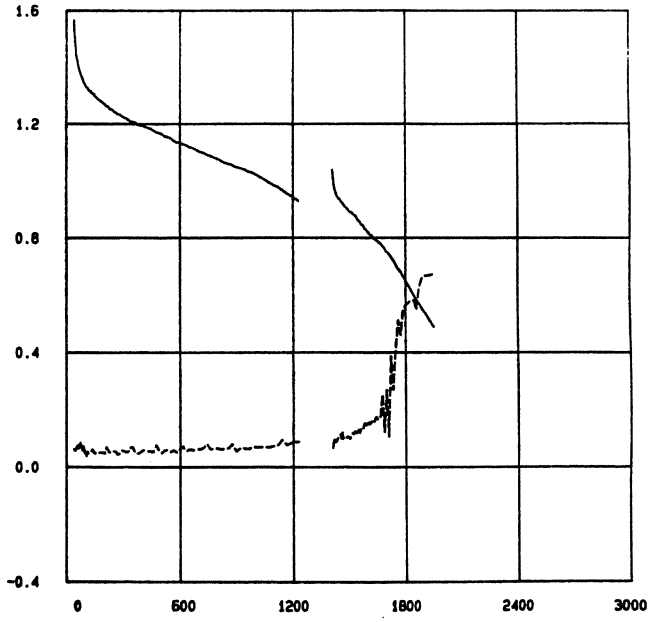
– – – – – G': Speichermodul

· · · · · Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung

Sinusfoermigkeit ----- Dossier Nr: 55240

Log (Modul [N/mm2]) ——— Pruefkoerper Nr: 603



Anzahl Wechsellastgruppen: 2

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

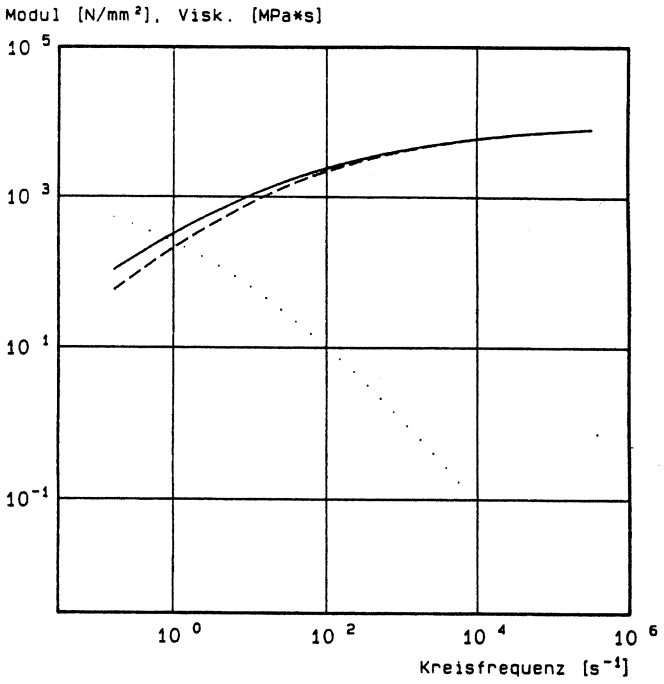
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 388 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 605 M1/T2

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

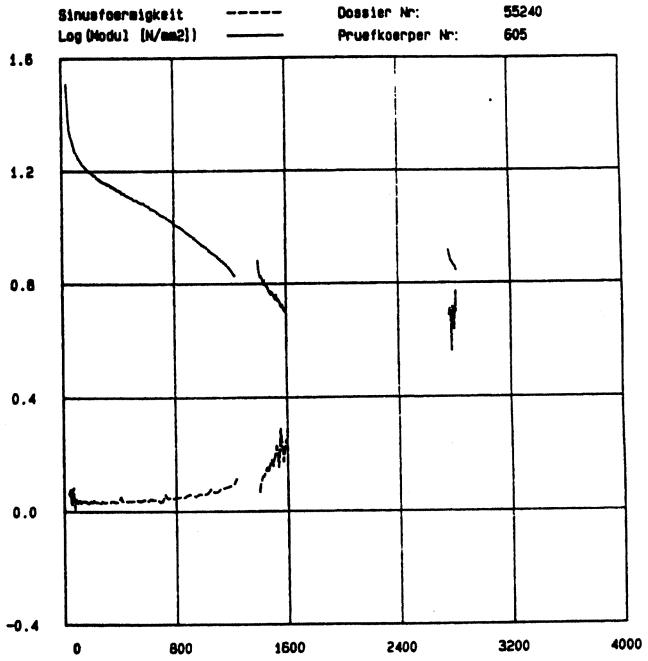


——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

– – – – – G': Speichermodul

. . . . . Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 1 + 2. angefangen

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

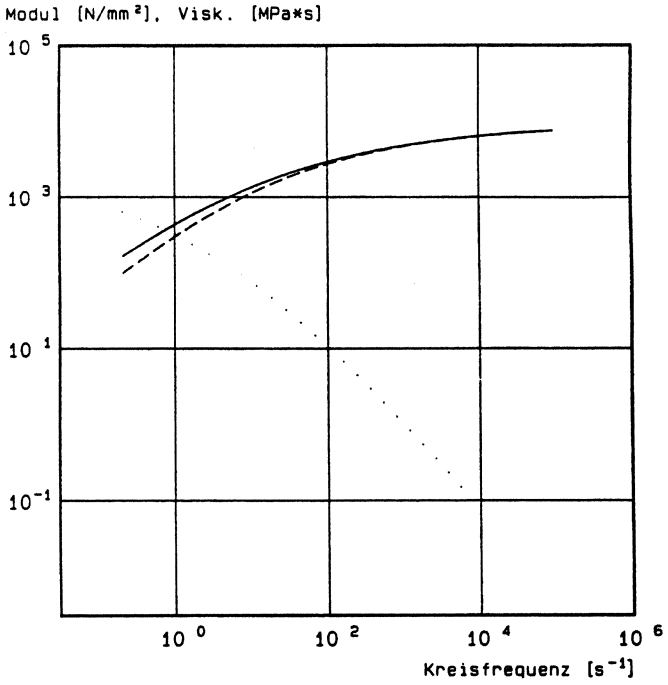
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 412 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 613 M1/T2

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

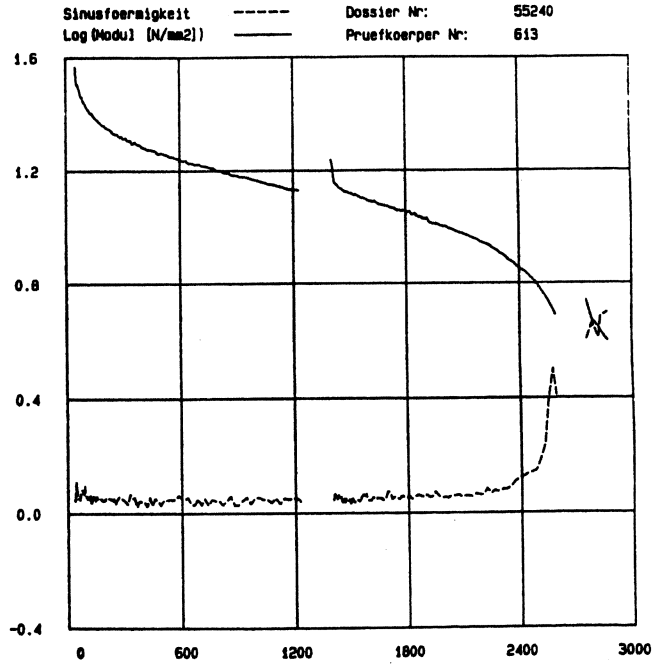


——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

– – – – – G': Speichermodul

. . . . . Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 2 + Anfang 3.

