

Diss. ETH 8177

**Entwicklungen zur
Bestimmung mechanischer Materialkennwerte an
bituminösen Baustoffen, insbesondere an Asphalt**

Abhandlung

zur Erlangung

des Titels eines Doktors der Technischen Wissenschaften

der

Eidgenössischen Technischen

Hochschule Zürich

vorgelegt von

Jürg P. Junker

dipl. Bauing. ETHZ

geboren am 27. August 1945

von Rapperswil / BE

angenommen auf Antrag von

Prof. H. Grob, Referent

Prof. Dr. T.H. Erismann, Korreferent

Zürich 1987

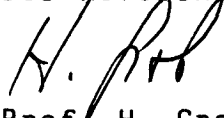
Vorwort

Es ist allgemein bekannt, dass die gängigen mechanischen Prüfverfahren zur Qualitätsbestimmung von bituminösen Bindemitteln und Dichtungsmaterialien und besonders für Asphalte keineswegs befriedigen, auch wenn sie die Basis von Normen bilden. Sie liefern gewöhnlich recht komplexe empirische Kennwerte, die zwar innerhalb der normierten Versuchsbedingungen einen Vergleich ermöglichen, aber weder eine absolute physikalische Charakterisierung erlauben, noch in statischen Berechnungen zu verwenden sind. Zudem sind die Versuchsbedingungen manchmal derart verschieden von den Beanspruchungen im Bauwerk, dass keine sichere Voraussage des Materialverhaltens in der Praxis möglich ist.

Herr Junker lässt mit seiner Arbeit die ganze Front der Laborprüfungen - er behandelt 12 in den Prüfmaschinen auswechselbare Versuchstypen - um einen wackeren Schritt vorrücken. Einerseits werden die Prüfungen auf die Vorgänge im Bauwerk sauber abgestimmt, etwa beim Dehnen und Stauchen von Kittfugen oder bei der Risseüberbrückung durch Dichtungsbahnen. Andererseits geht das Streben nach physikalisch definierten Kennwerten, wozu das neue Prüfverfahren 'Prüfkörper-Biege-Schub-Axial' (PK-BSA) an Asphalt den Hauptbeitrag leistet. Die scheibenförmigen Prüfkörper werden aus dem Belag entnommen oder mit vergleichbaren Methoden im Labor hergestellt. Die fast zerstörungsfreie Beanspruchung mit schwingendem Stempel ist recht praxisnah, und der daraus abgeleitete Schubmodul kann als charakteristischer Parameter für Berechnungen verwendet werden, natürlich unter Berücksichtigung von Temperatur und Belastungszeit.

Neben der ganzen Reihe von Versuchen würde ich es namentlich dem Prüfverfahren 'Prüfkörper-Biege-Schub-Axial' wünschen, dass es in der Praxis die verdiente Beachtung findet und sich mit der notwendigen Standardisierung in den bituminösen Laboratorien verbreitet.

Der Referent:



Prof. H. Grob

Altrector der ETHZ

Dübendorf, 19. Februar 1987

Vorwort

Es ist seit längerer Zeit kein Geheimnis, dass die Prüftechnik für bituminöse Materialien in ihrem konventionellen Stand den Ansprüchen moderner Anwendung nur teilweise gerecht wird: Eingeführte, zum Teil sogar genormte Verfahren und Geräte sind vielfach auf rein empirische Art, ohne hinreichende physikalische Grundlagen, entstanden und liefern dementsprechend Resultate, die nur entfernt mit der Realität auf der befahrenen Strasse korrelierbar sind. Die speziellen Eigenschaften bituminöser Baustoffe (starke viskoplastische Verformbarkeit, extreme Temperaturabhängigkeit wesentlicher Parameter) schliessen überdies den Einsatz üblicher servohydraulischer Prüfgeräte aus.

Die vorliegende Arbeit ist dementsprechend eingebettet in die seit etwa 15 Jahren laufenden Bestrebungen der EMPA, zu einer besser fundierten Technik zu gelangen. Dabei wird das Ziel verfolgt, mit Hilfe neuartiger Prüfgeräte zu Verfahren zu gelangen, die eine physikalisch deutbare Aussage über das Materialverhalten ermöglichen. Die Erfüllung dieser Aufgabe bedingte ein Vorgehen in sechs Teilschritten.

1. Festlegung der praxisrelevanten Materialeigenschaften auf Grund physikalisch fundierter Ueberlegungen,
2. Festlegung der zur Bestimmung dieser Eigenschaften erforderlichen Probenformen und der dazugehörigen Prüfabläufe,
3. Umsetzung der so gewonnenen Information in fachgerecht formulierte Pflichtenhefte für die zu bauenden Geräte und in entsprechende konkrete Prüfprogramme,
4. Konzeption und Konstruktion der Geräte unter Berücksichtigung eines minimalen Gesamtaufwandes, speziell bei der Unterteilung in Grund- und Zusatzgeräte,
5. Bau der Geräte,
6. Austesten der entstandenen Systeme bis zur Praxisreife.

In der vorliegenden Schrift werden diese Schritte, nach einer allgemein gefassten Einführung in die Problematik, detailliert dargelegt. Wesentliche Teile des so entstandenen Systems sind als persönliche Leistung des Autors zu betrachten.

Es ist zu hoffen, dass die hier geleistete Arbeit ihren Niederschlag nicht nur auf wissenschaftlicher Ebene findet, sondern auch den gebührenden Widerhall in der Praxis und in der Normung erfährt.

Der Korreferent:

Prof. Dr. T.H. Erismann
Direktionspräsident der EMPA

Dübendorf, 19. Februar 1987

VORWORT

ZUR ENTSTEHUNG DIESER ARBEIT

Aus der Verpflichtung der EMPA zu einer steten Anpassung und Verbesserung ihrer Ausrüstung und damit ihrer Leistungsfähigkeit auf dem Gebiet der Materialprüfung allgemein und insbesondere der Festigkeitsprüfungen auch an bituminösen Baustoffen, entstanden die hier beschriebenen neuen prüftechnischen Einrichtungen.

Dem Verfasser dieser Arbeit stellte sich die Aufgabe, zu bestehenden und neu zu entwickelnden Prüfverfahren der Festigkeitsuntersuchungen an bituminösen Baustoffen, eine Gruppe sich ergänzender und vielseitig einsetzbarer prüftechnischer Einrichtungen und Prüfmaschinen zu konzipieren, zu planen und zu realisieren.

Die vom Projektleiter als "Verbraucher" entworfenen Systeme und Elemente wurden mit grosser Leistung und Anstrengung unter fachlicher Kompetenz der Konstrukteure und Elektroniker der EMPA konstruiert und weitgehend durch die eigenen EMPA-Werkstätten realisiert. Grosse Unterstützung bei der Planung und Realisierung leisteten der Technische Dienst der EMPA und die Eidg. Baukreisdirektion.

Die neuen Prüfeinrichtungen stellen ein erfreuliches Resultat erspriesslicher Zusammenarbeit der Projektleitung mit den Spezialisten der genannten Abteilungen der EMPA und weiteren Beteiligten dar. Während des ganzen Ausbaues, und vor allem auch während der vom Projektleiter in abendfüllenden abklärenden Versuchen durchgeführten Testphase und dem darauf beruhenden Weiter- und Endausbau des gesamten Systems, kam seinen zahlreichen zusätzlichen Wünschen und Anregungen grösste Unterstützung zu.

Gesamthaft konnte so in rückblickend doch verhältnismässig kurzer Zeit vom Konzeptentwurf bis zur Inbetriebnahme eine Gruppe vielseitiger und sich ergänzender prüftechnischer Einrichtungen und Prüfmaschinen von hohem technischem und wissenschaftlichem Wert geschaffen werden.

Dadurch kann die Leistungsfähigkeit der Abteilung Strassenbau/ Abdichtungen sowie - durch das realisierte, ausbaufähige Baukastensystem der Prüfmaschinen und der dadurch geschaffenen Möglichkeit des Einsatzes auch für andere Baustoffe (z. B. Beton, Holz, Kunststoffe etc.) - des ganzen Ressorts Baustoffe der EMPA gesteigert werden. Letztlich gelangen die EMPA und die ETH in den Besitz von Prüfanlagen, welche die Wissenschaft und die Praxis bei der Lösung materialtechnologischer Probleme unterstützen.

Erste Ansätze dazu werden durch Resultate aus Testversuchen und vergleichenden Untersuchungen mitgeteilt.

Die nachstehende Darstellung der Realisierungsphase und des Erarbeitens erster Ergebnisse soll Beitrag und Anregung für weitere Kontakte und Tätigkeiten von Forschung und Praxis auf dem Gebiet der Festigkeitsuntersuchungen an bituminösen Baustoffen bilden und dazu beitragen, eine gemeinsame Basis für weitere Entwicklungen in der Prüftechnik zu schaffen.

DANK

An erster Stelle möchte ich meinem ehemaligen Lehrer und Vorgesetzten, Herrn Prof. H. Grob, Altrector der ETHZ, für die Übernahme des Referates und die zahlreichen Anregungen, Hinweise und Ratschläge während der Entstehung dieser Arbeit danken.

Zu grossem Dank bin ich auch Herrn Prof. Dr. T.H. Erismann, Direktionspräsident der EMPA, verpflichtet. Er hat als Doktorvater und als Korreferent durch stets grosszügige Unterstützung meiner Anliegen und durch kritische sowie anregende Prüfung der vorgetragenen Ideen die Voraussetzung für die Realisierung dieser Prüfeinrichtungen im jetzt vorliegenden Gesamtkonzept geschaffen.

Ebenso möchte ich den Ressortchefs der EMPA, den Herren U. Meier und R. Burkhardt für die stete Unterstützung der vorgelegten Forschungs- und Entwicklungsgesuche und der daraus anfallenden Arbeiten danken.

Ein Gleiches gilt speziell für die Abteilungen Konstruktion, Elektronik und den Technischen Dienst, in deren Aufgabenbereich die technische Realisierung der Prüfeinrichtungen fiel. Mein besonderer Dank vor allem an die Herren W. Leutert, W. Sennhauser, W. Bischof, M. Brenner, H. Wernli, E. Hunziker und ihre Mitarbeiter.

Für die sorgfältige Reinschrift des Manuskriptes und der Tabellen bin ich Frau M. Matti sehr dankbar. Dies gilt auch für die zahlreichen Aufnahmen von Herrn W. Isler der Fotoabteilung, die zahlreichen Reinzeichnungen von Herrn A. Niederer und die sorgfältige Drucklegung durch die Herren H. Messerli und V. Trinkl.

Für die mir innerhalb der Abteilung Strassenbau/Abdichtungen der EMPA gewährte Selbständigkeit bei der Projektleitung und Realisierung der nun vorliegenden Neuentwicklungen bin ich dem Abteilungsvorsteher, Herrn H. Fritz, zu grossem Dank verpflichtet. Ein gleicher Dank auch allen Mitarbeitern der Abteilung, die meine Arbeit durch ihre Unterstützung mitgefördert haben. Insbesondere danke ich meinem Kollegen Dr. R. Gubler für das Systemmanagement und die Programmierung des Prozessrechners, wodurch ich mich auf die Entwicklung von Subroutinen und die eigentlichen Probleme der Materialprüfung und der Mechanik konzentrieren konnte. Herrn L. Arpagaus danke ich für die grosse Mithilfe bei der Prüfkörperherstellung und bei der Versuchsdurchführung.

Wesentlicher Dank auch an meine Fachkollegen an Forschungsstellen im In- und Ausland, in kantonalen und privaten Ingenieurbüros und in Unternehmungen. Ihre Diskussionsbereitschaft und Unterstützung bei der Prüfkörperherstellung und bei einzelnen Prüfungen haben wesentlich zur Durchführung dieser Arbeit beigetragen.

Letztlich gilt auch grosser Dank meiner Frau und meinen Kindern, die während langer Zeit viel Verständnis für meine zusätzlichen Arbeiten und meine dadurch vermehrte Abwesenheit im Zusammenhang mit der Schaffung der vorliegenden Neuentwicklungen gezeigt haben.

ZUSAMMENFASSUNG/ÜBERSICHT

Teil I: Nach einer allgemeinen Darstellung der Problematik der Materialprüfung bituminöser Baustoffe wird das Gebiet der Festigkeitsuntersuchungen an bituminösen Baustoffen enger umrissen.

Ausgehend von einer Beschreibung der Situation in der Prüftechnik werden für die Hauptkategorien bituminöser Baustoffe Zielrichtungen für Entwicklungen in der Labor-Prüftechnik der Festigkeitsuntersuchungen erarbeitet. Ausführlicher werden Prüfverfahren der Festigkeitsuntersuchungen an Prüfkörpern aus verdichtetem bituminösem Mischgut (Asphalt) betrachtet.

Abgeleitet wird als eigentliche Aufgabenstellung dieser Arbeit die Zielsetzung für die Entwicklung und Realisierung neuer Prüfverfahren und prüftechnischer Einrichtungen.

Teil II: Aufgrund der in Teil I abgeleiteten Zielsetzung wird das Konzept und die Realisierung der neuen Prüfmaschinen und Zusatzeinrichtungen erläutert.

Die Beschreibung der realisierten Prüfmaschinen und weiterer prüftechnischer Einrichtungen erfolgt in der Reihenfolge der Schwerpunkte:

- Herstellen von Prüfkörpern
- Lagerungsarten (Beanspruchung der Prüfkörper vor den eigentlichen Festigkeitsprüfungen)
- Bruchversuche
- Ermüdungsversuche

Das Einsatzspektrum der Prüfmaschinen wird umrissen durch das Beschreiben der Einbauten und Zusatzeinrichtungen für verschiedene Prüfverfahren, insbesondere für Festigkeitsprüfungen an Asphalt. Ergebnisse aus Testversuchen werden erläutert.

Teil III: Für die Entwicklung eines Prüfverfahrens zur direkten Untersuchung von bituminösen Belagsschichten ab Bohrkernen wird ein Lösungsansatz erarbeitet. Dieses Prüfverfahren wird als "Prüfkörper-Biege-Schub-Axial" (PK-BSA) bezeichnet. Angestrebt werden damit vergleichbare Untersuchungen an Belagsschichten ab Bohrkernen und an im Labor hergestellten Prüfkörpern sowie das Bestimmen realistischer Materialkennwerte. Erste Ergebnisse aus Testversuchen mit den Prototypen der Prüfeinrichtungen werden diskutiert.

Teil IV: Vergleichende Untersuchungen an im Labor hergestellten Prüfkörpern mit verschiedenen Prüfverfahren. Die mit dem Prüfverfahren PK-BSA gemäss Teil III erarbeiteten Materialkennwerte an Prüfkörpern aus verdichteten bituminösen Mischungen der Praxis werden im Vergleich zu Ergebnissen aus Verdichtungsversuchen und anderen Festigkeitsprüfungen dargestellt.

Insbesondere wird der Versuch einer Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips (ZTSP) auf Ergebnisse von Mehrstufenversuchen mit dem Prüfverfahren PK-BSA erläutert.

Teil V: Vergleichende Untersuchungen mit dem Prüfverfahren PK-BSA an im Labor verschiedenartig hergestellten Prüfkörpern und an Belagsschichten ab Bohrkernen. Erläuterung der Anwendungsmöglichkeit des Prüfverfahrens PK-BSA auf mehrschichtige Belagsaufbauten am einfachsten Beispiel eines zweischichtigen Belagsaufbaus.

Teil VI: Enthält Kommentare und Folgerungen für die weitere Entwicklung der Laborprüftechnik an bituminösen Baustoffen allgemein und aufgrund der vergleichenden Untersuchungen speziell zum Aspekt der Festigkeitsuntersuchungen an Asphalt.

Für die in der Schweiz laufenden Forschungsanstrengungen wird in einer Übersicht in Tabelle 36 das Spektrum bestehender Prüfeinrichtungen umrissen.

ANHANG I: Literaturverzeichnis

ANHANG II: Versuchsergebnisse

ANHANG III: Symbole und Abkürzungen

SUMMARY

Part I: Following a general discussion of the problems of testing bituminous materials, the topic of strength tests on these materials is examined more closely.

Starting from a description of the state of the art of testing methods, goals are set for the development of improved laboratory methods for strength tests. Procedures for evaluating the strength of test specimens of compacted bituminous asphalt are dealt with in detail.

The actual aim of the present work is the development and realization of new test procedures and equipment.

Part II: Based upon the goals set forth in Part I the concept and realization of new testing machines and supplementary installations are discussed. Attention is focused on the following aspects:

- fabrication of test specimens;
- types of storage (loading of the specimen prior to or during the actual strength test);
- rupture tests;
- fatigue tests.

The application of testing machines is described including built-in and supplementary installations for various test procedures, especially strength tests on asphalt. Results from trial tests are presented.

Part III: A new approach was utilized in developing a test method for the direct testing of bituminous pavement layers derived from core specimens. This procedure is designated as "Specimen Axial-Shear-Bending" (SP-ASB). The aim is to permit comparative tests on pavement layers from cores and laboratory-fabricated specimens to determine realistic material values. Initial results from experiments with prototype equipment are described.

Part IV: Comparative tests on laboratory-fabricated specimens are presented, employing on the one hand the SP-ASB method and on the other hand compaction and other strength tests. The SP-ASB method also makes use of material value indices derived from specimens of bituminous mixes encountered in practice.

In particular, an attempt to apply the time-temperature-superposition principle is described based on results from multi-step tests with the SP-ASB test method.

Part V: The SP-ASB test method is applied to compare various laboratory-fabricated specimens with pavement layers from cores.

Comments are also given pertaining to the possibility of applying the SP-ASB-method for testing multy-layer specimens, based on an example in the most simple case of a two-layer asphalt construction.

Part VI: Comments and conclusions are given pertaining to the above-described tests. Further development of the laboratory procedure is discussed regarding bituminous materials in general, and specifically, strength tests on asphalt.

In order to localize the new test equipment described here, Table 36 gives an overview of existing test equipment in Swiss research centers.

Appendix I: Literature

Appendix II: Test results

Appendix III: Symbols and abbreviations

R E S U M E

Partie I: Après un exposé général des problèmes de l'essai des matériaux bitumineux, le problème de l'étude de la résistance de ces matériaux est abordé plus en détail.

Une description de la situation dans le domaine des techniques d'essai est utilisée comme base afin de définir des objectifs pour le développement de méthodes d'essai de résistance de laboratoire pour les principales catégories de matériaux bitumineux. Les méthodes d'essai de résistance sur des éprouvettes de mélanges bitume-agrégats (asphalte) sont traitées plus en détail.

A partir de ces considérations, le thème proprement dit de ce travail se définit comme la détermination d'objectifs pour le développement de méthodes, d'installations et plus particulièrement de machines d'essai nouvelles.

Partie II: Le développement et la réalisation de nouvelles machines d'essai et d'installations accessoires sont commentés en se référant aux objectifs définis dans la partie I. Les machines et autres dispositifs d'essai réalisés sont décrits en fonction des destinations principales suivantes:

- confection d'éprouvettes
- mode d'entreposage (solicitation des éprouvettes avant les essais de résistance proprement dits)
- essais de rupture
- essais de fatigue

L'étendue du domaine d'utilisation des machines d'essai est illustrée pour différentes méthodes d'essai, et plus particulièrement pour les essais de résistance sur l'asphalte, par la description des installations et accessoires correspondants. Les résultats de tests expérimentaux sont commentés.

Partie III: Une solution pour le développement d'une méthode d'essai pour l'examen direct des couches de revêtement bitumineux à partir de carottes a été élaborée. Cet essai, nommé essai éprouvette-cisaillement-flexion axial (EPR-CFA), est destiné à permettre des examens comparatifs entre des carottes prélevées sur des couches de revêtement et des éprouvettes confectionnées en laboratoire. Les premiers résultats de tests expérimentaux réalisés avec les prototypes d'installation d'essai sont décrits.

Partie IV: Examens comparatifs entre différentes méthodes d'essai sur des éprouvettes confectionnées en laboratoire. Les caractéristiques de matériau déterminées au moyen de la méthode d'essai éprouvette-cisaillement-flexion axial décrite dans la partie III sont comparées aux résultats d'essai de compactage et d'essais de résistance sur des éprouvettes de mélanges bitume- agrégat de la pratique.

En particulier, une tentative d'application du principe de superposition temps/température aux résultats d'essais éprouvette-cisaillement-flexion axiaux multi-paliers est commentée.

Partie V: Examens comparatifs au moyen de l'essai éprouvette-cisaillement-flexion axial entre des éprouvettes confectionnées en laboratoire selon différentes méthodes et des carottes prélevées sur des couches de revêtement. Les possibilités d'application de cette méthode d'essai aux systèmes de revêtement multicouches sont commentées sur la base de l'exemple le plus simple d'un revêtement bicouche.

Partie VI: Commentaires et conclusions sur les examens comparatifs dans la perspective du développement ultérieur des techniques d'essai de laboratoire pour les matériaux bitumineux en général et plus particulièrement pour l'examen de la résistance de l'asphalte.

Un aperçu des installations d'essai dont disposent les organismes de recherche exerçant leurs activités en Suisse est donné dans le tableau 36.

ANNEXE I: Bibliographie

ANNEXE II: Résultats des essais

ANNEXE III: Symboles et abréviations

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S
=====

	<u>Seite</u>
<u>TEIL I: AUSGANGSLAGE UND AUFGABENSTELLUNG</u>	1
1. EINLEITUNG	1
2. ALLGEMEINES ZUR MATERIALPRUEFUNG BITUMINOESER BAUSTOFFE	3
2.1 Die Anwendung bituminöser Baustoffe, Tab. 1	3
2.2 Das komplexe Verhalten bituminöser Baustoffe	5
2.3 Das Erarbeiten von Materialkennwerten	10
2.4 Schwerpunkte zu Forschung und Entwicklung der Materialprüfung bituminöser Baustoffe, Tab. 3	12
3. DAS SPEKTRUM DER FESTIGKEITSUNTERSUCHUNGEN AN BITUMINÖSEN BAUSTOFFEN IM LABOR	14
3.1 Übersicht zu bestehenden Prüfverfahren, Tab. 4	14
3.2 Allgemeine Problematik der Prüfkörper (PK)	18
3.3 Aspekte der eigentlichen Prüftechnik, technischer Ausrüstungsgrad	19
3.4 Allgemeine Zielsetzungen für die Entwicklung von Prüfverfahren der Festigkeitsuntersuchungen an bituminösen Baustoffen	22
4. AUFGABENSTELLUNG FÜR DIE ENTWICKLUNG VON EINRICHTUNGEN FÜR FESTIGKEITSPRÜFUNGEN	30
4.1 Entwicklungsschwerpunkte	30
4.2 Anforderungsprofil und Bedarfsmatrix, Tab. 9	30
<u>TEIL II: REALISIERUNG AUSGEWÄHLTER PRÜFTECHNISCHER EINRICHTUNGEN</u>	32
5. PLANUNG	32
5.1 Bedarf und Grundkonzept, Tab. 10	32
5.2 Einsatzspektrum	32
5.3 Anforderungsprofil für die elektronische Ausrüstung	35
6. REALISIERUNG VON PRÜFMASCHINEN, GRUPPEN I BIS IV	36
6.1 Gruppe I: Herstellen von Prüfkörpern (Asphalt)	38
6.2 Gruppe II: Einrichtungen für Lagerungsarten der Prüfkörper	46
6.3 Gruppe III: Schwerpunkt Ermüdung (Mehrfachprüfstand), Prüfanlage DYNASPHALT	53

	<u>Seite</u>
6.4 Gruppe IV: Schwerpunkt Bruchversuche, Universalprüfmaschine UVP 150 kN	65
6.5 Betriebsarten der Prüfmaschinen	70
7. EINBAUTEN UND ZUSATZEINRICHTUNGEN ZU DEN PRÜFVERFAHREN	
7.1 Konzept	73
7.2 Realisierte Einbauten und Zusatzeinrichtungen	74
<u>TEIL III:</u> ENTWICKLUNG DES PRÜFVERFAHRENS PK-BSA ZUR DIREKTEN UNTERSUCHUNG BITUMINÖSER BELAGSCHICHTEN AB BOHRKERNEN, PRÜFVERFAHREN <u>PRÜFKÖRPER-BIEGE-SCHUB-AXIAL</u>	116
8. BEDARF	116
9. KONZEPT	118
10. BERECHNUNGSMETHODE PK-BSA	121
11. TESTVERSUCHE	127
<u>TEIL IV:</u> VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN AN IM LABOR HERGESTELLTEN PRÜFKÖRPERN AUS VERDICHTETEM BITUMINÖSEM MISCHGUT	141
12. ZIELSETZUNGEN	141
13. ENTNAHME VON MISCHGUT AB AUFBEREITUNGSANLAGE, HERSTELLEN DER PRÜFKÖRPER DURCH STANDARDVERDICHTUNG	144
14. SPEZIELLE VERDICHTUNGSVERSUCHE, HERSTELLEN VON PRÜFKÖRPERN	146
14.1 Schlagverdichtung S	147
14.2 Gyratorverdichtung GY	153
14.3 Vibroverdichtung V	158
14.4 Druckverdichtung D	159
14.5 Walzverdichtung W	159
15. KONVENTIONELLE MECHANISCHE PRÜFVERFAHREN	160
15.1 Konventionelle technologische (empirische) Prüfverfahren (Marshall-Versuche, Spaltzugversuche)	160
15.2 Konventionelle physikalische Prüfverfahren (Monoaxiale Druckversuche, Monoaxiale Kriechversuche, 4-Punkt-Biegung)	164

	<u>Seite</u>
16. PRÜFVERFAHREN PRÜFKÖRPER-BIEGE-SCHUB-AXIAL, PK-BSA	173
16.1 Allgemeines und Versuchsparameter	173
16.2 Mehrstufenversuche an Prüfkörpern PK 1506 W	174
16.3 Versuch einer Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips (ZTSP) auf die Ergebnisse der Mehrstufenversuche mit dem Prüfverfahren PK-BSA aus Abschnitt 16.2	180
<u>TEIL V:</u> VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN MIT DEM PRÜFVERFAHREN PK-BSA AN IM LABOR HERGESTELLTEN PRÜFKÖRPERN UND AN BOHRKERNEN	184
17. ÜBERSICHT	184
18. ERGEBNISSE	184
18.1 Untersuchungen an im Labor hergestellten Prüfkörpern PK 1506. Abklären des Einflusses der Herstellungsart auf den Schubmodul G*	184
18.2 Untersuchungen an im Labor hergestellten Prüfkörpern und an Bohrkernen der Mischgutsorten AB 10 und AB 25	186
18.3 Untersuchungen am zweischichtigen Belagsaufbau (AB 10 und AB 25)	188
<u>TEIL VI:</u> KOMMENTARE UND FOLGERUNGEN	192
19. ZU DEN VERGLEICHENDEN UNTERSUCHUNGEN (TEILE IV + V)	192
20. ASPEKTE ZUR WEITEREN ENTWICKLUNG DER LABORPRÜFTECHNIK MECHANISCHER UNTERSUCHUNGEN AN BITUMINÖSEN BAUSTOFFEN	196
21. AUSBLICK UND BEZUGNAHME ZU VERSCHIEDENEN LAUFENDEN FORSCHUNGSANSTRENGUNGEN, INSBESONDERE ZU DEN MECHANISCHEN PRÜFUNGEN AN ASPHALT	200
<u>ANHANG I:</u> LITERATURVERZEICHNIS	
<u>ANHANG II:</u> VERSUCHSERGEBNISSE	
<u>ANHANG III:</u> SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN	

TEIL I: AUSGANGSLAGE UND AUFGABENSTELLUNG

1. EINLEITUNG

Jede materialtechnologische Untersuchung setzt die Möglichkeit des Einsatzes geeigneter prüftechnischer Einrichtungen voraus. Deren Spektrum reicht von der Kategorie spezieller Instrumente und Apparate für chemische und physikalische Analysen über Einrichtungen der nichtzerstörenden Materialprüfung bis zu den eigentlichen Prüfmaschinen für die zerstörende Materialprüfung.

Auf den verschiedensten Gebieten der Materialprüfung - so auch auf dem **Sektor der Prüfung bituminöser Baustoffe** - weisen diese Kategorien der Prüfeinrichtungen wiederum einfache und handliche Geräte wie auch grosse Prüfmaschinen und Anlagen auf, die im Idealfall selbst das Prüfen ganzer Bauteile oder Konstruktionen im Massstab 1:1 gestatten.

Für die **Materialprüfung im Labor** sind in Verbindung mit den eigentlichen Prüfmaschinen auch die Geräte und Einrichtungen für das Erzielen bestimmter Prüfbedingungen (Klima) oder für das Ansetzen geeigneter Lagerungsarten zwecks Simulieren bestimmter Beanspruchungen der Prüfkörper vor und während der eigentlichen Festigkeitsuntersuchungen (Ansetzen von Wasserlagerungen, Frost-Tau-Zyklen etc.) zu erwähnen.

Der Miteinbezug solcher Lagerungsarten in die **Festigkeitsuntersuchungen bituminöser Baustoffe** ist äusserst wichtig, da deren Einsatz im Hoch- und Tiefbau - speziell auch im Strassenbau - gekennzeichnet wird durch hohe Beanspruchungen, nicht alleine durch Nutzlasten und allfällige Bauwerksbewegungen, sondern zusätzlich und ausgeprägt durch Klimaeinflüsse.

Dies unterstreicht die berechtigte Forderung nach möglichst hoher **Praxisnähe** der Materialprüfung bituminöser Baustoffe im Labor.

Wird zudem auch grosse **Leistungsfähigkeit** bezüglich des Durchführens verschiedener und zahlreicher Prüfverfahren angestrebt, so wird auch für ein Speziallabor der Materialprüfung bituminöser Baustoffe der **Ausrüstungsgrad** an prüftechnischen Einrichtungen von entscheidender und damit erster Bedeutung.

Aufgrund dieser allgemeinen Feststellungen ist die generelle Situation der Materialprüfung bituminöser Baustoffe - insbesondere der Festigkeitsuntersuchungen und deren Prüftechnik - durch zwei Aspekte gekennzeichnet:

- Technologische (empirische) Prüfverfahren gestatten durch das Bestimmen meist versuchsspezifischer (nicht physikalischer, sondern empirischer) Materialkennwerte ein weitreichendes Charakterisieren der Baustoffe. Auf den so bestimmten Baustoffeigenschaften basieren die Normanforderungen, die auf Erfahrungswerten bezüglich des Praxisverhaltens der Baustoffe abgestützt sind [27, 28].

Dadurch entstanden zahlreiche, gemäss Bedürfnissen der Praxis vor allem auf Schnelligkeit und Handlichkeit ausgerichtete Prüfverfahren für Eignungs- und Routineprüfungen (Kontrolle), die als Konventionsverfahren keineswegs zu unterschätzen sind, aber sehr oft eine klare physikalische Aussage nicht zulassen [96].

- Der Wunsch und die **Notwendigkeit des Erarbeitens physikalischer Materialkennwerte** wurde daher für die Materialprüfung bituminöser Baustoffe erste **Zielsetzung** und trat auch in den letzten Jahren verstärkt in den Vordergrund von Forschungsanstrengungen in vielen Ländern.

Diese Zielsetzung setzt voraus:

- Entwicklung neuer Prüfverfahren.
- Ausbau bestehender und Entwicklung neuer, leistungsfähiger und vielseitig einsetzbarer Prüfeinrichtungen und Prüfmaschinen im Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Prüfverfahren;
- Optimale Ausrüstung auf Seite der Prozesssteuerung der Prüfmaschinen sowie der Datenerfassung und Auswertung.

Die EMPA, im besonderen die für das Gebiet der Materialprüfung bituminöser Baustoffe zuständige Abteilung Strassenbau/Abdichtungen, gelangte zur Erkenntnis und Überzeugung, dass die genannte Zielsetzung - das Erarbeiten neuer Erkenntnisse in der Materialtechnologie zur Förderung von Wissenschaft und Praxis - nur durch die Schaffung grundsätzlich neuer technischer Möglichkeiten anzugehen war.

Für das **Teilgebiet der Festigkeitsuntersuchungen** wurde der Beschluss gefasst, ein Gesamtkonzept für neue prüftechnische Einrichtungen und Prüfmaschinen zu erarbeiten und nach Möglichkeit zu realisieren.

Diese Situation und Beschlussfassung war Ausgangspunkt und Aufgabenstellung für die vorliegende Arbeit, wobei in einem ersten Schritt in materialprüferischer Hinsicht für den Verfasser nicht das Erarbeiten von allgemeinen Stoffgesetzen, sondern als Basis für weitere Schritte in Forschung und Anwendungstechnik, die **Entwicklung und Realisierung neuer technischer Mittel und Prüfverfahren** zur Erarbeitung physikalischer Materialkennwerte für die praktische Anwendung der bituminösen Baustoffe im Vordergrund standen.

2. ALLGEMEINES ZUR MATERIALPRUEFUNG BITUMINOESER BAUSTOFFE

2.1 Die Anwendung bituminöser Baustoffe

2.11 Einflussfaktoren

Die Vielfalt der Eigenschaften und der Anwendung bituminöser Baustoffe basiert auf verschiedenen Einflussfaktoren wie:

- Materialfaktoren

Beispielsweise haben die verwendeten Grundbaustoffe Bitumen und Mineralstoffe als Naturprodukte grosse Streubreiten bezüglich ihrer Zusammensetzung (Provenienz Rohöl, Petrographie).

- Produktionsfaktoren

Zusätzlich zu den Materialfaktoren der Grundbaustoffe werden durch unterschiedliches Aufbereiten der Naturprodukte stark unterschiedliche Eigenschaften der Baustoffe erzielt.

- Umweltfaktoren

Diese haben neben der ursprünglichen Beeinflussung der Grundbaustoffe, primär durch Klimaeinfluss, stark variierende Bauweisen in verschiedenen geographischen Zonen bewirkt. Darin ist auch historisch die ausgeprägte unterschiedliche Entwicklung der Anwendungstechnik bituminöser Baustoffe und ihrer Materialprüfung begründet.

2.12 Anwendungsspektrum

Die nachstehende Uebersicht, Tabelle 1, fasst vereinfacht das Anwendungsspektrum bituminöser Baustoffe bezüglich der Produkte, des Einsatzgebietes und des Zweckes zusammen.

Aus Tabelle 1 wird das umfangreiche Anwendungsspektrum bituminöser Baustoffe ersichtlich, wobei für den Materialprüfer bei Bearbeitung des ganzen Baustoffbereiches (wie dies für das Beispiel der Abteilung Strassenbau/Abdichtungen der EMPA zutrifft) eine grobe Aufteilung des Arbeitsvolumens etwa wie folgt angegeben werden kann:

Bindemittel, Massen, Dichtungsbahnen	≈ 1/3
Mischgut Beläge Spezielle Anwendungen	≈ 2/3

Eine deutliche Zunahme ist vor allem bei der Anwendung der Baustoffe auf dem Sektor Abdichtungen festzustellen, was dazu führte, einige spezielle Prüfeinrichtungen für das Prüfen von Bindemitteln, Massen und Dichtungsbahnen zu entwickeln, gemäss Teil II.

Baustoff/Produktegruppe	Anwendungsgebiet	Zweck
<u>Bindemittel</u> Bitumen, Bitumen-Teer Teer, Teer-Bitumen Lackbitumen (Variation der Sorten, Herstellung, Modifizierung)	Hoch- und Tiefbau und industrielle Anwendung als Voranstriche, Abdichtungen, Bindemittelanteil in Mischungen (Dichtungsmassen, Mastices, Gussasphalt, Asphaltbeton).	Isolieren, Abdichten, Dämpfen, Entdröhnen, Verfestigen (Stabilisieren).
<u>Dichtungsmassen</u> (Deckmassen) Geringe Mineral- oder andere Festkörperanteile, Feinstkörnungen mit Bindemittel (wie oben).	Hoch- und Tiefbau und industrielle Anwendungen. In Fabrikation von Dichtungsbahnen, Dachpappen und wie Bindemittel.	Abdichten, Ausgleich, ähnlich Bindemittel.
<u>Mastices</u> Feinstkörnungen bis Sandbereich.	Hoch- und Tiefbau. Abdichten, Dichtungsmassen, Ausgleich.	Abdichten, Ausgleich, ähnlich Bindemittel.
<u>Mischgut</u> Ausgewählte Körnungen.	Strassenbau. Oberflächenbehandlungen, Drainageschichten.	Verschleisschicht, Erhöhen der Griffigkeit. Sickerschichten, Anpassungen.
Gussasphalt, Sandasphalt; Sorten nach Grösstkorn bezeichnet (beschränktes Grösstkorn, hoher Bindemittel-, Filler- und Sandanteil).	Im Strassen- oder Hochbau, als Brücken-Dichtungsbelag Trag- oder Deckschicht sowie als eigentlicher Deckbelag.	Abdichtungs-, Trag- oder Verschleisschicht.
Asphaltbeton; Sorten nach Grösstkorn bezeichnet. Asphaltbeton bedeutet Kornverteilung nach dem Betonprinzip (Fullercurve).	<ul style="list-style-type: none"> • Deckschichten (Verschleiss) • Tragschichten (Ausgleich, Tragfunktion) • Fundationsschichten • Dichtungsbeläge (Wasserbau) • Offene Beläge (Drainasphalt) 	Aufnahme von Verschleiss Ausgleich, Lastverteilung Drainieren. Abdichten. Reduktion Fahrgeräusche.

Tab. 1: Anwendungsspektrum bituminöser Baustoffe.


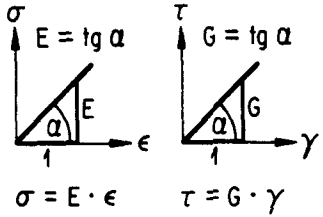
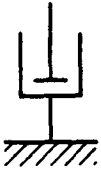
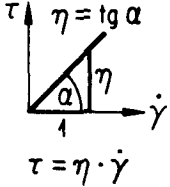

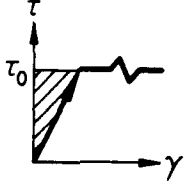
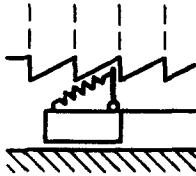
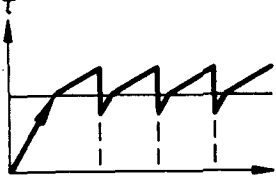
2.2 Das komplexe Verhalten bituminöser Baustoffe

2.2.1 Ideales und komplexes Verhalten

Jeglicher Stoff, für den Materialprüfer im Labor bei Baustoffen meistens in Form eines Prüfkörpers vorliegend, reagiert unter Belastung mit einer Verformung.

Die klassische Mechanik [1, 2, 3] verwendet für das Beschreiben des Verformungsverhaltens idealisierter Körper drei Modelle gemäss Tabelle 2.

Ist das Verhalten eines Körpers nur über verschiedene Stoffeigenschaften zu beschreiben, so handelt es sich um einen **komplexen Körper**, d.h. sein mechanisches (Verformungs-)Verhalten kann nur mit einem **komplexen Modell** annähernd beschrieben werden.

Mechanisches Element / Modell	Stoff, Körper	Verformung σ/ϵ resp. τ/γ , $\tau/\dot{\gamma}$ Diagramme
<u>Feder</u> Hooke 	Rein elastischer Körper (Superpositionsprinzip für den linear-elastischen Körper), Dehnung proportional zur Spannung.	 $\sigma = E \cdot \epsilon \quad \tau = G \cdot \gamma$
<u>Dämpfer</u> Newton 	Rein viskose Flüssigkeit.	 $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$
<u>Reibungsglied</u> Saint Venant 	Masse (Körper) auf Unterlage, bei Kraft $F >$ Haftreibung tritt Bewegung ein (wobei Gleitreibung $<$ Haftreibung) \rightarrow somit besteht keine Zuordnung zwischen (Weg)-Verformung und wirkender Spannung.	 $\tau^2 \geq \tau_0^2$
	Mögliche Ergänzung zwecks Zuordnung Verformung zu Spannung durch Proportionalitätsfaktor, beispielsweise einklinkende Feder.	

Tab. 2: Mechanische Grundelemente.

In einem komplexen Modell werden die Modelle der erwähnten idealisierten Körper durch Serien- und Parallelschaltung kombiniert und gestatten dadurch - dem tatsächlichen Verhalten eines Körpers wiederum nur angenähert - ein besseres Beschreiben des praxisrelevanten Verformungsverhaltens.

Insbesondere wird die theoretische Behandlung der Reibungsanteile (spontan-plastische Verformungsteile) problematisch, da keine eindeutige Zuordnung zwischen Verformung und Spannung besteht. Zusätzliche Annahmen und Ergänzungen, wie in [1] und Tabelle 2 aufgeführt, werden erforderlich.

Allgemein wird in [1] festgehalten, dass sich alle nicht-porösen Stoffe rein- und einfach elastisch verhalten, wenn Volumenänderungen unter isotropen Spannungen entstehen.

Beim Aufbringen deviatorischer Spannungen auf verschiedene Körper zeigen sich die unterschiedlichen rheologischen Eigenschaften dieser Körper bei Auftreten gestaltändernder Verformungen.

Die wichtigsten Kombinationen der drei Grundelemente zu den komplexen Modellen sind nach [1, 3] in Abbildung 1 in einem Auszug des "rheologischen Baums" dargestellt.

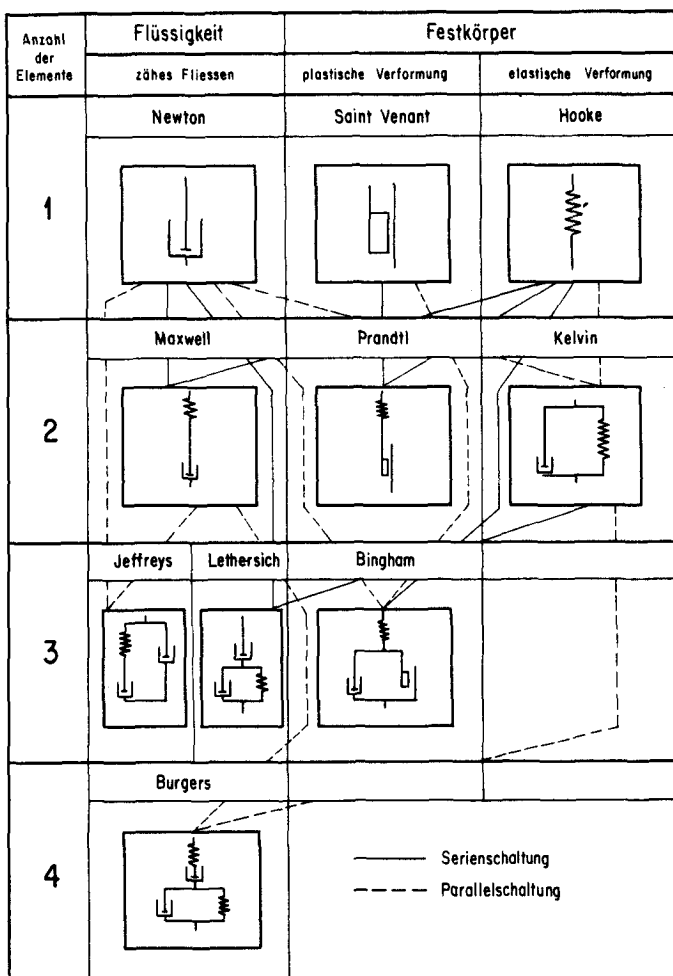


Abb. 1

Der rheologische Baum nach Reiner [3].

Für die mathematische Anwendung der Modelle gilt:

- Bei **Parallelschaltung** werden alle Elemente gleich verformt. Die im ganzen Querschnitt wirksame Spannung resultiert aus der Summe der Spannungen in den einzelnen Elementen.
- Bei **Serieschaltung** weisen alle Elemente die gleiche Spannung auf. Die Gesamtverformung resultiert aus der Verformung der einzelnen Elemente.

2.22 Modellvorstellungen zum Verformungsverhalten bituminöser Baustoffe

Die Anwendung rheologischer Modelle für bituminöse Baustoffe wurde verschiedentlich beschrieben [48, 52, 53, 61 bis 64].

Werden Modelle für das Beschreiben des Verformungsverhaltens bituminöser Baustoffe herangezogen, so zeigt es sich, dass eine Annäherung an das tatsächliche Verhalten nur durch ein **komplexes Modell** erreicht wird.

Dies zeigt beispielsweise die Modellvorstellung zum Verformungsverhalten eines Asphaltprüfkörpers unter monoaxialer statischer Belastung, Modell und Verformungsanteile nach [52] und den Abbildungen 2 und 3. In [52] wird festgehalten:

"Das Verformungsverhalten von Asphalt ist in erster Näherung als viskoelastisch zu bezeichnen. Diese Bezeichnung ist jedoch unvollständig, da Asphaltmischungen bei den in der Praxis herrschenden Temperatur- und Belastungsbedingungen neben den elastischen und viskosen auch spontanplastische Verformungen zeigen.

Für Asphalt wird oft ein rheologisches Modell mit fünf Elementen verwendet. In zahlreichen Kriechversuchen konnte dieses Modell im wesentlichen bestätigt werden, wobei auch eine Erweiterung durch ein in Serie geschaltetes Dämpfungselement vorgeschlagen wird, wie dies in der Abbildung 2 dargestellt ist. Dies beruht darauf, dass einige Mischungen, die während sehr langer Zeit (Tage) mit einer Druckspannung belastet waren, keinen Grenzwert für die Kriechdehnung zeigten. Die Kriechgeschwindigkeit blieb ebenso erhalten wie ein erheblicher viskoelastischer Rückverformungsanteil nach Entlasten."

Der qualitative Verlauf der Kriechdehnung sowie die einzelnen Verformungsanteile des Modells nach Abbildung 2 sind der Abbildung 3 zu entnehmen.

Grundsätzlich ist darauf hinzuweisen, dass speziell bei verdichteten bituminösen Gemischen - Asphaltkörpern - die Anwendung verschiedener Modelle in zeitlicher Folge für eine noch bessere Annäherung an das tatsächliche Verhalten erforderlich wäre.

Dies beruht darauf, dass jede Beanspruchung von Asphaltprüfkörpern irreversible Verformungen (Gefügeänderungen) zur Folge hat. Damit sind Veränderungen der mechanischen Eigenschaften verbunden. Diese fortdauernde Zustandsänderung der Mischung ist dabei als so bedeutend anzunehmen, dass ein herkömmliches rheologisches Modell immer nur einem bestimmten, relativ kleinen "Zustandsbereich" des Materials zugeordnet werden kann. Es ist daher streng genommen nicht zulässig, beispielsweise einen langdauernden Kriechversuch mit nur einem Modell zu beschreiben. Dafür wären vielmehr Modelle erforderlich, deren Aufbau zeitabhängig ist, oder solche, die aus Einzelelementen mit variabler Verformungscharakteristik in Funktion der Zeit oder in Funktion des "Zustandsbereiches" der Volumetrie bestehen würden.

Der gleiche Effekt - allerdings abgeschwächt - zeigt sich auch im Verformungsverhalten bituminöser Bindemittel oder Mastices. Infolge des geschlossenen und kolloidalen Aufbaues, z. B. eines Erdölbitumens treten die eigentlichen Strukturverschiebungen jedoch nur im Mikro- resp. Molekularbereich auf, wogegen diese bei den eher offenen verdichteten Gemischen im Makrobereich, d. h. im Bereich erfassbarer Gestalt- resp. Volumenänderungen, auftreten.

Eine Zwischenstufe zwischen Bindemittel und Asphalt bilden dabei etwa leicht bis stark stabilisierte Bindemittel mit Dispersionscharakter. Näher beim Gussasphalt und Asphaltbeton liegen die stark stabilisierten Mastices [62, 63].

Die praktische Anwendung der Modelle in der Materialprüfung ist noch sehr beschränkt. Grundsätzlich wäre diese Möglichkeit vor allem für das Auswerten standardisierter Kriechversuche angezeigt, wobei in einem ersten Schritt ein Beschränken auf das Bestimmen der verschiedenen Verformungsanteile, beispielsweise unter Angabe in Prozenten der Gesamtverformung nach der Belastungszeit t_1 , einem relativen Vergleich verschiedener Mischungen dienen könnte.

Der Versuch einer Auswertung von Kriechversuchen über Verformungsanteile ist in Teil IV unter den vergleichenden Untersuchungen aufgeführt.

Wird dabei aber die Zahl der untersuchten Prüfkörper im Hinblick auf eine praktische Anwendung auf 3 bis 4 beschränkt, so zeigen die Verformungsanteile sehr grosse Streuungen, da, wie schon in Abschnitt 2.21 festgehalten, das Bestimmen des spontan-plastischen Verformungsanteils ϵ_0 gemäss Abbildung 3 problematisch ist. Linearisierungen oder Extrapolationen, wie in [38] empfohlen, werden für übliche prüftechnische Einrichtungen unumgänglich.

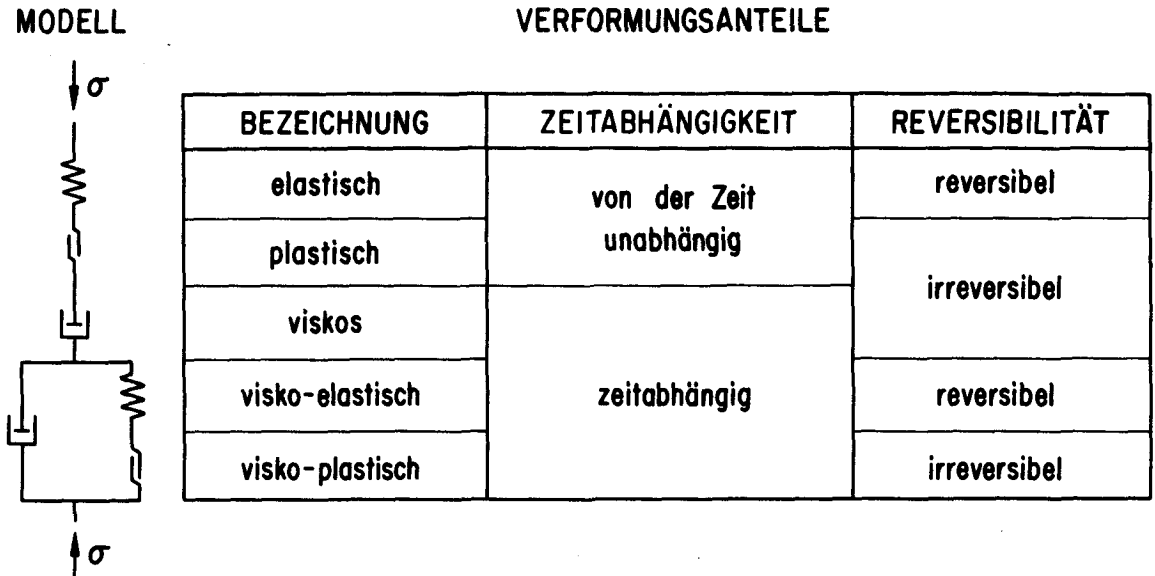


Abb. 2: Allgemeines rheologisches Modell nach Krass, jedoch durch ein in Serie geschaltetes Dämpfungsglied ergänzt, nach [48, 52].

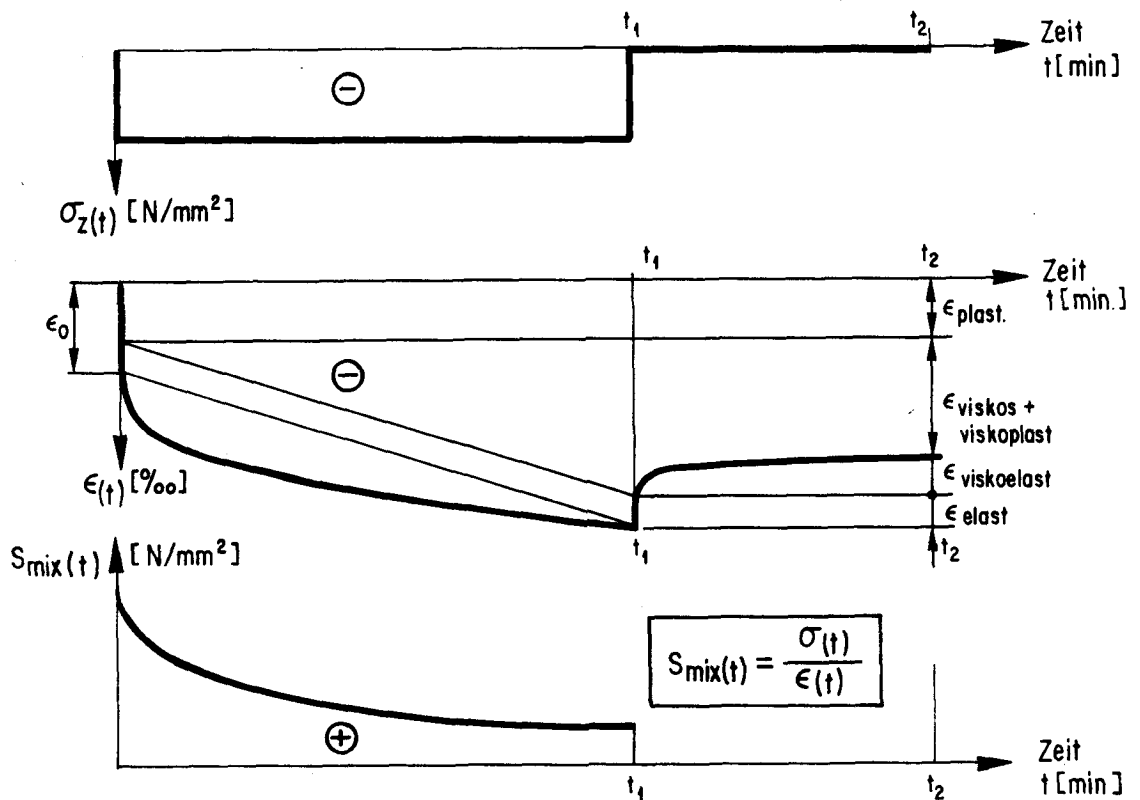


Abb. 3: **Kraftgesteuerter Versuch:** Qualitativer Verlauf der Kriechdehnung und des Steifigkeitsmoduls; Zusammenwirken der Verformungsanteile des Modells von Abbildung 2. Belastung von t_0 bis t_1 konstant. Die Darstellung wurde entsprechend der Konvention für die Vorzeichen (Druck - und Zug +) gewählt.

2.3 Das Erarbeiten von Materialkennwerten

2.31 Die "empirische Notwendigkeit"

Das in Abschnitt 2.2 festgehaltene komplexe Verhalten bituminöser Baustoffe zeigt sich in mechanischen Prüfungen deutlich im

- nicht newton'schen Verhalten der bituminösen Bindemittel, bei deren Betrachtung als Flüssigkeit sowie im
- viskosen, viskoelastischen bis annähernd elastischen Verhalten bituminöser Bindemittel und bituminös gebundener Gemische bezüglich Verformung unter mechanischer Beanspruchung, in starker Abhängigkeit von
 - . Beanspruchungsgeschwindigkeit und/oder
 - . Temperatur.

Dieses komplexe Verhalten führte in der Materialprüfung - beim Versuch der Erarbeitung von Kennwerten bituminöser Baustoffe unter festgelegten Versuchsbedingungen - auf die Notwendigkeit des Bestimmens rein versuchsspezifischer Materialkennwerte mittels empirisch-technologischer Prüfverfahren. Aus solchen Prüfverfahren abgeleitete Kennwerte sind daher als **empirische Materialkennwerte** zu bezeichnen. Als Beispiel ist hier das Bestimmen der Gebrauchsspanne bituminöser Bindemittel bezüglich des Einsatzes im Temperaturbereich «kalt-warm» anzuführen. Dazu werden folgende empirischen Materialkennwerte bestimmt:

In der Kälte: Brechpunkt, als Übergangstemperatur T_{BP} im Bereich elastisch-spröd. Technologisches Prüfverfahren "Brechpunkt".

In der Wärme: Erweichungspunkt Ring und Kugel, als Übergangstemperatur T_{RuK} im Bereich viskoelastisch-plastisch-viskos. Technologisches Prüfverfahren "Ring und Kugel".

Solche, in der Produktion wie auch für das Überwachen bei der Anwendung (Bauausführung) entwickelte empirische und technologische Prüfverfahren entstanden primär aus dem Bedarf nach schneller und einfacher Bereichs- oder Klasseneinteilung der Baustoffe.

Historisch gesehen, ist dies zudem durch beschränkte technische Möglichkeiten sowie durch gezielt tief angesetzten Aufwand in der Prüftechnik erklärbar.

Letzteres ist beispielsweise etwa für die erforderlichen Schnellprüfungen eines Baulabors weiterhin gültig.

Auf diesen Gegebenheiten basiert somit die sogenannte "empirische Notwendigkeit" beim Erarbeiten von Materialkennwerten an bituminösen Baustoffen [27].

2.32 Die empirischen Prüfverfahren und Materialkennwerte

Das beschriebene komplexe Verhalten der Strassenbaustoffe und das Streben nach Anpassung der Prüftechnik an die Bedürfnisse der Bauausfertigung und des Baulabors (im Interesse rascher Rückkoppelung der Untersuchungen bei laufenden Arbeiten) haben zur Entwicklung zahlreicher empirischer Prüfverfahren geführt. Deren **unbestreitbare Vorteile** - letztlich wurden sie auch auf diese Punkte hin ausgelegt - sind:

Einfachheit - Handlichkeit - Schnelligkeit

Diesen Vorteilen stehen aber eindeutige Nachteile gegenüber, die allerdings schon bei der Entwicklung dieser Prüfverfahren bewusst in Kauf genommen wurden, da primär das Erarbeiten von Vergleichswerten bei der laufenden Produktion von Baustoffen als Ueberwachungs- und Gütekriterien im Vordergrund stand. Nach längerer Erfahrung mit diesen Prüfverfahren wurde es möglich, bestimmte zulässige Bandbreiten der Baustoffeigenschaften mittels dieser Prüfungen festzulegen. Durch statistisch-empirische Korrelation der Prüfergebnisse mit dem Verhalten in der Praxis fanden solche Verfahren mit Angabe von Anforderungsbereichen Aufnahme in die Normenwerke. So wird beispielsweise in der Planungsphase das Marshall-Verfahren speziell für die Labor-Eignungsprüfungen herangezogen und später bei der Ausführung in der Qualitätskontrolle eingesetzt. Siehe die Abbildungen A24 und A25 im Anhang.

2.33 Physikalische Prüfverfahren und Materialkennwerte

Der Hauptnachteil empirischer Prüfverfahren besteht darin, dass sie meist **keine physikalischen Kennwerte** zu liefern vermögen. Deshalb wurde vielfach versucht, die versuchsspezifisch anfallenden Kennwerte in physikalische Kennwerte umzurechnen. Dies wird aber durch die in einigen Prüfverfahren vorliegenden komplexen Spannungszustände erschwert. Zudem sind Berechnungsgrundlagen zu wählen, die für die zu prüfenden Baustoffe kaum durchgehend anwendbar sind.

Allgemein wurde daher die Notwendigkeit erkannt, **physikalische Materialkennwerte** aus definierten Spannungszuständen in geeigneten Festigkeitsprüfungen abzuleiten, um dadurch ein wesentlich besseres Charakterisieren der Eigenschaften bituminöser Baustoffe zu ermöglichen [33].

Physikalische Materialkennwerte können zudem - sofern geeignete mathematische Beziehungen verfügbar sind - direkt als Bemessungsgrundlagen verwendet werden, wobei zu beachten ist, dass die Betrachtung der bituminösen Baustoffe in kontinuumsmechanischer Hinsicht, z.B. infolge der ausgeprägt zweidimensionalen Anwendung, erschwert wird und bei der konventionellen mechanischen Prüfung oft auch eine starke Formabhängigkeit der Kennwerte vorliegt.

2.4 Schwerpunkte zu Forschung und Entwicklung der Materialprüfung bituminöser Baustoffe

Zur Materialprüfung bituminöser Baustoffe, insbesondere des Strassenbaus, sind aus eigenen Erfahrungen sowie Forschungsprogrammen und Literaturstudien folgende hauptsächlichsten Schwerpunkte gemäss Tabelle 3 abzuleiten:

Nr.	Materialprüfung bituminöser Baustoffe; Schwerpunkte (2 bis 4) der Forschung und Entwicklung bituminöser Baustoffe
1	<u>Ausbau von Normenwerken</u> (Entwurf und Revision) Für Grundbaustoffe, wie Bindemittel, Mineralstoffe etc.; Produkte, wie Mastices, Dichtungsbahnen, Mischgut, Asphalte; bezüglich Herstellung, Zusammensetzung, Aufbau, Anforderungen, Ausführung, Kontrollen.
2	<u>Laboruntersuchungen</u> Hier ist grundsätzlich zwischen Analyse und Festigkeitsuntersuchung zu unterscheiden. Für beide Untersuchungsgebiete ist die Entnahme von Prüfgut oder Prüfkörpern resp. das Herstellen von Prüfkörpern als eigentliches Teilgebiet zu betrachten. Für die Festigkeitsuntersuchungen ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen: • Empirischen Prüfverfahren und • Physikalischen Prüfverfahren
3	<u>Grossversuche</u> (ca. 1:1) Hier sind Grossversuchsanlagen und Untersuchungen am Bauteil resp. am Objekt zu nennen, unter simulierter (Gebrauchs-)Beanspruchung.
4	<u>Versuche am Bauobjekt</u> (Bauobjekt 1:1) Untersuchung bzw. Beobachtung des Langzeitverhaltens unter Gebrauchs-Beanspruchung (Realität).
5	<u>Problemkreis Dimensionierung</u> Basierend auf und im Vergleich mit erarbeiteten Materialkennwerten aus den Schwerpunkten Nr. 2 bis 4, durch empirisch-statistische Korrelation und eigentliche physikalische Dimensionierung, durch Formeln unter Einsetzen physikalischer Materialkennwerte.

Tab. 3: Schwerpunkte Forschung und Entwicklung.

Ein Schema zur Verdeutlichung der Verbindungen zwischen den verschiedenen Forschungsschwerpunkten ist nachstehend als Abbildung 4 dargestellt. Deutlich wird darin die Problematik der Bezugnahme zwischen der Laborprüfung 2 und den Grossversuchen 3 sowie den Versuchen am Bauobjekt 4 veranschaulicht, insbesondere für den Problemkreis der Dimensionierung unter Punkt 5.2.

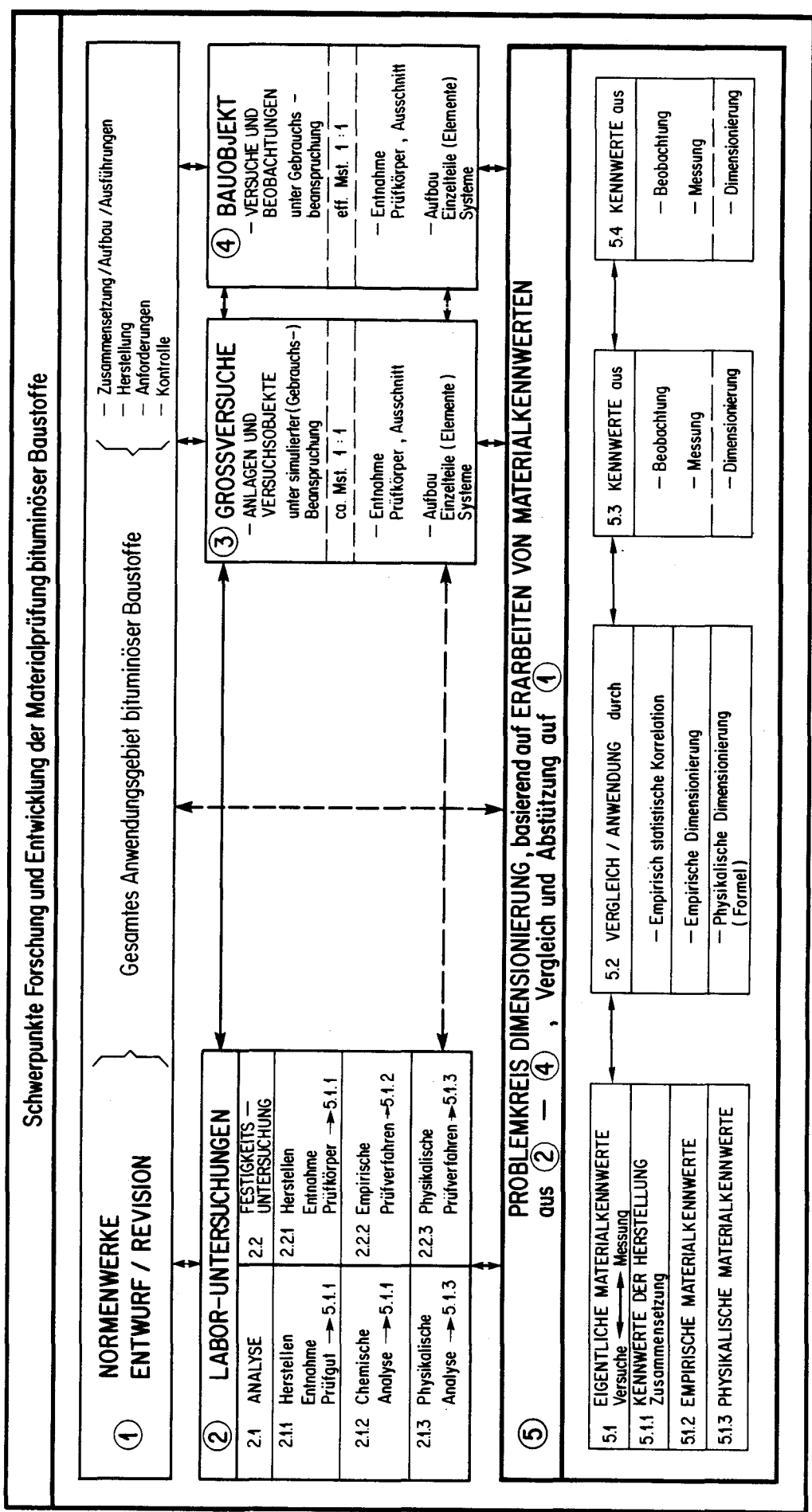


Abb. 4: Schema zu Tabelle 3, Schwerpunkte Forschung und Entwicklung der Materialprüfung bituminöser Baustoffe, [31].

3. DAS SPEKTRUM DER FESTIGKEITSUNTERSUCHUNGEN AN BITUMINOESEN BAUSTOFFEN IM LABOR

3.1 Uebersicht zu bestehenden Prüfverfahren (Tab. 4/1 bis 4/3)

Das Spektrum der Festigkeitsuntersuchungen an bituminösen Baustoffen im Labor wird ausgehend von einer Zusammenstellung der wichtigsten bestehenden Prüfverfahren betrachtet; siehe **Tabellen 4/1 bis 4/3**.

Die Vielfalt der bestehenden Prüfverfahren leitet sich ab aus den unter Abs. 2.1 aufgeführten breiten Anwendungsspektren der bituminösen Baustoffe sowie aus der unter Abs. 2.3 erläuterten "empirischen Notwendigkeit" in der Prüftechnik.

Die Zusammenstellung in den Tabellen 4/1 bis 4/3 ist wiederum nach Baustoff- resp. Produktegruppen gegliedert, mit Hinweisen auf den Zweck der Prüfverfahren.

Ziel und Zweck der Anwendung der aufgeführten Prüfverfahren ist das **Bestimmen von Materialkennwerten** zur Charakterisierung der Baustoffe. Nach Möglichkeit ist deren Verwendung in der Bemessung der Bauwerke und der Dimensionierung anzustreben.

Die nach Abschnitt 2.3 zu unterscheidenden empirischen und physikalischen Materialkennwerte sind in den Tabellen 4/1 bis 4/3 mit E und P bezeichnet.

Entsprechend werden die zugehörigen Prüfverfahren in empirisch-technologische bzw. physikalische Prüfverfahren eingeteilt.

Auf das Bestimmen von **Materialkennwerten der Funktion (F)** ist zusätzlich hinzuweisen. Sie gestatten es, ein Material oder einen Baustoff bezüglich seines Verhaltens in der Zweckbestimmung seiner Anwendung zu beurteilen.

So werden beispielsweise für einen Asphalt-Beton oder ein Abdichtungsmaterial folgende Materialkennwerte der Funktion massgebend:

- das Erreichen oder Unterschreiten eines bestimmten (Minimalwert-Erfahrung!) Hohlraumgehaltes im Asphalt oder
- der Verlust der Dichtheit eines Abdichtungsmaterials unter (örtlicher) wiederholter Beanspruchung [101, 104].

Hinweise auf solche Materialkennwerte bzw. Kriterien der Funktionalität (meist als Ereignisgrenzen ja/nein resp. nein/ja definiert) sind ergänzend in den Tabellen 4/1 bis 4/3 festgehalten.

Baustoff/Produktgruppe	Prüfverfahren	Bezeichnung	Kennwert Einheit	Typ	Zweck und Hinweis auf
Bindemittel	Penetration	Pen	1/10 mm	E	Bestimmen Eindringen einer Nadel. Hinweis auf "Härte", Härtegrad.
	Erweichungspunkt Ring und Kugel	TRuK	°C	E	Temperatur bei Auftreten einer bestimmten Verformung durch Belasten mit Kugel, Kennwert "in der Wärme", Übergang fest-plastisch-viskos, "Erweichung" bei TRuK.
	PI Penetrationsindex	PI	-	E	Mass für die Temperaturempfindlichkeit eines Bindemittels, Berechnung aus Pen725 und PenTRuK, wobei PenTRuK als 800 angenommen wird.
	Brechpunkt nach Fraas	TBP	°C	E	Temperatur bei Reißen oder Brechen einer Bindemittelschicht auf gebogenem Stahlblech. Kennwert "in der Kälte", Übergang fest-hart-spröde, "Brechen" bei TBP.
	Duktilität	D	m	E	Erfassen des "Fadenziehvermögens".
	Viskosität nach Engler	EV	°E	E	Bestimmen einer relativen Viskosität. Angabe der Ausflusszeit einer bestimmten Menge Bindemittel durch eine bestimmte Öffnung im Verhältnis zur Auslaufzeit von Wasser der gleichen Menge.
	Viskosität STV (Strassenteeviskosimeter)	STV	sec	E	Bestimmen einer empirischen, relativen Viskosität. Bestimmen der Durchflusszeit einer bestimmten Menge Bindemittel durch eine bestimmte Öffnung als Mass für die Viskosität.
	Dynamische Viskosität (konzentrische Zylinder, Rotation)	η	Ns/m ²	P	Bestimmen der Viskosität. Berechnet aus Kraft (Moment) bei festgelegtem Schergerfälle.
	Kinematische Viskosität (konzentrische Zylinder, Rotation)	ν	m ² /sec	P	Dichtebezogene dynamische Viskosität $\nu = \frac{\eta}{\rho}$.
	SLIDING-PLATE-Viskosimeter	η	Ns/m ²	P	Dynamische Viskosität.
	Druckplatten-Viskosimeter (Schubprüfungen)	η	Ns/m ²	P	Ausquetschen einer Masse unter verschiedenen Anordnungen. Berechnen der Viskosität.
	B-SA Prüfverfahren Bindemittel-Schub-Axial	G*	N/mm ²	P	Bestimmen des komplexen Schubmoduls.
		ϕ	°B	P	Phasenwinkel ϕ . Berechnen des Speichermoduls G' und des Verlustmoduls G''.
		η'	Ns/m ²	P	Bestimmen der Schwingungviskosität η' .

Tab. 4.1:

Übersicht zu bestehenden Prüfverfahren der Festigkeitsuntersuchung an bituminösen Baustoffen. Teil 1: Bindemittel. E: Emprisch; P: Physikalisch.

Baustoff/Produktgruppe	Prüfverfahren	Bezeichnung	Kennwert Einheit	Typ	Zweck und Hinweis auf
Mastics	Wie Bindemittel, zusätzlich Stempelleindringtiefe	x	mm	E	Widerstand gegen Punkt-Flächenlast.
		T _G	ja/nein °C	P	Stehvermögen (schiefe Ebene), evtl. relative Viskosität in Funktion der Temperatur. Grenztemperatur.
	Dehn-Versuche (RABE)	F	kN, N/mm ²	P	Kraftverlauf, Spannung.
		ε n	% (-)	P	Dehnung, Relaxation. Ablösen, Zyklenzahl.
Dichtungsmassen (Fugenfüll-Dichtungsmassen)	Dehn-Stauchversuche				Kraftverlauf (Spannung, Relaxation, Rückstellvermögen).
	an Masse	div.		E P	Wie Bindemittel und Mastices.
Dichtungsbahnen	an der ganzen Dichtungsbahn: Zugversuch an: - Streifen	FL/FQ	N/mm	P	Reisskraft pro Länge (Höchstkraft im Zugversuch), längs und quer.
		ε _L /ε _Q	%	P	Reissdehnung (bei Reisskraft); ε.
	- Naht	FL/FQ	N/mm	P	Reisskraft pro Länge (Höchstkraft im Zugversuch), längs und quer.
		ε _L /ε _Q	%	P	Reissdehnung (bei Reisskraft); ε.
	Schubversuch (einschnittig/zweischchnittig)	τ	N/mm ²	P	Schubspannung, Schubkraft (Höchstkraft), Verhalten der Dichtungsbahn unter Schubbeanspruchung (vor allem Masse).
		γ	°	P	Besser: Schubmodul, ganzer Aufbau (G, γ).
	Schlagversuch (Hagelschlag)	VAS	m/s	P	Widerstand gegen simulierten Hagelschlag; Schädlingsgeschwindigkeit, Schädigungsarbeit
		AAS	Nm	P	bis undicht.
	Dauerdruckfestigkeit	D _F	N/mm ²	P	Grenzspannung bis undicht im Dichtheitstest.
		M _F	mm	P	Maximale Fallhöhe bis Perforation eintritt.
Ermüdung (Dehnen, Stauchen, Falten, Rissüberbrückung)	F _R	N/mm	E	Zyklenzahl bis Eintreten der Undichtheit unter definierter Beanspruchung. Dichtheit ja - nein → f(n). Messen der Kraft "am Riss", F _R .	
	n	(-)	P		
Bituminöses Mischgut (Einzelkörnungen)	Haftfestigkeit (Umhüllung)	UG	%	E	Umhüllung geschätzt, Hinweis auf Haftverhalten im Beisein von Wasser (statisch, Druck-schwellbeanspruchung).
		m _v	Masse-%	E	Verlust von auf Bindemittel aufgestreutem Splitt nach Wasserlagerung.
Bituminöses Mischgut; Mastices	Stempelleindringtiefe	x	mm	P	Verformung unter Punkt- oder Flächenlast.
Bituminöses Mischgut, Gussasphalt	Stempelleindringtiefe	x	mm	P	Verformung unter Punkt- oder Flächenlast.
		S _{max}	N/mm ²	P	Steifigkeitsmodul, Dehnmachgiebigkeit.
	Kriechversuch	ε	%	P	Dehnung ε, Steigung ε, Verformungsanteile, Modellparameter.
		σ _L	N/mm ²	P	Zugspannung (Tieftemperaturbereich).

Tab. 4.2: Übersicht zu bestehenden Prüfverfahren der Festigkeitsuntersuchung an bituminösen Baustoffen. Teil 2: Mastices, Massen, Dichtungsbahnen, Sand- und Gussasphalt.
E: Empirisch; P: Physikalisch.

Baustoff/Produktgruppe	Prüfverfahren	Bezeichnung	Kennwert-Einheit	Typ	Zweck und Hinweis auf
Asphalt-Beton	Marshall-Versuch u.a. (Festigkeit) [2, 112]	SM FM SM/FM	N mm N/mm	E E E	Stabilität Fließwert Steifigkeit KW-FE (Kennwerte der Festigkeit)
	Marshall-Versuch u.a. (Verdichtung, Volumetrie) [2, 112]	+	+	-	Verdichtung nach festgelegten Verdichtungskriterien, Standardisierung und Dichte. KW-VOL (Kennwerte der Volumetrie).
	Verdichtungsverfahren: Gyrotor/PCG, Kneading-Compactor, table de Compactage	HG HHH HFB	Vol.-% Vol.-% %	P P P	Verdichtungszustand, Aufbringen von Verdichtungsenergie. Hohlraumgehalt, Hohlraum der Mineralstoffe. KW-VOL (Kennwerte der Volumetrie) Hohlraumgehalt-Füllungsgrad
	Hveem Hubbard-Field Prüfungen, ähnlich Marshall	ST FL ST/FL	N mm N/mm	E E E	Stabilität Fließwert Steifigkeit
	monoaxialer Kriechversuch	S _{mix} ε	N/mm ² %	P P	Steifigkeitsmodul, Dehnnachgiebigkeit. Dehnung, Dehngeschwindigkeit, Verformungsanteile an Gesamtverformung, Modellparameter.
	monoaxialer Druckversuch	S _{mix} ε	N/mm ² %	P P	Steifigkeitsmodul (Dehnnachgiebigkeit). Dehnung
	monoaxialer Zugversuch	S _{mix} ε	N/mm ² %	P P	Steifigkeitsmodul Dehnung
	monoaxialer Schwingversuch	M* ε φ	N/mm ² % OB	P P P	Komplexer Steifigkeitsmodul. Dehnung, Dehngeschwindigkeit, Verformungsanteile an Gesamtverformung, Modellparameter. Phase F-x. Berechnen M' und M*.
	Biegeversuch: 3-Punkt-Biegung 4-Punkt-Biegung	M* φ	N/mm ² OB	P P	Komplexer Steifigkeitsmodul. Phase F-x. Berechnen von M' und M*.
	Schubversuche - Platten (zweischneittig) - konzentrische Zylinder (PK-PBSA)	G* φ	N/mm ² OB	P P	Komplexer Schubmodul. Phase F-x. Berechnen von G' und G*.
	Torsionsversuch: statisch schwingend	G* φ	N/mm ² OB	P P	Komplexer Schubmodul. Phase F-x. Berechnen von G' und G*.
	triaxialer Kriechversuch	S _{mix} ε	N/mm ² %	P P	Steifigkeitsmodul Dehnung, Dehngeschwindigkeit, Verformungsanteile an Gesamtverformung, Modellparameter.
	triaxialer Druckversuch (Bruchversuch)	S _{mix} c φ	N/mm ² N/mm ² OB	P P P	Steifigkeitsmodul (Dehnnachgiebigkeit). Kohäsion Winkel der inneren Reibung
	triaxialer Schwingversuch	M* ε φ	N/mm ² % OB	P P P	Steifigkeitsmodul Dehnung, Dehngeschwindigkeit, Verformungsanteile an Gesamtverformung, Modellparameter. Phase F-x. Berechnen von M' und M*.

Tab. 4.3: Übersicht zu bestehenden Prüfverfahren der Festigkeitsuntersuchung an bituminösen Baustoffen. Teil 3: Asphalt-Beton. E: Empirisch; P: Physikalisch.

3.2 Allgemeine Problematik der Prüfkörper (PK)

Wie für andere Baustoffe geltend, ist auch bei den bituminösen Baustoffen die Hauptproblematik der Festigkeitsuntersuchungen an Prüfkörpern im Labor im zwangsläufigen "Dimensionsverlust" (Massstab, Ausdehnung) des Prüfkörpers gegenüber der Anordnung der Baustoffe in der praktischen Anwendung zu suchen.

Für die als reine **Qualitätskontrolle** (Prüfung auf Konstanz, Erreichen von Minimalwerten) ausgelegte Festigkeitsuntersuchung besteht diese Problematik nur beschränkt, d.h. meist wird sie durch Erfahrungswerte aus dem Vergleich mit dem Verhalten in der Praxis gemildert. Ebenso beschränkt bleibt aber oft auch die direkte Uebertragbarkeit der Ergebnisse solcher Routinetests in die Praxis, sowohl bezüglich der effektiven Beanspruchung der Baustoffe als auch ihres tatsächlichen Festigkeits- und Funktionsverhaltens.

Für die angenäherte Simulation der Praxisbeanspruchung werden neben der aufwendigeren Ausrüstung an prüftechnischen Einrichtungen vor allem das **Einleiten von Kräften** oder das **Aufbringen von Deformationen** am Prüfkörper problematisch.

So können die aus der Spannungsanalyse am Bauelement oder am Grossprüfstück und die aus der theoretischen Betrachtung am Bauelement oder am "Kontinuum" (hier als grossräumige oder flächige Ausdehnung eines Baustoffes im Sinne seiner tatsächlichen praktischen Anwendung zu bezeichnen) - etwa aus Verfahren wie "Berechnung am Streifen gegebener Breite" oder "Betrachtung am isotropen Halbraum" - abgeleiteten und auf den Prüfkörper zu übertragenden Spannungen nur angenähert ihrer tatsächlichen Verteilung aufgebracht werden.

Das hat seine Ursache darin, dass der Prüfkörper nur einen kleinen Ausschnitt aus dem Baustoff bezüglich der Dimensionen seiner tatsächlichen praktischen Anwendung darstellt.

So wird beispielsweise die Radialspannung im Triaxialversuch nicht nur radial ($\sigma_{21} \equiv \sigma_{22}$), sondern auch über die vertikale Achse der Prüfkörper (meist Zylinderachse) konstant aufgebracht. Deutlichen Einfluss wie auch bei anderen Baustoffen haben weiter etwa die Behinderung der Querdehnung durch die Druckplatten oder in Zugversuchen das Einspannen der Prüfkörper.

Im Zugversuch tritt speziell bei visko-elastischen Stoffen ein ausgeprägtes Einschnüren auf, verstärkt durch visko-plastische Verformungen infolge örtlich erhöhter Beanspruchung (Ausquetschen an den Klemmbacken), die grossen Einfluss auf die Prüfresultate haben können. Siehe auch unter Prüfen der Duktilität.

Bei den Bindemitteln sind die Prüfkörper relativ einfach durch Erwärmen und Eingiessen in Formen oder direkt in die Prüfeinrichtungen zu gewinnen.

Bei Fertigprodukten, wie Dachpappen oder Dichtungsbahnen, ist ein Herausschneiden oder Stanzen der Prüfkörper erforderlich. Problematisch werden hier Funktionsprüfungen am eigentlichen Material bei Prüfkörpern mit kleinen Abmessungen wie auch an Systemausschnitten geringer Abmessungen.

Für zu verdichtende Gemische, wie Mastices, Sand- oder Gussasphalte und Asphalt-Beton, wird das Herstellen geeigneter Prüfkörper zusätzlich problematisch, weil sie meistens nicht der Praxis entsprechend ausgeführt werden kann. Der Prüfkörper sollte aus dem fertigen Produkt entnommen werden können. Diesbezüglich haben Bohrkerne aus bituminösen Belägen sicher den besten Praxisbezug bei Festigkeitsuntersuchungen an verdichteten bituminösen Gemischen.

Generell ist die Problematik der Prüfkörper unter den folgenden Aspekten zusammenzufassen:

- Geeignete Herstellung resp. Entnahme am Bauwerk (praxis-konformer Zustand des Baustoffes, bezeichnet als Initialzustand IP der Praxis oder Initialzustand IL des Labors),
- Festlegen geeigneter Abmessungen (Minimalabmessungen),
- Krafteinleitung (Einspannung) und
- Übergang von der Materialprüfung zur Systemprüfung.

3.3 Aspekte der Prüftechnik, technischer Ausrüstungsgrad

Unter **Prüftechnik** sind für das einzelne Prüfverfahren die verschiedenen Phasen bei der Versuchsdurchführung und der Einsatz der zugehörigen technischen Hilfsmittel resp. Elemente zu verstehen.

Als **technischer Ausrüstungsgrad** ist die Summe der vorhandenen und einsetzbaren Elemente und Hilfseinrichtungen zu bezeichnen.

3.31 Prüftechnik - Phasen und Elemente der Versuchsdurchführung

Eine Uebersicht zur Prüftechnik und Versuchsdurchführung gibt die Tabelle 5. Sie ist bezüglich der einzelnen Phasen im Versuchsablauf gegliedert.

P R Ü F T E C H N I K		
Phase	Ausführung durch	Technische Mittel
Herstellen der Prüfkörper PK	Herstellen/Entnahme und Bearbeiten der Prüfkörper. Lagern (→ Beanspruchung zusätzlich vor der eigentlichen Festigkeitsbeanspruchung), Konditionieren. Vorbereiten der Prüfkörper.	Mischen, Verdichtungsgeräte; Stanzen, Schneiden, Fräsen, Bohren, Schleifen. Wasserdruck (statisch, schwingend), Klimakammer, Raumklima. Aufkleben Zugplatten etc., Anpassen an Einbauten.
Einrichten	Vorbereiten Prüfmaschinen (Aufwärmen, Klima Prüfraum). Einbau, Einspannen der Prüfkörper. Konditionieren der Prüfkörper im Prüfraum.	Manuell (Führungshilfe Computer) Manuell. Festklima oder Klimasteuerung, wenn Klima der Prüfkörper variabel.
Eingabe Versuchsdaten	Festlegen Prüfparameter, Eingabe Prüfkörperdaten. Einrichten Geber, Abgleich (Tarieren).	Versuchsprogramm, Kennwerte Prüfkörper nach Herstellen, Voruntersuchungen. Computer, Nullabgleich und Tarieren.
Eigentlicher Versuch und Datenerfassung	Versuchsstart, Steuern/Erfassen von Messdaten (Vorbelastung, Hauptbelastung, Entlasten, Relaxation), Versuchsende.	Steuerung/Regelung, Prüfmaschinen (eigentliche Versuchsphase), Datenerfassung. → Transferieren der Daten, Speicherung im Computer.
Auswerten	Ausbau der Prüfkörper. Weitere Messungen an Prüfkörpern. Plotten, Berichterstellung.	Erfassen weiterer Prüfkörper - Daten aus anderen Messungen. Auswerten für einzelne Prüfkörper, Gruppen von Prüfkörpern, Tabellen und Graphics ab Computer und Plotter.

Tab. 5: Prüftechnik - Phasen und Elemente der Versuchsdurchführung.