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

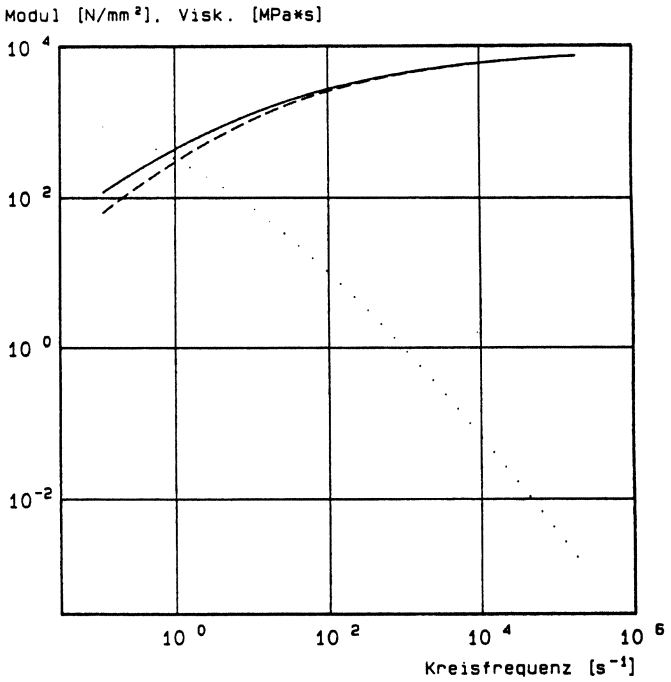
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 375 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 623 M1/T2

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch



——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

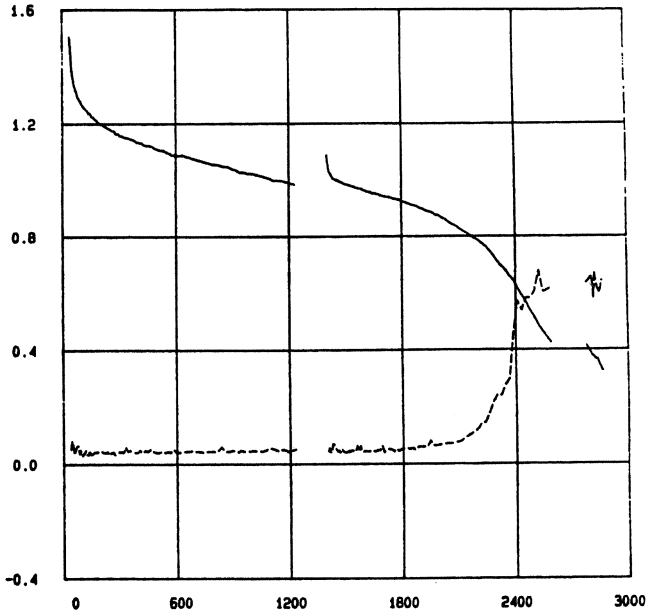
– – – – – G': Speichermodul

. . . . . Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung

Sinusfoermigkeit ----- Dossier Nr: 55240

Log (Modul [N/mm2]) ——— Pruefkoerper Nr: 623



Anzahl Wechsellastgruppen: 2 + Anfang 3.

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

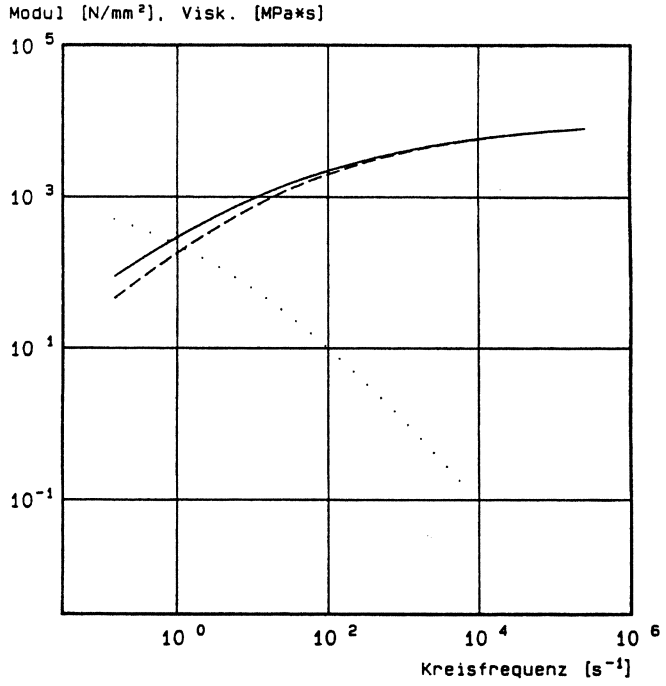
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 450 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 701 M1/T3

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch



——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

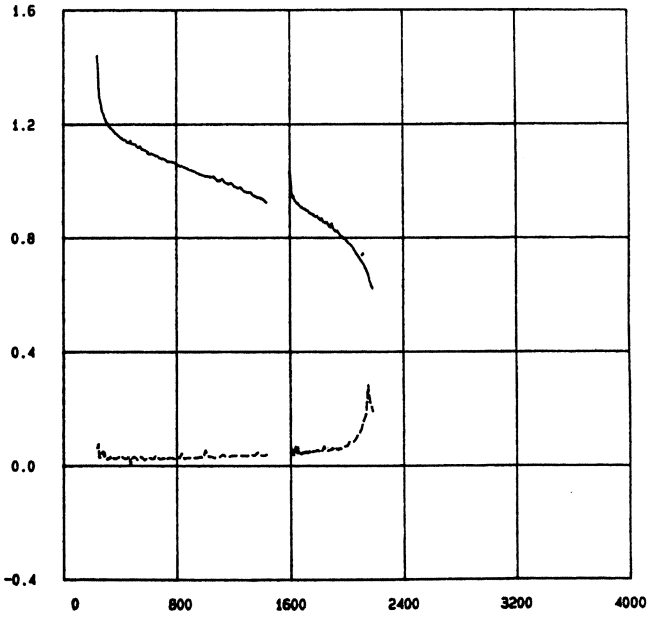
– – – – – G': Speichermodul

. . . . . Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung

Sinusfoermigkeit ----- Dossier Nr: 55240

Log (Modul [N/mm2]) ——— Pruefkoerper Nr: 701



Anzahl Wechsellastgruppen: 2

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

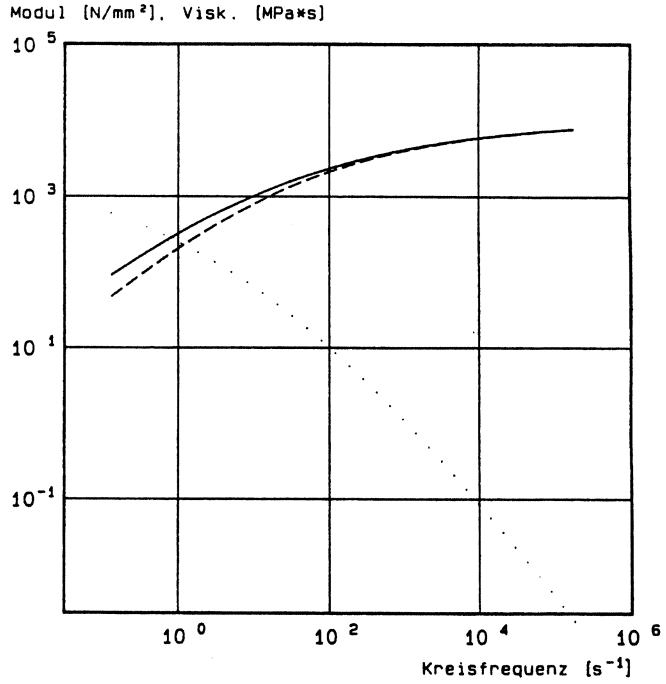
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 463 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 703 M1/T3