3.32 Der technische Ausrüstungsgrad

Für **Speziallabors** - als solche sind auch die Labors der auf einzelne Fachgebiete ausgerichteten Abteilungen der EMPA zu bezeichnen - bestehen aufgrund von Aufträgen für Routineprüfungen, für die Durchführung spezieller Untersuchungen und für Forschung und Entwicklung verschiedene **Anforderungen** an den technischen Ausrüstungsgrad:

- Möglichkeit zur Durchführung bestehender (normierter) Prüfverfahren
- Möglichkeit zur Modifizierung bestehender (normierter) Prüfverfahren
- Aufbau von Versuchsanordnungen nach speziellen Bedürfnissen der Praxis sowie Simulation im Schadenfall (Wunsch, Bedarf Auftraggeber)
- Entwicklung neuer Prüfverfahren, Schwerpunkt F+E

Für die Erfüllung dieser Anforderungen wird die stete **Anpassung und Verbesserung des technischen Ausrüstungsgrades** von grösster Bedeutung. Für die Entwicklung neuer Prüfverfahren ist aber insbesondere die Möglichkeit zur Realisierung neuer Prüfeinrichtungen - sei es durch Beschaffung von aussen, sei es durch Eigenbau von Prototypen (Bedarf, Konzepterarbeitung, Entwurf, Konstruktion, Realisierung, Test, direkte und spezielle Anwendung) - von zentralem Interesse.

Voraussetzung dazu sind die erforderlichen Mittel (Kredite) sowie eine leistungsfähige Infrastruktur bei Eigenbau (kompetente Abteilungen Konstruktion/Elektronik und zugehörige Werkstätten) [96].

Der technische Ausrüstungsgrad hat grundsätzlich zwei Hauptaspekte, nämlich **Mechanik** und **Elektronik**.

Festigkeitsuntersuchungen	
↓ Technischer Ausrüstungsgrad ↓	
Mechanische Elemente	Elektronik
Prüfmaschinen Einbauten Hilfseinrichtungen	Steuer-/Regeltechnik Geber, Verstärker Datenerfassung, Auswertung (Darstellung)

Tab. 6: Aspekte des technischen Ausrüstungsgrades; mechanische Elemente - Elektronik.

Diese zwei Gruppen - mechanische Elemente und Elektronik - sind als sich ergänzende und gleichermassen erforderliche Bausteine zu betrachten und entsprechend auszubauen.

3.4 Allgemeine Zielsetzungen für die Entwicklung von Prüfverfahren der Festigkeitsuntersuchungen an bituminösen Baustoffen

Aus den vorstehenden Abschnitten war gesamthaft für die Entwicklung der Prüfverfahren der Festigkeitsuntersuchungen an bituminösen Baustoffen im Labor abzuleiten:

A Ausbau des technischen Ausrüstungsgrades gesamthaft.

B Entwicklung der Prüftechnik nach Zielpunkten für:

1. **Verbessertes Herstellen von Prüfkörpern.**

2. **Ansetzen von Lagerungsarten** zwecks Beanspruchung der Prüfkörper vor sowie während der Festigkeitsprüfungen.

3. **Entwicklung von Festigkeitsprüfverfahren, die**

- grössere Variation einzelner Versuchsparameter (beispielsweise die Weiterentwicklung empirischer "1-Punkte-Prüfverfahren") gestatten;
- Ansatzpunkte für Systemprüfungen (Prüfen ganzer Aufbauten) bieten;
- den direkten Vergleich (Initialzustände IL und IP) zwischen Laborprüfkörpern und Prüfkörpern aus dem Bauwerk entnommen (Bohrkerne, Ausschnitte) ermöglichen.

In den Abschnitten 3.41 bis 3.43 werden diese Aspekte für die **Hauptgruppen der bituminösen Baustoffe/Produkte** getrennt kurz zusammengefasst.

3.41 Festigkeitsuntersuchungen an Bindemitteln, Mastices sowie Dichtungsmassen und Deckmassen (auf Träger)

Diese Baustoffe resp. Produkte sind als Grundbaustoffe (Bindemittel), als Anteile von Gemischen oder als Komponenten von Produkten in Festigkeitsuntersuchungen zu prüfen auf:

- **Gütekriterien** (nach Norm), meist als Schnellprüfung mit empirisch-technologischen Prüfverfahren (1-Punkte-Versuche zur Herstellung, Verarbeitung und eigentlichem Festigkeitsverhalten).
- **Verhalten in Parameterfeldern**, d. h. Bestimmen physikalischer Materialkennwerte in Funktion der Variation einzelner Versuchsparameter (z.B. Verformungsgeschwindigkeit, Temperatur, Zeit etc.).

1 Prüfkörper

Menge resp. Abmessungen der Prüfkörper sind je nach Prüfverfahren gegeben.

Anzustreben sind Prüfkörper mit eher hohem Massenanteil. Ideal ist das Einfüllen des zu prüfenden Materials direkt in die Prüfeinrichtung (Eingiessen).

2 Lagerungsarten

Hier stehen vor allem Alterungstests unter Thermo- bzw. Klimabeanspruchung im Vordergrund, bezüglich des Verhärtens resp. Versprödens der Bindemittel und Massen.

Für stabilisierte Bindemittel und Massen sind je nach Beimengung von mineralischen Baustoffen (Filler, Feinsand) weiterhin Versuche bezüglich des Verhaltens der Gemische unter Wassereinwirkung durchzuführen (Quellen, Volumenänderung). Das Erfassen des eigentlichen **Haftverhaltens** kann dabei nur beschränkt durch mechanische Prüfungen erfolgen [16, 19]. Zudem ist in praxisüblichen Mischungsverhältnissen der Bindemittelanteil der Mastices relativ hoch, wodurch eigentliche Haftprobleme kaum auftreten.

Haftversuche werden deshalb vor allem für das Charakterisieren der Mineralstoffe bezüglich ihres Haftverhaltens durchgeführt. Dabei bleibt der Anteil des Bindemittels tief, beispielsweise bei 10 Massen-% in Filler-Bindemittel-Mischungen zur Herstellung von Prüfkörpern.

3 Prüfverfahren

Im Vordergrund stehen **Stabilitätsprüfungen** (Standvermögen, Ablaufen der Masse auf schiefer Ebene) in Ergänzung zu den **empirisch-technologischen Prüfungen**, wie Brechpunkt, Penetration, Erweichungspunkt Ring und Kugel, Stempeleindringung, etc.

Als **physikalische Prüfverfahren** sind in Ergänzung resp. als Erweiterung beispielsweise der **Viskositätsprüfungen** bei mittleren bis tiefen Temperaturen vorzusehen:

Schub-Schwingversuche im mittleren bis tiefen Temperaturbereich (+40...+20...-10...-20°C).

Dabei treten eigentliche Ermüdungsversuche eher zurück, wogegen das Bestimmen von Materialkennwerten in Funktion des Parameterfeldes Frequenz-Temperatur, beispielsweise des **komplexen Schubmoduls G^*** (mit den Komponenten Spei-

cher- und Verlustmodul), Aussagen über das **Dämpfungsvermögen** von Bindemitteln in Funktion der Temperatur und von Massen oder Mastices als stabilisierte Bindemittel in Funktion des Stabilisierungsgrades erlauben sollten. Gleichzeitig ist aus solchen Versuchen im Tieftemperaturbereich das elastisch-spröde Verhalten abzuleiten, was Aussagen über die Rissempfindlichkeit solcher Massen oder Mastices sowie der diese Mastices enthaltenden bituminösen Gemische oder Produkte (Dichtungsbahnen) gestattet. Beispiel: Ergänzung der Biegeprüfungen von Polymer-Bitumen-Dichtungsbahnen nach [110].

Diese Kriterien sind vor allem auch für polymermodifizierte Bindemittel und Massen im Vergleich zu den verwendeten Ausgangsbindingmitteln zu untersuchen, da die erstgenannten bekanntlich eine erweiterte Gebrauchsspanne gegenüber den herkömmlichen Bindemitteln aufweisen.

Für das Auswerten der Versuche dürfte ausser den physikalischen Materialkennwerten auch die rheologische Charakterisierung dieser Baustoffe durch das Bestimmen von Modellparametern oder durch die Betrachtung nach dem Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzip aufschlussreich sein.

Insbesondere treten infolge der wieder grösseren Tendenz zu "härteren" oder "steiferen" Bauweisen unter Verwendung härterer Bindemittel vermehrt Versuche über das Kälteverhalten bituminöser Bindemittel in den Vordergrund [40, 41].

Solche Untersuchungen sind im Belagsbau nach Möglichkeit parallel zur Beobachtung des Verhaltens von Versuchsstrecken durchzuführen. Neuere Arbeiten auf diesem Gebiet [12, 14, 40, 41] liefern dazu wertvolle Anhaltspunkte.

3.42 Festigkeitsuntersuchungen an industriellen Produkten, z.B. Abdichtungsmaterialien, Dichtungsbahnen

1 Prüfkörper

Die Prüfkörper sind nach Möglichkeit entsprechend den Ausführungskriterien am Bau zu entnehmen, herzustellen und für die Prüfungen ihrer Funktion entsprechend anzuordnen (hauptsächlich zweidimensionale Ausdehnung der Baustoffe).

Für die reinen Qualitätskontrollprüfungen (gemäss Normprüfungen) ist das Verwenden von Prüfkörpern möglichst grosser Abmessungen angezeigt, vor allem für die mechanische Prüfung ganzer Aufbauten (Systemprüfungen) von Abdichtungsstrukturen.

2 Lagerungsarten und Simulationen

Vordringlich wird das Anwenden von Lagerungsarten zwecks Prüfung auf **Verträglichkeit** (Anwendung ähnlicher Baustoffe in Systemen) oder des **Haftverhaltens** der Baustoffe untereinander wie auch auf verschiedenen Unterlagen, mit oder ohne Vorbehandlung der Unterlage und mit oder ohne Voranstriche als Haftbrücken.

Dazu sind umfangreiche Versuche unter Variation des Einflusses von Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wasser, Frosttauwechsel, Art der Voranstriche etc. durchzuführen.

3 Prüfverfahren

Für die Dichtungs- bzw. Deckmassen gelten auch die in Abschnitt 3.41 aufgeführten Punkte. Zugleich besteht ein Bedürfnis nach der Schaffung neuer Prüfverfahren.

Für die ganze Produktegruppe sind ausser den normierten Standardversuchen der eigentlichen Materialprüfung in Qualitäts- resp. Produktkontrollen (wie beispielsweise Zugversuche an Streifen) weitere Prüfverfahren in Richtung System- bzw. Funktionsprüfungen zu entwickeln.

Als Zwischenstufe zwischen der Festigkeitsprüfung am Prüfkörper und der Systemprüfung sind Prüfungen mit praxisentsprechender Anordnung der Prüfkörper (Art, Lage, Beanspruchung), allenfalls eigentliche Funktionsprüfungen zu entwickeln (z. B. Bestimmen der Kriterien dicht/undicht von Abdichtungsmaterialien).

Dazu sind beispielsweise Ermüdungsprüfungen unter Erarbeiten von Kennwerten der Festigkeit und der Funktionalität sowie der Abhängigkeitsfunktionen dieser Kennwerte untereinander (z. B. Dichtungskriterien von Abdichtungsmaterialien für Elementbauten, Brücken etc. in Funktion der Schwingungsbeanspruchung) durchzuführen.

3.43 Festigkeitsuntersuchungen an Prüfkörpern aus verdichteten bituminösen Gemischen (Asphalt)

Für diese Baustoffgruppe sind je nach Korngrößenverteilung und Bindemittelgehalt verschiedene Gemischearten, wie Sandasphalt, Gussasphalt und Asphaltbeton, zu unterscheiden.

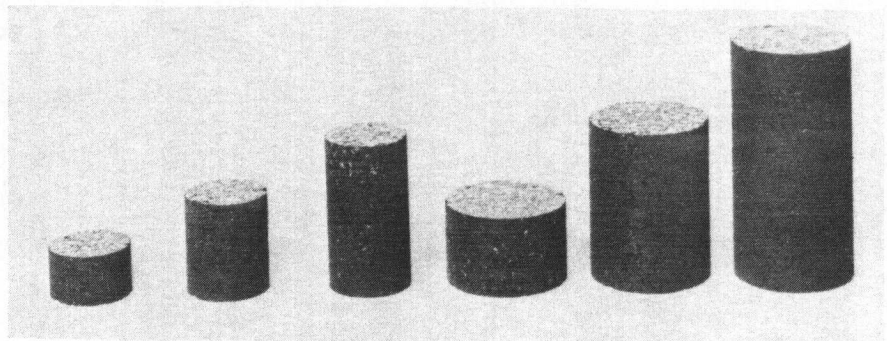
1 Prüfkörper

Die Frage der Herstellung und der Abmessungen der Prüfkörper im Labor bedarf weiterer intensiver Abklärungen, siehe Abschnitte 13 bis 16.

Diesbezüglich geben anzustrebende Vergleichsuntersuchungen an Bohrkernen und an im Labor hergestellten Prüfkörpern gewisse Randbedingungen für die Abmessungen der Prüfkörper, wobei eher auf grössere Bohrkern- und damit Prüfkörperdurchmesser auszuweichen ist (Durchmesser 150...200... 300 mm).

Vom Verfasser in mehrjährigen Abklärungen durchgeführte Verdichtungsversuche führten beispielsweise zu einer Prüfkörperreihe gemäss Abb. 5.

Die vergleichenden Untersuchungen in Kapitel IV geben weitere Hinweise zur Prüfkörperherstellung, siehe [89 bis 93]. Vor allem dürften für Schwingversuche an Belagsschichten ab Bohrkernen Prüfkörper eines Typs 1502, 1504, 1506 sowie 2002... und 3002... zu verwenden sein.



Prüfkörper	1006	1012	1020	1510	1520	1530*
Durchmesser [mm]	100	100	100	150	150	150
Höhe [mm]	65	120	200	100	200	300

Abb. 5: Beispiele verschiedener Prüfkörpertypen, Reihe mit Durchmesser 100 und 150 mm (* beschränkt möglich).

2 Lagerungsarten an Prüfkörpern

Eine ausreichende Signifikanz des Ansprechens von verdichteten bituminösen Gemischen auf verschiedene Lagerungsarten unter statischem oder schwingendem Wasserdruck in anschliessenden Festigkeitsprüfungen konnte aus eigenen Untersuchungen noch nicht abgeleitet werden [19].

Mechanische Beanspruchung unter gleichzeitiger Beanspruchung durch Wasserdruck zeigt deutlicheren Einfluss gemäss [17].

Vor allem für hohlraumreiche Beläge, wie Drainasphalte, sind weitere Versuche bezüglich der Auswascheffekte und des eigentlichen Haftverhaltens angezeigt.

3 Prüfverfahren

• **Gussasphalt, Mastices**

Diese Gemische haben einen hohen Anteil an Bindemittel, Filler und Sand, d.h. einen relativ hohen Mastixanteil. Sie sind daher dicht bis geschlossen (Bindemittelüberschuss) aufgebaut. Der Steifigkeit dieses Mastixanteiles kommt deshalb grosse Bedeutung zu. Statische Prüfverfahren, wie Kriechversuche und Stempel Eindringung, stehen im Vordergrund. Wie bei den Bindemitteln und Mastices sind zusätzlich auch hier Schwingversuche im erweiterten Parameterfeld Frequenz/Temperatur (f/T) durchzuführen.

• **Asphaltbeton**

Grundsätzlich ist das ganze Spektrum der wichtigsten bestehenden Prüfverfahren weiter anzuwenden (spezifische Erfahrungswerte verschiedener Prüfstellen).

Innerhalb der Routine- und Eignungsprüfungen mit empirisch-technologischen Prüfverfahren sind insbesondere die weitgehend eingeführten (normierten) Verdichtungsversuche weiter auszubauen. Ansätze für praktische Anwendungen sind aus der Mehrstufenverdichtung (modifizierte Marshallverdichtung) mit dem Bestimmen des Verdichtungsparameters C nach [87] abzuleiten.

Ein weiteres Ergänzen oder der Einsatz bestehender empirischer Prüfverfahren ist anzustreben.

Dazu sollten nach bisherigen Standardvorschriften hergestellte Prüfkörper weiterhin auch in physikalischen Prüfverfahren verwendet werden. Ebenso sind bei der Prüfkörperherstellung weitere Modifikationen möglich und vorzunehmen, siehe unter Absatz 2, Prüfkörper.

Darüber hinaus sollte die Entwicklung eines für Labor-Prüfkörper und Bohrkerne gleichermaßen anwendbaren Prüfverfahrens angestrebt werden, mit der wünschbaren Ausbaumöglichkeit für das Herstellen ganzer Aufbauten im Labor oder das Herstellen von Prüfkörpern in der Praxis entsprechenden Schichtdicken (Initialzustände IP und IL).

Dafür eignen sich ebenfalls Schwingversuche, wobei wie bei den Bindemitteln und Mastices nicht nur Ermüdungsprüfungen im Vordergrund stehen sollten, sondern physikalische Materialkennwerte in Funktion des Parameterfeldes Frequenz-Temperatur (f/T) zu bestimmen wären.

Im Zusammenhang mit dem Herstellen der Prüfkörper - und des nach Herstellung vorliegenden "Initialzustandes" = Zustand nach Verdichtung (Verdichtungsgrad 100 % der Bohrkerne entspricht normierter Verdichtung nach Marshall-Standard und ist Bezugsgrösse!) ist sicher für weitere Forschungsarbeiten die grundsätzliche Entscheidung zu treffen, ob weiterhin - und dies gilt speziell für mechanische Prüfungen in der Wärme, mit

ausgeprägten Verformungen der Prüfkörper-Prüfverfahren angewendet werden sollen, in denen Festigkeitskennwerte nicht direkt in Verbindung zu Volumetrie der Prüfkörper gesetzt werden können. Diese Fragestellung wird beispielsweise bei monoaxialen Prüfverfahren weitgehend ausgeklammert. Die Festigkeitskennwerte werden in Funktion der Belastung, der Temperatur und der Zeit mit Bezug auf den Initialzustand der Prüfkörper abgeleitet. Die axial und radial bestimmten Verformungen geben aber keine Anhaltspunkte über Veränderungen der volumetrischen Kenngrößen KW-VOL (gesamthaft als Volumetrie oder Verdichtungszustand zu bezeichnen) eines Prüfkörpers. Die verbreitete Auffassung, dass Kennwerte der Festigkeit auch in Funktion der am Prüfkörper vorliegenden Kennwerte der Volumetrie zu betrachten sind, ist daher angebracht und vertretbar, ansonsten auch bei relativ hohem Aufwand in der Prüftechnik fundamentale Beziehungen resp. Abhängigkeiten nicht physikalisch, sondern nur bezugsempirisch, mit Bezug auf einen während der eigentlichen Prüfung nicht mehr existierenden ursprünglichen Zustand (Initialzustand) des Prüfkörpers erfasst werden.

Die erwähnten Schwingversuche im Parameterfeld Frequenz-Temperatur können dagegen auf den Initialzustand der Prüfkörper bezogen werden, da pro Versuchspunkt nur wenige Schwingungen für das Bestimmen der physikalischen Kennwerte erforderlich sind und dadurch vernachlässigbare Veränderungen der volumetrischen Verhältnisse auftreten. Bedingung dazu ist die Versuchsdurchführung auf tiefer, "unterkritischer" Kraftstufe, siehe auch Abschnitt 11 in Teil III.

Wenn Gefügeverschiebungen innerhalb verdichteter bituminöser Gemische bei stärkeren Deformationen auftreten (siehe auch Abschnitt 2.22), insbesondere bei Bruchversuchen, ist dagegen keine Bezugnahme zum Initialzustand möglich. Zudem ergeben sich beispielsweise für Triaxialversuche Probleme bei der Definition des Bruchzustandes. Deutlich wird dieser Sachverhalt zudem auch in monoaxialen Bruchversuchen oder in extrema etwa beim Marshallversuch, wo in einem eigentlichen "Quetschversuch" die Stabilität und der Fließwert nach ausgeprägten Gefügeverschiebungen (siehe dazu die Abbildungen A24 und A25 im Anhang) bestimmt werden, was besagt:

Man misst am "falschen Punkt"!

Zum Verformungsverhalten wird für die praktische Anwendung einzelner Prüfverfahren auf die nachstehende Tabelle 7 und [23] verwiesen, in denen die "Bewertung der Prüfverfahren zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Asphaltgemischen" enthalten ist.

Als weitere Entwicklungsziele für Prüfverfahren an Asphalt sind somit gesamthaft zu nennen:

- Wegrücken empirisch-technologischer Prüfverfahren vom Bruchversuch (als Einpunkte-Prüfverfahren), nach Möglichkeit Ändern der Verfahren.

- Ausdehnen empirischer Prüfverfahren auf Parameterfelder (Kennwerte der Festigkeit in Funktion von Laststufe, Temperatur, Frequenz, Zeit, Volumetrie, etc.).
- Beizug von Relaxationsprüfungen (in Ergänzung zu Kriechversuchen), insbesondere für das Untersuchen des Kälteverhaltens ("Kälte-Kontraktion-Relaxation"), siehe [40, 41].
- Ausbau physikalischer Prüfverfahren durch höhere Auflösung der Datenerfassung und Auswertung.
- Die Zielsetzung für ein direktes Prüfen verdichteter bituminöser Mischungen in praxisentsprechender Schichtdicke (nach praxisiertem Herstellen) erscheint vordringlich. Ein möglicher Lösungsansatz dazu ist in der Form eines neuen Prüfverfahrens in Kapitel III enthalten.

Kriteriengruppen	Prüfverfahren Bewertungskriterien	Marshall: Stabilität, Fließwert, Quotient	Duriez	Kriechtest: $\sigma_v = \text{const};$ $\sigma_H = 0$	Triaxialtest: $\sigma_v = \text{const};$ $\sigma_H = \text{const}$	Triaxialtest: $\sigma_v = \text{vari};$ $\sigma_H = 0$	Triaxialtest: $\sigma_v = \text{vari};$ $\sigma_H = \text{const}$	Triaxialtest: $\sigma_v = \text{vari};$ $\sigma_H = \text{vari}$	Gyrator	Orniereur, wheel- tracking test	Rundlauf
		Anwendungsbereich	Laboratoriumsproben	+	+	+	+	+	+	+	+
	Ausbauproben	o	o	++	o	o	o	o	--	+	o
	Grösstkorn	o	+	+	+	+	+	+	+	++	++
Apparative Gegebenheiten	Gerätekosten	++	+	+	o	-	-	--	-	-	--
	Verbreitung	++	+	+	-	-	-	--	-	o	--
Verfahrenstechnische Merkmale	Zeitaufwand	++	++	+	o	o	o	o	++	o	--
	Einfachheit	++	++	+	o	-	-	--	+	+	-
	Prüfkosten	++	+	+	o	-	-	-	++	o	--
	Wiederholbarkeit	+	++	++	++	++	++	++	+	+	o
	Vergleichbarkeit	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Aussagegrenzen	Praxiskonformität der Beanspruchung	--	--	--	+	-	++	++	o	+	+
	Reihung	+	o	++	++	++	++	++	+	++	++
	Vorhersage der Spurrinntiefe	--	--	+	+	+	++	++	-	+	+
Einsatzbereich	Routine	+	+	+	-	-	-	--	o	o	--
	Forschung	o	o	+	++	+	++	++	+	+	++

Tab. 7: Bewertung der Prüfverfahren für das Bestimmen des Verformungsverhaltens von Asphaltgemischen [23].

Wertung: ++ sehr günstig; + günstig; o durchschnittlich; - ungünstig; -- sehr ungünstig.

4. AUFGABENSTELLUNG FÜR DIE ENTWICKLUNG VON EINRICHTUNGEN FÜR FESTIGKEITSPRÜFUNGEN

4.1 Entwicklungsschwerpunkte

Entsprechend Abschnitt 3.4 werden die Entwicklungsschwerpunkte 1 bis 3 zu den Prüfverfahren in Tabelle 8 zusammengefasst.

1 Herstellen geeigneter Prüfkörper	2 Vorbereitung, Lagerungsarten der Prüfkörper (Beanspruchung des Prüfkörpers inkl. Simulation von Nebeneinflüssen)	3 eigentliche Festigkeitsprüfungen (inkl. Funktionsprüfungen)
- Herstellung (Labor) - Entnahme (Bau, Grossversuch) - Verdichtung	- Klima - Alterung (auch vor der Festigkeitsprüfung) - Wassereinwirkung (statisch, schwingend)	- statisch oder schwingend - zerstörungsfrei (Ermüdung, Kurzzeit) - zerstörend (Ermüdung, Langzeit, Bruch)

Tab. 8: Entwicklungsschwerpunkte zu den Prüfverfahren.

4.2 Anforderungsprofil und Bedarfsmatrix

In Tabelle 9 ist das allgemeine **Anforderungsprofil** für prüftechnische Einrichtungen in einer Matrixform dargestellt.

Der Komplexität des Gebietes der **Festigkeitsuntersuchungen an bituminösen Baustoffen** entsprechend, ist die Matrix nach den Entwicklungsschwerpunkten der Prüfverfahren und nach den Produktgruppen auszuwerten.

Spezielle Zielsetzungen aus Abschnitt 3.4 für die Realisierung von Prüfeinrichtungen nach Bedürfnissen der Praxis (Dimensionierung, Anwendungstechnik) zu den drei Produktgruppen waren:

- Schaffen einer Möglichkeit zur Prüfung bituminöser Bindemittel und Massen mit grösserem Massenanteil im breiteren Frequenz-/Temperatur-Parameterfeld, insbesondere im unteren und tieferen Gebrauchsbereich der Temperatur.
- Realisierung einer Prüfeinrichtung für Abdichtungsmaterialien und Beschichtungen auf Ermüdung/Risse-Überbrückung **und** Funktionstüchtigkeit (Dichtheitskriterium in Funktion der mechanischen Kennwerte), Erfassen der Kraft möglichst nahe am Riss.
- Entwicklung eines Prüfverfahrens zur direkten Prüfung von Belagsschichten in Form von Bohrkernen oder Laborprüfkörpern mit Ausbaumöglichkeiten für das Prüfen mehrschichtiger Belagsaufbauten.

M A T R I X prüftechnische Einrichtungen zu		Entwicklungsschwerpunkte der Prüfverfahren an bituminösen Baustoffen	
Produktgruppen	1 Herstellen der Prüfkörper, Entnahme der Prüfkörper; zusätzlich: - Aufbauten, Systeme gemäss Praxis	2 Lagerungsarten der Prüfkörper - Beanspruchung (Klima vor) - Simulation am Prüfkörper während FU	3 Eigentliche Prüfverfahren der Festigkeitsuntersuchung
1 Bindemittel und Mastices (schwach stabilisiert), bituminöse Massen	11 Eingiessen, Pressen Prüfgut in Prüfeinrichtung direkt (kein eigentlicher Prüfkörper = idealer Prüfkörper). Möglichst hoher Massenanteil am Prüfkörper ist anzustreben.	21 Einrichtungen für: - Temperaturbeanspruchung (Alterung) der Prüfkörper (Klimakammern). - Haftfestigkeitsprüfung (Haftung im ternären System Bindemittel/Wasser/Mineralstoffe → Wasserdruckerzeugung statisch und schwingend.	31 - Schwingversuche, Umsetzen in/und Ergänzungen der Viskositätsprüfungen. - Schub-/Schwingversuche im breiten Frequenz/Temperatur-Bereich
2 Abdichtungsmassen, Abdichtungsmaterialien Dichtungsbahnen	12 Massen wie 11, jedoch zusätzlich: - Einrichtung für Stanzen und Schneiden - Herstellen Aufbau, Systeme	22 Massen wie 21, zusätzlich: - Wasseraufnahme - Wasserdampfdiffusion - Wasserdruck (Dichtheit) → Klimakammern → Wasserdruckerzeugung → Verträglichkeitsprüfungen	32 Massen wie 31, zusätzlich: → Schwing/Ermüdungsprüfungen (kombiniert mit Funktionsprüfungen, wie Dichten, Dämpfen) → Systemprüfungen (Verträglichkeit) → Abschälprüfungen, Schubprüfungen
3 Verdichtete bituminöse Gemische: - Mastices stark stabilisiert - Asphalte (Sand, Guss-) - Walzasphalte	13 Mischer → spezielle Problematik - Schlag (modifizieren) - Druck - Vibro - Walz (Walzen im Rahmen) - Knet - Spezielle Verdichtungsmaschinen (Gyrator/PCG/Table de compactage)	23 Wie 21 und 22, zusätzlich: - Wasserdruck: Auswaschen, statisches und schwingendes Durchströmen → Klimakammern → Wasserdruckerzeugung	33 Modifizierung empirisch-technologischer Prüfverfahren und Einrichtungen - Zeitstandversuch } monoaxial und tri- - Ermüdungsversuch } axial - Bruchversuch - Kälte-Kontraktion-Relaxation Entwicklung gleicher Prüfverfahren für Laborprüfkörper und Bohrkörner (Initialzustände des Labors II und der Praxis IP) - Schub-Schwingversuche

Tab. 9: Bedarfsmatrix für Einrichtungen zur Festigkeitsprüfung an bituminösen Baustoffen. Die Matrix ist auszuwerten nach den Entwicklungsschwerpunkten der Prüfverfahren und nach den Produktgruppen.

TEIL II: REALISIERUNG AUSGEWÄHLTER PRÜFTECHNISCHER EINRICHTUNGEN

5. PLANUNG

5.1 Bedarf und Grundkonzept

Die Realisierung der in Tabelle 9 enthaltenen Elemente musste naturgemäss im Rahmen der verfügbaren finanziellen Mittel sowie der Möglichkeiten auf baulichem, konstruktivem, elektronischem und werkstattmässigem Gebiet erfolgen.

Darauf basierte das in nebenstehender Tabelle 10 festgelegte Grundkonzept für die Realisierung ausgewählter prüftechnischer Einrichtungen zu den Versuchsgruppen I bis V.

5.2 Einsatzspektrum

Das Einsatzspektrum für die zu schaffenden Prüfmaschinen der Gruppen II bis IV leitet sich aus der Tabelle 1, Seite 4, und den Tabellen 4.1 bis 4.3, Seiten 15 bis 17, ab.

Dieses Einsatzspektrum wird in erster Linie durch die verschiedenen Einbauten im Sinne eines Baukastensystems abgedeckt, siehe Abschnitt 7.

Der Einsatz der Anlagen kann naturgemäss auch für Festigkeitsuntersuchungen an anderen Baustoffen erfolgen, sei es mit den gleichen Einbauten oder mit zusätzlichen spezifischen Einrichtungen.

5.3 Anforderungsprofil für die elektronische Ausrüstung

Der Ausrüstungsgrad bezüglich Elektronik wird vor allem für die eigentlichen Prüfmaschinen von erster Bedeutung.

Gesamthaft war folgendes Anforderungsprofil abzuleiten:

Steuerung/Regelung

Aufwand gering bis mittel für

- Einrichtungen der Prüfkörperherstellung (grosser manueller Anteil).

Aufwand mittel bis gross für

- Einrichtungen für das Ansetzen von Lagerungsarten der Prüfkörper (Beanspruchung/Simulation).

Aufwand gross für

- Prüfmaschinen: Regelkreise

Aufgaben	Geräte
I Herstellen von Prüfkörpern (Verdichten)	<ul style="list-style-type: none"> - Schlagverdichter, modifizierte Marshallgeräte - Statischer Druck-Verdichter, Ausstoss- und Verdichtungs- presse - Vibrationsverdichter, horizontalwirkend - Walzverdichtung in Stahlrahmen, Labor-Handwalze
II Lagerungsarten (Vorbereiten) der Prüfkörper	<ul style="list-style-type: none"> - Klimaanlage zu Prüfmaschinen, je eine Klimakammer zu jeder Prüfmaschine - Wasserdruckerzeugung, Wasserdruckaggregat für Wasserdruck <ul style="list-style-type: none"> • statisch • schwingend (auch Wechsellast) • Möglichkeit für Dichtheitsprüfungen und Durchströmversuche
III Ermüdungsprüfungen Festigkeitsuntersuchungen und Verformungsverhalten	<ul style="list-style-type: none"> - Mehrfachprüfstand DYNASPHALT <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; margin: 5px 0;"> <p>spezifische Prüfvorrichtungen zu verschiedenen Prüfverfahren, als Elemente des Baukastensystems, bezeichnet als "Einbauten" (kompatibel)</p> </div>
IV Bruchversuche	<ul style="list-style-type: none"> - Universalprüfmaschine UVP 150 kN
V Funktionsprüfungen spezielle Ermüdungs- oder Bruchversuche (III und IV) und Überwachung der Funktion der Baustoffe	<ul style="list-style-type: none"> - Einbauten für Dichtheitsprüfungen, Risseüberbrückungen

Tab. 10: Grundkonzept für die Realisierung ausgewählter prüftechnischer Einrichtungen, Gruppen I bis V.

Gesamthaft sind optimale Austauschbarkeit (Kompatibilität) und möglichst einfache Bedienung durch gleichartige Elemente an verschiedenen Maschinen anzustreben.

Geber, Verstärker

Auch hier war weitgehender Universaleinsatz an verschiedenen Prüfeinrichtungen (Kompatibilität, Datenerfassung) anzustreben.

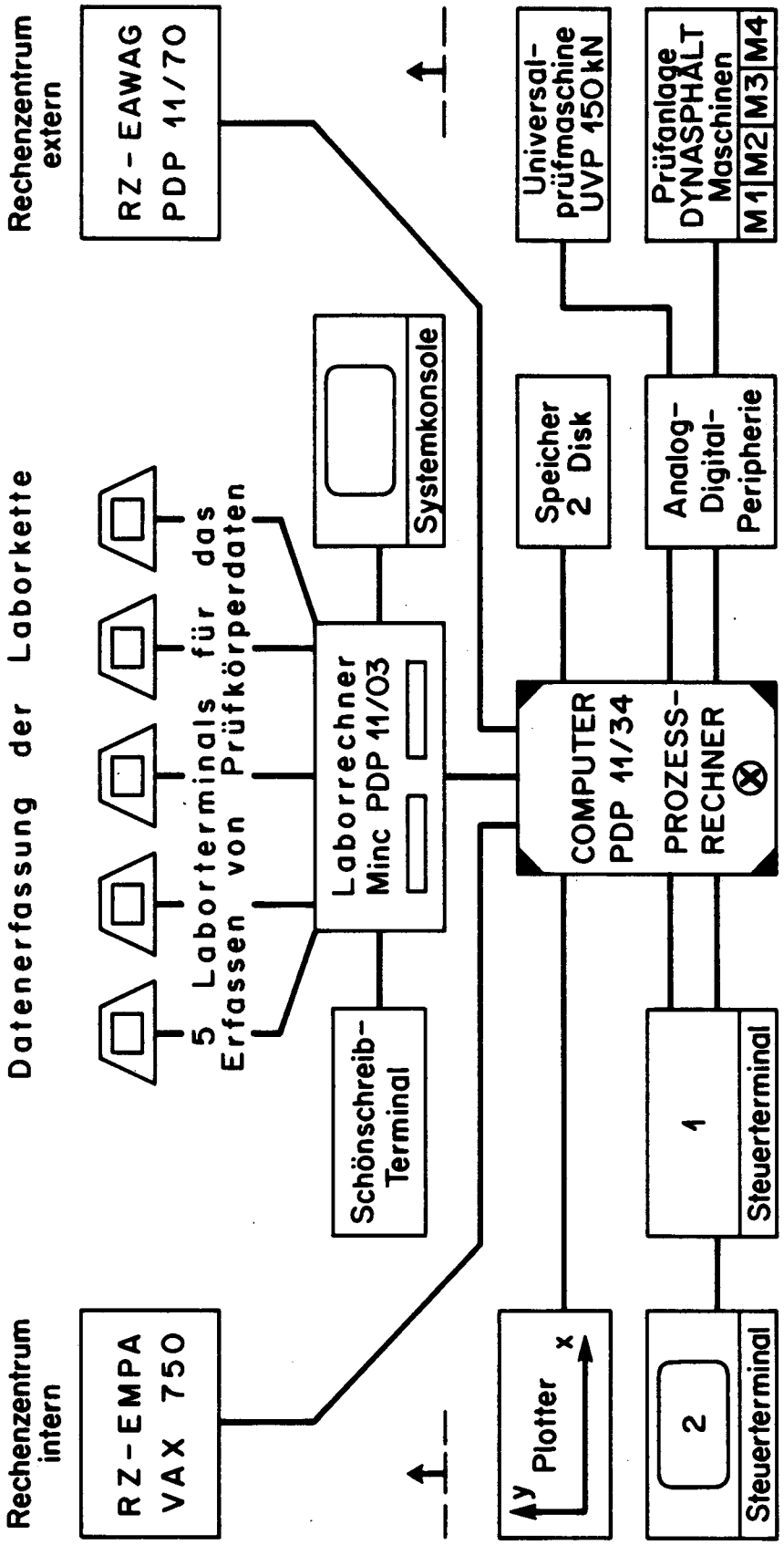
Datenerfassung, Auswertung

Anzustreben waren folgende Charakteristiken:

- Möglichkeit des On-Line-Betriebes am Computer, insbesondere Prozesssteuerung, Datenerfassung und Überwachung des Versuchszustandes. Zielsetzung ist dabei das Erfassen von Daten an genau auf den Versuchsablauf abgestimmten Zeitpunkten, da nur so maximale Informationen aus den Messwerten gewonnen werden können. Siehe Tabelle 13 und Abbildung 26. Zudem soll die andauernde Überwachung des Versuchszustandes sicherstellen, dass auch bei hohen Erfassungsgeschwindigkeiten fehlerfreie und dadurch auswertbare Daten anfallen.
- Möglichkeit zur Verknüpfung mit dem bestehenden Datenerfassungssystem für Laboruntersuchungen.
- Möglichkeit zur Verknüpfung mit anderen bestehenden Rechenzentren für weitergehende Auswertungen (Statistik).
- Das maschinelle Erfassen der Daten soll zudem die Versuchsdurchführung wesentlich erleichtern durch:
 - Führungshilfen für den Operator mittels ausgefeiltem Dialogsystem.
 - Prüfen der Eingaben zum Versuch auf Plausibilität.
 - Wiedergabe des aktuellen Versuchszustandes.
 - Automatisches Auswerten der Messergebnisse unmittelbar nach dem Versuch (Abrufen von Commandfiles für Berechnungen, Erstellen von Tabellen und graphischen Darstellungen).

In der nachstehenden Abbildung 6 ist die Verknüpfung des für den On-Line-Betrieb der Prüfmaschinen (Prozesssteuerung) eingesetzten Computers (x) mit den anderen Rechenzentren und der Laborkette schematisch dargestellt.

Vor allem können die auf dem Datenerfassungssystem der Laborkette gespeicherten Prüfkörperdaten (Abmessungen, Dichte, Rohdichte, Hohlraumgehalt usw.) der in den Festigkeitsprüfungen verwendeten Prüfkörper auf das Rechensystem der Prozesssteuerung der Prüfmaschinen transferiert und direkt verarbeitet werden. Siehe dazu auch die Abbildungen 25, 26 und 31.



⊗ PROZESSSTEUERUNG PRUEFMASCHINEN, ON-LINE-BETRIEB
 —↑— VERKNEUEPFUNG MIT LABORKETTE UND RECHENZENTREN —↑—

Abb. 6: Prozesssteuerung und Datenerfassung der Prüfanlage DYNASPHALT und der Universalprüfmaschine UVP 150 kN im On-Line-Betrieb am Computer (x). Verknüpfung des Computers mit Laborkette und anderen Rechenzentren.

6. REALISIERUNG VON PRÜFMASCHINEN, GRUPPEN I BIS IV

Eine Übersicht zu den realisierten prüftechnischen Einrichtungen gemäss Grundkonzept in Tabelle 10 gibt die Abbildung 6, siehe dazu auch [100].

Die eigentlichen Prüfmaschinen der Gruppen I bis IV sind in den Abschnitten 6.1 bis 6.4 beschrieben.

Die Einbauten 1 bis 12 zu den verschiedenen Prüfverfahren sind ausführlich in Kapitel 7 dargestellt, siehe dazu auch Tabelle 15.

In Abbildung 7 sind die Einbauten für die verschiedenen Prüfverfahren den Produktegruppen wie folgt zuzuordnen:

<u>Produktegruppe</u>	<u>Einbau Nr.</u>
Bindemittel, Mastices	1
Fugenfüllmaterialien	1 - 3
Abdichtungsmaterialien (Dichtungsbahnen, Beschichtungen)	4 + 5
Asphalt (Prüfkörper aus verdichtetem bituminösem Mischgut)	6 - 12

Die in Abbildung 7 und in Tabelle 15, Seite 75, enthaltenen Elemente stellen somit den Rahmen des Gesamtkonzeptes der realisierten prüftechnischen Einrichtungen für die Festigkeitsuntersuchungen an bituminösen Baustoffen dar.

Zu den Einbauten für die verschiedenen Prüfverfahren ist speziell darauf hinzuweisen, dass, mit Ausnahme der neuentwickelten Elemente für Mehrfachprüfungen (4 bis 6 Prüfkörper parallel), auf deren universelle Einsatzmöglichkeit auch in bestehenden Prüfmaschinen anderer Labors geachtet wurde. Dies im Sinne eines allgemeinen Beitrages zur Prüftechnik der Festigkeitsuntersuchungen an bituminösen Baustoffen und verbunden mit dem Hinweis darauf, dass dieses Gesamtkonzept der Prüfeinrichtungen zu einem wesentlichen Teil auf dem Gedankenaustausch und den Kontakten des Verfassers mit Fachleuten im Inland und in verschiedenen Ländern Europas basiert.

Die Realisierung der Prototypen der Einbauten für die verschiedenen Prüfverfahren erforderte einen relativ grossen Aufwand. Dieser Aufwand rechtfertigte sich durch die Notwendigkeit, neben den zahlreichen laufenden theoretischen Anstrengungen, auch den Bedarf an neuen Prüfgeräten, also den unerlässlichen Werkzeugen des Materialprüfers, zu decken.

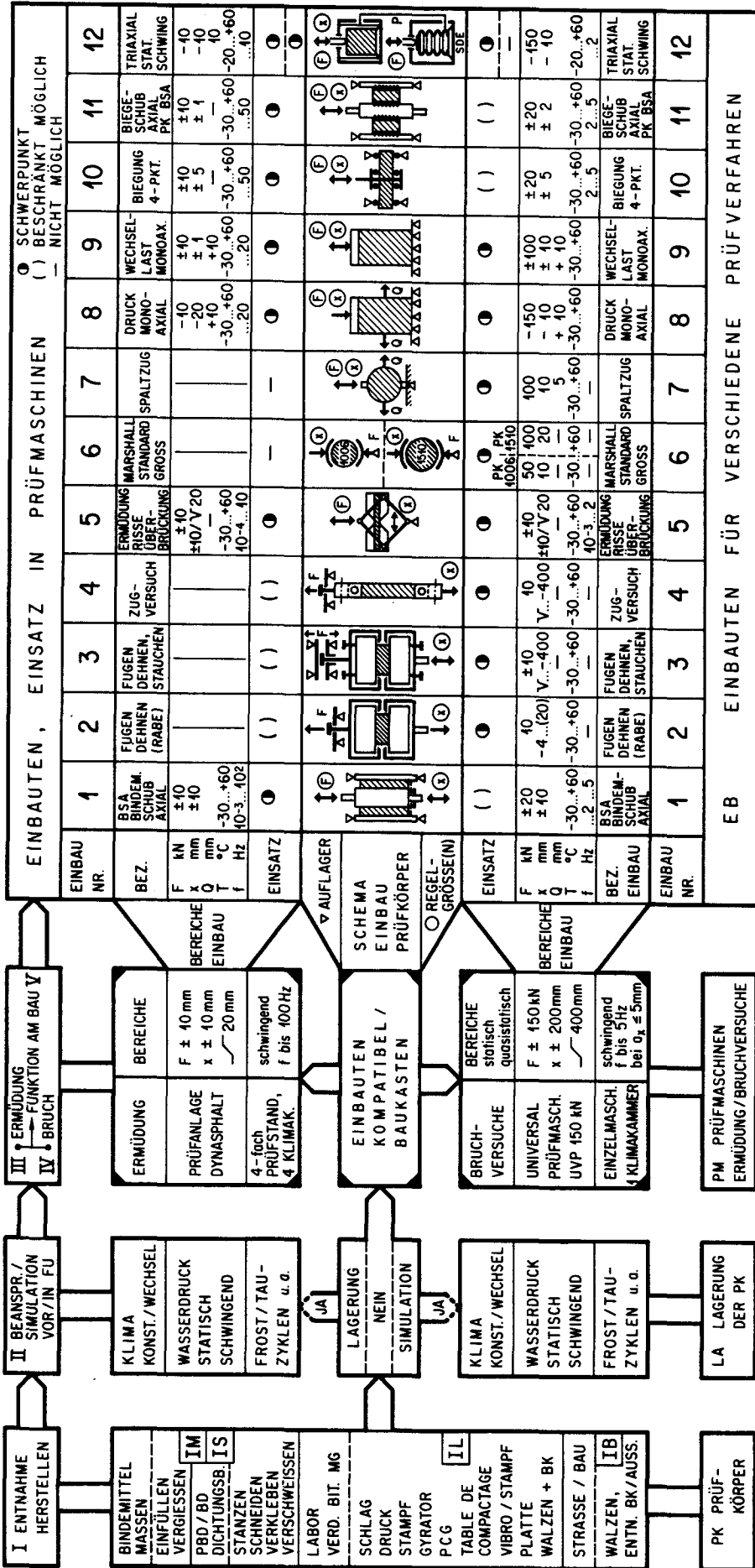


Abb. 7: Übersicht zu den im Gesamtkonzept realisierten prüftechnischen Einrichtungen gemäss den Kapiteln 6 und 7, Prüfmaschinen, Einbauten und Zusatzrichtungen.

6.1 Gruppe I: Herstellen von Prüfkörpern (Schwerpunkt Asphalt)
(Ergebnisse siehe Abschnitt 14)

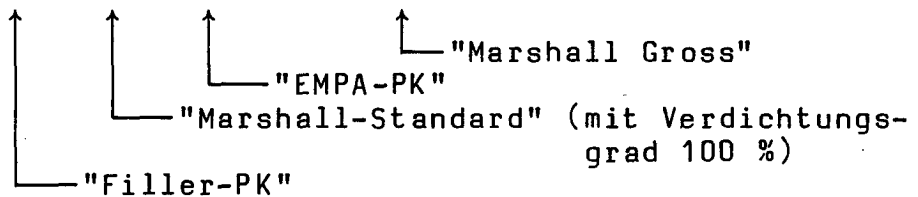
6.11 Schlag-Verdichtungsgeräte

a) Konzept

Angesichts des weitverbreiteten und auch in der Schweiz normierten Prüfverfahrens nach Marshall war in einem ersten Schritt zur verbesserten Herstellung (geeignete Abmessungen) von Prüfkörpern aus verdichtetem bituminösem Mischgut die Modifikation der Schlag-Verdichtungsgeräte angezeigt, unter Schaffung neuer Verdichtungsformen. Siehe dazu [112] und Abbildung A24 im Anhang.

Durch diese Modifikation wurde beispielsweise das Herstellen einer Prüfkörperreihe gemäss Abbildung 5 und gemäss nachstehender Tabelle 11 angestrebt.

PK	0510	1006	1012	1020	1510	1520	1530	2020	2030
Ø (mm)	50	100	100	100	150	150	150	200	200
h (mm)	100	63,5	120	200	100	200	300	200	300



Tab. 11: Prüfkörperreihe für modifizierte Schlagverdichtung SV nach Marshall (Untersuchung nur bis PK 1520).

b) Realisierung

Die vorgenannte Zielsetzung verlangte eine Erhöhung der Masse des Fallkörpers auf 9 kg gegenüber 4,5 kg nach Marshall-Standard [100 - 10'519]. Dies wurde durch eine Zusatzmasse verwirklicht, die Gesamtmasse als Z bezeichnet.

Gleichzeitig mussten die Schlagzahlen für die grösseren Prüfkörper (1510 und 1520) massiv erhöht werden. Weil dadurch der Verdichtungsprozess wesentlich länger dauert, wurde eine Heizplatte für das Vorwärmen der Verdichtungsstempel eingebaut. Für die wesentlich höhere Beanspruchung wurden stärkere Antriebsmotoren und Getriebe benötigt.

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen die neuen Schlag-Verdichtungsgeräte.

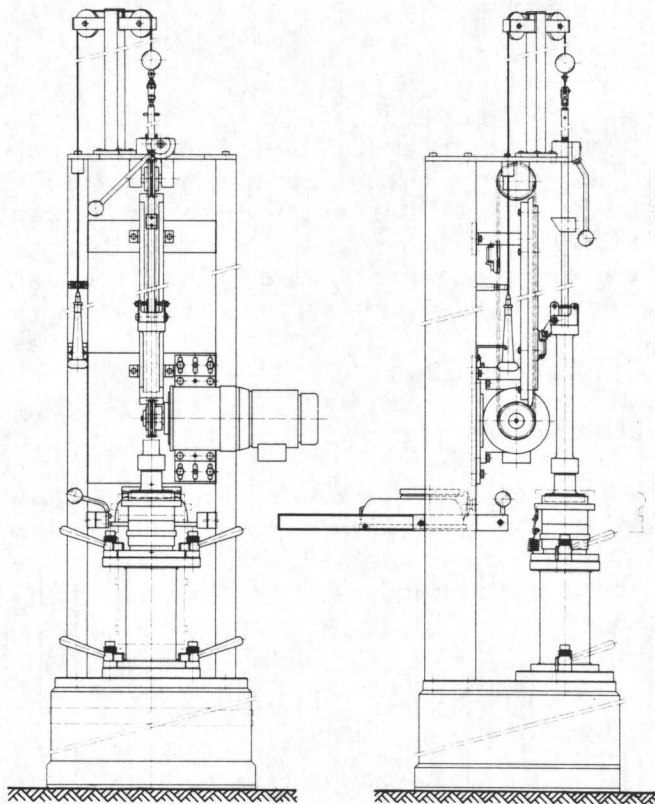


Abb. 8

Modifiziertes Marshall-Verdichtungsgerät. Oben erkennbar die Anhebevorrichtung für die Falleinheit. Dadurch wird das Herausnehmen der Falleinheit beim Drehen und Wechseln der Verdichtungsform überflüssig.

Sichtbar ist die verschiebbare Heizplatte für das Vorwärmen des Verdichtungsstempels der Falleinheit. Unten der auswechselbare Sockel (an Prüfkörperhöhe angepasst) zur Aufnahme der verschiedenen Verdichtungsformen.

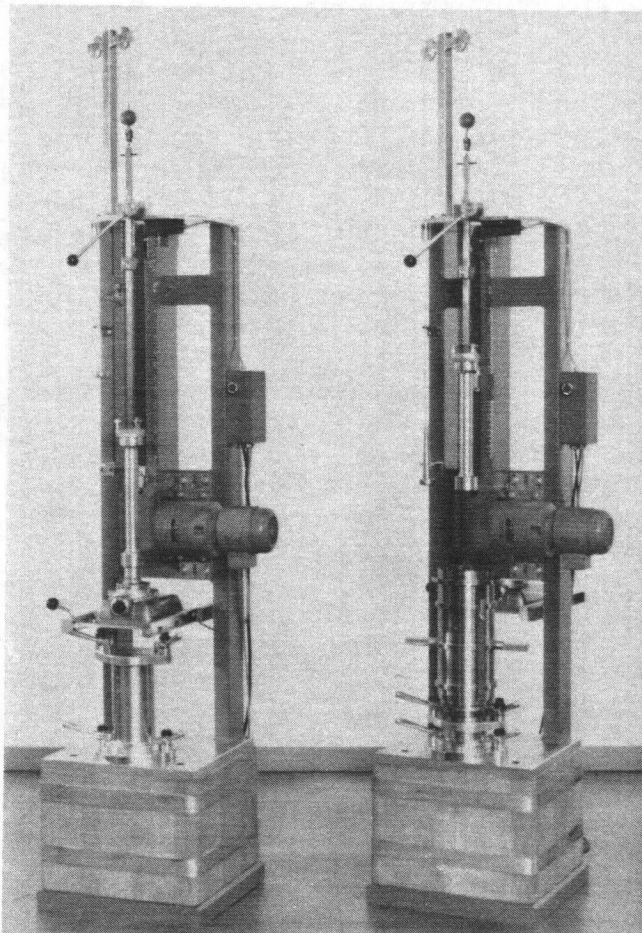


Abb. 9

Modifiziertes Marshall-Verdichtungsgerät.

Links: Sockel zur Aufnahme der Verdichtungsform für PK 1006 nach Marshall-Standard, Falleinheit auf Heizplatte abgesenkt.

Rechts: Verdichtungsform für PK 1520 eingesetzt, Falleinheit abgesenkt, Fallkörper (ohne Zusatzmasse Z) angehoben.

6.12 Ausstoss- und Verdichtungspresse

a) Konzept

Die in Abschnitt 6.11 aufgeführten Prüfkörper sind nach dem Verdichtungs Vorgang und nach dem Abkühlen aus den Verdichtungsformen auszustossen. Vor allem bei hohen Prüfkörpern treten relativ grosse Wandreibungen auf, die entsprechende Ausstosskräfte erfordern. Um dieser Bedingung und Arbeitserleichterungen bei der Herstellung zahlreicher Prüfkörper, vor allem nach Marshall-Standard (Prüfkörper 1006) und Marshall "Gross" (Prüfkörper 1510) gerecht zu werden, wurde eine Ausstoss- und Verdichtungs presse (mit Kraftbereich bis 300 kN und Wegbereich bis 400 mm = Kolbenhub) konzipiert.

Die vorgesehene Verwendung als Verdichtungs presse bezieht sich vor allem auf das Herstellen von Prüfkörpern aus Filler-Bitumen-Gemischen, da diese Prüfkörper unter Schlagverdichtung nach dem Umdrehen bei halber Schlagzahl je nach Fillerart wieder zu Auflockerungen neigen.

b) Realisierung

Die in den Abbildungen 10 und 11 dargestellte Ausstoss- und Verdichtungs presse gestattet somit das Ausstossen der in Abschnitt 6.11, "Modifizierte Marshall-Verdichtungsgeräte", aufgeführten Prüfkörper der Typen 0510 bis 2020 [100 - 10556].

Aus den Abbildungen 10 und 11 sind die verschiedenen Druckstempel (den verschiedenen Prüfkörperhöhen entsprechend), aus der Abbildung 10 zudem die im Untergestell eingebaute Auffang- bzw. Anhebevorrichtung für die aus den Verdichtungsformen auszustossenden Prüfkörper ersichtlich. Diese gestattet, die Prüfkörper (maximal ca. 20 kg Masse) nach dem Ausstossen wieder auf Arbeitshöhe anzuheben.

Für weitere Versuche zum Verdichten bituminöser Gemische mit abgestufter Korngrößenverteilung (Korngrößenverteilung nach dem Betonprinzip) wurde auch der Einsatz gewölbter Stempel gemäss Abbildung 12 vorgesehen. Doch auch mit dieser (der Vollständigkeit halber aufgeführten) Massnahme zur Überwindung der grossen Wandreibung bei hohen Prüfkörpern und zum Durchkneten der zu verdichtenden Masse konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Siehe dazu die Abschnitte 6.12c und 14.4.

Zusätzlich kann mit entsprechenden Einsätzen das Herausstanzen von Prüfkörpern aus Abdichtungsmaterialien erfolgen.

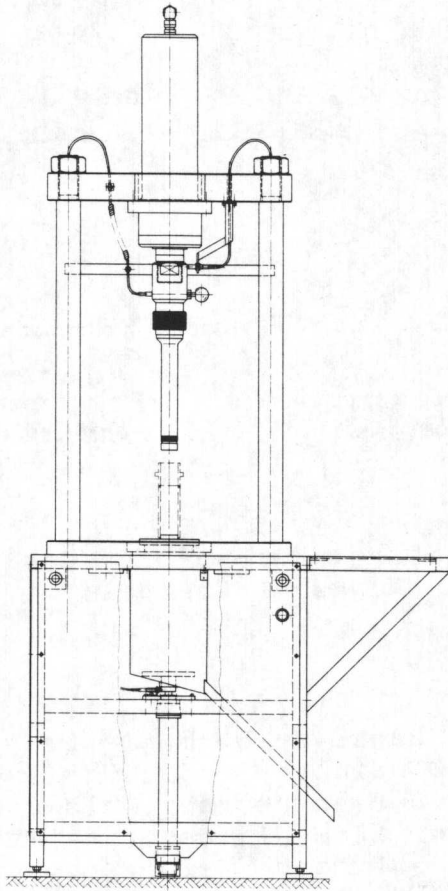


Abb. 10

AUVP 300 kN, Ausstoss- und Verdichtungspresse.

Eingezeichnet ist der Verdichtungsstempel mit 50 mm Durchmesser und die Verdichtungsform für Prüfkörper PK 0510 ($d = 50 \text{ mm}$, $h = 100 \text{ mm}$). Unten ist die pneumatische Anhebevorrichtung für die aus der Verdichtungsform ausgestossenen Prüfkörper sichtbar.

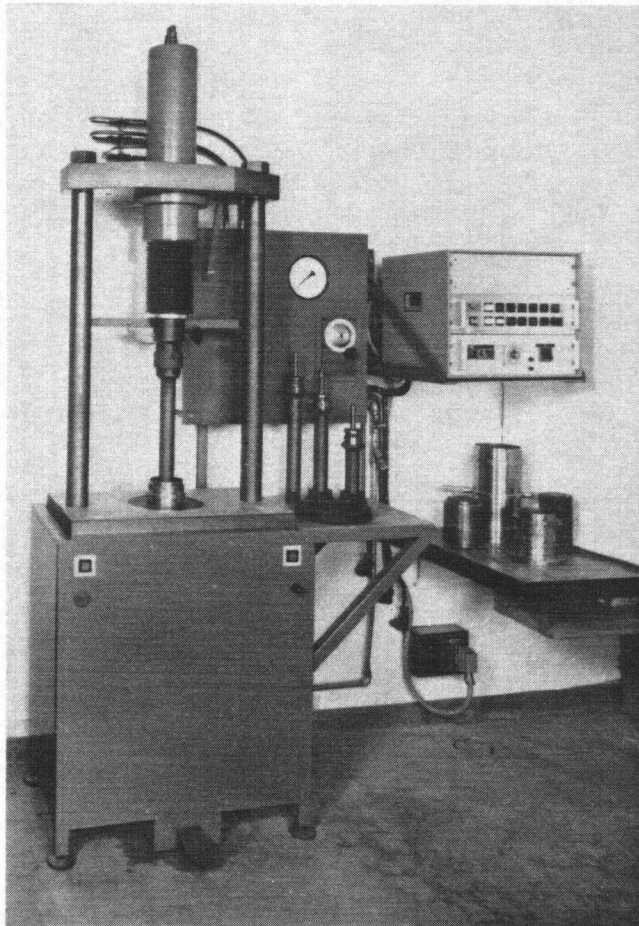


Abb. 11

AUVP 300 kN, Ausstoss- und Verdichtungspresse, Stempel für PK 1006, Marshall-Standard, abgesenkt, bereit für den Ausstossvorgang.

Oben rechts die Steuerung, darunter verschiedene Verdichtungsformen und Verdichtungsstempel.

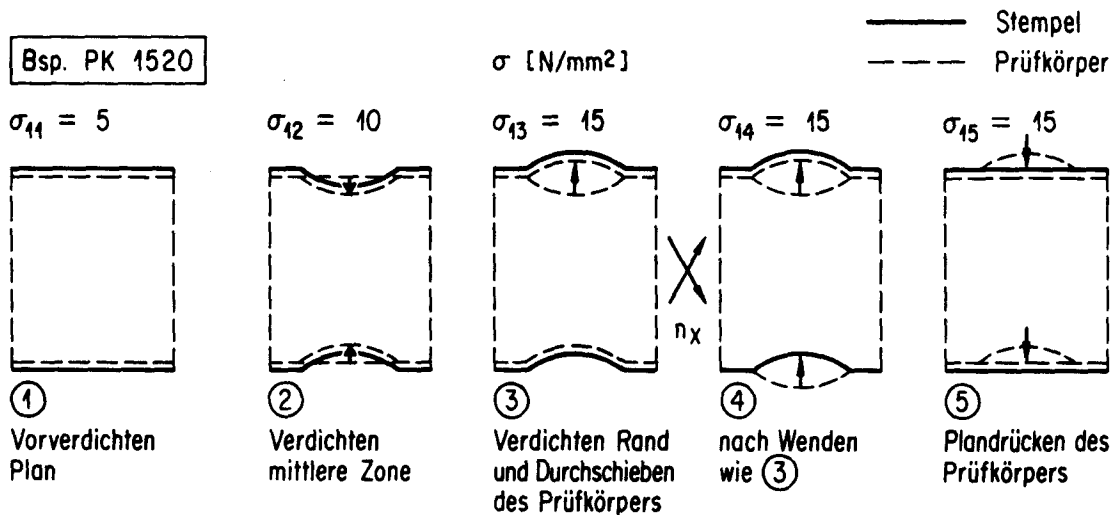


Abb. 12: Statische Druckverdichtung, Reihenfolge des Einsatzes konvexer und konkaver Stempel.

c) Ergebnisse

Durch das Anordnen konvexer und konkaver Stempel wurde das Erreichen gleichmässigerer Rohdichte- resp. Hohlraumgehalt-Verteilung im Prüfkörper angestrebt, als dies bei der Verwendung planparalleler Stempel festzustellen ist. Zudem wurde auch versucht, auf diese Weise die bei statischer Druckverdichtung erforderlichen hohen Druckspannungen und die dadurch auftretenden grösseren Kornzertrümmerungen im Splittbereich zu verringern.

Aber auch mit dem Einsatz der gewölbten Stempel nach Abbildung 12 musste beispielsweise für den Prüfkörper PK 1520 (Durchmesser 150 mm, Höhe 200 mm) eine Axialspannung von $\sigma_{14} = \sigma_{\max} = 15 \text{ N/mm}^2$ für das Erreichen eines Verdichtungsgrades von 100 %, gemäss Schlagverdichtung nach Marshall-Standard, aufgebracht werden.

Gesamthaft gesehen, konnten aus Vorversuchen keine befriedigenden Ergebnisse erzielt werden.

In Abschnitt 14.4 erfolgt ein weiterer Hinweis auf die Verdichtung unter statischem Druck.

In [89] werden die auftretenden starken Kornzertrümmerungen bei statischer Druckverdichtung unter Verwendung konvexer und konkaver Stempel aufgeführt, mit Angabe eines Zertrümmerungsgrades Z_{bit} , bezeichnet als "bituminöser Z-Wert".

Angesichts der erwähnten unbefriedigenden Resultate, wird die statische Druckverdichtung vor allem für das Verdichten von Filler-Bindemittelgemischen, Mastices und Gussasphalten eingesetzt.

6.13 Vibrationsverdichter

a) Konzept

Für die vergleichenden Untersuchungen zur Prüfkörperherstellung gemäss Abschnitt 14.3. und [89] konnte auch ein Vibrations-Verdichtungsgerät entsprechend Abbildung 14 nach [91] eingesetzt werden.

Das an der EMPA in Entwicklung stehende Vibrations-Verdichtungsgerät wird in Anlehnung an eine in Frankreich am LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) auch für das Verdichten von Erdbaumaterial eingesetzte Verdichtungsmaschine konzipiert.

Weitere Entwicklungen zur Vibrationsverdichtung wurden aus der Feststellung heraus angegangen, dass Prüfkörper, die unter Vibrationsverdichtung hergestellt wurden, in ihren mechanischen Kennwerten vergleichsweise näher bei Belagsprüfkörpern liegen als durch Schlagverdichtung hergestellte Prüfkörper.

b) Realisierung

- **Horizontal-Vibrationsverdichter nach Abbildung 13**

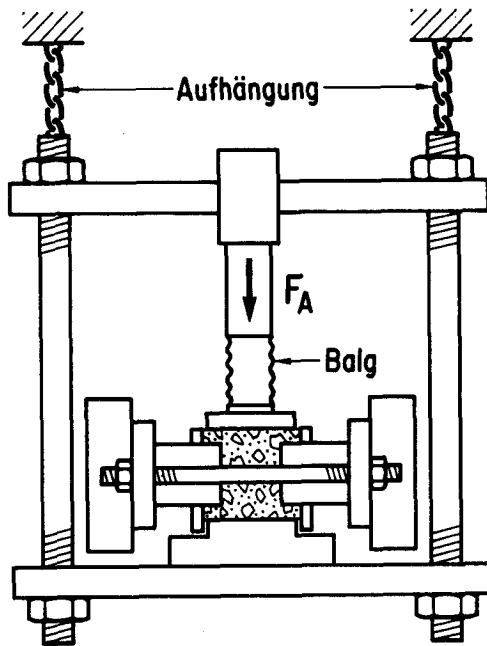
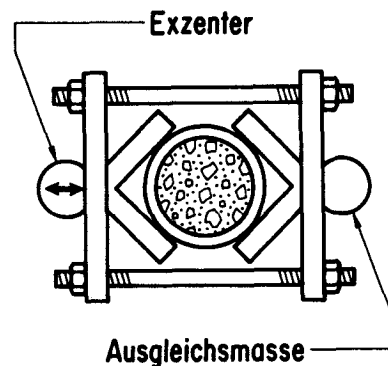


Abb. 13

Schema des Horizontal-Vibrationsverdichters.



Bei diesem Verdichtungsgerät wird die Vibrationsbewegung auf die Verdichtungsform übertragen. Vertikal kann pneumatisch eine beliebige Axialspannung (Bereich der Axialkraft F_A bis 20 kN) erzeugt werden.

• **Vertikal-Vibrationsverdichter nach Abbildung 14**

Die in Teil IV beschriebenen Vergleichsuntersuchungen zur Verdichtung konnten mit einem vertikalwirkenden Vibrations-Verdichtungsgerät einer Strassenbau-Unternehmung durchgeführt werden. Das der EMPA für diese Untersuchung in verdankenswerter Weise zur Verfügung gestellte Gerät ist schematisch in Abbildung 14 dargestellt.

Hier wirkt die schwingende Masse über den Belastungsstempel auf das zu verdichtende Mischgut. Die Verdichtungsform V_F wird freilagernd eingesetzt.

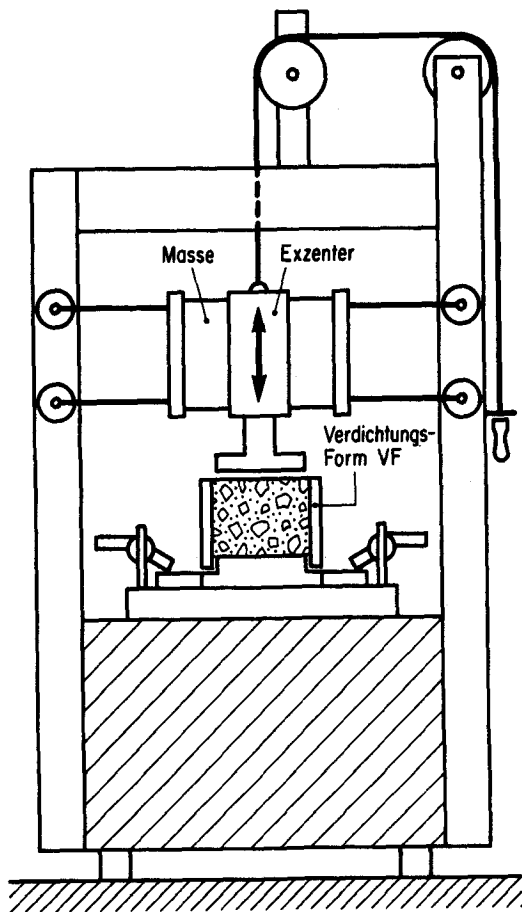


Abb. 14

Über vertikalen Druckstempel wirkendes Vibrations-Verdichtungsgerät, Basis der Verdichtungsform fest.

Verdichtungsform V_F frei gelagert mit grober Zentrierung durch die Basis (fixierte Bodenplatte).

c) Ergebnisse

Die Ergebnisse der Vibrations-Verdichtung sind in Abschnitt 14.3 aufgeführt.

Weitere Untersuchungen zur Vibrationsverdichtung werden am LAVOC, Laboratoire des voies de circulation der EPFL, mit einem Vibrator des LCPC durchgeführt, siehe [90].

6.14 Labor-Walzverdichtung (Handwalze)

Für diese Verdichtungsart wurde das Verdichtungsprinzip des Labors des Dienstes Weg-en Waterbouwkunde des Rijkswaterstaates der Niederlande (DWW/NL) in Delft übernommen [93]. Die Unterlagen zur Labor-Walzverdichtung wurden der EMPA in verdankenswerter Weise zur Verfügung gestellt. Die nachgebaute Walze ist an dieser Stelle mit Erlaubnis des DWW/NL beschrieben.

a) Konzept

Das Einwalzen mit einer Handwalze erfolgt in einem Rahmen aus Holzplatten oder in einem Stahlrahmen mit Einsatzschienen. Nach Bedarf können so verschiedene Rahmenhöhen erreicht werden.

Durch mehrmaliges Vorwalzen mit der Handwalze (total 56 kg Masse) wird das zu verdichtende Mischgut vorverdichtet (Durchmesser der Walze $d = 195$ mm, Breite $b = 208$ mm).

Das eigentliche Verdichten erfolgt mit Zusatzmassen von 2×26 kg bzw. 2×38 kg, wobei auch für bituminöse Gemische (Asphalt) mit einer Korngrößenverteilung nach dem Betonprinzip ein Verdichtungsgrad von mindestens 98 % nach Marshall-Standard erreicht werden kann.

b) Realisierung

Siehe Schema gemäss Abbildung 15.

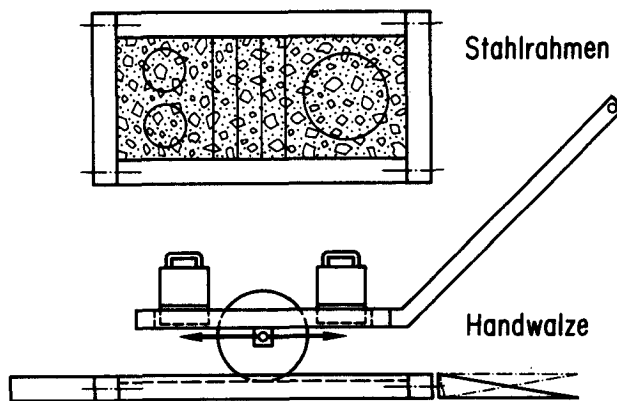


Abb. 15: Labor-Handwalze mit Stahlrahmen (Holzplatten als Einlage unten).

c) Ergebnisse

Die Ergebnisse der Walz-Verdichtung sind in Abschnitt 14.5 aufgeführt.

6.2 Gruppe II: Einrichtungen für Lagerungsarten der Prüfkörper

6.21 Servohydraulisches Wasserdruckaggregat

a) Konzept

Das nachstehend beschriebene, aufwendige Wasserdruckaggregat wurde mit EMPA-eigenen Mitteln in erster Linie für die im Forschungsauftrag FA 4/73 des Eidg. Departementes des Innern [19] durchzuführenden Versuche gebaut. Durch seine universelle Einsatzmöglichkeit soll es aber auch für weitere Untersuchungen an bituminösen und anderen Baustoffen eingesetzt werden.

Die über das Wasserdruckaggregat erzeugte Belastung der Prüfkörper durch statischen oder schwingenden (dynamischen) Wasserdruck, einschliesslich Wechselbelastung im Druck- und Unterdruckbereich (p_{rel}), zielt insbesondere auf die Simulation der durch Verkehr und Klima auftretenden Beanspruchungen des Baustoffes Asphalt. Zusätzlich ist im Anschluss an solche Lagerungsarten auch die Möglichkeit einer Prüfung der Durchlässigkeit oder des Haftverhaltens, beispielsweise von Polymer-Bitumen-Dichtungsbahnen (PBD) auf Beton, unter Variation der Vorbehandlung des Betons und der Art der Applikation gegeben.

b) Realisierung

Die ursprüngliche Absicht, ein mechanisches Element (z.B. Kurbelantrieb in Verbindung mit einem Kolben) als Betriebsaggregat einzusetzen, wurde angesichts der verschiedenen Randbedingungen (Betrieb unter Wechselbelastung im Druck- und Unterdruckbereich; Möglichkeit des Aufbringens eines statischen Drucks) aufgegeben.

In der Folge wurde daher der Eigenbau eines servohydraulischen Wasserdruckaggregates an der EMPA beschlossen, da die Möglichkeit eines Anschlusses an die Druckölversorgung der Prüfanlage "DYNASPHALT" und der Universalprüfmaschine "UVP 150 kN" (siehe Abschnitte 6.3 und 6.4) gegeben war.

Zudem sollte das Wasserdruckaggregat auch für das Erzeugen der Radialspannung σ_{23} in statischen Triaxialversuchen auf den vorgenannten Prüfmaschinen dienen.

Das Schema zur ganzen Anlage ist in Abbildung 16 dargestellt.

Die Funktion und der Bau des servohydraulischen Betriebsaggregates ist in den folgenden Abschnitten sowie in [100 - 10'587] beschrieben.

- **Übersicht, Aufbau der Prüfanlage**

Die in der Übersicht (siehe Abbildung 16) dargestellte Anordnung beschreibt Bereiche und Betrieb des Wasserdruckaggregates in Verbindung mit speziellen Druckgefässen nach [100 - 10'428].

Das servohydraulische Wasserdruckaggregat enthält einen Druckwandler, dessen Hochdruckseite servohydraulisch angetrieben ist. Die Niederdruckseite ist als Öl-/Wasser-Medienwandler konzipiert und liefert den Wasserdruck für die Prüfung.

Das Betriebsaggregat und die Druckgefässe wurden in einer Einheit (vgl. Abbildung 17) zusammengebaut, was eine wesentliche Erleichterung für die Versuchsdurchführung und zusätzlich grosse Platzersparnis darstellt.

- **Betrieb**

Um bei dem gewählten Druck-Untersetzungsverhältnis von 10:1 und einem Systemdruck von 25 MPa (250 bar) den für den Betrieb der Druckgefässe zulässigen Maximaldruck von 1 MPa (10 bar) nicht zu überschreiten, wurde an der Zapfstelle des Betriebsaggregates eine Druckbegrenzung auf 10 MPa (100 bar) eingebaut.

Da der pulsierende Wasserdruck über einen Membranspeicher als Medienwandler erzeugt wird, mussten elektronische Positionsendschalter für den Kolben des Druckwandlers montiert werden, da sonst ein Anliegen der Membrane zu deren Zerstörung führen könnte. Die Ausgangsstellung der Membrane muss somit durch ein Zurückdrücken von Wasserseite her und anschliessendes Ablassen eines gewissen Wasservolumens erzeugt werden. Zusätzlich wurde daher ein Überdruck - Ölkreislauf von 1,5 MPa (15 bar) - zugeschaltet, der den Kolben bei Erreichen der unteren Endstellung durch Nachladen zurück, in die obere Endlage (Startposition), drückt.

Die Funktionen des Zylinders und des ganzen Wasserdruckaggregates konnten überprüft und die gestellten Anforderungen bestätigt werden.

Der Betrieb im Druckbereich mit $p_{rel} = 0$ bis 1 MPa (10 bar) ist absolut problemlos. Regelprobleme der Servohydraulik treten dagegen aus physikalischen Gründen beim Betrieb unter Wechselbelastung im Bereich von $p_{rel} = -0,05$ MPa (-0,5 bar) bis 1 MPa (10 bar), entsprechend einem $p_{abs} = 0,05$ MPa (0,5 bar) bis 1,1 MPa (11 bar) auf, infolge Wechsel von Druck (hartes System) auf Unterdruck (weiches System).

WASSERDRUCKAGGREGAT

Schema des servohydraulischen Betriebsaggregates

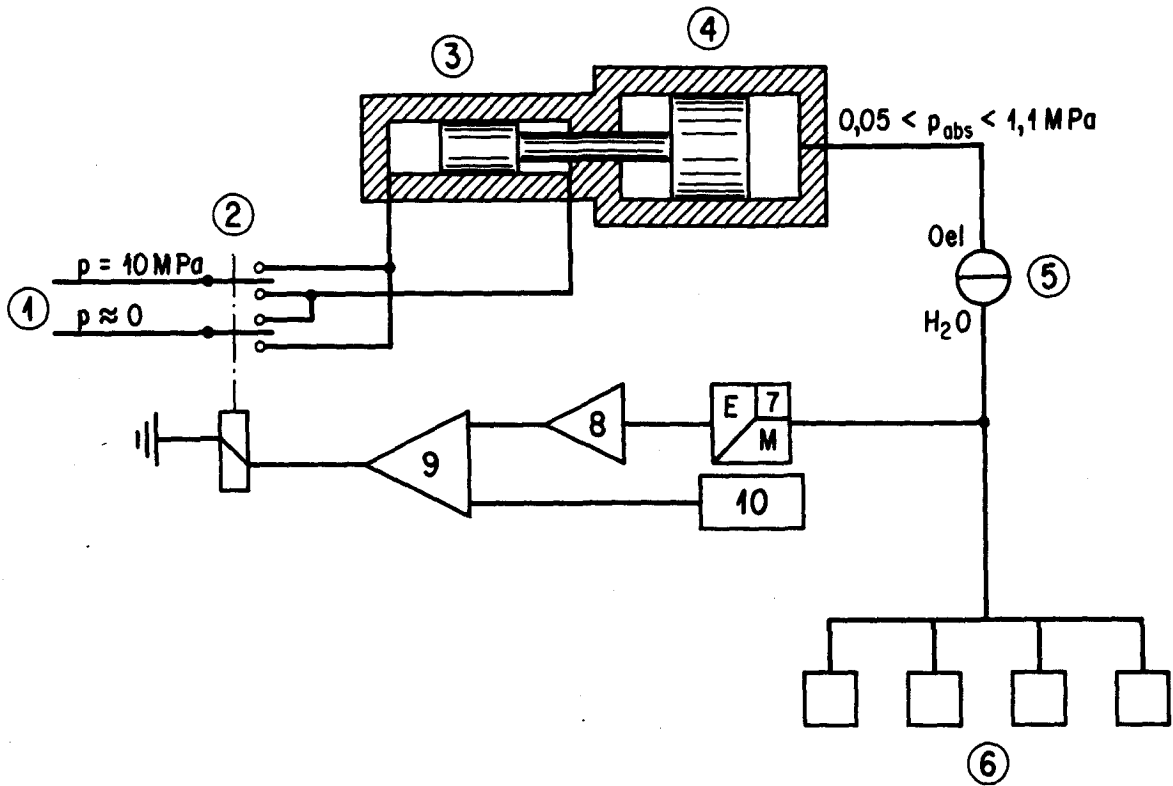


Abb. 16: Schema des Wasserdruckaggregates für die Wasserlagerung von Prüfkörpern unter statischem und pulsierendem Druck bzw. Vakuum. Maximale Frequenz $f_{\max} = 2$ Hz; maximale Lastwechselzahl pro Versuch $n_{\max} = 2 \cdot 10^6$.

- 1 = Zapfstelle der Druckölversorgung
- 2 = Servoventil
- 3 = Druckwandler, Hochdruckseite
- 4 = Druckwandler, Niederdruckseite
- 5 = Medienwandler
- 6 = vier Druckgefäße
- 7 = Druckwandler
- 8 = Messverstärker
- 9 = Servoverstärker
- 10 = Funktionsgenerator als Sollwertgeber

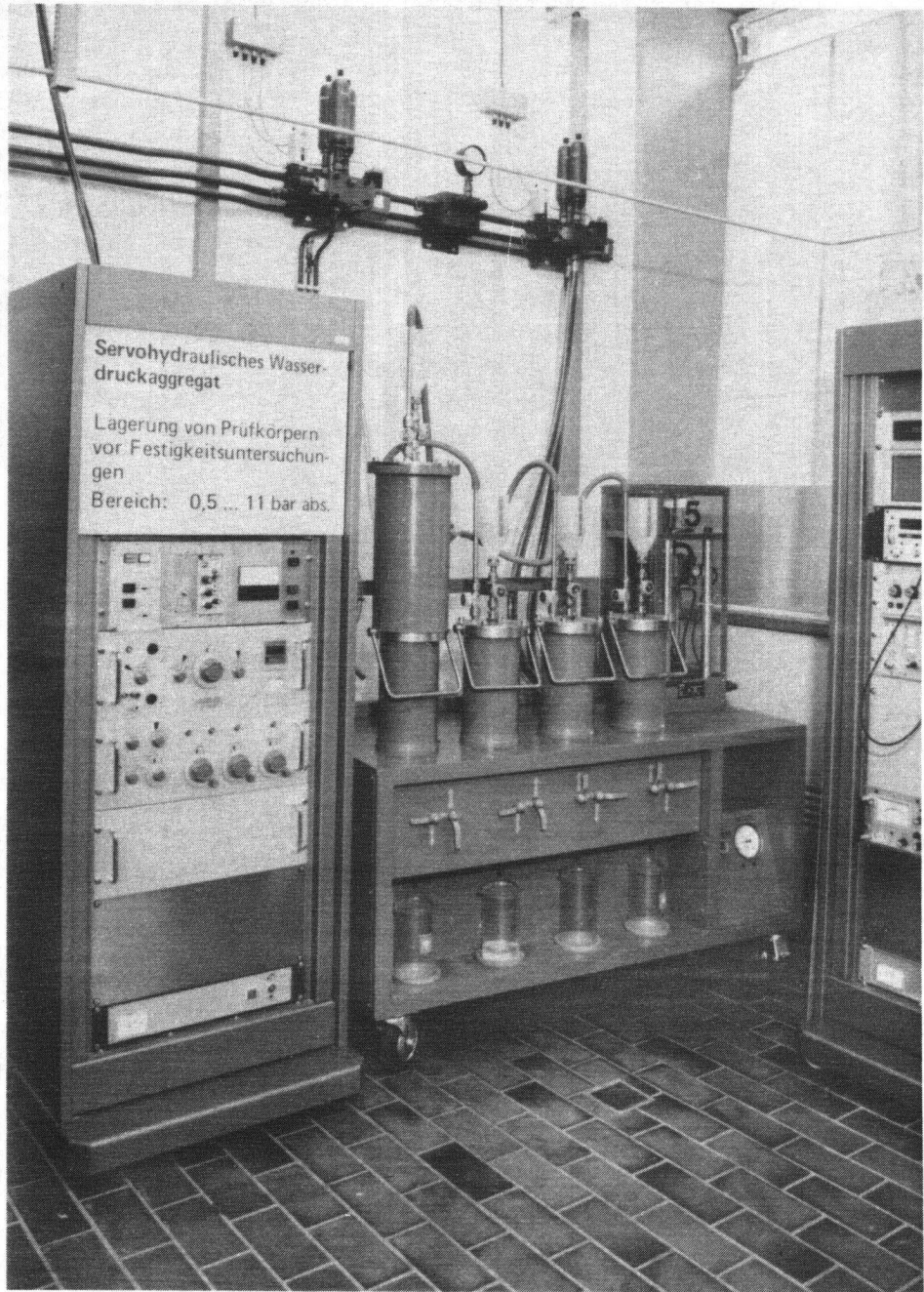


Abb. 17: Servohydraulisches Wasserdruckaggregat, Gesamtansicht der Prüfanlage.

Oben: Zapfstelle mit Druckreduzierung (Sicherheit)

Links: Elektronischer Teil

Rechts: Hydraulischer Teil mit Druckwandler (hinten) und Druckgefäßen (vorne)

Bei Vorgabe einer Sinusfunktion am Funktionsgenerator ist festzustellen, dass eine asymmetrische Belastungsfunktion im Drucksystem auftritt. Diese Asymmetrie hat ihre Ursache in der Druckabhängigkeit der Systemelastizität. Sie tritt vor allem bei Versuchen im Teilvakuum in Erscheinung, d.h. bei kleinen Drücken.

Die resultierende asymmetrische Belastung des Prüfkörpers kann beim Betrieb durch entsprechendes Einstellen des Regelkreises etwas verbessert werden, wobei aber festzustellen ist, dass die bis jetzt erreichte maximale Frequenz von 2 Hz für den Betrieb unter Wechselbelastung nicht erhöht werden kann. Die Frequenz bleibt bei dieser Betriebsart beschränkt, da sehr schnell ein Abreißen der Membrane von der Wassersäule oder des Niederdruckkolbens von der Ölsäule auftritt. Entsprechend dieser tiefen Frequenz dauern Versuche mit grosser Lastwechselzahl entsprechend lange (fast 12 Tage für $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel).

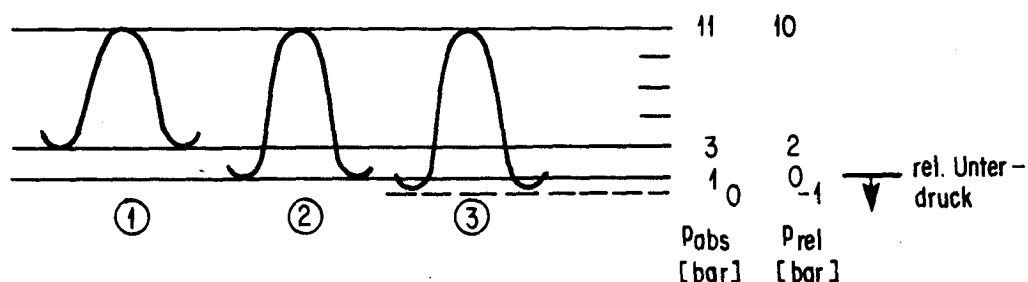


Abb. 18: Belastungsfälle 1 bis 3, siehe auch Abbildungen 19 bis 21.

Die in den Abbildungen 19 bis 21 festgehaltenen Kurven für schwingenden Wasserdruck wurden in Testversuchen vor und nach den eigentlichen Druckgefässen gleichzeitig mit zwei Druckgebern erfasst. Beide Druckmessungen ergaben gleiche Ergebnisse, was bedeutet, dass der geregelte Druck (Druckgeber vor dem Prüfkörper) tatsächlich am Prüfkörper wirksam wird.

c) Ergebnisse

Ergebnisse umfangreicher Untersuchungen mit dieser Prüfeinrichtung sind in [19] beschrieben.

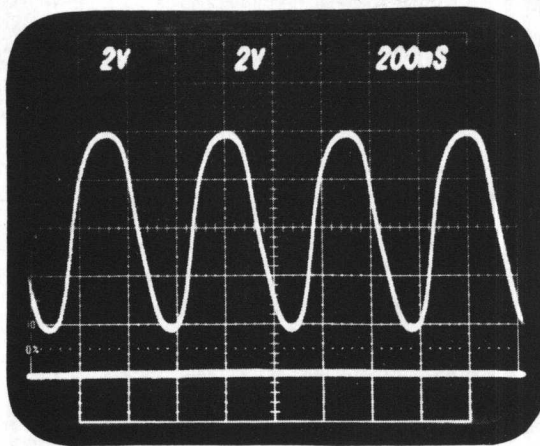


Abb. 19

Belastungsfall 1

Druck-Schwelllast, Frequenz $f = 2 \text{ Hz}$.

$$p_0 = 1,0 \text{ MPa}$$

$$p_{0\text{abs}} = 1,1 \text{ MPa}$$

$$p_u = 0,2 \text{ MPa}$$

$$p_{u\text{abs}} = 0,3 \text{ MPa}$$

Belastungsfunktion annähernd symmetrisch.

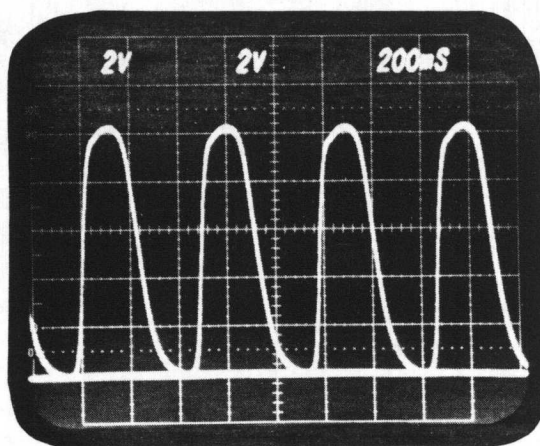


Abb. 20

Belastungsfall 2

Druck-Ursprungslast, Frequenz $f = 2 \text{ Hz}$.

$$p_0 = 1,0 \text{ MPa}$$

$$p_{0\text{abs}} = 1,1 \text{ MPa}$$

$$p_u = 0$$

$$p_{u\text{abs}} = 0,1 \text{ MPa}$$

Belastungsfunktion wird leicht asymmetrisch.

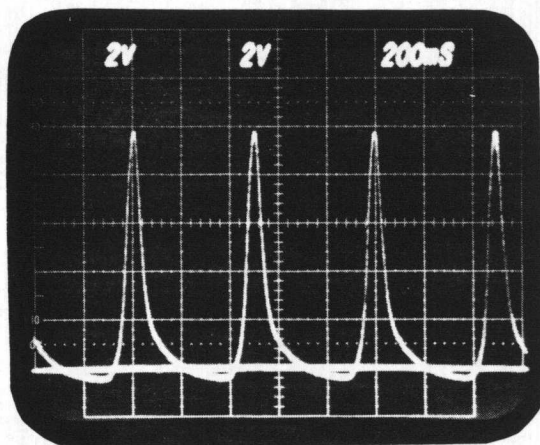


Abb. 21

Belastungsfall 3

Druck-Wechselast, Frequenz $f = 2 \text{ Hz}$.

$$p_0 = 1,0 \text{ MPa}$$

$$p_{0\text{abs}} = 1,1 \text{ MPa}$$

$$p_{u\text{rel}} \approx -0,05 \text{ MPa}$$

$$p_{u\text{abs}} \approx +0,05 \text{ MPa}$$

Belastungsfunktion ausgeprägt asymmetrisch.

6.22 Klimaanlagen (Klimakammern)

Die technischen Daten der Klimakammern der eigentlichen Prüfmaschinen sind in Tabelle 12 zusammengefasst (da die Klimakammern werden ebenfalls der Gruppe II der Prüfeinrichtungen zugeordnet).

Abmessungen:	Für UVP 150 kN: 650 mm x 1'015 mm x 810 mm ≈ 500 l Für DYNASPHALT: 650 mm x 550 mm x 770 mm ≈ 275 l
Maximaltemperatur:	+95°C
Minimaltemperatur:	-30°C
Temperaturtoleranz:	-/+1°C
Feuchtetoleranz:	-/+5 % relative Feuchte
Rel. Feuchtigkeit RF in Fuktion des Bereichs der Temperatur T:	+10 < T < 20°C 50 < RF < 95 % +20 < T < 30°C 35 < RF < 95 % +30 < T < 60°C 20 < RF < 95 % +70°C < T RF < 90 % +80°C < T RF < 60 %
Leistungsbedarf:	ca. 1'300 W bei Schranktemperatur von -20°C
Heizleistung:	4,8 kW
Kältemaschine:	wassergekühlt
Wasserverbrauch:	ca. 150 l/h
Kälteleistung bei VT - 25°C:	1'800 kcal/h
Temperaturbereich der Wasserausnützung:	+15 < T < 30°C
Temperaturüberwachung:	Widerstandsfühler 2 x Pt 100
Feuchteüberwachung:	Widerstandsfühler 2 x Pt 100
Betriebsarten:	Über Handschalter oder extern ansteuerbar; Festklima I, Festklima II oder Wechselklima I, II über Schaltuhr.

Tab. 12: Technische Daten der Klimanlagen (Klimakammern) der Prüfmaschinen DYNASPHALT und UVP 150 kN.

6.3 Gruppe III: Schwerpunkt Ermüdung (Mehrfachprüfstand), Prüfanlage "DYNASPHALT"

a) Konzept

Bei der Erarbeitung des Konzeptes für eine Prüfanlage mit Schwerpunkt Ermüdungsprüfung an Prüfkörpern aus verdichtetem bituminösem Mischgut, an Asphalt - daher die Bezeichnung Prüfanlage "DYNASPHALT" - waren als Ausgangspunkte folgende Anforderungen [100 - 10'504, 100 - 10'813] zu berücksichtigen:

• **Laborprüfung**

Laborprüfung bedeutet **Untersuchung an Prüfkörpern**, die im Labor hergestellt oder aus Bauwerken (z.B. als Bohrkern in der Dimension von Prüfkörpern) entnommen werden. Da die Dimensionen der Prüfkörper zwangsläufig beschränkt bleiben und für die Ermüdungsprüfung wesentlich geringere Kräfte als im statischen Bruchversuch für das Erreichen eines praxisnahen Spannungszustandes erforderlich sind, war auch der **Kraftbereich** (10 kN Druck und Zug) der Prüfanlage relativ tief anzusetzen.

Dieser Bereich gestattet somit statische Bruchversuche nur an Prüfkörpern kleiner Abmessungen. Für die Bruchversuche an den auch für die Ermüdungsprüfung vorgesehenen Prüfkörpern grösserer Abmessungen wurde daher eine spezielle Prüfmaschine gemäss Abschnitt 6.4 entwickelt.

• **Leistungsfähigkeit**

Die Leistungsfähigkeit hat folgende Aspekte:

- **Hohes Arbeitstempo:** Diese Bedingung muss für umfangreiche Untersuchungen mit Schwerpunkt Ermüdung und vielen variablen Material- und Versuchsparametern vorrangig sein und erfordert einen **Mehrfachprüfstand**, da die zulässige Frequenz des Einzelgerätes beschränkt ist. Dabei ist angesichts der unvermeidlichen Streuung für jede Parameterkonfiguration eine Mehrzahl von Versuchen erforderlich.
- **Eignung für eine Vielzahl von Prüfverfahren:** Diese Zielsetzung, welche den erheblichen Aufwand bei der Realisierung der Prüfanlage DYNASPHALT rechtfertigt, führte auf das gewählte **Baukastensystem** mit Prüfvorrichtungen für verschiedene Prüfverfahren, bezeichnet als **"Einbauten"**.

- **Eignung für verschiedene Betriebsarten:** Für eine Mehrfachprüfanlage wird im Normalfall meist ein Parallelbetrieb aller Prüfmaschinen mit gemeinsamem Programm erfolgen. Je nach Versuchsart und Prüfverfahren sind aber auch Einzelproben zu untersuchen, was die Möglichkeit **des unabhängigen, allenfalls von Hand gesteuerten Betriebes** der einzelnen Prüfmaschinen und **des Betriebes in beliebig zusammengestellten Gruppen** einschliessen sollte. Aufgrund dieser Variation der Betriebsarten ergab sich zwangsläufig ein Aufteilen für die Klimatisierung mit je einer Klimakammer pro Maschine.
- **Leistungsfähige und programmierbare Klimatisierung:** Die speziell für die Ermüdungsprüfung von Baustoffen angezeigte Klimatisierung musste auch extern programmierbar (über Schaltuhren) ausgelegt werden, um einen automatischen Betrieb zu gewährleisten. Die Verwendung einer eigenen Klimakammer für jede Maschine war für die Steuerung und die Konstanthaltung eines bestimmten Klimas von Vorteil. Nach kurzen Eingriffen von aussen wird infolge des geringen Nettovolumens von ca. 280 Litern eine rasche Wiederherstellung des vorgeschriebenen Klimas im Prüfraum möglich.

b) Realisierung

• **Konzept**

Unter Berücksichtigung der vorstehend aufgeführten Kriterien wurde die Prüfanlage DYNASPHALT als 4-fach-Prüfstand konzipiert.

Ansichten der Prüfanlage geben die Abbildungen 22 und 23. Abbildung 22 zeigt die vier Maschinen mit eingebauten Druckrahmen für monoaxiale Druckversuche (statischer Druck, Kriechversuche und Druckschwellbelastung). Abbildung 23 gibt eine Ansicht der Steuerelektronik mit den im mittleren Kasten der Gruppe rechts angeordneten zentralen Elementen, wie dem Hauptfunktionsgenerator und dem unter dem Kathodenstrahloszilloskop angeordneten Überwachungsteil (siehe das Schema in Abbildung 25). In den benachbarten Schränken ist die Elektronik für je zwei Regelkreise eingebaut, mit Anzeigegeräten für Kraft und Weg als Einrichtehilfen.

Daran anschliessend ist das Steuerterminal für den Computer (On-line-Betrieb), Drucker, Plotter und Rechner untergebracht.

Für den Betrieb als einzelne Maschinen oder den Betrieb in Gruppen wurden weitere Funktionsgeneratoren eingebaut. Dies ermöglicht beispielsweise das Durchführen von kurzzeitigen Einzelversuchen am Tage und den Dauer-Gruppenbetrieb in der Nacht.

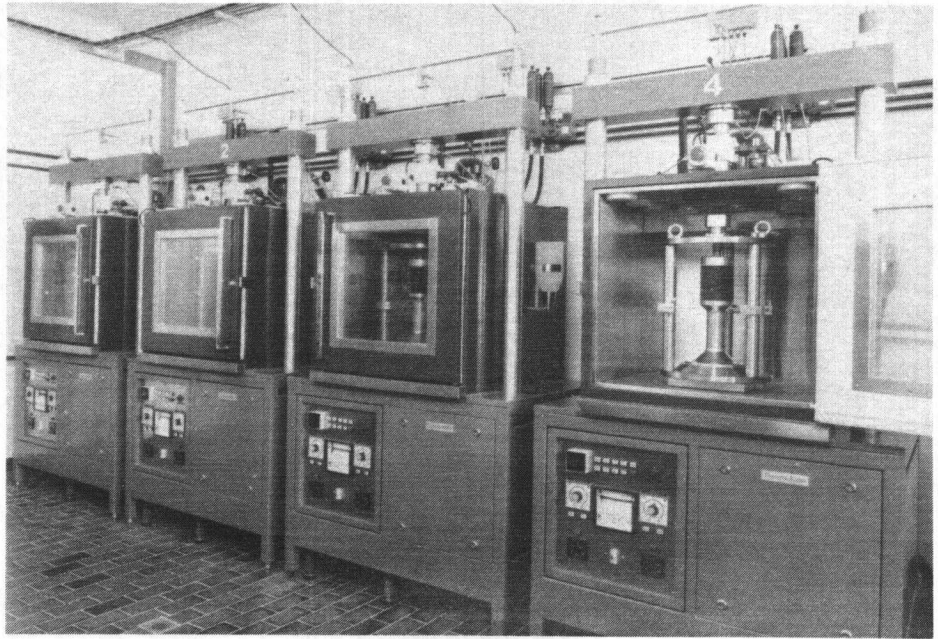


Abb. 22: Mechanisch-hydraulischer Teil der Prüfanlage DYNASPHALT. Eingebaut in den Klimakammern sind die Druckrahmen für monoaxiale Druckversuche.

Oben sind die Drucköl-Zapfstellen für die einzelnen Maschinen ersichtlich, welche deren unabhängigen Betrieb gestatten.

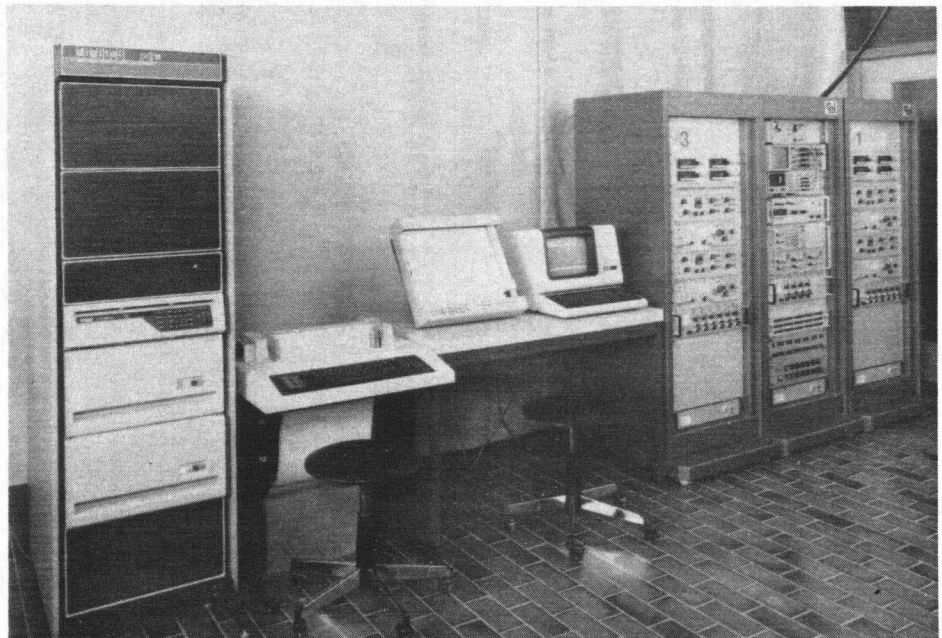


Abb. 23: Elektronischer Teil der Prüfanlage DYNASPHALT. Von links nach rechts: Rechner, Drucker, Plotter, Steuerterminal, drei Normschränke mit Regelkreisen der Maschinen M1 bis M4 - im mittleren Schrank: FG, KO, Überwachungsteil.

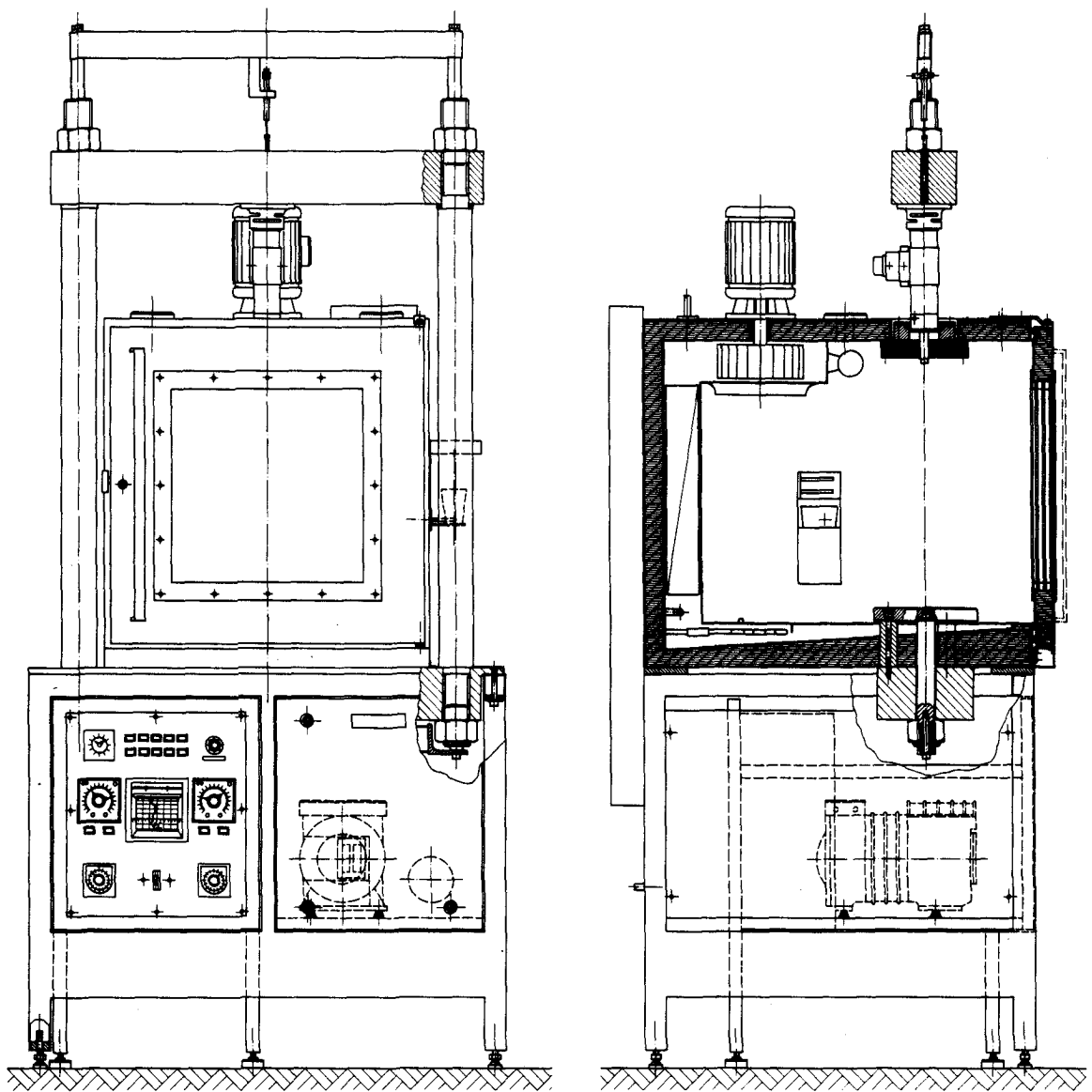


Abb. 24: Prüfanlage DYNASPHALT.

Prüfmaschine mit Klimakammer und Klimaanlage. Er-sichtlich ist der grosse freie Prüfraum der Kli-makammer zur Aufnahme der Einbauten für verschie-dene Prüfverfahren.

Im unteren Teil des Gestells ist die Klimaanlage mit separater Abstützung ersichtlich.

Die Schnittzeichnung zeigt zudem den ab der unte-ren Traverse des Kraftrahmens durch die Säulen geführten Wegrahmen als Basis für den axial mon-tierten Kolbenweggeber.

• **Bereiche der Anlage**

- Kraft: Gesamtbereich ± 10 kN (Druck und Zug), Teilbe-reiche 4, 2 und 1 kN wählbar.
- Kolbenweg: Gesamtbereich ± 10 mm (ab Nullstellung des Kolbens), Teilbereiche 4, 2 und 1 mm wählbar.

Für die kleinsten wählbaren Bereiche sind folgende Auflösungen verfügbar:

Kraft: 0,5 N (kleinster Bereich: 1 kN)

Kolbenweg: $5 \cdot 10^{-3}$ mm (mit dem eingebauten Geber; kleinster Bereich: 1 mm)

Verformung: $5 \cdot 10^{-5}$ mm (mit angesetztem Taster; kleinster Bereich: 0,1 mm)

• **Elektronik (Prozesssteuerung und Datenerfassung)**

Für den optimalen Betrieb der ganzen Prüfanlage DYN- ASPHALT war die Realisierung eines On-Line-Betriebes am Computer unumgänglich. Um die speziell für Schwingversuche erforderliche hohe Messgeschwindigkeit und Messrate zu erreichen, mussten alle Messsignale über den Signalbus anstehend konzipiert werden. Ein Umschalter vor den Verstärkern wurde daher nicht erforderlich. Schema in Abbildung 25.

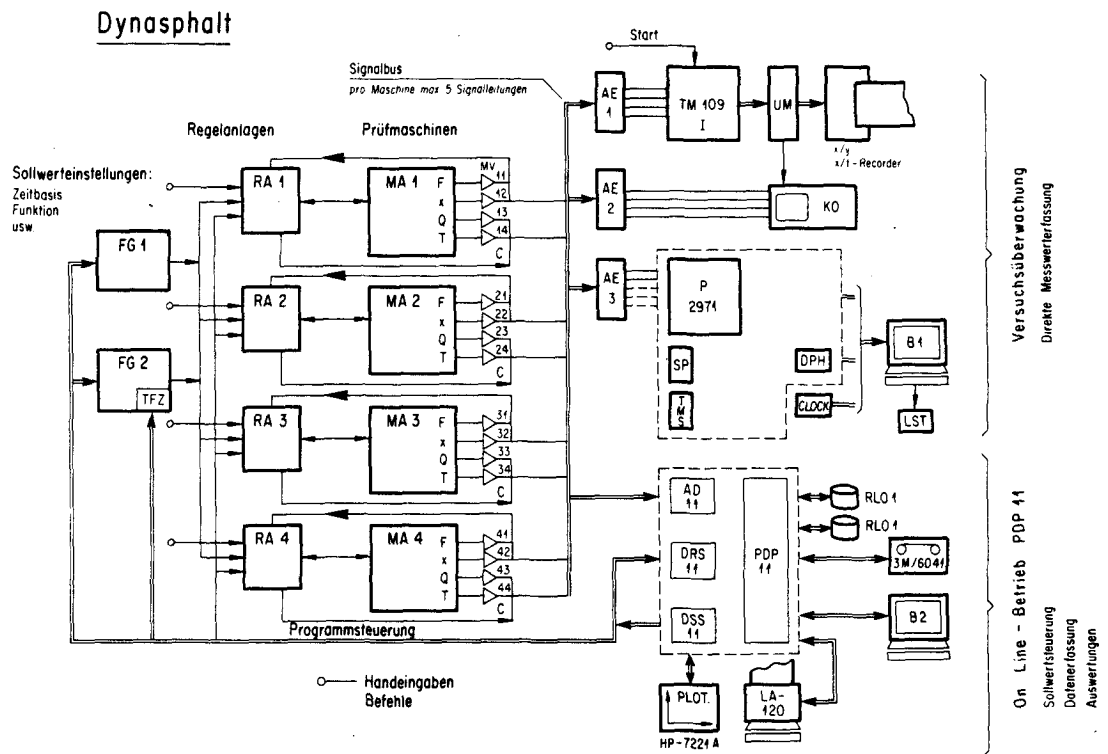


Abb. 25: Schema der Prüfanlage DYNASPHALT mit Steuerung durch den Computer im On-Line-Betrieb und mit Überwachungsteil.

FG Funktionsgenerator	TM Transientenspeicher
RA Regelanlagen	P Phasenmesser
MV Messverstärker	SP Spitzenwertmesser
C Commando	TMS Tariereinheit
AE Anschalteinheiten	KO Kathodenstrahl- loscilloskop
UM Umschalter	AD Analog-Digital-Wand- ler
DRS/DSS Digital Input/ Output	

• **Aufgabenstellung an die Rechenmaschine/Computer**

1. Initialisierung

- Führungshilfen für das Bedienungspersonal.
- Berechnen von Einstellgrößen (z.B. Erreichen ganzzahliger Verhältnisse zwischen Schwingungsperiode und Dauer der Wechselbelastung).
- Absicherung gegen Fehleinstellungen.

2. Versuchsdurchführung

- Steuern des Belastungsablaufes.
- Datenerfassung On-Line.
- Steuerungsfunktion in der Datenerfassung ausüben.
- Datenerfassung (bis max. 15'000 Messungen pro sec beim Erfassen von Schwingungsvorgängen, Abarbeiten nach Messraster.
- Versuchsüberwachung (Zustandsmeldungen für Operator).

3. Auswertung

- Zwischenauswertung, Kontrolloutputs.
- Datenauswertung Tabellen, Berichte, Plots.

4. Statistische Auswertung

• **Das Problem der Automatisierung (Tabelle 13)**

Schon im ersten Planungsstadium der Prüfanlage DYNASPHALT wurde deutlich, dass ein leistungsfähiger Betrieb der Anlage nur dann erfolgen konnte, wenn die Steueraufgaben, die Datenerfassung und die Auswertung weitgehendst automatisch, d.h. im On-Line-Betrieb am Computer ausgeführt würden [95, 100 - 10'813].

Grundsätzlich mussten für die Prüfanlage DYNASPHALT die in Tabelle 13 aufgeführten Phasen bei der Versuchsdurchführung bezüglich Festlegen des Automatisierungsumfanges beachtet werden.

Die Phasen 1 bis 3 sind für eine 4-fache Prüfanlage prinzipiell aus einer Automatisierung auszuschliessen, da dort praktisch für alle Versuchsarten zahlreiche grössere manuelle Eingriffe durch den Operateur erforderlich werden.

In Phase 4 ist nach der vom Operateur festgelegten Programmwahl (schon an Automatisierungsgrenze) die Möglichkeit zur manuellen Einstellung der Sollwerte und Grenzwerte (Vorlast, Grundlast, Wechselbelastung) auf Anlagenseite der Steuerelektronik gegeben. Vom Konzept der Steuer- und Regelelektronik her sind

Nr.	P h a s e
1	Prüfkörperereinbau und Vorbereiten Messeinrichtung.
2	Konditionieren des Prüfkörpers im Prüfraum (Klimakammer).
3	Vorbereiten und Einrichten Prüfmaschinen.
4	Programmwahl, Wahl von Vorlast, Grundlast, Wechsellast (je 3 Sollwerte pro Maschine) und Grenzwerteinstellungen für F, x und n.
5	"Check before take off" (Vorlast-Kontrollmessungen).
6	Start → Vorlast → Grundlast - Hauptlast (vordynamisch - Wechsellast - nachdynamisch), eigentlicher Versuchsbeginn.
7	Messtakt $f(t)$ resp. $f(n)$.
8	Datenerfassung und Versuchsüberwachung gemäss 7.
9	Auswerten.
10	Erstellen von Tabellen und graphischen Darstellungen.

Tab. 13: Phasen der Versuchsdurchführung.

am Funktionsgenerator die Belastungsart, die Kurvenform, die Frequenz (Periodendauer) sowie die Kommandos START (RUN), HOLD, RESET etc. auch manuell einstellbar. Über den mit einer dynamischen Messeinheit (Spitzenwert- und Tariereinheit) ausgerüsteten Überwachungsteil sind alle Sollwerteinstellungen vor und während des Betriebs abruf-, kontrollier- und "trimmbar".

Sämtliche Sollwerteinstellungen (Vorlast, Grundlast, Wechsellast sowie Periodtime, Belastungsart und Kurvenform) und alle weiteren am Funktionsgenerator vorhandenen Kommandotasten können auch extern über den Computer angesteuert werden.

Die Automatisierungsgrenze der Prüfanlage DYNASPHALT verläuft somit in Tabelle 13 durch Phase 4.

Der Computer übernimmt bei der Initialisierung der Versuche Führungshilfen bei der Eingabe der Versuchsdaten und der Einstellgrössen. Gleichzeitig werden Fehleinstellungen durch Soll-Ist-Vergleiche verhindert.

• **Betrieb der Prüfanlage DYNASPHALT**

- **Versuchsprogramme**

Beispiele von Versuchsprogrammen sind in der Tabelle 14 und in der Abbildung 26 dargestellt.

Für alle Versuchsarten mit den verschiedenen Einbauten existiert ein gemeinsames Programm für die Eingabe der Versuchsdaten mit den in Abbildung 26 aufgeführten wählbaren Parametern.

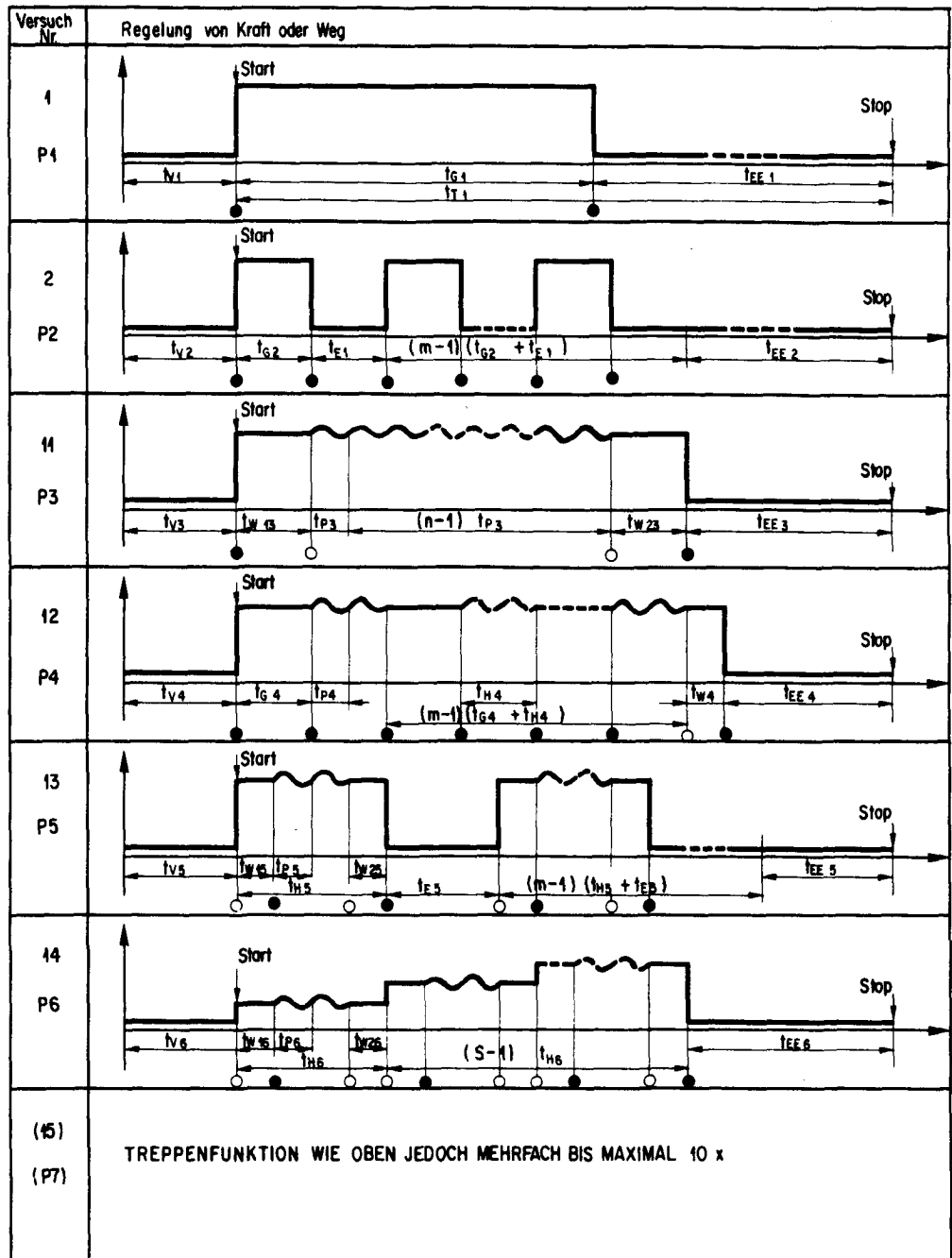
Durch die Computersteuerung der Prüfanlage DYNASPHALT sowie die automatische Datenerfassung und Auswertung wird die Durchführung der Versuche - abgesehen vom anfänglich grossen Programmierumfang - mit verhältnismässig kleinem Aufwand möglich.

Versuch Nr.	Programm Nr.	Bezeichnung	
1	P1	MKV	monoaxialer Kriechversuch, 1 Belastung
2	P2	MKVIG	monoaxialer Kriechversuch, Intervalle Grundlast
11	P3	MSV	monoaxialer Schwingversuch, 1 Wechsellastgruppe
12	P4	MSVIW	monoaxialer Schwingversuch, Intervalle Wechsellast
13	P5	MSVIG	monoaxialer Schwingversuch, Intervalle Grundlast
14	P6	MSVSTG	monoaxialer Schwingversuch, Stufen Grundlast
Weitere Versuche mit Treppenfunktionen über Stufen (Rampen, HOLD/RUN) oder als Triaxialversuche unter Überlagerung eines Seitendrucks (Versuche 21 - ...).			

Tab. 14: Versuchsprogramme Prüfanlage DYNASPHALT gemäss Abbildung 26.

Beispiele für den Betrieb der Prüfanlage DYNASPHALT sind auch in den Abbildungen 27 und 28 dargestellt.

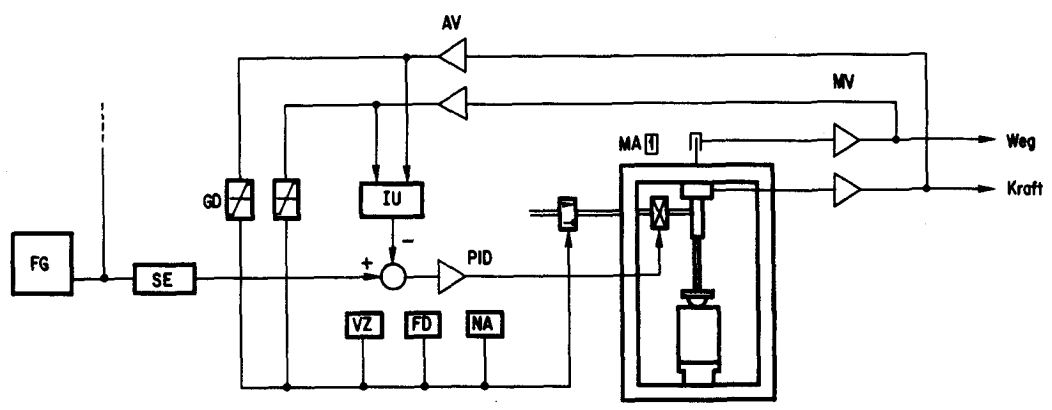
Der Einsatz der Prüfanlage erfolgt gemäss Abbildung 33, "Betriebsarten der Prüfmaschinen" und Abbildung 6, "Übersicht zu den Einbauten für verschiedene Prüfverfahren".



● Belastungswechsel
○

Abb. 26: Schematische Darstellung einiger Programme für monoaxiale Druckversuche. Für Triaxialversuche ist ein Seitendruck zu überlagern.

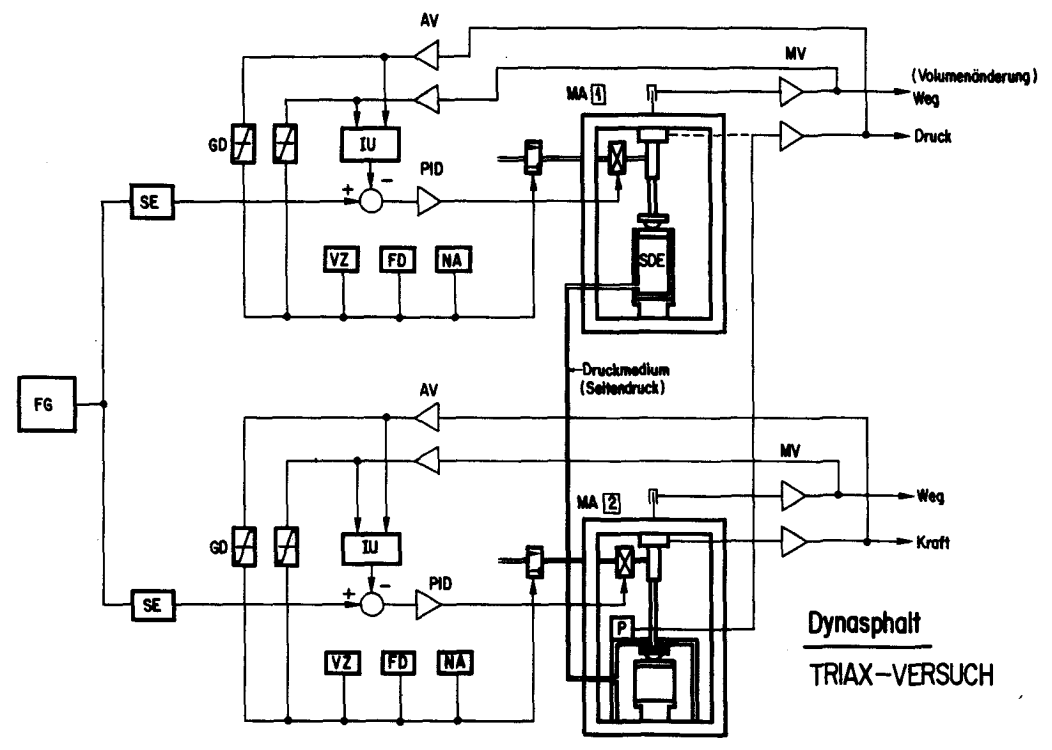
Wählbar sind:
 Vorlastzeiten t_V , Grundlastzeiten t_G , Hauptlastzeiten t_H , Entlastungszeit t_E sowie die Gesamtversuchszeit t_T und die Schwingungsdauer t_P resp. die daraus sich ergebenden Wartezeiten t_W (Zeiten vor- resp. nachdynamisch).



Abk. :	Funktion :	Typ :
FG	Funktionsgenerator	LFG 1000R
SE	SollwertEinstellung	ALU 1012
GD	Grenzwertdetektoren	L 1002
IU	Istwertumschaltung	FS 2001
VZ	Vorwählzähler	PC 1010
FD	Fehlerdetektor	SA 2000A
NA	Notabschaltung	ES 2007
AV	Anpassverstärker	UI 2111/M4
PID	PID-Regler + Verstärker	SA 2000 A
MV	Messverstärker	KWS 3072
MA 1	Maschine 1	

Dynasphalt
Monoaxiale Versuche

Abb. 27: Betrieb im monoaxialen Druckversuch. Prüfmaschinen 1 bis 4 parallel, in Gruppen oder einzeln (Einsatz weiterer Funktionsgeneratoren).



Dynasphalt
TRIAX-VERSUCH

Abb. 28: Betrieb im Triaxialversuch. Gruppenbetrieb der Prüfmaschinen. Die Kommandos der Maschinen 1 und 2 können gegeneinander phasenverschoben werden (axiale und radiale Beanspruchungen zeitlich gegeneinander verschoben oder in Phase); Legende siehe Abbildung 27.

6.4 Gruppe IV: Schwerpunkt Bruchversuche, Universalprüfmaschine UVP 150 kN

a) Konzept

Die Vielfalt bestehender Prüfverfahren an bituminösen Baustoffen zum Schwerpunkt Bruchversuche kann kaum mit einer Universalprüfmaschine alleine abgedeckt werden. Für einzelne Prüfverfahren sind relativ grosse Kraft- und/oder Wegbereiche notwendig, wobei die gewählten Bereiche

- 150 kN Kraft und

- 400 mm Weg (± 200 mm, 400 mm nur Rampe)

für Bruchversuche im Druckbereich bis 150 kN mit kleinem Wegbereich bis 10 mm (Triaxialversuche) resp. Zug-Dehnversuche im kleinen Kraftbereich von 10 kN bei einem Dehnweg von rund 200 bis 300 mm (an Dichtungsbahnen) erforderlich werden.

Da zusätzlich die Schaffung eines grossen freien Prüf-raumes - der Klimakammer - zur Aufnahme verschiedenster Versuchseinbauten in Anlehnung an das Baukastensystem der Prüfanlage DYNASPHALT vorzusehen war, drängte sich die Realisierung einer Universalprüfmaschine im Eigenbau auf [100 - 10'741].

Vordringlich wurde für die Festlegung des Konzeptes auch die Möglichkeit zur Realisierung der Parallelprüfung von beispielsweise 4 bis 6 Prüfkörpern in Dehn- und/oder Stauchversuchen an Fugendichtungsmassen oder in Zugversuchen an Dichtungsbahnen. Diese Versuche werden vor allem weggesteuert (Kolbenweg), mit kleinen Verformungsgeschwindigkeiten durchgeführt und sind daher sehr zeitraubend. Die Parallelprüfung gestattet somit wesentlich rationellere Versuchsdurchführungen unter grosser Zeitersparnis.

b) Realisierung

Den Aufbau der Prüfmaschine zeigen die Abbildungen 29 und 30. Speziell in Abbildung 30 wird der grosse freie Prüfraum zur Aufnahme der verschiedenen Einbauten des Baukastensystems ersichtlich.

Die vorgenannte Bedingung der Möglichkeit zur Parallelprüfung von Prüfkörpern wurde konstruktiv durch Anordnen von 6 Kraftmessdosen (Bereiche 10 kN) über der oberen Traverse des Kraftrahmens der Maschine gelöst. Diese bilden die Auflager für 6 Zugstangen, die durch die obere Traverse und die Klimakammer hindurch in den Prüfraum geführt und dort mit Schnellkupplungen zur Aufnahme der Einspannvorrichtungen der Prüfkörper versehen werden.

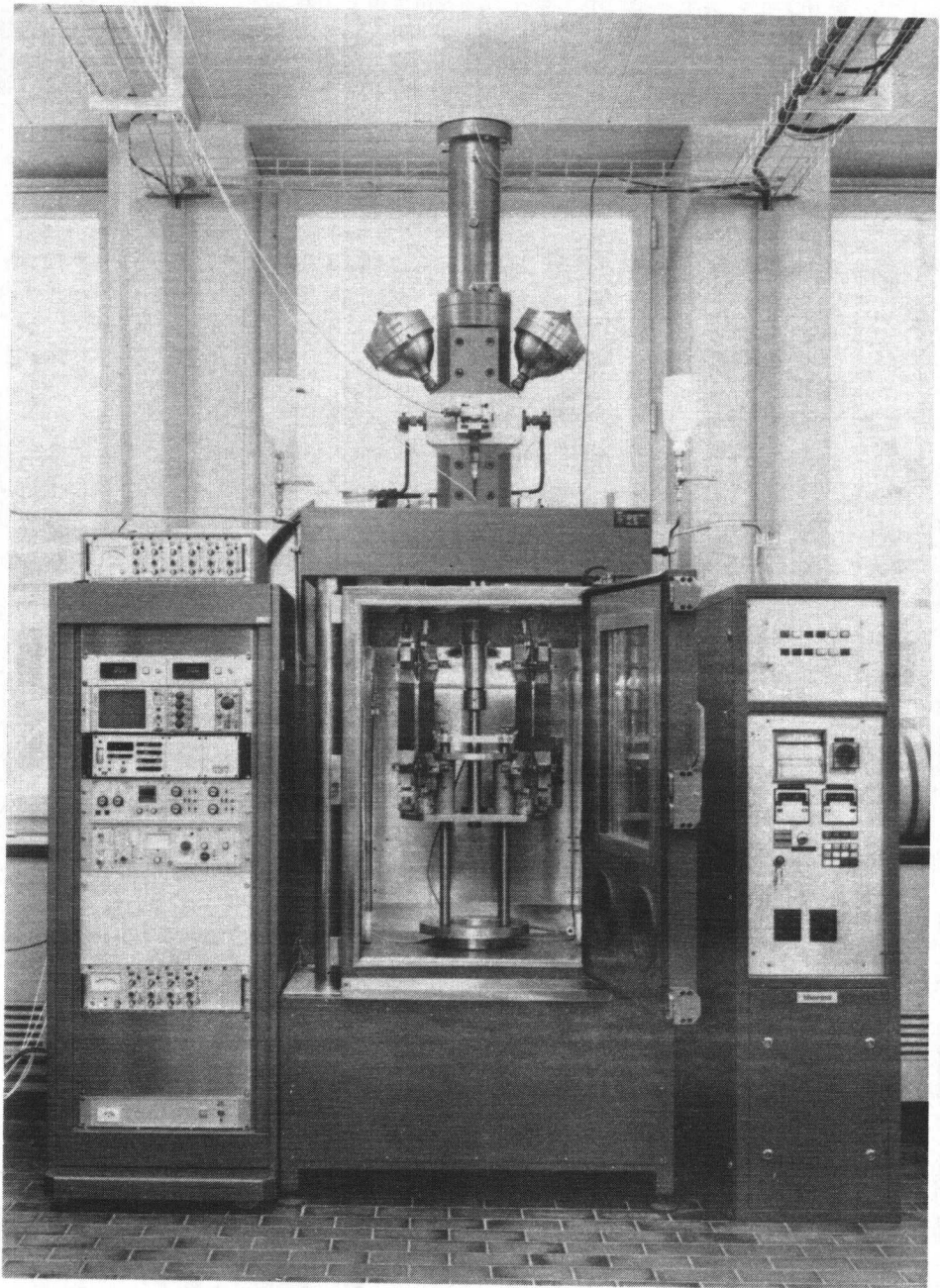


Abb. 29: Universalprüfmaschine UVP 150 kN mit eingesetztem Einbau für die Zugprüfung an Dichtungsbahnen (sechs Prüfkörper, obere Klemmbanken je über Zugstangen an Druckmessdosen auf der oberen Traverse abgestützt, Druckmessdosen mit Bereich 10 kN).

Links: Elektronischer Teil (Funktionsgenerator, Regelkreis, Verstärker und statische Anzeigen Kraft und Weg).

Rechts: Steuerkasten mit Kompressor (unten) der Klimakammer. Oben Einschub mit Zapfstellenbedienung für die Druckölversorgung.

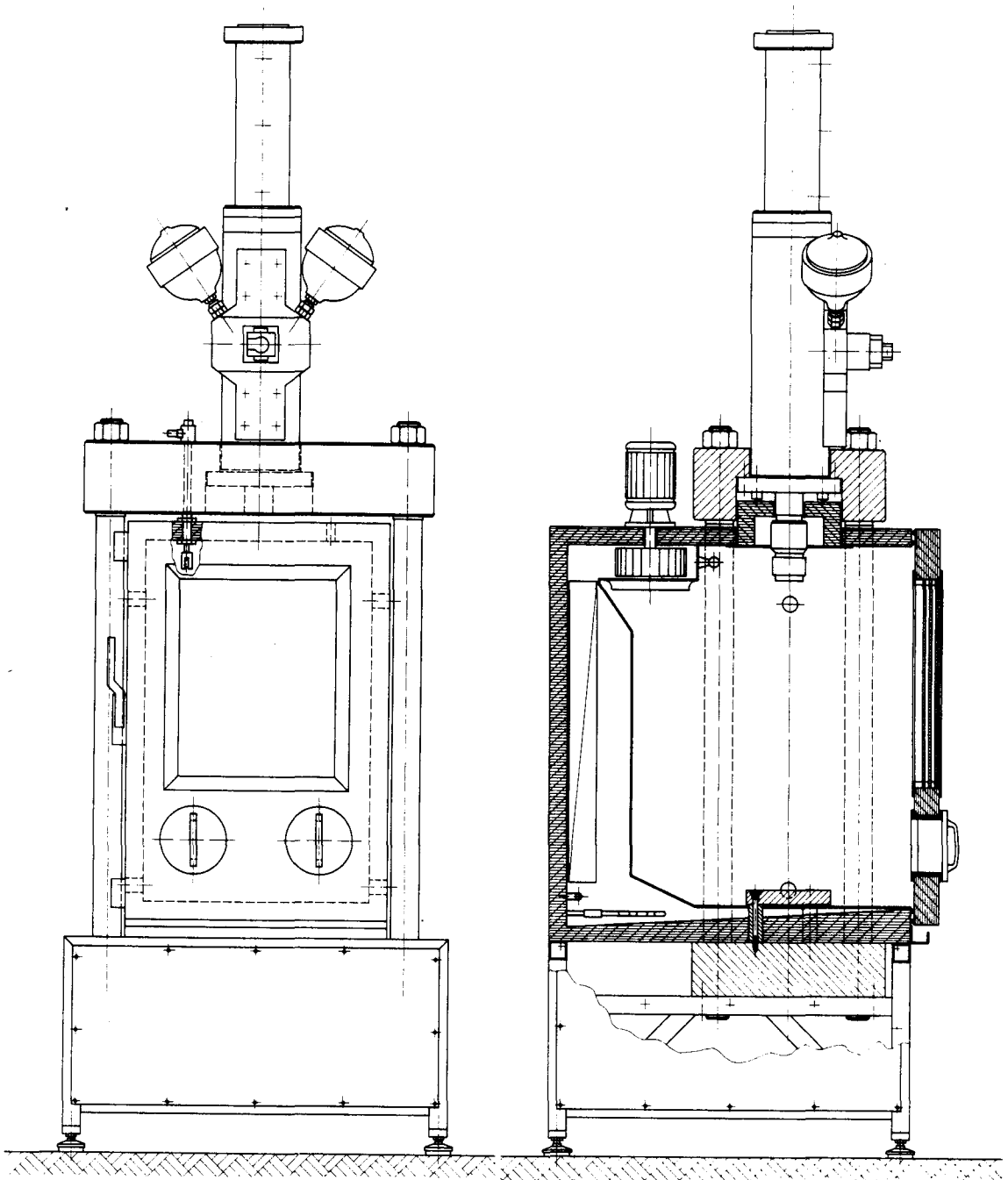


Abb. 30: Universalprüfmaschine UVP 150 kN mit eingebauter Klimakammer. Deutlich ist der grosse freie Prüfraum mit der Basis zur Aufnahme der verschiedenen Einbauten des Baukastensystems ersichtlich.

In der Ansicht links ist eine Zugstange für Zugversuche mit einer Druckmessdose 10 kN als Auflager eingezeichnet.

Im weggesteuerten Zug-Dehn-Versuch (Kolbenweg) können so die Bruchkraft (Maximalkraft per Definition) und die zugehörige Dehnung jedes einzelnen Prüfkörpers getrennt erfasst werden, siehe auch die Abbildungen 44 bis 49.

• **Bereiche der UVP 150 kN**

- F Kraft, Gesamtbereich ± 150 kN (Druck und Zug), Teilbereiche 100, 50 und 20 kN wählbar
- x Kolbenweg, Gesamtbereich ± 200 mm, Teilbereiche 100, 50 und 20 mm wählbar
- a_x Schwingungsamplitude für langsame, dynamische Versuche < 10 mm, für quasistatische Versuche bis 400 mm (Rampe, Halbwelle)
- f Frequenz < 2 Hz (f nach Möglichkeit, Überwachung Öldruck, Begrenzung Weg a_x)
- n Zyklenzahl pro Versuch bis $2 \cdot 10^5$

Für die kleinsten wählbaren Bereiche sind folgende Auflösungen verfügbar:

- Kraft: 5 N (kleinster Bereich: 1kN)
- Kolbenweg: 10^{-2} mm (mit dem eingebauten Geber; kleinster Bereich: 20 mm)
- Verformung: $5 \cdot 10^{-4}$ mm (mit dem angesetzten Taster; kleinster Bereich: 1 mm)

• **Elektronik (Prozesssteuerung und Datenerfassung)**

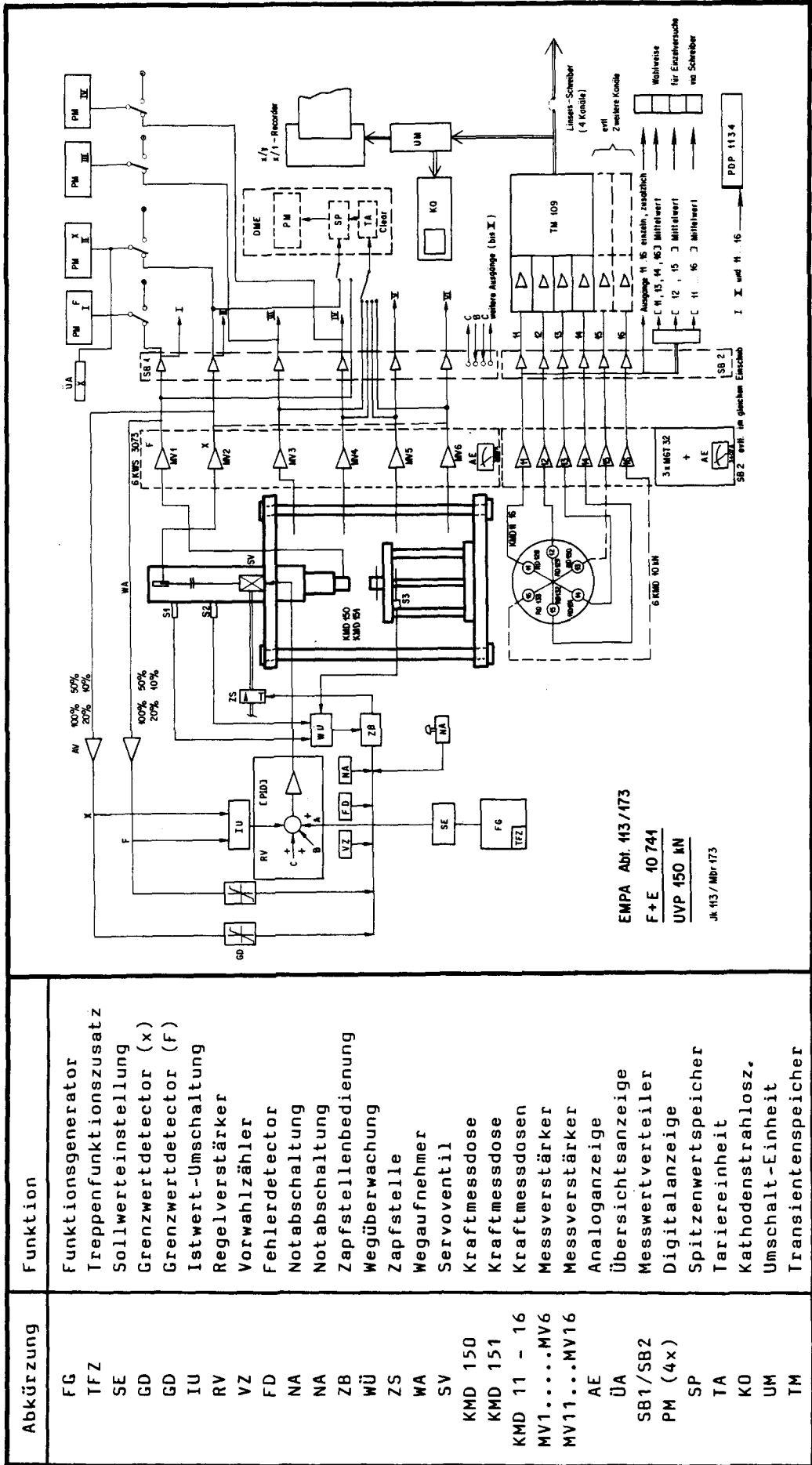
Grundsätzlich wurde für die UVP 150 kN das gleiche Konzept für den Betrieb und die Elektronik der Prozesssteuerung und Datenerfassung gewählt wie bei der Prüfanlage DYNASPHALT.

Zum Problem der Automatisierung und zur Aufgabenstellung an den Computer für Prozesssteuerung und Datenerfassung im On-Line-Betrieb gelten die gleichen Bemerkungen, die unter Abschnitt 6.3 - Prüfanlage DYNASPHALT - festgehalten sind.

Schema der Anlage gemäss Abbildung 31.

• **Betrieb der UVP 150 kN**

Der Einsatz der Prüfmaschine UVP 150 kN erfolgt gemäss Abbildung 33, "Betriebsarten der Prüfmaschinen", und Abbildung 7, "Übersicht zu den Einbauten für verschiedene Prüfverfahren".



Abkürzung	Funktion
FG	Funktionsgenerator
TFZ	Treppenfunktionszusatz
SE	SollwertEinstellung
GD	Grenzwertdetector (x)
GD	Grenzwertdetector (F)
IU	Istwert-Umschaltung
RV	Regelverstärker
VZ	Vorwahlzähler
FD	Fehlerdetector
NA	Notabschaltung
NA	Notabschaltung
ZB	Zapfstellenbedienung
WÜ	Wegüberwachung
ZS	Zapfstelle
WA	Wegaufnehmer
SV	Servoventil
KMD 150	Kraftmessdose
KMD 151	Kraftmessdose
KMD 11 - 16	Kraftmessdosen
MV1...MV6	Messverstärker
MV11...MV16	Messverstärker
AE	Analoganzeige
ÜA	Übersichtsanzeige
SB1/SB2	Messwertverteiler
PM (4x)	Digitalanzeige
SP	Spitzenwertspeicher
TA	Tariereinheit
KO	Kathodenstrahllosz.
UM	Umschalt-Einheit
TM	Transientspeicher

Abb. 31: Elektronik der Universalprüfmaschine UVP 150 kN, Schema und Geräteliste.

6.5 Betriebsarten der Prüfmaschinen (Gruppen II bis V)

6.51 Anordnung der Prüfmaschinen

Im Zuge des erforderlich gewordenen Umbaues eines Labors konnte ein eigentlicher Prüfmaschinenraum für die servohydraulischen Prüfmaschinen geschaffen werden.

Die Druckölversorgung aller Prüfmaschinen erfolgt über eine gemeinsame Pumpe, wobei jede Prüfmaschine über eine eigene Zapfstelle mit Drucköl versorgt wird. Durch die speziell gefertigten Zapfstellen wird erreicht, dass das Ein- oder Ausschalten einzelner Prüfmaschinen ohne Druckstösse im Gesamtsystem der Druckölversorgung erfolgen kann.

Bei den im Prüfmaschinenraum konzentrierten Prüfmaschinen handelt es sich um

- das Wasserdruckaggregat: gemäss Abschnitt 6.2
- die Prüfanlage DYNASPHALT: gemäss Abschnitt 6.3
- die Universalpresse UVP 150 kN: gemäss Abschnitt 6.4

Diese Prüfeinrichtungen sind zusammen mit den zugehörigen Elementen für Steuerung und Datenerfassung sowie dem Computer für die eigentliche Prozesssteuerung und weiteren mechanischen Hilfseinrichtungen, den Klimaanlage sowie den Energieträgern in einer Übersicht in Abbildung 32 dargestellt.

6.52 Betriebsarten

Unter Betriebsarten wird hier der Einsatz der Prüfmaschinen im Einzelversuch (x) oder im Parallelversuch (x x) verstanden. Parallelversuch bedeutet gleiche Prüfung an gleichen oder ähnlichen Prüfkörpern unter gleicher mechanischer oder klimatischer Beanspruchung.

Beispielsweise bedeutet dies für monoaxiale Schwingversuche auf der Prüfanlage DYNASPHALT für die Maschinen 1 bis 4 im Parallelversuch:

gleiche Belastungsfunktion, gleiche Frequenz	gleiche oder verschiedene Laststufen, Klimabedingungen (Klima meist konstant)
--	---

Eine allgemeine Übersicht zu den Betriebsarten der verschiedenen Prüfmaschinen gibt Abbildung 33.

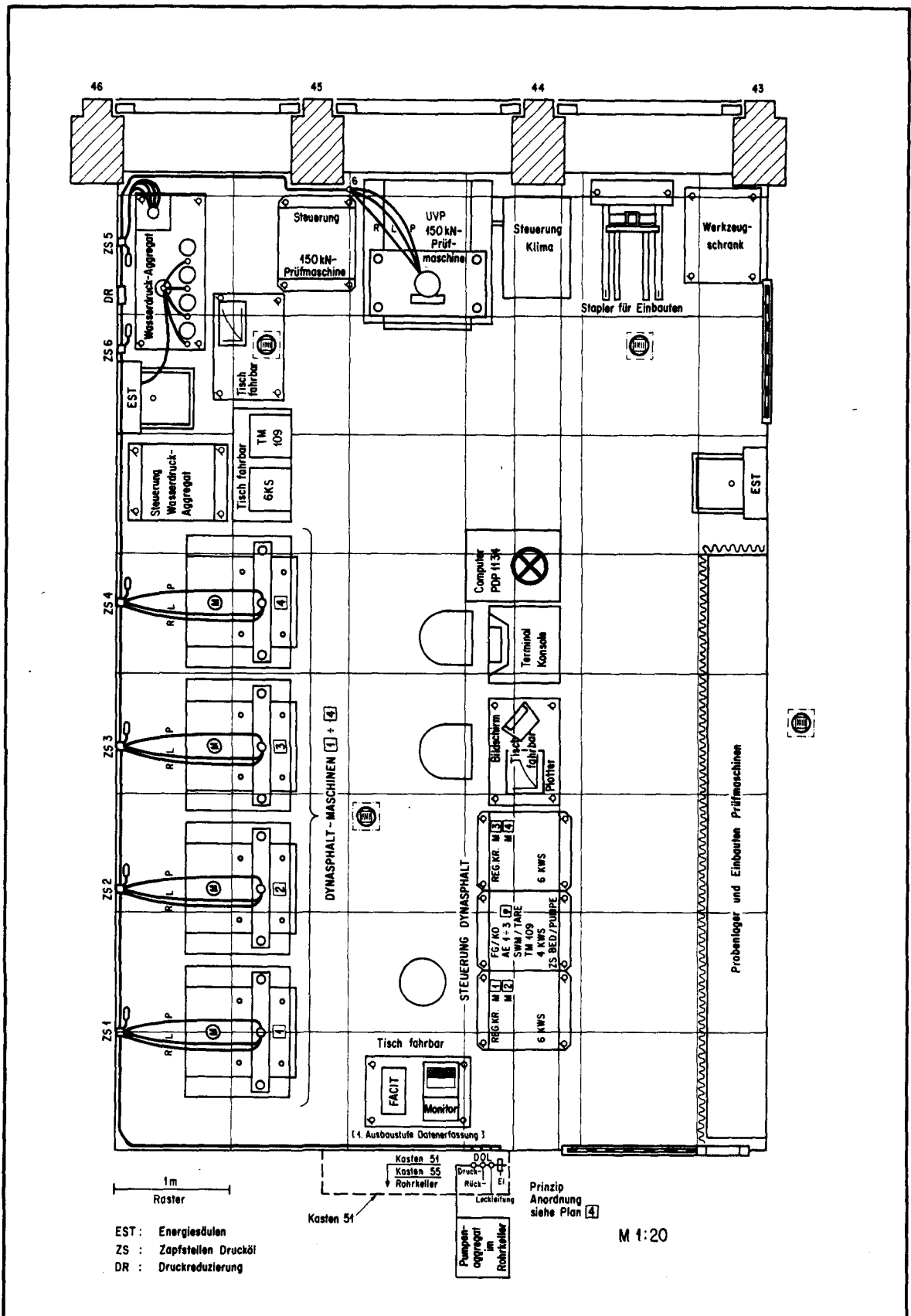


Abb. 32: Anordnung der Prüfmaschinen. Zentral: Der Computer (x) für die Prozess-Steuerung und Datenerfassung der Prüf-anlage DYNASPHALT und der UVP 150 kN, siehe auch die Abbildungen 6 und 31.

BETRIEBSARTEN DER PRÜFMASCHINEN			PRÜFVERFAHREN
DYNASPHALT Maschinen 1-4 F 0...10 kN	WASSERDRUCK- AGGREGAT p _a 0.05...1.1 MPa (0.5...11 bar)	UNIVERSALPRÜF- MASCHINE F 0...150 kN	BEZEICHNUNG UND KRAFTBEREICH
x x x x (VTU oder WI)		x	1 MBV, Monaxialer Bruchversuch 0...10 kN 0...150 kN
x x x x (VTU oder WI)		x	2 MKV, Monoaxialer Kriechversuch 0...10 kN 0...150 kN
x x x x (nur WI)			3 MSV, Monoaxialer Schwingversuch 0...10 kN
x x x x SDE SDE		x VT x	4 TBV, Triaxialer Bruchversuch 0...10 kN nVolco 0...10 kN Volco 0...150 kN nVolco 0...150 kN Volco
x x x x SDE SDE		x VT x	5 TKV, Triaxialer Kriechversuch 0...10 kN nVolco 0...10 kN Volco 0...150 kN Volco 0...150 kN Volco
x x x x SDE SDE		x VT x	6 TSV, Triaxialer Schwingversuch 0...10 kN nVolco, σ_{23} stat 0...10 kN nVolco, σ_{23} sw 0...10 kN Volco, σ_{23} stat + sw
x x x x bis 10 kN Zug und/oder Druck	* Schwingender und statischer Wasserdruck, Lagerungsart.	x* 20...150 kN Druck resp. Zug über Umlenkung 0...10 kN Zug- versuche/6-fach	7 * Spezielle Versuche mit verschie- denen Einbauten.
<p><u>Legende, Abkürzungen</u></p> <p>x Prüfmachine</p> <p>x x Prüfmachines einzeln oder parallel</p> <p>x x Bilden Einheit im Triaxbetrieb</p> <p>--- Seitendruck σ_{23} wird erzeugt von nach</p> <p>VTU Volumen-Messsystem "Tubus", monoaxial</p> <p>WI Volumen-Messsystem "Wicklung", monoaxial</p> <p>VT Volumenmesszylinder Triax</p> <p>x x Druckerzeugung, Seitendruck in Serie</p> <p>stat statisch</p> <p>sw schwingend</p> <p>nVolco nicht volumenkontrolliert</p> <p>Volco volumenkontrolliert</p>			

Abb. 33: Betriebsarten der servohydraulischen Prüfmachines.

7. EINBAUTEN UND ZUSATZEINRICHTUNGEN ZU DEN PRÜFVERFAHREN

7.1 Konzept

Für die Prüfanlage DYNASPHALT und die Universalprüfmaschine UVP 150 kN zeigten sich auch innerhalb ihrer Einsatzschwerpunkte

Ermüdung → Prüfanlage DYNASPHALT und

Bruchversuche → Universalprüfmaschine UVP 150 kN

Bedarf und Anwendung ähnlicher oder identischer Prüfverfahren. Damit war nach Möglichkeit die Schaffung und Anwendung gleicher spezifischer Prüfeinrichtungen zu diesen Prüfverfahren als Elemente eines Baukastensystems gegeben.

Ausserdem wurde deutlich, dass es von Vorteil und erforderlich sein würde, beispielsweise

- statische oder quasistatische Prüfungen im kleinen Kraft- und/oder Verformungsbereich der Prüfkörper auch auf der Prüfanlage DYNASPHALT durchzuführen (höhere Auflösung, kleinere Fehlererwartung).
- den Einsatz der UVP 150 kN auch für Schwingversuche bei tiefer Frequenz im beschränkten Kraft- und Verformungsbereich vorzusehen, um dadurch in langdauernden Einzelversuchen ein unverhältnismässiges zeitliches Blockieren der Mehrfachprüfanlage DYNASPHALT zu vermeiden.

Durch diese Gegebenheit wurde für die angestrebte Kompatibilität das Anordnen grosser freier Prüfräume mit guter Zugänglichkeit in den Klimakammern aller Prüfmaschinen gewählt, in welche die spezifischen Einbauten für die verschiedenen Prüfverfahren als Elemente des Baukastensystems eingesetzt werden. Siehe hierzu das Schema in der Abbildung 34.

Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass alle Einbauten als überarbeitete oder neu konzipierte Elemente zur Prüftechnik der Festigkeitsuntersuchungen an bituminösen Baustoffen in der Form von Prototypen geschaffen wurden.

Bei der Inbetriebnahme und in den Testversuchen zeigten sich in der Folge für die als Prototypen entwickelten Einbauten zu neuen Prüfverfahren gewisse Verbesserungsmöglichkeiten. So wurden zum Beispiel die Einbauten EB 1 und EB 11 in doppelter Ausführung unter Erhöhung der Prüfkörperabmessungen gebaut.

Wie auf Seite 36 und in Abbildung 7 festgehalten, wurden alle Einbauten für einen möglichst universellen Einsatz - auch in bestehenden Prüfmaschinen - konzipiert. Spezielle Anordnungen - mit Anpassungen der Prüfmaschinen - mussten dagegen für die Prototypen der Einbauten Nr. 2 bis 4 gewählt werden, da sie auf die Parallelprüfung von 4 bis 6 Prüfkörper ausgelegt wurden.

7.2 Realisierte Einbauten und Zusatzeinrichtungen

Die Einbauten und Zusatzeinrichtungen (Kraftmessdosen, Eichkörper, Volumenmessgeräte) für die verschiedenen Prüfverfahren sind nach Produktgruppen der Baustoffe aufgeführt, in der Reihenfolge für

- Bindemittel, Dichtungsmassen
- Mastices (stabilisierte Bindemittel, Massen)
- Fugenfüllmassen
- Abdichtungsmaterialien (Dichtungsbahnen, Beschichtungen)
- Verdichtetes bituminöses Mischgut, Asphalt

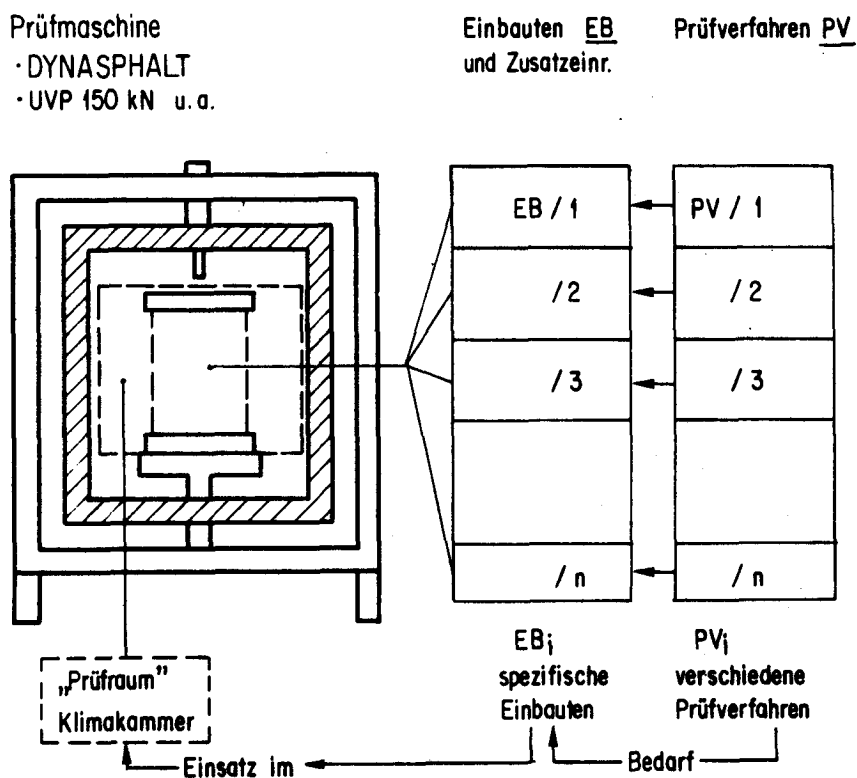


Abb. 34: Schema zum Einsatz von Einbauten und Zusatzeinrichtungen für verschiedene Prüfverfahren als Elemente im Baukastensystem.

In Tabelle 15 sind die realisierten Einbauten mit Angabe ihrer Einsatzschwerpunkte und unter Zuordnung zu den verschiedenen Produktgruppen bituminöser Baustoffe zusammengestellt. Siehe dazu auch die Abbildung 7.

Deutlich wird der Schwerpunkt der mechanischen Prüfung an Asphalt durch die Einbauten 6 bis 12 veranschaulicht.

Einbau/Element		Baustoff	Einsatzschwerpunkt	
Nr.	Bezeichnung Einbau • Zusatzeinrichtung	Produkte- gruppe, Prüfkörper PK	Ermüdung Schwing- versuche	Statische Kriech- und Bruch- versuche
1	Bindemittel-Schub-Axial (B-SA), 1a und 1b	Bindemittel Mastics, Massen	●	()
2	Fugendehnung (Rabe), mit • Messkörper Fugen	Massen, Kitte	()	●
3	Fugen - Dehnen/Stauchen	Massen, Kitte	()	●
4	Zugversuch	Dichtungs- bahnen	()	●
5	Risseüberbrückung	Dichtungs- bahnen, Be- schichtun- gen	●	●
6	Einbauten Marshall 6a Marshall Standard 6b Marshall-Gross, mit • Messkörper MAME 20 kN	Asphalt PK	-	●
7	Spaltzug	Asphalt PK	-	●
8	Monoaxialer Druckeinbau, mit • VTU Volumenmesstabus • VWI Wicklungen	Asphalt PK	●	●
9	Wechsellast Druck/Zug	Asphalt PK	●	●
10	Biegung Wechsellast	Asphalt PK	●	()
11	Biege-Schub-Axial (PK-BSA) 11a für PK Ø (100 mm) 150 mm 11b für PK Ø 200 mm, 300 mm	Asphalt PK	●	()
12	Triaxialzelle, mit • SDE Seitendruckelement • VT Volumenmesszylinder Triax • MT Messkörper Triax	Asphalt PK	● ()	●

Tab. 15: Einbauten und Zusatzeinrichtungen (•); ● Schwerpunkt, () beschränkt einsetzbar, - nicht einsetzbar.

7.21 EB 1: Einbau Bindemittel-Schub-Axial (B-SA)

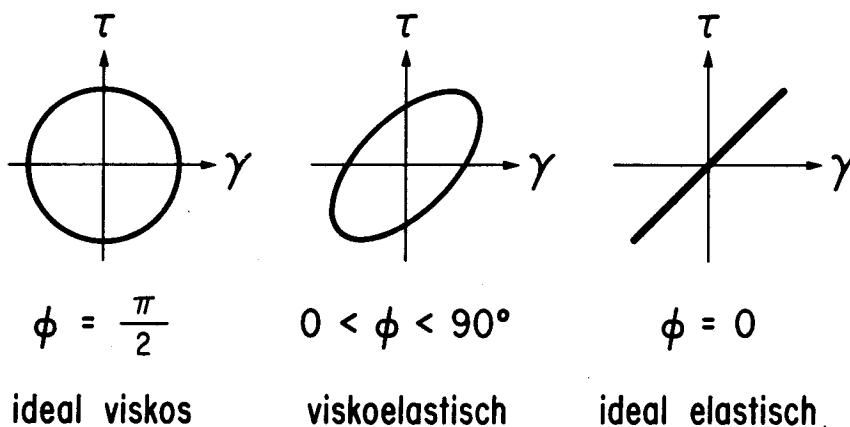
Allgemeines

Dieses Prüfverfahren und die in den Abbildungen 36 und 37 dargestellten Einbauten wurden als Ergänzung der Viskositätsprüfung und der technologisch-empirischen Prüfverfahren "Penetration", "Ring und Kugel" und "Brechpunkt" an Bindemitteln entwickelt.

Wesentlich war dabei das Schaffen einer Möglichkeit für das Bestimmen physikalischer Materialkennwerte der Bindemittel im mittleren bis tiefen Gebrauchsbereich der Temperatur, im Anschluss an Viskositätsmessungen ($-20 < T < 60^{\circ}\text{C}$). Für ein besseres Charakterisieren der viskoelastischen Baustoffe wurde das Bestimmen des Schubmoduls G aus statischen Versuchen und vor allem des komplexen Schubmoduls G^* sowie der Phasenverschiebung ϕ aus Schwingversuchen angestrebt, für

- Bindemittel und bituminöse Massen, insbesondere für modifizierte Bindemittel.
- Bindemittel-Filler-Gemische zum Bestimmen der Stabilisierungswirkung der Filler (Forschungsauftrag 3/83 des EDI, "Filler für bituminöses Mischgut"), in Ergänzung zu [86].
- Deckmassen von Dichtungsbahnen
- Kitte

Das unterschiedliche Verhalten ideal viskoser, viskoelastischer und ideal elastischer Stoffe im Schub-Schwingversuch zeigt die Abbildung 35 nach [64].



ϕ , Phasenverschiebung Spannung \longleftrightarrow Verformung

Abb. 35: Phasenverschiebung ϕ zwischen Spannung und Verformung im Schwingversuch; Beispiel Schubversuch.

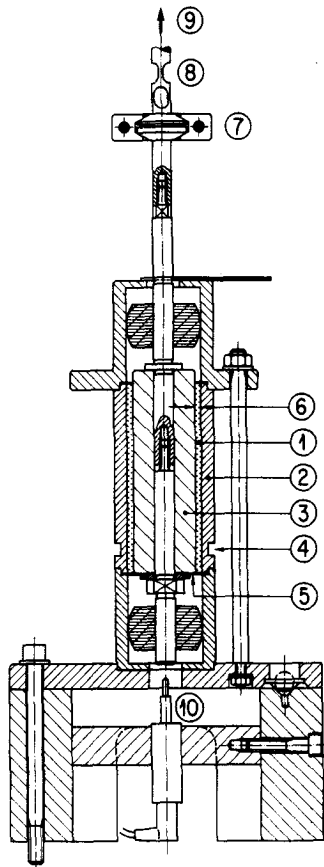


Abb. 36

Einbau EB 1a.

Prüfverfahren-Bindemittel-Schub-Axial, B-SA.

Abmessungen:

$R_1 = 20, 25, 27,5 \text{ mm}$

$R_2 = 30 \text{ mm}$

Legende:

- 1 Prüfgut (Bindemittel, Mastix)
- 2 äusseres Rohr R_2
- 3 inneres Rohr R_1
- 4 Nut für Lehre
- 5 elastische Membrane
- 6 Messspalt ($R_2 - R_1$)
- 7 Kupplung an Stelze/Kolben Prüfmaschine
- 8 Stelze
- 9 Kolben Prüfmaschine
- 10 Weggeber

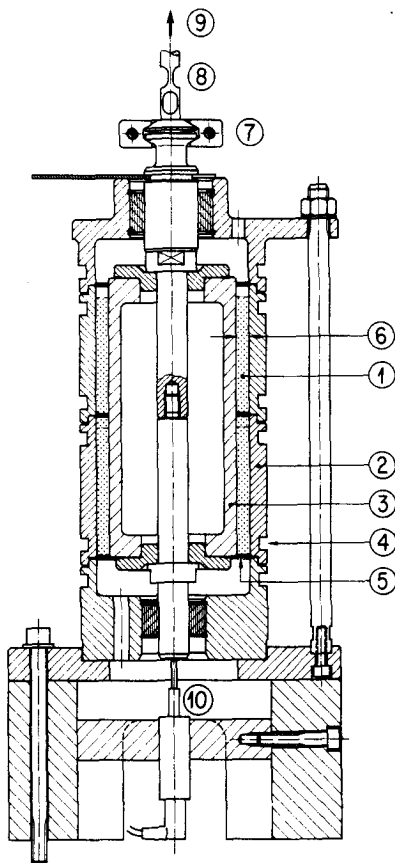


Abb. 37

Einbau EB 1b.

Prüfverfahren Bindemittel-Schub-Axial, B-SA.

Abmessungen:

$R_1 = 50, 55 \text{ mm}$

$R_2 = 60 \text{ mm}$

Legende wie Abbildung 36.

Das Prüfverfahren "Bindemittel-Schub-Axial" (B-SA)

Die gewählte Prüfanordnung für die Schubprüfung an Bindemitteln und Mastices in den Einbauten EB 1a und b mit konzentrischen Rohren zeigt Abbildung 38.

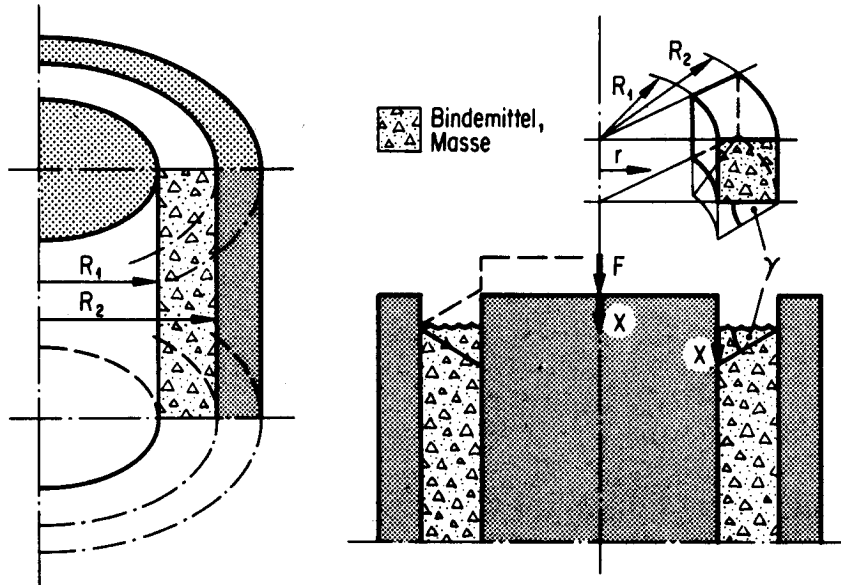


Abb. 38: Schema zur Schubbeanspruchung der Bindemittel in konzentrischen Rohren.

Die axiale Verschiebung x als Funktion der Kraft F und die weiteren physikalischen Größen τ , γ und G stehen unter der Annahme elastischen Verhaltens in folgenden Beziehungen:

$$\tau_r = \frac{F}{2r \cdot \pi \cdot h} ; \quad G = \frac{\tau}{\gamma} ; \quad \gamma = \frac{\tau}{G}$$

$$x = \int_{R_1}^{R_2} \gamma(r) dr = \frac{F}{2\pi \cdot h} \cdot \frac{1}{G} \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{r} dr =$$

$$\frac{F}{2\pi \cdot h} \cdot \frac{1}{G} (\ln R_2 - \ln R_1)$$

$$G = \frac{F}{x} \cdot \underbrace{\frac{(\ln R_2 - \ln R_1)}{2\pi \cdot h}}_K$$

Der statische Schubmodul berechnet sich somit zu

$$\underline{\underline{G = \frac{F}{x} \cdot K}}$$

Besteht die Beanspruchung eines viskoelastischen Prüfkörpers im Spalt aus einer sinusförmigen Kraft in Funktion der Zeit t ,

$$F(t) = F_0 \cdot \sin \omega t \quad \text{mit } F_0 = \text{Kraftamplitude,}$$

so resultiert im Versuch eine um den Winkel ϕ verschobene Verformung x von

$$x = x_0 \cdot \sin(\omega t - \phi) \quad \text{mit } x_0 = \text{Wegamplitude}$$

Daraus wird der komplexe Schubmodul berechnet zu

$$\underline{\underline{G^* = \frac{F_0}{x_0} \cdot K}}$$

In Abbildung 39 ist diese Abhängigkeit zwischen Kraft $F(t)$ und Verschiebung $x(t)$ dargestellt.

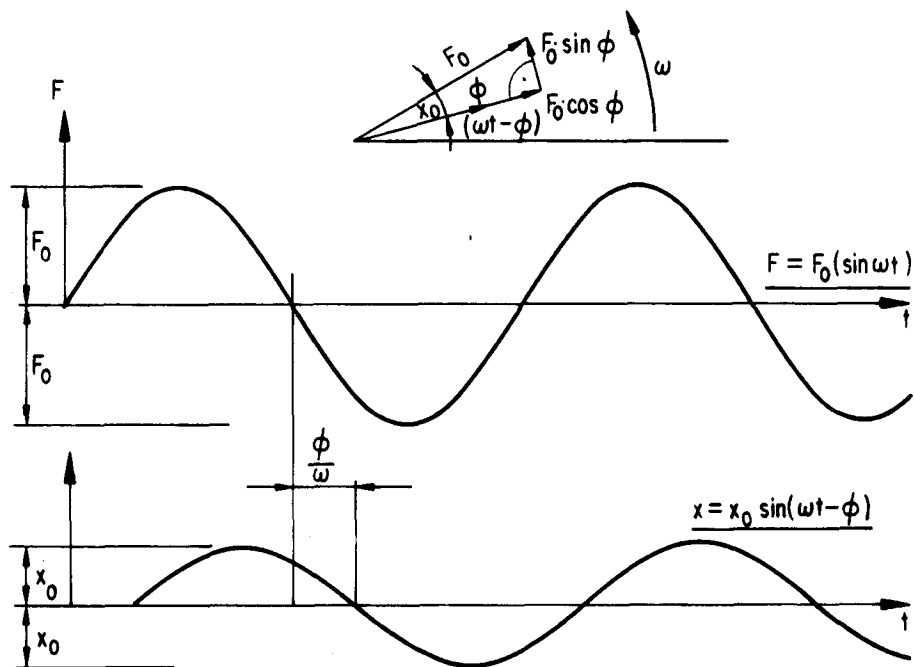


Abb. 39: Kraft-Verformungs-Beziehung bei Viskoelastizität und sinusförmiger Beanspruchung $F = F_0 \cdot \sin \omega t$.

Für das praktische Durchführen der Versuche ist festzuhalten, dass die Kraft im weggesteuerten Schwingversuch mit $x = x_0 \cdot \sin \omega t$ der Verformung zeitlich vorausläuft.

Aus dem Schubversuch wird der komplexe Schubmodul G^* in Funktion der Zeit explizit berechnet zu

$$G^*(t) = \frac{F_0 \cdot \sin(\omega t)}{x_0 \cdot \sin(\omega t - \phi)} \cdot K$$

Wegen der Phasenverschiebung ϕ ist dieser Ausdruck keine einfache Grösse mehr. Sie ist bei einer bestimmten Temperatur nicht nur von der Kreisfrequenz abhängig, sondern variiert auch mit der Zeit t [11].

Vom mathematischen Standpunkt aus gibt es einfachere Beziehungen, wenn Spannungs- sowie Verformungsschwingungen - und damit dieser Modul - als Vektoren in der Ebene der komplexen Zahlen dargestellt werden.