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch



——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

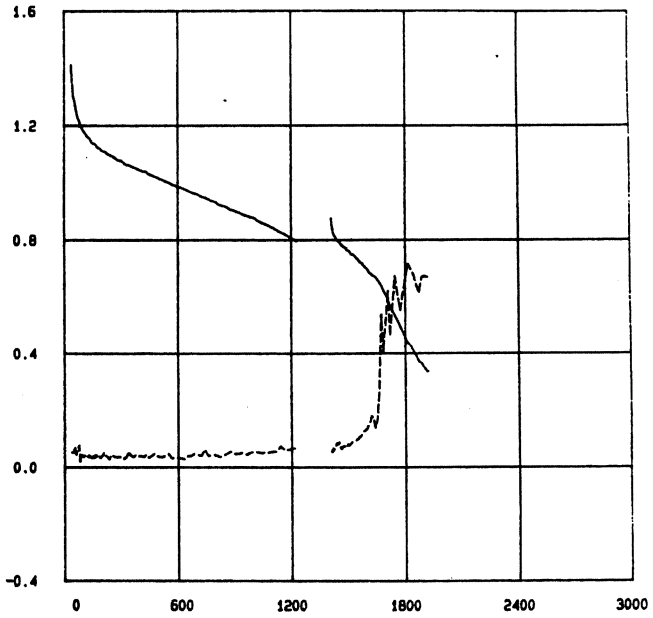
– – – – – G': Speichermodul

· · · · · · Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung

Sinusfoermigkeit ----- Dossier Nr: 55240

Log(Modul [N/mm2]) ——— Pruefkoerper Nr: 703



Anzahl Wechsellastgruppen: 2

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

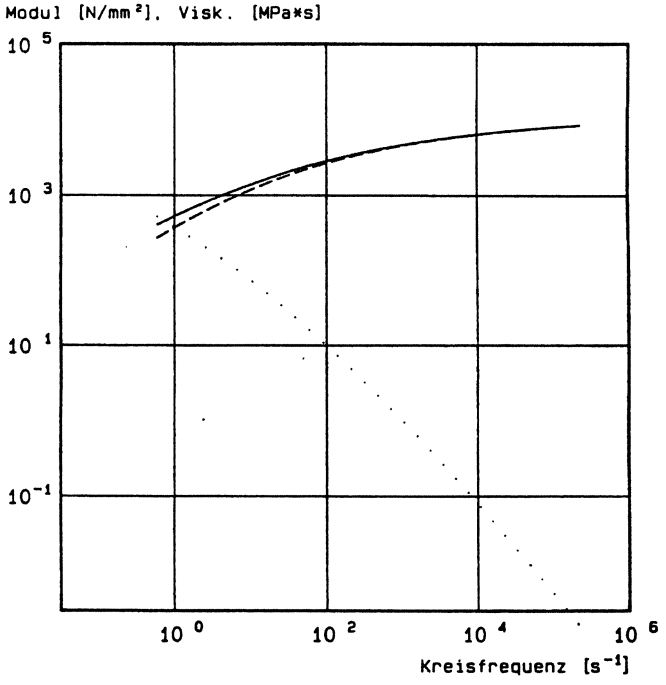
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Grosse: 475 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 713 M1/T3

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch



——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

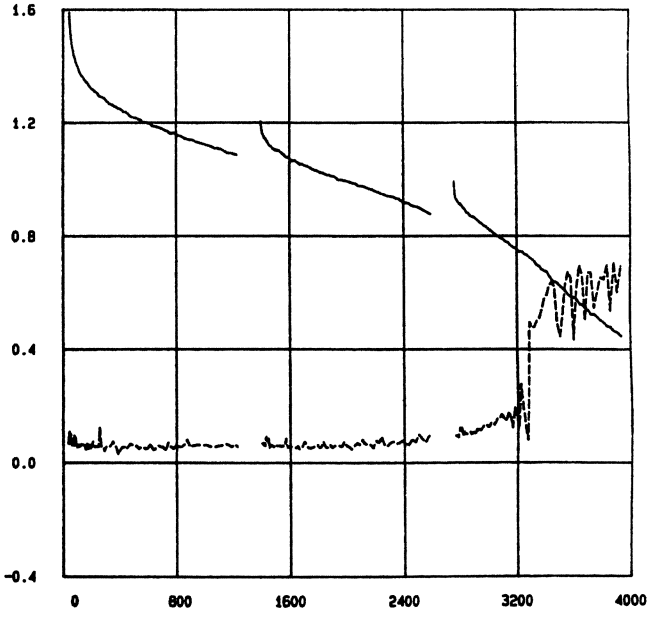
– – – – – G': Speichermodul

· · · · · · Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung

Sinusfoermigkeit ----- Dossier Nr: 55240

Log(Modul [N/mm2]) ——— Pruefkoerper Nr: 713



Anzahl Wechsellastgruppen: 3

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

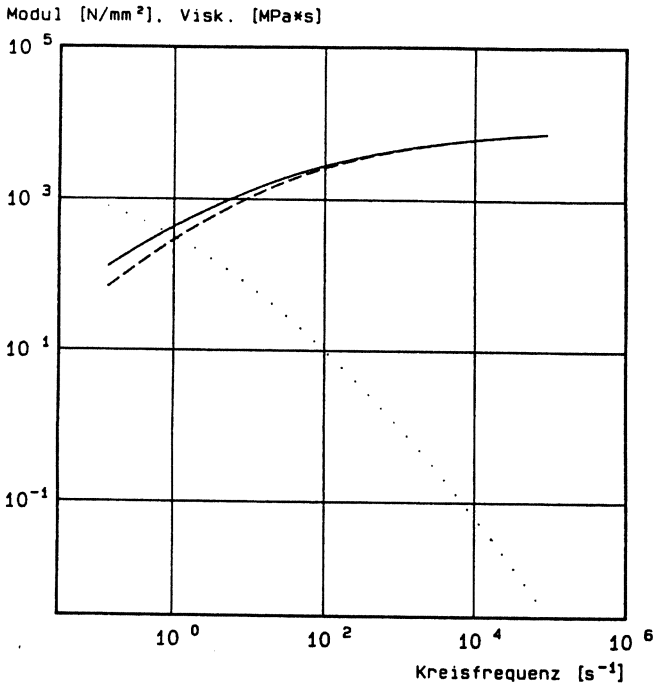
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Grosse: 460 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 723 M1/T3

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch



——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

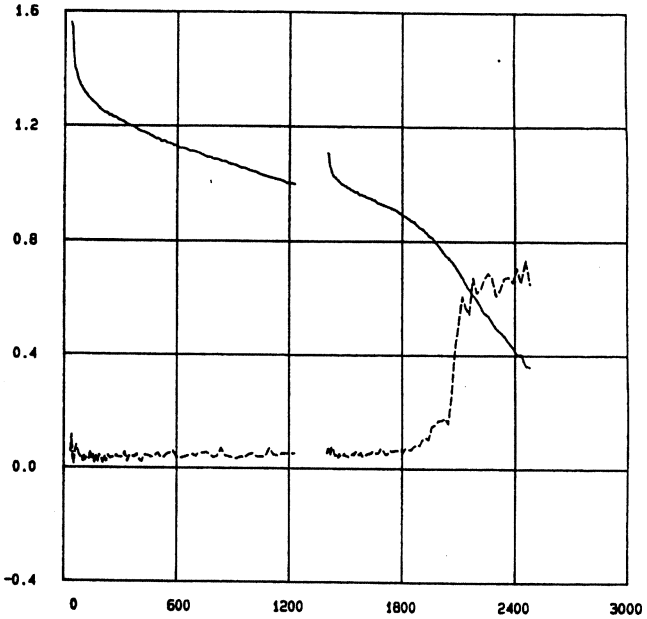
– – – – – G': Speichermodul

. . . . . Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung

Sinusfoermigkeit ----- Dossier Nr: 55240

Log (Modul [N/mm2]) ——— Pruefkoerper Nr: 723



Anzahl Wechsellastgruppen: 2

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

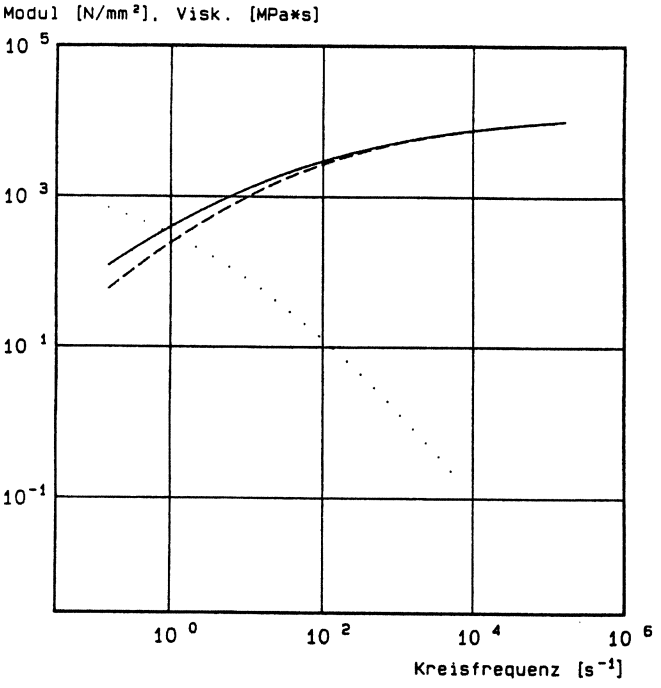
Pruefteemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 425 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 801 M2/T3