In der komplexen Schreibweise lauten die entsprechenden Gleichungen

$$F(t) = F_0 \cdot e^{i(\omega t)}$$

$$x(t) = x_0 \cdot e^{i(\omega t - \phi)}$$

und damit diejenige für den komplexen Schubmodul

$$G^* = \frac{F_0}{x_0} \cdot K \cdot e^{i(\phi)}$$

Daraus ergibt sich, dass der komplexe Schubmodul G^* nur von der Phasenverschiebung ϕ und insbesondere nicht mehr von der Zeit t abhängig ist.

In der Ebene der komplexen Zahlen wird der komplexe Schubmodul als Vektor dargestellt; siehe Abbildung 40.

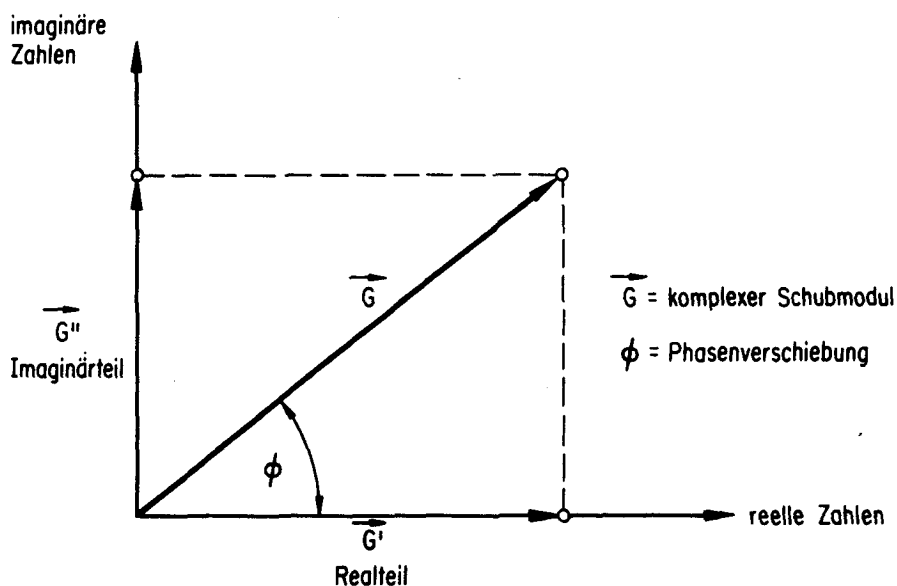


Abb. 40: Darstellung des Vektors \vec{G} und seiner Komponenten \vec{G}' und \vec{G}'' in der Ebene der komplexen Zahlen.

Die als Vektor dargestellte rheologische Grösse ist durch ihre Komponenten G' und G'' bestimmt. Damit ist der komplexe Schubmodul durch die Beziehung gegeben

$$\vec{G} = \vec{G}' + i\vec{G}''.$$

Die Bestimmungsgrössen des komplexen Schubmoduls können als Kennwerte viskoelastischer Materialien bei schwingender Beanspruchung verwendet werden.

Der Realteil des komplexen Schubmoduls ist durch die Gleichung gegeben

$$G' = |\vec{G}| \cos \phi.$$

G' ist ein Mass für die bei der Schwingung wiedergewonnene Verformungsenergie und damit auch ein Mass für die Elastizität des Materials. Deshalb wird G' auch als Speichermodul bezeichnet.

Der Imaginärteil ist durch die Gleichung definiert

$$G'' = |\vec{G}| \sin \phi.$$

G'' ist ein Mass für die bei der Schwingung infolge der Viskosität nicht wieder gewinnbar in Wärme umgewandelte oder verlorene Schwingungsenergie. G'' wird deshalb auch Verlustmodul genannt.

Aus dem Verlustmodul wird die Schwingungsviskosität berechnet zu

$$\eta' = \frac{G''}{\omega}.$$

Die Phasenverschiebung ϕ ergibt sich aus

$$\tan \phi = \frac{G''}{G'}.$$

$\tan \phi$ wird auch als Verlustfaktor bezeichnet und stellt ein Relativmass für die Energieverluste bei der Schwingung im Vergleich zur wiedergewinnbaren Energie dar.

Der Betrag des komplexen Schubmoduls

$$|\vec{G}| = \sqrt{G'^2 + G''^2}$$

wird als absoluter Modul bezeichnet. Er entspricht dem Quotienten der Scheitelwerte der Spannung und der Verformung.

Die Schwingungsviskosität η' berechnet sich explizit zu

$$\boxed{\eta' = \frac{G''}{\omega} = \frac{F_0}{x_0} \cdot K \cdot \sin \phi \cdot \frac{1}{\omega}} \quad \text{mit} \quad \omega = \frac{2\pi}{PT}.$$

In den Abbildungen 42 und 43 sind die Ergebnisse der Messungen an einem Bindemittel Bitumen B 80/100 dargestellt. Aus dem komplexen Schubmodul G^* lässt sich der Steifigkeitsmodul S_{bit} berechnen, unter der Annahme der Querdehnungszahl $\nu = 0,5$ (inkompressibler Prüfkörper) zu

$$S_{bit} = 2(1+\nu) \cdot G = 3G.$$

Als Vergleich sind in Abbildung 42 die aus den gemessenen Schubmoduln berechneten Steifigkeitsmoduln zusammen mit den aus dem Diagramm nach van der Poel in Abbildung 41 bestimmten S_{bit} -Werten eingezeichnet.

Die mit dem Prüfverfahren B-SA in ersten Testversuchen ermittelten Werte von S_{bit} liegen etwas höher, zeigen aber gesamthaft gute Übereinstimmungen mit den Werten nach van der Poel.

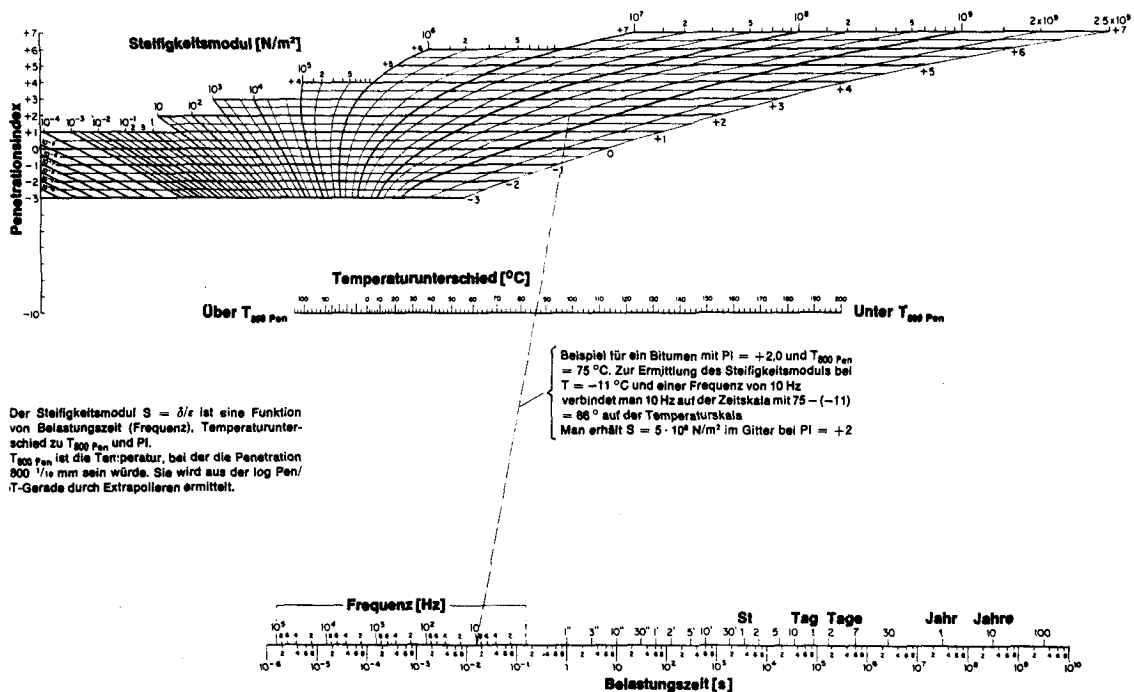


Abb. 41: Das van der Poel-Nomogramm für S_{bit} .

Das van der Poelsche Nomogramm basiert auf umfangreichen Untersuchungen an Normalbitumen. Seine Anwendung bleibt daher auf Normalbitumen beschränkt.

Das Bestimmen der S_{bit} -Werte für modifizierte Bindemittel und Mastices mit dem Prüfverfahren B-SA stellt somit eine Erweiterung der Prüftechnik dar. Ergebnisse dieser Testversuche sind in der Tabelle A1 im Anhang aufgeführt.

In Abbildung 43 ist die Abhängigkeit des Phasenwinkels ϕ_{F-x} in Funktion der Temperatur für die Frequenz $f = 1$ (s^{-1}) aufgezeichnet. Der Phasenwinkel $\phi_{F-x} = 0^\circ$ wird annähernd bei der Temperatur des Brechpunktes nach Fraas (T_{bp}) erreicht, umgekehrt tritt ein Phasenwinkel von 90° annähernd bei der Temperatur Ring und Kugel (T_{RuK}) auf.

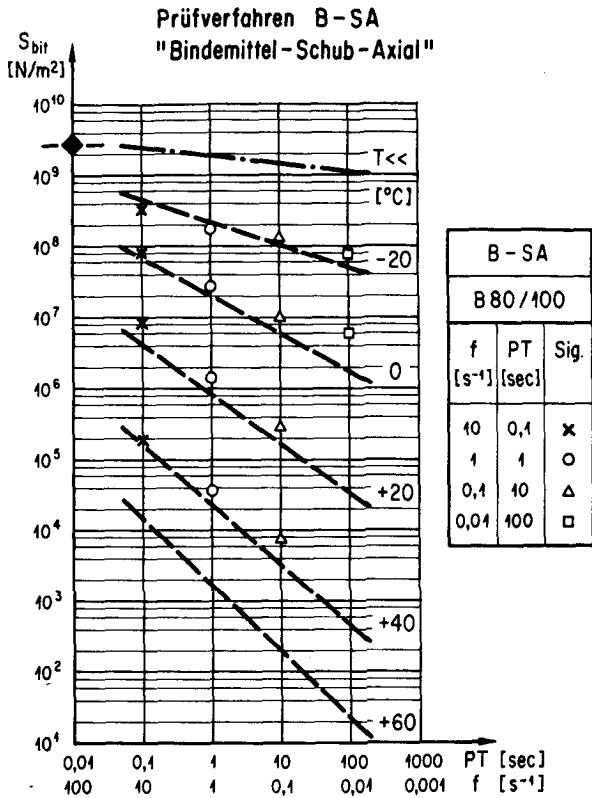


Abb. 42

S_{bit}-Werte für ein Bitumen B 80/100. Vergleich der mit dem Nomogramm nach van der Poel bestimmten Werte (---) und den S_{bit}-Werten aus dem Prüfverfahren B-SA für verschiedene Frequenzen und Temperaturen.

Der in [6] angegebene Grenzwert für S_{bit} von $\approx 3 \cdot 10^9$ (N/m²) ist mit der Signatur \blacklozenge bezeichnet. Er wird erreicht bei extrem tiefer Temperatur und/oder hoher Frequenz.

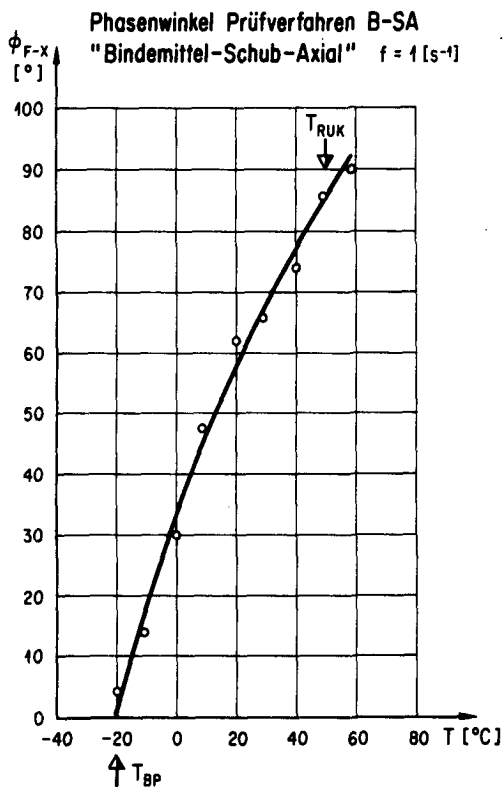


Abb. 43

Phasenwinkel ϕ_{F-x} , ermittelt im Prüfverfahren B-SA für verschiedene Temperaturen an einem Bitumen B 80/100 bei der Frequenz $f = 1 \text{ s}^{-1}$.

$$\phi_{TBP} \approx 0^\circ \text{ bei } T_{BP} = -20,5^\circ\text{C}$$

$$\phi_{TRuK} \approx 90^\circ \text{ bei } T_{RuK} = 49,8^\circ\text{C}$$

T_{BP}: Temperatur Brechpunkt nach Fraas

T_{RuK}: Temperatur Erweichungspunkt Ring und Kugel

7.22 EB 2: Einbau Fugendehnung

Allgemeines

Dieser Einbau wurde für das Bestimmen der Dehnbarkeit und des Haftvermögens bituminöser Massen und anderer Fugenmaterialien in Anlehnung an das Fugenmodell von Rabe [106] entwickelt. Wesentlich ist auch hier die Möglichkeit der Rationalisierung des Prüfvorganges durch gleichzeitiges Prüfen von vier Prüfkörpern.

Prüfeinrichtung

Einbau EB 2 gemäss den Abbildungen 44 und 45. Die Kraftmessung erfolgt über die auf der oberen Traverse der Universalprüfmaschine UVP 150 kN angeordneten Kraftmessdosen, die als Auflager für die mit den Prüfkörperhalterungen verbundenen Zugstangen dienen. Dehnen der Fugen durch Wegsteuerung des Kolbens der Prüfmaschine. Dieser wirkt über die Kraftmessdose auf den beweglichen Teil des Einbaus.

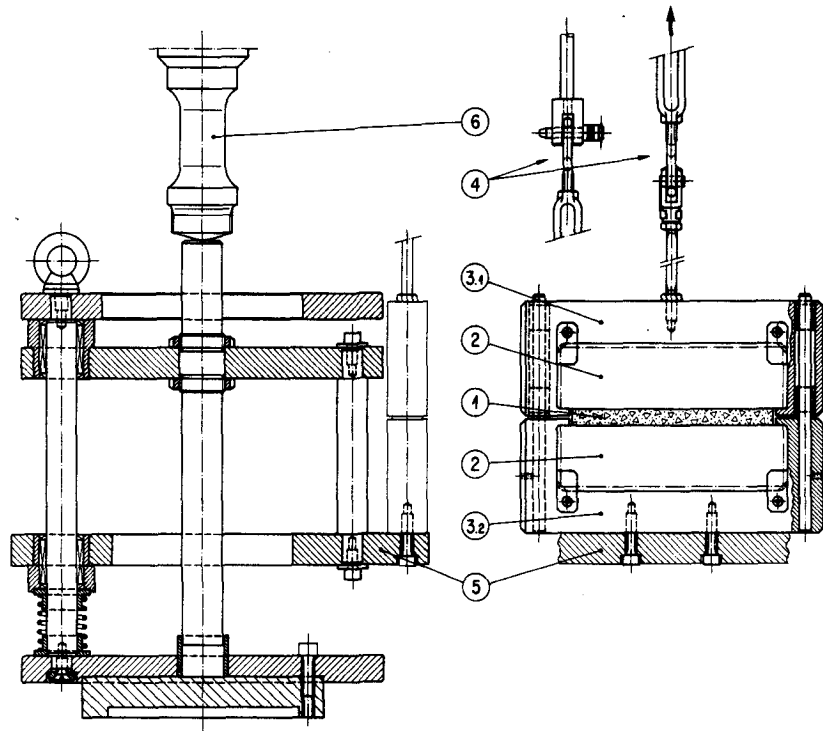


Abb. 44: Einbau EB 2; Fugendehnung (in Anlehnung an das Modell nach Rabe), Schema des Einbaus.

- 1 Fugenmaterial, Prüfkörper
- 2 Betonprismen
- 3 Prüfkörperhalterung, 3.1 fest, oben
3.2 beweglich, unten
- 4 Zugstange mit Kupplung und Spannvorrichtung
- 5 Beweglicher Teil des Einbaus (mit 3.2)
- 6 Druckmessdose am Kolben der Prüfmaschine

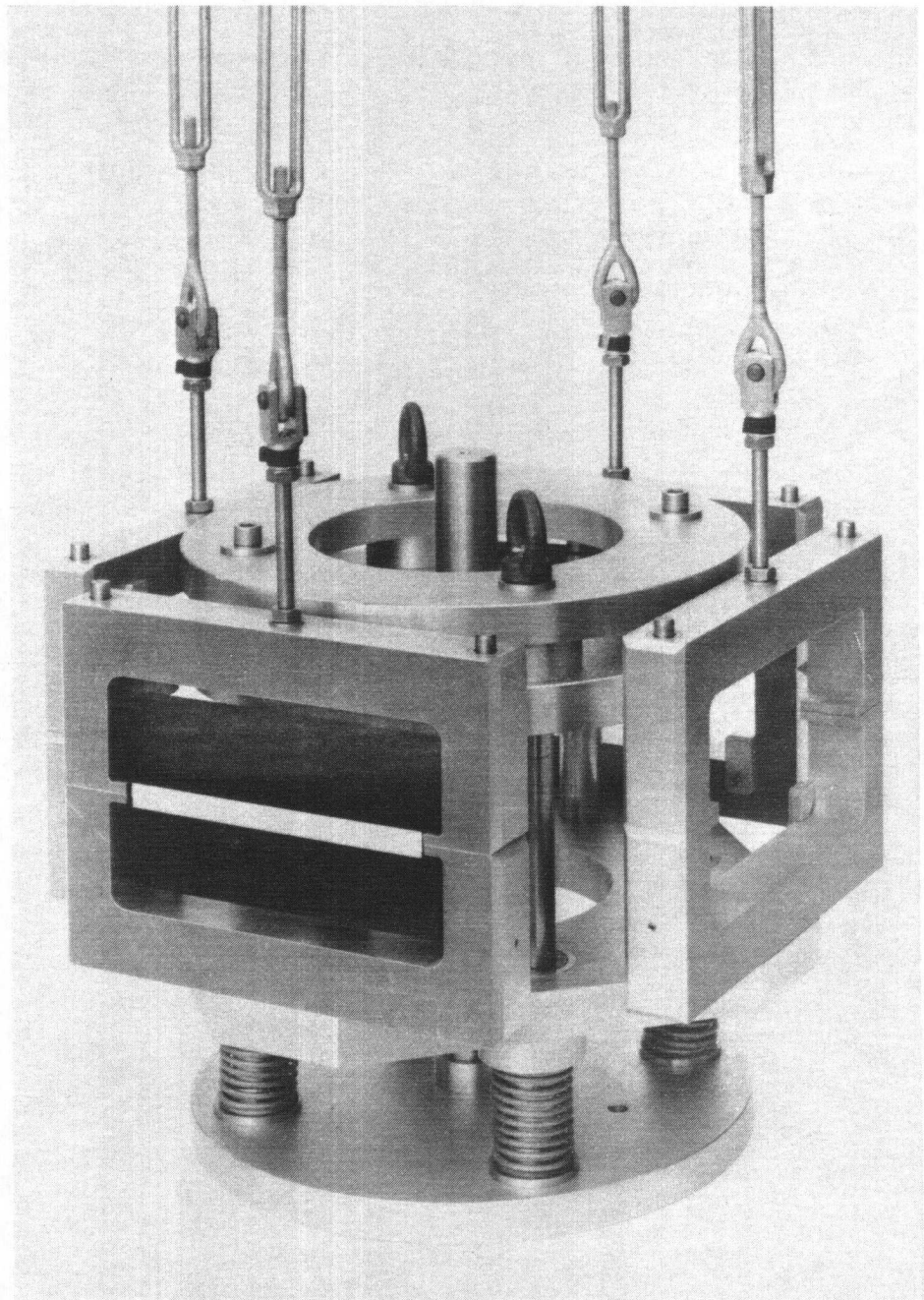


Abb. 45: Einbau EB 2, Fugendehnung (in Anlehnung an das Fugenmodell nach Rabe) mit eingesetztem Modellkörper, 4-fach Prüfvorrichtung.

Zusatzeinrichtungen Messkörper Fugen

Bei diesen Zusatzeinrichtungen handelt es sich um vier künstliche Fugen, die als Messkörper (Federkörper) in den Einbau eingesetzt werden. Diese Zusatzeinrichtungen wurden für das Überprüfen der Einstellungen der ganzen Prüfeinrichtung (Geber, Verstärker) gebaut.

Die Kontrolle der Zugkräfte bei vorgegebener Dehnung (Kolbenweg x) kann so in kurzer Zeit gemäss Eichskala (Kraft-Weg-Diagramme) der Messkörper erfolgen.

7.23 EB 3: Einbau Fugen Dehnen-Stauchen

Allgemeines

Diese Prüfeinrichtung ist in den Abbildungen 46 und 47 dargestellt. Der Einbau für das Dehnen und Stauchen von Fugenmassen ist eine Weiterentwicklung des Fugenmodells nach Rabe. Im Gegensatz zum Rabe-Versuch sind aber die Prüfkörper wesentlich kleiner, Abmessungen 50 mm x 15 mm x 15 mm. Das Prüfverfahren nach [107, 108] erfolgt auf Dehnen alleine oder auf Dehnen und Stauchen.

Prüfeinrichtung

Wesentlich ist für Dehn- und Stauchversuche die Möglichkeit der präzisen Vorspannung der Prüfkörper, damit im Dehnversuch eine einwandfreie Kraftmessung erfolgen kann.

Zusätzlich mussten Feststellschrauben für die Prüfkörper und die Prüfkörperhalterungen angeordnet werden. Für jeden Prüfkörper wurden Führungsstangen für die Prüfkörperhalterung eingebaut, um ein Verdrehen auszuschliessen. Diese Details sind aus der Schnittzeichnung in Abbildung 47 ersichtlich.

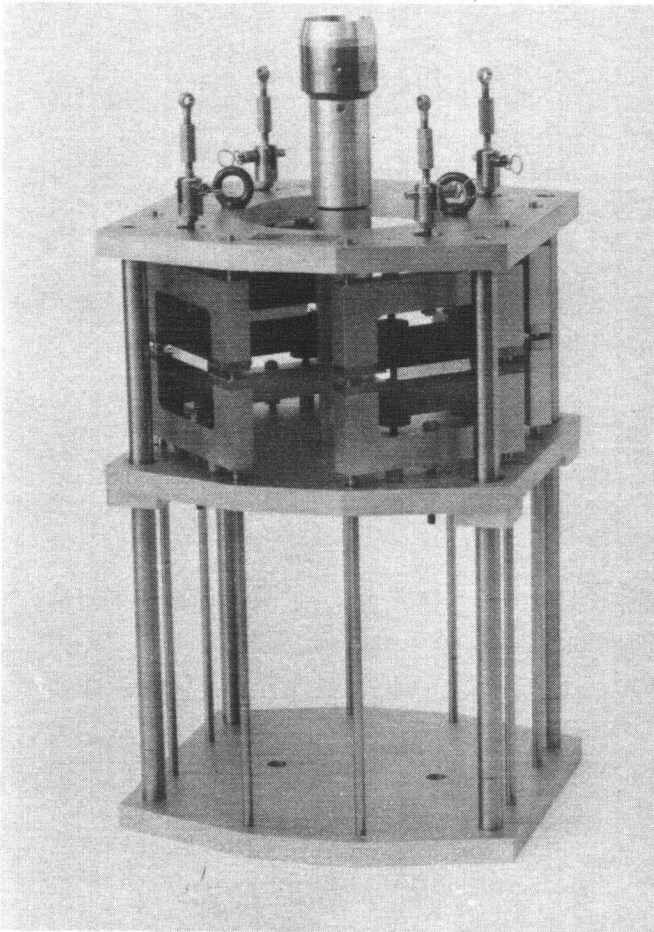


Abb. 46

Einbau EB 3; Fugen Dehnen-Stauchen.

Die Möglichkeit zur gleichzeitigen Prüfung von vier Prüfkörpern stellt auch für dieses Prüfverfahren eine wesentliche Rationalisierung dar. Dadurch kann die direkte Mittelwertbestimmung aus einer Gruppe von vier Prüfkörpern in einem Versuch erfolgen.

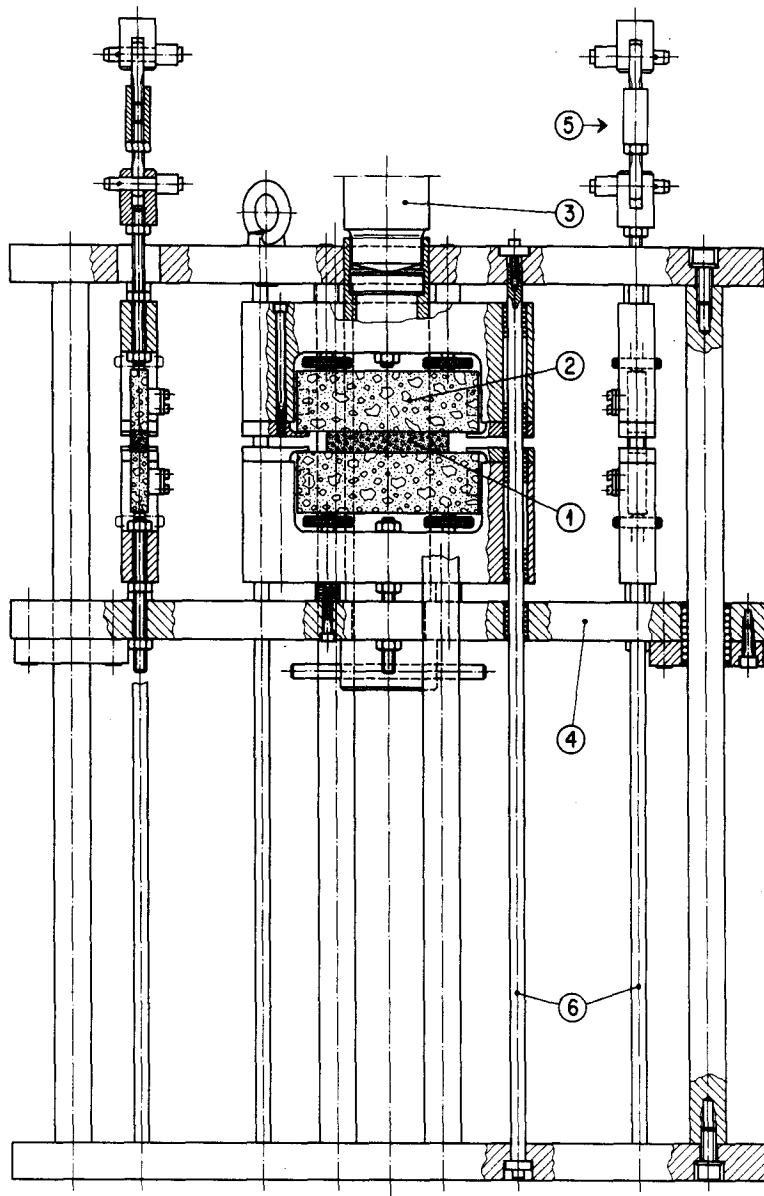


Abb. 47: Einbau EB 3; Fugen Dehnen-Stauchen.

- 1 Fugenmaterial (Prüfkörper)
- 2 Betonprismen (in Prüfkörperhalterung)
- 3 Druckmessdose Prüfmaschine
- 4 Beweglicher Teil des Einbaus
- 5 Kupplung an Zugstange mit Spanner
- 6 Führungsstangen als Verdrehschutz

7.24 EB 4: Zugversuche an Dichtungsbahnen

Allgemeines

Das Prüfen der Zugfestigkeit an Ausschnitten (an Streifen 400 mm x 50 mm, freie Einspannlänge 200 mm) von Abdichtungsmaterialien (Bitumen-Dichtungsbahnen und Polymermodifizierte-Bitumen-Dichtungsbahnen) wird beispielsweise mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 40 mm/min bei Raumtemperatur nach [109, 110] durchgeführt. Da diese Baustoffe teilweise grosse Bruchdehnungen (Dehnung beim Auftreten der Maximallast im Zugversuch per Definition) bis über 100 % aufweisen können, wird die Versuchsdauer relativ gross. Vor allem erfordert das Prüfen von mindestens fünf Prüfkörpern in Einzelversuchen für die Mittelwertbestimmung gemäss Normvorschrift hohen Zeitaufwand.

Um bei der grossen Anzahl durchzuführender Routineprüfungen einen vertretbaren Aufwand in der Versuchsdurchführung zu erreichen, wurden Massnahmen zur Rationalisierung dieser Prüfung unumgänglich.

Versuchseinrichtung

Der Einbau für Zugversuche an Abdichtungsmaterialien (Dichtungsbahnen) wurde zur Rationalisierung des Prüfvorganges als Prüfvorrichtung für das gleichzeitige Prüfen von sechs Prüfkörpern gebaut.

Wesentlich war auch die Entwicklung geeigneter selbstzentrierender Einspannvorrichtungen (Klemmbacken), die aus Abbildung 48 ersichtlich sind.

Das Erfassen der Versuchsdaten erfolgt mit einem 6-Kanalschreiber. Die einzelnen Kraft-Weg-Diagramme der verschiedenen Prüfkörper beginnen im Versuch bezüglich x verschoben, da die unteren Klemmbacken bei Versuchsbeginn noch nicht kraftschlüssig am beweglichen Teil des Einbaus anliegen.

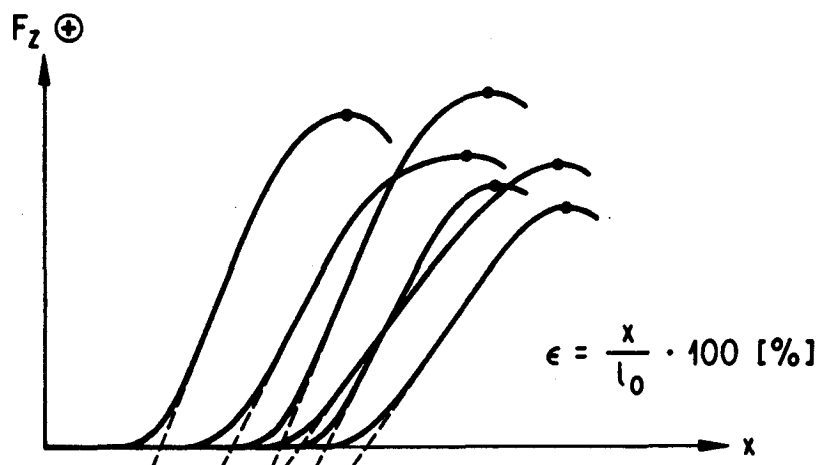


Abb. 48: Beispiel für Kraft-Weg-Diagramme im Zugversuch an Dichtungsbahnen; Erfassung mit 6-Kanalschreiber.

Angestrebt wird die Versuchsdurchführung im On-Line-Betrieb am Computer (Prozesssteuerung, Messwerverfassung und Auswertung).

Die nachstehende Abbildung 49 und die Abbildungen 29 und 30 zeigen den Einbau für Zugversuche an Ausschnitten von Dichtungsbahnen und die Anordnung der Druckmessdosen als Auflager der Zugstangen.

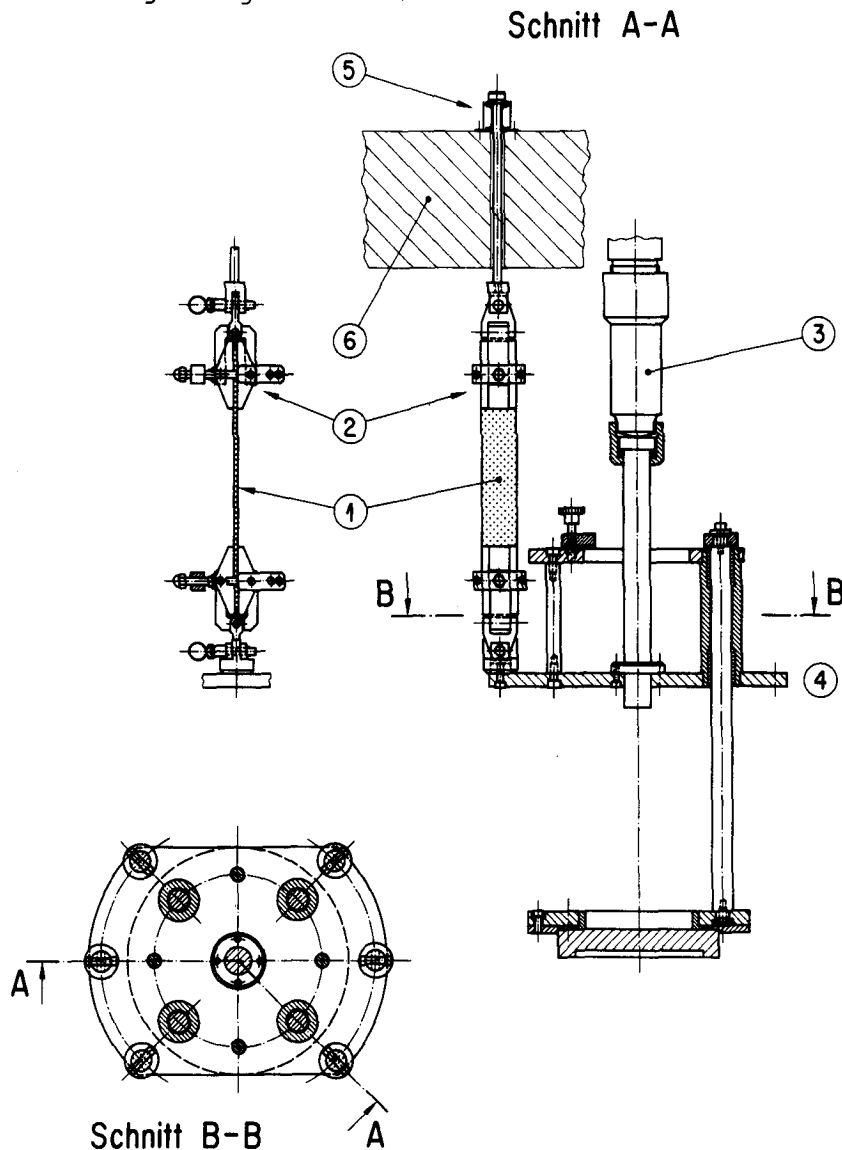


Abb. 49: Einbau EB 4; Zugversuche an Dichtungsbahnen.

- 1 Prüfkörper (400 mm x 50 mm)
- 2 Klemmbacken (100 mm x 50 mm)
- 3 Druckmessdose der Prüfmaschine, verbunden mit 4
- 4 Beweglicher Teil des Einbaus (Regelung Kolbenweg der Prüfmaschine)
- 5 Druckmessdose als Auflager der Zugstange
- 6 Obere Traverse Kraftrahmen der Prüfmaschine

7.25 EB 5: Einbau Ermüdung und Risseüberbrückung von Abdichtungsmaterialien (Dichtungsbahnen, Beschichtungen)

Allgemeines

Dieses Prüfverfahren dient der Charakterisierung und Funktionsprüfung von Abdichtungsmaterialien (Dichtungsbahnen oder Beschichtungen) unter statischer oder schwingender mechanischer Beanspruchung auf Dehnung. Die Rissöffnung muss unter der Anforderung bleibender Dichtheit des beanspruchten Materials überbrückt werden.

Prüfeinrichtung

Zwei horizontale Platten dienen als Träger zur Aufnahme der Prüfkörper. Sie liegen in einer Ebene und sind senkrecht zur Trennfuge (als vorgegebener "Riss") gegeneinander verschiebbar.


Die Öffnung der Trennfuge, somit die "Rissöffnung", wird mit einem Weggeber hoher Auflösung geregelt. Ein Zähler (Zyklenzähler der Prüfmaschinenelektronik) registriert die Anzahl Zyklen, beispielsweise bis zu einem vordefinierten prozentualen Abfall der Kraft im weggesteuerten Versuch oder die erreichte Zyklenzahl bis zum Moment der auftretenden Undichtheit des Prüfkörpers (eigentliche Funktionsprüfung).

Versuchsdurchführung

Nach [110] werden drei Prüfkörper der Abmessungen 200 mm x 350 mm geprüft. Die Prüfkörper werden im Standardversuch gemäss [110] (im Rahmen der Entstehung von [110] wurde dieses Prüfverfahren und dieser Einbau entwickelt) auf die Trägerplatten aufgeschweisst oder aufgeklebt.

Die Trägerplatten können verschiedene Ausgangsstellungen aufweisen:

Trennfuge (Rissöffnung) $AR = 0$ (geschlossen, = A_0) oder
 $AR \neq 0$ (offen)

Durch die Bewegung der Trägerplatten wird die Anfangsrissöffnung AR auf die maximale Rissöffnung MR erweitert. Die Prüfung wird weggesteuert, mit einer Halbwelle unter Dreiecksfunktion gefahren; Amplitude der Halbwelle ()

$$a_h = MR - AR$$

Versuchsablauf in Funktion der Zeit gemäss Abbildung 50.

PBD - Ermüdung, Risse-Überbrückung

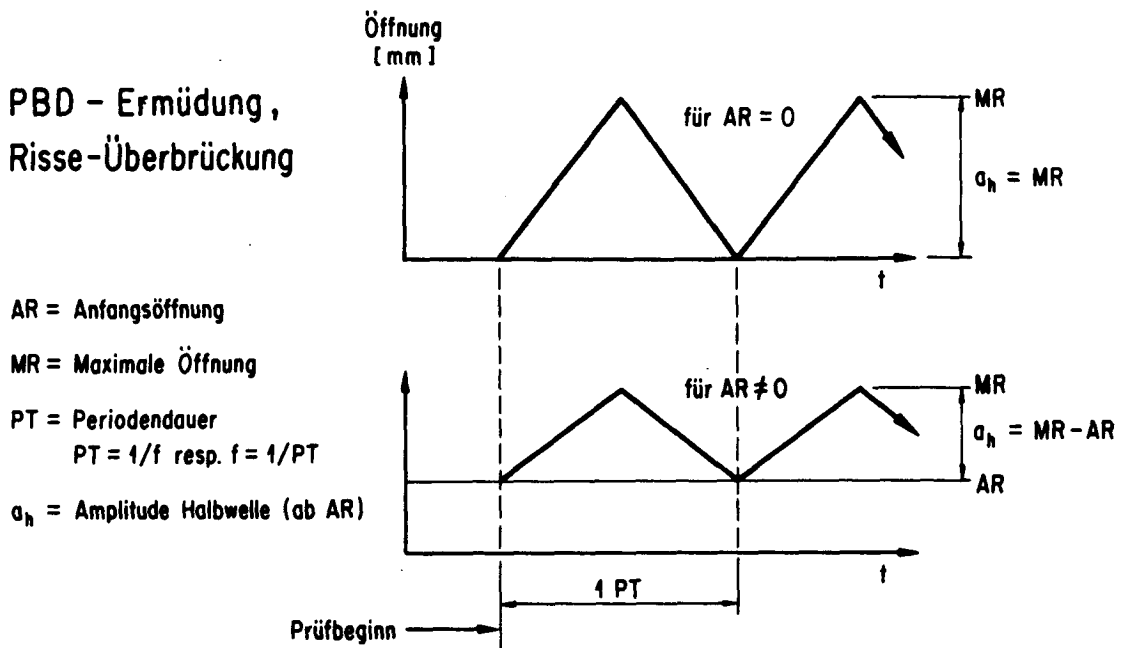


Abb. 50: Versuchsablauf Ermüdung/Risseüberbrückung (Zeit/Rissöffnungs-Diagramm). Versuchsablauf schematisch.

Für die Dichtheitsprüfungen werden die Prüfkörper seitlich aufgebordet. Die eigentliche Prüffläche von 150 mm x 300 mm wird mit etwa 10 mm Flüssigkeit überdeckt.

Durch das Anordnen einer geeigneten elektrischen Messeinrichtung (Auffanggefäß unter der Rissöffnung, Vakuumsaugung) wird der Moment der auftretenden Undichtheit der Prüfkörper durch Angabe der bis zu diesem Zeitpunkt ausgeführten Zyklenzahl festgehalten (1 Zyklus bedeutet eine Bewegung ab Anfangsrissöffnung AR auf die maximale Rissöffnung MR und wieder zurück auf die Anfangsrissöffnung AR).

Prüfparameter [110]

Für das Durchführen der Prüfung werden verschiedene Versuchsparameter gewählt. Ein Beschränken auf bestimmte Werte von AR, MR, f und T wird erforderlich, da nicht alle Kombinationen der Parameter nach Tabelle 16 gefahren werden können. [110] enthält vorläufig keine Anforderungen. Die Prüfung hat orientierenden Charakter und dient als relative Vergleichsbasis. Spezielle Einsätze dieser Prüfeinrichtung erfolgen auch für das Untersuchen von Fugenkonstruktionen von Fahrbahnbelägen auf Abdichtungen der Fahrbahnplatten von Brücken und Tunnels.

Als mögliche Versuchsparameter gelten die in Tabelle 16 angegebenen Werte nach [110].

Temperatur	T			+23	0	-10	°C
Anfangsöffnung	A	0	0,25	0,5		1,0	mm
Maximale Öffnung	M	0,25	0,5	1,0	2,0	3,0	mm
Amplitude Halbwelle	a_h	0,25	0,5	1,0		2,0	mm
Frequenz	f	1	10^{-1}	10^{-2}		10^{-3}	s^{-1}
Periodendauer	PT	1	10	100		1000	s

Die eingerahmte Parameterkombination entspricht der Prüfung nach CSTB für Elastomer-Bitumenbahnen. Diese Prüfung wird bis 500 Zyklen durchgeführt.

Tab. 16: Versuchsparameter Ermüdung, Risseüberbrückung.

Hinweis

Diese Prüfung basiert auf einem Entwurf des französischen CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). Die Prüfung nach CSTB ist jedoch durch weitere Versuchspunkte zu erweitern. Die Prüfung dient dem relativen Vergleich verschiedener Materialien untereinander, unter mechanischer Beanspruchung auf wiederholte Dehnung und als Qualitätsmerkmal für gleiche Materialien bei aufeinanderfolgenden Prüfungen. Grundsätzlich wird bei einer bestimmten Parameterkombination eine möglichst hohe Zyklenzahl bis zum Eintreten der Undichtheit angestrebt [101, 104].

Die Abbildungen 51 und 52 zeigen die Prüfeinrichtung und die Schnittzeichnung.

Legende zu Abbildung 51:

- 1 Prüfkörper
- 2 Trägerplatte
- 3 Klemmplatte
- 4 Beweglicher Rahmen
- 5 Weggeber
- 6 Führung
- 7 Kupplung am Kolben der servohydraulischen Prüfmaschine
- 8 Flüssigkeit
- 9 Auffangvorrichtung für 8 (Erfassung der auftretenden Undichtheit des Prüfkörpers, beispielsweise durch das Anordnen eines Vakuumkanals)

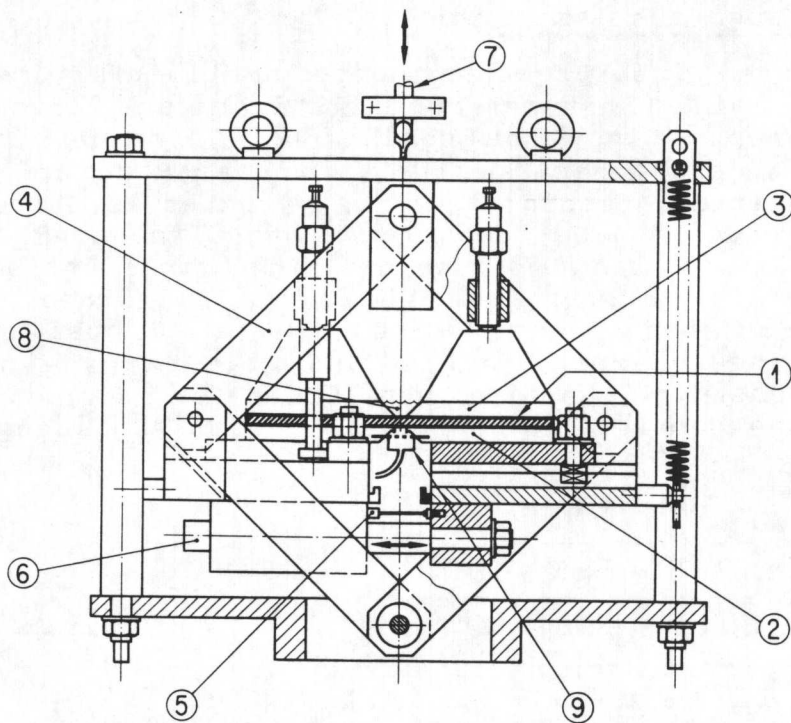


Abb. 51: Einbau EB 5; Ermüdung, Risseüberbrückung (Legende siehe Seite 90 unten).

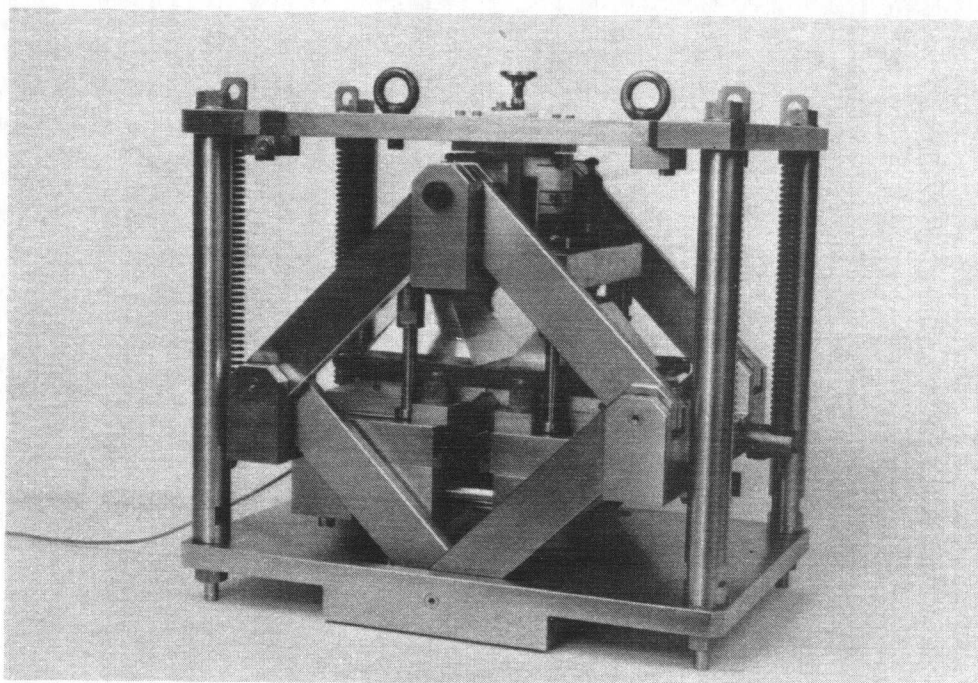


Abb. 52: Einbau EB 5; Ermüdung, Risseüberbrückung.

Ergebnisse aus Testversuchen

In ersten Testversuchen wurden Polymer-Bitumen-Dichtungsbahnen mit Elastomer-Modifikation der Deckmasse (Erweichungspunkt Ring und Kugel $\approx 120^{\circ}\text{C}$, Träger 250 g/m^2 flächenbezogene Masse) geprüft. Die Versuche erfolgten ab geschlossenen Trägerplatten (A_0) unter statischer Öffnung ($0,1 \text{ mm pro Minute}$) auf die Anfangsöffnung AR . Nach 1 Minute Relaxation auf AR wurde eine sinusförmige Schwingung (Halbwelle) überlagert, mit einer Amplitude $a_h = AR$. Die maximale Rissöffnung betrug $MR = 2 AR$, bei einer Schwingungsfrequenz von $f = 1 \text{ s}^{-1}$. Bestimmt wurde die erreichte Lastwechselzahl n bis zum Eintreten der Undichtheit in Funktion der Variablen $AR = a_h$ gemäss Abbildung 53.

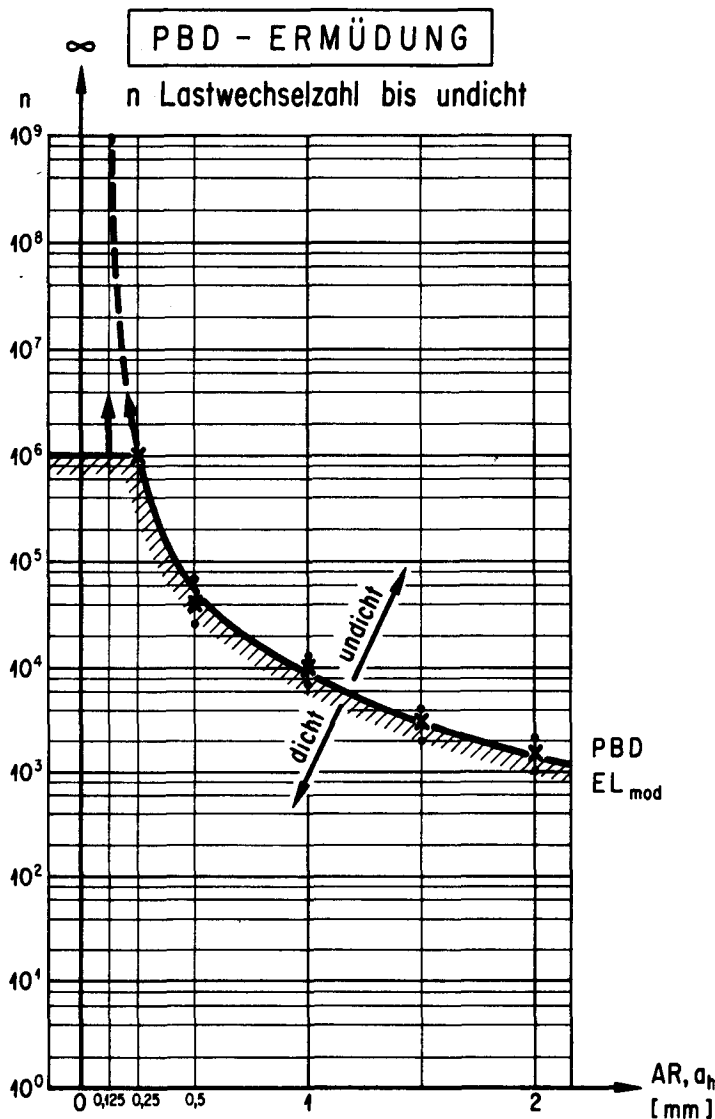


Abb. 53

PBD-Ermüdung bei $T = -10^{\circ}\text{C}$.

n : Erreichte Lastwechselzahl bis zum Eintreten der Undichtheit in Funktion von a_h . Statische Öffnung auf $AR = a_h$. Maximale Öffnung $MR = 2 AR$.

Erfassen der Kräfte "am Riss" siehe Abbildung 54.

$A_0 \rightarrow AR$	MR	$T = -10^{\circ}$	PBD 5mm
0	a_h	$f = 1 [\text{s}^{-1}]$	$\times EL_{mod}$

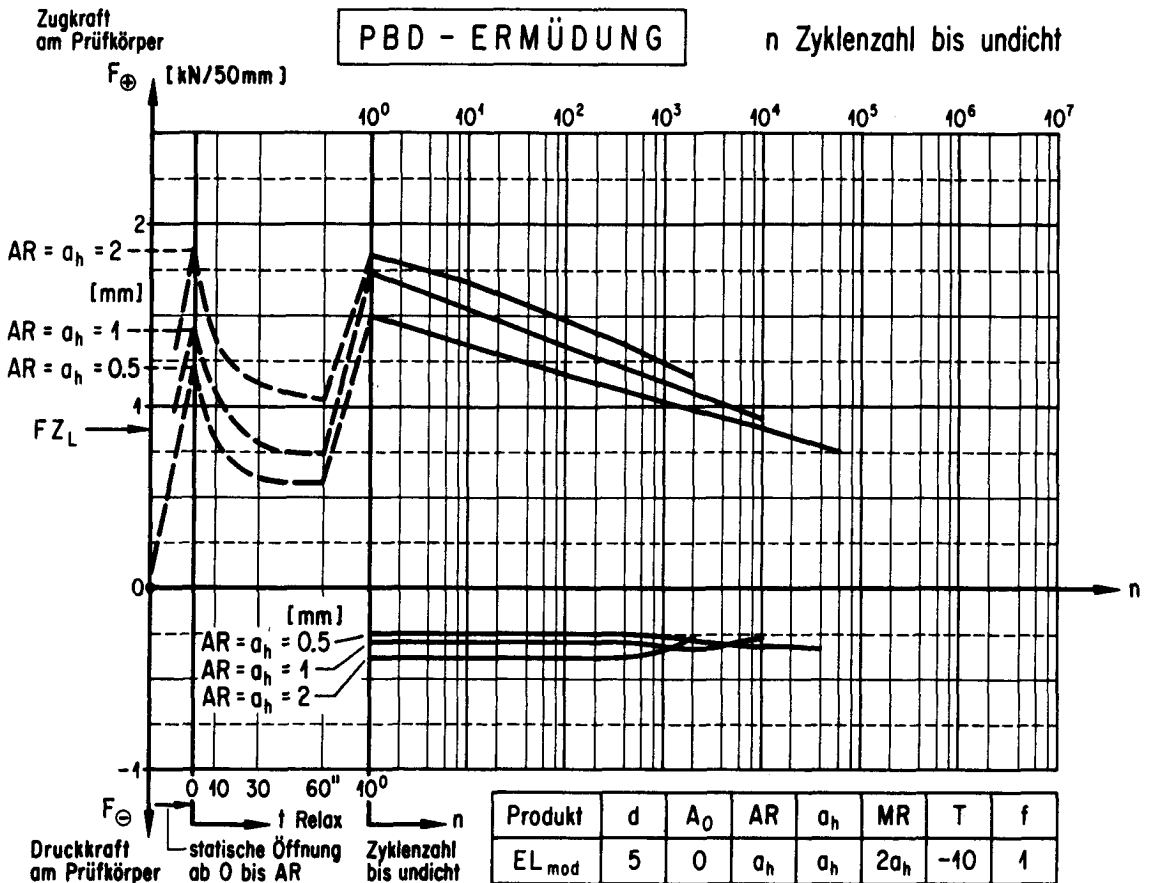


Abb. 54: PBD-Ermüdung bei $T = -10^{\circ}\text{C}$

Erfassen der Zugkräfte F_+ und der Druckkräfte F_- der Dichtungsbahn "am Riss", in Funktion der Lastwechselzahl n für die verschiedenen Anfangsöffnungen $AR = a_h$ ab $A_0 = 0$, und die maximalen Öffnungen $MR = 2a_h$ bei der Frequenz $f = 1$ (s^{-1}). Die im Prüfkörper "am Riss" wirkenden Kräfte F_+ und F_- wurden auf die Streifenbreite von 50 mm umgerechnet, um eine Relation mit der Reisskraft längs (F_{ZL}) im Zugversuch (Einbau EB 4) zu ermöglichen.

Aus Abbildung 54 ist zu erkennen, dass die auftretenden Zug- und Druckkräfte wie auch die erreichte Lastwechselzahl n gemäss Abbildung 53 von der gewählten Anfangsöffnung $AR = a_h$ und der nachfolgend im Schwingversuch erreichten maximalen Öffnung $MR = 2a_h$ abhängen.

Die in diesen Testversuchen ermittelten Kräfte und die Zyklenzahlen bis zum Eintreten der Undichtheit sind in der Tabelle A2 im Anhang aufgeführt.

7.26 EB 6 a + b: Einbauten Marshall "Standard" und Marshall "Gross" mit der Kontroll- und Zusatzeinrichtung "Marshall-Messkörper MAME 20 kN

Allgemeines

Diese Prüfeinrichtungen werden ebenfalls als Einbauten aufgeführt, da die Erweiterung des Marshall-Standardversuches auf Prüfkörper grösserer Abmessungen für bituminöses Mischgut mit Grösstkorndurchmesser grösser 16 mm schon länger diskutiert und angestrebt wird. Entsprechend werden im Teil IV, in Abschnitt 15.11 die Ergebnisse Marshall "Standard" im Vergleich zu Marshall "Gross" dargestellt.

Zum Marshallverfahren wurde der Marshall-Messkörper MAME 20 kN als Zusatzeinrichtung gebaut.

Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtungen sind in den Abbildungen 55 und 56 dargestellt.

Die langen Führungen an den unteren Hälften der Scherformen sollen das Ausfahren der oberen Scherform verhindern und so der Unfallgefahr bei der Versuchsdurchführung entgegenwirken.

Zusatzeinrichtung Marshall-Messkörper MAME 20 kN

Diese Zusatzeinrichtung (Federkörper mit Kraftbereich von 20 kN bei ungefähr 3 mm Weg) dient in erster Linie für Kontrollmessungen von Marshallpressen in verschiedenen Labors. Sie wurde speziell für Untersuchungen im Rahmen eines Forschungsauftrages "Marshall-Versuch" entwickelt und soll als Messkörper in einem Ringversuch mit verschiedenen Labors eingesetzt werden.

Mit diesem Messkörper können allfällige "Nichtlinearitäten" bestehender Prüfeinrichtungen festgehalten und die Abweichungen ΔF in Funktion des Weges bzw. Δx in Funktion der Kraft bestimmt werden (siehe Abbildung 57). Dazu wird jeweils die "innere Messung i" (am Marshall-Messkörper) mit der "äusseren Messung a" an der Prüfpresse verglichen (siehe Tabelle 17 und die Abbildungen 57 bis 60). Dadurch können beispielsweise bei grösseren Bauvorhaben, insbesondere bei in verschiedenen Labors vergleichend durchzuführenden Untersuchungen, Abklärungen allfälliger Einflüsse auf Seite der Prüfeinrichtungen erfasst und korrigiert werden.

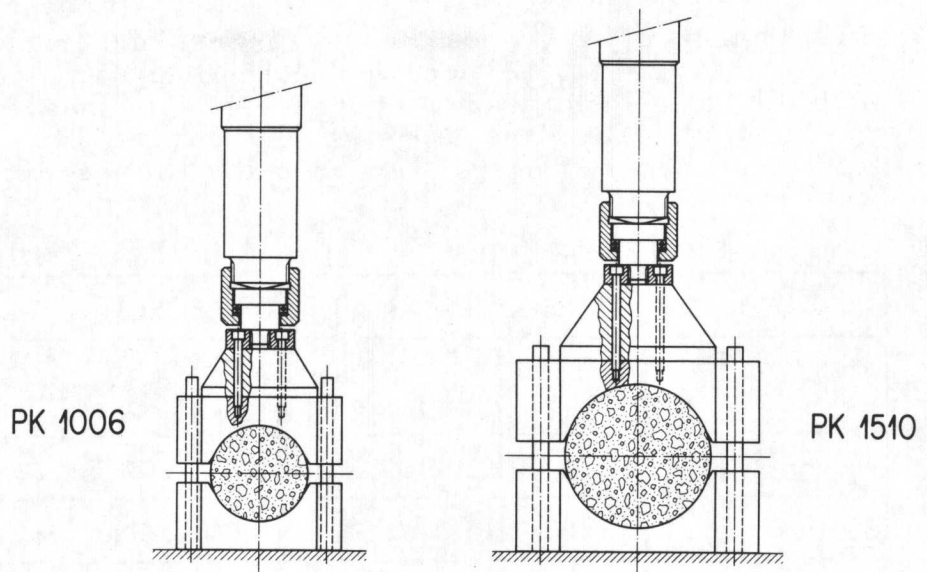


Abb. 55: Einbauten EB 6a und 6b; Marshall-Scherformen, Schema als Grössenvergleich.

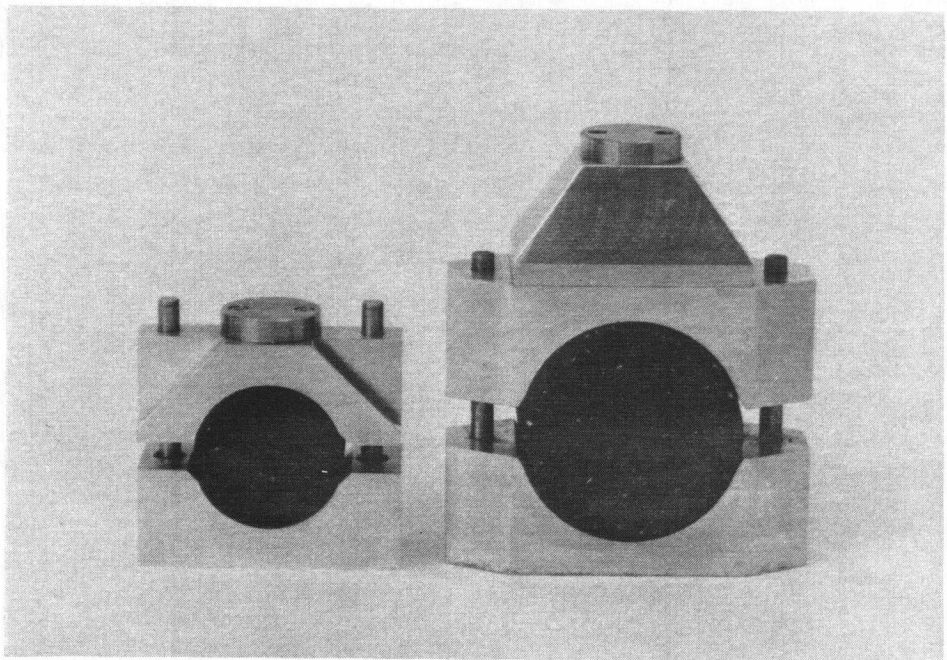


Abb. 56: Einbauten 6a und 6b; Marshall-Scherformen.

Links: Einbau EB 6a, Marshall-Standard, PK 1006
(Durchmesser 100 mm, $h \approx 65$ mm).

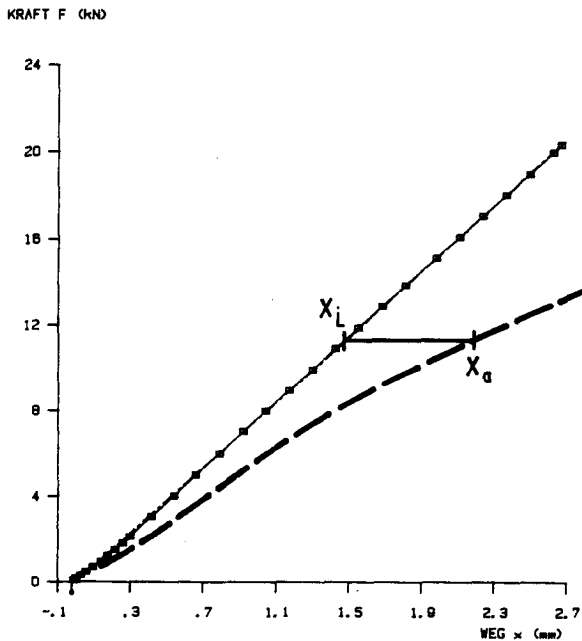
Rechts: Einbau EB 6b, Marshall Gross, PK 1510
(Durchmesser 150 mm, $h \approx 100$ mm).

Die Charakteristik des Marshall-Messkörpers MAME 20 kN ist aus der Tabelle 17 und der Abbildung 57 ersichtlich. Die Abbildung 58 zeigt schematisch ein aus innerer und äusserer Messung abgeleitetes Korrektur-Diagramm beispielsweise für den gemessenen Weg x (Verformung, FlieBswert) in Funktion der Kraft F .

Marshall-Messkörper MAME 20 kN							
Grösse	Messung						Mittelwert
	1	2	3	4	5	6	
Abschnitt	0.0041	0.0002	0.0028	0.0208	0.0303	0.0236	0.013 kN
Steigung	7.6402	7.6547	7.6710	7.6630	7.6710	7.6680	7.66 kN/mm
(Korrelationskoeffizient)	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	(0.9999) für $F(x)$

Tab. 17: Marshall-Messkörper MAME 20 kN, Kraft F in Funktion des Weges x (Verformung), 6 Messungen.

MARSHALL 20 kN 1. Messung



Abschnitt	Steigung	X-Mittel	Y-Mittel	Korr. Koeff.	Ans.
-411189E-2	7.6402	1.0706	8.17552	.999923	29

Abb. 57: MAME 20 kN, F/x -Diagramm als Messung i . x_a Messung an einer Prüfmaschine.

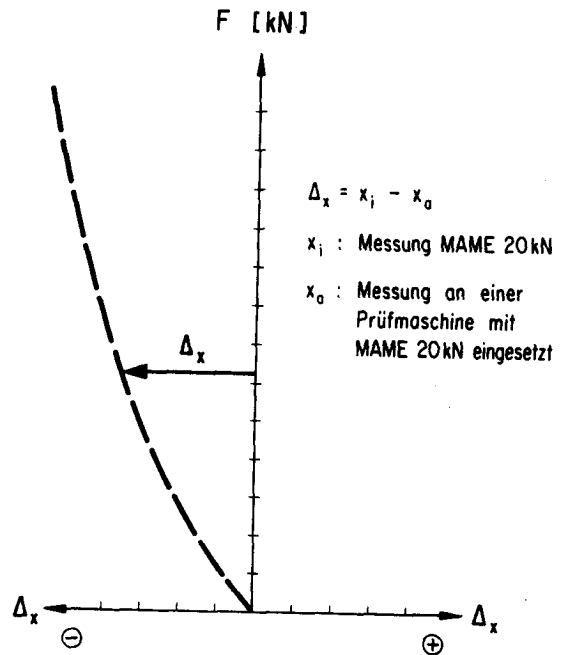


Abb. 58: Korrektur-Diagramm für x , schematisch $\Delta x(F)$.

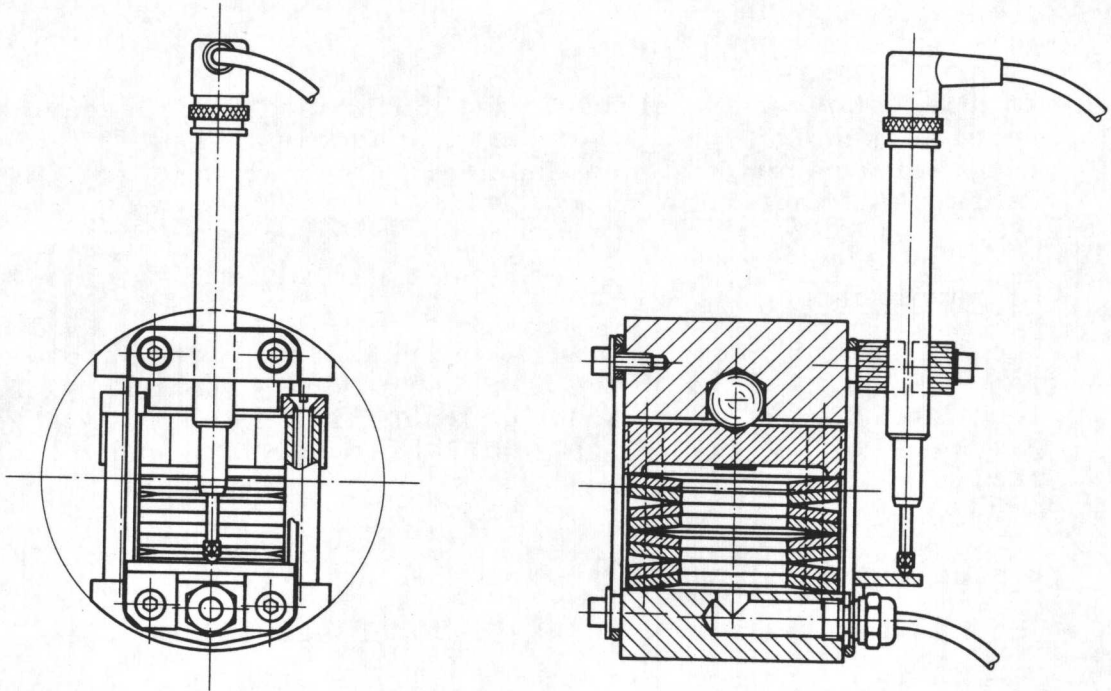


Abb. 59: Marshall-Messkörper MAME 20 kN mit eingesetztem Weggeber W5 (Taster), Ansicht und Schnitt.

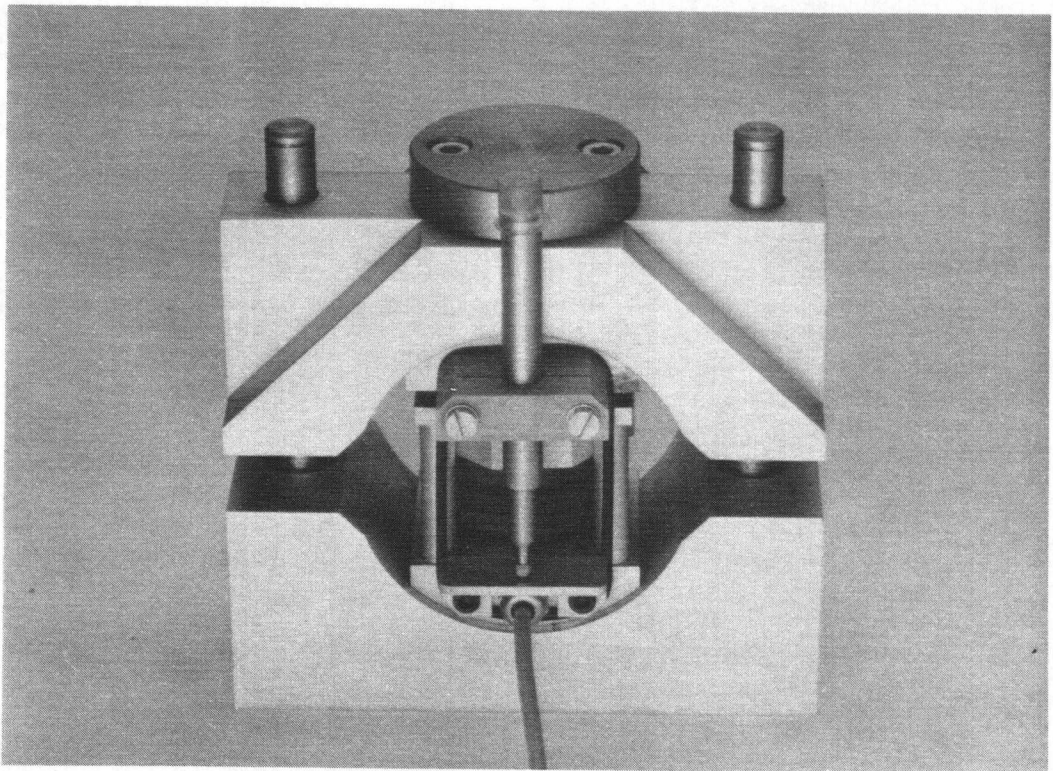


Abb. 60: Marshall-Messkörper MAME 20 kN mit eingesetztem Weggeber W5 (Taster).

7.27 EB 7: Einbau für Spaltzugversuche

Allgemeines

Im Spaltzugversuch erfolgt das Berechnen der Bruchspannung unter Anwendung der Elastizitätstheorie. Diese gilt näherungsweise aber für den Baustoff Asphalt nur im tieferen Gebrauchstemperaturbereich.

Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung wurde auf Prüfkörper mit Durchmessern von 100 mm, 150 mm und 200 mm mit Höhen bis 200 mm ausgelegt und für die Universalprüfmaschine UVP 150 kN konzipiert. Der Einbau ist in den Abbildungen 61 und 62 dargestellt.

Versuchsdurchführung

Der Spaltzugversuch kann kraft- oder weggesteuert erfolgen.

Zwei Weggeber für das Messen der Querdehnung sind auf Führungsschienen mit der Möglichkeit der Festarretierung auf Höhe der Radien der Prüfkörper beidseitig montiert.

Vor allem für Prüfkörper grosser Abmessungen (Durchmesser 150 mm, $h = 200$ mm) treten hohe Bruchkräfte (bis 150 kN) auf.

Zum Spaltzugversuch ist zu bemerken, dass verschiedene Untersuchungen Höchstwerte der Bruchspannungen bei einer Temperatur von rund -10°C zeigten. Bei dieser Temperatur tritt meistens schlagartig ein Sprödbbruch auf, der sehr oft auch ein Spalten der grösseren Mineralstoffkörner bewirkt. Tendenziell zeigen hohlraumärmere Mischungen (mit höherem Bindemittelgehalt) grössere Spaltzugfestigkeiten unter den genannten Versuchsbedingungen.

Die Ergebnisse aus Spaltzugversuchen sind in Teil IV, Vergleichende Untersuchungen, aufgeführt.

Der Spaltzugversuch wird vor allem in Belgien für Eignungsprüfungen und Kontrollprüfungen eingesetzt. Neuere Forschungsarbeiten mit dem Spaltzugversuch wurden auch in der Schweiz an verschiedenen Forschungsstellen durchgeführt.

Weitere Abklärungen und Untersuchungen mit diesem Prüfverfahren werden in [43] empfohlen.

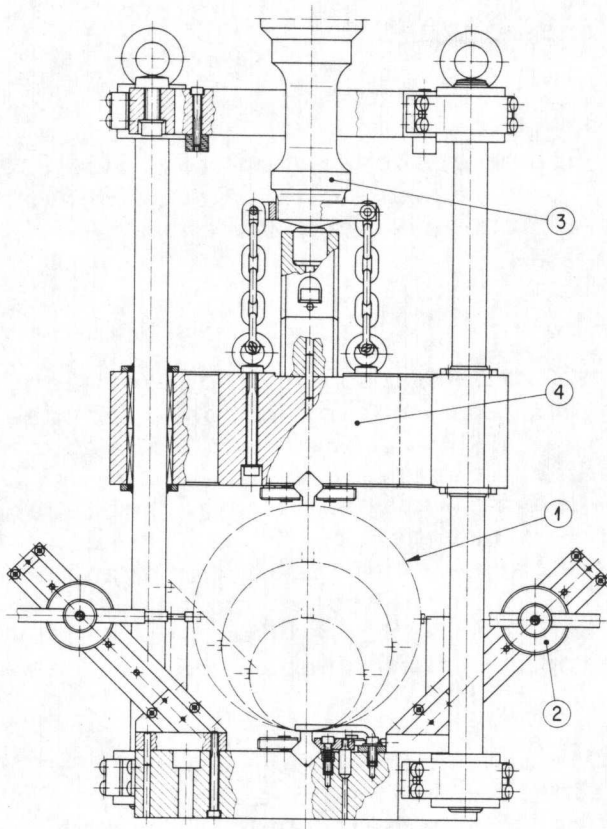


Abb. 61

Einbau EB 7, Spaltzug.

- 1 Prüfkörper
- 2 Basis Weggeber (Querdehnung)
- 3 Druckmessdose
UVP 150 kN
- 4 Beweglicher Teil des
Einbaus, verbunden
mit 3

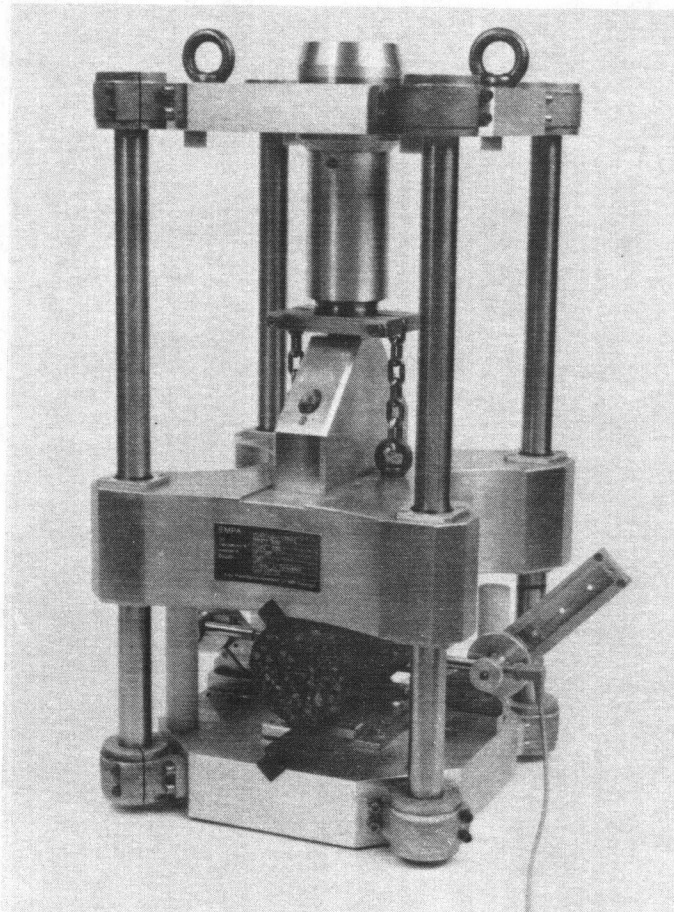


Abb. 62

Einbau EB 7, Spaltzug.

Eingesetzt ein PK 1020 mit
Durchmesser $d = 100$ mm,
Höhe $h = 200$ mm.

7.28 EB 8: Einbau für monoaxiale Druckversuche

Allgemeines

Der Einbau für monoaxiale Druckversuche wird für statische Versuche (Kriechversuche), Schwingversuche (Druck-Schwellbeanspruchung) oder Bruchversuche eingesetzt.

Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung ist ersichtlich aus den Abbildungen 63 bis 65. Für eine Anpassung an die Prüfkörperhöhe der festgelegten Prüfkörper der Typen 1006...2020 wurden entsprechende Sockel angeordnet. Die Messung der Querdehnung erfolgt auf der halben Höhe des Prüfkörpers mit 3 Weggebern. In diesen Einbau kann ein Volumenmesstabus in Verbindung mit dem Standrohr (Volumenmess-System VTU, Verdrängungsprinzip) als Zusatzeinrichtung eingesetzt werden, wobei die Querdehnung auch hier auf der halben Höhe des Prüfkörpers erfasst wird. Dazu sind Durchführungen für die Weggeber erforderlich.

Das Volumenmessverfahren VTU ist eher aufwendig (siehe Abbildung 65) und nur für statische Versuche geeignet. Als einfachere und für statische und schwingende Versuche geeignete Messeinrichtung wurde das Volumenmess-System VWI (Wicklung) nach Abbildung 64 eingesetzt.

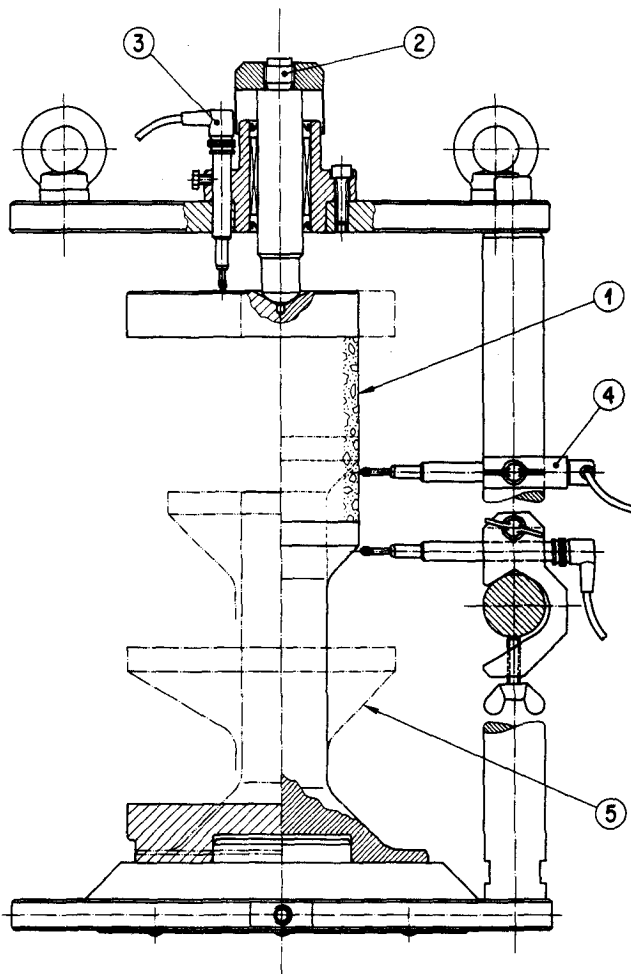


Abb. 63

Einbau EB 8, Einbau für monoaxiale statische und schwingende Druckversuche (Kriech- und Bruchversuche).

- 1 Prüfkörper
- 2 Belastungsstempel
- 3 Weggeber axial (2x)
- 4 Weggeber radial (3x)
- 5 Sockel zur Aufnahme der Prüfkörper (Anpassung an Durchmesser und Höhe der Prüfkörper).

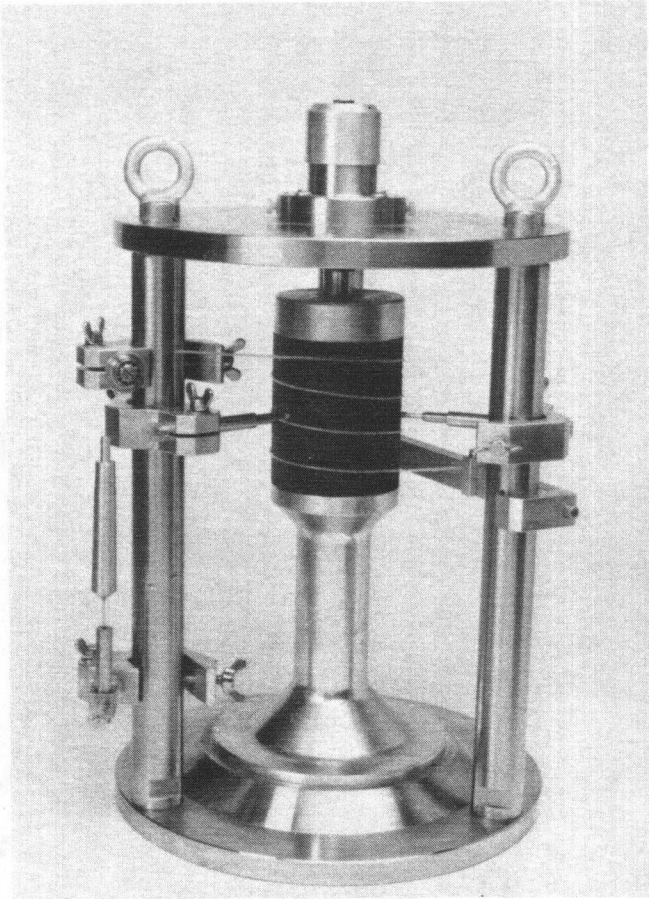


Abb. 64

Einbau EB 8, Monoaxiale Druckversuche, mit Zusatzeinrichtung Volumen-Messsystem "Wicklung" VWI. Eine Stahlsaite wird in kurzen Teflon-Schlauchabschnitten geführt, was deren radiale Verschiebung ermöglicht. Es erfolgt eine mechanische Umfangsmessung (Längenänderung) in der Abwicklung des Prüfkörpers.

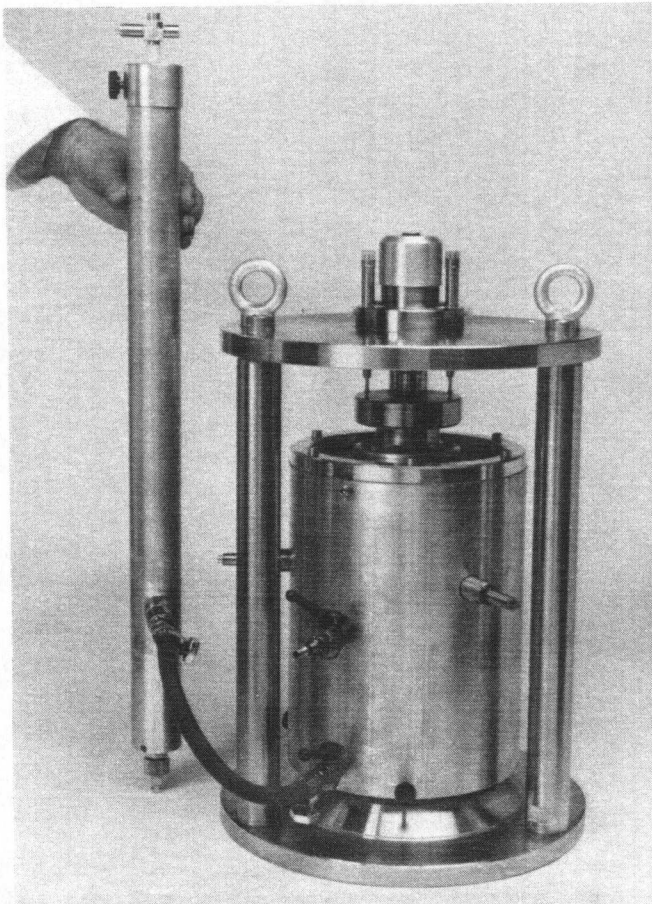


Abb. 65

Einbau EB 8, Monoaxiale Druckversuche, mit Zusatzeinrichtung Volumen-Messsystem VTU mit Tubus und Standrohr ST (Verdrängungsprinzip, kommunizierende Gefäße, nur für statische Versuche geeignet).

7.29 EB 9: Einbau Wechsellast monoaxial

Allgemeines

Die Erweiterung der monoaxialen Druckversuche auf monoaxiale Versuche unter Wechselbelastung kann mit diesem Einbau erfolgen.

Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung ist aus den Abbildungen 66 und 67 ersichtlich.

Es können Prüfkörper bis maximal 200 mm Durchmesser und 200 mm Höhe eingesetzt werden.

Die Messungen der Längenänderung, der Querdehnung und der Volumenänderung erfolgen entsprechend Einbau EB 8.

Versuche unter Wechselbelastung monoaxial sind speziell für die Untersuchung des eigentlichen Verformungsverhaltens von Asphalt angezeigt, wobei auch das Bestimmen der Querdehnungszahl ν im Vordergrund steht, um diesen Kennwert in weitere Berechnungen der Dimensionierung oder für die Auswertung anderer Prüfverfahren einsetzen zu können. Solche Untersuchungen erfolgten zum Beispiel am LCPC in Frankreich, an der TU München [42] sowie auch im Zusammenhang mit thermisch induzierten Spannungen an der TU Braunschweig [41]. Mit Schwerpunkt Verformungsverhalten von Gussasphalt wurden Versuche unter Wechselbelastung monoaxial und triaxial am Institut für Bau- und Werkstoffkunde der ETH-Zürich [62 und 63] durchgeführt.

Im Zusammenhang mit der Untersuchung des Kälteverhaltens bituminöser Beläge werden vermehrt auch die Eigenschaften polymermodifizierter Bindemittel analysiert. Dies erfolgt auch durch das Erfassen der infolge der Kältekontraktion auftretenden Spannungen resp. durch die Untersuchung des anschliessenden Relaxationsverhaltens der Beläge [41, 42].

Um allfällige Zwängungen bei der Einspannung infolge fehlender Planparallelität der Prüfkörper-Endflächen auszuschliessen, wurde eine spezielle Einspannvorrichtung am beweglichen Teil des Einbaus gewählt. Unter geringer Druckvorspannung kann die obere, am Prüfkörper vorgängig aufgeklebte Stirnplatte mit dem beweglichen Teil des Einbaus verbunden werden, unter Anpassung mit Stell- und Spannschrauben. Diese Details sind aus den Abbildungen 66 und 67 zu entnehmen.

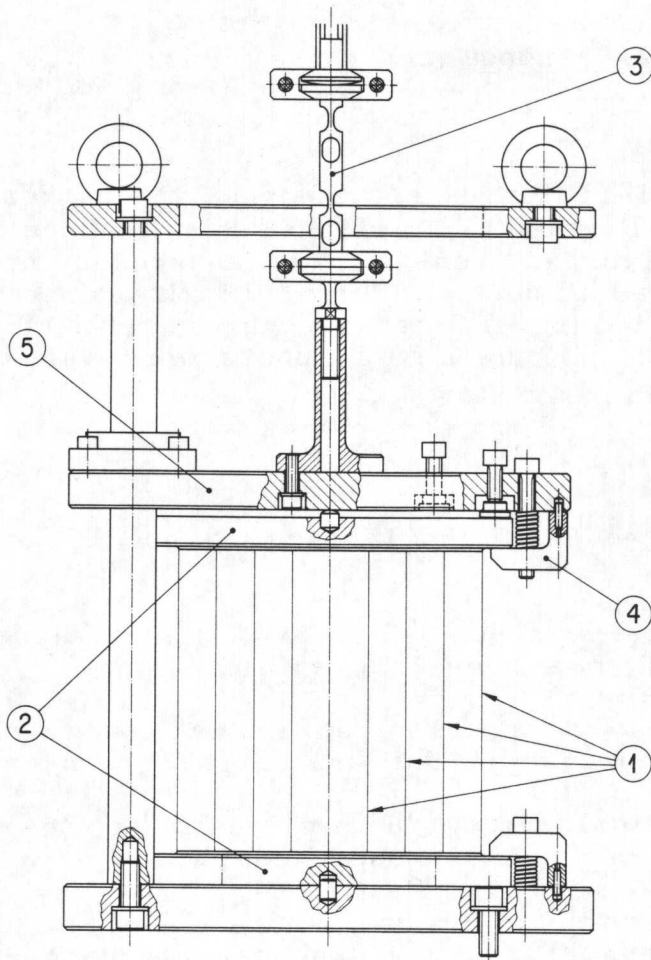


Abb. 66

Einbau EB 8, Wechsellast monoaxial.

- 1 Prüfkörper
- 2 Zug-Druckplatten (an Prüfkörper geklebt)
- 3 Stelze mit Kupplungen an Einbau und Kolben der Prüfmaschine
- 4 Einspannvorrichtung für 2
- 5 Beweglicher Teil des Einbaus

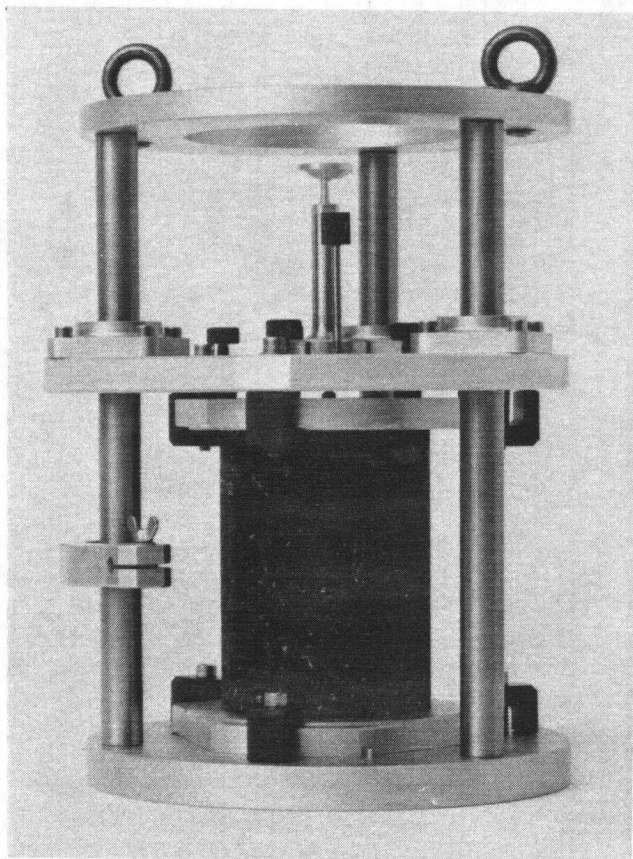


Abb. 67

Einbau EB 9, Wechsellast monoaxial.

Axiale Weggeber (3x) werden beispielsweise bei der Prüfung der "Kälte-Kontraktion-Relaxation" zwischen die Druck- und Zugplatten (auf Prüfkörper geklebt) eingebaut.

7.210 EB 10: Einbau zur 4-Punkt-Biegung

Allgemeines

Dieser Einbau wurde speziell für Untersuchungen an Prüfkörpern in Form von Prismen gebaut. Ähnliche Untersuchungen werden im Labor des Dienstes Weg-en Waterbouwkunde des Rijkswaterstaates der Niederlande in Delft, DWW/NL, durchgeführt. Die Anwendung dieser Prüfvorrichtung ist auch für die Baustoffe Holz und Beton sowie für Kunststoffe vorgesehen.

Prüfvorrichtung

Die Prüfvorrichtung ist aus den Abbildungen 68 und 69 ersichtlich.

Es können Prüfkörper (Prismen) von 40 mm x 40 mm x 500 mm bis 100 mm x 100 mm x 600 mm eingesetzt werden.

Speziell wurde bei der Konstruktion auf eine optimale, zwängungsfreie Einspannmöglichkeit der Prüfkörper geachtet.

Dazu wurde das äussere Auflager A "unten" fest und "hinten", "oben" und "vorne" verstellbar ausgeführt.

Die inneren Auflager B und C sowie das äussere Auflager D sind nach dem Einsetzen des Prüfkörpers und der Einspannung in Auflager A von allen vier Seiten an den Prüfkörper anpassbar.

Die Versuchsdurchführung kann kraft- oder weggesteuert erfolgen.

Wesentlich an dieser Prüfvorrichtung ist die Lagerung der Einspannquerschnitte in der Ebene der O-Achse des Prüfkörpers. Die Einspannquerschnitte sind zudem drehbar gelagert.

Für den Einbau des Prüfkörpers muss die Prüfvorrichtung in der Klimakammer der Prüfmaschine um 90° gedreht werden.

Als Vergleichsuntersuchungen konnten 4-Punkt-Biegeprüfungen im Rahmen der in Teil IV beschriebenen Untersuchungen in Zusammenarbeit mit dem Dienst Weg-en Waterbouwkunde in Delft DWW/NL durchgeführt werden.

Untersucht wurden Prismen aus im Labor durch Walzverdichtung hergestellten Belagsplatten nach Abschnitt 14.4 (Tabelle A15 im Anhang). Die Ergebnisse der 4-Punkt-Biegeprüfungen sind in Abschnitt 15.23 aufgeführt.

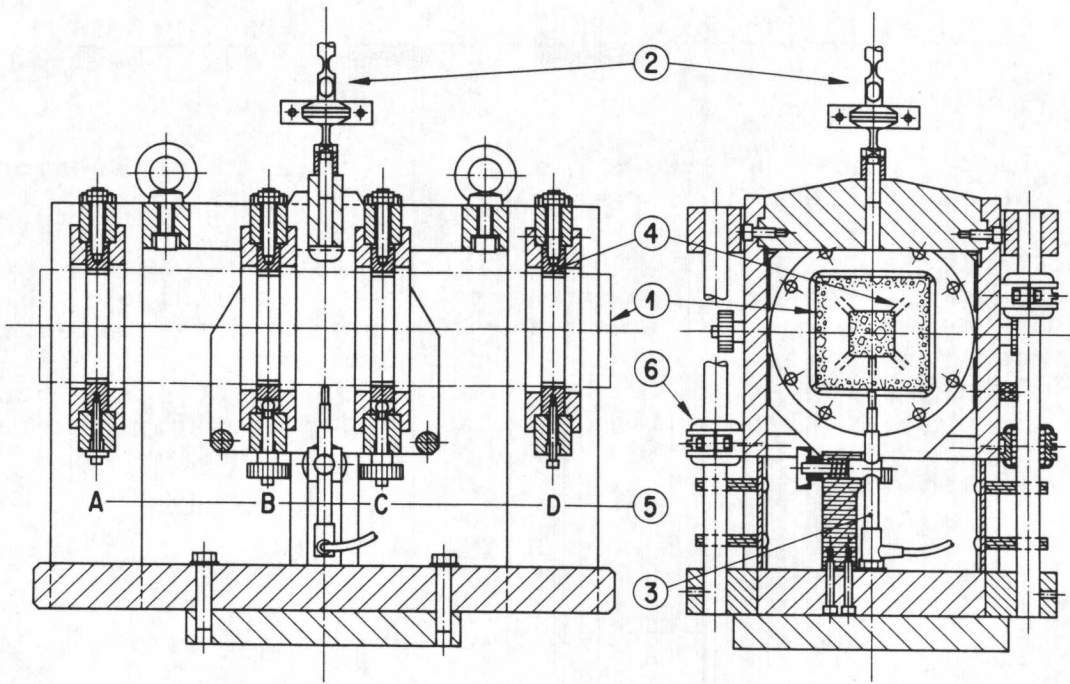


Abb. 68: Einbau EB 10, 4-Punkt-Biegung.

- | | |
|-------------------------|--------------------|
| 1 Prüfkörper | 4 Klemmbacken |
| 2 Stelze mit Kupplungen | 5 Auflager A bis D |
| 3 Weggeber W1, Taster | 6 Führungen |

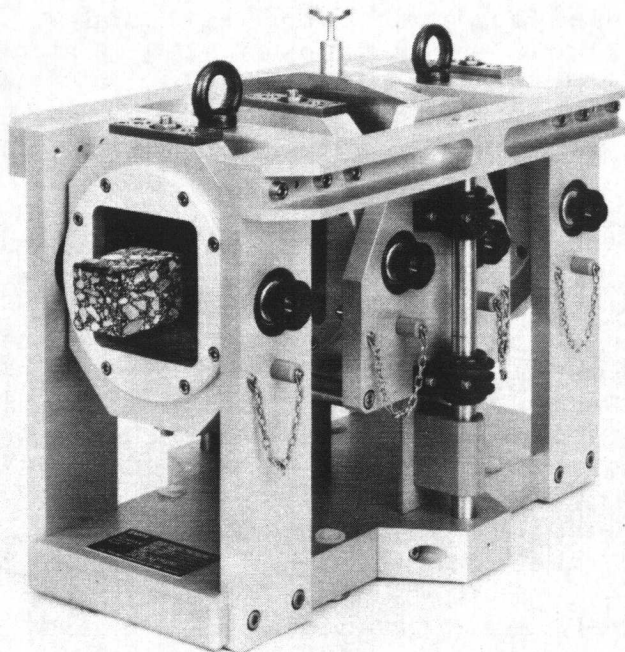


Abb. 69: Einbau EB 10, 4-Punkt-Biegung.

7.211 EB 11 a, b: Einbauten PK-Biege-Schub-Axial (PK-BSA)

Allgemeines

Diese Einbauten wurden zu dem in Teil III beschriebenen, neu entwickelten Prüfverfahren PK-BSA realisiert.

Zielsetzung dieses Prüfverfahrens ist das Erarbeiten von Materialkennwerten an Belagsschichten, die direkt ab Bohrkernen aus der Strasse entnommen wurden (Initialzustand IP der Praxis der Prüfkörper) in Ergänzung und im Vergleich zu Materialkennwerten, die an im Labor hergestellten Prüfkörpern (Initialzustand IL des Labors der Prüfkörper) erarbeitet werden. Ergebnisse solcher Untersuchungen sind in den Teilen IV und V aufgeführt.

Prüfeinrichtungen

Die Prüfeinrichtungen sind in den Abbildungen 70 und 71 dargestellt.

Als Prototypen wurden 2 Einbauten realisiert:

- EB 11a für Prüfkörper \emptyset (100) 150 mm, h = 20....80 mm
- EB 11b für Prüfkörper \emptyset 150...300 mm, h = 30...250 mm

Versuchsdurchführung

Die Versuche werden vorwiegend kraftgesteuert gefahren. Gemessen werden die Amplituden von Kraft und Verformung axial (Verschiebung x) und der Phasenwinkel ϕ_{F-x} .

Die ausführliche Beschreibung des Prüfverfahrens PK-BSA und der Resultate von Testversuchen erfolgt in den Teilen III und IV.

Erste Vorversuche wurden mit aussen kreisringförmig aufgelegten Prüfkörpern und für die Krafteinleitung gegeneinander leicht vorgespannten, zentrisch in der Achse angeordneten Belastungsstempeln (daher relativ aufwendige Einspannvorrichtung beim Prototypen EB 11a) durchgeführt. Diese Konfiguration hätte keine oder minimale (Schleifen) Prüfkörpervorbereitungen erfordert, konnte aber wegen der viskosen oder plastischen örtlichen Verformungen der Prüfkörper nur im Tieftemperaturbereich eingesetzt werden. Die gleiche Bemerkung gilt für eine Zwischenstufe zur jetzigen Prüfanordnung, wobei der Prüfkörper wiederum aussen kreisringförmig aufgelegt, zentrisch aber mit dem eingeklebten Belastungsstempel versehen wurde.

Um einwandfreie Prüfbedingungen zu erhalten, musste in der Folge das System der "gelochten Scheibe" mit umklebtem Hüllrohr als Auflager und eingeklebtem Belastungsstempel, gemäss den Abbildungen 70 und 71 sowie Abbildung 80 in Teil III, gewählt werden.

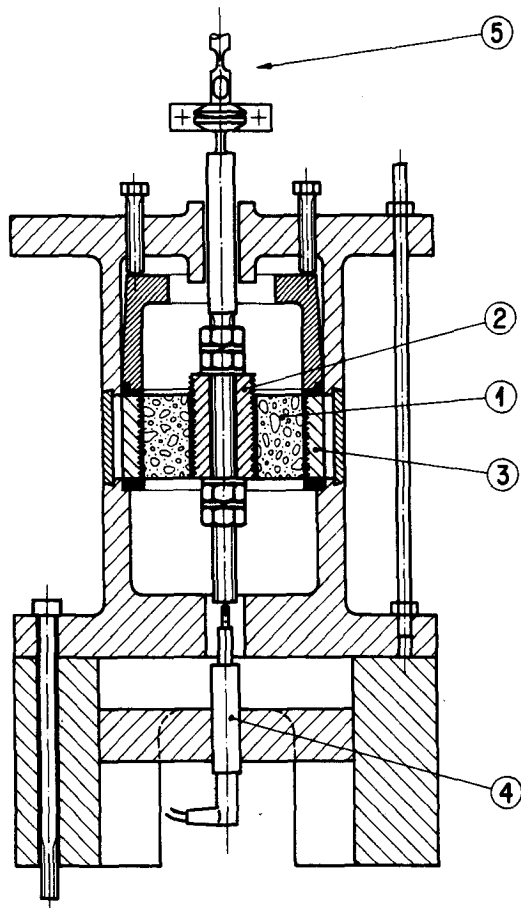


Abb. 70

Einbau EB 11a, Prüfverfahren PK-BSA, Prüfkörper-Biege-Schub-Axial für Prüfkörper mit Durchmesser 100 mm und 150 mm.

- 1 Prüfkörper
- 2 Belastungsstempel eingeklebt, an Prüfmaschine gekoppelt (Gewindezapfen mit innen durchgeführter und verschraubter Gewindestange)
- 3 Hüllrohr geklebt, als Auflager
- 4 Weggeber W1 (Taster)
- 5 Kupplung an Stelze bzw. Kolben der Prüfmaschine

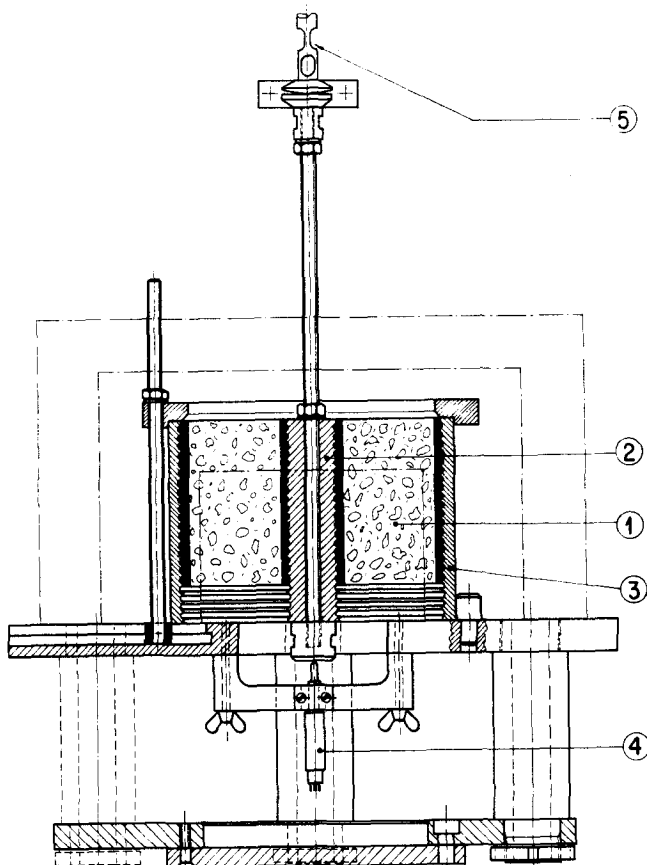


Abb. 71

Einbau EB 11b, Prüfverfahren PK-BSA, Prüfkörper-Biege-Schub-Axial für Prüfkörper mit Durchmesser 150 mm, 200 mm und 300 mm.

Prinzip und Legende gemäss Abbildung 70.

Weitere Entwicklungen von Einbauten für das Prüfen von Prüfkörpern, bestehend aus mehrschichtigen Belagpaketen, sind in Bearbeitung (für Bohrkerne bis 500 mm Durchmesser und Höhen bis 300 mm).

7.212 EB 12: Einbau Triaxialzelle mit Seitendruckelement (SDE)
und den Zusatzeinrichtungen Messkörper-Triax (MT)
und Volumen-Messzylinder Triax (VT)

Allgemeines

Triaxialversuche werden in erster Linie für Untersuchungen im Rahmen von Forschungsarbeiten eingesetzt [60...64].

Die Entwicklung einer speziellen Triaxzelle für statische und schwingende Druckversuche an Asphaltprüfkörpern unterschiedlicher Abmessungen und an Bodenproben ergab sich aus der Zielsetzung möglichst praxisnaher Schwingversuche mit gleichzeitig schwingender Radialspannung σ_{23} , bezeichnet als Seitendruck.

Zu diesem Zweck wurde als integrierter Teil des Triaxialsystems das Seitendruckelement SDE entwickelt. Das Seitendruckelement wird mit der Triaxzelle zu einem geschlossenen System verbunden. Siehe dazu die Abbildungen 72 bis 75.

Triaxzelle

Die Triaxzelle wurde für Prüfkörper der Typen PK 1012, 1020, 1520 und 1530 (siehe Abbildung 5) ausgelegt.

Sie ist mit einem doppelten Mantel versehen, wobei der äussere Mantel der Temperierung des eigentlichen Druckmediums in der Triaxzelle dient.

Die Druck- und Temperaturmessungen erfolgen im Innern der eigentlichen Druckzelle.

Unter einigen Anpassungen konnte dieses Konzept der Triaxialzelle vom Institut für Strassenbau der ETH-Zürich übernommen und für statische Versuche eingesetzt werden [64].

Seitendruckelement SDE

Das Seitendruckelement wurde für das Erzeugen der statischen oder schwingenden Radialspannung im Triaxialversuch (bezeichnet als Seitendruck) entwickelt.

Die Konstruktion besteht aus einem Stahlfaltenbalg, welcher über zwei Verbindungsleitungen an die Triaxzelle angeschlossen wird. Die eigentliche Druckerzeugung erfolgt durch Krafteinleitung auf das Seitendruckelement in einer weiteren Prüfmaschine der Prüfanlage DYNASPHALT. Das Seitendruckelement wird an Stelle eines Prüfkörpers in den Einbau EB 8 für monoaxiale Druckversuche eingesetzt und wirkt als Umsetzer von Kraft nach Druck; siehe Abbildungen 73 bis 75.

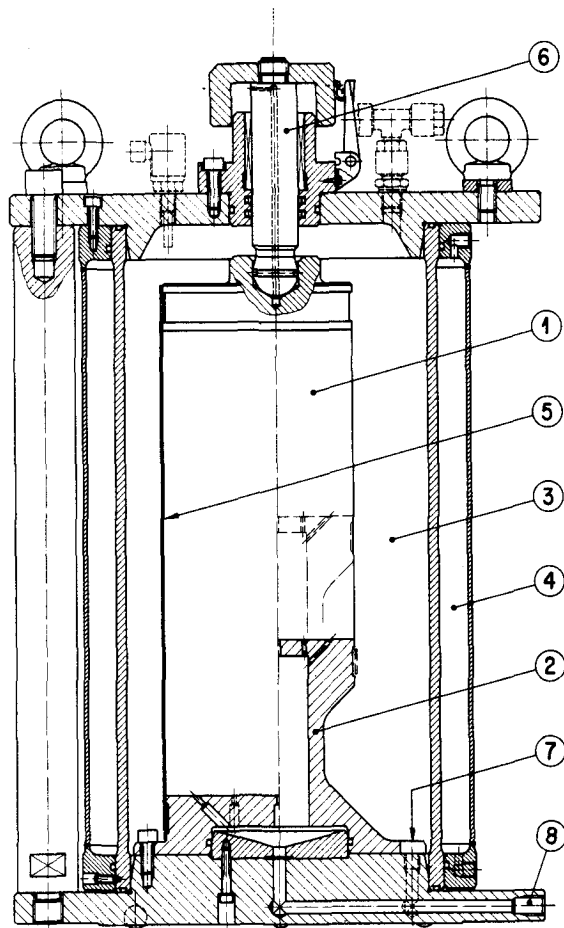


Abb. 72

Einbau EB 12, Triax-Zelle.

- 1 Prüfkörper
- 2 Sockel zur Aufnahme von 1 (Sockel gelocht, für das Erfassen des Porenwasserdruckes)
- 3 Druckmedium
- 4 Temperiermedium
- 5 Gummimembrane
- 6 Belastungsstempel
- 7 Druckleitung zu SDE (2x)
- 8 Druckleitung für Porenwasserdruck
- 9 Weggeber axial, Taster nicht sichtbar (an 6 montiert)

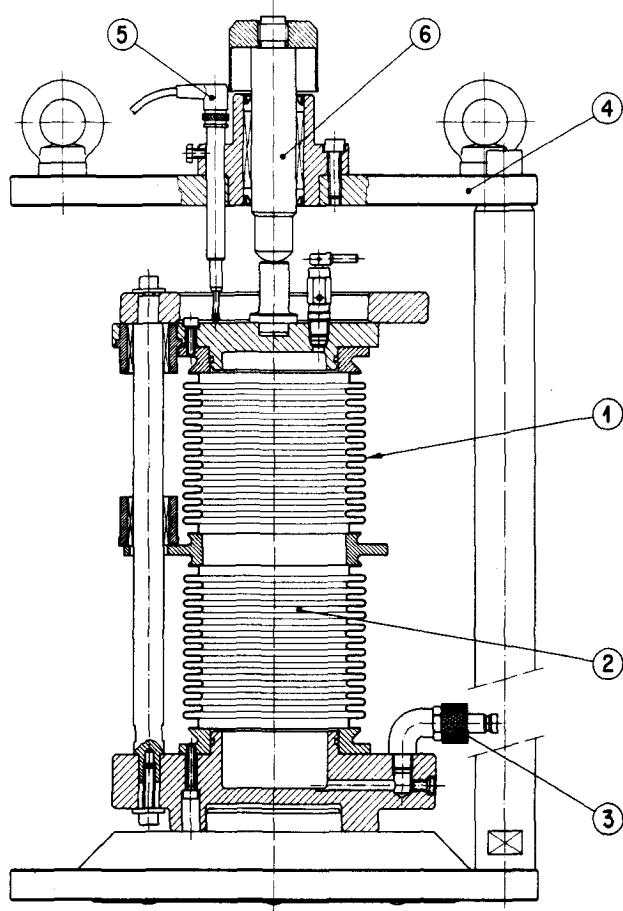


Abb. 73

Seitendruckelement SDE, eingesetzt in EB 8.

- 1 Stahlfaltenbalg
- 2 Druckmedium
- 3 Druckleitungen zu Triax-Zelle (2x)
- 4 Einbau EB 8
- 5 Weggeber axial am SDE
- 6 Belastungsstempel

Bedingung für das einwandfreie Aufbringen des Seitendruckes ist das vorgängige Entlüften des ganzen Drucksystems.

Als Druckmedium wurde bisher ein Gemisch aus destilliertem Wasser und Glykol verwendet, was den Betrieb im Temperaturbereich auch unter 0°C ermöglicht.

Die Anordnung im Triax-Schwingversuch für das Erzeugen des schwingenden Radialdruckes mit dem Seitendruckelement ist aus Abbildung 74 ersichtlich. Siehe dazu auch Abschnitt 6.5, Betriebsarten der Prüfmaschinen.

Die Abbildung 75 zeigt die Prüfeinrichtungen Triax-Zelle und Seitendruckelement als Einheit gemäss Abbildung 74.

Spezifikationen des Seitendruckelementes SDE:

- Die Wahl eines Stahlfaltenbalges für das Seitendruckelement ergab sich aus der Forderung nach leckfreier Erzeugung des Seitendruckes (Volumenmessung über Weg axial am SDE).
- Der wirksame Querschnitt A des Seitendruckelementes ($10'000 \text{ mm}^2$) und die axial aufgebrachte Kraft der Prüfmaschine (N) erzeugen den Druck p_T in der Triax-Zelle zu

$$p_T = \frac{F}{A} \quad (\text{MPa})$$

Der erforderliche Seitendruck wird über die erzeugende Kraft F der Prüfmaschine geregelt, bis zu einer Maximalkraft von $10'000 \text{ N}$, damit bis zu einem Maximaldruck von

$$\frac{10'000 \text{ N}}{10'000 \text{ mm}^2} = 1 \text{ MPa (10 bar)}$$

- Das leere Seitendruckelement SDE weist eine Federkonstante von 200 N/mm pro Windung auf. Bei insgesamt 46 Windungen des Seitendruckelementes SDE ergibt dies eine Federkonstante von

$$c_{\text{SDE}} = \frac{200}{46} \approx 4,5 \text{ N/mm}$$

Bei einem maximal möglichen Kolbenweg der Prüfmaschine von 20 mm entsteht am Seitendruckelement eine Federkraft von $\approx 100 \text{ N}$, was 1% der Maximalkraft der Prüfmaschine entspricht.

- Der schwingende Wasserdruck kann im Druck-Schwellbereich von $0,01$ bis $1,0 \text{ MPa}$ ($0,1$ bis 10 bar) bis zu einer Frequenz von $10 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ erzeugt werden, wobei die doppelte Verbindungsleitung vom Seitendruckelement zur Triaxialzelle bestehen muss. Eine weitere Bedingung ist, wie vorstehend festhalten, gutes Entlüften des ganzen Drucksystems.
- Wie schon unter Abbildung 28 erwähnt, können die axialen und radialen Beanspruchungen der beiden Prüfmaschinen mittels dieser Prüfeinrichtungen zeitlich gegeneinander verschoben oder in Phase gefahren werden, durch zeitliches Verschieben der Command-Signale.

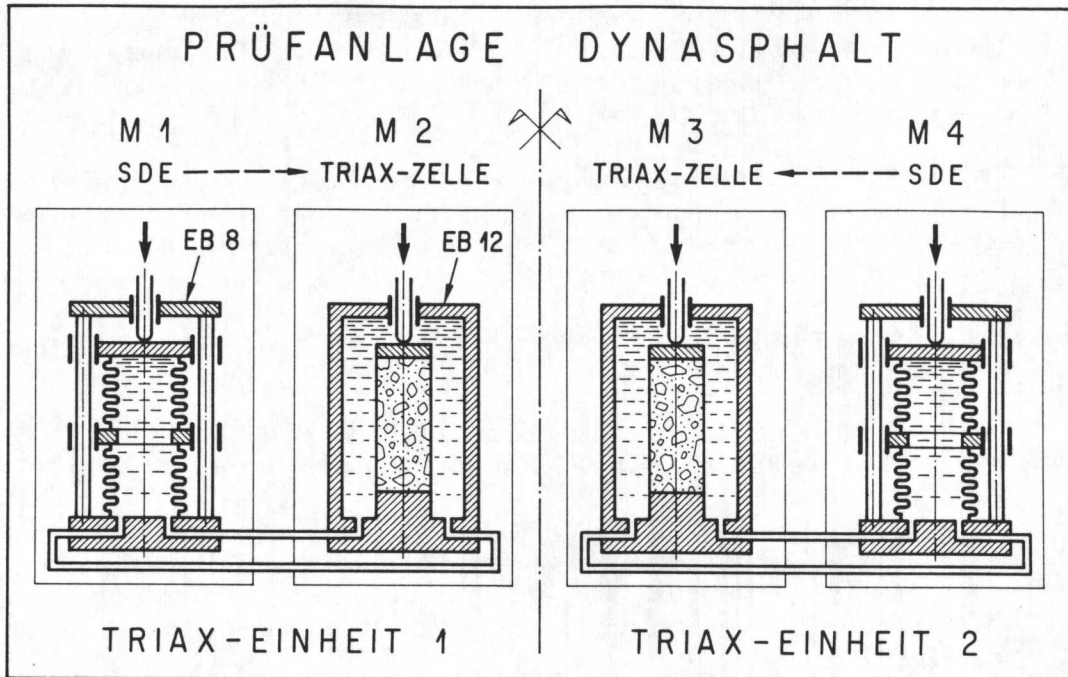


Abb. 74: Anordnung von Triaxial-Zellen und Seitendruckelementen in der Prüfanlage DYNASPHALT, Maschinen 1 bis 4, Betrieb in Gruppen M 1/M 2 und M 3/M 4.

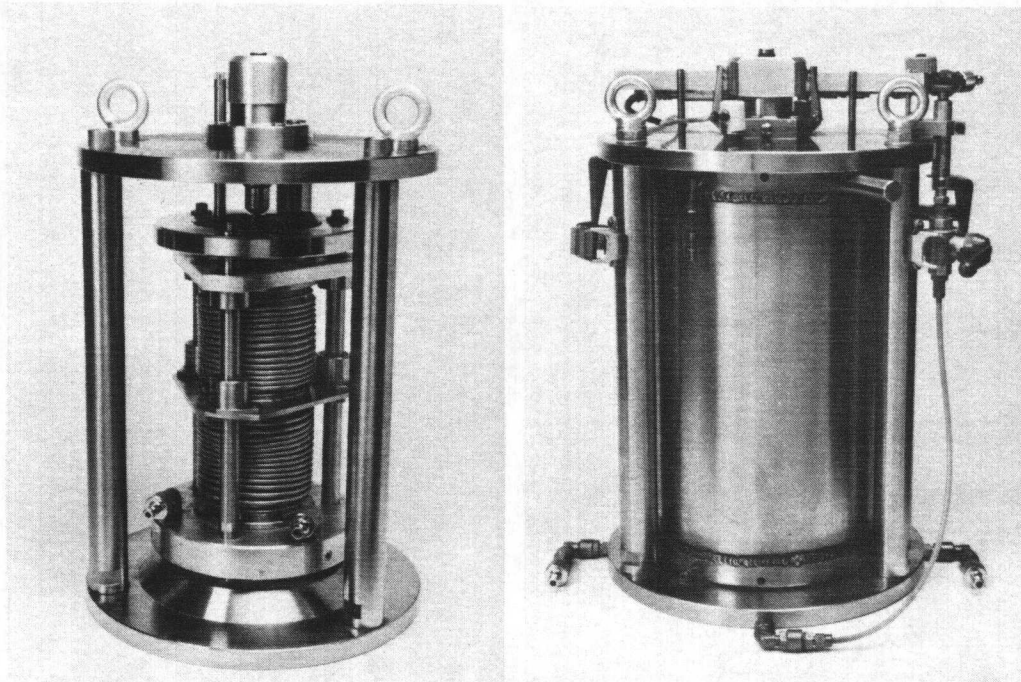


Abb. 75: Triax-Zelle und Seitendruckelement.

Zusatzeinrichtung Messkörper Triax (MT)

Dieser Messkörper wurde für eine Kontrolle der tatsächlich auftretenden Beanspruchung am Prüfkörper im Triax-Schwingversuch entwickelt.

Die Konstruktion gemäss Abbildung 76 erlaubt den Einbau in die Triaxzelle unter Wegführung der Messleitungen vom eigentlichen Messkörper durch den Stempeleinbau und die Grundplatte der Triaxzelle.

Die rechnerisch bestimmten Kräfte am Körper konnten im Versuch bestätigt werden.

Vor allem konnte die infolge des Zelldruckes σ_{23} (Radialdruck) addierende, überlagerte Druckspannung axial nachgeprüft werden.

Der Triax-Messkörper ist in Abbildung 76 dargestellt. Er wird zusätzlich für die Kontrolle der Prüfmaschinen - zur Überprüfung der Einstellung der Druckmessdosen als "innere Messung" - verwendet.

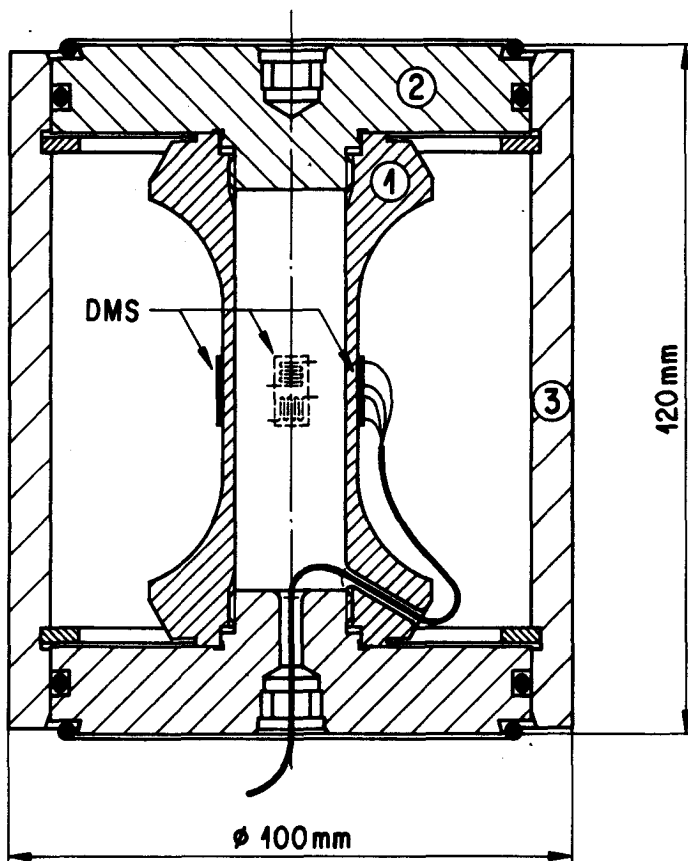


Abb. 76

Messkörper Triax.

- 1 Messkörper mit DMS
- 2 Druckplatten
- 3 Mantel

Zusatzeinrichtung Volumen-Messzylinder Triax (VT)

Für Triax-Kriechversuche oder Triax-Bruchversuche ist das Erfassen der Volumenänderung am Prüfkörper mit konventionellen Methoden (Windkessel) umständlich und aufwendig.

Mit dem Volumen-Messzylinder Triax wird die Volumenmessung auf eine Wegmessung reduziert. Dieser Volumen-Messzylinder hat einen doppelwirkenden Kolben mit beidseitig gleicher Kolbenfläche.

Durch das Vorschalten des Volumen-Messzylinders in die Druckleitung vor der Triax-Zelle kann aus der Wegänderung (Verschiebung des Kolbens am Volumen-Messzylinder) die Volumenänderung des Prüfkörpers berechnet werden, unter Berücksichtigung der Volumenverdrängung durch den axialen Belastungsstempel in der Triax-Zelle und die druckabhängige Volumenänderung des Gesamtsystems.

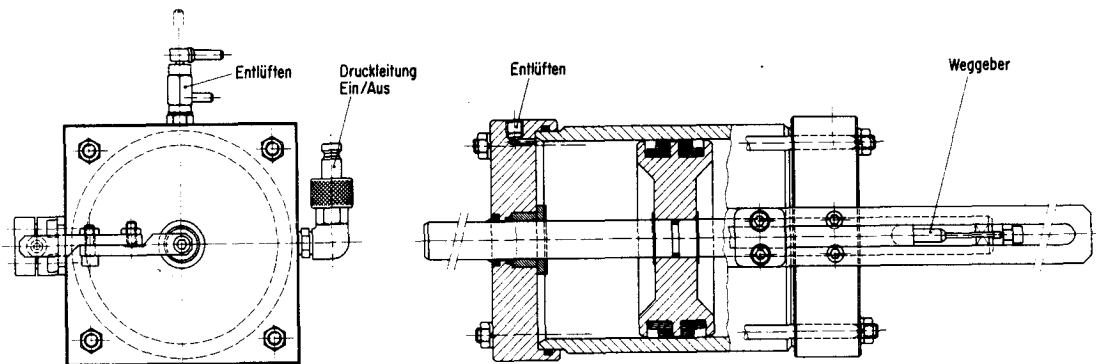


Abb. 77: Volumen-Messzylinder Triax als doppelwirkender Kolben.

Im On-Line-Betrieb der Prüfmaschinen in Triaxial-Versuchen können die verschiedenen Systemeinflüsse rechnerisch erfasst und berücksichtigt werden. Dabei ist festzuhalten, dass gegenüber den monoaxialen Versuchen ein wesentlicher Unterschied für die Prozesssteuerung, Messwerterfassung und Auswertung bei den Triaxialversuchen besteht, da entsprechend Abbildung 74 jeweils zwei Prüfmaschinen in einer Triax-Einheit zusammengeschaltet werden.

Die entsprechenden Steuerprogramme für die Versuchsdurchführung, die Datenerfassung und die Auswertung wurden nach [113] entwickelt.

TEIL III: ENTWICKLUNG DES PRÜFVERFAHRENS PK-BSA ZUR DIREKTEN
UNTERSUCHUNG BITUMINÖSER BELAGSSCHICHTEN AB BOHR-
KERNEN, PRÜFVERFAHREN PRÜFKÖRPER-BIEGE-SCHUB-AXIAL

8. BEDARF

Das Realisieren einer Prüfmöglichkeit für das direkte Bestimmen physikalischer Materialkennwerte am verdichteten bituminösen Mischgut im Ist-Zustand, d.h. an einzelnen Schichten oder an im Verbund vorliegenden Schichten (Aufbau) im Initialzustand der Praxis, stellt einen ersten Bedarf in der Laborprüftechnik der Festigkeitsuntersuchungen an Asphalt dar. Solche Prüfkörper ab Bohrkernen liegen meist in Schichten von 30 bis 120 mm Dicke vor, je nach Art und Aufbau mit einer oder mehreren Belagsschichten (Mischgutsorten, Deck- oder Tragschichten). Zu den üblichen Bohrkerndurchmessern von 100 und 150 mm ist eine Erweiterung auf 200 und 300 mm Durchmesser (evtl. bis 500 mm) möglich und angezeigt; beispielsweise für die Entnahme ganzer Belagsaufbauten (gesamte Dicke bis 250 mm!).

Wird zudem ein geeigneteres Verdichtungsverfahren auch für das Herstellen praxisentsprechender Prüfkörper gleicher Abmessungen im Labor (durch Walzen oder durch Vibrationsverdichtung in Schichtdicken der Praxis und anschließende Entnahme der Bohrkernkerne) möglich, so rückt eine **realistischere Vergleichsmöglichkeit** zwischen Aussage der Laborprüfung und mechanischem Verhalten der verdichteten bituminösen Schichten der Strasse in "Griffweite", d.h. die Bestimmung **realistischer Materialkennwerte** im Labor kann erfolgen.

Grundsätzlich ist die Entwicklung eines neuen Prüfverfahrens unter dem Aspekt der Beanspruchungsart zu wählen. Zu unterscheiden ist zwischen:

- Bruchversuch (quasistatisch, schwingend),
- Ermüdungs-Dauerversuch (statisch, schwingend) und
- Mehrstufenversuch mit punktwaiser Kurzzeit-Beanspruchung (Lastwechselpakete, Belastungsblocks).

Für Mehrstufenversuche kann ein weitgehender Ausschluss deutlich irreversibler Verformungen (Verschiebungen im Gefüge), die als "überkritisch" zu bezeichnen sind, nur bei einem Prüfverfahren erzielt werden, das unter Variation von Frequenz und/oder Temperatur (Parameterfeld f/T) kurze Lastwechsel- resp. Beanspruchungspakete bei beschränkter, "unterkritischer" Laststufe aufweist. Die Darstellung dieser Forderung, unter Berücksichtigung der vorgegebenen Prüfkörperabmessungen, ist in Abbildung 78 schematisch enthalten. Die Möglichkeit der Bezugnahme zwischen dem Initialzustand der Prüfkörper nach Herstellung im Labor (IL) und dem Initialzustand nach Einbau und Verdichtung in der Praxis (IP) bildet dabei die eigentliche Zielsetzung. Letzterer stellt in jedem Falle den Bezugspunkt für das Herstellen der Prüfkörper im Labor dar.

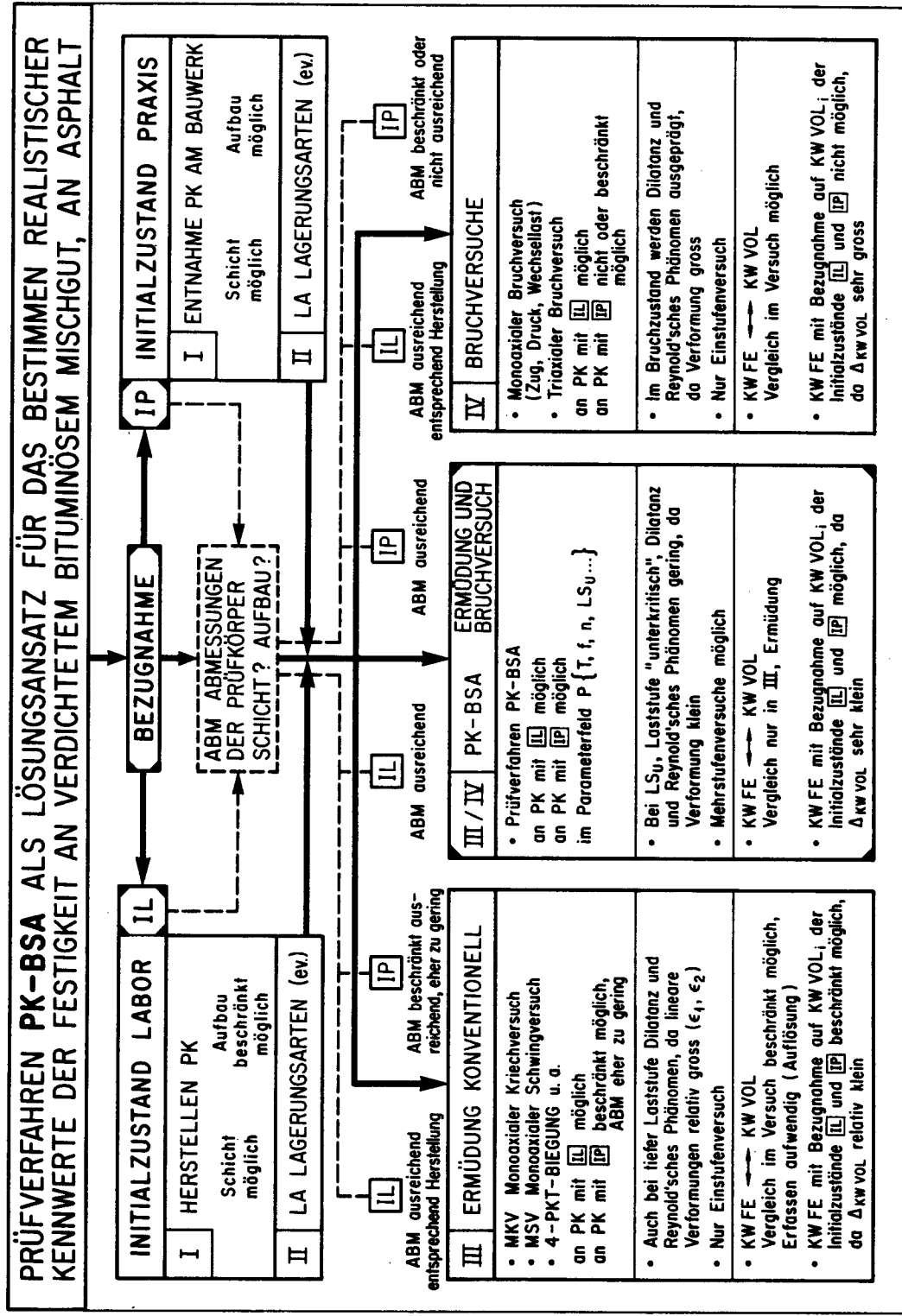


Abb. 78: Prüfverfahren PK-BSA, Lokalisierung innerhalb der Versuchsgruppen I bis IV. Vergleich der Prüfverfahren unter Verwendung der Prüfkörper mit den Initialzuständen IL (Labor) und IP (Praxis) sowie unter Bezugnahme der Kennwerte der Festigkeit (KW-FE) auf die Kennwerte der Volumetrie (KW-VOL) im Versuch oder auf die Kennwerte der Volumetrie der Initialzustände (KW-VOL_i).

9. KONZEPT

9.1 Abmessungen der Prüfkörper (PK)

Aus der in Abschnitt 8 abgeleiteten anzustrebenden Vergleichbarkeit von Laborprüfkörpern mit dem Initialzustand des Labors (IL) und Belagsschichten ab Bohrkernen mit dem Initialzustand der Praxis (IP) werden die Abmessungen der Prüfkörper etwa nach Tabelle 18 abgegrenzt.

PK	Höhe h (Schicht- dicke) (mm)	20...80	20...120	20...150	30...200
	Durchmes- ser d (mm)	(100)	150	200	300
	Bezeichnung PK oder BK	1002...	1502...	2002...	3003...

Tab. 18: Abmessungen der Prüfkörper. () Verwendung nur beschränkt möglich.

Die Anwendung bestehender Prüfverfahren an Prüfkörpern mit den Abmessungen nach Tabelle 18 ist möglich in

- Marshall-Versuchen
 - Spaltzug-Versuchen
- } Verhältnis $h/d > \approx 0,5$
- monoaxialen Druckversuchen, statisch (Kriechen) oder schwingend, Verhältnisse $h/d > \approx 1,0$ und
 - monoaxialen Zugversuchen oder Wechsellastversuchen, statisch oder schwingend, Verhältnisse $h/d > \approx 1,0$.

Für Triaxialversuche sind Prüfkörper mit dem Verhältnis $h/d > 1,5$ oder besser $h/d > 2,0$ zu wählen [60 bis 64]. Die in Tabelle 18 angegebenen Bereiche der Abmessungen der Prüfkörper schliessen daher Triaxialversuche für den direkten Vergleich Labor-Praxis (IL ↔ IP) weitgehend aus.

9.2 Konzept

Aufgrund der vorgenannten Einschränkungen wurde versucht, eine geeignetes Prüfverfahren zu den vorgegebenen Prüfkörpern (Laborprüfkörper und Bohrkern!) zu entwickeln, wobei folgende Punkte angestrebt wurden:

- Beanspruchung des Prüfkörpers in Richtung der hauptsächlichen Beanspruchung wie in der Praxis und kontinuumsmechanische Betrachtung des Prüfkörpers.
- Minimaler Aufwand in der Prüfkörpervorbereitung.

- Möglichkeit der mehrfachen Prüfung am gleichen Prüfkörper, mit kurzen Lastwechselpaketen auf verschiedenen Temperaturstufen unter Variation der Frequenz, bezeichnet als Mehrstufenversuch.

Beispiele von Mehrstufenversuchen am gleichen Prüfkörper sind in Abbildung 79 dargestellt. Nach dem Vorkonditionieren der Prüfkörper sind die einzelnen Lastwechselpakete auf verschiedenen Temperaturstufen etwa gemäss den Programmen 1 bis 3 zu fahren, unter Einhalten der erforderlichen Zwischenzeiten Δt für das Konditionieren der Prüfkörper auf der jeweils nachfolgenden Temperaturstufe zwecks Abbau von temperaturinduzierten Spannungen.

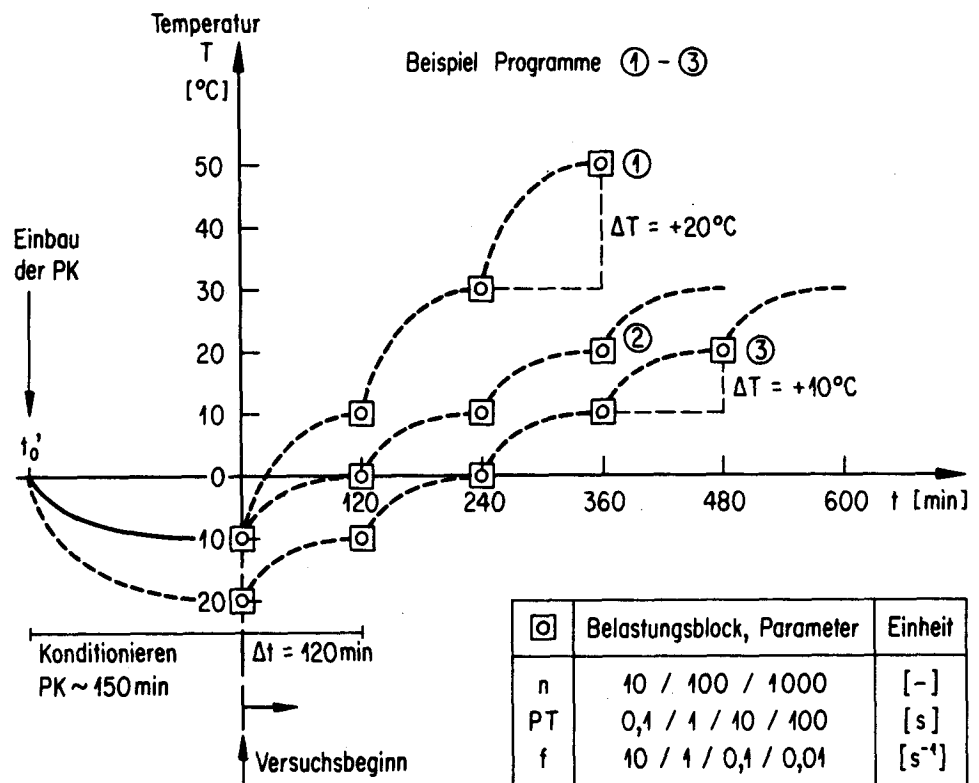


Abb. 79: Beispiele Versuchsabläufe von Mehrstufenversuchen, Programme 1 bis 3, Belastungsblocks mit n = Zyklenzahl, f = Frequenz, PT = Periodtime.

Im Laufe der Entwicklung des neuen Prüfverfahrens wurde die **Beanspruchung des Prüfkörpers in Form einer gelochten Scheibe** gewählt. Der Prüfkörper wird somit zusätzlich axial gebohrt und in diese innere axiale Bohrung wird ein Belastungsstempel eingeklebt. Der Prüfkörper wird aussen mit einem Hüllrohr (festes Auflager) verklebt.

Diese Prüfanordnung wurde dann als Prüfverfahren PK-BSA ("Prüfkörper-Biege-Schub-Axial") bezeichnet, da im Prüfkörper insbesondere bei geringer Prüfkörperhöhe zusätzlich zur Schubbeanspruchung wesentliche Beanspruchung durch Biegung auftritt. Siehe hierzu die Abbildungen 80 und 83.

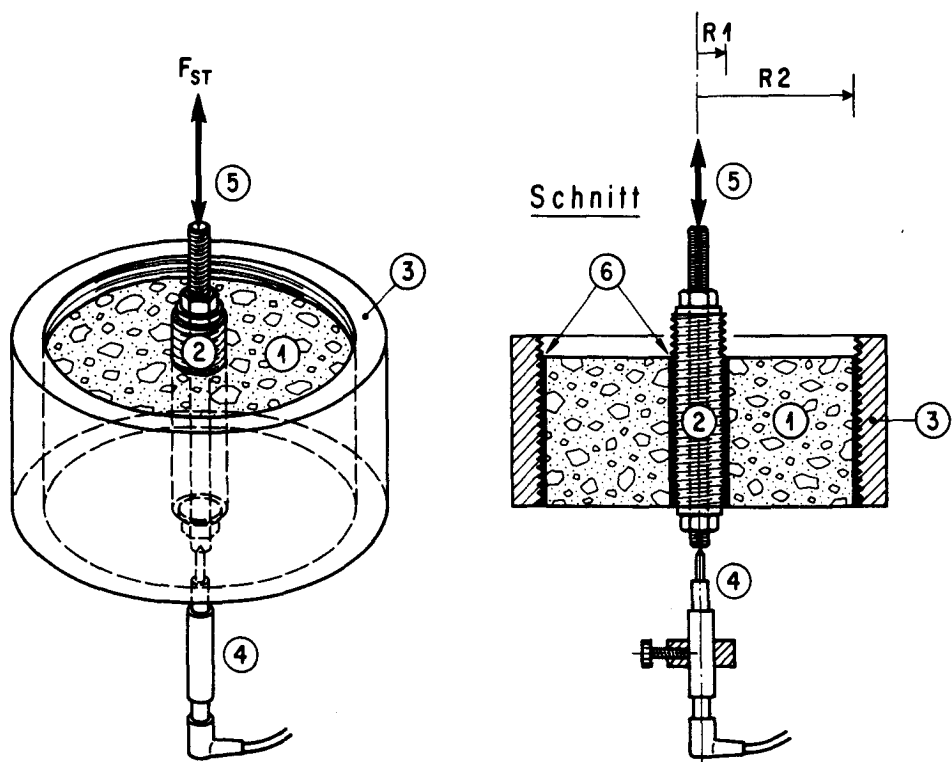


Abb. 80: Schematische Darstellung der Prüfanordnung im Prüfverfahren PK-BSA, mit dem Prüfkörper als gelochte Scheibe.

- 1 Prüfkörper PK
- 2 Axialer Belastungsstempel (mit verschraubter Gewindestange, mit 5 verbunden)
- 3 Hüllrohr, festes Auflager
- 4 Weggeber axial
- 5 Kupplung an Kolben der Prüfmaschine (über Gewindestange)
- 6 Klebeflächen (Epoxidharz)

Zum Prüfverfahren PK-BSA wurden die Einbauten EB 11a und 11b gemäss den Abbildungen 70 und 71 realisiert.

Speziell ist auf die aus den Abbildungen 70, 71 und 80 ersichtliche axiale Wegmessung hinzuweisen. Diese erfolgt auf der unteren, spannungslosen Seite des Einspannsystems (Gegenseite der mit dem Kolben der Prüfmaschine verbundenen, durch den Belastungsstempel geführten und verschraubten Gewindestange).

Die auftretende Gesamtverformung am Einspannsystem (am ganzen Einbau, inkl. Verformung der Klebschichten) wird rechnerisch kompensiert. Für die erfolgte Weiterentwicklung der Einbauten (bei anzustrebender Standardisierung und Vereinfachung der Einbauten und des Prüfverfahrens ohne rechnerische Korrektur der Systemverformungen durch den Computer) wurden Einflüsse von Systemverformungen durch das Anordnen einer Messbrücke unter dem Auflager des Hüllrohres ausgeschaltet, gemäss Abbildung 71.

10. BERECHNUNGSMETHODE PK-BSA

10.1 Beanspruchung des Prüfkörpers als gelochte Scheibe

Durch die gewählte Beanspruchungsart des Prüfkörpers gemäss der Anordnung in Abbildung 80 ist das Problem rotations-symmetrisch bezüglich der y-Axe.

Die Beanspruchung durch Krafteinleitung über den axialen Stempel (Belastungsstempel) in y-Richtung kann prinzipiell auf folgende drei Arten erfolgen:

- a) Statisch oder schwingend in einer Richtung, mit oder ohne Grundlast bei schwingender Beanspruchung, als statisches oder dynamisches Kriechen, als eigentliche Festigkeitsprüfung bis zum Bruch.
- b) Unter Wechsellast symmetrisch, als eigentliche Ermüdungsprüfung.
- c) Unter Wechsellast asymmetrisch, als Ermüdungs- und Festigkeitsprüfung.

Diese Lastfälle sind in Abbildung 81 festgehalten.

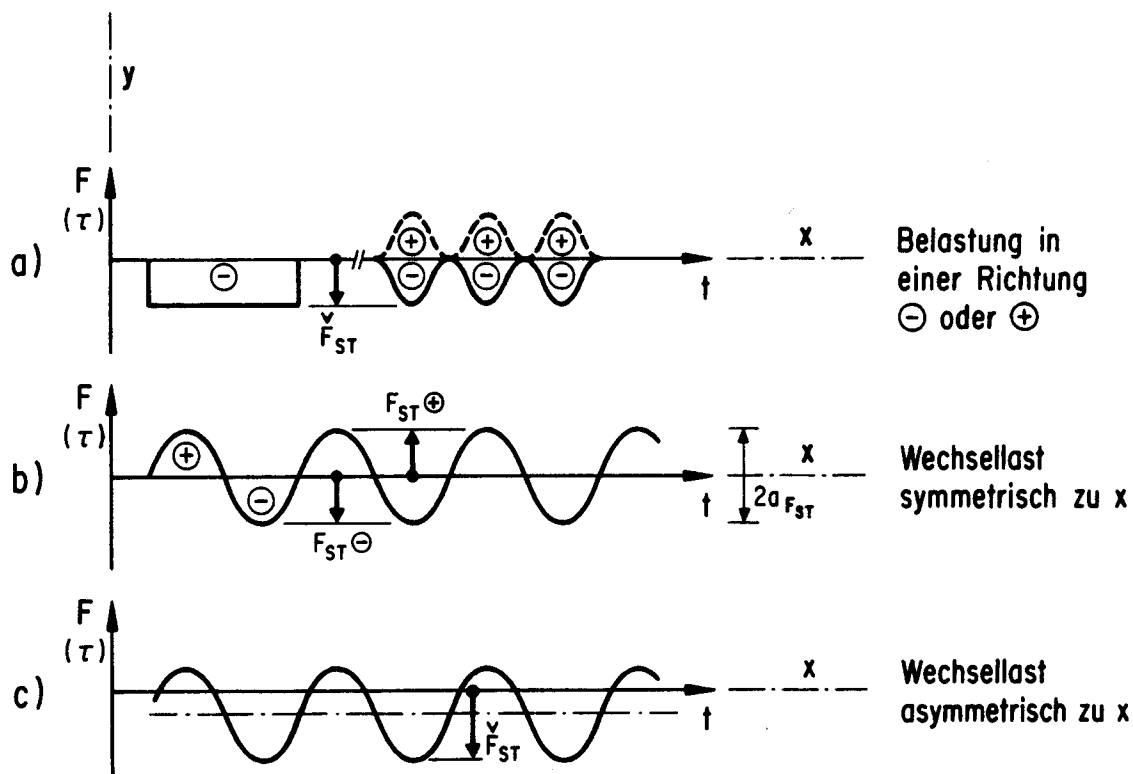


Abb. 81: Prüfverfahren PK-BSA, Belastungsfälle a), b) und c).

Für die angestrebten Mehrstufenversuche auf verschiedenen aufeinanderfolgenden Temperatur- und Frequenzstufen wurde der Lastfall b) gewählt. Dadurch wird in Ergänzung zum Lastfall "Geometrie" auch der Lastfall "Beanspruchung" symmetrisch.

10.2 Methode der "Finiten Elemente", Programm "FLOWERS"

Berechnungsgrundlagen

Im Experiment erfolgt die Beanspruchung der Prüfkörper durch die auf den axialen Belastungsstempel wirkende Kraft F_{ST} in y-Richtung. Bestimmt wird die Verschiebung DY des Belastungsstempels in Funktion der Kraft F_{ST} .

Durch die in den Abschnitten 8 und 9 festgelegte Beanspruchungsart ergibt sich für den Prüfkörper ein äusserst komplizierter Spannungs- und Verschiebungszustand, der beispielsweise über die numerische Methode der "Finiten Elemente" erfasst werden kann.

Mit grosszügiger Unterstützung des Instituts für Informatik der ETH Zürich konnte das Programm "FLOWERS" [120] für die Berechnungen eingesetzt werden.

Für die Berechnungen der Verschiebungen DY eines Prüfkörpers infolge der angreifenden Stempelkraft F_{ST} am Belastungsstempel müssen die Materialkennwerte

E: E-Modul und

ν : Querdehnungszahl

eingesetzt werden.

Diese mechanischen Materialkennwerte stellen aber für den zu untersuchenden Asphalt-Prüfkörper die im Experiment zu bestimmenden Grössen dar. Deshalb war das nachstehend beschriebene Vorgehen der "indirekten" Kennwertbestimmung am Asphaltprüfkörper über Vergleichsberechnungen am Modellkörper zu wählen.

Berechnungen am Modellkörper

Das indirekte Bestimmen der Materialkennwerte Elastizitätsmodul E resp. Schubmodul G des Asphaltprüfkörpers erfolgte durch elastische Vergleichsberechnungen am Modellkörper unter Annahme einer für Asphaltprüfkörper aus Erfahrungswerten abgeleiteten mittleren Querdehnungszahl $\nu = 0,35$ (-). Ein Stoffparameter (ν) wird somit als Näherung festgehalten. Für das anschliessende Umrechnen auf die Kennwerte des Asphaltprüfkörpers führt diese Näherung dann auf eine Gleichung mit einer Unbekannten, dem hauptsächlich interessierenden Elastizitätsmodul oder Schubmodul des Asphaltprüfkörpers.

Für die Vergleichsberechnungen an Modellkörpern (Index M) wurde der Lastfall "Beanspruchung" jeweils fest gewählt:

Elastizitätsmodul: $E_M = 2'000$ (N/mm²)

Querdehnungszahl: $\nu_M = 0,35$ (-)

Stempelkraft: $F_{ST,M} = 2'000$ (N)

Die Lastfälle "Geometrie" wurden unter Variation der inneren und äusseren Radien der Prüfkörper, R_1 und R_2 , sowie der Prüfkörperhöhe h entsprechend den verschiedenen Prüfkörpertypen nach Tabelle 18 berechnet.

Werden die Radien R_1 und R_2 standardisiert, so bleibt die Variable h , für welche die Verschiebungswerte DY_M unter dem festen Lastfall "Beanspruchung" berechnet oder interpoliert werden müssen.

Der Einfluss der Querdehnungszahl ν wurde durch Vergleichsberechnungen mit dem Lastfall $E_M = 2'000 \text{ N/mm}^2$ und $F_{ST,M} = 2'000 \text{ N}$ ermittelt. Die Variation der Querdehnungszahl ν ergab beispielsweise für den Prüfkörper PK 1506 die in Tabelle 19 enthaltenen Verschiebungen DY_M .

Querdehnungszahl ν	Verschiebung DY_M (mm)	DY (%) bezogen auf $DY_{\nu=0,35} \equiv 100\%$ (%)	Faktor für G und E, bezogen auf $\nu = 0,35$	$\Delta G, \Delta E$ in (%)
0,25	$0,97843 \cdot 10^{-2}$	96,45	0,965	-3,5
0,30	$0,99802 \cdot 10^{-2}$	98,38	0,984	-1,6
0,35*	$0,10144 \cdot 10^{-1}$	100,00	1,000	0
0,40	$0,10269 \cdot 10^{-1}$	101,23	1,012	+1,2
0,45	$0,10335 \cdot 10^{-1}$	101,88	1,019	+1,9

Tab. 19: Einfluss der Variation der Querdehnungszahl ν auf die Verschiebung DY_M des Modellkörpers und resultierende Korrekturfaktoren für den Elastizitätsmodul E bzw. Schubmodul G des Asphaltprüfkörpers. $DY_M(\nu=0,35)$ ist Basisgrösse für die Berechnung der Moduln E und G , siehe Seiten 123 und 124.

Aus Tabelle 19 wird ersichtlich, dass durch die (übliche) Annahme einer mittleren Querdehnungszahl $\nu = 0,35$ (-) im Prüfverfahren PK-BSA am Prüfkörper PK 1506 für Querdehnungszahlen ν von 0,25...0,45(-) abweichende Ergebnisse in der Modulstimmung von -3,5...+1,9 % entstehen können. Für Querdehnungszahlen von 0,30 und 0,45 (-) betragen die Abweichungen nur -1,6 resp. +1,2 % und können als gering bezeichnet werden.

Einteilen des Querschnittes

Für die Berechnung mit der Methode der "Finiten Elemente" wird der Querschnitt in eine endliche Anzahl Elemente eingeteilt. Aus Symmetriegründen (Rotationssymmetrie bezüglich y-Axe) kann im vorliegenden Beispiel die Betrachtung am halben Querschnitt erfolgen, wie dies Abbildung 82 zeigt. Der Querschnitt wird hier am Beispiel eines Prüfkörpers PK 1006 in 30 Elemente eingeteilt, mit den Knoten 1, 3, .. 113 und den Zwischenknoten 2, 4, ... 112.

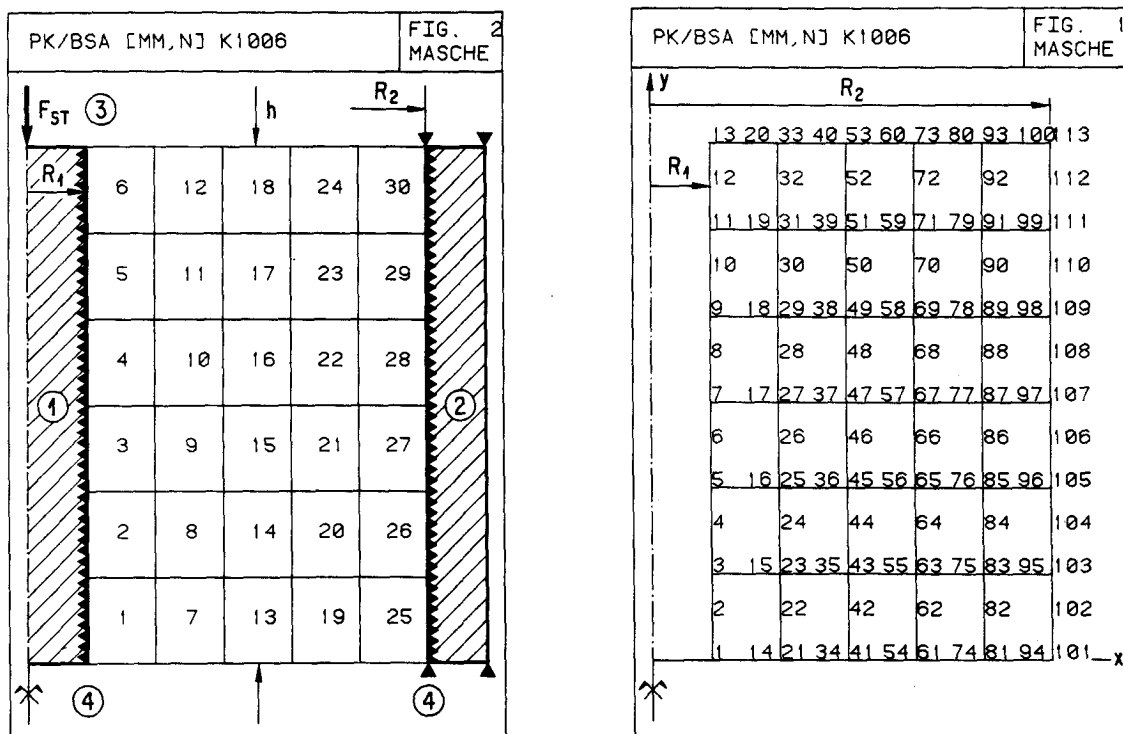


Abb. 82: Einteilen des Querschnittes des Prüfkörpers PK 1006 in 30 Elemente (links) sowie Anordnen der Knoten und Zwischenknoten (rechts). Rotationssymmetrie bezüglich der y-Axe.

- 1 Belastungsstempel, Stempelkraft F_{ST} gleichmässig verteilt, auf die Knoten 1 bis 13 wirkend
- 2 Hüllrohr (festes Auflager)
- 3 Stempelkraft F_{ST}
- 4 Klebefläche (hier mit der Dicke 0 idealisiert)

In Abbildung 83 ist die Verschiebung DY des Belastungsstempels und damit der Knotenpunkte 1 bis 13 dargestellt.

Vergleichende Berechnungen mit der Einteilung des Querschnittes in 100 Elemente gegenüber 30 Elementen ergaben beispielsweise für den Prüfkörper PK 1506 Änderungen in der Verschiebung DY um $\approx 0,66\%$ (von $DY = 10,144 \cdot 10^{-3}$ mm bei 30 Elementen auf $DY = 10,210 \cdot 10^{-3}$ mm bei 100 Elementen).

Die gleiche Einteilung der Querschnitte in 100 Elemente wurde in der Folge auch für die Prüfkörper PK 1003...3010 gewählt.

Für jeden Lastfall "Geometrie" wurde somit die Verschiebung DY infolge der Stempelkraft unter dem Lastfall "Beanspruchung" am Modellkörper berechnet.

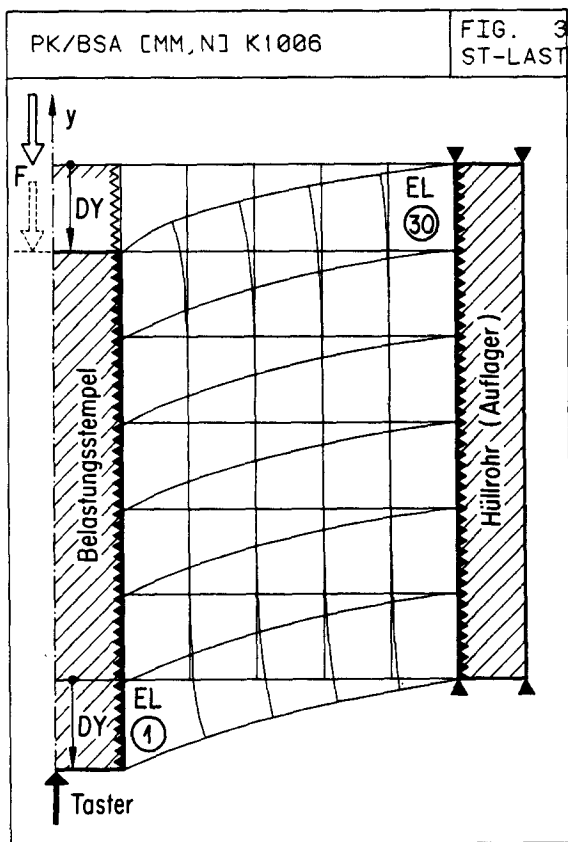


Abb. 83

Verschiebung DY des Belastungsstempels und damit der Knoten 1 bis 13 infolge der Stempelkraft F_{ST} .

Indirektes Bestimmen der Materialkennwerte E und G des Asphaltprüfkörpers

Unter der Annahme einer mittleren Querdehnungszahl von $\nu_M = 0,35$ wird die Verschiebung DY_M am Modellkörper für einen bestimmten Lastfall "Geometrie" unter dem Lastfall "Beanspruchung" (E_M , ν_M und $F_{ST,M}$) berechnet.

Die im Experiment am Asphaltprüfkörper für den gleichen Lastfall "Geometrie" resultierende Verschiebung DY_V infolge einer beliebigen Stempelkraft $F_{ST,V}$ führt unter der Annahme der Elastizitätstheorie für den Modul E des Asphaltprüfkörpers auf die Beziehung

$$E = \frac{E_M \cdot DY_M \cdot F_{ST,V}}{DY_V \cdot F_{ST,M}}$$

Index M: Modellkörper

Index V: Experiment (Versuch)

oder für den Schubmodul auf

$$G = \frac{G_M \cdot DY_M \cdot F_{ST,V}}{DY_V \cdot F_{ST,M}}$$

, wobei $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

Die am Modellkörper eingesetzten und ermittelten Grössen werden in einer Konstante K_{FE} zusammengefasst mit

$$K_{FE} = \frac{G_M \cdot D_{YM}}{F_{ST,M}} .$$

Für den Schubmodul G des Asphaltprüfkörpers folgt damit

$$G = \frac{F_{ST,V}}{D_{YV}} \cdot K_{FE}$$

Wegen der viskoelastischen Eigenschaften des Baustoffes Asphalt ist im Schwingversuch auch hier, wie in Abschnitt 7.2, das Einführen der komplexen Moduln gegeben.

Für den komplexen Schubmodul G^* folgt aus den ermittelten Amplituden $a_{F_{ST,V}}$ und $a_{D_{Y,V}}$ die Beziehung

$$G^* = \frac{a_{F_{ST,V}}}{a_{D_{Y,V}}} \cdot K_{FE}$$

im symmetrischen Schwingversuch nach Lastfall b) in Abbildung 81 und für kurze Belastungsblocks (mit geringer Lastwechselzahl n).

Mit der im Schwingversuch ermittelten Phasenverschiebung ϕ zwischen Stempelkraft $F_{ST,V}$ und Verschiebung $D_{Y,V}$ werden die Anteile G' und G'' berechnet zu

$$\begin{aligned} G' &= |G^*| \cdot \cos \phi \\ G'' &= |G^*| \cdot \sin \phi \end{aligned}$$

Im Dauerschwingversuch (eigentlicher Ermüdungsversuch) wird der komplexe Schubmodul G^* in Funktion der Lastwechselzahl n ermittelt zu

$$G^*(n) = \frac{a_{F_{ST,V}}}{a_{D_{Y,V}(n)}} \cdot K_{FE} \quad (\text{Schwingversuch, } a_{F_{ST}} = \text{konstant})$$

Im statischen Versuch ergibt sich - analog zum Kriechversuch monoaxial - der statische Schubmodul G in Funktion der Zeit t mit

$$G(t) = \frac{F_{ST,V}}{D_{YV}(t)} \cdot K_{FE} \quad (\text{Kriechversuch, } F_{ST} = \text{konstant})$$

Korrektur von DY_M bei abweichenden Prüfkörperabmessungen

(Geringfügige Abweichungen von h , R_1 und R_2 von einem bestimmten Modellkörper)

Weichen die Prüfkörperabmessungen h , R_1 und R_2 eines Asphaltprüfkörpers geringfügig von einem schon berechneten Modellkörper, damit von einem bestimmten Lastfall "Geometrie" ab, so ist die Verschiebung DY_M des entsprechenden Modellkörpers wiederum als weiterer Lastfall "Geometrie" zu berechnen oder graphisch aus Ergebnissen vorausgegangener Berechnungen unter Variation von h_1 , R_1 und R_2 als DY_{GRA} zu ermitteln.

Am Beispiel der vom Prüfkörper PK 1506 (Abmessungen $h = 60$ mm, $R_1 = 25$ mm und $R_2 = 75$ mm) abweichenden Prüfkörper PK 1505_{8/23/77} ($h = 58$ mm, $R_1 = 23$ mm, $R_2 = 77$ mm) und PK 1506_{2/27/77} ($h = 62$ mm, $R_1 = 27$ mm, $R_2 = 77$ mm) werden die Verschiebungen DY_M graphisch als Näherungen DY_{GRA} ermittelt und mit den berechneten Werten DY_{BER} verglichen.

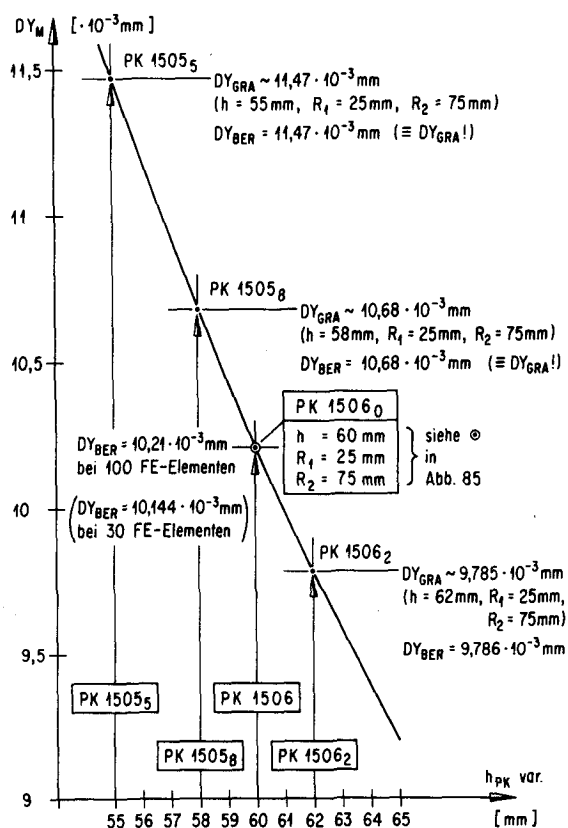


Abb. 84: DY_M Verschiebung des Belastungsstempels der Modellkörper 15xx ($R_1 = 25$ mm, $R_2 = 75$ mm) in Funktion der Prüfkörperhöhe h , im Bereich der Prüfkörperhöhe 55 mm $< h < 65$ mm.

DY_{GRA} graphisch ermittelte Verschiebung des Belastungsstempels

DY_{BER} berechnete Verschiebung des Belastungsstempels

In Abbildung 85 ist der Einfluss der Variation der Radien R_1 im Bereich $22 \text{ mm} < R_1 < 28 \text{ mm}$ (wobei $R_2 = 75 \text{ mm}$, fest) und R_2 im Bereich $72 \text{ mm} < R_2 < 78 \text{ mm}$ (wobei $R_1 = 25 \text{ mm}$, fest) auf die Verschiebung DY_M des Modellkörpers PK 1506 ($h = 60 \text{ mm}$, $R_1 = 25 \text{ mm}$, $R_2 = 75 \text{ mm}$) ersichtlich.

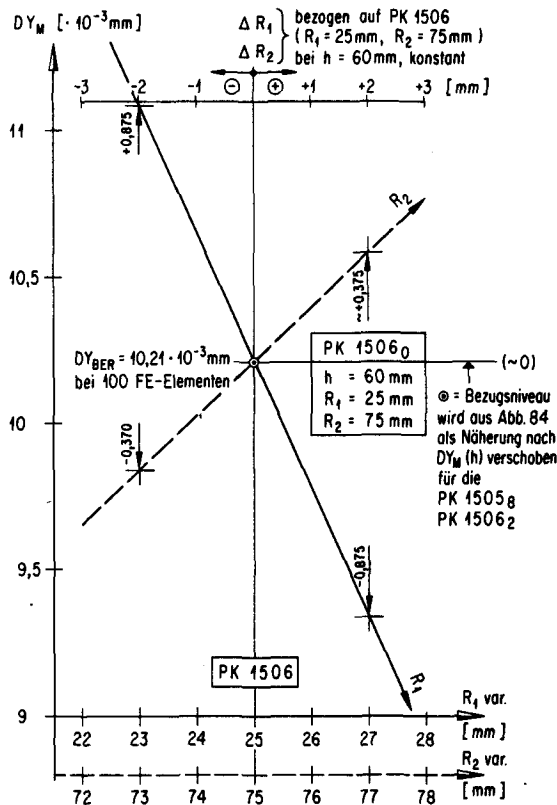


Abb. 85

DY_M Verschiebung des Belastungsstempels der Prüfkörper PK 1506 ($h = 60 \text{ mm}$) unter Variationen von

— R_1 , im Bereich $22 \text{ mm} < R_1 < 28 \text{ mm}$, $R_2 = 75 \text{ mm}$, fest

- - - R_2 , im Bereich $72 \text{ mm} < R_2 < 78 \text{ mm}$, $R_1 = 25 \text{ mm}$, fest

Die als Näherung bestimmten Verschiebungen DY_{GRA} (durch "Verschieben" von Abbildung 85 auf Abbildung 84) der Prüfkörper PK 1505_{8/23/77} und PK 1506_{2/27/77} betragen $(10,68 + 0,875 + 0,375) \cdot 10^{-3} \text{ mm} = 11,93 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ für den PK 1505_{8/23/77} resp. $(9,785 - 0,805 + 0,375) \cdot 10^{-3} \text{ mm} = 9,365 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ für den PK 1506_{2/27/77} gegenüber den berechneten Werten DY_{BER} von $12,01 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ für den PK 1505_{8/23/77} und $9,352 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ für den PK 1506_{2/27/77}.

Die Abweichungen der graphisch bestimmten Verschiebungen gegenüber den berechneten Verschiebungen betragen somit in Prozenten $\approx 0,66 \%$ für den PK 1505_{8/23/77} und $\approx 0,30 \%$ für den PK 1506_{2/27/77}. Diese Abweichungen können als gering bezeichnet werden.

Daraus ist abzuleiten, dass das Ermitteln der Verschiebungen des Belastungsstempels für einen beliebigen Lastfall "Geometrie" mit ausreichender Genauigkeit aus entsprechend konstruierten Nomogrammen (basierend auf umfangreichen FE-Berechnungen) erfolgen kann. Voraussetzung dazu ist ein entsprechendes Verdichten der Anzahl der Berechnungspunkte der Lastfälle "Geometrie".

11. TESTVERSUCHE

Die Testversuche mit dem Prüfverfahren PK-BSA wurden an Asphaltprüfkörpern und an Kunststoffkörpern durchgeführt. Sie dienen dem Bestimmen verschiedener Einflussfaktoren bei der Versuchsdurchführung und sind in fünf Teile gegliedert, nämlich in die Abschnitte:

11.1 Klebeverbindung

11.2 Abmessungen der Prüfkörper

11.3 Kraftstufe

11.4 Reihenfolge der Temperaturstufen

11.5 Vergleichsmessungen an Kunststoffkörpern (Überprüfen des experimentellen Lösungsansatzes)

Für die in den Abschnitten 11.2 und 11.4 beschriebenen Testversuche wurde ein Asphaltbeton AB 16/2 mit einem Bindemittel Bitumen B 80/100 (Kennwerte nach Aufarbeiten: Pen = 82 1/10 mm, $T_{RuK} = 52,4^{\circ}C$; Ausgangskennwerte: Pen = 96 1/10 mm, $T_{RuK} = 48,6^{\circ}C$) verwendet, bis zu einer maximalen Versuchstemperatur von $40^{\circ}C$, somit bis rund $10^{\circ}C$ unter T_{RuK} des Bindemittels nach Aufarbeiten. Siehe dazu die Tabelle A20 im Anhang.

Für die Versuche in Abschnitt 11.3 wurde die zentrale Mischung M3 nach Teil IV eingesetzt, d.h. ein Asphaltbeton AB 16 mit einem Bitumen B 60/70 (Kennwerte nach Aufarbeiten: Pen = 31 1/10 mm, $T_{RuK} = 69^{\circ}C$; Ausgangswerte: Pen = 53 1/10 mm, $T_{RuK} = 57^{\circ}C$) bis zu einer maximalen Versuchstemperatur von $60^{\circ}C$, somit auch hier bis rund $10^{\circ}C$ unter T_{RuK} des Bindemittels nach Aufarbeiten. Die bei der Verarbeitung im Labor und durch Alterung aufgetretene relativ starke Verhärtung des B 60/70 (schon Anfangskennwerte relativ "hart") erlaubte auch die Versuchsdurchführung auf der Temperaturstufe $T = 60^{\circ}C$. Damit wurde ein direkter Vergleich mit den ebenfalls auf dieser Temperaturstufe bestimmten empirischen Materialkennwerten im Marshallversuch möglich.

11.1 Einfluss der Klebeverbindung

Für das Verkleben der Prüfkörper (R_1 und R_2) mit dem Belastungsstempel (R_0) und dem Hüllrohr (R_3) wurde anfänglich ein "gefülltes", mit Quarzsand stabilisiertes Zweikomponentengießharz (Epoxidharz) verwendet. Dieser Klebstoff (Verhältnis Bindemittel zu Filler $\approx 1:4$) konnte aber nur schwerlich in die Spaltbreiten von 1 und 2 mm eingebracht werden. In der Folge wurde das ungefüllte Zweikomponentengießharz verwendet, das aber nur einen Schubmodul von $G_K = 1'000 \text{ N/mm}^2$ aufweist (jedoch annähernd konstant im Bereich von $-20^{\circ}C$ bis $+60^{\circ}C$ nach Angaben des Herstellers).

Die experimentelle Überprüfung des Schubmoduls G' des Epoxidharzes zeigt die Abbildung A23 im Anhang. G' kann, da im Schwingversuch der Phasenwinkel ϕ_{F-x} nur $\approx 0,5 \dots 5$ ($^{\circ}B$) beträgt, gleich dem Schubmodul G^* gesetzt werden.