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch



——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

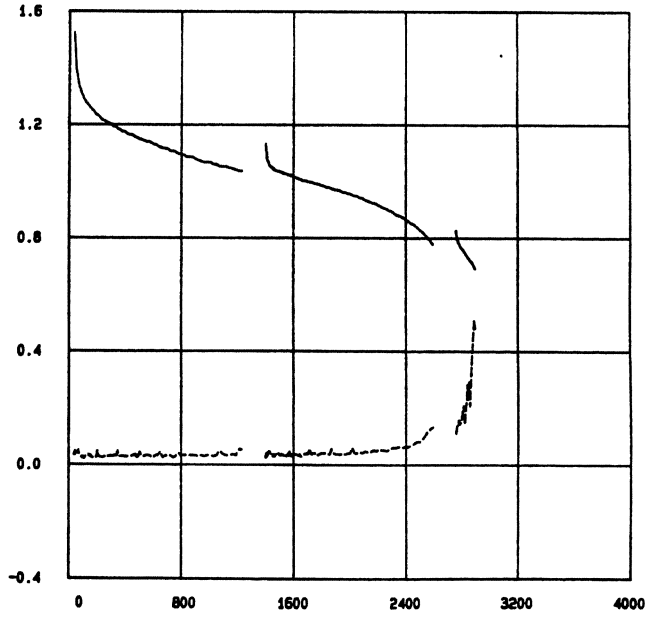
– – – – – G': Speichermodul

. . . . . Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung

Sinusfoermigkeit ----- Dossier Nr: 55240

Log (Modul [N/mm2]) ——— Pruefkoerper Nr: 801



Anzahl Wechsellastgruppen: 2 + 3.angefangen

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

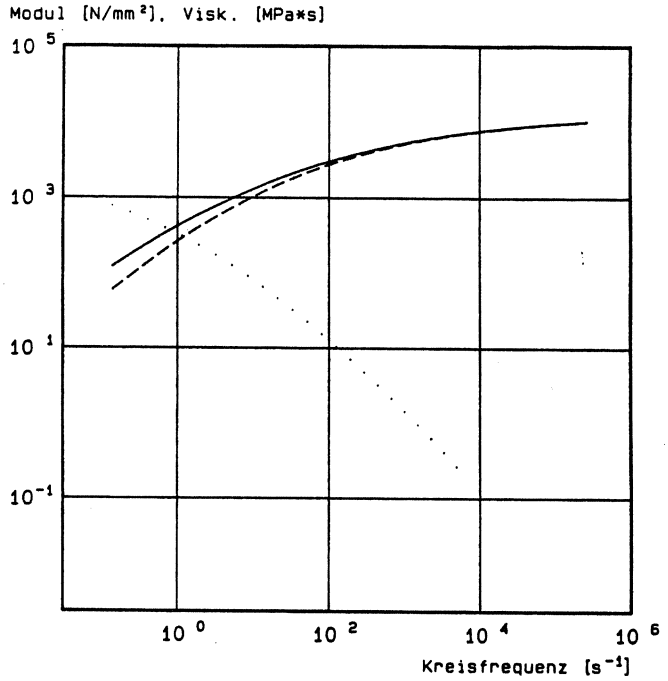
Pruefteemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 450 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 802 M2/T3

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

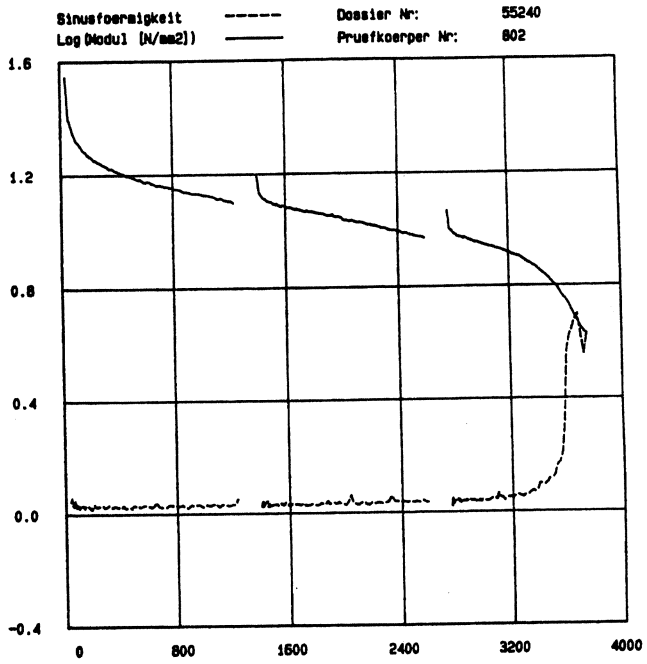


G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

G': Speichermodul

Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 3

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

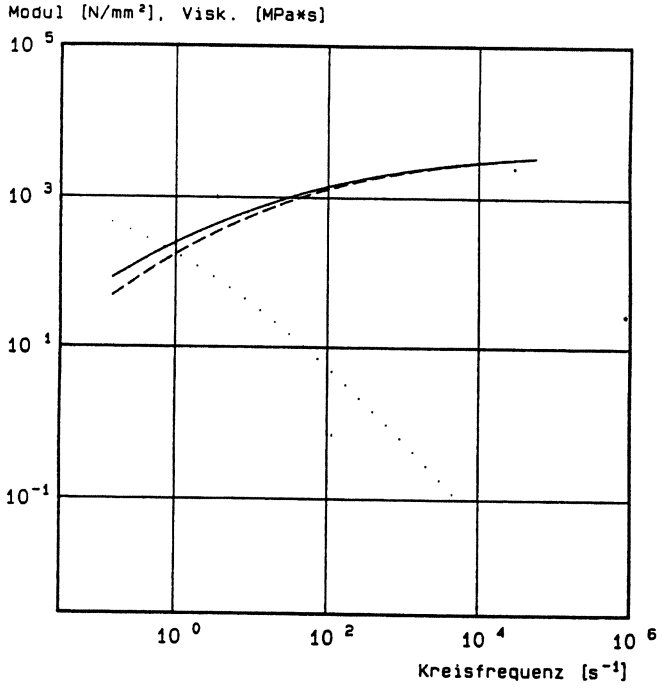
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 450 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 803 M2/T3

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

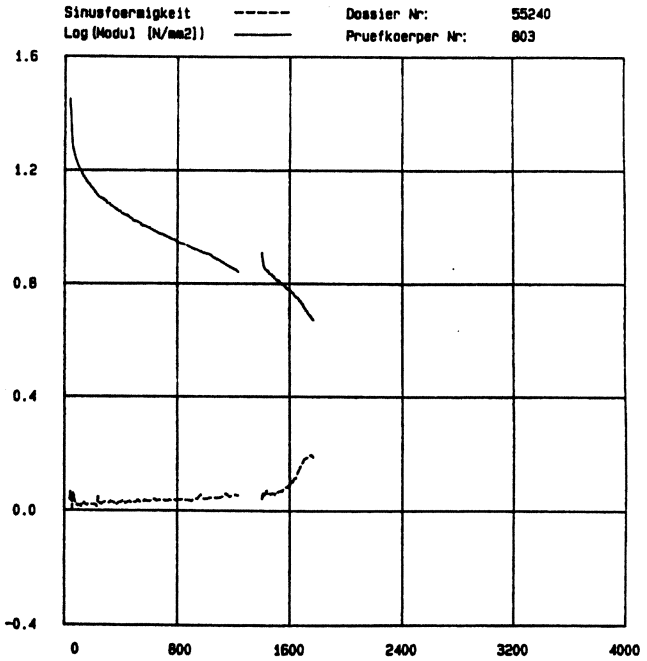


G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

G': Speichermodul

Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 1 + 2. angefangen

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

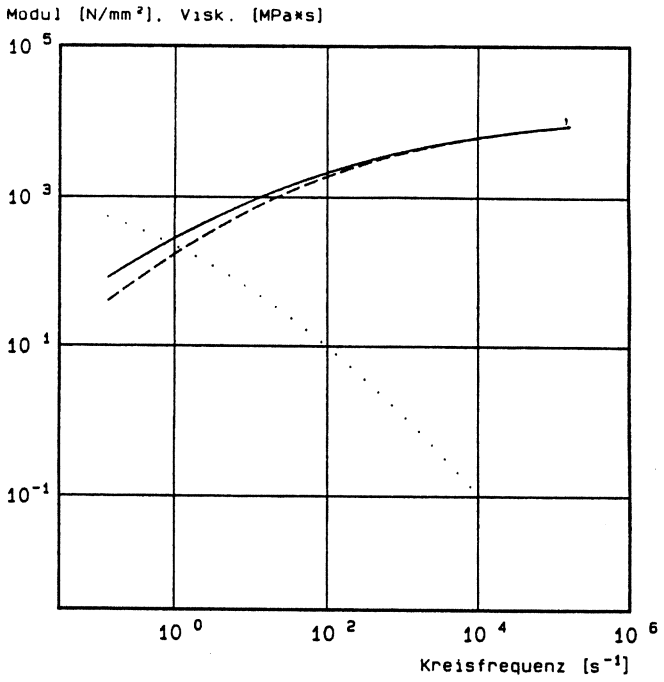
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 425 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 813 M2/T3