Eine rechnerische Korrektur der gemessenen Verschiebung DY des Belastungsstempels infolge Schubverformung der Klebschichten wurde somit erforderlich, bezeichnet mit Δy_K . Siehe dazu auch die Berechnungen zur Abbildung 38.

$$\Delta y_K = \frac{a_F (\ln R_3 - \ln R_2)}{G_K \cdot 2\pi \cdot h} + \frac{a_F (\ln R_1 - \ln R_0)}{G_K \cdot 2\pi \cdot h},$$

$$\Delta y_K = \frac{a_F}{1'000 \cdot 2\pi \cdot h} \cdot \ln \frac{R_1 \cdot R_3}{R_0 \cdot R_2}.$$

Die korrigierte Verschiebung des Belastungsstempels beträgt

$$DY' = DY - \Delta y_K$$

Die berechneten Anteile der Schubverformung der Klebschichten (angenommen $d = 1 \text{ mm}$) an der Verschiebung des Belastungsstempels sind in Tabelle 20 für die Prüfkörper PK 1006, 1506, 2006, und 3006 aufgeführt. Eingesetzt wurden der Schubmodul des Modellkörpers nach Abschnitt 10.2 mit $G_M = 740,7 \text{ N/mm}^2$ sowie ein Schubmodul G_M von $5'000 \text{ N/mm}^2$ (entsprechend dem Schubmodul eines Asphalts im Tieftemperaturbereich bei $T_A \approx -20^\circ\text{C}$), wobei hier $DY' = DY_M$ und dadurch $DY = DY' + \Delta y_K$.

Für das Rechenbeispiel (30 FE-Elemente) wurde der Lastfall "Beanspruchung" nach Abschnitt 10.2 verwendet ($F_{ST} = 2'000 \text{ N}$, $\nu = 0,35$).

Prüfkörper R1	1006 10	1506 25	2006 25	2006 50	3006 25	3006 50	$T_A \approx$ ($^\circ\text{C}$)
DY' ($G_M=740.7 \text{ N/mm}^2$) $\equiv 100 \%$ (mm)	13,771	10,144	14,916	6,488	26,916	14,714	+20
Δy_K 10^{-3} (mm)	0,664	0,287	0,269	0,160	0,252	0,142	
DY (mm)	14,435	10,431	15,185	6,648	27,168	14,856	
Korrekturfaktor für $G \approx DY/DY'$ (-)	1,048	1,028	1,018	1,025	1,009	1,010	
DY' ($G_M=5'000 \text{ N/mm}^2$) $\equiv 100 \%$ (mm)	2,040	1,503	2,209	0,960	3,980	2,179	-20
Δy_K $\cdot 10^{-3}$ (mm)	0,664	0,287	0,209	0,160	0,252	0,142	
DY' (mm)	2,704	1,790	2,478	1,120	4,232	2,321	
Korrekturfaktor für $G \approx DY/DY'$ (-)	1,325	1,191	1,122	1,167	1,063	1,065	

Tab. 20: Korrekturfaktoren für G infolge Schubverformung in den Klebschichten (Annahme $d = 1 \text{ mm}$) für die Stempelkraft $F_{ST} = 2'000 \text{ N}$ bei Schubmoduln von $\approx 740 \text{ N/mm}^2$ und $5'000 \text{ N/mm}^2$.

Aus der Tabelle 20 ist ersichtlich, dass die Korrekturfaktoren für hohe Schubmoduln der Prüfkörper (Tieftemperaturbereich) und kleine Prüfkörperabmessungen (Verhältnis Prüfkörpervolumen zu Klebefläche klein) sehr gross, bei kleinen Schubmoduln der Prüfkörper und grossen Prüfkörperabmessungen dagegen praktisch unwirksam werden ($\Delta\gamma_K \approx 1\%$). Daraus ist abzuleiten, dass die rechnerische Korrektur unerlässlich wird und zudem möglichst grosse Prüfkörper verwendet werden sollten.

Die Angaben des Herstellers für den Schubmodul G_K des Epoxidharzes werden durch die Ergebnisse von Messungen für den Bereich $T = 0^\circ \dots 60^\circ\text{C}$ (Abbildung A23 im Anhang) bestätigt. Schwankungen um $\pm 10\%$ von G_K bewirken beispielsweise im Experiment am PK 1506 Abweichungen am zu bestimmenden Schubmodul G^* von $0,25 \dots 0,4\%$ (auf der Basis eines Schubmoduls G^* von $2'000 \text{ N/mm}^2$ des Modellkörpers) und sind vernachlässigbar.

11.2 Einfluss der Prüfkörperabmessungen

Variation der Prüfkörperhöhe h

Untersucht wurden unter Schlagverdichtung hergestellte Prüfkörper PK 1504, 1506 und 1508 ($R_1 = 25 \text{ mm}$ und $R_2 = 75 \text{ mm}$) der Mischung AB 16/2 bei 20°C und 40°C . Variiert wurde zudem die Stempelkraft F_{ST} .

Die in dieser Versuchsreihe bestimmten Schubmoduln sind in Tabelle 21 zusammengestellt.

PK Prüfkörper	G* bei Stempelkraft von			G* bei Stempelkraft von		
	500 N	1'000 N	2'000 N	125 N	250 N	500 N
1508 MW (N/mm^2)	-	1'163	1'184	-	412	397
		[1'173]			[405]	
CV (%)	-	5,2	4,3	-	6,0	4,2
1506 MW (N/mm^2)	-	1'293	1'273	-	436	417
		[1'283]			[426]	
CV (%)	-	3,6	3,4		8,3	9,6
1504 MW (N/mm^2)	1'331	1'334	-	398	364	-
	[1'333]		-	[381]		-
CV (%)	4,4	4,6	-	7,2	6,7	-
Temperatur ($^\circ\text{C}$)	20			40		

Tab. 21: Mittelwerte und Variationskoeffizienten der komplexen Schubmoduln G^* für die Prüfkörper PK 1504, 1506 und 1508. Jeweils 5 Einzelbestimmungen bei $f = 10 \text{ (s}^{-1}\text{)}$. [] Mittelwerte aus 2 Kraftstufen.

Die Werte des Schubmoduls G^* liegen gemäss Tabelle 21 bei der Temperatur 40°C für alle Prüfkörper nahe beisammen. Bei der Temperatur 20°C ist in dieser Versuchsreihe eine Abnahme des Schubmoduls um rund 10 % von Prüfkörper PK 1504 nach PK 1508 festzustellen.

In der Tabelle 22 erfolgt die Angabe der Schubmoduln in Prozenten, bezogen auf G^* (%) des Prüfkörpers PK 1506 \equiv 100 %, in der Gegenüberstellung mit den Verdichtungskennwerten der Prüfkörper.

PK	Anzahl	HOGE		RODI		$G^*(\%)$		Verdichtung	
		MW (Vol.-%)	CV (%)	MW (g/cm^3)	VG (%)	$T=20^\circ\text{C}$	$T=40^\circ\text{C}$	Art	2x
1508	5	7,30	4,9	2,335	98,9	91,4	95,3	S	75Z
1506	5	6,90	5,8	2,345	99,4	100	100	S	62Z
1504	5	7,00	2,8	2,341	99,2	103,7	89,2	S	40Z
1006	10	6,44	3,7	2,360	\rightarrow 100	--	--	S	50

Tab. 22: Zusammenstellung der Schubmoduln G^* (%) der Prüfkörper 1504, 1506 und 1508 bei 20 und 40°C und bei der Frequenz $f = 10 \text{ (s}^{-1}\text{)}$, bezogen auf G^* des Prüfkörpers PK 1506, mit Angabe der Verdichtungskennwerte der Prüfkörper.

\rightarrow Marshall-Standard \equiv Verdichtungsgrad 100 %

Aufgrund der durchgeführten (beschränkten) Anzahl Versuche kann gesamthaft keine systematische Differenzierung der Schubmoduln infolge Variation der Prüfkörperhöhe festgestellt werden. Die Abweichungen liegen mit rund 3...10 % im Rahmen üblicher Streuungen bei der Materialkennwertbestimmung an Asphaltprüfkörpern. Auf den verschiedenen Temperaturstufen ist für beide Kraftstufen gute Übereinstimmung festzustellen. Siehe dazu auch Abschnitt 11.3, "Einfluss der Kraftstufe - Linearität".

Variation der Radien (Bohrkerne)

In einer Versuchsreihe an einem Asphaltbeton AB 10 sowie an einem Asphaltbeton AB 25 (Tabelle A20 im Anhang) wurden die in Tabelle 23 aufgeführten Schubmoduln ermittelt. Geprüft wurden Belagsschichten ab Bohrkerne BK (Prüfkörper der Höhen 30 und 60 mm) unter Variation der Radien R_1 und R_2 . (Für die Mittelwertbildung wurden jeweils alle Prüfkörper jeder Sorte verwendet.)

BK	Mischgut	Anzahl	h (mm)	R1 (mm)	R2 (mm)	G* (N/mm ²)	CV (%)	G*(%) der GR
1003	AB 10	8	30	10	50	936,8	27,0	94,9
1503		4	30	25	75	1'053,7	5,2	106,7
2003		2	30	25	100	939,0]	11,0	95,1
2003		EW 1	30	50	100	895,7	--	90,7
3003		3	30	25	150	1'014,6	8,6	102,8
3003		7	30	50	150	1'032,7	8,8	104,6
xx03	Mittelw.	GR (6)	30	--	-	978,7	6,5	-
	AB 10	PK 25		--	-	987,4	16,4	≡ 100,0
	1)	PK 17		--	-	1'014,2	8,4	
1506	AB 25	4	60	25	75	1'112,5	3,6	95,0
2006		3	60	25	100	1'205,0	7,4	102,8
3006		3	60	25	150	1'295,0	6,8	110,5
3006		3	60	50	150	1'093,0	5,3	93,3
xx06	Mittelw.	GR (4)	60	--	-	1'176,4	7,9	-
	AB 25	PK 13		--	-	1'171,5	8,7	≡ 100,0

Tab. 23: Asphaltbeton AB 10 und AB 25, komplexer Schubmodul G* bei 20°C und $f = 10 \text{ s}^{-1}$ (EW = Einzelwert). G*(%) bezogen auf die Mittelwerte von G* aller Prüfkörper jeder Sorte.

1) ohne die PK 1003

Die in Tabelle 23 enthaltenen Ergebnisse zeigen für den AB 10 eine maximale Abweichung eines Gruppenmittelwertes vom Mittelwert von 9,3 %. Mit dem Variationskoeffizienten von 6,5 % für die Gruppenmittelwerte ist der Einfluss der Variation der Prüfkörperabmessungen (Variation der Radien) gesamthaft als relativ klein zu bezeichnen.

Für den AB 25 beträgt die maximale Abweichung eines Gruppenmittelwertes vom Mittelwert 10,5 %. Damit ist sie etwas grösser als beim AB 10. Das gleiche gilt für den resultierenden Variationskoeffizient von 7,9 % der Gruppenmittelwerte.

Die Variationskoeffizienten für alle Einzelwerte der Prüfkörper liegen beim AB 10 ($n = 23$) bei 16,4 %, beim AB 25 ($n = 13$) bei 8,7 %.

Der hohe Variationskoeffizient beim Asphaltbeton AB 10 resultiert offensichtlich aus der bei den Prüfkörpern PK 1003 auftretenden grossen Streuung (PK 1003: $n = 8$, CV = 27 %), womit deutlich wird, dass das Prüfen von Prüfkörpern mit dem doch sehr kleinen Durchmesser von 100 mm auch für dieses Prüfverfahren äusserst problematisch wird.

Werden dagegen die Prüfkörper PK 1003 nicht in die Mittelwertbildung für den AB 10 einbezogen, so resultiert - über die restlichen Prüfkörper gesehen - ein Variationskoeffizient CV = 8,4 % für $n = 17$, siehe 1 in Tabelle 23.

11.3 Einfluss der Kraftstufe

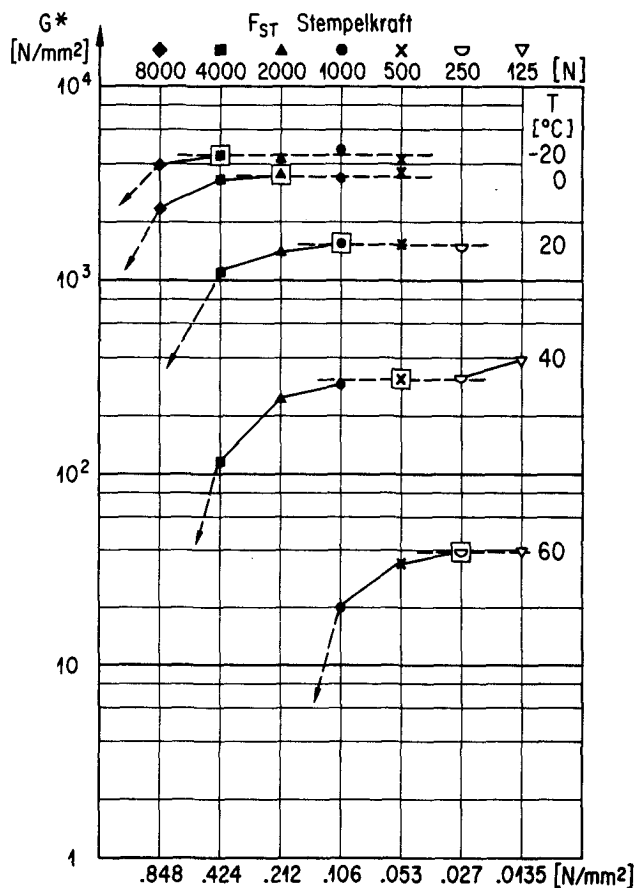
Für das Bestimmen des Einflusses der Kraftstufe auf verschiedenen Temperaturstufen wurden unter Schlagverdichtung hergestellte Prüfkörper PK 1506 der Mischung M3 gemäss Teil IV untersucht. (PK 1506: $R_1 = 25 \text{ mm}$, $R_2 = 75 \text{ mm}$, $h = 60 \text{ mm}$).

Diese Versuchsreihe wurde in Anlehnung an die in [74] festgehaltenen Versuche als "Linearitätstest" bezeichnet. Die Versuche wurden bei einer Frequenz von $1 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ an je fünf Prüfkörpern pro Versuchspunkt durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 24 aufgeführt.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe gemäss Tabelle 24 sind in Abbildung 86 dargestellt.

"LINEARITÄTSTEST" an Mischung M3, PK-BSA
(je 5 PK 1506 pro Kraftstufe)

□ : optimale Kraftstufe



$\tau_{(R1)}$ Schubspannung am Belastungsstempel (R1) für die optimale Kraftstufe □ infolge der Stempelkraft F_{ST}

Abb. 86

Versuchspunkte

"LINEARITÄTSTEST".

G^* in Funktion der Stempelkraft F_{ST} auf verschiedenen Temperaturstufen bei der Frequenz $f = 1 \text{ (s}^{-1}\text{)}$.

τ_{R1} ist die infolge der Stempelkraft F_{ST} am Belastungsstempel bei R_1 wirkende Schubspannung.

T (°C)	f (s ⁻¹)	a _F (N)	τ(R1) (N/mm ²)	G*		ΔEW ± min. (%)	ΔEW ± max. (%)	SIGN.
				MW (N/mm ²)	CV (%)			
-20	1	8'000	0,848	3'970	12,1	14,2	15,1	■ ←
		4'000	0,424	4'410	8,5	11,0	11,7	
		2'000	0,212	4'220	7,4	7,9	11,3	
		1'000	0,106	4'710	17,9	19,5	24,8	
		500	0,053	4'220	18,8	21,7	22,9	
0	1	8'000	0,848	2'370	20,2	24,5	29,5	▲ ←
		4'000	0,424	3'260	15,7	16,0	20,4	
		2'000	0,212	3'580	10,0	11,2	13,0	
		1'000	0,106	3'390	11,2	14,0	19,6	
		500	0,053	3'605	15,0	18,2	18,7	
+20	1	4'000	0,424	1'105	19,7	22,6	26,2	● ←
		2'000	0,212	1'420	13,3	16,9	21,2	
		1'000	0,106	1'543	8,9	9,5	14,2	
		500	0,053	1'560	15,4	15,8	16,9	
		250	0,027	1'475	17,9	19,6	24,7	
+40	1	2'000	0,212	245,0	16,4	20,4	20,7	x ←
		1'000	0,106	288,0	12,8	14,9	18,1	
		500	0,053	319,5	8,4	9,1	11,7	
		250	0,027	315,0	11,9	13,0	15,2	
		125	0,013	390,0	18,7	24,2	27,2	
+60	1	1'000	0,106	20,1	24,8	25,3	36,2	∩ ← ∨
		500	0,053	34,5	19,8	24,4	27,3	
		250	0,027	39,3	11,3	12,5	16,3	
		125	0,013	39,0	13,4	16,9	17,3	

Tab. 24: Versuchsreihe "LINEARITÄTSTEST" (je fünf Prüfkörper pro Versuchspunkt). Schubmodul G*, Mittelwerte und Variationskoeffizienten, PK 1506, Mischung M3. ΔEW grösste Abweichungen ± der Einzelwerte vom Mittelwert (± bedeutet oben resp. unten).

Beim Festlegen der definitiven Versuchsbedingungen "Kraftstufe in Funktion der Temperatur" wurde versucht, für jede Temperaturstufe mit möglichst hoher Kraftstufe zu fahren, um dadurch die Einflüsse der Verformungen am Gesamtsystem der Prüfeinrichtung und der dadurch resultierenden Messfehler möglichst klein zu halten. Für die Variationskoeffizienten und die maximalen Abweichungen der Einzelwerte von den Mittelwerten traten Optimierungstendenzen (minimale Werte) bei diesen maximal möglichen Kraftstufen auf. Dies zeigt sich in Abbildung 87. Dort sind die Variationskoeffizienten und die maximalen Abweichungen der Einzelwerte von den Mittelwerten (± bedeutet oben resp. unten) unter Angabe in Prozenten (bezogen auf die Mittelwerte) für die verschiedenen Kraftstufen nach Tabelle 24 und Abbildung 86 aufgeführt.

"LINEARITÄTSTEST" an Mischung M3, PK-BSA
(je 5 PK 1506 pro Kraftstufe)

□ : optimale Kraftstufe

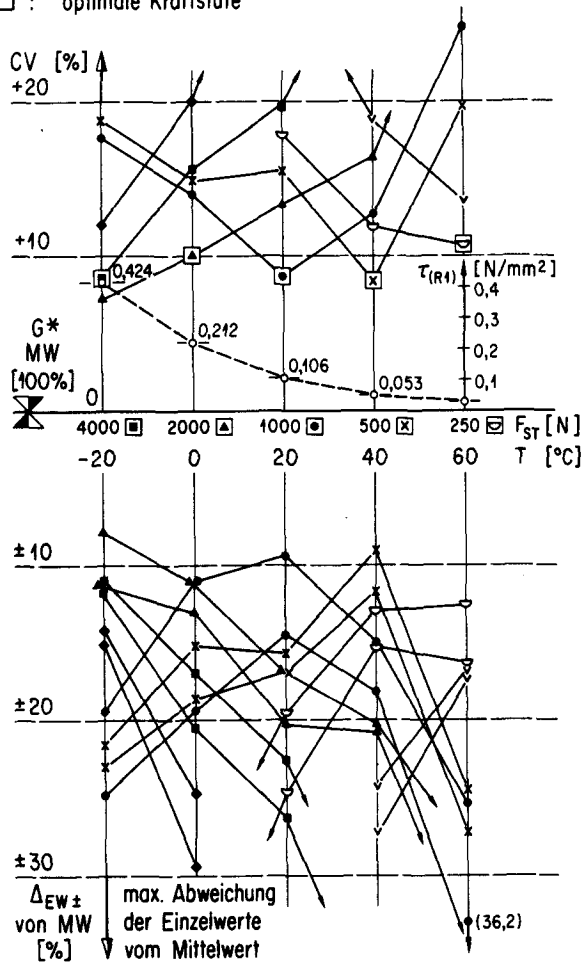


Abb. 87

Schubmodul G^* , Variationskoeffizient CV und maximale Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert, Angaben in Prozenten für verschiedene Kraftstufen und Temperaturstufen. Prüfkörper PK 1506 der zentralen Mischung M3 des AB 16.

11.4 Einfluss der Reihenfolge der Temperaturstufen

Ein Hauptaspekt bei der Realisierung des Prüfverfahrens PK-BSA bestand in der anzustrebenden Möglichkeit der Realisierung von Mehrstufenversuchen am gleichen Prüfkörper, siehe dazu die Abbildung 79.

Der Einfluss der Reihenfolge der Temperaturstufen wurde in zwei Versuchsgruppen 1 und 2 mit den Versuchsreihen

A_1, B_1, C_1 und A_2, B_2, C_2 untersucht.

Die Versuchsgruppe 1 wurde an der in Teil IV verwendeten zentralen Mischung M3 gefahren, wobei für die Versuchsreihe C_1 die Ergebnisse aus der "Linearitätsprüfung" in Abschnitt 11.3 eingesetzt wurden.

Es bedeuten:

- Versuchsreihe A:** Mehrstufenversuch an einer Prüfkörpergruppe von 5 Prüfkörpern, beginnend "in der Kälte", dann auf den nachfolgenden höheren Temperaturstufen.
- Versuchsreihe B:** Mehrstufenversuch an einer Prüfkörpergruppe von 5 Prüfkörpern, beginnend "in der Wärme", dann auf den nachfolgenden tieferen Temperaturstufen.
- Versuchsreihe C:** Prüfung von je einer Prüfkörpergruppe von 5 Prüfkörpern auf jeder Temperaturstufe; $C \equiv 100 \%$, Bezugsniveau für die Versuchsreihen A und B auf jeder Temperaturstufe.

Versuchsgruppe 1

Untersuchungen an Prüfkörpern PK 1506 der Mischung M3 des AB 16 nach Teil IV auf 5 Temperaturstufen bei einer Frequenz $f = 1 \text{ (s}^{-1}\text{)}$. Die Ergebnisse sind in Tabelle 25 zusammengefasst.

Die Ergebnisse in Tabelle 25 zeigen, dass die komplexen Moduln G^* in der Versuchsreihe B_1 , mit "Beginn in der Wärme", auf den tieferen Temperaturstufen gegenüber der Versuchsreihe A_1 , mit "Beginn in der Kälte", um rund 6...10 % tiefer liegen. Es ist anzunehmen, dass sich auch die auf der nach Abschnitt 11.3 bei "unterkritischer" Kraftstufe eingetretenen geringen "Verschiebungen im Gefüge" auf die Kennwerte des Asphaltes der nachfolgenden tieferen Temperaturstufen auswirken, ungeachtet eines möglichen "Einfriererefektes". Die Werte der Versuchsreihe B_1 liegen denn auch im Bereich +20 bis -20°C bei 92,3...96,0 % der Werte der Versuchsreihe C_1 , somit rund 4...8 % unter der Versuchsreihe C_1 .

Die Versuchsreihe C_1 mit je 5 Prüfkörpern pro Temperaturstufe liegt tendenziell zwischen den Versuchsreihen A_1 und B_1 . Aus der Versuchsreihe A_1 ist abzuleiten, dass beim Mehrstufenversuch mit "Beginn in der Kälte" kein deutlicher Unterschied zur punktweisen Bestimmung auf jeder Temperaturstufe vorliegt. (Die Versuchsreihe A_1 liegt beispielsweise auf der Temperaturstufe 20°C bei 102,7 % von C_1 , somit etwas höher als die Versuchsreihe C_1 .)

Versuchsgruppe 2

Untersuchung an Prüfkörpern PK 1506 der Mischung AB 16/2. Die Versuchsreihen A_2 , B_2 und C_2 wurden bei der Frequenz $f = 10 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ mit der Möglichkeit der Datenerfassung und Berechnung durch den Computer als Wiederholung gefahren. Pro Versuchsstufe resultiert dabei die Einzelwertbestimmung (EW_{PK}) an jedem Prüfkörper aus 14 Einzelmessungen (GEW) innerhalb eines Belastungspaketes. Der Einzelwert (EW_{PK})

PK-BSA Schubmodul G* (N/mm ²), Versuchsreihen, "Temperaturstufen", f = 1 (s ⁻¹) an PK 1506, Mischung M3 (B 60/70)										A ₁ "kalt" → "warm" C ₁ je 5 Prüfkörper pro Temperaturstufe B ₁ "kalt" + "warm"					
Versuchsreihe	-20°C			0°C			+20°C			+40°C			+60°C		
	MW (N/mm ²)	CV (%)	ΔEW _{max} (%)	MW (N/mm ²)	CV (%)	ΔEW _{max} (%)	MW (N/mm ²)	CV (%)	ΔEW _{max} (%)	MW (N/mm ²)	CV (%)	ΔEW _{max} (%)	MW (N/mm ²)	CV (%)	ΔEW _{max} (%)
A ₁ → → → → MW (%)	4'582* 101,9	7,8	11,2	3'494 97,6	8,6	14,2	1'585 102,7	10,9	16,7	308,5 96,5	13,1	18,3	36,7 93,3	16,5	23,8
C ₁ ≡ 100 %* MW (%)	4'410* 98,1	8,5	11,7	3'580 100	10,0	13,0	1'543 100	8,9	14,2	319,5 100	8,4	11,7	39,3 100	11,3	16,3
B ₁ ← ← ← ← MW (%)	4'317 96,0	8,9	14,2	3'261 91,1	13,1	17,5	1'424 92,3	13,7	19,0	---	---	---	---	---	---
C ₁ (-20°)* = Mittelwert aus zwei Gruppen (A ₁ + C ₁)/2 = 4'496 ≡ 100 %															

Tab. 25: Versuchsreihen A₁, B₁ und C₁ zur Abklärung des Einflusses der Reihenfolge der Temperaturstufen, Mischung M3 (PK 1506 Herstellung durch Schlagverdichtung).

PK-BSA Schubmodul G* (N/mm ²), Versuchsreihen, "Temperaturstufen", f = 10 (s ⁻¹) an PK 1506, Mischung AB 16/2 (B 80/100)										A ₁ "kalt" → "warm" C ₁ je 5 Prüfkörper pro Temperaturstufe B ₁ "kalt" + "warm"					
Versuchsreihe	0°C			20°C			40°C								
	EW _{PK} (N/mm ²)	σ _{GEW} (N/mm ²)	CV _{GEW} (%)	EW _{PK} (N/mm ²)	σ _{GEW} (N/mm ²)	CV _{GEW} (%)	EW _{PK} (N/mm ²)	σ _{GEW} (N/mm ²)	CV _{GEW} (%)						
A ₂ → → → → → → "kalt" → "warm"	1'944	54,9	2,80	1'241	26,6	2,10	472,1	65,0	13,80						
	2'030	45,4	2,25	1'241	44,2	3,40	401,8	14,5	3,60						
	1'980	52,2	2,65	1'253	29,7	2,40	490,1	23,7	4,80						
	1'927	44,1	2,30	1'265	41,6	3,30	453,1	25,0	5,50						
	1'950	47,4	2,40	1'185	40,1	3,40	-	---	---						
MW (%)	* 1'966 99,8	40,4 σ _{EW}	2,10 CV _{EW}	1'237 96,0	30,7 σ _{EW}	2,50 CV _{EW}	454,3 100,7	38,1 σ _{EW}	8,40 CV _{EW}						
C ₂ ≡ 100 %* je 5 PK pro Temperaturstufe	2'053	53,0	2,60	1'240	60,5	4,90	485,0	23,0	4,70						
	1'914	45,7	2,40	1'352	50,9	3,80	437,0	17,8	4,10						
	1'947	77,0	3,95	1'309	9,2	5,30	410,1	19,5	4,60						
	1'929	47,2	2,45	1'313	38,8	3,00	401,0	19,6	4,90						
	2'022	48,9	2,40	1'251	21,7	1,80	-	---	---						
MW (%)	* 1'972 100,1	59,4 σ _{EW}	3,00 CV _{EW}	1'293 100	47,0 σ _{EW}	3,60 CV _{EW}	* 436,3 96,7	36,0 σ _{EW}	8,25 CV _{EW}						
B ₂ ← ← ← ← ← "kalt" + "warm"	1'932	39,1	2,00	1'203	39,9	3,30	444,8	18,5	4,20						
	1'783	34,5	1,95	1'196	43,1	3,60	487,7	27,1	5,50						
	1'773	50,8	2,90	1'234	31,0	2,50	487,3	46,0	9,50						
	2'034	38,1	1,90	1'239	30,6	2,50	458,0	16,5	3,60						
	2'045	45,7	2,25	1'280	38,6	3,00	452,6	25,6	5,70						
MW (%)	* 1'913 97,2	131,0 σ _{EW}	6,90 CV _{EW}	1'230 95,0	33,3 σ _{EW}	2,70 CV _{EW}	* 466,1 103,3	20,1 σ _{EW}	4,30 CV _{EW}						
Mittelwerte * aus zwei Gruppen	C ₂ (0°)* = (A ₂ +C ₂)/2 = 1'969* ≡ 100 %						C ₂ (40°)* = (B ₂ +C ₂)/2 = 451** ≡ 100 %								

Tab. 26: Versuchsreihen A₂, B₂ und C₂ zur Abklärung des Einflusses der Reihenfolge der Temperaturstufen, Mischung AB 16/2 (PK 1506, Herstellung durch Schlagverdichtung). Zusammensetzung AB 16/2 siehe Tabelle A20 im Anhang.

des einzelnen Prüfkörpers ist unter Angabe des Variationskoeffizienten CV_{GEW} aus diesen 14 Messungen berechnet. Der Mittelwert aus 5 Prüfkörpern ist als MW bezeichnet, mit Angabe der Standardabweichung σ_{EW} und des Variationskoeffizienten CV_{EW} .

In der Versuchsgruppe 2 wurden drei Temperaturstufen gefahren (0, 20 und 40°C). Auch in der Versuchsreihe B₂, bei "Beginn in der Wärme", liegen die Schubmoduln auf den nachfolgenden tieferen Temperaturstufen mit 95 und 97,2 % etwas tiefer. Als Bezugswertwerte C₂ für die Temperaturstufen 0 und 40°C wurden jeweils die Mittelwerte* $(A_2 + C_2)/2$ bei 0°C und $(B_2 + C_2)/2$ bei 40°C gebildet. In der Versuchsreihe A₂ fällt auf, dass der Mittelwert für die Temperaturstufe 40°C mit 100,7 % den Wert von C₂* übertrifft. Dies bestätigt die Folgerung aus Versuchsreihe A₁, dass für die Mehrstufenversuche auf verschiedenen Temperaturstufen bei "Beginn in der Kälte" annähernd identische Werte wie bei den Einzelversuchen auf jeder Temperaturstufe gemessen werden.

Aufgrund dieser Ergebnisse aus Testversuchen kann die Möglichkeit des Mehrstufenversuches an einem Prüfkörper auf verschiedenen Temperaturstufen bestätigt werden.

11.5 Vergleichsmessungen an Kunststoffkörpern

(Überprüfen des experimentellen Lösungsansatzes)

Zusätzliche Vergleichsuntersuchungen an Kunststoff-Prüfkörpern wurden in

- Monoaxialen Druckversuchen und
- im Prüfverfahren PK-BSA

durchgeführt. Sie dienten der Überprüfung des experimentellen Lösungsansatzes des Prüfverfahrens PK-BSA.

Die komplexen Elastizitätsmoduln im Prüfverfahren PK-BSA wurden aus den Schubmoduln über die Beziehung

$$E^* = G^* \cdot 2(1+\nu) \text{ mit } \nu = 0,35$$

bestimmt und zusätzlich mit im monoaxialen Druckversuch ermittelten Elastizitätsmoduln E verglichen.

Mit diesen Versuchen war zudem die im Prüfverfahren PK-BSA angestrebte "formunabhängige" Modulbestimmung zu überprüfen.

Der Vergleich zwischen dem statischen Modul E (bei Stauchungen ϵ der Prüfkörper um 1,5 %) aus dem monoaxialen Druckversuch und dem komplexen Modul E* aus dem Prüfverfahren PK-BSA kann erfolgen, da die Adilan-Prüfkörper annähernd elastisches Verhalten ($\text{tg} \phi_{F-x} \approx 0,15$) zeigen und die gewählte Frequenz von $f = 1 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ im Prüfverfahren PK-BSA eine relativ langsame Beanspruchung darstellt.

Im monoaxialen Druckversuch an Kunststoffen hat der Formfaktor A/M (Verhältnis Querschnittsfläche zu Mantelfläche) der Prüfkörper einen wesentlichen Einfluss auf die Grösse des Elastizitätsmoduls. Die Angabe der Moduln erfolgt daher meist unter Bezugnahme auf diesen Formfaktor.

Die Modulbestimmungen erfolgten an den in der Tabelle 27 aufgeführten Prüfkörpern.

Aus Tabelle 27 und Abbildung 88 ist für den monoaxialen Druckversuch (MDV) die deutliche Abhängigkeit des bestimmten E-Moduls vom Formfaktor (FOFA von 0,188...0,630) ersichtlich. Die Ergebnisse aus dem Prüfverfahren PK-BSA zeigen diesen Einfluss des Formfaktors auf den E-Modul nicht. Der Mittelwert aus Prüfungen von 15 Prüfkörpern (PK 3010 bis 1502) mit wesentlich grösseren Unterschieden in den Formfaktoren (FOFA von 0,47...2,50) liegt bei $104,8 \text{ N/mm}^2$ und entspricht etwa dem im monoaxialen Druckversuch am Prüfkörper 1510 (FOFA = 0,375) bestimmten E-Modul. Der Variationskoeffizient von 5,3 % aus diesen 15 Einzelbestimmungen ist als ausreichend klein zu bezeichnen, um aufgrund dieser Ergebnisse die angestrebte formunabhängige Modulbestimmung im Prüfverfahren PK-BSA als erfüllt zu betrachten.

Die Ergebnisse aus Tabelle 27 sind in der Abbildung 88 dargestellt und veranschaulichen die deutliche Abhängigkeit der E-Moduln vom Formfaktor A/M im monoaxialen Druckversuch. Für den komplexen Modul E^* aus dem Prüfverfahren PK-BSA besteht diese Abhängigkeit dagegen nicht.

Im Vergleich zum angegebenen Mittelwert $MW_m = 104,8 \text{ N/mm}^2$ und dem zugehörigen Variationskoeffizienten CV_m von 5,3 % (aus Einzelwertbestimmungen an 15 Prüfkörpern) im Prüfverfahren PK-BSA führten 10 Messungen am gleichen Prüfkörper PK 1508 auf einen Mittelwert von $102,6 \text{ N/mm}^2$ bei einem Variationskoeffizienten $CV = 0,28 \%$. Dieser Variationskoeffizient ist als sehr klein zu bezeichnen. Für diese wiederholten Messungen am gleichen ("idealen") Kunststoff-Prüfkörper stellt er ein Mass für die Streuung der auf der Prüfanlage DYNASPHALT ermittelten Kennwerte E^* oder G^* dar.

Der statische Modul E der Adilan-Prüfkörper wird vom Hersteller mit 100 N/mm^2 angegeben, mit einer Bandbreite von $\pm 10 \%$. Die Übereinstimmung zwischen dem im Prüfverfahren PK-BSA ermittelten komplexen Modul E^* und dem statischen Modul E für die Formfaktoren 0,2...0,5 ist gut und entspricht somit dem E-Modul gemäss Angabe des Herstellers.

Vergleich	E, E* Elastizitätsmodul von ADILAN-Prüfkörpern								
Prüfverfahren	Prüfkörper		Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	FOFA A/M (-)	Modul E, E*			
	Nr.	Typ				MW _{PK} (N/mm ²)	CV _{PK} (%)	MW _{GR} (N/mm ²)	CV _{GR} (%)
Monoaxiale Druckversuche MDV → E Formfaktor FOFA von 0,188...0,630	01	1520	150	200	0,188	97,0	--		
	02	1512	150	120	0,312	100,1	--		
	03	1510	150	100	0,375	105,7	--	--	--
	04	2010	200	100	0,500	119,1	--		
	05	2008	200	80	0,630	201,3	--		
PK-BSA → E* Formfaktor FOFA von 0,470...2,500	1	3010	300	100	0,750	104,2	0,90		
	2	3008	300	80	0,940	102,3	0,95	GR 1	
	3	3006	300	60	1,250	107,6	1,85	108,0	4,92
	4	3004	300	40	1,875	109,8	0,84		
	5	3003	300	30	2,500	115,9	0,74		
	6	2008	200	80	0,630	100,2	2,30		
	7	2006	200	60	0,830	100,6	1,30	GR 2	
	8	2004	200	40	1,250	94,9	0,80	99,3	2,87
	9	2003	200	30	1,666	98,3	1,75		
	10	2002	200	20	2,500	102,4	0,75		
	11	1508	150	80	0,470	103,5	0,61		
	12	1506	150	60	0,630	110,2	2,60	GR 3	
	13	1504	150	40	0,940	111,2	0,75	107,1	3,58
	14	1503	150	30	1,250	103,8	0,98		
	15	1502	150	20	1,875	107,7	1,39		
1-15	alle Prüfkörper PK-BSA					104,8	5,30	MW _m	CV _m

Tab. 27: Vergleichende E-Modulbestimmung im Prüfverfahren PK-BSA und im monoaxialen Druckversuch an Kunststoff-Prüfkörpern, in Form von Zylindern verschiedener Abmessungen und Formfaktoren (FOFA = A:M).

MW_{PK} und CV_{PK} bestimmt aus 12 Einzelmessungen an jedem Prüfkörper auf 3 bis 4 Laststufen.

MW_{GR} und CV_{GR} bestimmt an den Gruppen der Prüfkörper mit den Durchmessern 300 mm, 200 mm und 150 mm.

MW_m und CV_m Mittelwert und Variationskoeffizient bestimmt aus den MW_{PK} der Prüfkörper PK-Nr. 1...15 im Prüfverfahren PK-BSA.

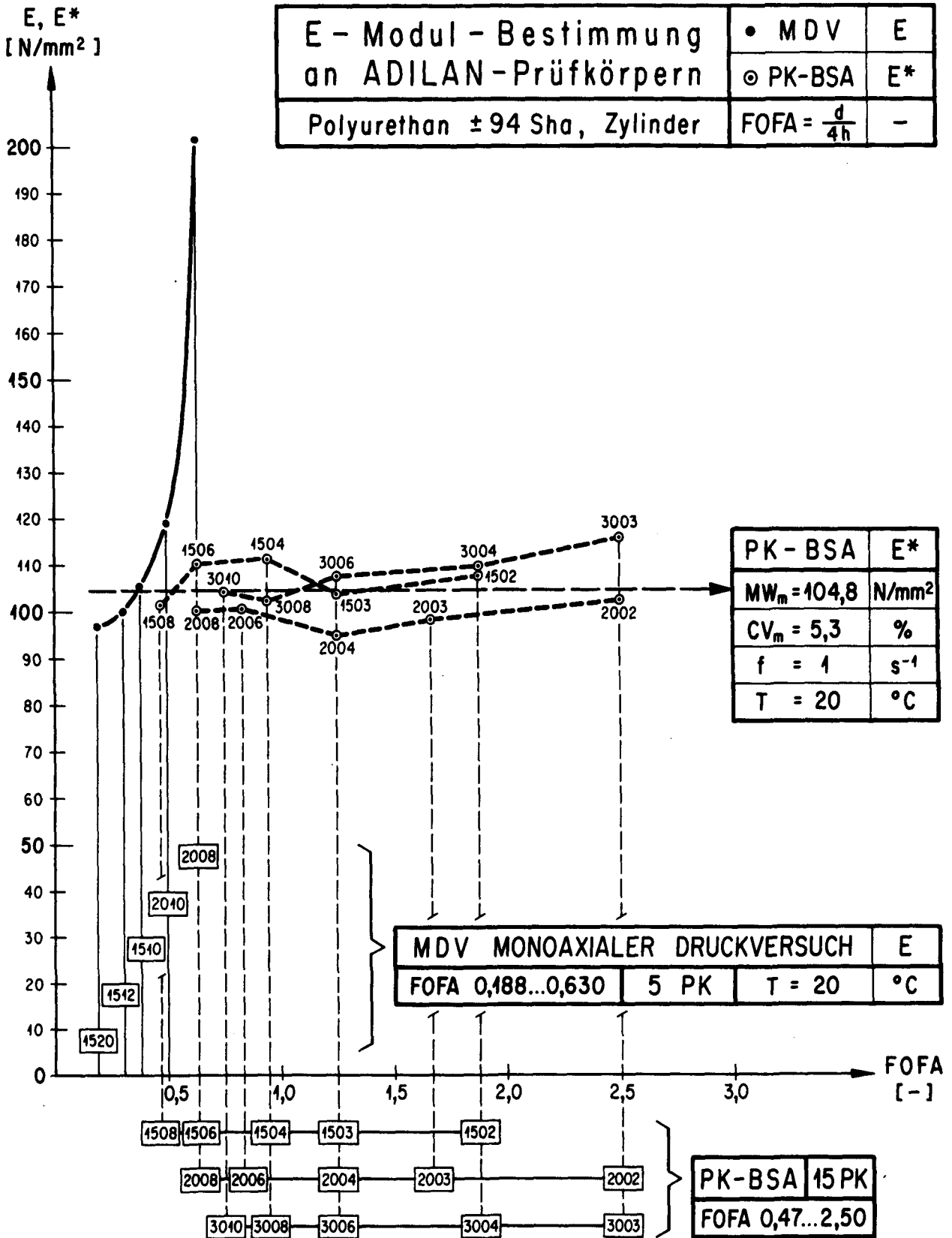


Abb. 88: Vergleich der ermittelten E-Moduln im Prüfverfahren PK-BSA (E*) und im monoaxialen Druckversuch (E) in Funktion des Formfaktors FOFA = A:M = d:4h für Prüfkörper in der Form von Zylindern, nach Tabelle 27.

TEIL IV: VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN AN IM LABOR HERGESTELLTEN PRÜFKÖRPERN AUS VERDICHTETEM BITUMINÖSEM MISCHGUT

12. ZIELSETZUNGEN

12.1 Allgemeines

Die allgemeinen Zielsetzungen für vergleichende Untersuchungen an im Labor hergestellten Prüfkörpern aus verdichtetem bituminösem Mischgut - an Asphalt - umfassten drei Aspekte:

- Entnahme einer möglichst praxisentsprechenden, abgestuften Mischgutreihe eines Asphaltbeton AB 16 ab Aufbereitungsanlage, in Anlehnung an eine vorgängig erfolgte Eignungsprüfung im Labor, unter
 - Variation des Bindemittelgehaltes und
 - entsprechender Anpassung des Füllergehaltes,
 - im Bereich der nach Marshall-Standardverdichtung erreichbaren maximalen Lagerungsdichte der Mineralstoffe (entspricht dem minimalen Hohlraumgehalt der Mineralstoffe, HMM_{\min}) dieser Mischgutreihe mit insgesamt fünf Mischungen M1 bis M5.
- Herstellen von Prüfkörpern (PK) im Labor, unter
 - Variation der Herstellungsart,
 - Variation der Prüfkörperabmessungen,
 - mit der Zielsetzung des Erreichens eines Verdichtungsgrades VG 100 % nach Marshall-Standard für alle Prüfkörper bei allen Verdichtungsarten.
- Erarbeiten von Materialkennwerten bezüglich
 - Verdichten, Kennwerte der Volumetrie (KW-VOL) der PK, und
 - Mechanischem Verhalten, Kennwerte der Festigkeit (KW-FE) der PK, zwecks
 - Abklären der generellen Differenzierung verschiedener Prüfverfahren für das Abgrenzen der Bereiche "stabil" - "instabil" innerhalb der gewählten Mischgutreihe des AB 16 mit den Mischungen M1 bis M5. Diese stellen in Funktion des Bindemittelgehaltes fünf typische Endverdichtungszustände für Asphaltbeton im Bereich der maximalen Lagerungsdichte der Mineralstoffe dar.
 - Durchführen der vergleichenden Untersuchungen unter Bedingungen des Praxisfalles durch Beschränken der Anzahl Prüfkörper auf maximal 5 PK pro Versuchspunkt.

Als Prüfverfahren wurden in den vergleichenden Untersuchungen eingesetzt:

	<u>Bezeichnung</u>	<u>in Abschnitt</u>
Verdichtungsversuche im Labor		14
- Schlagverdichtung	S	14.1
- Gyratorverdichtung	GY	14.2
- Vibroverdichtung	V	14.3
- Walzverdichtung (Handwalze)	W	14.4
 Konventionelle mechanische Prüfverfahren		 15
- Konventionelle empirisch-technologische Prüfverfahren		15.1
• Marshall-Versuche (Prüfung "in der Wärme")	MV	15.11
• Spaltzugversuche (Prüfung "in der Kälte")	SPV	15.12
- Konventionelle physikalische Prüfverfahren		15.2
• Monoaxiale Druckversuche (Bruchversuche, "Essai DURIEZ")	MDV	15.21
• Monoaxiale Kriechversuche	MKV	15.22
• 4-Punkt-Biegung unter Wechsellast	4-PKT-B	15.23
 Prüfverfahren <u>Prüfkörper-Biege-Schub-Axial</u>	 PK-BSA	 16
- Allgemeines und Versuchsparameter		16.1
- Mehrstufenversuche an Prüfkörpern PK 1506 <u>W</u>		16.2
- Versuch einer Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips (ZTSP)*		16.3

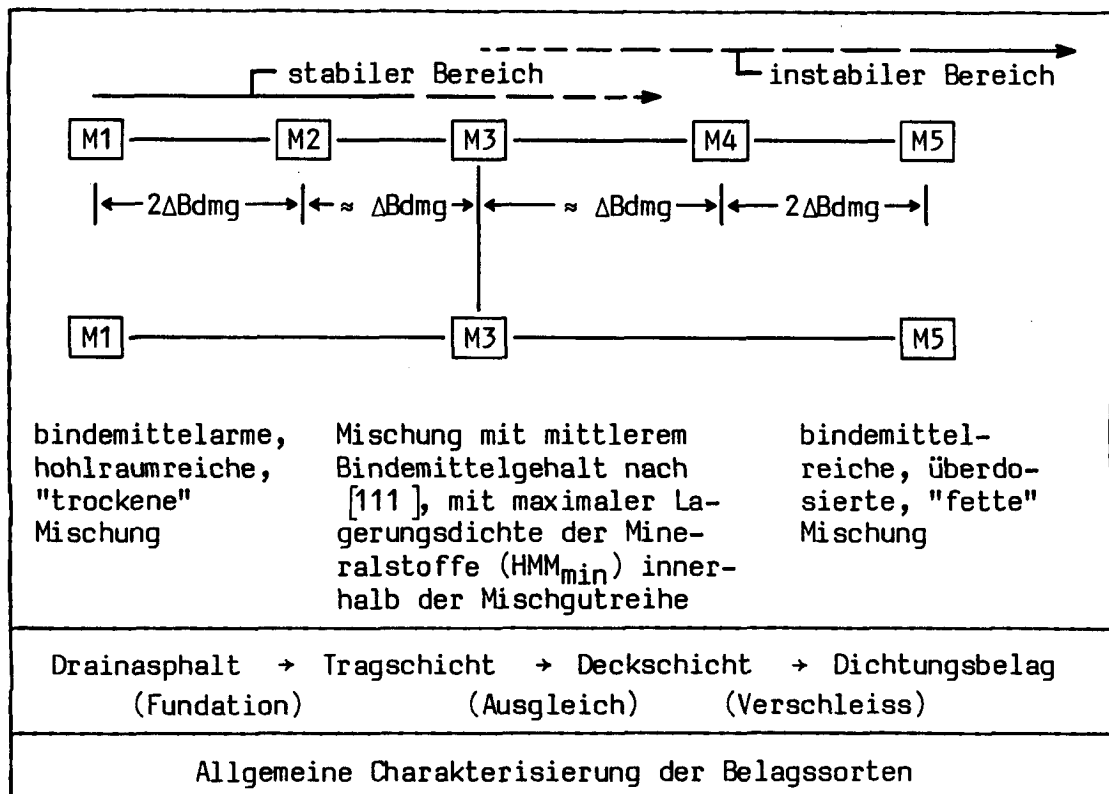
Das Prüfverfahren PK-BSA ist als Weiterentwicklung der nach [73, 74, 75] durchgeführten Schubversuche (Prüfungen im System "einschnittig-zweischchnittig" an jeweils 2 Prüfkörpern) zu betrachten, wobei hier die Möglichkeit der Anwendung auf den einzelnen Prüfkörper (PK als Laborprüfkörper oder als Einzelschicht ab Bohrkern oder Bohrkern mit mehrschichtigem Belagsaufbau) unter Beanspruchung in Richtung der Hauptbeanspruchung der Praxis auch in Mehrstufenversuchen (mehrfache Beanspruchung des gleichen Prüfkörpers auf mehreren aufeinanderfolgenden Temperaturstufen unter Variation der Frequenz) besteht. Dies gestattet das Charakterisieren der zu untersuchenden verdichteten bituminösen Gemische bezüglich ihres temperatur- und zeitabhängigen Verhaltens, somit ihres rheologischen Verhaltens im Parameterfeld (T/f)*.

12.2 Konzept zur Entnahme von Mischgut ab Aufbereitungsanlage

Für die zu entnehmende Mischgutreihe eines Asphaltbetons AB 16 ab Aufbereitungsanlage wurden fünf Mischungen (M1 bis M5) nach Tabelle 28 definiert und bei der Herstellung angestrebt. Unter Variation des Bindemittelgehaltes und unter entsprechender Anpassung des Füllergehaltes sollten diese Mischungen den Normbereich nach [111] für einen AB 16 abdecken.

In Funktion des steigenden Bindemittelgehaltes sollte die zentrale Mischung M3 innerhalb dieser Mischgutreihe die maximale Lagerungsdichte der Mineralstoffe (HMM_{min}) aufweisen, bei einem mittleren Bindemittelgehalt innerhalb der Mischgutreihe von annähernd 5 Massen-% in Anlehnung an [111].

Die Tabelle 28 veranschaulicht dieses Konzept schematisch mit der Zielsetzung der Entnahme der Mischgutreihe M1 bis M5 des AB 16 unter den genannten Randbedingungen.



Tab. 28: Schematische Zielsetzung für die Entnahme der Mischgutreihe eines Asphaltbetons AB 16 mit den Mischungen M1 bis M5 ab Aufbereitungsanlage, in Anlehnung an eine im Labor erfolgte Eignungsprüfung. Die fünf Mischungen charakterisieren typische Verdichtungszustände eines Asphaltbetons in Funktion des (steigenden) Bindemittelgehaltes.

13. ENTNAHME VON MISCHGUT AB AUFBEREITUNGSANLAGE, HERSTELLEN DER PRÜFKÖRPER DURCH STANDARDVERDICHTUNG

13.1 Probenahme

Durch grosszügiges Entgegenkommen einer Belagsunternehmung konnten die praxiskonformen Mischungen - entsprechend der nach Tabelle 28 angestrebten Mischgutreihe eines AB 16 - ab Aufbereitungsanlage entnommen werden [92]. Um die Mischungen M1 bis M5 annähernd zu erreichen, mussten jedoch gesamthaft 22 Chargen Mischgut zu je 750 kg Masse aufbereitet und analysiert werden. Produziert wurden zwei Mischgutreihen (Reihe 1 mit einem mittleren Füllergehalt von 7,5 Massen-% ; Reihe 2 mit einem mittleren Füllergehalt von 9,5 Massen-%), unter Variation des Bindemittelgehaltes von 3,5...6,5 Massen-%, in Anlehnung an eine vorgängig im Labor durchgeführte Eignungsprüfung. Aus der Mischgutreihe 1 wurden die definitiven Mischungen M1 bis M5 ausgewählt [32]. Das Aufteilen der einzelnen Chargen erfolgte nach Entnahme ab Aufbereitungsanlage durch ein in Abbildung 89 dargestelltes Portionierverfahren mit Hilfe von Kartonschachteln, die in einen zusammensteckbaren Holzrahmen mit Trennbrettern eingesetzt werden. Dieses speziell entwickelte Entnahme- und Portionierverfahren ist für ähnliche Aufgaben aufgrund der gemachten guten Erfahrungen zu empfehlen. Nach dem Verteilen und Einfüllen des Mischgutes kann der Holzrahmen mit Zwischenbrettern und Schachteln sofort für das Portionieren der nächsten Charge vorgelegt werden.

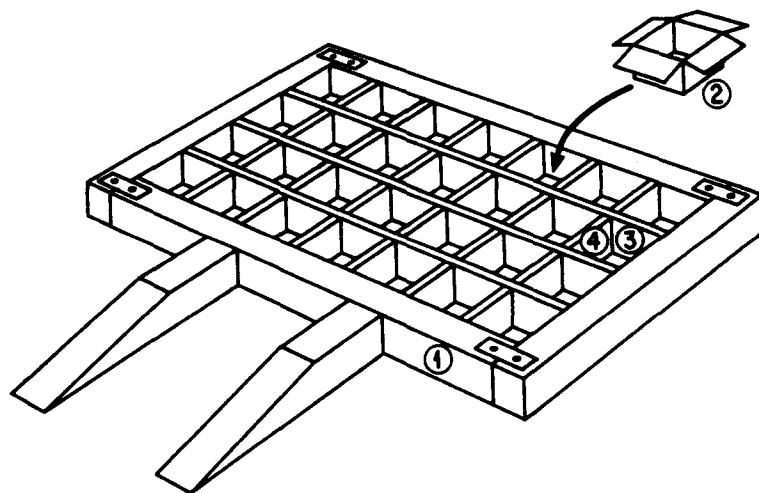


Abb. 89: Schema zum Portionierverfahren der ab Aufbereitungsanlage entnommenen Mischgutchargen von 750 kg Masse in Portionen zu rund 27 kg.

- 1 Steckbarer Holzrahmen
- 2 Kartonschachteln
- 3 } Zwischenbretter
- 4 }

13.2 Herstellen der Prüfkörper durch Marshall-Standard-Verdichtung

Die Abbildung 90 zeigt in einer Übersicht die aus der ab Aufbereitungsanlage entnommenen Mischgutreihe 1 festgelegten Mischungen M1 bis M5 bezüglich ihrer nach Marshall-Standardverdichtung am Prüfkörper PK 1006 erreichten volumetrischen Kenngrößen KW-VOL. Siehe Tabelle A6 im Anhang.

Schematisch wurde in dieser Darstellung über den Bindemittelgehalt auf die theoretischen Extrempunkte der Volumetrie (---0---) der Mischgutreihe extrapoliert, in Ergänzung zu den Mischungen M1 bis M5. Dadurch kann die gegenseitige Abhängigkeit der Kennwerte der Volumetrie, KW-VOL, verdeutlicht und besser veranschaulicht werden.

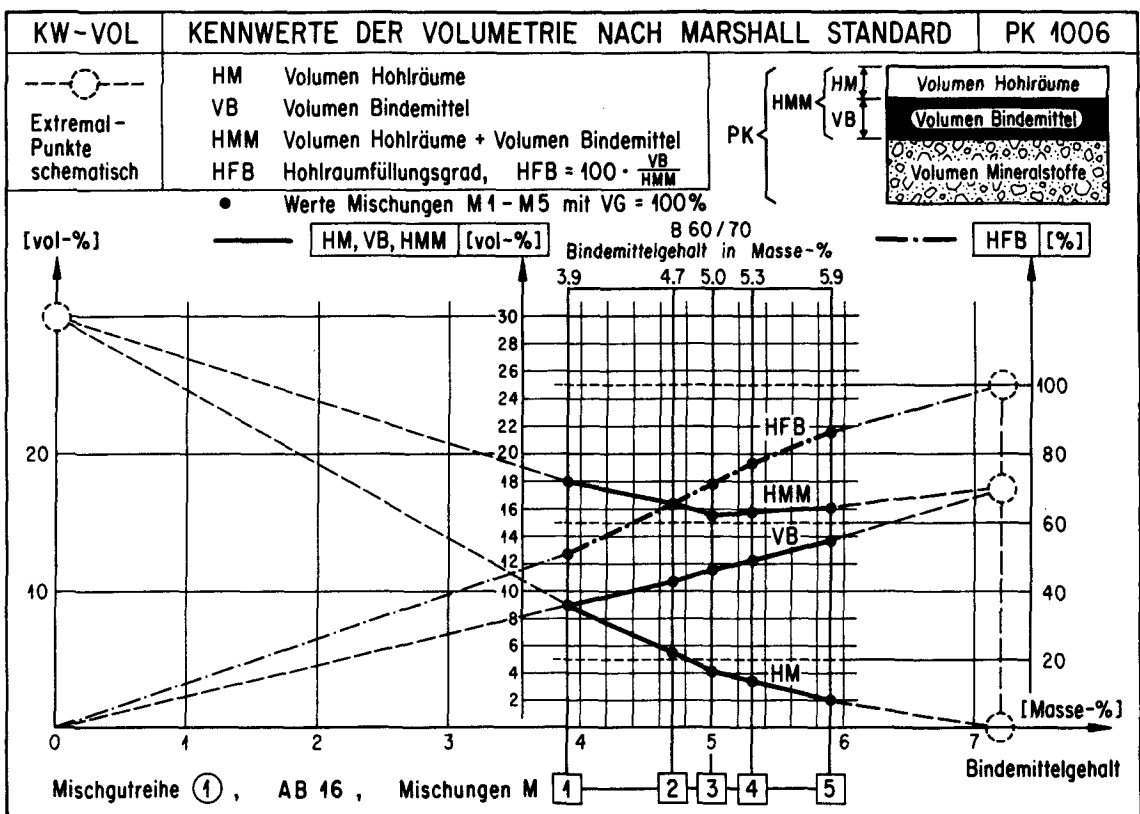


Abb. 90: KW-VOL, Kennwerte der Volumetrie der Mischungen M1 bis M5, bestimmt am Prüfkörper PK 1006 nach Marshall-Standard [112], mit dem Verdichtungsgrad VG 100 % per Definition. Extrempunkte schematisch. Siehe auch die Abbildungen A24 und A25 im Anhang.

Innerhalb dieser Arbeit wurde für das Herstellen aller Prüfkörper (auch anderer Abmessungen und Herstellungsarten als Prüfkörper PK 1006) stets das Erreichen des Verdichtungsgrades VG 100 %, entsprechend Prüfkörper PK 1006 nach Marshall-Standard, angestrebt und in Vorversuchen überprüft. Somit gelten für alle in den Festigkeitsuntersuchungen in den Abschnitten 14, 15 und 16 verwendeten Prüfkörper die aus Abbildung 90 zu entnehmenden Kennwerte der Volu-

metrie (KW-VOL) der Mischungen M1 bis M5, die als "Initialzustände Labor" (IL) mit Verdichtungsgrad VG 100 % bezeichnet werden. Siehe dazu auch die Abbildung 78 in Teil III.

Ergänzend zu Abbildung 90 enthält die Tabelle A3 im Anhang die Werte der Bindemittelgehalte und Füllergehalte sowie der Korngrößenverteilung der Mischungen M1 bis M5. Die Korngrößenverteilung ist zudem in Abbildung A4 im Anhang dargestellt.

Das Filler-Bindemittelverhältnis der Mischungen M1 bis M5 variiert von 1,9...1,45 (der Kehrwert von 0,53...0,70) was praxisüblichen Mischungsverhältnissen entspricht. Gesamthaft wurde der mittlere Bindemittelgehalt innerhalb der Mischgutreihe für einen Asphaltbeton AB 16 mit 5 Masse-% bei Mischung M3 gewollt etwas tief angesetzt, um mit der ganzen Mischgutreihe M1 bis M5 in etwa das ganze Spektrum der Belagstypen nach Tabelle 28 abdecken zu können.

14. SPEZIELLE VERDICHTUNGSVERSUCHE, HERSTELLEN VON PRÜFKÖRPERN

Das Herstellen der Prüfkörper im Labor erfolgte durch verschiedene Verdichtungsarten:

	<u>Abschnitt</u>
Schlag-Verdichtung (S) nach Marshall-Standard (PK 1006, S = 2 x 50) und nach Marshall-Modifiziert, durch Verdichten mit variierender Schlagzahl und mit doppelter Fallmasse (Z) bei Prüfkörpern grösserer Abmessungen.	14.1
Gyrator-Verdichtung (GY)	14.2
Vibro-Verdichtung (V) unter Einsatz eines vertikalwirkenden Vibro-Verdichters nach Abschnitt 6.13.	14.3
Labor-Walz-Verdichtung (W) an Prüfkörpern im Form von Platten, unter Einsatz einer Handwalze nach Abschnitt 6.14.	14.4
Druck-Verdichtung (D) unter statischem Druck (nur Hinweis).	14.5

Bezugsgrösse für alle im Labor hergestellten Prüfkörper und Platten war der Verdichtungsgrad VG 100 % des Prüfkörpers PK 1006 nach Marshall-Standard gemäss [112], mit den Kennwerten der Volumetrie (KW-VOL) der Mischungen M1 bis M5 entsprechend Abbildung 90.

14.1 Schlagverdichtung S

14.11 Marshall-Standard

Die Kennwerte der Volumetrie (KW-VOL) nach Marshall-Standardverdichtung am Prüfkörper PK 1006 (Schlagzahl $S = 2 \times 50$) für die Mischungen M1 bis M5 sind aus Abbildung 90 und den Tabellen A5 und A6 im Anhang zu entnehmen.

14.12 Marshall-Modifiziert

Jeweils vier Prüfkörper PK 1006 der Mischungen M1 bis M5 wurden unter Variation der Schlagzahl S gemäss der Zusammenstellung in Tabelle A5 im Anhang hergestellt. Die Mittelwerte der volumetrischen Kennwerte und der Verdichtungsgrade VG_{50} (Normverdichtungsgrad bezogen auf die Schlagzahl $S = 2 \times 50$) und VG_{100} (Verdichtungsgrad bezogen auf die Schlagzahl $S = 2 \times 100$) sind in der Tabelle A5 im Anhang aufgeführt.

Der Verlauf der Rohdichte (RODI) und des Hohlraumgehaltes (HM) - in Funktion der Schlagzahl S - sind der nachstehenden Abbildung 91 zu entnehmen.

In der Abbildung 91 sind links die experimentell bestimmten Werte der Rohdichte und des Hohlraumgehaltes, rechts die ausgeglichenen Werte aufgrund der Berechnungen der TH Braunschweig [87] dargestellt. Auf letzteren beruht die in Abschnitt 14.13 beschriebene Berechnung der Verdichtungsparameter C nach Arand und Renken. Die ausgeglichenen Werte wurden aus den in acht Verdichtungsstufen (gemäss Tabelle A5 im Anhang) experimentell bestimmten Grössen ermittelt.

14.13 Bestimmen des Verdichtungsparameters C

Das Bestimmen des Verdichtungsparameters C nach Arand und Renken [23, 87] erfolgt über den exponentiellen Lösungsansatz für die Rohdichte RODI in Funktion der Schlagzahl S mit

$$\text{RODI}(S) = a - b \cdot e^{-S/C}, \text{ wobei gilt}$$

$a = \text{RODI}_\infty$: Maximal erreichbare Endrohndichte

RODI_0 : Anfangsrohndichte

$b = (\text{RODI}_\infty - \text{RODI}_0)$: Betrag, um den die Rohdichte während des Verdichtungsprozesses bis zum Erreichen der theoretischen Endrohndichte zunimmt.

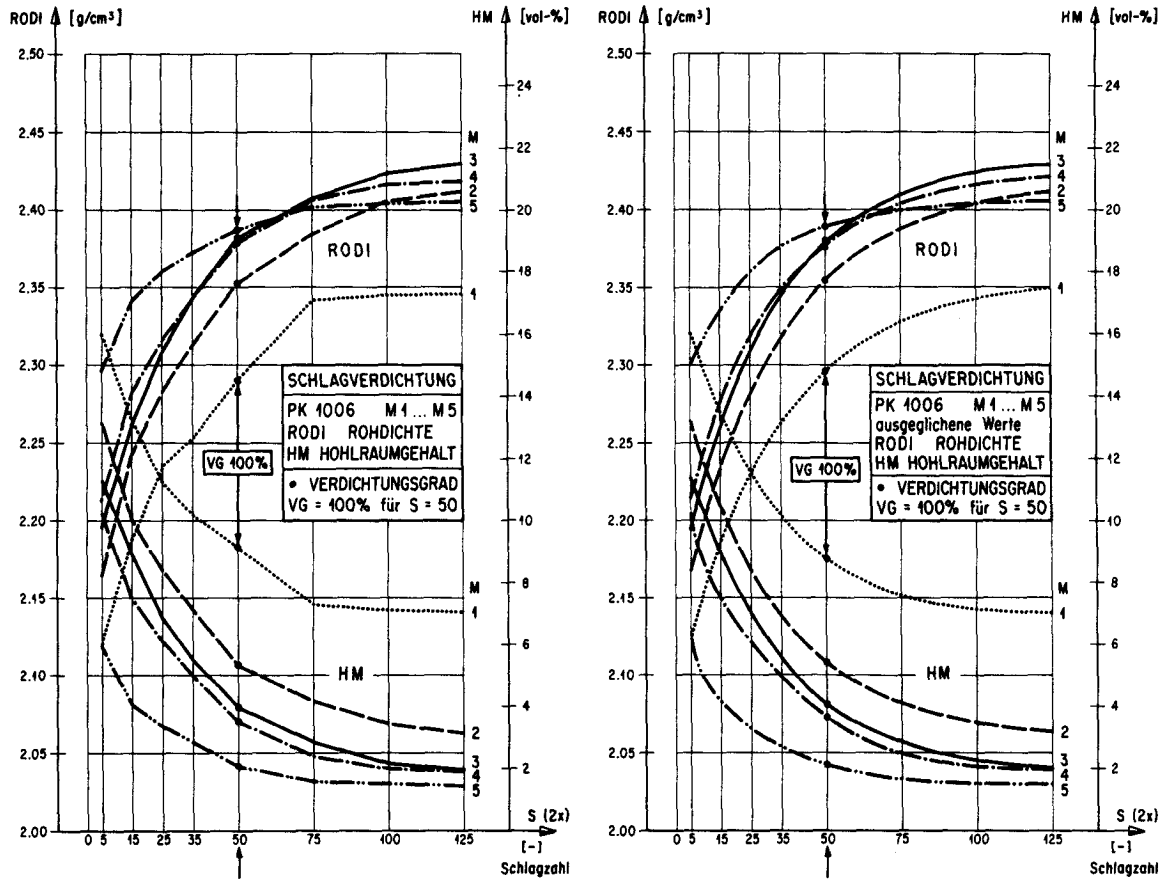


Abb. 91: Schlagverdichtung Marshall-Modifiziert. Mittelwerte der Rohdichte (RODI) und des Hohlraumgehaltes (HM) der Prüfkörper PK 1006 der Mischungen M1 bis M5 in Funktion der Schlagzahl S (zweimal).

Links: Experimentell bestimmte Werte.

Rechts: Ausgeglichenen Werte nach [87].

$e^{-S/C}$: Bestimmt anschaulich aus der Differenz ($RODI_{\infty} - RODI_0$) = b den Anteil, um den die Anfangsrohddichte $RODI_0$ nach einer bestimmten geleisteten Verdichtungsarbeit zunimmt.

S: Schlagzahl (variabel).

C: Faktor C. Er charakterisiert die Geschwindigkeit der Dichtezunahme und wird als universelle Grösse für das Charakterisieren der Verdichtungsarbeit eines Mischgutes (hier aufgrund der Schlagverdichtung über die Schlagzahl S) herangezogen. Er wird als **Verdichtungsparameter C** bezeichnet.

Renken hat in [87] nachgewiesen, dass für bituminöses Mischgut insbesondere ein Zusammenhang besteht zwischen der Grösse des Verdichtungsparameters C ($C <$ bedeutet leicht verdichtbar, $C >$ bedeutet schwer verdichtbar) und der Steifigkeit S_{mix} im Kriechversuch.

Für eine allgemeine Gegenüberstellung zu den aus den vergleichenden Untersuchungen in verschiedenen Festigkeitsprüfungen ermittelten mechanischen Kennwerten wurden die C-Werte der Mischungen M1 bis M5 als Schätzwerte über drei Verdichtungsstufen und als berechnete Grössen aus acht Verdichtungsstufen bestimmt.

Die in Tabelle 29 als C_8 bezeichneten Werte beziehen sich auf die acht Verdichtungsstufen, die Werte C_{100} und C_{125} stellen die erwähnten Schätzwerte nach [87] dar. Sie sind in Abbildung 92 dargestellt.

Verdichtungsparameter C (42 Nm)	Asphaltbeton AB 16 mit Mischgutreihe				
	M1	M2	M3	M4	M5
C_8	32,7	33,2	31,1	29,5	23,8
C_{125}	27,1	30,8	30,3	28,5	22,8
C_{100}	26,9	29,7	29,0	28,3	22,5

Tab. 29: Verdichtungsparameter C der Mischungen M1 bis M5.

C_8 : für $S = 2 \times (5, 15, 25, 35, 50, 75, 100, 125)$

C_{100} : für $S = 2 \times (5, 25, 100)$

C_{125} : für $S = 2 \times (5, 25, 125)$ Schlagzahl $2 \times (-)$

Ein weiterer Vergleich der ermittelten Verdichtungsparameter C mit den mechanischen Kennwerten der Festigkeit aus verschiedenen Prüfverfahren ist für die vergleichenden Untersuchungen von grossem Interesse.

Der Verdichtungswiderstand der Mischungen M1 bis M4 ist aufgrund der ermittelten C-Werte als etwa gleichwertig einzustufen. Mischung M2 weist innerhalb der ganzen Mischgutreihe den maximalen Verdichtungsparameter C auf. Für die Mischung M2, die nach Abbildung 90 innerhalb der ganzen Mischgutreihe noch vor dem bei Mischung M3 erreichten minimalen Hohlraumgehalt der Mineralstoffe (HMM_{min}) liegt, ist somit nach [87] ein etwas höherer Verformungswiderstand gegenüber den anderen Mischungen zu erwarten, insbesondere gegenüber den Mischungen M3 bis M5. Mischung M5 weist als bindemittelreichere, dadurch nach Marshall-Standardverdichtung hohlraumärmere Mischung, einen deutlich kleineren Verdichtungsparameter C auf. Sie ist daher auch als wesentlich weniger standfest zu betrachten. Dies wird durch die Ergebnisse aus den verschiedenen mechanischen Prüfungen in den Abschnitten 15 und 16 auch bestätigt.

Nach Angaben der TH Braunschweig weisen sehr leicht verdichtbare Mischgutsorten Verdichtungswiderstände C von etwa 5 (42 Nm) auf, sehr schwer verdichtbare Mischungen C-Werte von etwa 40 (42 Nm). Dies bedeutet, dass die Mischungen M1 bis M4 normal bis eher schwer verdichtbar sind, die Mischung M5 relativ dazu als mittel bis leicht verdichtbar zu bezeichnen ist. Die Einheit (42 Nm) wird aus der Verdichtung nach Marshall-Standard abgeleitet.

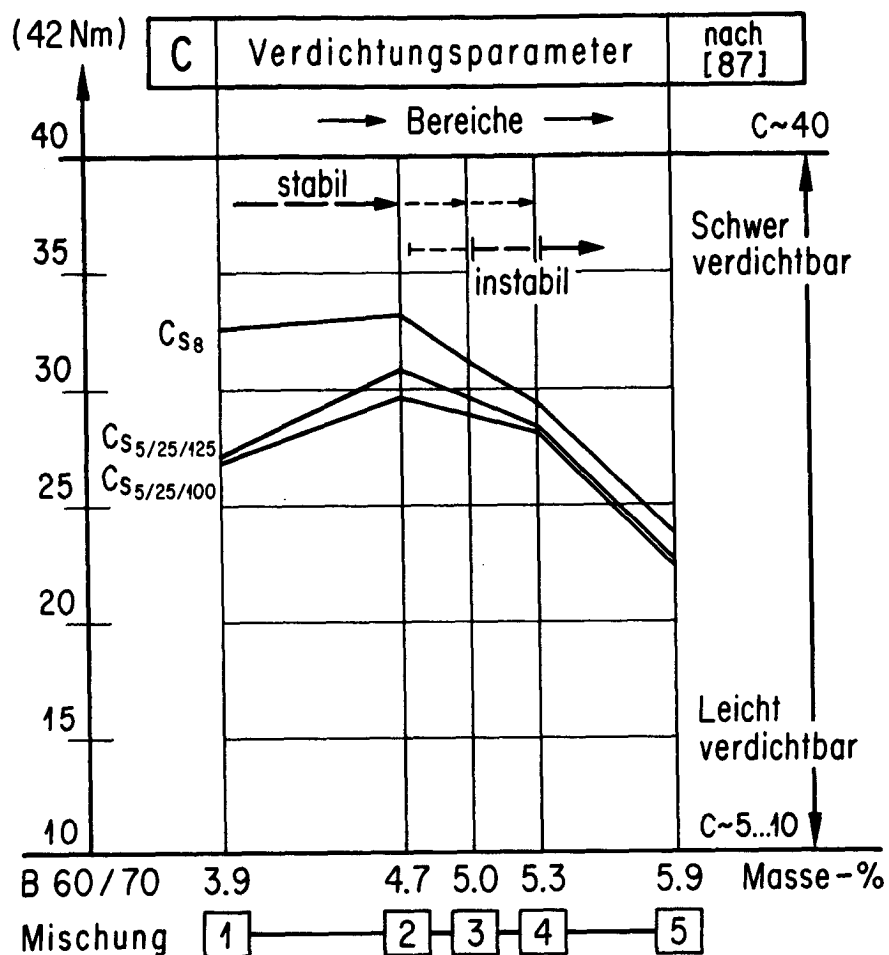


Abb. 92: Verdichtungsparameter C der Mischungen M1 bis M5 gemäss Tabelle 29.

Aufgrund der bestimmten C-Werte aus der Schlagverdichtung nach Marshall-Modifiziert ist die Abgrenzung des stabilen Bereiches innerhalb der Mischgutreihe M1 bis M5 schon bei M2 angedeutet (Beginn des relativen instabilen Verhaltens), deutlich aber bei Mischung M4 vorzunehmen, wie die Abbildung 92 veranschaulicht.

14.14 Verdichtungs-aufwand für verschiedene Verdichtungsgrade (VG)

Für das Verdichten in der Praxis ist zusätzlich von Interesse, welcher relative Verdichtungs-aufwand für das Erreichen der verschiedenen Verdichtungsstufen respektive Verdichtungsgrade erforderlich wird, z.B. für die Schritte von Verdichtungsgrad VG 95 % nach VG 98 % oder von VG 98 % nach VG 100 %. Die Schlagzahlen für die Verdichtungsgrade VG 95 % und VG 98 % wurden aufgrund der Ergebnisse aus der Verdichtung nach Marshall-Modifiziert (Tabelle A5 im Anhang) bestimmt.

Für die Verdichtungsgrade VG 95 %, VG 98 %, VG 100 % sind in den Abbildungen 93 und 94 die erforderlichen Schlagzahlen S für die verschiedenen Verdichtungsgrade und die Differenzen ΔS zwischen den verschiedenen Verdichtungsgraden dargestellt.

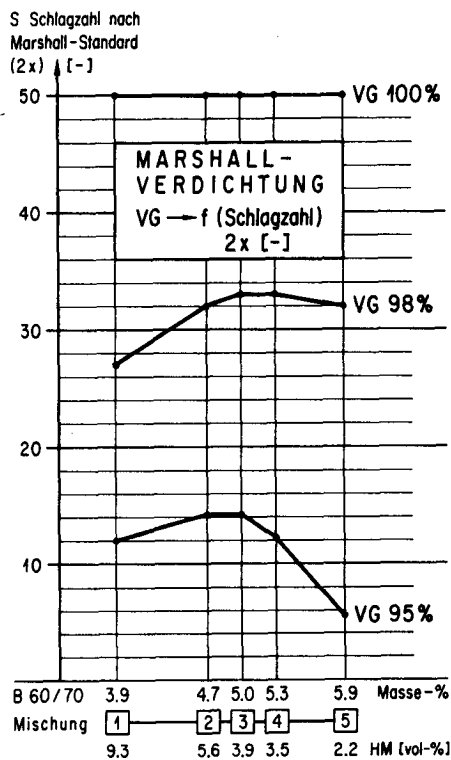


Abb. 93

S Schlagzahl (2x) für die Verdichtungsgrade VG 95 %, 98 % und 100 % der PK 1006 (VG 100 % beruht auf $S = 2 \times 50$ per Definition).

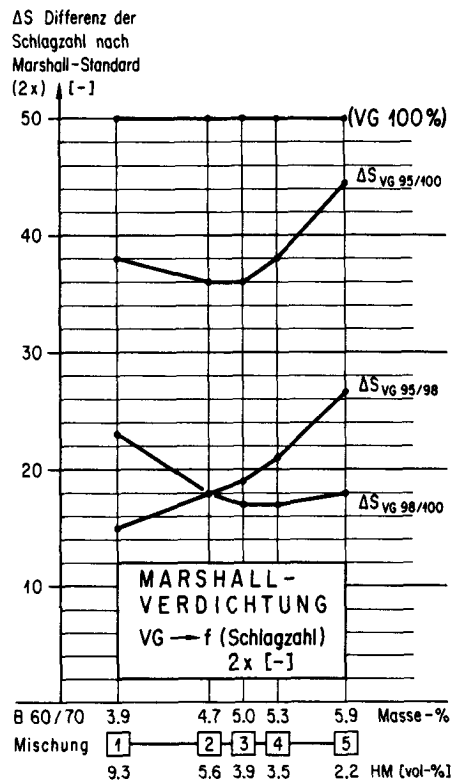


Abb. 94

ΔS Differenz der Schlagzahl S für das Erreichen höherer Verdichtungsgrade ab VG 95 % und VG 98 %, bezogen auf VG 100 % bei der Schlagzahl $S = 2 \times 50$.

Aus Abbildung 93 wird ersichtlich, dass die Mischungen M1 bis M4 für das Erreichen des Verdichtungsgrades VG 95 % annähernd gleiche Schlagzahlen S von 12...14 erfordern. Die verdichtungswilligere Mischung M5 erreicht diesen Verdichtungsgrad jedoch schon bei der Schlagzahl $S = 6$. Für den

Verdichtungsgrad VG 98 % wird dagegen deutlich, dass die Mischung M1 (hohlraumreich bei VG 100 %) eine deutlich tiefere Schlagzahl erfordert als die Mischungen M2 bis M5.

Aufschluss über die erforderlichen Differenzen ΔS für das Erreichen nächsthöherer Verdichtungsgrade gibt die Abbildung 94. Die hohlraumärmeren Mischungen M4 und M5 erfordern grössere Differenzen der Schlagzahl S von VG 95 % nach VG 98 % und von VG 95 % nach VG 100 %. Für den Schritt von VG 98 % nach VG 100 % erfordert die Mischung M1 jedoch wieder eine deutlich grössere Differenz der Schlagzahl S als die Mischungen M2 bis M5 (VG 98 % von M1 wird relativ früh erreicht, dann noch weitere Zunahme der Verdichtung bei der hohlraumreichen Mischung M1), was die erwähnte stark nivellierende Wirkung der Schlagverdichtung bezüglich des bei der Schlagzahl $S = 2 \times 50$ (-) definierten Verdichtungsgrades für die Mischungen M1 bis M5 unterstreicht.

Generell ist somit an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die Standard-Schlagverdichtung für die verschiedenen Mischguttypen eine relativ stark nivellierende Wirkung hat. Dies zeigt sich darin, dass auch verdichtungsunwillige (sperrige, im allgemeinen hohlraumreiche) Mischungen - entsprechend Mischung M1 - mit zunehmendem Verdichtungsaufwand anfänglich noch zusätzliche relative Verdichtung erfahren, wogegen verdichtungswillige, im allgemeinen bindemittelreiche, dadurch hohlraumarme, "überfettete" Mischungen - entsprechend Mischung M5 - auch bei hohem weiterem Verdichtungsaufwand nur noch geringe relative Verdichtungs Zunahme bezüglich Verdichtungsgrad VG 100 % aufweisen.

Für die Schlagverdichtung ist aber festzuhalten, dass dieser Vergleich gewissermassen "im doppelten Sinne" relativ bleibt, da ja der Verdichtungsgrad VG 100 % per Definition auch auf der - wie erwähnt - stark nivellierenden Verdichtungsstufe von $S = 2 \times 50$ Schlägen nach Marshall-Standard beruht. Zu diesem Punkt wird in Abschnitt 14.2, Gyratorverdichtung, ein weiterer Vergleich bezüglich des erforderlichen Verdichtungsaufwandes für das Erreichen eines nächsthöheren Verdichtungsgrades ab einem vorgegebenen Verdichtungsgrad angefügt. Dabei wird, wie in Abbildung 94, die erforderliche Differenz im Verdichtungsaufwand für die Schritte von VG 95 % nach VG 98 % und VG 100 % sowie von VG 98 % nach VG 100 % betrachtet. Siehe dazu auch die Abbildungen 96 und 97.

14.15 Schlagverdichtung (S) der Prüfkörper PK 1012...PK 1520

Die Schlagverdichtung von Prüfkörpern anderer Abmessungen als nach Marshall-Standard, somit der Prüfkörper PK 1012.. ..1520 nach Abbildung 5 erfolgte unter Erhöhen der Schlagzahlen und teilweise mittels doppelter Fallmasse (9,5 kg) gegenüber Marshall-Standard. Aus umfangreichen Vorversuchen konnten innerhalb [89] die definitiven Schlagzahlen für das Erreichen des Verdichtungsgrades VG 100 % aller Prüfkörper ermittelt werden.

Für die Mischungen M1 bis M5 des Asphaltbetons AB 16 sind die erreichten Kennwerte der Volumetrie (KW-VOL) in den Tabellen A6 und A7 im Anhang für die Prüfkörper PK 1006, 1012, 1510 und 1520 zusammengestellt.

14.2 Gyratorverdichtung

14.21 Gyratorverdichtung der Mischungen M1 bis M5

Vergleichende Untersuchungen mit dem Gyratorverdichter an je drei Prüfkörpern PK 1006 der Mischungen M1 bis M5 des Asphaltbetons AB 16 konnten durch grosszügiges Entgegenkommen der Herren Prof. Dr. G. Paulmann und Dr. P. Motz am Institut für Strassenwesen der TH Darmstadt durchgeführt werden. Diese Verdichtungsversuche wurden in Ergänzung und als Vergleich zur Schlagverdichtung angestrebt, da im Gyrator die erreichte Verdichtung (Rohdichte und Verdichtungsgrad) am Prüfkörper in Funktion des Verdichtungsaufwandes verfolgt und analysiert werden kann.

Gleichzeitig sollte die in Abschnitt 14.13 beschriebene, stark nivellierende Wirkung der Schlagverdichtung mit einem weiteren Verdichtungsverfahren vergleichend untersucht werden.

In der Tabelle A8 im Anhang sind die mit der Gyratorverdichtung erreichten Kennwerte der Volumetrie (KW-VOL) und die auf die Marshall-Standardverdichtung bezogenen Verdichtungsgrade (VG) in Funktion der Umdrehungszahl des Gyrators für die Mischungen M1 bis M5 aufgeführt. Die Abbildung 93 zeigt den Verlauf dieser Kennwerte in Funktion der Umdrehungszahl U_G des Gyrators.

Eine Einschränkung muss bei der Betrachtung des in Abbildung 95 dargestellten gesamten Verlaufes der Verdichtungskurve (Rohdichte RODI in Funktion der Umdrehungszahl U_G des Gyrators) insofern vorgenommen werden, als ein Verdichten bei der nach Marshall-Verdichtung vorgegebenen Verdichtungstemperatur von $T_1 = 155^\circ\text{C}$ nur bis zu einem Verdichtungsgrad von VG 98 % erfolgte. Nach dem Erreichen der Verdichtungstemperatur $T_2 = 60^\circ\text{C}$ wurde anschliessend weiter verdichtet bis VEN (Verdichten Ende) gemäss Abbildung 95. Die gleichen physikalischen Bedingungen gelten somit nur

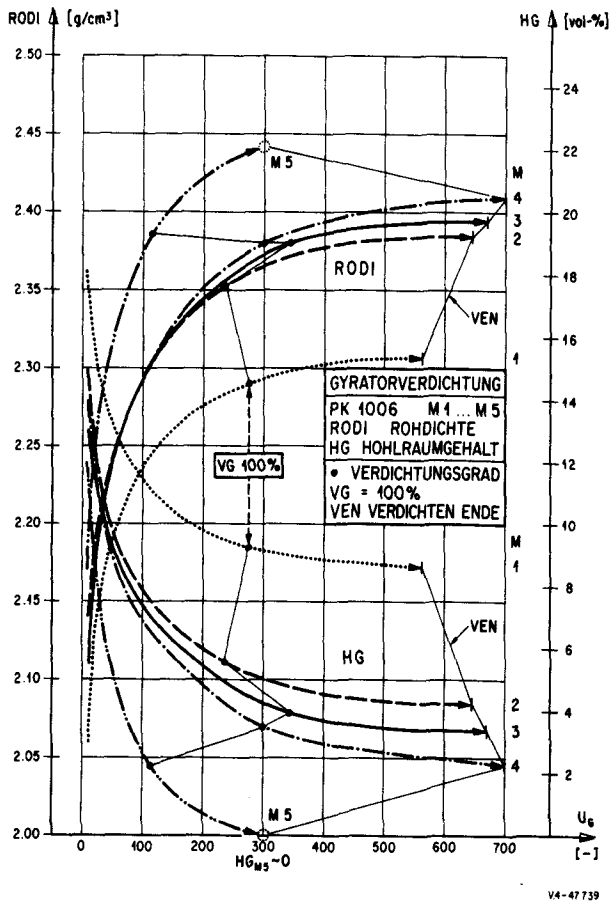


Abb. 95

Gyratorverdichtung

KW-VOL der PK 1006 der Mischungen M1 bis M5 in Funktion der Umdrehungszahl U_G .

RODI Rohdichte

HG Hohlraumgehalt

• Punkte mit VG 100 %

VEN Verdichten Ende

bis zum Erreichen des Verdichtungsgrades VG 98 %. Dies war für das Bestimmen des Verdichtungsparameters C_{gy} zu berücksichtigen und erforderte das Einsetzen der nach modifizierter Marshall-Verdichtung erreichbaren maximalen Rohdichte in Abschnitt 14.23 unter Zuordnung der in der Tabelle A9 im Anhang aufgeführten Umdrehungszahl für VEN.

14.22 Verdichtungsaufwand im Gyrator für verschiedene Verdichtungsgrade

Wie bei der Schlagverdichtung unter Abschnitt 14.13 erwähnt, wurde auch für die Gyratorverdichtung der erforderliche Verdichtungsaufwand (U_G) für das Erreichen bestimmter Verdichtungsgrade ermittelt. Daraus wurden die Differenzen ΔU_G für das Erreichen nächsthöherer Verdichtungsgrade ab bestimmten vorgegebenen Verdichtungsgraden ermittelt. Diese Größen sind in den Abbildungen 96 und 97 dargestellt.

Aus den Abbildungen 96 und 97 wird deutlich, dass die Mischung M3 (mit der nach Marshall-Standard innerhalb der Mischgutreihe M1 bis M5 erreichten maximalen Lagerungsdichte der Mineralstoffe) gesamthaft den grössten Verdichtungsaufwand im Gyrator für das Erreichen des Verdichtungs-

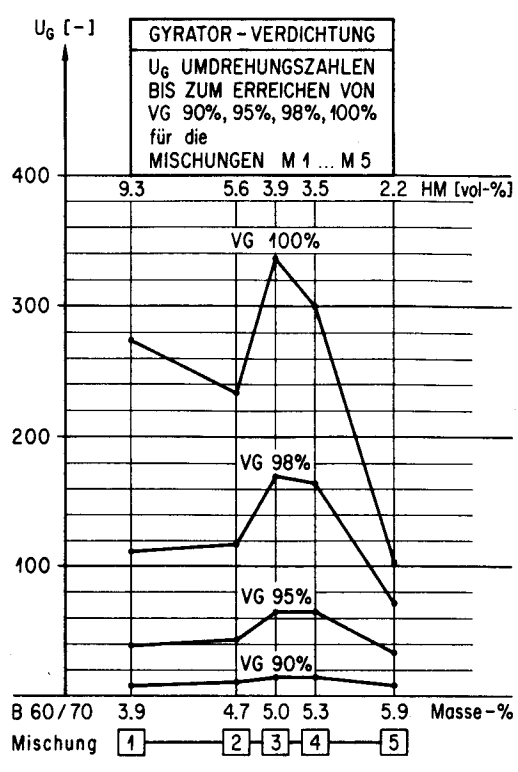


Abb. 96

U_G Umdrehungszahl des Gyrtors für verschiedene Verdichtungsgrade VG der Mischungen M1 bis M5, bezogen auf VG 100 % nach Marshall-Standard.

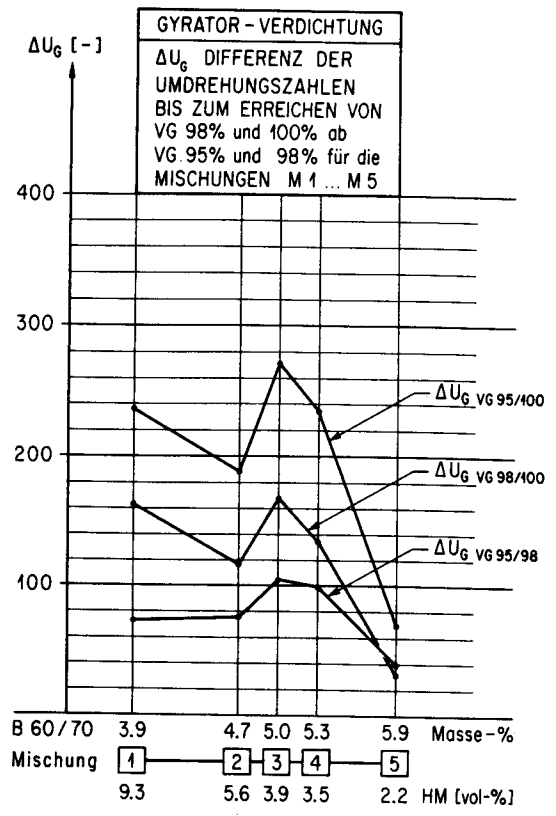


Abb. 97

ΔU_G erforderliche Differenz der Umdrehungszahl des Gyrtors für das Erreichen nächsthöherer Verdichtungsgrade, bezogen auf VG 100 % nach Marshall-Standard.

grades VG 100 % erfordert. Die Mischungen M1 bis M4 liegen auch bei der Gyratorverdichtung im Verdichtungsaufwand gegenüber der Mischung M5 deutlich höher. Der Bereich stabiler Mischungen ist aufgrund der Gyratorversuche bei Mischung M4 abzugrenzen. Aus der Abbildung 97 wird deutlich, dass auch die hohlraumreiche Mischung M1 hohe Differenzen im Verdichtungsaufwand (ΔU_G) erfordert, um den Verdichtungsgrad VG 100 % ab den Verdichtungsgraden VG 95 % und VG 98 % (unter der erwähnten Temperaturabstufung von T_1 nach T_2) zu erreichen. Der tiefe Bindemittelgehalt der Mischung M1 bewirkt gegenüber der Mischung M2 offensichtlich wesentlich grössere innere Reibung der Mineralstoffe, was diesen hohen relativen Verdichtungsaufwand für die Mischung M1 bewirkt.

Für die Mischung M2 mit 0,8 Masse-% höherem Bindemittelgehalt gegenüber Mischung M1 liegt somit der erforderliche Verdichtungsaufwand für den Verdichtungsgrad VG 100 % etwas tiefer. Dieser steigt jedoch für die Mischung M3 deutlich an. Es ist darauf hinzuweisen, dass die bindemittelreiche,

"fette" Mischung M5 gegenüber den Mischungen M1 bis M4 wesentlich geringeren Verdichtungsaufwand erfordert. Diese Feststellung gilt für die Schlagverdichtung gemäss den Abbildungen 93 und 94 nicht. Dies beruht, wie schon erwähnt, auf der stark nivellierenden Wirkung der Schlagverdichtung und zudem auf der über die Schlagverdichtung definierten Vergleichsbasis des Verdichtungsgrades VG 100 % mit $S = 2 \times 50$ nach Marshall-Standard.

In den Abbildungen 98 und 99 ist der Verdichtungsaufwand für das Erreichen bestimmter Verdichtungsgrade für die Gyrator- und die Schlagverdichtung nochmals vergleichend dargestellt. Die nivellierende Wirkung der Schlagverdichtung wird veranschaulicht, ebenso die starke Relativierung des Verdichtungsgrades eines bituminösen Mischgutes durch die Definition des Verdichtungsgrades VG 100 % mit $S = 2 \times 50$ Schlägen nach Marshall-Standard.

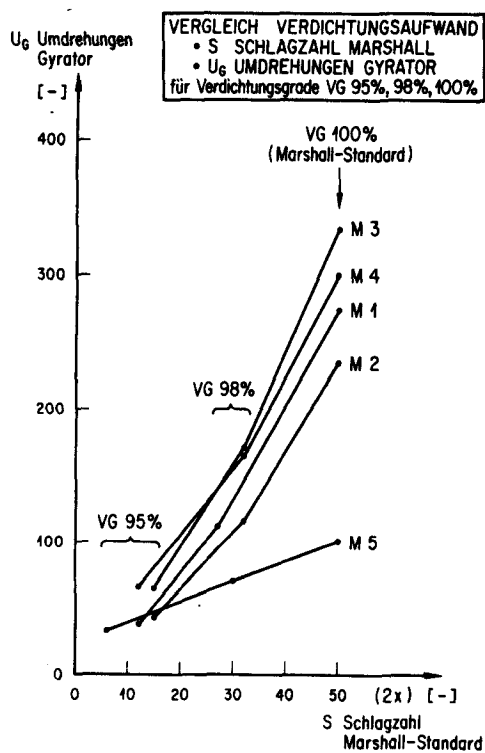


Abb. 98

Vergleich des Verdichtungsaufwandes bei Gyratorverdichtung und bei Schlagverdichtung für verschiedene Verdichtungsgrade VG, bezogen auf VG 100 % nach Marshall-Standard.

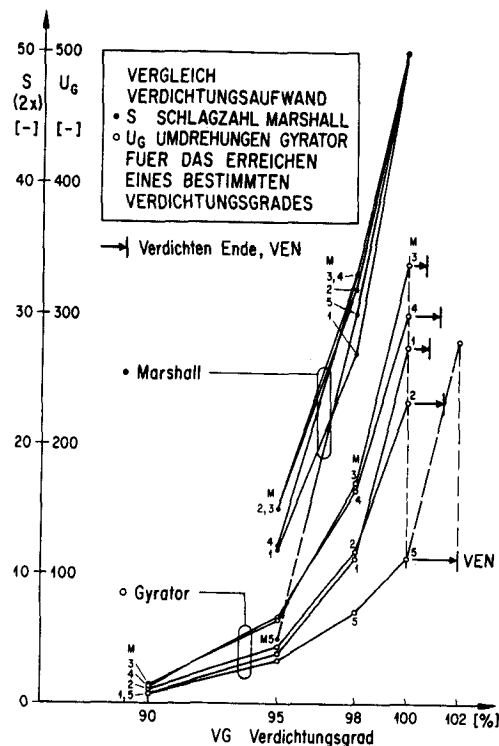


Abb. 99

Vergleich des Verdichtungsaufwandes bei Gyratorverdichtung und bei Schlagverdichtung in Funktion des Verdichtungsgrades VG, bezogen auf VG 100 % nach Marshall-Standard.

14.23 Das Bestimmen eines Verdichtungsparameters C-Gyrator, C_{GY}

Das Bestimmen des Verdichtungsparameters C_{GY} erfolgte wie bei der Schlagverdichtung über den Verlauf der Verdichtungskurve, der Rohdichte in Funktion des Verdichtungsaufwandes, ausgedrückt durch die Umdrehungszahl U_G des Gyrotors. Diese Verdichtungskurven sind in Abbildung 95 dargestellt, die dazugehörigen Werte sind in der Tabelle A8 im Anhang aufgeführt.

Die Werte für C_{GY} der Mischungen M1 bis M5 sind zusammen mit den aus der Schlagverdichtung Marshall-Modifiziert abgeleiteten C-Werten in der Tabelle 30 enthalten und in der Abbildung 100 vergleichend dargestellt.

Verdichtungsparameter C (42 Nm)	AB 16, Mischungen M1 bis M5				
	M1	M2	M3	M4	M5
C ₈	32,0	33,2	31,0	29,5	23,8
C ₁₂₅	27,1	30,8	30,3	28,5	22,8
C ₁₀₀	26,9	29,7	29,0	28,3	22,5
C _{GY} (98 %)	24,5	22,4	24,3	21,9	17,6

Tab. 30: C_{GY} Verdichtungsparameter, ermittelt durch Gyrotorverdichtung, im Vergleich mit den C-Werten nach Marshall-Modifiziert gemäss [87] und Tabelle 29 sowie Abbildung 100.

Die Verdichtung an je drei Prüfkörpern PK 1006 der Mischungen M1 bis M5 erfolgte bei der Temperatur T₁ = 155°C bis zum Verdichtungsgrad VG 98 %, anschliessend bei T₂ = 60°C bis zu "Verdichten Ende" (VEN) gemäss Tabelle A8 im Anhang und Abbildung 95.

Aus der Abbildung 100 wird deutlich, dass der Verdichtungsparameter C_{GY} innerhalb der Mischgutreihe bei steigendem Bindemittelgehalt gesamthaft abnehmend ist. Deutlich tiefer bezüglich C_{GY} liegt die Mischung M5 im Vergleich zu den Mischungen M1 bis M4. Der hohe Verdichtungsparameter der Mischung M1 im Vergleich zu Mischung M2 lässt sich durch die grosse innere Reibung dieser bindemittelarmen, dadurch hohlraumreichen Mischung M1 erklären.

Aufgrund des ermittelten Verdichtungsparameters C_{GY} sind die Mischungen M1 bis M4 bezüglich des Verdichtungsstandes als etwa gleichwertig zu beurteilen. Die Mischung M5 liegt jedoch wiederum deutlich tiefer, was die Ergebnisse bezüglich des Verlaufes der Rohdichte in Funktion der Schlagzahl S bei der Schlagverdichtung bestätigt.

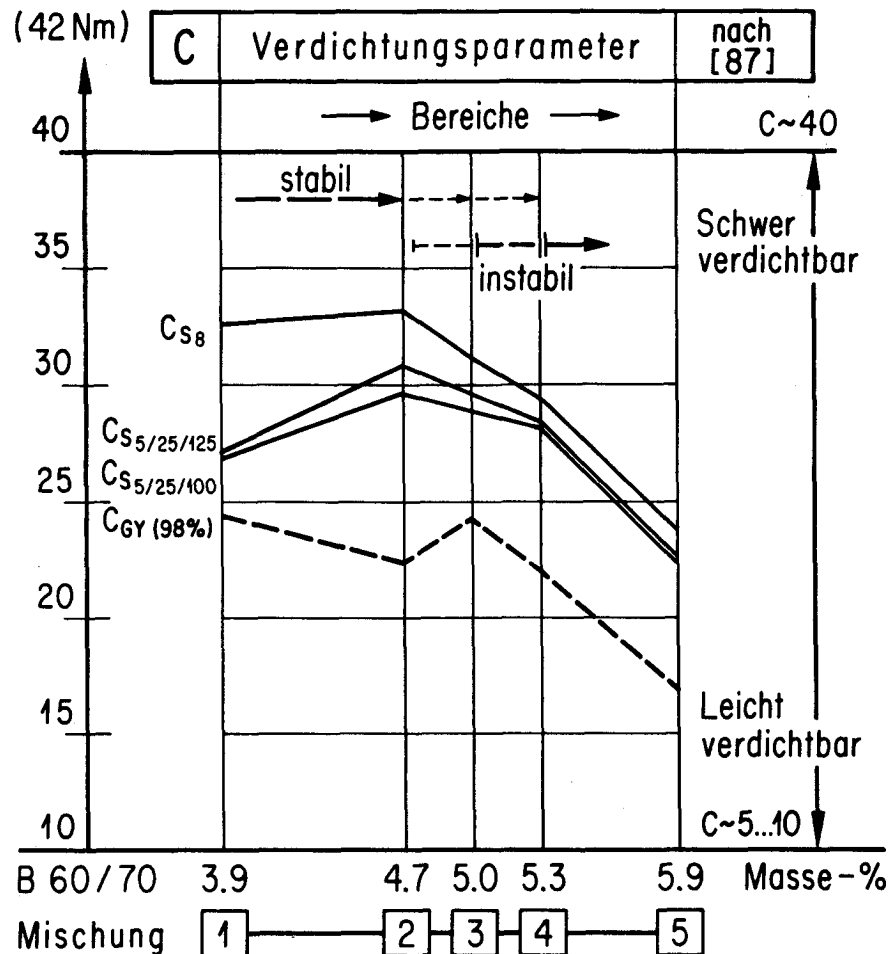


Abb. 100: C_{GY} Verdichtungsparameter abgeleitet aus der Gyratorverdichtung, im Vergleich zu den aus der Schlagverdichtung nach Marshall-Modifiziert abgeleiteten C-Werten nach [87] und [89] gemäss Tabelle 30.

14.3 Vibroverdichtung

Das Verdichten mit einem vertikal wirkenden Vibroverdichter nach Abbildung 13 wurde für das Herstellen von Prüfkörpern verschiedener Abmessungen (PK 1004, 1006, 1008 sowie PK 1504, 1506 und 1508) der Mischungen M1 bis M5 angewendet. Der Vibroverdichter für diese Untersuchungen wurde freundlicherweise von einer Bauunternehmung zur Verfügung gestellt. Die Zielsetzung bei der Vibroverdichtung war das Erreichen des Verdichtungsgrades VG 100 % nach Marshall-Standard für alle Prüfkörper. Nach Vorversuchen, die auch auf einer internen Studie [91] der Bauunternehmung beruhten, konnten die definitiven Verdichtungszeiten festgelegt werden. Die Ergebnisse in der Tabelle A9 im Anhang zeigen, dass die angestrebte Verdichtung mit Verdichtungsgrad VG

100 % gut angenähert werden konnte. Ergebnisse aus vergleichenden Untersuchungen an Prüfkörpern verschiedener Herstellungsarten (Schlag-, Vibro- und Walzverdichtung) sind in Teil IV, Abschnitt 16, aufgeführt. Weitere Anwendungen der Vibroverdichtung sind in [89, 90] beschrieben.

14.4 Druckverdichtung (Hinweis)

Das Verdichten unter statischem Druck nach Abschnitt 6.12 konnte für die nach dem Betonprinzip aufgebauten bituminösen Mischgutsorten nur mit Einschränkungen erfolgen, da auch unter dem Einsatz gewölbter Verdichtungsstempel (mit dem "Durchschieben" der zu verdichtenden Masse nach Abbildung 11) sehr hohe Druckspannungen für das Erreichen des Verdichtungsgrades VG 100 % erforderlich wurden. Dadurch resultierten massive Kornzertrümmerungen der Mineralstoffe, vor allem im Splittbereich. Umfangreiche Versuche zur statischen Druckverdichtung sind auch in [89] enthalten. Die Druckverdichtung kann jedoch für das Herstellen von Prüfkörpern aus Filler-/Bindemittelgemischen sowie für Sand- und Gussasphalte zufriedenstellend eingesetzt werden, wobei die Anwendung des "Doppelkolbenprinzips" nach Krass [48, 61] erfolgen sollte.

14.5 Walzverdichtung

Mit den Mischungen M1 bis M5 des AB 16 sowie mit weiteren Mischungen AB 10, AB 16, AB 25 und HMT 40 wurden Platten der Abmessungen 700 mm x 500 mm x 65 mm durch Verdichten mit der in Abschnitt 6.14 beschriebenen Handwalze hergestellt. Nach dem Erwärmen des Mischgutes AB 16, M1 bis M5, auf die Verdichtungstemperatur von $T = 155^{\circ}\text{C}$ (Verdichtungstemperatur für ein Bindemittel B 60/70 nach Marshall) und dem Einfüllen in Stahlrahmen wurden drei Stufen von Walzübergängen (W1 bis W3) gemäss Tabelle 31 aufgebracht.

Stufe	n_m	Masse (kg)	Masse total (kg)	Linienlast (N/mm)
W1	20	56	56	2,6
W2	20	W1 + 2·26	108	4,8
W3	120...150	W1 + 2·38	132	6,2

Tab. 31: Stufen der Walzverdichtung W mit der Handwalze im Labor (n_m erforderliche mittlere Anzahl Walzübergänge für das Erreichen von VG 100 %).

Aus Vorversuchen und nach [93] wurden die in der Tabelle 31 zusammengestellten erforderlichen Walzübergänge W1 bis W3 für die verschiedenen Verdichtungsstufen ermittelt. Es resultierten daraus die in der Tabelle A10 im Anhang aufgeführten Kennwerte der Volumetrie (KW-VOL) und die berechneten Verdichtungsgrade VG für die Mischungen M1 bis M5.

Nach Tabelle A10 sind die erreichten Verdichtungsgrade bezüglich VG 100 % als zufriedenstellend bis gut zu bezeichnen. Dies lässt das Anwenden der Walzverdichtung mit der Handwalze im Labor nach [93] für weitere Versuche zur Prüfkörperherstellung als brauchbar erscheinen, obwohl für das Erreichen des Verdichtungsgrades VG 100 % der einzelnen Mischungen eine teilweise sehr hohe Anzahl von Walzübergängen W3 erforderlich wurde.

15. KONVENTIONELLE MECHANISCHE PRÜFVERFAHREN

15.1 Konventionelle technologische (empirische) Prüfverfahren

15.11 Marshall-Versuche, MV (Prüfverfahren "in der Wärme")

Siehe dazu die Tabellen A6, A11 und die Abbildung A24 im Anhang.

a) Marshall-Standard, PK 1006

Die Ergebnisse der normierten Marshall-Prüfung nach [111, 112] an den Prüfkörpern PK 1006 der Mischungen M1 bis M5 des Asphaltbeton AB 16 sind in der Abbildung 101, zusammen mit den Kennwerten der Volumetrie (KW-VOL), nach Abbildung 90 zusammengestellt.

Aus der Abbildung 101 wird ersichtlich, dass die Stabilität SM innerhalb der Mischgutreihe M1 bis M5 bei der Mischung M2 einen maximalen Wert erreicht. Dieses Maximum tritt vor dem Erreichen der maximalen Lagerungsdichte (somit vor dem minimalen Hohlraumgehalt HMM_{min} der Mineralstoffe) bei der Mischung M3 auf. Im allgemeinen liegen bindemittelarme, dadurch hohlraumreiche, "trockene" Mischungen - entsprechend der Mischung M1 - in der Stabilität SM beispielsweise gegenüber einer Mischung M2 höher. Hier weist die Mischung M1 innerhalb der Mischgutreihe infolge des deutlich tieferen Bindemittelgehaltes von nur 3,9 Massen-% für einen Asphaltbeton AB 16 jedoch offensichtlich zu geringe Kohäsion auf, was die gegenüber der Mischung M2 geringere Stabilität erklären lässt.

Für die Mischgutreihe M1 bis M5 des AB 16 ist aufgrund der Stabilitätswerte SM ein Optimum bei Mischung M2 vorliegend, was für einen allgemeinen Vergleich mit den Ergebnissen aus anderen Prüfverfahren zu beachten ist.

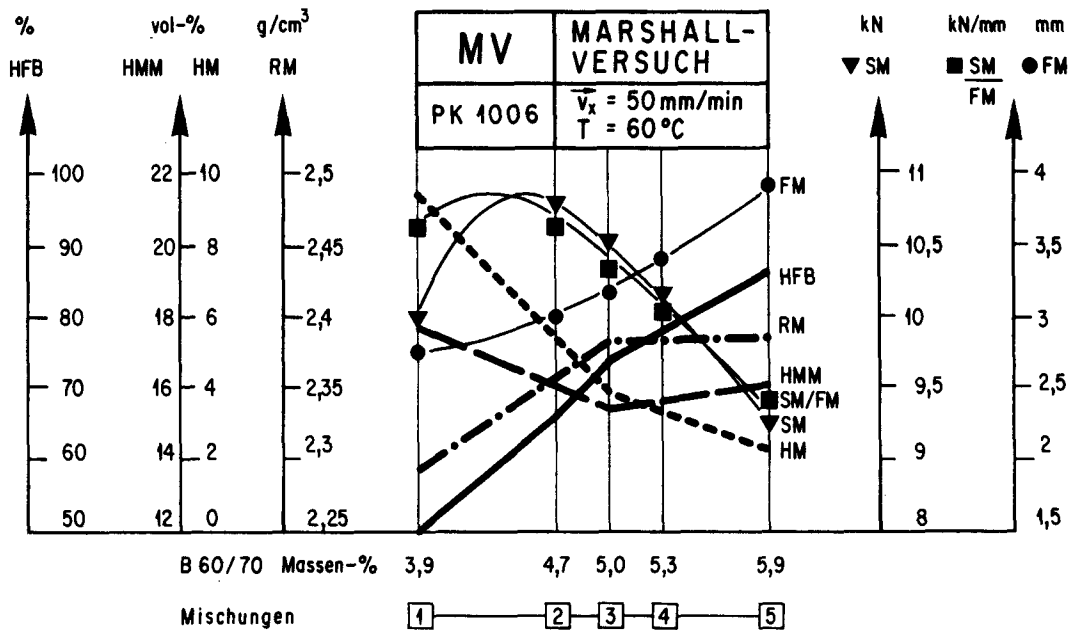


Abb. 101: Marshall-Standard, Prüfkörper PK 1006 - Festigkeitskennwerte (KW-FE) der Mischungen M1 bis M5 der Mischgutreihe des Asphaltbeton AB 16.

SM: (▼) Stabilität
 FM: (●) Fließwert
 SM/FM: (■) Steifigkeit (Quotient)

in der Gegenüberstellung zu den Kennwerten der Volumetrie (KW-VOL) nach Abbildung 90.

HM: Hohlraumgehalt
 RM: Rohdichte
 HMM: Hohlraumgehalt der Mineralstoffe
 HFB: Hohlraumfüllungsgrad

Die Mischungen M4 und M5 weisen bezüglich der Stabilität FM die Tendenz zu unstabilem Verhalten innerhalb der Mischgutreihe auf. Ausgeprägt zeigt Mischung M5 dieses Verhalten, was mit dem deutlichen Überschreiten des minimalen Hohlraumgehaltes (HMM_{\min}) der Mineralstoffe zu erklären ist. Infolge des steigenden Bindemittelgehaltes wird das "Bindemittelangebot" grösser, der Bindemittelfilm dicker, was bei einem Prüfverfahren "in der Wärme" zu deutlicher Abnahme der inneren Reibung durch Kontaktverluste zwischen den Mineralkörnern und damit zu verstärktem viskosem Fließen führt.

Diese Feststellung wird durch den innerhalb der Mischgutreihe M1 bis M5 ansteigenden Fließwert FM bestätigt. Der aus der Stabilität und dem Fließwert resultierende Quotient SM/FM, die Marshall-Steifigkeit, erreicht ebenfalls einen maximalen Wert bei Mischung M2

und zeigt eine deutliche Abnahme für die Mischungen M3 bis M5. Die Mischung M1 erreicht jedoch bezüglich der Steifigkeit annähernd den Wert von Mischung M2.

Aufgrund der Festigkeitsprüfung nach Marshall-Standard ist der stabile Bereich innerhalb der Mischgutreihe M1 bis M5 nach Mischung M2 abzugrenzen. Dies bestätigt, dass die maximalen Festigkeitswerte bei Prüfverfahren "in der Wärme" vor dem Erreichen der maximalen Lagerungsdichte der Mineralstoffe, damit vor dem Erreichen des minimalen Hohlraumgehaltes der Mineralstoffe (HMM_{\min}) auftreten. Siehe auch Abbildung A25 im Anhang.

b) Marshall-Gross, PK 1510

Im Vergleich zur Verdichtung und Festigkeitsprüfung nach Marshall-Standard wurden auch Versuche Marshall-Gross mit Prüfkörpern PK 1510 durchgeführt. Die Festigkeitsprüfung erfolgte mit dem Einbau EB 6b, gemäss den Abbildungen 55 und 56. Die Ergebnisse der volumetrischen Kennwerte der Prüfkörper PK 1510 (nach Schlagverdichtung mit doppelter Masse der Falleinheit gegenüber Marshall-Standard) sind in der Tabelle A7 im Anhang enthalten. Die Festigkeitskennwerte Marshall-Gross sind in der Tabelle A11 im Anhang - zusammen mit den Festigkeitskennwerten nach Marshall-Standard - aufgeführt.

In Abbildung 102 sind die Festigkeitskennwerte beider Marshall-Prüfungen vergleichend dargestellt.

In Abbildung 102 wurden in der Gegenüberstellung unterschiedliche Einheiten gewählt. Die Ergebnisse aus dem Prüfverfahren Marshall-Standard sind mit grösseren Einheiten abgebildet. Dies verdeutlicht aber zusätzlich das offensichtlich bessere Differenzieren des Prüfverfahrens Marshall-Gross in diesem Beispiel.

Auch im Prüfverfahren Marshall-Gross ist der stabile Bereich innerhalb der Mischgutreihe M1 bis M5 nach der Mischung M2 abzugrenzen. Dies aufgrund der Kennwerte FM und SM/FM, die ab Mischung M3 deutliche Zunahme resp. Abnahme zeigen. Das Maximum der Stabilität tritt hier erst bei Mischung M3 auf, im Gegensatz zum Prüfverfahren Marshall-Standard. Gesamthaft zeigen beide Prüfverfahren ähnliches Verhalten der Mischungen M1 bis M5 innerhalb der ganzen Mischgutreihe, wobei das Prüfverfahren Marshall-Gross deutlicher differenziert.

Das Prüfverfahren Marshall-Gross wird für verschiedene Abklärungen im Zusammenhang mit der Zusammensetzung von Mischgut für Heissmischtragschichten HMT sowie für Spezialbeläge im Asphaltwasserbau mit Grösstkorndurchmesser der Mineralstoffe bis 40 mm resp. 60 mm eingesetzt. Ergebnisse vergleichender Untersuchungen zwischen Marshall-Standard und Marshall-Gross sind in [45] enthalten.

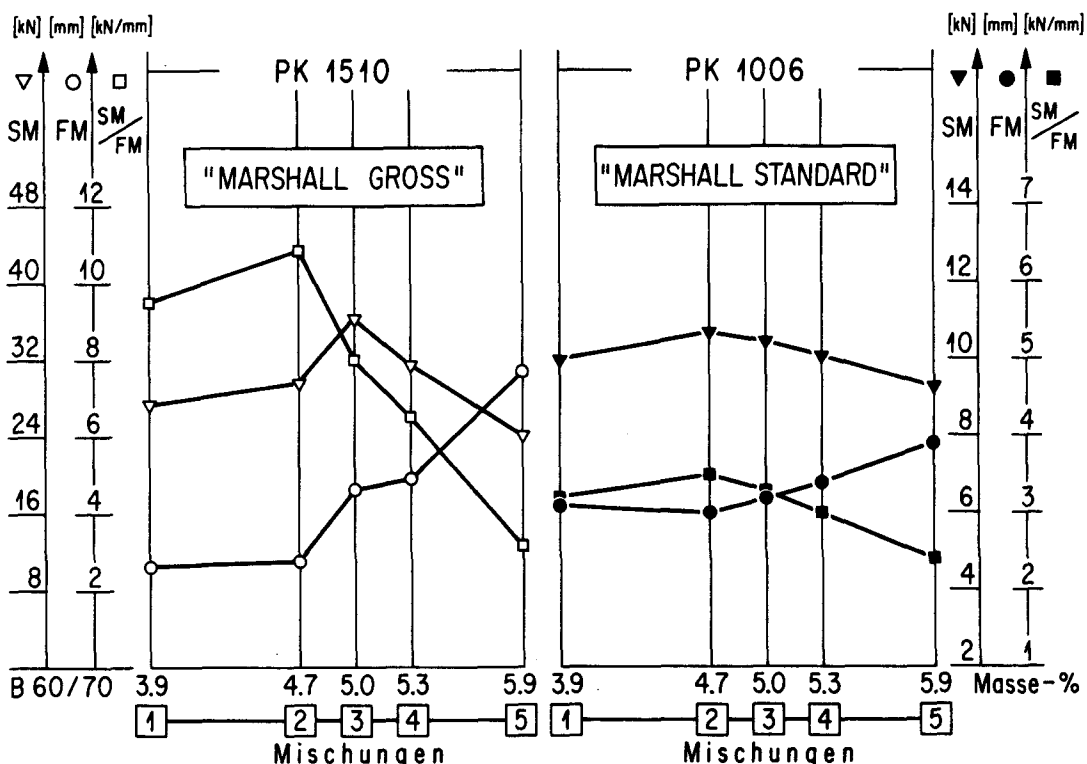


Abb. 102: Festigkeitskennwerte nach Marshall-Standard an Prüfkörpern PK 1006 und nach Marshall-Gross an Prüfkörpern PK 1510 der Mischungen M1 bis M5, Mischgutreihe Asphaltbeton AB 16.

15.12 Spaltzugversuch, SPV (Prüfverfahren "in der Kälte")

Die Spaltzugversuche wurden an den Prüfkörpern PK 1006, 1012 sowie PK 1510 und 1512 (alle mit einem Verdichtungsgrad VG \approx 100 %) der Mischungen M1 bis M5 durchgeführt. Die Spaltzugversuche erfolgten mit dem Einbau EB 7 gemäss den Abbildungen 61 und 62.

Die Ergebnisse der Spaltzugversuche sind in der Tabelle A12 im Anhang und in Abbildung 103 aufgeführt.

Das Erreichen des Maximalwertes der Bruchspannung innerhalb der Mischgutreihe M1 bis M5 tritt deutlich bei Mischung M3 auf. Die dazugehörigen Bruchstauchungen der Prüfkörper PK 1006 und 1012 sind für alle Mischungen M1 bis M5 praktisch gleich gross, zeigen aber für die Prüfkörper PK 1510 und 1512 eine deutliche Zunahme bei der Mischung M5.

Gesamthaft ist innerhalb der Mischgutreihe M1 bis M5 mit steigendem Bindemittelgehalt auch ein Ansteigen der Bruchspannungen festzustellen, was auf eine Erhöhung des "wirksamen Querschnittes" durch zunehmendes Schliessen der Hohlräume deuten lässt.

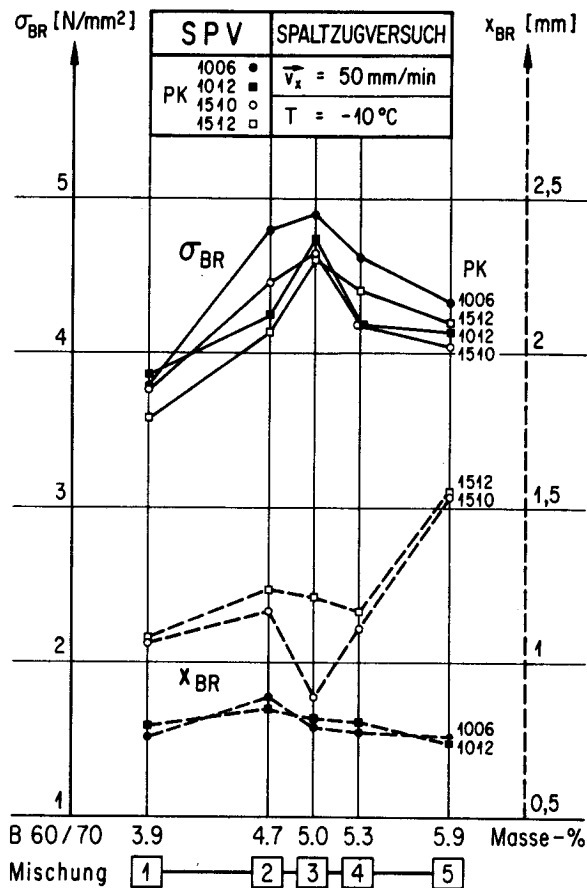


Abb. 103

Spaltzugversuche, SPV an Prüfkörpern PK 1006, 1012 sowie PK 1510 und 1512 der Mischungen M1 bis M5 bei der Temperatur $T = -10^\circ\text{C}$.

Die Spaltzugversuche wurden bei der Temperatur $T = -10^\circ\text{C}$ durchgeführt, weil aus verschiedenen Untersuchungen abgeleitet werden konnte, dass bei dieser Temperatur die grössten Bruchspannungen auftreten, siehe auch [30].

Aufgrund der Spaltzugversuche ist der stabile Bereich innerhalb der Mischgutreihe M1 bis M5 bei Mischung M4 abzugrenzen, insbesondere durch die ausgeprägte Zunahme der Bruchstauungen der Mischung M5 bei den Prüfkörpern PK 1510 und 1512.

15.2 Konventionelle physikalische Prüfverfahren

15.21 Monoaxiale Druckversuche, MDV ("Essai DURIEZ" bei $T = 40^\circ\text{C}$)

Monoaxiale Druckversuche (Bruchversuche) an Prüfkörpern PK 1012 wurden in Anlehnung an das in Frankreich normierte Prüfverfahren "Essai DURIEZ" bei verschiedenen Verformungsgeschwindigkeiten durchgeführt ($\bar{v}_x = 0,5, 5$ und 50 mm/min). Die Ergebnisse der monoaxialen Druckversuche sind in der Tabelle A13 im Anhang zusammengefasst und in Abbildung 104 dargestellt.

Die Prüfungen wurden mit dem Einbau EB 8 gemäss der Abbildung 63 durchgeführt.

Aus den Kraft-Verformungs-Diagrammen wurde der Steifigkeitsmodul bei Bruchkraft als Sekantenmodul und bei zwei Dritteln der Bruchkraft als Tangentenmodul (jeweils unter Linearisieren der Anfangsverformung) ermittelt, gemäss der Abbildung 104.

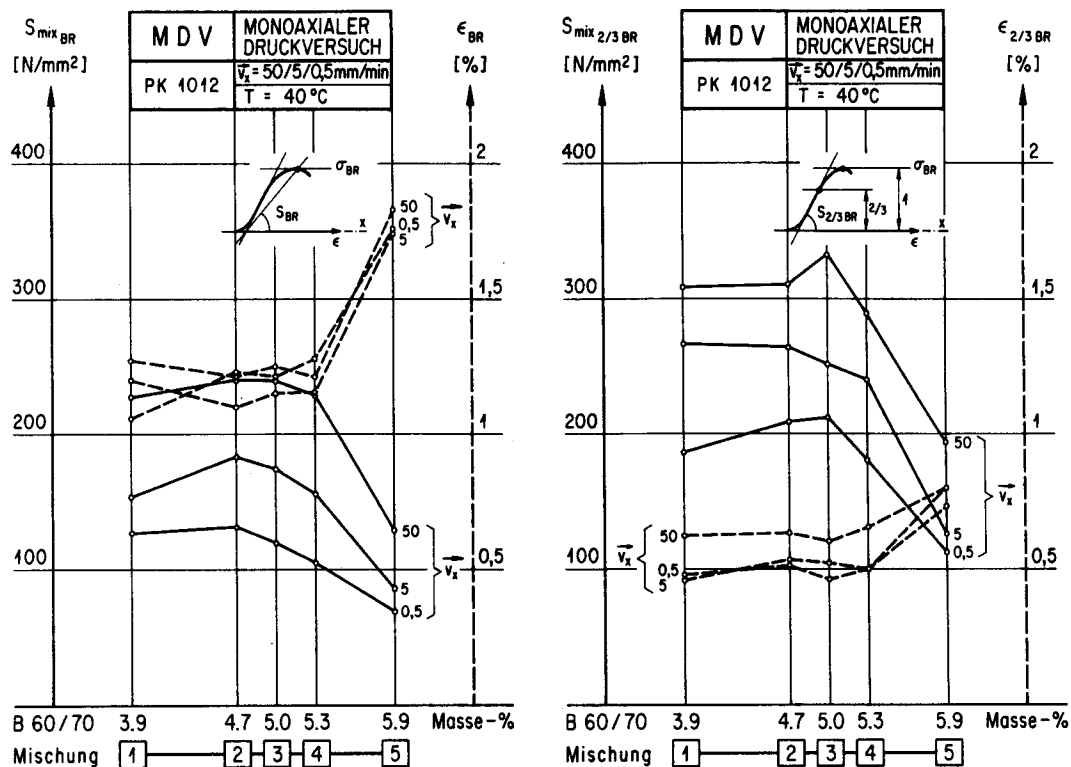


Abb. 104: Monoaxiale Druckversuche, MDV, Bruchversuche an Prüfkörpern PK 1012 der Mischungen M1 bis M5, AB 16.

Links: Steifigkeitsmodul bei Bruchkraft (Sekantenmodul).

Rechts: Steifigkeitsmodul bei zwei Dritteln der Bruchkraft (Tangentenmodul).

Die Ergebnisse der monoaxialen Druckversuche lassen gemäss der Abbildung 104 innerhalb der Mischgutreihe M1 bis M5 des AB 16 Optimierungstendenzen für die Steifigkeitsmoduln S_{BR} und $S_{2/3 BR}$ bei den Mischungen M2 und M3 erkennen. Die Bruchstauchungen und die Stauchungen bei zwei Dritteln der Bruchkraft, bestimmt unter Linearisierung der Anfangsverformung, sind bis und mit Mischung M4 etwa gleich gross, steigen aber für die Mischung M5 deutlich an.

Gesamthalt ist auch aufgrund der durchgeführten monoaxialen Druckversuche der stabile Bereich innerhalb der Mischgutreihe M1 bis M5 des Asphaltbetons AB 16, beginnend bei den Mischungen M2 und M3, deutlich bei Mischung M4 abzugrenzen.

15.22 Monoaxiale Kriechversuche, MKV

Die monoaxialen Kriechversuche wurden ebenfalls bei der Temperatur $T = 40^{\circ}\text{C}$ durchgeführt. Die konstante Druckspannung wurde für die Mischungen M1 bis M5 des Asphaltbetons AB 16 jedoch auf $0,2 \text{ N/mm}^2$ gegenüber üblichen $0,1 \text{ N/mm}^2$ [47] erhöht, da aufgrund von Erfahrungswerten für die vorliegende Mischgutreihe kleine Verformungen und dadurch hohe Steifigkeitswerte S_{mix} zu erwarten waren. Dies infolge des nach Aufarbeiten des Bindemittels vorliegenden hohen Erweichungspunktes Ring und Kugel von 69°C und des bei Mischung M1 vorliegenden tiefen Bindemittelgehaltes von 3,9 Massen-%. Durch die vorgenommene Erhöhung der konstanten Druckspannung auf $0,2 \text{ N/mm}^2$ wurde versucht, auch die bindemittelarme Mischung M1 einer deutlichen Verformung zu unterwerfen, um dadurch einen Vergleich mit den Mischungen M2 bis M5 beim Auswerten der Kriechversuche durch Berechnen der Verformungsanteile - gemäss den Abbildungen 2 und 3 - vornehmen zu können.

Dazu ist festzuhalten, dass sich oft bindemittelarme, dadurch hohlraumreiche und sehr steife Mischungen durch den Kriechversuch kaum beurteilen lassen, da sie auf die relativ geringe Druckspannung von $0,1 \text{ N/mm}^2$ nicht oder nur geringfügig ansprechen und vielmehr "einfach stehen bleiben".

Die Kriechversuche wurden an je fünf Prüfkörpern PK 1012 wie bei den monoaxialen Druckversuchen durchgeführt. Die Kennwerte der Prüfkörper mit einem Verdichtungsgrad von annähernd VG 100 % nach Abbildung 90 sind in der Tabelle A6 im Anhang aufgeführt.

Die Ergebnisse der Kriechversuche sind in der Tabelle A14 im Anhang enthalten und in den nachstehenden Abbildungen 105 bis 108 dargestellt.

In Abbildung 105 sind die Kennwerte Steifigkeitsmodul S_{mix} , die Verformung $EP1$ und die Querdehnungszahl R in Funktion der Zeit t in einer Übersicht aufgezeichnet. Für die Verformung $EP1$ wurden die Rückverformungen $EP1R$ (reversibel) und $EP1IRR$ (irreversibel) analog Abbildung 3 aufgrund der gleichlangen Belastungs- und Entlastungszeiten $t = 3'599 \text{ s}$ berechnet. Für das Berechnen der verschiedenen Verformungsanteile nach Abbildung 3 wurde $EP1_{3599}$ auf 100 % gesetzt.

Von Bedeutung und problematisch ist bei dieser Art des Auswertens das Bestimmen des Anfangs-Steifigkeitsmoduls $S_{\text{mix}}(0)$ sowie der Verformungsgeschwindigkeiten $DEP1_{\text{BEL}}$ und $DEP1_{\text{ENTL}}$, insbesondere in den Zeitpunkten 0 und 3'600 s, beim Belasten und Entlasten. Durch die hohe Auflösung in der Datenerfassung der Prüfanlage DYNASPHALT konnten diese Anfangsverformungen und die Rückverformungen (Sprungantworten) sowie die entsprechenden Verformungsgeschwindigkeiten erfasst werden, siehe Abbildung 107.

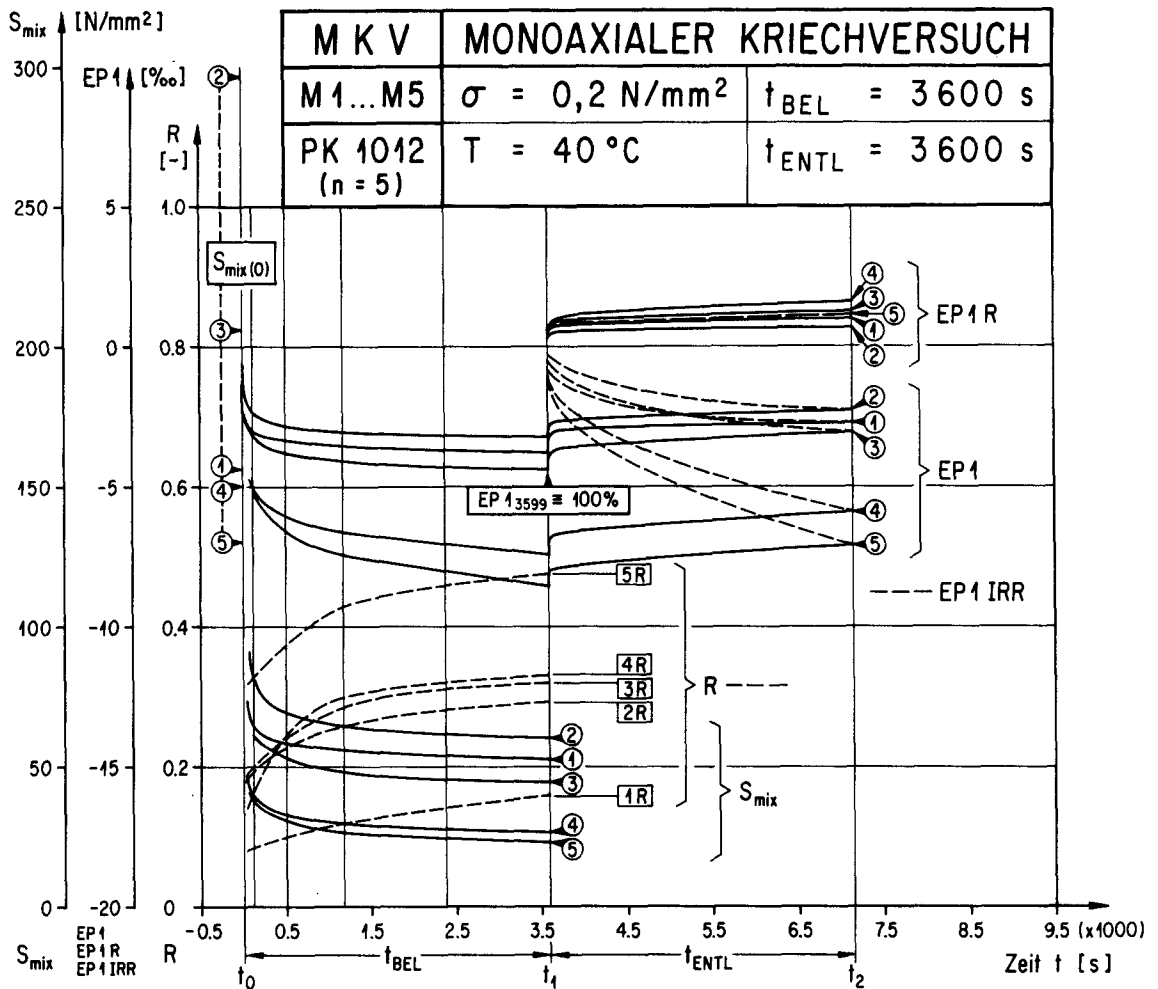


Abb. 105: Monoaxiale Kriechversuche an Prüfkörpern PK 1012 der Mischungen M1 bis M5 des Asphaltbetons AB 16.

- S_{mix} : Steifigkeitsmodul
- EP1: Verformung axial
- EP1R: reversible Verformung
- EP1IRR: irreversible Verformung
- R: Querdehnungszahl

Werden die Messdaten mit Standardeinrichtungen geringerer Auflösung oder nur graphisch erfasst, so wird das Bestimmen dieser Vorformungsanteile und der entsprechenden Verformungsgeschwindigkeiten problematisch. Diese Kennwerte müssen dann beispielsweise über ein Linearisieren der Verformungskurve im doppeltlogarithmischen Massstab und über eine rückwirkende Extrapolation ermittelt werden, was aber die zu berechnenden Verformungsanteile stark beeinflussen kann. Zu dieser Problemstellung sind weitere Untersuchungen unerlässlich [37, 38, 47, 52, 53, 56].

Aus den Ergebnissen der monoaxialen Kriechversuche an den Mischungen M1 bis M5 ist der stabile Bereich der Mischgüterreihe gemäss den Abbildungen 105 und 106 nach Mischung M2 abzugrenzen. Für die kurzen Belastungszeiten ($t = 0, 5$ und

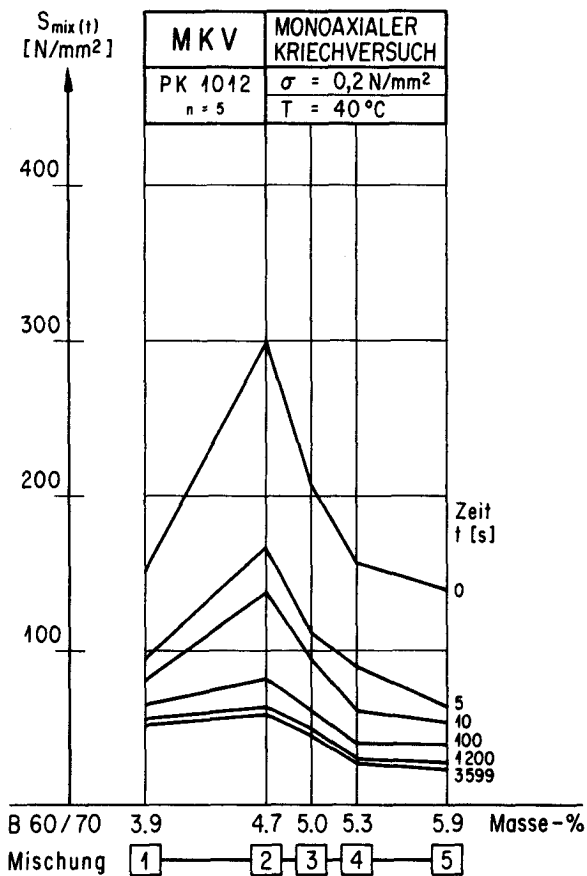


Abb. 106

Monoaxialer Kriechversuch, MKV an Prüfkörpern PK 1012 der Mischungen M1 bis M5.

S_{mix} : Steifigkeitsmodul für $t = 0, 5, 10, \dots, 3'599$ s, siehe auch Abbildung 105.

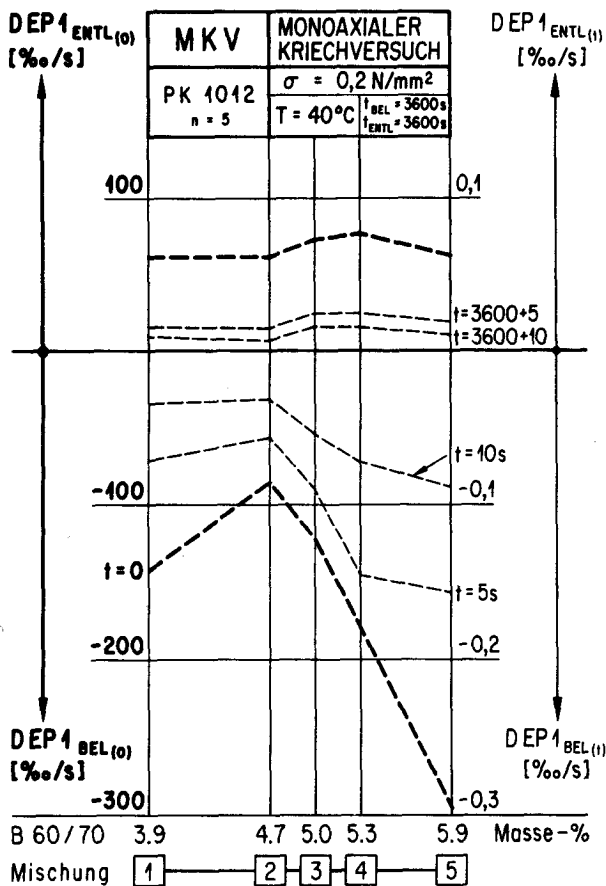


Abb. 107

Monoaxialer Kriechversuch, MKV an Prüfkörpern PK 1012 der Mischungen M1 bis M5.

DEP1: Verformungsgeschwindigkeiten
 DEP1_{BEL}: bei Belasten ($t = 0$)
 DEP1_{ENTL}: bei Entlasten ($t = 3'600$ s)

10 s) zeigt die Mischung M2 deutlich besseres Verhalten, mit Maximalwerten bezüglich des Steifigkeitsmoduls und der Anfangs-Verformungsgeschwindigkeit. Ab einer Belastungszeit von etwa 10 s zeigen die Mischungen M1 und M2 etwa gleiches Verhalten, die Mischungen M3 bis M5 dagegen tiefere Werte.

Gesamthaft weist die Mischung M2 besseres Verhalten bezüglich der mechanischen Kennwerte S_{mix} und DEP_1 auf, deutlich besseres Verhalten bei den kurzen Belastungszeiten und bei der Anfangsbelastung, was auf ihr optimales Verhalten innerhalb der ganzen Mischgutreihe bei schwingender Beanspruchung im höheren Temperaturbereich hinweist.

Die **Verformungsanteile** wurden unter Bezugnahme auf die nach einer Stunde erreichte maximale Verformung $EP_{1,3599}$ gemäss der Darstellung in der Abbildung 3 berechnet, mit Angabe in Prozenten ($EP_{1,3599} \equiv 100\%$) gemäss der Darstellung in Abbildung 108. Über die Mischungen M1 bis M5, damit über den steigenden Bindemittelgehalt betrachtet, ist deutlich die Zunahme des Verformungsanteiles V+VP (viskos und viskoplastisch) festzustellen. Die Anteile EL (elastisch) und PL (plastisch) differenzieren nicht deutlich, gesamthaft ist eine Abnahme von M1 bis M5 festzustellen. Der Anteil VE (viskoelastisch) zeigt Optimierungstendenzen mit einem Maximalwert bei Mischung M2.

Die **Verhältnisse der Verformungsanteile** sind ebenfalls in der Abbildung 108 eingezeichnet. Das Verhältnis EL/VE differenziert zwischen den Mischungen M1 und M2 sehr stark. Der gegenüber der Mischung M1 deutlich höhere viskoelastische Anteil VE von Mischung M2 wirkt sich hier aus. Das Auftreten eines Maximalwertes beim Verhältnis EL/PL basiert auf der innerhalb der Mischgutreihe anfänglich stärkeren Abnahme des Anteils PL und dessen Konstanz bei den Mischungen M3 bis M5, wogegen der Verformungsanteil EL bis zur Mischung M5 durchgehend leicht abnimmt.

Infolge der stetigen Zunahme des Verformungsanteils V+VP von Mischung M1 bis M5 und dem bei Mischung M2 auftretenden Maximalwert für den Verformungsanteil VE resultieren für das Verhältnis VE/V+VP bei den Mischungen M2 und M3 deutlich höhere Werte, sowohl gegenüber der Mischung M1 wie auch gegenüber den Mischungen M4 und M5. Diese Optimierungstendenzen lassen auf ein erneutes Abgrenzen des stabilen Bereiches innerhalb der Mischgutreihe M1 bis M5 bei der Mischung M2, "spätestens" bei der Mischung M3 schliessen. Die ermittelten Verhältnisse EL/VE und EL/PL bestätigen diese Tendenz, wobei das Bestimmen des Verformungsanteils PL - wie auch schon vorstehend festgehalten - mit grösseren Streuungen behaftet ist. Dies wirkt sich auf alle Verformungsanteile aus, verstärkt jedoch auf die Verformungsanteile EL und PL. Dies infolge des erwähnten schwierigen Bestimmens der Anfangsverformung EP_0 (damit des Anfangs-Steifigkeitsmoduls S_{mix0} als Sprungantwort beim Belasten) und deren Aufteilen in die Verformungsanteile EL und PL über die gemessene Rückverformung nach Entlasten bei $t = 3'600$ s.

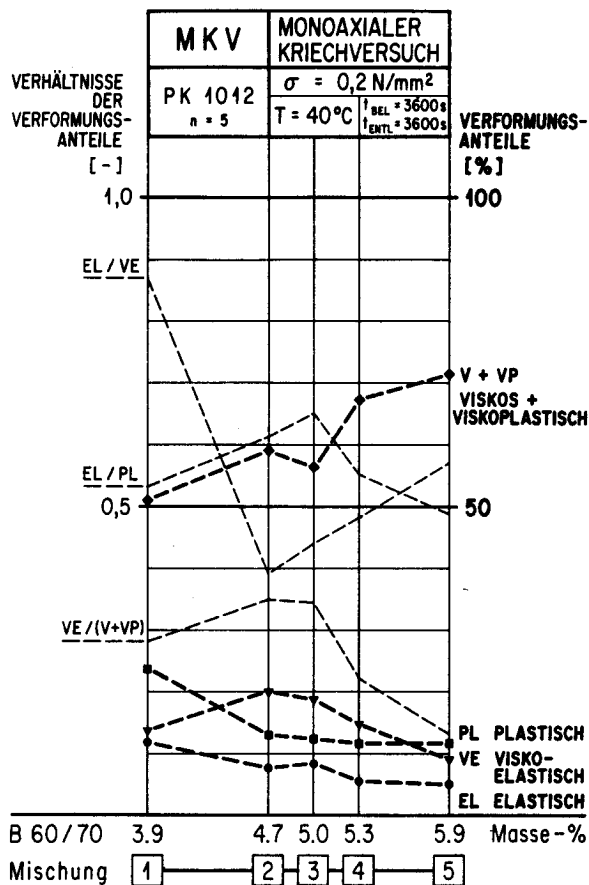


Bild 108

Monoaxialer Kriechversuch, MKV. Verformungsanteile in % der Gesamtverformung nach einer Stunde (EP_{3599}) und Verhältnisse der Verformungsanteile.

Die Verformungsanteile VE und V+VP basieren dagegen auf den unter statischer (konstanter) Beanspruchung über längere Zeitabschnitte ermittelten Verformungen. Da vor allem der Verformungsanteil V+VP für alle Mischungen M1 bis M5 bei über 50 % (bis 70 % bei M5) liegt, werden die Einflüsse der Streuungen der Einzelwerte dieser Verformungsteile für die berechneten Verhältnisse mit diesen Verformungsanteilen (VE und V+VP) abgeschwächt. Daher müsste für das weitere Ermitteln der Verformungsanteile beliebiger Mischungen vor allem ein umfangreiches Abklären des Einflusses der Art (Zeitfolge, Auflösung der Datenerfassung) des Bestimmens der elastischen und (spontan-)plastischen Verformungsanteile erfolgen. Aufgrund der innerhalb dieser Untersuchung gemachten Erfahrungen ist jedoch auf die bei der hohen Auflösungsmöglichkeit der Datenerfassung feststellbaren, grossen Streuungen der Ergebnisse hinzuweisen. Siehe dazu die Tabellen A14 und A22 im Anhang. Selbstverständlich muss erwähnt werden, dass die kleine Anzahl von 5 Prüfkörpern pro Versuchspunkt im vorliegenden Fall keine weiteren statistischen Aussagen zulässt, dass diese beschränkte Anzahl der Prüfkörper aber in etwa dem im Praxisfall gegebenen Untersuchungsumfang entspricht.

15.23 4-Punkt-Biegung unter Wechsellast, 4-PKT-B

Die vergleichenden Untersuchungen mit dem Prüfverfahren der 4-Punkt-Biegung unter Wechsellast - entsprechend Einbau EB 10 gemäss den Abbildungen 68 und 69 - konnten im Labor des Dienstes Weg-en Waterbouwkunde des Rijkswaterstaates der Niederlande in Delft (WDD/NL) durchgeführt werden.

Die Untersuchungen zur Bestimmung des komplexen Moduls E^* erfolgten an Prismen mit den Abmessungen 50 mm x 50 mm x 450 mm mit den in Abbildung 109 aufgeführten Versuchsparametern.

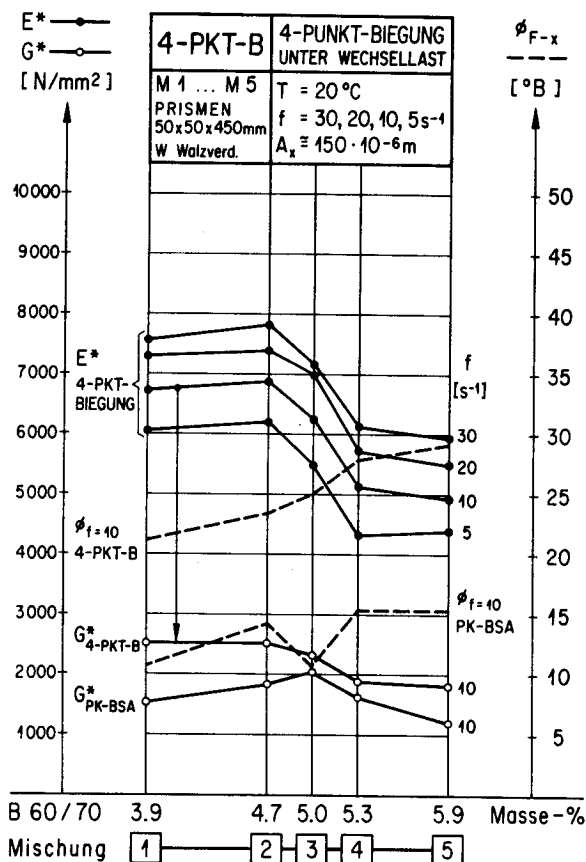


Abb. 109

4-Punkt-Biegung, Prüfung unter Wechsellast.

Die Ergebnisse sind in der Tabelle A15 im Anhang zusammengestellt und in Abbildung 109 aufgezeichnet.

Unter Einsetzen der Querdehnungszahl $\nu = 0,35$ wurde der komplexe Schubmodul $G^*_{4-PKT-B}$ für die Frequenz $f = 10 \text{ s}^{-1}$ berechnet und mit dem aus dem Prüfverfahren PK-BSA nach Abschnitt 16 bestimmten komplexen Schubmodul G^*_{PK-BSA} zusammen in Abbildung 109 dargestellt.

Der im Prüfverfahren PK-BSA bestimmte komplexe Schubmodul G^* liegt für die Mischungen M1 und M2 teilweise deutlich tiefer. Die Mischungen M3 und M4 zeigen bessere Übereinstimmung, bei der Mischung M5 liegt wieder ein tieferer Wert beim Prüfverfahren PK-BSA vor.

Das Prüfverfahren PK-BSA weist unter den vorliegenden Prüfbedingungen für den Schubmodul G^* ein Optimum bei Mischung M3 auf. Die aus der 4-Punkt-Biegung abgeleiteten Schubmoduln sind für die Mischungen M1 und M2 etwa gleich gross, liegen aber innerhalb der ganzen Mischgutreihe M1 bis M5 für die Mischungen M3 bis M5 deutlich tiefer.

Die Unterschiede der Schubmoduln aus diesen beiden Prüfverfahren sowie das relativ unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Mischungen könnte auch mit den bei der 4-Punkt-Biegung auftretenden Problemen der Einspannung der Prüfkörper in Zusammenhang stehen. Die steiferen, bindemittelärmeren Mischungen M1 und M2 liegen offensichtlich deutlich höher, was in Zusammenhang mit deren besserem Verhalten bezüglich der örtlichen Beanspruchung in den Einspannquerschnitten stehen könnte.

Auffallend ist auch der grosse Unterschied bezüglich der ermittelten Phasenwinkel ϕ_{F-x} . Die Werte für ϕ_{F-x} liegen beim Prüfverfahren PK-BSA deutlich tiefer. Auf eine Wertung dieser Feststellung wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, doch ist allgemein darauf hinzuweisen, dass die Phasenmessung ein grosses prüftechnisches Problem darstellen kann. Aufgrund der gemachten Erfahrungen sollte die Phasenmessung wenn möglich durch eine Kurvenanalyse über den im Realtime-System arbeitenden Computer erfolgen. Für eine physikalisch einwandfreie Phasenbestimmung ist zudem eine symmetrische Beanspruchung (Geometrie und mechanische Beanspruchung) zu wählen, da die viskoelastischen Materialien vor allem in ihren Dämpfungseigenschaften bei Belasten und Entlasten (beispielsweise im monoaxialen Schwingversuch im Druckschwellbereich, verstärkt noch unter monoaxialer Wechsellast) stark unterschiedlich reagieren und daher in Funktion der Zeit stark asymmetrische Kurvenformen aufweisen können. Werden solche Schwingungen durch handelsübliche Phasenmessgeräte analysiert, so können abweichende Ergebnisse zu den am gleichen Material bei symmetrischer Beanspruchung anfallenden Ergebnissen der Phasenwinkel auftreten.

Gesamthaft differenzieren die aus dem Prüfverfahren der 4-Punkt-Biegung abgeleiteten Schubmoduln G^* innerhalb der ganzen Mischgutreihe M1 bis M5 relativ gut. Der stabile Bereich innerhalb der Mischgutreihe ist hier nach Mischung M2 abzugrenzen.

Infolge der erwähnten Problematik bei der Einspannung wird das Prüfverfahren 4-Punkt-Biegung meistens nur bis zu einer Versuchstemperatur von $T = 30^{\circ}\text{C}$ angewendet. Es eignet sich unterhalb dieser Temperatur zudem ebenfalls für Ermüdungsprüfungen.

16. PRÜFVERFAHREN PRÜFKÖRPER-BIEGE-SCHUB-AXIAL, PK-BSA

16.1 Allgemeines und Versuchsparameter

Das in Teil III ausführlich beschriebene Prüfverfahren PK-BSA wurde in die vergleichenden Untersuchungen als ein neues mechanisches Prüfverfahren mit der Möglichkeit der Durchführung von Mehrstufenversuchen am gleichen Prüfkörper miteinbezogen.

Diese speziell für das Charakterisieren der Mischungen M1 bis M5 der Mischgutreihe des Asphaltbetons AB 16 bezüglich des temperatur- und zeitabhängigen Verhaltens durchgeführten umfangreichen Mehrstufenversuche umfassten folgende Parameter:

- Variation der Mischungen, Mischgutreihe Asphaltbeton AB 16 mit den Mischungen M1 bis M5.
- Variation der Herstellungsart der Prüfkörper PK 1506 durch
 - S Schlagverdichtung nach Abschnitt 14.1
 - V Vibroverdichtung nach Abschnitt 14.3
 - W Walzverdichtung nach Abschnitt 14.5
- Variation der Temperaturstufen (von "kalt" nach "warm").
- Variation der Frequenzen (von "schnell" nach "langsam" auf jeder Temperaturstufe).

Die nachstehende Tabelle 32 zeigt schematisch die mit dem Prüfverfahren PK-BSA durchgeführten Versuchspunkte (total ca. 1'200 Einzelversuche) unter Variation der oben erwähnten Parameter.

M Mischung	Herstellen (je 5 PK 1506)	T Temperaturstufe (°C)	f Frequenz (s ⁻¹)
$\left\{ \begin{array}{l} M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \\ M5 \end{array} \right\}$	$\times \left\{ \begin{array}{l} S(M3) \quad - \quad W \\ S \quad \quad \quad V \quad W \\ S \quad \quad \quad V \quad W \\ S \quad \quad \quad V \quad W \\ S(M3) \quad - \quad W \end{array} \right\}$	$\times \left\{ \begin{array}{l} \text{"Beginn"} \quad -20 \\ \text{in der} \quad \downarrow \quad 0 \\ \text{Kälte"} \quad \quad 20 \\ \quad \quad \quad \quad 40 \\ \quad \quad \quad \quad 60 \end{array} \right\}$	$\times \left\{ \begin{array}{l} \text{"schnell" nach} \\ \text{"langsam", auf} \\ \text{jeder T-Stufe} \\ \text{10..1..0, 1..0, 01} \end{array} \right\}$

Tab. 32: Versuchspunkte der Mehrstufenversuche mit dem Prüfverfahren PK-BSA.

(M3) bedeutet nur Prüfen von M3 bei T = -20°C und T = 60°C/→ Reihenfolge.

- bedeutet nicht geprüft bei T = -20°C und T = + 60°C

16.2 Mehrstufenversuche an Prüfkörpern PK 1506W

Die Mehrstufenversuche auf allen Temperaturstufen wurden an Gruppen von fünf Prüfkörpern PK 1506W der Mischungen M1 bis M5 des Asphaltbetons AB 16 durchgeführt. Jede Prüfkörpergruppe wurde nacheinander auf verschiedenen Temperaturstufen und bei verschiedenen Frequenzen gemäss der Übersicht über die Versuchspunkte in der Tabelle 32 geprüft. Aus jeweils fünf Einzelbestimmungen an den fünf Prüfkörpern wurden pro Versuchspunkt der Mittelwert und der Variationskoeffizient sowie die grösste Abweichung eines Einzelwertes vom Mittelwert bestimmt. Der Phasenwinkel ϕ_{F-x} wurde in einer Einzelmessung des Computers ermittelt.

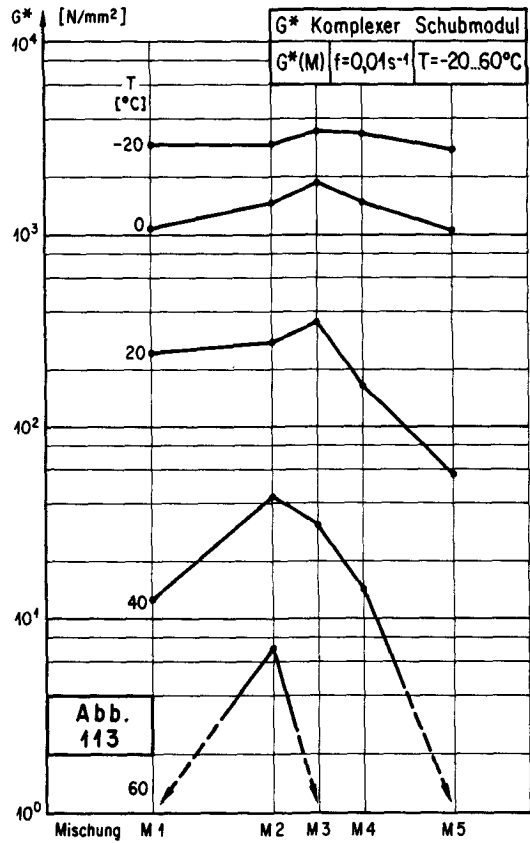
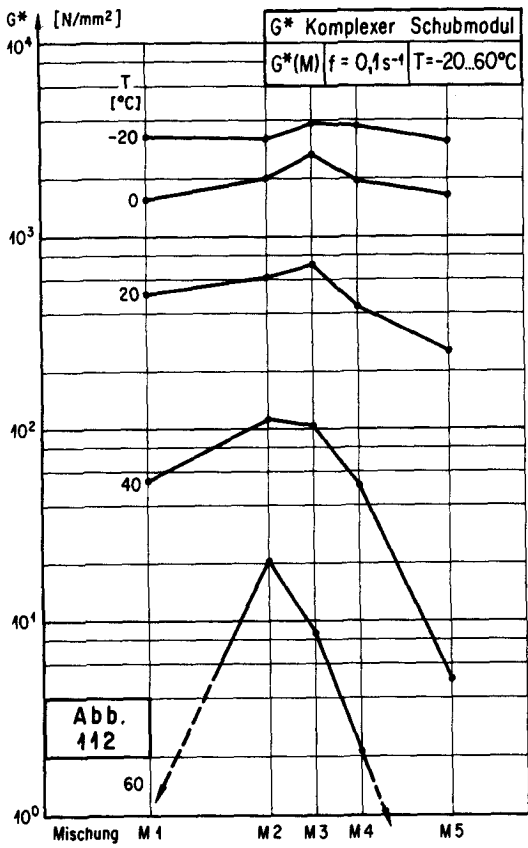
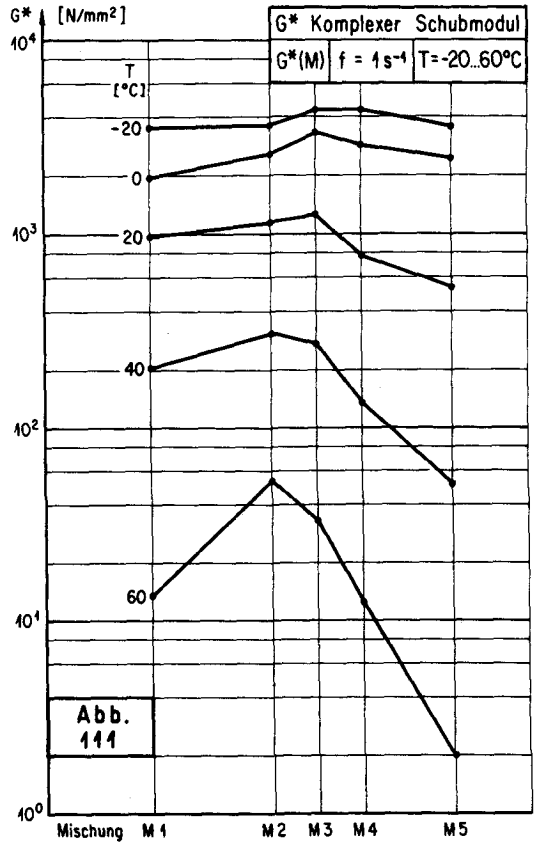
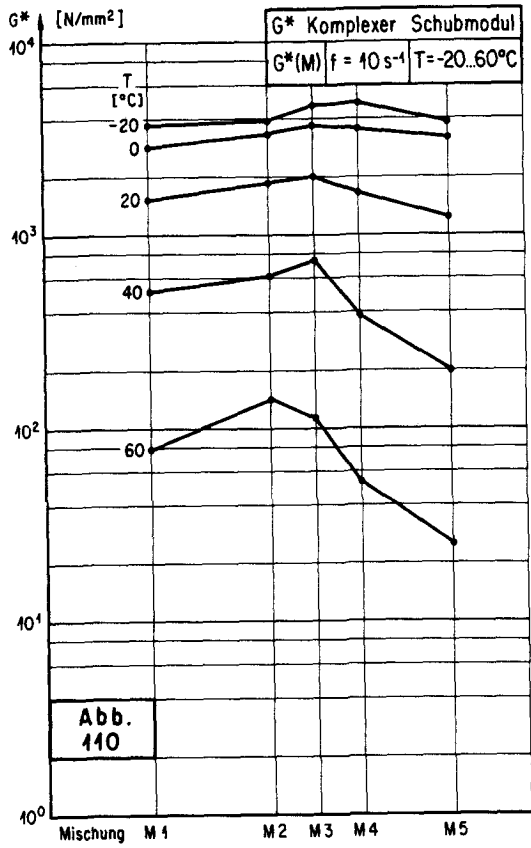
Die Ergebnisse sind in der Tabelle A16 im Anhang, zusammen mit den auf drei Temperaturstufen ermittelten komplexen Schubmoduln G^* der durch Vibro- und Schlagverdichtung hergestellten Prüfkörper aufgeführt.

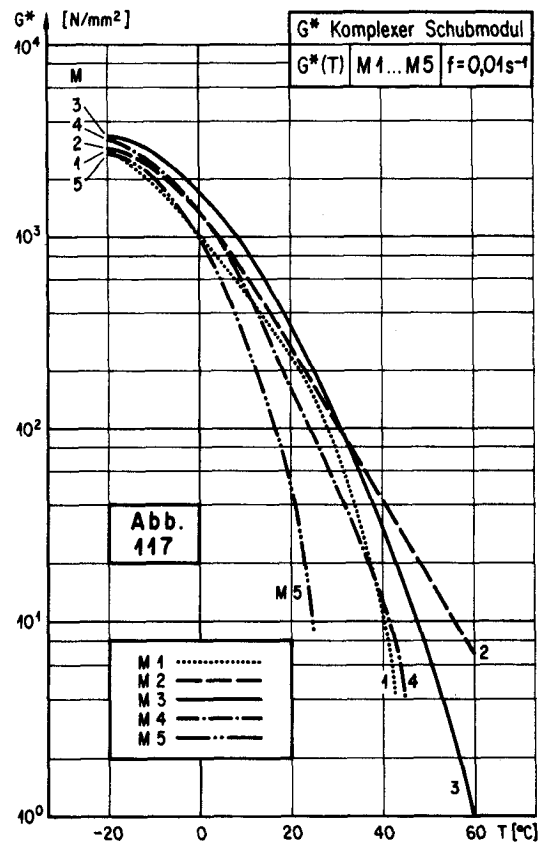
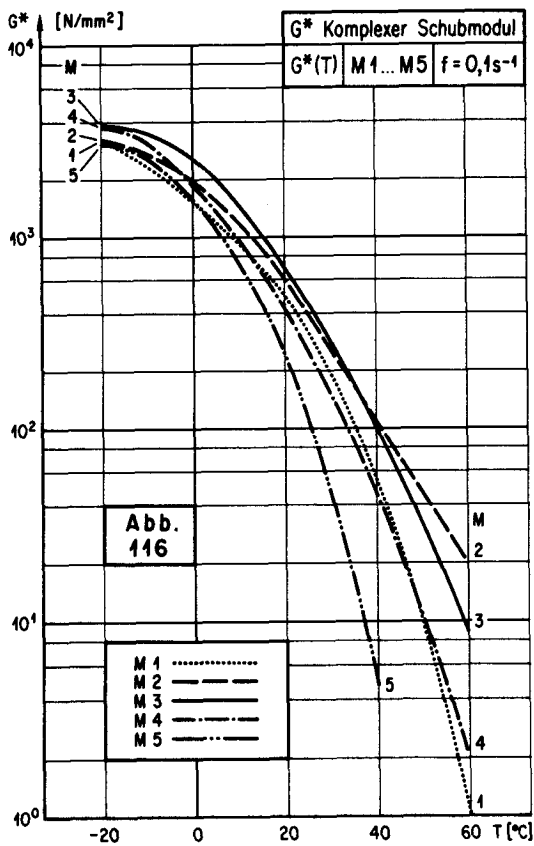
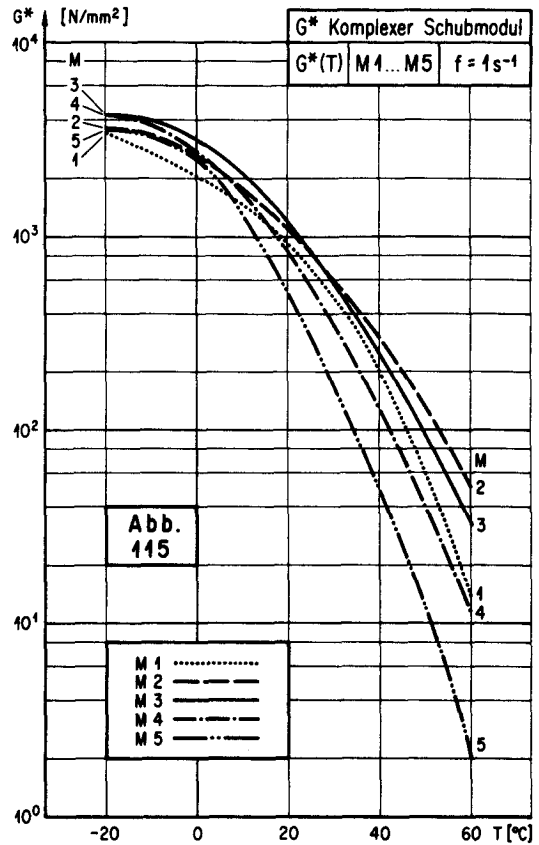
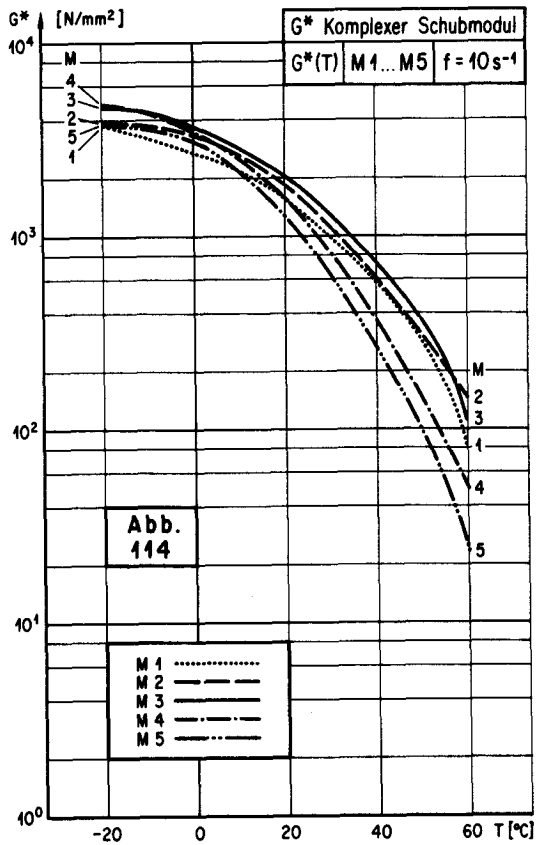
Die Ergebnisse der Mehrstufenversuche auf fünf Temperaturstufen an den Prüfkörpern 1506W (hergestellt durch Walzverdichtung nach Abschnitt 14.5) sind in den nachstehenden Abbildungen 110 bis 121 dargestellt.

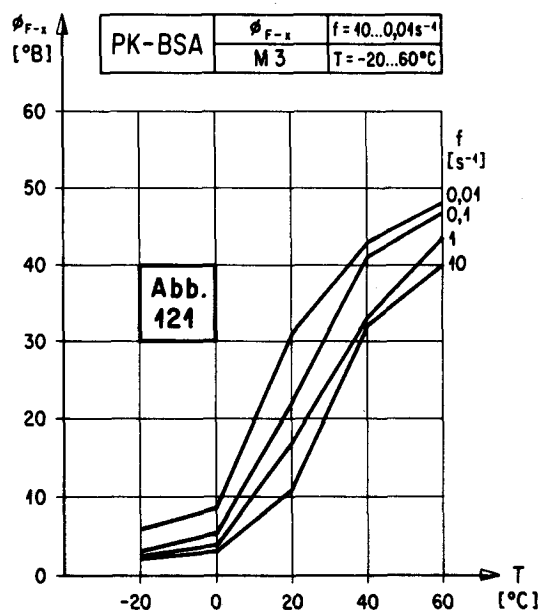
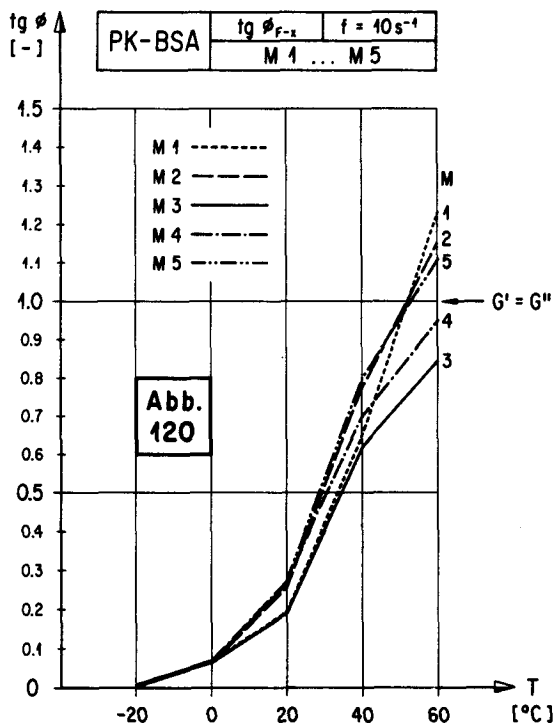
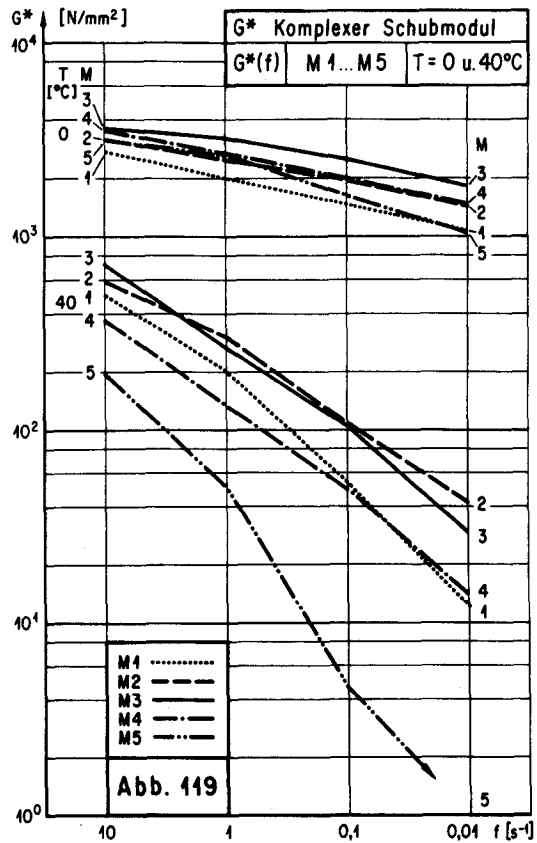
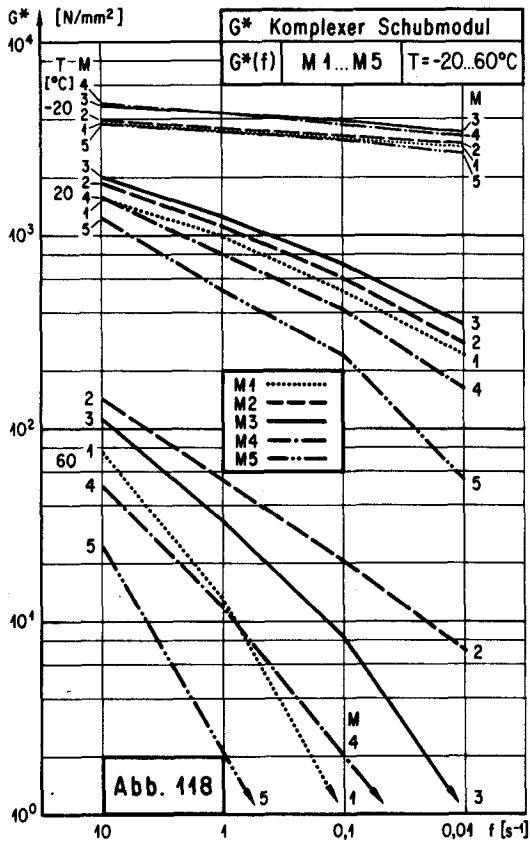
Die Tabelle 33 gibt eine Übersicht zu den Abbildungen 110 bis 121. Die Abbildungen sind nach den verschiedenen Kennwerten und Parametern gruppiert.