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

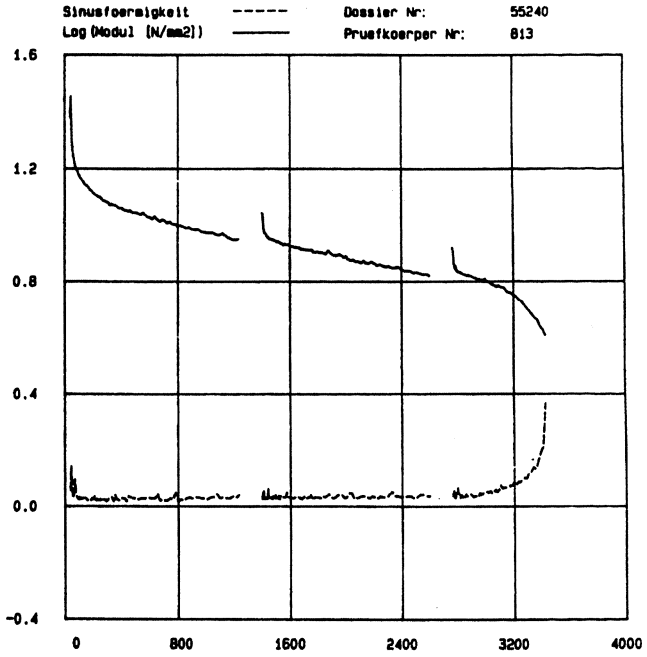


——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

– – – – – G': Speichermodul

. . . . . Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 3

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

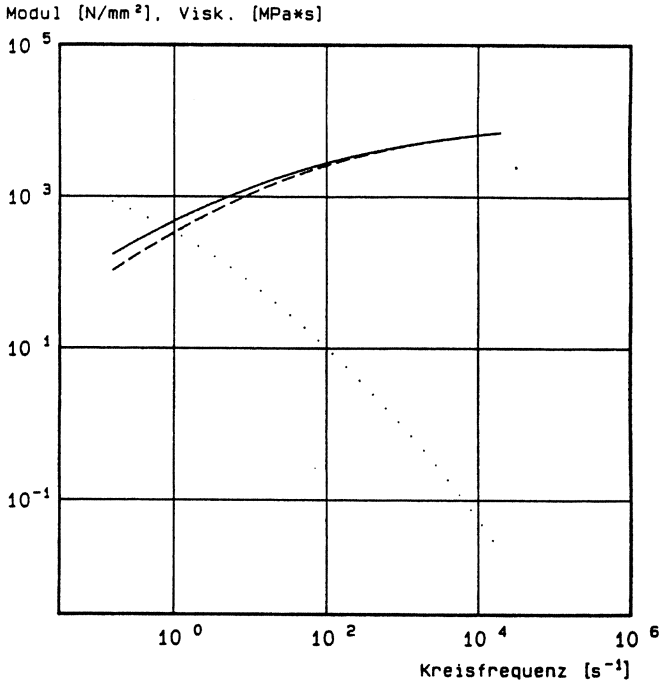
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 538 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 903 M3/T3

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch

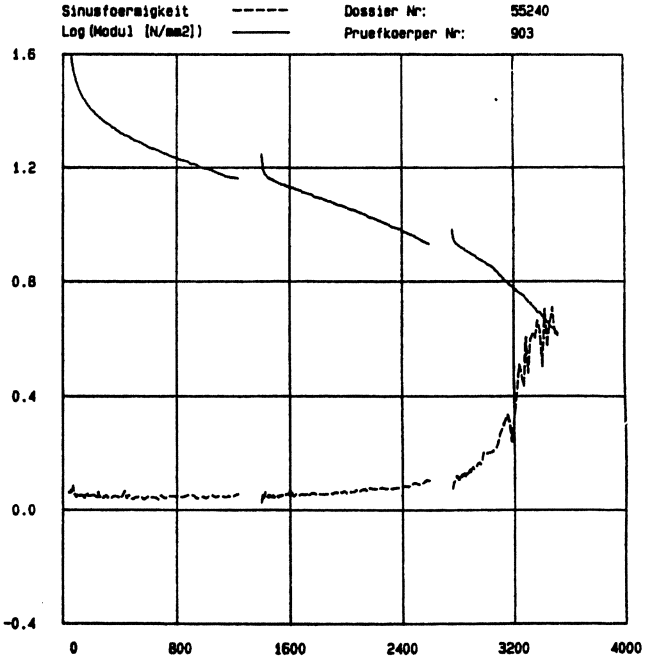


——— G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

– – – – – G': Speichermodul

. . . . . Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung



Anzahl Wechsellastgruppen: 3

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

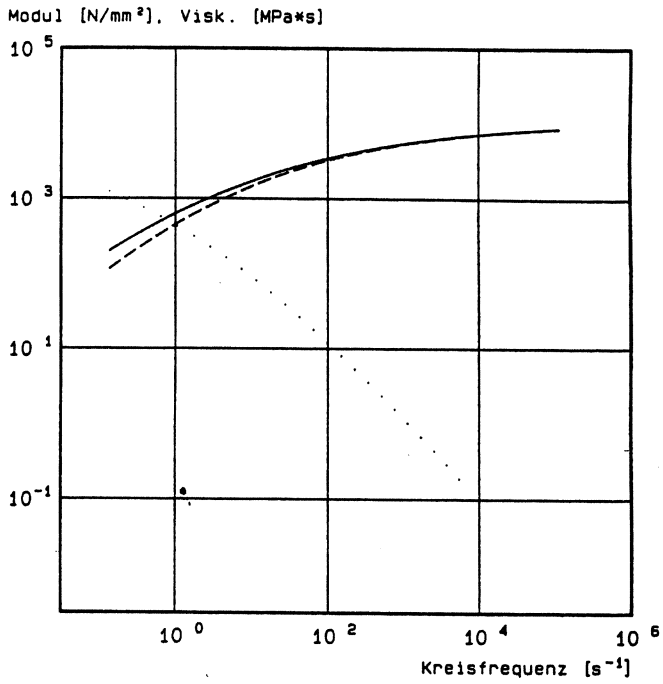
Prueftemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 463 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 901 M3/T3

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch



G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

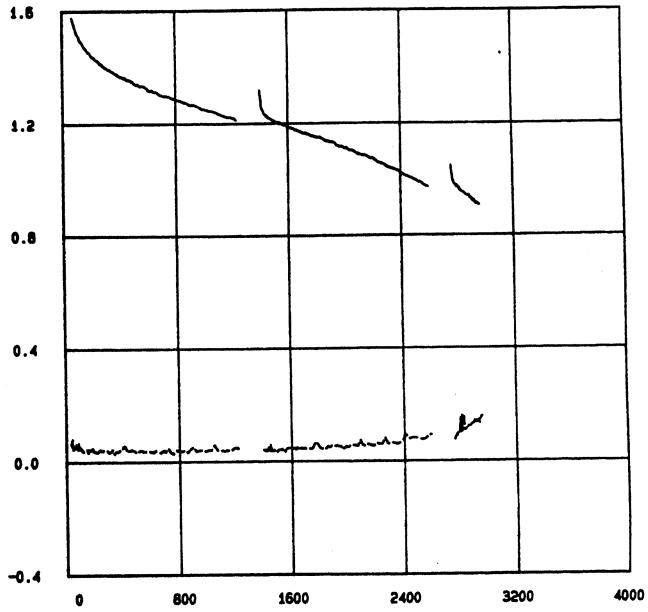
G': Speichermodul

Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung

Sinusfoermigkeit ----- Dossier Nr: 55240

Log (Modul [N/mm2]) ——— Pruefkoerper Nr: 901



Anzahl Wechsellastgruppen: 2 +3. angefangen

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

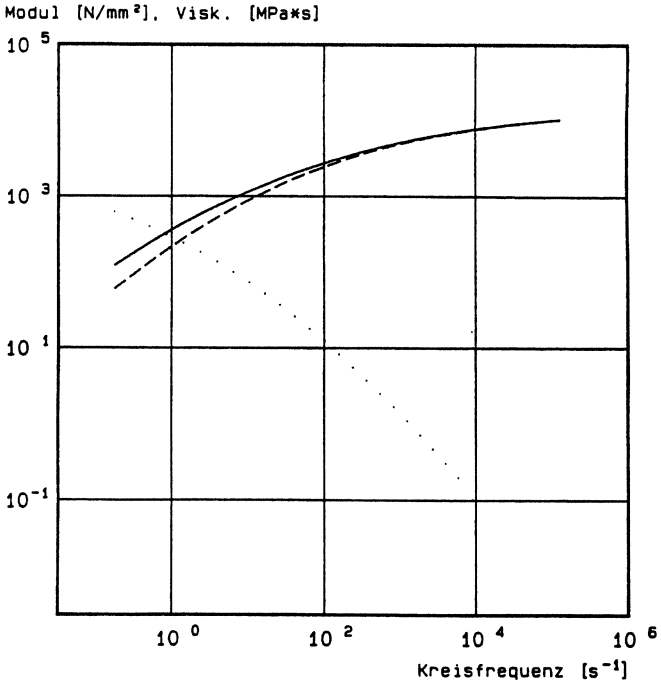
Pruefteemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 438 [N]

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

Pruefkoerper 902 M3/T3

Masterkurve bei 20 °C, Ausgleich: Quadratisch



G*: Betrag des komplexen Schubmoduls

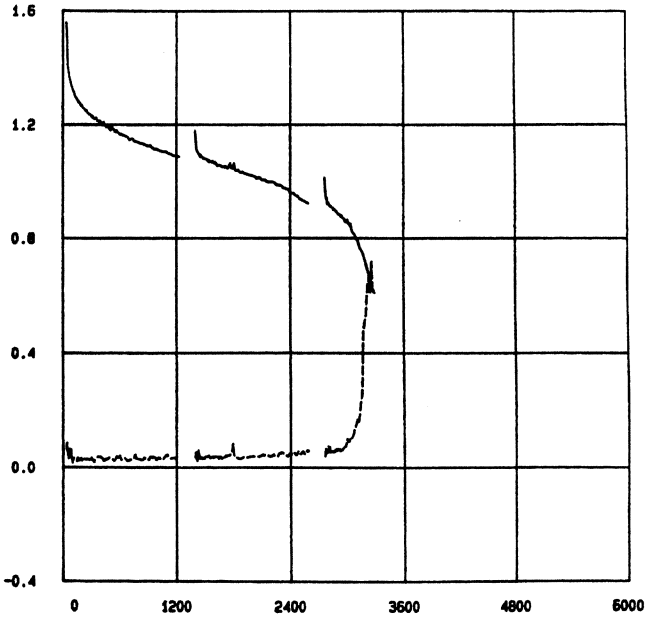
G': Speichermodul

Schwingungsviskosität

Ermuedungspruefung

Sinusfoermigkeit ----- Dossier Nr: 55240

Log (Modul [N/mm2]) ——— Pruefkoerper Nr: 902



Anzahl Wechsellastgruppen: 3

Schwingungen pro Wechsellastgruppe: 300

Pruefteemperatur [oC]: 40

Zu regelnde Groesse: 450 N

Kennwert der Sinusfoermigkeit zeigt Bruch durch Sprung an

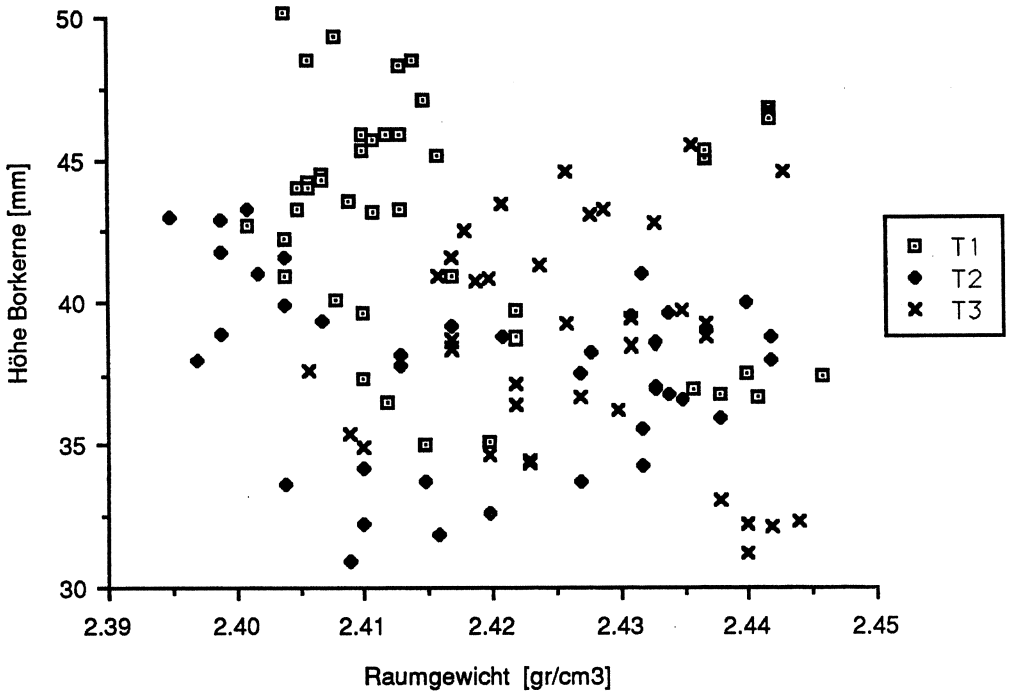
Beilage 15

Komplexer Schubmodul G* [N/mm²] (Mittelwerte)

Temp. [°C]	Frequenz [s-1]	M1/T1 [N/mm2]	M2/T1 [N/mm2]	M3/T1 [N/mm2]	M1/T2 [N/mm2]	M2/T2 [N/mm2]	M3/T2 [N/mm2]	M1/T3 [N/mm2]	M2/T3 [N/mm2]	M3/T3 [N/mm2]
0	32	9394	8505	10130	8146	9610	9170	8077	10160	8910
0	16	8466	7808	9600	7618	8648	8078	7497	9570	8240
0	8	7766	7195	8630	7072	7756	7453	6640	8440	7445
0	4	7200	6555	7805	6432	6958	6425	6053	7740	6750
0	2	6286	5855	6850	5774	6406	5860	5593	6837	6133
0	1	5822	5420	6155	5456	6012	5548	5207	6097	5748
0	0.5	5488	5063	5725	5122	5646	5233	5000	5707	5490
0	0.25	5082	4705	5315	4816	5280	4820	4633	5287	5128
0	0.125	4704	4308	4865	4486	4878	4438	4297	4840	4725
5	32	8126	7798	9920	7420	8558	7718	7340	8663	8075
5	16	7310	6890	8570	6784	7748	7163	6697	7870	7415
5	8	6674	6248	7745	6276	6884	6375	5970	7280	6798
5	4	5858	5593	6860	5674	6160	5620	5350	6560	6018
5	2	5230	4955	5900	5100	5550	5058	4823	5693	5370
5	1	4738	4473	5220	4590	5036	4658	4453	5070	4990
5	0.5	4360	4130	4680	4350	4640	4243	4093	4597	4595
5	0.25	3928	3715	4170	3896	4198	3808	3707	4113	4185
5	0.125	3470	3260	3640	3482	3714	3368	3330	3643	3798
10	32	7006	6543	7655	6548	7606	6810	6367	7403	7133
10	16	6362	5905	6820	5938	6740	6138	5817	6760	6445
10	8	5594	5253	6125	5324	5982	5380	5157	5997	5753
10	4	4852	4618	5360	4754	5222	4648	4517	5283	5100
10	2	4286	3978	4525	4144	4570	4085	3963	4510	4473
10	1	3706	3513	3900	3694	4028	3610	3557	3907	3985
10	0.5	3260	3105	3350	3308	3570	3190	3193	3387	3570
10	0.25	2746	2613	2805	2848	2984	2683	2727	2893	3095
10	0.125	2118	2170	2320	2422	2516	2233	2303	2380	2618
15	32	5806	5518	6295	5620	6122	5675	5437	6150	6035
15	16	5098	4818	5525	4980	5342	4943	4800	5310	5358
15	8	4430	4208	4715	4406	4610	4330	4257	4680	4693
15	4	3732	3548	3940	3752	3938	3533	3590	3973	4035
15	2	3122	2983	3220	3186	3344	3000	3050	3250	3430
15	1	2614	2475	2635	2720	2824	2528	2583	2683	2908
15	0.5	2186	2043	2130	2292	2348	2095	2180	2207	2475
15	0.25	1718	1610	1660	1842	1836	1630	1747	1723	1998
15	0.125	1316	1238	1255	1474	1424	1240	1350	1320	1568
20	32	4622	4438	4830	4602	4846	4465	4467	4763	4933
20	16	3914	3748	4005	3922	4098	3775	3777	4037	4228
20	8	3248	3123	3320	3332	3420	3140	3180	3373	3583
20	4	2618	2523	2630	2768	2776	2515	2630	2700	2945
20	2	2092	1988	2035	2240	2248	1980	2120	2103	2373
20	1	1632	1543	1550	1788	1750	1548	1677	1627	1900
20	0.5	1266	1178	1190	1422	1356	1185	1323	1243	1495
20	0.25	916	845	835	1062	984	858	983	883	1115
20	0.125	640	593	585	764	696	595	690	613	795
25	32	3420	3348	3515	3554	3646	3373	3523	3550	3833
25	16	2784	2648	2790	2966	2952	2668	2877	2810	3063
25	8	2202	2123	2180	2424	2336	2143	2313	2237	2525
25	4	1678	1620	1635	1880	1804	1598	1783	1683	1960
25	2	1252	1195	1185	1436	1352	1173	1353	1217	1493
25	1	910	868	845	1072	996	848	990	873	1108
25	0.5	658	623	595	792	720	605	733	617	813
25	0.25	447	1590	390	554	486	408	500	407	560
25	0.125	292	278	265	378	324	265	327	263	368
30	32	2362	2270	2285	2502	2498	2260	2413	2340	2668
30	16	1770	1715	1695	1928	1862	1693	1743	1747	2095
30	8	1314	1275	1250	1476	1408	1238	1317	1290	1570
30	4	942	908	875	1072	1008	880	910	913	1145
30	2	638	628	600	762	702	608	640	620	810
30	1	445	423	400	528	486	405	430	417	560
30	0.5	306	283	270	364	332	275	287	277	383
30	0.25	194	180	170	240	214	175	183	173	248
30	0.125	124	110	105	148	134	105	110	103	158

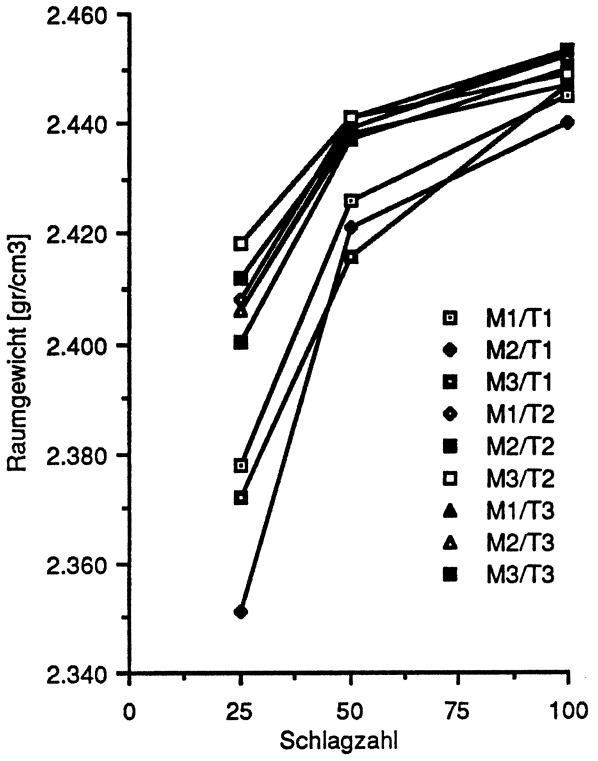
Beilage 16

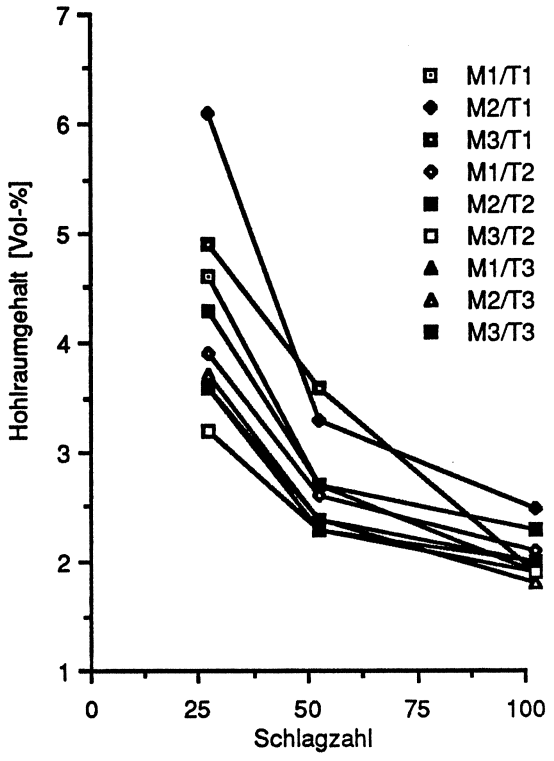
Korrelation Raumgewicht - Bohrkernhöhen



Beilage 17

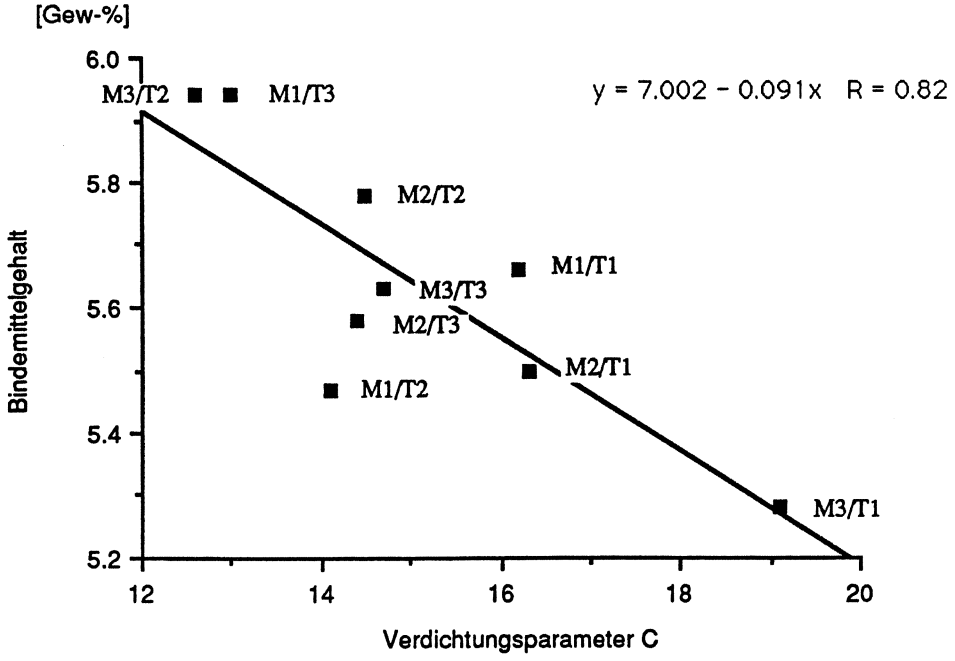
Raumgewicht und Hohlraumgehalt in Funktion der Schlagzahl





Beilage 18

Einfluss des Bindemittelgehaltes auf den Verdichtungsparameter



Beilage 19

Tabellarische Resultatzusammenfassung der Ebenheitsmessung

sW-Werte in ‰

Versuchsfeld	Spur 1	Spur 2	Spur 3	Spur 4
M1/T1	1,29	1,22	1,01	1,27
M2/T1	1,24	1,38	0,97	1,05
M3/T1	1,04	1,13	0,92	0,89
M1/T2	1,04	1,25	1,25	1,23
M2/T2	1,10	1,10	0,84	0,96
M3/T2	1,37	1,28	0,94	1,16
M1/T3	1,57	1,67	2,00	1,25
M2/T3	1,40	1,48	1,31	1,39
M3/T3	1,48	1,47	1,33	1,68

Nach Mischtemperatur geortnet	Spur 1	Spur 2	Spur 3	Spur 4
T1	1,19	1,24	0,97	1,08
T2	1,20	1,22	1,03	1,12
T3	1,49	1,55	1,61	1,43
Nach Mischfolge geortnet	**Spur 1**	**Spur 2**	**Spur 3**	**Spur 4**
M1	1,32	1,41	1,45	1,25
M2	1,24	1,31	1,04	1,13
M3	1,31	1,30	1,05	1,22

Beilage 20

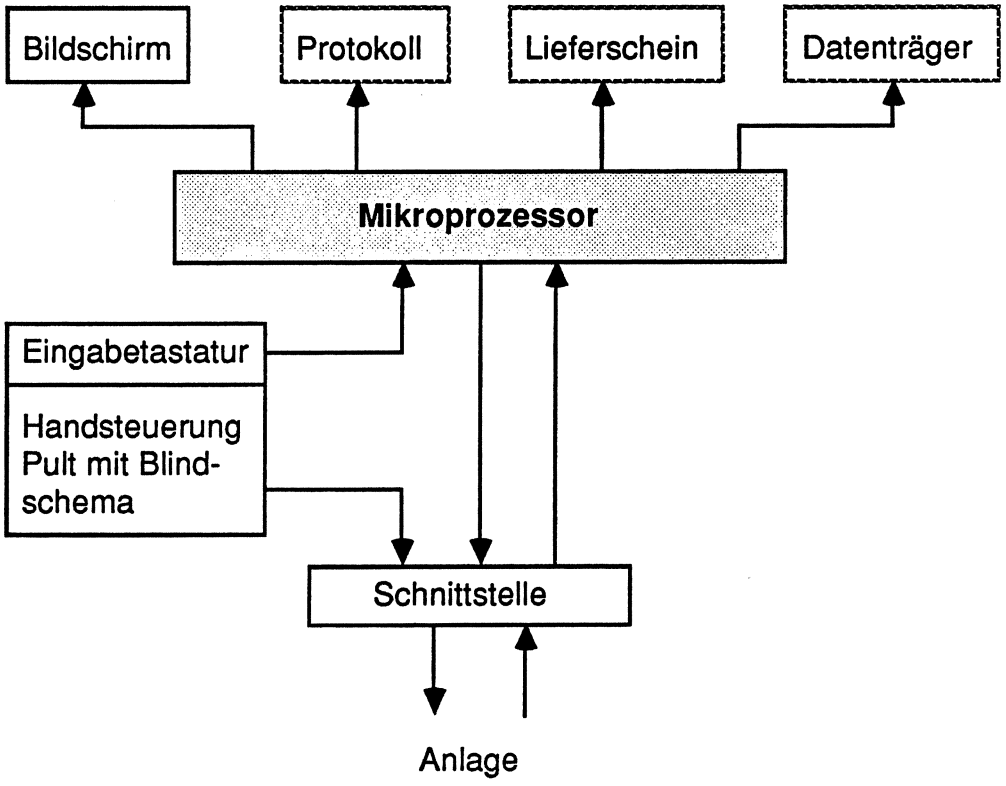
Tabellarische Resultatzusammenfassung der Griffigkeitsmessung

Messstrecke	Messart	v [km/h]	Anzahl Einzelwerte	min	max	s	mittel	Beurteilung
M1/T1	Block	40	1	-	-	-	0.68	gut
		60	2	0.63	0.68	-	0.68	sehr gut
		80	-	-	-	-	-	-
M2/T1	Block	40	7	0.58	0.73	0.05	0.69	gut
		60	9	0.55	0.65	0.03	0.59	gut
		80	1	-	-	-	0.57	sehr gut
M3/T1	Block	40	8	0.66	0.74	0.03	0.69	gut
		60	11	0.49	0.68	0.06	0.57	gut
		80	2	0.50	0.52	-	0.51	gut
M3/T2	Block	40	8	0.56	0.80	0.1	0.65	gut
		60	15	0.38	0.62	0.08	0.51	befriedigend
		80	4	0.34	0.42	0.03	0.38	ausreichend
M2/T2	Block	40	7	0.53	0.72	0.07	0.61	befriedigend
		60	12	0.44	0.60	0.06	0.51	befriedigend
		80	3	0.28	0.44	0.08	0.35	schlecht
M1/T2	Block	40	9	0.51	0.78	0.1	0.66	gut
		60	10	0.41	0.61	0.06	0.52	befriedigend
		80	2	0.28	0.43	-	0.36	schlecht
M1/T3	Block	40	9	0.49	0.74	0.08	0.59	befriedigend
		60	14	0.34	0.64	0.08	0.55	befriedigend
		80	3	0.47	0.50	0.02	0.48	befriedigend
M2/T3	Block	40	8	0.53	0.76	0.07	0.67	gut
		60	7	0.38	0.55	0.05	0.49	ausreichend
		80	2	0.36	0.39	-	0.38	ausreichend
M3/T3	Block	40	7	0.44	0.71	0.09	0.57	ausreichend
		60	11	0.34	0.54	0.07	0.43	schlecht
		80	3	0.23	0.41	0.1	0.34	schlecht
Vergleichs-messung	Block	40	13	0.6	0.7	0.03	0.66	gut
		60	12	0.44	0.56	0.04	0.52	befriedigend
M1/T1	Schlupf	40	2	0.9	0.9	-	0.9	
		60	-	-	-	-	-	
M2/T1	Schlupf	40	3	0.76	0.88	0.07	0.84	
		60	3	0.73	0.89	0.08	0.82	
M3/T1	Schlupf	40	4	0.81	0.87	0.03	0.84	
		60	4	0.8	0.84	0.02	0.83	
M3/T2	Schlupf	40	5	0.8	0.85	0.02	0.83	
		60	6	0.75	0.82	0.03	0.77	
M2/T2	Schlupf	40	4	0.76	0.86	0.05	0.82	
		60	4	0.68	0.8	0.06	0.75	
M1/T2	Schlupf	40	4	0.8	0.89	0.04	0.83	
		60	3	0.57	0.86	0.16	0.76	
M1/T3	Schlupf	40	6	0.82	0.88	0.02	0.85	
		60	5	0.75	0.86	0.05	0.83	
M2/T3	Schlupf	40	4	0.84	0.92	0.04	0.87	
		60	5	0.67	0.86	0.08	0.8	
M3/T3	Schlupf	40	5	0.72	0.86	0.05	0.8	
		60	5	0.7	0.85	0.05	0.78	
Vergleichs-messung	Schlupf	40	5	0.76	0.84	0.03	0.79	
		60	9	0.61	0.78	0.06	0.7	

Beilage 21

Technische Angaben zum Belagslieferwerk Rubingen AG

Technische Angaben BERAG 1

- Leistung 3000 t Mischgut pro Tag
- Chargenmischer 5 t Inhalt
- 10 Mineralsilos Gesammtinhalt 1900m³, 13 Dosierapparate
- Inhalt der 10 Heissmineralsilos 800 t
- Beschickung : 9 Silos über 2 Siebstrassen
- 1 Silo Bypass
- 3 Fillersilos Gesamtinhalt 380 t, 3 Ringleitungen
- Entstaubungsanlage mit Gaskühler und Trockenfilter

Aufbau der Steuerung