Abbildung Nr.	Kennwert (an)	Parameter		
		in Funktion	als Festgrössen	
110	G^* (PK 1506W)	M1 bis M5	$T = -20...60$	$f = 10$
111	G^* (PK 1506W)	M1 bis M5	$T = -20...60$	$f = 1$
112	G^* (PK 1506W)	M1 bis M5	$T = -20...60$	$f = 0,1$
113	G^* (PK 1506W)	M1 bis M5	$T = -20...60$	$f = 0,01$
114	G^* (PK 1506W)	$T = -20...60$	M1 bis M5	$f = 10$
115	G^* (PK 1506W)	$T = -20...60$	M1 bis M5	$f = 1$
116	G^* (PK 1506W)	$T = -20...60$	M1 bis M5	$f = 0,1$
117	G^* (PK 1506W)	$T = -20...60$	M1 bis M5	$f = 0,01$
118	G^* (PK 1506W)	$f = 10...0,01$	M1 bis M5	$T = -20/20/60$
119	G^* (PK 1506W)	$f = 10...0,01$	M1 bis M5	$T = 0/40$
120	$\text{tg } \phi_{F-x}$	$T = -20...60$	M1 bis M5	$f = 10$
121	ϕ_{F-x}	$T = -20...60$	M3	$f = 10...0,01$
G^* (N/mm ²); T (°C); f (s ⁻¹); ϕ_{F-x} (°B); M (Mischungen AB 16)				

Tab. 33: Übersicht zu den Versuchspunkten der Mehrstufenversuche an den Prüfkörpern PK 1506W der Mischungen M1 bis M5 des Asphaltbeton AB 16. Prüfungen auf verschiedenen Temperaturstufen bei vier Frequenzen (5 Prüfkörper pro Versuchspunkt).







Die nachfolgende Beurteilung der Ergebnisse der Mehrstufenversuche an Prüfkörpern PK 1506W der Mischungen M1 bis M5 basiert auf den Darstellungen der komplexen Schubmoduln G^* in den Abbildungen 110 bis 119.

Aus den Abbildungen 110 bis 119 wird das unterschiedliche Verhalten der Mischungen M1 bis M5 bezüglich der Beanspruchung auf verschiedenen Temperaturstufen und/oder Belastungszeiten (Variation der Frequenz) deutlich erkennbar.

Aus den Abbildungen 110 bis 113 ist ersichtlich, dass bei den Temperaturstufen $T = -20^\circ\text{C}$ und $T = 0^\circ\text{C}$, somit "in der Kälte", und bei kurzen Belastungszeiten ($f = 10$ und 1 s^{-1}) der Schubmodul G^* innerhalb der ganzen Mischgutreihe (über den steigenden Bindemittelgehalt betrachtet) gesamthaft ansteigt.

Bei den längeren Belastungszeiten ($f = 0,1$ und $0,01 \text{ s}^{-1}$) sind die Schubmoduln bei der Temperaturstufe $T = -20^\circ\text{C}$ für alle Mischungen M1 bis M5 annähernd gleich gross. Auf der Temperaturstufe $T = 0^\circ\text{C}$ wird das Auftreten eines Maximalwertes des Schubmoduls für Mischung M3 schon ab einer Frequenz $f = 1 \text{ s}^{-1}$ erkennbar. Deutlich wird dies bei den Frequenzen $f = 0,1$ und $0,01 \text{ s}^{-1}$. Diese Feststellung entspricht den Ergebnissen der Spaltzugversuche (SPV), die für die Mischung M3 mit der maximalen Lagerungsdichte der Mineralstoffe (HMM_{min}) deutliche Maximalwerte der Bruchspannungen aufweisen.

Mit steigender Temperatur, d.h. auf den Temperaturstufen $T = +20^\circ\text{C}$ und $+40^\circ\text{C}$ wird die genannte Tendenz bezüglich des Auftretens eines Maximalwertes bei Mischung M3 noch etwas verstärkt, wobei sich dieser Maximalwert für längere Belastungszeiten bei der jetzt vorliegenden Prüfung "in der Wärme" von Mischung M3 nach Mischung M2 verschiebt.

Auf der (für die Versuchsdurchführung bei den längeren Belastungszeiten mit $f = 0,1$ und $0,01 \text{ s}^{-1}$ schon etwas kritischen) Temperaturstufe $T = 40^\circ\text{C}$, vor allem bei $T = 60^\circ\text{C}$ zeigt sich diese Tendenz nochmals verstärkt. Bei der Temperaturstufe $T = 60^\circ\text{C}$ ist für die langen Belastungszeiten von 100 s (Frequenz $f = 0,01 \text{ s}^{-1}$), ausser bei Mischung M2, schon deutliches "Kriechen" innerhalb einiger Schwingungen festzustellen. Für die Auswertung über mehrere Temperatur- und Frequenzstufen nach Abschnitt 16.3 wurden diese kritischen Messpunkte durch Einsetzen des in der ersten Schwingung ermittelten Schubmoduls erfasst. Bei ausgeprägtem Fließen wurden die Schubmoduln auf "1" (N/mm^2) gesetzt, um für die Berechnungen bei der versuchsweisen Anwendung der Zeit-Temperatur-Superposition die erforderlichen fünf Temperaturstufen zu erreichen. Siehe dazu die mit Pfeilen angedeuteten Kurvenverläufe in den Abbildungen 112 und 113 sowie 118 und 119.

Gesamthaft ist der stabile Bereich innerhalb der Mischgutreihe M1 bis M5 aufgrund der mit dem Prüfverfahren PK-BSA durchgeführten Untersuchungen für die tieferen Temperatur-

stufen $T = -20...+20^{\circ}\text{C}$ bei Mischung M3 abzugrenzen. Die Mischung M3 mit der maximalen Lagerungsdichte der Mineralstoffe (HMM_{min}) zeigt somit im unteren bis tieferen Temperaturbereich optimales Verhalten, das - wie schon erwähnt - auch im empirisch-technologischen Prüfverfahren Spaltzugversuch (SPV) auftritt.

Für die Temperaturstufen $T = +40^{\circ}\text{C}$ und $T = +60^{\circ}\text{C}$ wird der stabile Bereich deutlich bei der Mischung M2 abgegrenzt, insbesondere für die grösseren Belastungszeiten ($f = 0,1$ und $0,01 \text{ s}^{-1}$). Diese Feststellung entspricht weitgehend den aus dem Prüfverfahren Marshall-Versuch (als empirisches Prüfverfahren), dem Kriechversuch und dem Prüfverfahren 4-Punkt-Biegung (als physikalische Prüfverfahren) "in der Wärme" abgeleiteten Feststellungen bezüglich des Verlaufes der mechanischen Materialkennwerte innerhalb der Mischgutareihe M1 bis M5. Aus allen Prüfverfahren ist gesamthaft ein optimales Verhalten der Mischung M2 erkennbar. Der stabile Bereich der Mischgutareihe ist daher gesamthaft ebenfalls nach Mischung M2 abzugrenzen.

Ergänzend ist festzustellen, dass im physikalischen Prüfverfahren PK-BSA die (wie auch in anderen Prüfverfahren) eher stabilbleibende (hohlraumreiche, bindemittelarme, "trockene"), gewissermassen prüftechnisch "unansprechbare" Mischung M1 im komplexen Schubmodul G^* ab der Temperaturstufe $T = +20^{\circ}\text{C}$ ebenfalls unter die optimale Mischung M2 fällt.

Diese Feststellung wurde ergänzend auch mit der versuchsweisen Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips in Abschnitt 16.3 überprüft.

Zur ermittelten Phasenverschiebung ϕ_{F-x} ist auf die Abbildungen 120 und 121 zu verweisen. Die Ergebnisse der Phasenverschiebung sind in der Tabelle A17 im Anhang aufgeführt.

Grundsätzlich ist nochmals auf die im Prüfverfahren PK-BSA ermittelten, gegenüber dem Prüfverfahren 4-Punkt-Biegung deutlich kleineren Phasenverschiebungen hinzuweisen.

Diese Unterschiede können durch die Art des Auswertens (Messung mit einem Phasenmessgerät oder Kurvenanalyse mittels Rechner) wie auch durch die unterschiedliche Art der Beanspruchung im Prüfverfahren selbst auftreten. So kann beispielsweise im monoaxialen Schwingversuch im Druckbereich (Druck-Schwellversuch) bei sinusförmiger Kraftregelung durch das unterschiedliche Verhalten des viskoelastischen Materials bei Belasten und Entlasten (verschiedene Dämpfer wirksam) eine in Richtung der Zeitaxe und der Auslenkung asymmetrische Verformungskurve entstehen, welche die genannten Differenzen bei der Phasenmessung mit konventionellen Messgeräten bewirken kann. Deutlich wird dies bei monoaxialer Beanspruchung unter Wechsellast.

Bei der gewählten Beanspruchung unter symmetrischer Wechsellast im Prüfverfahren PK-BSA sind sowohl der Lastfall Geometrie, d.h. die geometrische Anordnung symmetrisch und der eigentliche Lastfall Beanspruchung symmetrisch (Wechselbelastung), wodurch im kraftgesteuerten Versuch (mit sinusförmigem Kraftverlauf) auch eine zeitverschobene symmetrische Verformung auftritt. Zur weiteren Abklärung der genannten Unterschiede in den Ergebnissen der Phasenmessung in verschiedenen Prüfverfahren sind zusätzliche Untersuchungen erforderlich.

16.3 Versuch einer Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips (ZTSP) auf die Ergebnisse der Mehrstufenversuche mit dem Prüfverfahren PK-BSA aus Abschnitt 16.2

Die Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips auf die Ergebnisse aus Kurzzeitversuchen an Baustoffen erfolgt in der Regel für die angestrebte Extrapolation betreffend der Voraussage ihres Langzeitverhaltens [7, 8].

Die Anwendung auf die im vorliegenden Beispiel mit dem Prüfverfahren PK-BSA durchgeführten Mehrstufenversuche (kurze Lastwechselfpakete bei verschiedenen Frequenzen auf verschiedenen Temperaturstufen = Belastungsblocks) an den Prüfkörpern PK 1506W der Mischungen M1 bis M5 nach Abschnitt 16.2 erfolgte zur Charakterisierung der Empfindlichkeit der untersuchten Mischungen dieser Mischgutreihe bezüglich des Einflusses von Belastungsgeschwindigkeit und Temperatur.

Die aus den Abbildungen 110 bis 119 erkennbaren Unterschiede im Verhalten der Mischungen M1 bis M5 im untersuchten Parameterfeld T/f sollten zudem weiter analysiert und über das empirische Verfahren ZTSP versuchsweise rechnerisch erfaßt werden.

Die eigentliche rechnerische Auswertung der in Abschnitt 16.2 und in den Tabellen A16 und A17 im Anhang zusammengefaßten Ergebnisse der Mehrstufenversuche konnten bezüglich des Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips mit dem nach [7] entwickelten Berechnungsprogramm "WLF" nach [119] durchgeführt werden, unter Eingabe der ermittelten Schubmoduln G' und G'' .

Das Berechnungsprogramm [119] ermittelt die erforderlichen Verschiebungen Δt auf der Zeitaxe, um welche eine für die Temperatur T_1 ermittelte Masterkurve verschoben werden muss, um bei einer Temperatur T_2 den gleichen mechanischen Kennwert (hier G^*) wie bei T_1 und t_1 zu erreichen. Diese erforderlichen Zeitverschiebungen Δt wurden als Verschiebungsfaktoren $\log_a T$ durch Ausgleich berechnet und in der Tabelle 34 zusammengestellt. Die vollständigen Ergebnisse dieser versuchsweisen Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips ZTSP sind in der Tabelle A19 im Anhang aufgeführt.

log _a T nach [119] für G* der Mischungen M1 - M5, AB 16						
log _a T	T (°C)	M1	M2	M3	M4	M5
Verschiebung von T =	-20					
nach T =	-10	2,311	0,967	→0,964	1,095	0,979
→ bedeutet	0	3,568	2,222	→2,194	2,566	2,230
Minimum von	20	5,618	→4,526	5,103*	5,341	4,967
log _a T inner-	40	7,684	→6,497	7,188	7,499	7,087
halb M1 bis M5	60	9,546	→8,276	9,091	9,486	8,463

Tab. 34: log_aT, Verschiebungsfaktoren für die Masterkurve der Schubmoduln G* der Mischungen M1 bis M5. Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips (ZTSP) auf die Ergebnisse der Mehrstufenversuche mit dem Prüfverfahren PK-BSA im Parameterfeld T/f.

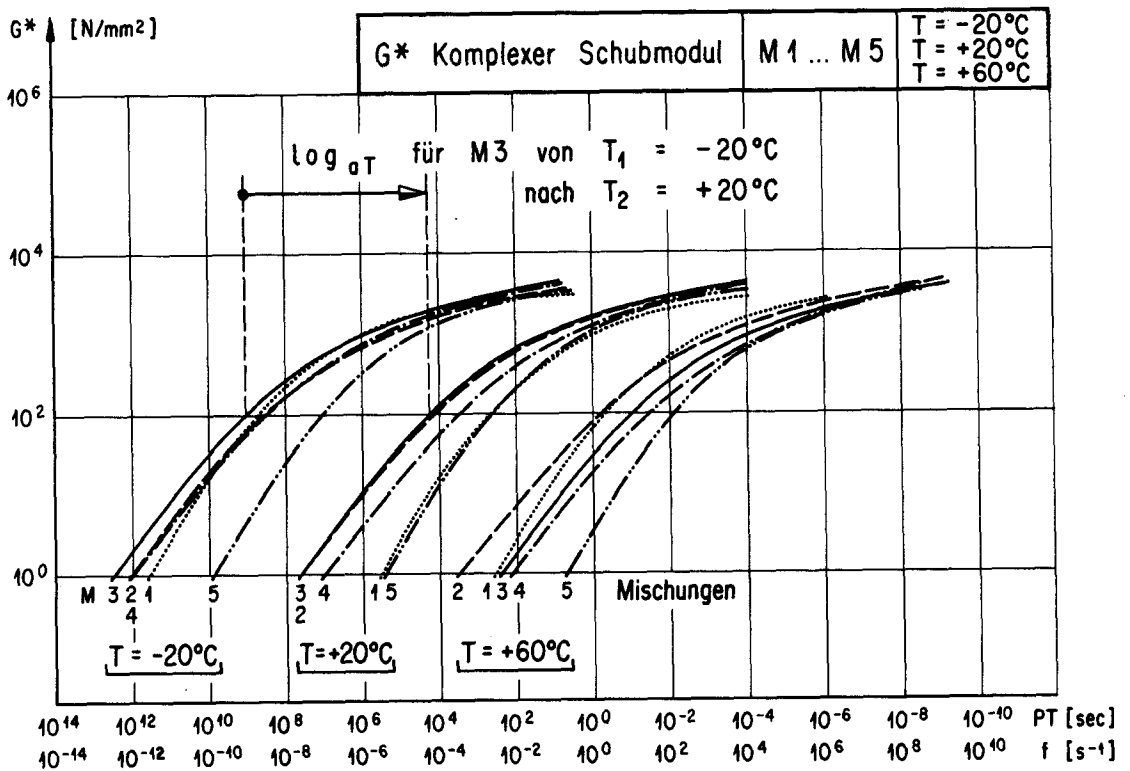


Abb. 122: PK-BSA, Masterkurven für G* für die Referenztemperaturen T = -20, +20 und +60°C, bestimmt an den Prüfkörpern PK 1506W der Mischungen M1 bis M5 des Asphaltbeton AB 16. Eingezeichnet ist log_aT für M3 als Verschiebungsfaktor der Masterkurve von T₁ = -20°C nach T₂ = +20°C. Siehe auch (*) in der Tabelle 34.

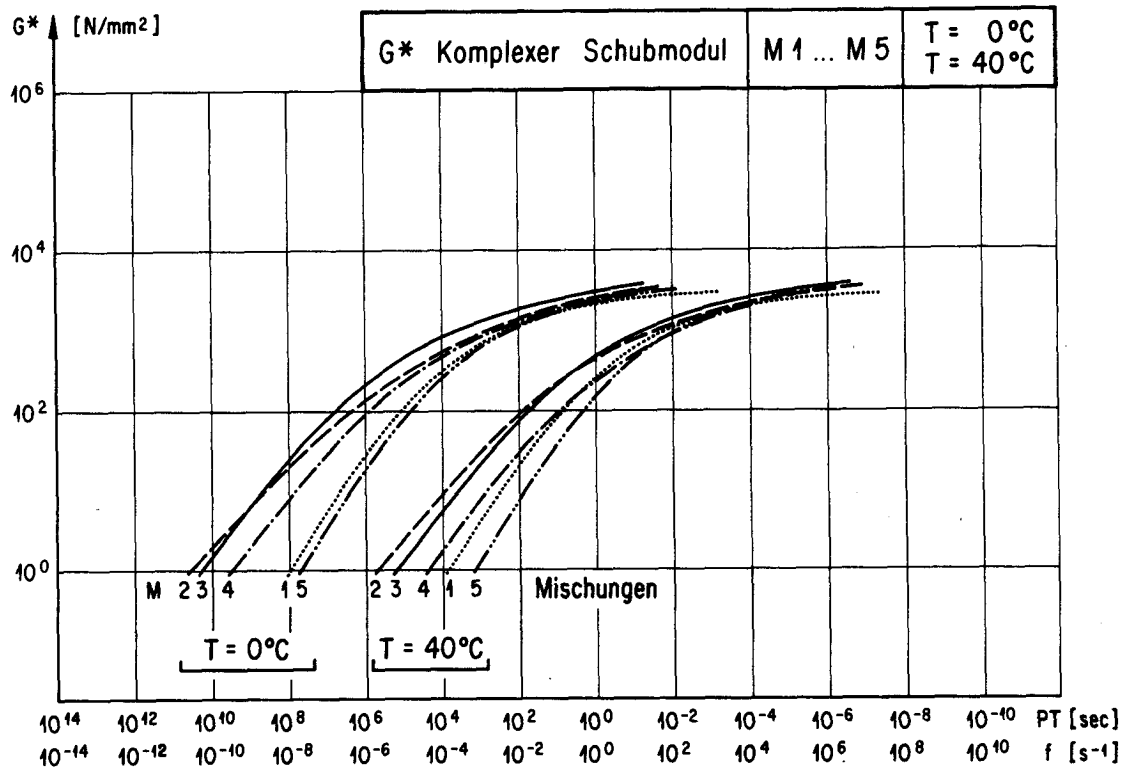


Abb. 123: PK-BSA, Masterkurven für G^* für die Referenztemperaturen $T = 0$ und $+40^\circ\text{C}$, bestimmt an den Prüfkörpern PK 1506W der Mischungen M1 bis M5 des Asphaltbeton AB 16.

Die ermittelten Verschiebungsfaktoren $\log_a \tau$ stellen somit in konzentrierter Form das aufgrund der Anwendung des Zeit-Temperatur-Superposition-Prinzips erarbeitete wirksame Stoffgesetz der verschiedenen Mischungen M1 bis M5 im Parameterfeld T/f dar. Sie charakterisieren und differenzieren die Mischungen M1 bis M5 innerhalb der ganzen Mischgutreihe bezüglich ihres rheologischen Verhaltens.

Die ermittelten Faktoren C_1 und C_2 nach [119] entsprechen jedoch - ausser bei Mischung M1 - den in der Literatur [7, 8] aufgeführten, vor allem an Kunststoffen ermittelten Faktoren, nicht. Die Ursachen dieser teilweise sehr grossen Abweichungen müsste in umfangreicheren Abklärungen ermittelt werden. Diese Faktoren werden daher hier nicht aufgeführt, und eine weitere Untersuchung erfolgt an dieser Stelle nicht. Die Ergebnisse sind in Tabelle A19 im Anhang enthalten. Die einzelnen grossen Abweichungen könnten auf der gesamthaft zu kleinen Anzahl der Versuchspunkte beruhen, wobei der im Berechnungsprogramm nach [119] erfolgte Ausgleich (Mitteln der Hüllkurve der verschobenen Kurvenabschnitte) noch zusätzlichen Einfluss haben konnte.

In der Tabelle 34 sind die ab der Referenztemperatur von $T = -20^\circ\text{C}$ für die Verschiebungen nach den höheren Temperaturstufen von $T = -10 \dots +60^\circ\text{C}$ berechneten Verschiebungsfaktoren $\log_a \tau$ aufgeführt. Die für die verschiedenen Referenztemperaturen $T = -20, 0, +20, +40$ und $+60^\circ\text{C}$ berechneten Masterkurven sind in den Abbildungen 122 und 123 dargestellt.

Die Abstände zwischen den auf die verschiedenen Referenztemperaturen bezogenen Masterkurven von der Masterkurve für $T = -20^{\circ}\text{C}$ auf der Zeitaxe entsprechen den in der Tabelle 34 aufgeführten Verschiebungsfaktoren $\log_a T$, wie dies für $\log_a T$ der Mischung M3 bei einer Verschiebung von $T_1 = -20^{\circ}\text{C}$ nach $T_2 = +20^{\circ}\text{C}$ in Abbildung 122 veranschaulicht wird.

Die generelle Beurteilung der Mischungen M1 bis M5 bezüglich ihres unterschiedlichen rheologischen Verhaltens innerhalb der Mischgutreihe kann im untersuchten Parameterfeld aufgrund der mit dem Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips berechneten $\log_a T$ -Verschiebungsfaktoren erfolgen.

Für die ab der Referenztemperatur $T = -20^{\circ}\text{C}$ vorgenommene Erhöhung der Temperatur auf die Temperaturstufen von $T = -10 \dots 60^{\circ}\text{C}$ muss die am wenigsten temperaturempfindliche Mischung innerhalb der Mischgutreihe den minimalen Verschiebungsfaktor $\log_a T$ aufweisen, siehe dazu (\rightarrow) in der Tabelle 34.

Für das Verschieben von $T = -20^{\circ}\text{C}$ nach den Temperaturstufen $T = -10$ und 0°C weist die Mischung M3 diesen minimalen Verschiebungsfaktor $\log_a T$ auf (wobei $\log_a T$ für M3 $\approx \log_a T$ für M2).

Für das Verschieben von $T = -20^{\circ}\text{C}$ nach den Temperaturstufen $T = 20 \dots 60^{\circ}\text{C}$ liegt der Minimalwert von $\log_a T$ jeweils deutlich bei der Mischung M2.

Dies bedeutet, dass sich die Mischung M3 im tieferen Temperaturbereich bezüglich der Temperaturempfindlichkeit optimal verhält. Beim Verschieben auf höhere Temperaturstufen zeigt jedoch die Mischung M2 dieses optimale Verhalten innerhalb der Mischgutreihe.

Das versuchsweise Anwenden des Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips (ZTSP) auf die Ergebnisse der erarbeiteten Materialkennwerte G^* im Prüfverfahren PK-BSA bestätigt die aus den Abbildungen 110 bis 119 "aufgrund visueller Beurteilung" abgeleitete Differenzierung im Verhalten der Mischungen M1 bis M5 innerhalb der Mischgutreihe.

Damit wird als Näherung auch rechnerisch mit der empirischen Methode ZTSP nach [119] das aus anderen Prüfverfahren abgeleitete optimale Verhalten der Mischungen M3 und M2 erfasst. Das optimale Verhalten der Mischung M3 im tieferen Temperaturbereich, somit "in der Kälte", jenes der Mischung M2 im höheren Temperaturbereich, somit "in der Wärme", wird bestätigt.

Weitere Untersuchungen mit dem Prüfverfahren PK-BSA und der Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips sind angezeigt, wobei insbesondere das rheologische Verhalten bituminöser Beläge mit modifizierten Bindemitteln (PMB) interessiert und für weitere Abklärungen im Vordergrund steht. Gleichzeitig müssten kleinere Temperaturschritte (5 oder 10°C) und zusätzliche Frequenzen gewählt werden.

TEIL V: VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN MIT DEM PRÜFVERFAHREN
PK-BSA AN IM LABOR HERGESTELLTEN PRÜFKÖRPERN UND AN
BOHRKERNEN

17. ÜBERSICHT

Die in Abschnitt 18 aufgeführten Ergebnisse umfassen die Gegenüberstellung der ermittelten Schubmoduln G* im Prüfverfahren PK-BSA an

	<u>in Abschnitt</u>
Mischungen M1 bis M5 des Asphaltbetons AB 16	18.1
Vergleich verschiedenartig hergestellter Prüfkörper PK 1506, hergestellt durch	
- S Schlagverdichtung	
- V Vibroverdichtung	
- W Walzverdichtung	
2 Mischgutsorten AB 10 und AB 25, entnommen ab Einbau in situ,	18.2
- Vergleich verschiedenartig hergestellter Prüfkörper der Einzelschichten, hergestellt durch	
• S Schlagverdichtung im Labor und	
• W Walzverdichtung im Labor	
- mit Einzelschichten dieser Mischgutsorten AB 10 und AB 25 ab Bohrkernen verschiedener Abmessungen, entnommen nach Einbau in situ	
Bohrkernen eines zweischichtigen Aufbaus mit diesen Mischgutsorten AB 10 und AB 25	18.3

18. ERGEBNISSE

18.1 Untersuchungen an im Labor hergestellten Prüfkörpern PK 1506, Abklären des Einflusses der Herstellungsart auf den Schubmodul G*

Für ein generelles Abklären des Einflusses der Herstellungsart der Prüfkörper auf den mechanischen Kennwert G* wurden die Ergebnisse der mit dem Prüfverfahren PK-BSA durchgeführten Untersuchungen an Prüfkörpern PK 1506S, 1506V und 1506W in einer Übersicht in der Tabelle A18 im Anhang dargestellt. Der für die verschiedenen Temperaturen und Frequenzen aufgeführte Schubmodul G* (%) für die Verdichtungsarten Vibroverdichtung V und Walzverdichtung W

wurde aus den Ergebnissen nach Tabelle A16 im Anhang berechnet, unter Bezugnahme auf den für die unter Schlagverdichtung S hergestellten Prüfkörper PK 1506S ermittelten Schubmodul G^* , welcher auf $G^* (\%) = 100 \%$ gesetzt wurde.

Dadurch kann das mechanische Verhalten der verschiedenartig hergestellten Prüfkörper in einem generellen Vergleich unter Angabe in Prozenten des Schubmoduls G^* bezüglich der unter Schlagverdichtung hergestellten Prüfkörper betrachtet werden.

Die im Anhang in der Tabelle A18 enthaltenen Ergebnisse basieren auf der in der Tabelle A16 aufgeführten vollständigen Zusammenstellung der an den Mischungen M1 bis M5 durchgeführten Untersuchungen mit dem Prüfverfahren PK-BSA.

Die Gesamtmittelwerte MW des Schubmoduls $G^* (\%)$ wurden für die Verdichtungsarten Vibroverdichtung V und Walzverdichtung W über alle Mischungen M1 bis M5 sowie über alle Temperaturstufen und Frequenzen gebildet und unterstreichen so den angestrebten generellen Vergleich.

Bei der Betrachtung aller Mischungen M1 bis M5 liegt der Mittelwert $G^* (\%)$ für die Vibroverdichtung V bei 89,1 %, jener der Walzverdichtung W bei 84,2 % der Schlagverdichtung S mit der Bezugsgrösse $G^* (\%) = 100 \%$.

Werden nur die (praxisnäheren) Mischungen M2 bis M4 in die Mittelwertbildung einbezogen, so liegen die entsprechenden Werte bei 88 % für die Vibroverdichtung V und bei 84,3 % bei der Walzverdichtung W. Dies entspricht den ermittelten Grössen für alle Mischungen M1 bis M5 des AB 16. Gesamthaft liegt die Vibroverdichtung V deutlich näher bei der Walzverdichtung W im Vergleich zur Schlagverdichtung S.

Die Schlagverdichtung bewirkt im Mittel den um einen Faktor 1,17 höheren Schubmodul G^* gegenüber den Verdichtungsarten V und W. Dies bestätigt die Ergebnisse aus anderen Untersuchungen [47, 53]. Aus Kriechversuchen wurden jedoch noch wesentlich höhere mechanische Kennwerte der durch Schlagverdichtung hergestellten Prüfkörper im Vergleich etwa zu Bohrkernen und durch andere Herstellungsarten verdichteten Prüfkörper gemessen. Dies kann aber teilweise auch mit der Verwendung des für mechanische Prüfungen eher zu geringe Prüfkörperabmessungen aufweisenden Prüfkörpers PK 1006 nach Marshall-Standard in Kriechversuchen zusammenhängen.

Hier stellt sich somit wieder die Frage, ob eine geeignete Verdichtungsart im Labor (mit dem Initialzustand IL des Labors) entwickelt werden kann, die bei gleichem Verdichtungsgrad wie bei Bohrkernen in situ (mit dem Initialzustand IP der Praxis) auch in der Grössenordnung gleiche Materialkennwerte in geeigneten Prüfverfahren erzeugt, wie sie an Bohrkernen auftreten, siehe Abbildung 78.

Aufgrund der hier vorliegenden Ergebnisse scheint ein weiteres Anwenden der Vibroverdichtung V und der Walzverdichtung W im Labor angezeigt, doch werden zusätzliche umfangreiche Untersuchungen für einen breit abgestützten Vergleich mit Bohrkernen unerlässlich, siehe dazu auch [89, 90].

Diese genannte Problemstellung wird in Abschnitt 18.2 durch eine Vergleichsuntersuchung an Bohrkernen und an im Labor hergestellten Prüfkörpern am Beispiel eines Praxisfalles mit zwei Mischgutsorten AB 10 und AB 25, die für einen zweischichtigen Aufbau bei einem Vorplatz zum Einbau gelangten, aufgezeigt. Der Umfang dieser Vergleichsuntersuchungen ist sehr beschränkt, gibt aber zur genannten Problemstellung der Erarbeitung eines geeigneteren Herstellungsverfahrens für Laborprüfkörper einige Anhaltspunkte.

18.2 Untersuchungen an im Labor hergestellten Prüfkörpern und an Bohrkernen der Mischgutsorten AB 10 und AB 25

Die Zusammensetzung der in dieser Vergleichsuntersuchung verwendeten Mischgutsorten Asphaltbeton AB 10 und AB 25 ist in der Tabelle A20 im Anhang aufgeführt.

Diese Mischgutsorten AB 10 und AB 25 wurden für die in Abschnitt 11.2 durchgeführten Untersuchungen zur Abklärung des Einflusses der Prüfkörperabmessungen im Prüfverfahren PK-BSA in der Form von Bohrkernen variabler Abmessungen (variable Radien bei gleichen Schichtdicken) eingesetzt.

Die hier beschriebenen vergleichenden Untersuchungen erfolgten bei der Temperatur $T = 20^{\circ}\text{C}$ und bei der Frequenz $f = 10 \text{ s}^{-1}$. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 35 zusammengestellt, unter Angabe der Anzahl Prüfkörper pro Herstellungsart und Mischgutsorte. Die angegebenen Mittelwerte für die Bohrkern BK entsprechen den Mittelwerten in der Tabelle 23, wobei die Gruppe der Prüfkörper PK 1003 beim AB 10 nicht für die Mittelwertbildung einbezogen wurde, siehe 1) in der Tabelle 23.

Die Ergebnisse in der Tabelle 35 zeigen beim Asphaltbeton AB 10 sehr ähnliches Verhalten der nach Walzverdichtung im Labor W hergestellten Prüfkörper und der Bohrkern, die mit $G^*(\%)$ von 78,3 % und 72,1 % deutlich unter der Bezugsgrösse $G^*(\%)$ der Schlagverdichtung S mit $G^*(\%) = 100 \%$ liegen. Sie liegen zudem in der Grössenordnung nahe beieinander, was die Anwendung der Walzverdichtung W im Labor im Vergleich zu den Bohrkernen BK als geeignet erscheinen lässt.

Beim Asphaltbeton AB 25 erreicht die Walzverdichtung W mit $G^*(\%)$ von 99,1 % jedoch den Wert der Schlagverdichtung S. Dies entspricht nicht der Abstufung zwischen den Herstellungsarten Schlagverdichtung S und Walzverdichtung W auf-

G* (N/mm ²) und G* (%) in % der Schlagverdichtung S für W und BK				
Herstellung im Labor	AB 10		AB 25	
	G*	G*(%)	G*	G*(%)
S Schlagverdichtung	MW 1'406 n = 3 CV = 4,0 %	100	MW 1'347 n = 4 CV = 3,4 %	100
W Walzverdichtung	MW 1'101 n = 3	78,3	MW 1'334 n = 3	99,1
BK Bohrkerne	MW 1'014 n = 17 CV = 8,4	72,1	MW 1'172 n = 13 CV = 8,7	86,0

Tab. 35: Vergleich Bohrkerne BK mit im Labor hergestellten Prüfkörpern S Schlagverdichtung und W Walzverdichtung über G* und G*(%) mit Bezug auf G*(%) = 100 % für S Schlagverdichtung.

grund der an den Mischungen M1 bis M5 des Asphaltbetons AB 16 ermittelten Schubmoduln in Abschnitt 18.1, wird aber durch die Feststellung abgeschwächt, dass auch die Bohrkerne BK beim AB 25 mit einem Wert von G*(%) = 86 % in diesem Beispiel entsprechend hoch liegen.

Diese Ergebnisse können infolge der beschränkten Anzahl der Versuche nicht weiter analysiert werden, doch liegt die Vermutung nahe, dass dieses Verhalten beim AB 25 mit dem doch wesentlich grösseren maximalen Korndurchmesser der Mischgutsorte zusammenhängen könnte, da insbesondere die G*(%) der Walzverdichtung W, über die drei Mischgutsorten AB 10, AB 16 (Mischgutreihe M1 bis M5) und AB 25 betrachtet, deutlich steigende Tendenz mit zunehmender maximaler Korngrösse aufweisen, veranschaulicht durch die mittleren Werte für G*(%) von 78,3 %, 84,2 % und 99,1 % in der entsprechenden Reihenfolge der aufgeführten Mischgutsorten. Der Wert von 84,2 % für die Walzverdichtung W des AB 16 (Mischgutreihe M1 bis M5) ist der Tabelle A18 im Anhang zu entnehmen.

Gesamthaft ist aus den Abschnitten 18.1 und 18.2 abzuleiten, dass die weitere Anwendung der Herstellungsverfahren Vibroverdichtung V und Walzverdichtung W im Labor im Vergleich zu Bohrkerne BK gegeben ist. An dieser Stelle ist, in Ergänzung zu Abschnitt 8, nochmals darauf hinzuweisen, dass ein besserer Vergleich zwischen dem Verhalten der verdichteten bituminösen Mischungen in der Praxis und in mechanischen Prüfungen im Labor nur über ein praxisgerechteres Herstellen der zu untersuchenden Prüfkörper möglich sein wird. Zudem sind diese Prüfkörper auch in physikalisch

definierten Prüfverfahren zu untersuchen, um "tatsächlich wirksame Materialkennwerte", somit realistische Materialkennwerte erarbeiten zu können.

Eine solche Möglichkeit besteht beispielsweise für das hier beschriebene und angewendete Prüfverfahren PK-BSA.

18.3 Untersuchungen am zweischichtigen Belagsaufbau (AB 10 und AB 25)

Die in den Abschnitten 11.2 und 18.2 untersuchten Belagschichten der Sorten AB 10 und AB 25 wurden aus Bohrkernen eines zweischichtigen Belagsaufbaus entnommen. Dieser umfasste bei einer Gesamtdicke von 100 mm:

Deckschicht: Asphaltbeton AB 10, Dicke 28...40 mm

Tragschicht: Asphaltbeton AB 25, Dicke 72...60 mm

Der Einbau dieser beiden Mischgutsorten erfolgte unter Bedingungen der Praxis beim Bau eines Vorplatzes. Die Zusammensetzung der Mischgutsorten AB 10 und AB 25 ist in der Tabelle A20 im Anhang aufgeführt.

Die nachstehend beschriebenen vergleichenden Untersuchungen an Bohrkernen dieses zweischichtigen Belagsaufbaus konnten nur im beschränkten Umfang durchgeführt werden. Sie sollen aber an dieser Stelle eine Anwendungsmöglichkeit des Prüfverfahrens PK-BSA für mehrschichtige Belagsaufbauten erläutern, hier am Beispiel des einfachsten Falles eines zweischichtigen Belagsaufbaus.

Es wurden insgesamt 12 Bohrkern des zweischichtigen Belagsaufbaus untersucht. Die Aussen- und Innendurchmesser der Prüfkörper wurden variiert, siehe dazu die Tabelle 23 und die Tabelle A21 im Anhang sowie die Abbildung 125. Die Prüfungen erfolgten bei der Temperatur $T = +20^{\circ}\text{C}$ und der Frequenz $f = 10 \text{ s}^{-1}$.

Die Bestimmungsgrösse in dieser Untersuchung war die unter der Stempelkraft F_{ST} auftretende Verschiebung DY des Belastungsstempels. Zu vergleichen waren die rechnerisch bestimmten Verschiebungen DY_{BER} und die experimentell bestimmten (gemessenen) Verschiebungen DY_{γ} .

Unter Berücksichtigung der elastischen Verformung des Gesamtsystems der Prüfeinrichtung wurden die korrigierten gemessenen Verschiebungen $DY_{\gamma KO}$ in der Tabelle A21 im Anhang den berechneten Verschiebungen DY_{BER} gegenübergestellt. Die berechneten Verschiebungen DY_{BER} wurden unter Einsetzen der komplexen Elastizitätsmoduln E_1^* des AB 10 und E_2^* des AB 25 ermittelt, die aus den in Tabelle 23 aufgeführten komplexen Schubmoduln G^* berechnet wurden.

Für die Berechnungen wurden die aus der Tabelle 23 zu entnehmenden komplexen Schubmoduln G^* wie folgt eingesetzt:

- **Lastfall 1** (= ▲ in Abbildung 125 und Tabelle A21 im Anhang): Mittelwerte der G^* aller Prüfkörper jeder Belagschicht (Deckschicht AB 10 ohne die Prüfkörper PK 1003).
- **Lastfall 2** (= ● in Abbildung 125 und Tabelle A21 im Anhang): Gruppenmittelwerte der G^* der Prüfkörper mit entsprechenden Abmessungen, als Bezugsgrößen (= 100 %).
- **Lastfall 3** (= ■ in Abbildung 125 und Tabelle A21 im Anhang): Die (Mittelwerte- σ) der G^* aller Prüfkörper jeder Belagsschicht (Deckschicht AB 10 ohne die Prüfkörper PK 1003).

Die mit der Methode der finiten Elemente nach Abschnitt 10 berechneten Verschiebungen basierten auf der Einteilung des (halben) Querschnittes der Bohrkerns in 20 FE-Elemente entsprechend der Darstellung in Abbildung 124 für den Bohrkern BK 3010. Für die Berechnungen wurde zudem vollständiger Schichtverbund angenommen (die einzelnen Schichten konnten tatsächlich nur durch Schneiden getrennt werden), was für die einzelnen Schichten das Zuordnen gemeinsamer Knotenpunkte (●) in der "Trennschicht" bedeutete.

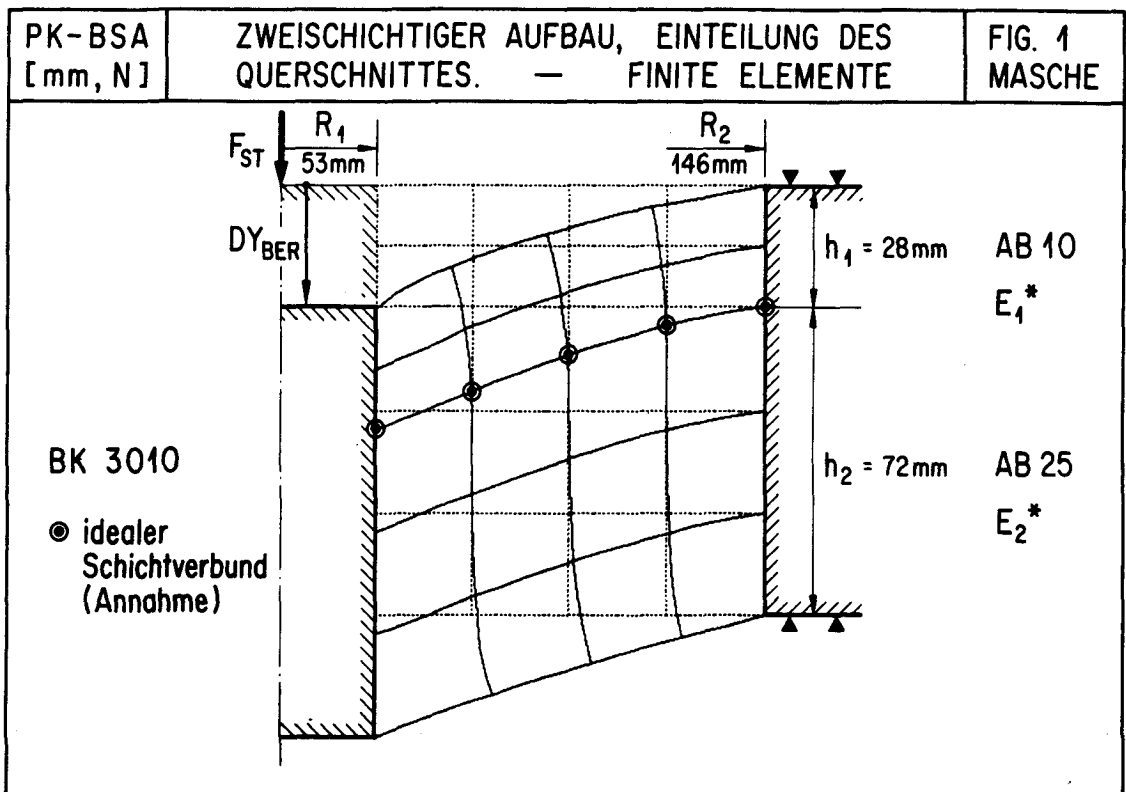


Abb. 124: Prüfverfahren PK-BSA, Anwendung auf den zweischichtigen Belagsaufbau am Beispiel des Bohrkerns BK 3010.

Die Ergebnisse von Tabelle A21 im Anhang sind in der Abbildung 125 dargestellt. Die gemessenen Verschiebungen (Einzelwerte \circ , Mittelwerte \odot) und berechneten Verschiebungen (Lastfälle 1 \blacktriangle , 2 \bullet und 3 \blacksquare) wurden unter Bezugnahme auf den Lastfall 2 \bullet ($\equiv 100\%$) dargestellt. Der Lastfall 2 wurde unter Einsetzen der an den Gruppen der Prüfkörper mit entsprechenden Abmessungen bestimmten Schubmoduln berechnet.

In der Abbildung 125 zeigt sich für die gemessenen und berechneten Verschiebungen DY_{BER} und DY_V relativ gute Übereinstimmung. Durch den bei der Berechnung angenommenen vollständigen Schichtverbund (idealisiert) wurde erwartet, dass die gemessenen Werte über den berechneten Werten liegen würden. Im Vergleich zu dem auf den Lastfall 2 bezogenen Mittelwert aller Prüfkörper liegen die gemessenen Verschiebungen mit 97 % jedoch etwas unter den berechneten Verschiebungen, entsprechen diesen aber recht gut.

Die Experimente am zweischichtigen Belagsaufbau zeigen somit gesamthaft gute Übereinstimmung mit den Berechnungen. Weitere Untersuchungen und Anwendungen dieses Prüfverfahrens, auch für die Untersuchung mehrschichtiger Belagsaufbauten, können daher empfohlen werden. Es sind aber weitere umfangreichere Untersuchungen und Abklärungen bezüglich der auftretenden Streuungen der Ergebnisse sowie bezüglich Einfluss des unterschiedlichen Schichtverbundes erforderlich.

Ergänzend ist insofern nochmals auf die Abbildung 125 und die Tabelle A21 im Anhang hinzuweisen, als auch für den vorliegenden, bewusst ungünstig gewählten Fall, mit der doch sehr kleinen Anzahl Prüfkörper (12 Bohrkerne) und der gleichzeitigen Variation der Prüfkörperabmessungen, relativ geringe Abweichungen der Messwerte vom berechneten Mittelwert (Lastfall 2) festzustellen sind. Elf Einzelwerte liegen innerhalb der Bandbreite von $\pm 20\%$. Diese Übereinstimmung ist als überraschend gut zu bezeichnen, wenn man davon ausgeht, dass sehr oft bei Dimensionierungsberechnungen - bei fehlenden Angaben "tatsächlich wirksamer", realistischer Materialkennwerte - Annahmen für die Größenordnung der mechanischen Materialkennwerte mit Faktoren von 0,5 bis etwa 2,0 zu treffen sind.

Für weitere Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Dimensionierung sollen daher unter Variation der einzelnen Schichtdicken des bituminösen Oberbaus und der Anwendung verschiedener Bindemittel die Frage des Schichtverbundes im Zusammenhang mit der Ermittlung der Steifigkeit der Belagspakete ganzer Aufbauten geprüft werden. Dazu ist die weitere Anwendung des Prüfverfahrens PK-BSA speziell angezeigt.

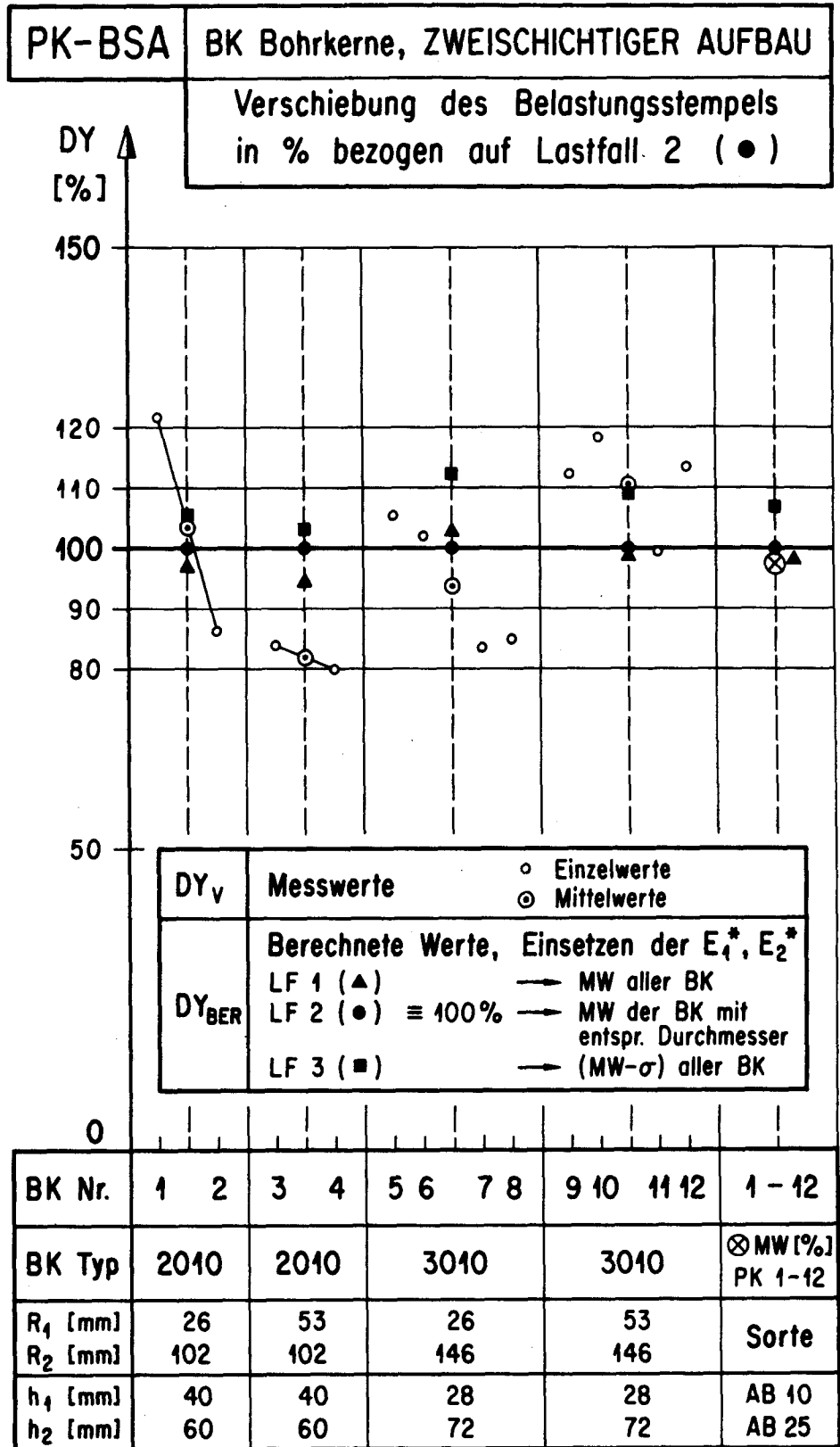


Abb. 125: Prüfverfahren PK-BSA, Untersuchungen am zwei-schichtigen Aufbau. DY ist die Verschiebung des Belastungsstempels. Vergleich der gemessenen Verschiebungen DY_V mit den berechneten Verschiebungen DY_{BER} aufgrund der Lastfälle 1, 2 und 3. Siehe Ergebnisse in Tabelle A21 im Anhang.

E_1^* und E_2^* berechnet aus den G^* nach Tabelle 23.

TEIL VI: KOMMENTARE UND FOLGERUNGEN

19. ZU DEN VERGLEICHENDEN UNTERSUCHUNGEN

19.1 Vergleichende Untersuchungen an im Labor hergestellten Prüfkörpern

Allgemeines

Wie in Abschnitt 12, Zielsetzungen zu den vergleichenden Untersuchungen, festgehalten wurde, sollten diese das generelle Differenzieren des mechanischen Verhaltens verschiedener, innerhalb einer abgestuften Mischgutreihe eines Asphaltbetons AB 16 liegender systematischer Mischungen aufzeigen. Die mit verschiedenen Prüfverfahren durchgeführten Untersuchungen sollten zudem mit den Ergebnissen des Prüfverfahrens PK-BSA verglichen werden.

Der in dieser gewählten Mischgutreihe des AB 16 (nach Abbildung 90 mit den Mischungen M1 bis M5) untersuchte Bereich des Auftretens der maximalen Lagerungsdichte der Mineralstoffe (entspricht dem minimalen Hohlraumgehalt HMM_{\min} der Mineralstoffe) basiert im vorliegenden Beispiel im wesentlichen auf der Variation des Bindemittelgehaltes unter Anpassung des Füllergehaltes. Diese Mischgutreihe mit den Mischungen M1 bis M5, die fünf typische Verdichtungszustände nach dem Betonprinzip abgestufter bituminöser Mischungen darstellen, kann daher nicht als reine "1-parametrische" Versuchsreihe betrachtet werden. Die "Zustandsgrößen" der Mischungen M1 bis M5, die Kennwerte der Volumetrie (KW-VOL) sind jedoch in erster Linie vom variierenden (innerhalb der Mischgutreihe steigenden) Bindemittelgehalt abhängig. Siehe auch die Abbildungen A24 und A25 im Anhang.

Die Kommentare zu den Ergebnissen der Untersuchungen mit den verschiedenen Prüfverfahren sind in den entsprechenden Abschnitten 14 und 15 enthalten.

Das Differenzieren bezüglich des mechanischen Verhaltens der durch die Mischungen M1 bis M5 aufgrund der Verdichtung nach Marshall-Standard gemäss Abbildung 90 erreichten typischen Verdichtungszustände wird durch das generelle Abgrenzen der Bereiche "stabil" und "instabil" infolge der relativen Reihung der Prüfverfahren innerhalb der Mischgutreihe vorgenommen.

Beurteilung gesamthaft

- Die Verdichtungsversuche (Marshall-Modifiziert, Gyratorverdichtung) lassen mit Hilfe der ermittelten Verdichtungsparameter C und des erforderlichen Verdichtungsaufwandes für die verschiedenen Verdichtungsgrade deutlich unterschiedliches Verhalten der Mischungen M1 bis M5 er-

kennen. Das für die Mischung M2 aus den Verdichtungsversuchen abgeleitete optimale Verhalten innerhalb der Mischgutreihe lässt auch besseres Verhalten dieser Mischung in den mechanischen Prüfungen erwarten. Renken [87] hat diesen Zusammenhang beispielsweise zwischen dem Verdichtungsparameter C bei Schlagverdichtung (Mehrstufenverdichtung) und dem Steifigkeitsmodul S_{mix} im Kriechversuch nachgewiesen.

Es ist festzuhalten, dass die verschiedenen angewendeten Prüfverfahren "in der Wärme" bezüglich des mechanischen Verhaltens - insbesondere des optimalen Verhaltens der Mischung M2 - innerhalb der Mischgutreihe M1 bis M5 ähnlich differenzieren. Das Abgrenzen der Bereiche "stabil" und "instabil" innerhalb der Mischgutreihe erfolgt somit in verschiedenen Prüfverfahren ähnlich.

Im tieferen Temperaturbereich ($-10...+10^{\circ}\text{C}$), "in der Kälte", ist innerhalb der Mischgutreihe gesamthaft optimales Verhalten der Mischung M3 festzustellen. Die Mischung M3 ist die Mischung mit der maximalen Lagerungsdichte der Mineralstoffe innerhalb der Mischgutreihe (HMM_{min}). Demgegenüber weist die noch vor diesem Verdichtungszustand liegende Mischung M2 "in der Wärme" deutlich besseres Verhalten in allen Prüfverfahren auf.

- Dies bestätigt die allgemeine Erfahrung, dass das optimale Verhalten der nach dem Betonprinzip abgestuften bituminösen Mischungen - in hauptsächlichlicher Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt betrachtet - noch vor dem unter Standardverdichtung erreichten Zustand der maximalen Lagerungsdichte der Mineralstoffe (HMM_{min}) auftritt.

Da die verschiedenen Prüfverfahren den Bereich "stabil" ähnlich abgrenzen, bedeutet dies, dass alle Prüfverfahren eine etwa vergleichbare Reihung verschiedener Mischungen innerhalb einer (vor allem über den Bindemittelgehalt) abgestuften Mischgutreihe ermöglichen.

Die Anwendung all dieser Prüfverfahren unter der Zielsetzung der Untersuchung des relativen optimalen Verhaltens verschiedener Mischungen im Sinne einer Reihung innerhalb von Eignungsprüfungen ist damit gegeben. Bestimmt werden dabei jedoch vorwiegend prüfkörperspezifische Kennwerte.

- Wird aber über diese "relative Reihung" hinaus das dringend erforderliche Erarbeiten prüfkörperformunabhängiger, im Kontinuum wirksamer, realistischer mechanischer Materialkennwerte angestrebt - realistisch im Sinne von "tatsächlich wirksam" -, so sind die mit dem Prüfverfahren PK-BSA erarbeiteten Materialkennwerte physikalisch aussagefähig und relativ rasch sowie einfach zu ermitteln.
- Zusätzlich können im Prüfverfahren PK-BSA am gleichen Prüfkörper Mehrstufenversuche auf mehreren aufeinanderfolgenden Temperaturstufen (von "kalt" nach "warm") und auf jeder Temperaturstufe unter Variation der Frequenz (von "schnell" nach "langsam") durchgeführt werden, was

das rheologische Charakterisieren verschiedener Mischungen im Parameterfeld Frequenz/Temperatur (f/T) gestattet. Zudem können die erarbeiteten realistischen Materialkennwerte für die Dimensionierung, d.h. die Bemessung bituminöser Beläge, herangezogen werden.

Grundsätzlich ist aber erneut darauf hinzuweisen, dass jede mechanische Prüfung in enger Verbindung mit dem Verdichtungszustand resp. dem Verdichtungsverhalten der zu untersuchenden Mischungen erfolgen muss, um beispielsweise in der Praxis das Fehlverhalten mechanisch sehr stabiler (verdichtungsunwilliger) Mischungen durch die Neigung zu Rissebildungen "in der Kälte" auszuschließen.

- Gesamthaft ist aus den Ergebnissen der durchgeführten vergleichenden Untersuchungen eine ausreichende "Reihung" aller Prüfverfahren bezüglich der untersuchten Mischungen innerhalb dieser Mischgutreihe abzuleiten.

Ein allgemeines Umsetzen einer Reihung von Materialkennwerten vergleichend untersuchter Mischungen in eine Aussage bezüglich des Praxisverhaltens in der Praxis dürfte aber weitgehend von der jeweiligen "Erfahrungswolke" des Beurteilenden abhängen, es sei denn, die erarbeiteten Materialkennwerte können wie beim Prüfverfahren PK-BSA als realistische mechanische Materialkennwerte betrachtet werden. Zusammen mit den zu berücksichtigenden volumetrischen Kennwerten der Mischungen erlauben sie eine klare physikalische Aussage im ganzen Bereich der Gebrauchstemperatur und durch geeignetes und verbessertes Herstellen der Prüfkörper im Labor wird ein besserer und direkter Vergleich zwischen Labor und Praxis erzielt.

Vergleich der Kennwerte aus verschiedenen Prüfverfahren

In Ergänzung zu den vorliegenden Ergebnissen der verschiedenen mechanischen Prüfverfahren und der eigentlichen Verdichtungsversuche müsste durch das Untersuchen zahlreicher Mischungen versucht werden, bezüglich des Hauptparameters Bindemittelgehalt und des innerhalb von Mischgutreihen massgebenden volumetrischen Kennwertes, des Hohlraumgehaltes der Mineralstoffe (HMM), eine Abhängigkeit der mechanischen Kennwerte und der berechneten Verdichtungsparameter aus Korrelationsmatrixen abzuleiten. Dadurch könnte die "Reihung" der verschiedenen Prüfverfahren vergleichend betrachtet und zudem das festgestellte, teilweise annähernd gleiche Abgrenzen der Bereiche "stabil" und "instabil" innerhalb von Mischgutreihen veranschaulicht werden. Deutlich ist aber, dass die im Rahmen dieser Untersuchungen vorliegende Anzahl der Versuchspunkte an den systematischen Mischungen M1 bis M5 für das Berechnen einer Korrelationsmatrix zu gering ist. Die Untersuchung der Korrelation wurde durchgeführt, konnte aber nicht als aussagekräftig betrachtet werden. Eine gewisse Verbesserung hätte hier die Untersuchung von insgesamt sieben Mischungen innerhalb der Mischgutreihe bedeutet. Dadurch wäre aber der Umfang der gezielt gewählten Untersuchung an systematischen Mischungen mit verschiedenen Prüfverfahren innerhalb dieser Arbeit zu gross geworden.

Darin zeigt sich der offensichtliche Nachteil vergleichender Untersuchungen an vergleichsweise wenigen, dafür systematischen Mischungen (aufwendiges Herstellen!) in mehreren (verschiedenen) Prüfverfahren.

Um weitere und statistisch gesicherte Aussagen bezüglich der Abhängigkeit zwischen verschiedenen Materialkennwerten machen zu können, werden umfangreiche Untersuchungen an einer grossen Anzahl Mischungen erforderlich, da ein Vergleich jeweils über die erarbeiteten Mittelwerte der Kennwerte an Prüfkörpern der einzelnen Mischungen zu erfolgen hat.

Für einen generellen Vergleich der auftretenden Streuungen wurden die in der Tabelle A22 im Anhang aufgeführten mittleren Variationskoeffizienten CV_m einzelner Materialkennwerte aus verschiedenen Prüfverfahren über die Mischungen M1 bis M5 bestimmt. Diese mittleren Variationskoeffizienten liegen im Bereich von etwa 8...15 % für die Prüfungen "in der Wärme". Deutlich tiefer liegen die Werte beim Spaltzugversuch als Prüfung "in der Kälte". Dieser Unterschied ist auch für die mittleren Variationskoeffizienten des Schubmoduls G^* im Prüfverfahren PK-BSA festzustellen; für höhere Versuchstemperaturen und längere Belastungszeiten (tiefere Frequenzen) liegt eine Zunahme der mittleren Variationskoeffizienten vor. Deutlich höher liegen die mittleren Variationskoeffizienten der berechneten Verformungsteile aus dem Kriechversuch, wie dies schon in Abschnitt 15.22 festgehalten wurde.

19.2 Untersuchungen an im Labor hergestellten Prüfkörpern und an Bohrkernen im Prüfverfahren PK-BSA

Auch der Umfang dieser Untersuchungen blieb infolge der vorgegebenen kleinen Anzahl Prüfkörper und Bohrkern e eingeschränkt. Generell konnte jedoch festgestellt werden, dass die durch Vibroverdichtung und Walzverdichtung hergestellten Prüfkörper in ihren mechanischen Eigenschaften (Schubmodul G^*) eher den Bohrkernen entsprechen als die durch Schlagverdichtung hergestellten Prüfkörper. Weitere umfangreiche Untersuchungen zu dieser Problemstellung sind erforderlich.

Die Untersuchungen am zweischichtigen Belagsaufbau gemäss Abschnitt 18.3 zeigten für das Prüfverfahren PK-BSA - auch hier bei beschränkter Anzahl der Prüfkörper - gute Ansatzpunkte für das Prüfen mehrschichtiger Belagsaufbauten. Das Realisieren dieser Prüfmöglichkeit stellt daher für den Problemkreis der Dimensionierung bituminöser Beläge und für den anzustrebenden Vergleich zwischen mechanischem Verhalten bituminöser Belagsschichten im Labor und im Bauwerk eine praxisbezogene Neuentwicklung und dadurch eine echte Erweiterung in prüftechnischer Hinsicht dar.

20. ASPEKTE ZUR WEITEREN ENTWICKLUNG DER LABORPRÜFTECHNIK MECHANISCHER UNTERSUCHUNGEN AN BITUMINÖSEN BAUSTOFFEN

Gesamthft ist auf die in den Abschnitten 3.4 festgehaltenen Zielsetzungen für die weitere Entwicklung von Prüfverfahren zu den verschiedenen Produktgruppen bituminöser Baustoffe hinzuweisen.

Für die **Bindemittel und Massen** (speziell für Polymer-Modifikationen) sind weitere Prüfverfahren für ein verbessertes rheologisches Charakterisieren dieser Baustoffe zu entwickeln, insbesondere auch mit Schwerpunkt Kälteverhalten. Die Programmierung der Prüfanlage DYNASPHALT für Mehrstufenversuche mit automatischer Auswertung der Zeit-Temperatur-Superposition wurde daher als weitere Zielsetzung realisiert [113 bis 119].

Für **Abdichtungsmaterialien** sind vermehrt Kennwerte der "Funktion" zu erarbeiten. Als Beispiel ist die Funktion des "Dichtens" der Baustoffe unter gleichzeitiger mechanischer Beanspruchung zu nennen. Für solche Prüfungen wird aber der Schritt von der Materialprüfung (als Qualitätskontrolle am einzelnen Baustoff) zur Systemprüfung (Brückenabdichtungen, Dachkonstruktionen, Fugen) unumgänglich.

Für den **Schwerpunkt der mechanischen Prüfung von Asphalt** wird das Erarbeiten realistischer (im Kontinuum tatsächlich wirksamer) Materialkennwerte an praxisgerecht verdichtetem Mischgut erste Zielsetzung, wenn in Ergänzung zur reinen Qualitätskontrolle über relative Vergleiche, oder zusätzlich zur Reihung und Optimierung verschiedener Mischungen, der direkte Vergleich Labor-Praxis angestrebt wird. Für die gesamte Prüftechnik stellt sich jedoch letztlich die Frage nach dem zu betreibenden oder erforderlichen Aufwand. In Abbildung 126 wurde daher der Versuch einer allgemeinen Darstellung des erforderlichen relativen Aufwandes in der Prüftechnik in Verbindung mit der zu erwartenden Aussage bezüglich des Verhaltens in der Praxis vorgenommen. Diese Darstellung nimmt schematisch Bezug auf den "Berührungspunkt Strasse", was einerseits den grossen Aufwand in der Prüftechnik für die als aussagefähiger betrachteten Prüfverfahren veranschaulicht, andererseits aber die jetzt doch weitgehend nur über das normierte, empirisch-technologische Prüfverfahren nach Marshall vorhandene "Berührung mit der Strasse", damit der Praxis, aufzeigt.

Die gewählte Darstellung schliesst mit ein, dass für die verschiedenen Prüfverfahren unterschiedliche Ausbaustufen möglich werden, die innerhalb der Abbildung 126 gewisse Verschiebungen zulassen. Siehe dazu auch die Tabelle 7 und [23].

Am Beispiel des Prüfverfahrens PK-BSA gilt die gewählte Lokalisierung, weil der eigentliche Versuchsaufwand durch vorausgehende, umfangreiche Berechnungen an Modellkörpern

im Experiment auf das Bestimmen der wirksamen Stempelkraft und der daraus resultierende Verschiebung des Belastungsstempels reduziert wird.

Durch die realisierte Möglichkeit des Bestimmens realistischer Materialkennwerte mit Hilfe kontinuumsmechanischer Betrachtung (\equiv triaxialer Spannungszustand) ist das Prüfverfahren PK-BSA in seiner Aussage den Triaxial-Schwingversuchen gleichzusetzen oder überzuordnen. Der prüftechnische Aufwand beim Prüfverfahren PK-BSA liegt wesentlich tiefer und übersteigt denjenigen monoaxialer Schwingversuche nicht.

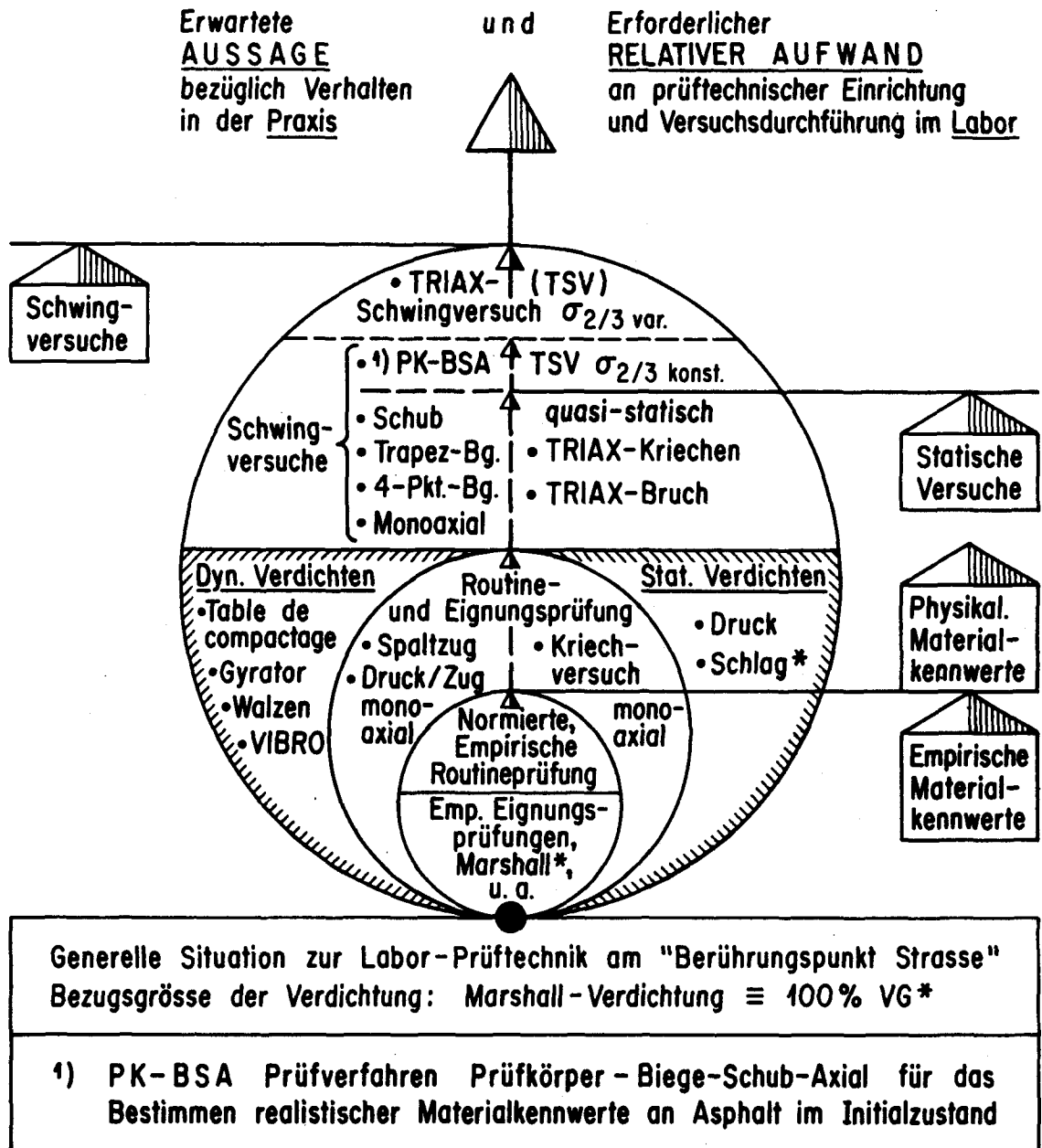


Abb. 126: Erforderlicher relativer Aufwand in der Prüftechnik und zu erwartende Aussage bezüglich des Verhaltens der im Labor untersuchten verdichteten bituminösen Mischungen (Asphalt) in der Praxis. Siehe auch Tabelle 7 und [23] sowie Abb. 127.

Das in der Abbildung 126 schraffiert gezeichnete Gebiet trennt somit die weniger aufwendigen mechanischen Prüfverfahren von den in prüftechnischer Hinsicht (Ausrüstungsgrad!) anspruchsvolleren Prüfverfahren. Die im schraffiert umrandeten Gebiet liegenden Prüfverfahren haben oder können infolge des beschränkten erforderlichen Aufwandes in der Prüftechnik eher grössere Verbreitung in Kontroll- und Eignungsprüfungen erfahren. Dies bestätigen beispielsweise die in verschiedenen Ländern normierten Prüfverfahren (mit ihren bekannten Nachteilen) wie Marshall-Versuch, Spaltzugversuch, monoaxialer Druckversuch ("Essai Duriez") sowie die in den letzten Jahren vermehrt erfolgte Anwendung des Kriechversuches.

Die über dem schraffierten Gebiet in Abbildung 126 liegenden Prüfverfahren könnten eine weitere Verbreitung und Anwendung in der Praxis nur durch wesentliche Standardisierung der Prüfverfahren und der zugehörigen Prüfeinrichtungen erreichen. Unter der Zielsetzung des Erarbeitens realistischer Materialkennwerte ist eine solche Standardisierung auch für das Prüfverfahren PK-BSA angezeigt.

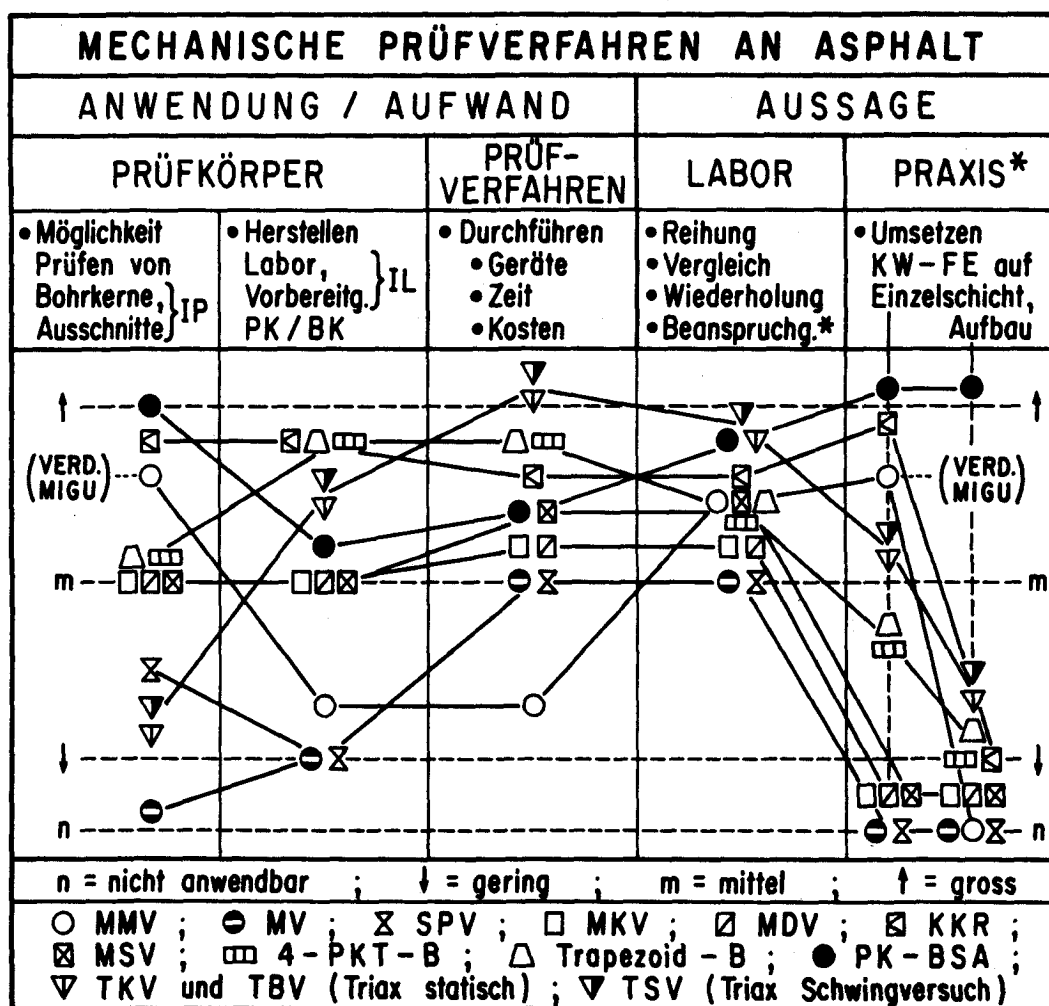


Abb. 127: Mechanische Prüfverfahren an verdichtetem bituminösem Mischgut, an Asphalt; Aufwand und Aussagefähigkeit. Bezeichnung der Prüfverfahren siehe im Anhang III/7.

In Abbildung 127 wird versucht, den prüftechnischen Aufwand und die Aussagefähigkeit für verschiedene mechanische Prüfverfahren an Asphalt differenzierter darzustellen und relativ zu beurteilen, in Ergänzung und in Anlehnung an (23), Tabelle 7 und Abbildung 78.

Die in Abbildung 127 enthaltene relative Bewertung umfasst den Aufwand bei der Prüfkörperherstellung im Labor (PK mit dem Initialzustand IL des Labors), die Möglichkeit des Prüfens von Bohrkernen oder Ausschnitten (Ausbauprüfkörper mit dem Initialzustand IP der Praxis) und die Aussagefähigkeit der aus den verschiedenen Prüfverfahren abgeleiteten mechanischen Kennwerte (oder KW-FE, Kennwerte der Festigkeit). Das Beurteilen und Charakterisieren verschiedener Asphalte im Labor und die Umsetzbarkeit der Kennwerte in Aussagen zum Praxisverhalten sind getrennt zu betrachten. Für die Praxis ist wiederum zu unterscheiden, ob Prüfungen und Aussagen nur die Einzelschicht oder Einzelschichten und ganze Aufbauten (mehrschichtige Belagspakete) betreffen.

Aufgrund dieser relativen Bewertung sprechen für weitere Anwendungen des Prüfverfahrens PK-BSA zusammengefasst folgende Punkte :

1. Das Prüfverfahren PK-BSA ermöglicht das Bestimmen (Prüfkörper-) formunabhängiger, realistischer Materialkennwerte durch kontinuumsmechanisches Betrachten des Baustoffes (PK-BSA \equiv "vereinfachter" Triaxialversuch!) auch im Initialzustand der Praxis (IP der Bohrkern).
2. Das Prüfverfahren PK-BSA gestattet einen direkten Vergleich Labor/Praxis, unter der Voraussetzung geeigneter Herstellungsarten der Prüfkörper im Labor (IL \equiv IP).
3. Die Möglichkeit der Durchführung von Mehrstufenversuchen im Prüfverfahren PK-BSA erlaubt das rheologische Charakterisieren der Baustoffe im Parameterfeld Frequenz/Temperatur (f/T) durch Anwenden des Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips (ZTSP) im ganzen Bereich der Gebrauchstemperatur.
4. Die im Prüfverfahren PK-BSA erarbeiteten realistischen Materialkennwerte (E^* , G^* , $\text{tg}\phi_{F-x}$, E' , E'' bzw. G' , G'') können direkt für die Dimensionierung bituminöser Belagsaufbauten verwendet werden.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die bestehenden, meistens auf der Anwendung der Elastizitätstheorie basierenden Dimensionierungsverfahren [121 u.a.] streng genommen nur bis zu Temperaturen von $T = +30^\circ\text{C}$ und für Geschwindigkeiten über 30 km/h (somit kurze Belastungszeiten) angewendet werden dürfen [35].

Die Entwicklung realistischerer Dimensionierungsverfahren - auch für höhere Temperaturen und längere Belastungszeiten - müsste in weiteren Schritten angegangen werden, nach Möglichkeit unter Anwendung viskoser, viskoelastischer und plastischer FE-Elemente, die somit auch im Prüfverfahren PK-BSA einzusetzen oder durch dieses zu erarbeiten wären.

21. AUSBLICK UND BEZUGNAHME ZU DEN VERSCHIEDENEN LAUFENDEN FORSCHUNGSANSTRENGUNGEN, INSBESONDERE ZU DEN MECHANISCHEN PRÜFUNGEN AN ASPHALT

Die in dieser Arbeit beschriebenen Entwicklungen zur mechanischen Prüfung bituminöser Baustoffe, insbesondere von Asphalt, entsprechen weitgehend auch den an anderen Forschungsstellen erarbeiteten Zielsetzungen für das Schaffen eines Gesamtkonzeptes prüftechnischer Einrichtungen.

Im Sinne einer vermehrt anzustrebenden Koordination, auch beim Bau von Prüfeinrichtungen, wurde das an der Abteilung Strassenbau/Abdichtungen der EMPA geschaffene Gesamtkonzept für Prüfeinrichtungen in diesem Bericht zusammengefasst.

In erster Linie bestand somit die Zielsetzung dieser Arbeit in der Erarbeitung von Ansätzen für neue prüftechnische Möglichkeiten. Die praktische Anwendung der entwickelten Prüfeinrichtungen wurde mit ersten Ergebnissen aus Testversuchen erläutert, wobei der Umfang der Untersuchungen notwendigerweise beschränkt bleiben musste.

Insbesondere sollen aber dem Anwender in der vorliegenden Darstellung Problematik und Möglichkeiten materialprüferischer Erfassung des komplexen Verhaltens bituminöser Baustoffe veranschaulicht und damit nähergebracht werden.

Für das Teilgebiet der als Schwerpunkt behandelten mechanischen Prüfungen an Prüfkörpern aus verdichtetem bituminösem Mischgut - an Asphalt - wird abschliessend in der Tabelle 36 eine Zusammenstellung der an verschiedenen Forschungsstellen unseres Landes eingesetzten Prüfeinrichtungen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) aufgeführt. Bewusst sollen damit die hier beschriebenen Entwicklungen in die Gesamtheit der laufenden Forschungsanstrengungen eingereiht werden, und verdeutlichen, dass diese Arbeit einen Beitrag zur Entwicklung der Laborprüftechnik der mechanischen Prüfungen an bituminösen und anderen Baustoffen darstellt.

Gesamthaft sollen diese Entwicklungen der eigentlichen Zielsetzung der Materialprüfung von Baustoffen dienen, nämlich der weiteren Verbesserung und sichereren Anwendung der Baustoffe. Dazu sind übliche Qualitätskontrollen und Eignungsprüfungen mit konventionellen, empirisch-technologischen Prüfverfahren vermehrt durch den Einsatz spezieller, praxisbezogenerer und dadurch aussagefähigerer Prüfverfahren zu ergänzen - oder nach Möglichkeit zu ersetzen.

Beispiele solcher Prüfverfahren sind in dieser Arbeit mit dem Einbau zum Prüfverfahren B-SA (Bindemittel-Schub-Axial), mit der Prüfeinrichtung zur Risseüberbrückung von Abdichtungsmaterialien und mit dem Prüfverfahren PK-BSA (Prüfkörper-Biege-Schub-Axial) für Asphaltprüfkörper (Laborprüfkörper und Bohrkerne) aufgeführt.

ASPHALTPRÜFUNG	Schwerpunkte	Bauwerk	Grossversuchsanlagen		Mechanische Prüfungen (Festigkeit, Verformung), Prüfungen in situ, Prüfungen im Labor, Forschung					
	Einsatzgebiet	Beobachtungstrecken	Grossversuche		Routine (Eignung, Kontrolle), Materialprüfung					
		Prüfstellen, im Rahmen von Prüfmethode	Forschungsaufträge, Strassenkataster der Kantone, ETHZ, EPFL, EMPA	Rundlauf ISETH	Ornier-LAVOC	Unternehmer Priv./Kant. Labors	ETHZ / EPFL / EMPA			
Problemkreis					ISETH	LAVOC	IGB	EMPA	IBWK	
Unterbau/Untergrund Oberbau (Tragschichten, Deckschichten)		1:1 Schütten, Verdichten 1:1 Mischen, Verdichten	1:1 1:1	1:1 1:1						
Prüfkörper Ausschnitte, Bohrkern, Entnahme		Entnahme	x	x	x	(x)	()	()	(x)	()
Prüfkörper										
Herstellen:	- Marshall-Standard - Marshall-Modifiziert - Vibroverdichtung	Zusammensetzung, Mischgutkontrollen beim Einbau	x	x	x	x	x	xx	(x)	
Verdichten:	- Gyrator PCG - Walzen in Stahlrahmen danach Bohrkern etc. - Table de compactage	Verdichtungskontrolle in situ			xv	x	x	xx m		
Prüfverfahren in situ										
	- ME-Wert - Deflektion - Dynamischer Schwinger	x x x	x x x	x x x	x x x	x x x	x x x			
Prüfverfahren im Labor										
Eignungsprüfung:	- Marshall-Versuch - Marshall-Gross - Spaltzugversuch	Erarbeiten empirischer (versuchspez.) Materialkennwerte.			x xv xv	x x x	x x x	x x x	x x x	
Verformung:	- Simulateur de trafic	(Spurrillenbildung)					x			
Verdichtung:	- Marshall Mehrstufenvers. - Gyrator/PCG						x PCG		x	
Verformung statisch:	- Kriechversuch - quas. stat. Druckversuch - quas. stat. Zugversuch - Torsionsversuch				x x	xxxx x x	x x x	xxxx xxxx x	x x x	
Verformung schwingend:	- PK-BSA - 4-Punkt-Biegung - Torsionsversuch - Trapezoidbiegung - Monoaxialer Schwingvers.	Erarbeiten physikalischer Materialkennwerte					x x	x x	xx x x	x x
Verformung Triaxversuche:	- Triax-Kriechen - Triax-Schwingversuch (* auch σ_{23} schwingend)					x x	x x	x x	xx xx*	x x
Kälteverhalten:	- Kälte-Kontraktion-Relaxation								x	x
Lagerungsarten vor/während mechanischer Prüfung										
Wasserlagerung:	- statischer Druck - Druckschwelllast - Wechsellast möglich	Einflüsse auf					x x	x x	x x	x x
Klima:	- Temperatur (Alterung) - Luftfeuchtigkeit				x x	x x	x x	x x	x x	x x

Tab. 36: Asphaltprüfung; generelle Übersicht zu bestehenden prüf-technischen Einrichtungen, Einsatzgebieten und beteiligten Forschungsstellen. → Schwerpunkt, x Anwendung von, xx mehrfach, () wird zugeliefert, v vereinzelt, m modifiziert.

A N H A N G I

LITERATURVERZEICHNIS

L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I SHINWEIS

Zur Prüftechnik der Festigkeitsuntersuchung an Asphalt ist in nachstehender Lit. [32] ein umfangreiches Literaturverzeichnis zu den verschiedenen Prüfverfahren enthalten.

Das Literaturverzeichnis wurde entsprechend den angegebenen allgemeinen Titeln in Gruppen aufgeteilt.

Mechanik, Verformungsverhalten bituminöser Baustoffe

- [1] Arand A.: Zur Theorie des Verformungsverhaltens von Asphalten. BTAP, 26. Jahrg. 1/2, 1975, S. 36...42.
- [2] Reiner M.: Rheologie in elementarer Darstellung. Carl Hanser Verlag, München, 1968.
- [3] Ziegler H.: Mechanik I - III, Lehrbücher der Mechanik. Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart.
- [4] Nijboer L.W.: Plasticity as a Factor in the Design of Dense Bituminous Road Carpets. Elsevier Publishing Company Inc., 1948.
- [5] Hills J.F., Heukelom W.: Steifigkeitsmodul und Poissonzahl von Asphalt. Bitumen 5/1971.
- [6] Van der Poel C.: A general system describing the viscoelastic properties of bitumens and its relation to routine test data. Journal of Applied Chemistry 4, 1954 and Shell Bitumen Reprint No. 9.
- [7] Williams M.L., Landel R.F., Ferry J.D.: The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms. American Chemical Society Journal, Vol. 77, 1955.
- [8] Meier U., Müller R.: Extrapolation der Ergebnisse von Kurzzeit-Kriechversuchen an GFK- und CFK-Verbundwerkstoffen mit Hilfe des Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips.

Bindemittel

- [9] Klopfer H.: Über das nicht-newtonsche Verhalten von reinem und verfülltem Destillationsbitumen B45 im Temperaturbereich zwischen 0° und 45°C. Heft 32, Otto-Graf-Institut, Stuttgart, 1967.
- [10] Vater E.-J.: Viskoelastisches Verhalten von Destillationsbitumen. Veröffentlichung des Instituts für Strassenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Heft 8, Dissertation, Karlsruhe 1972.
- [11] Fritz H.W.: Rheologische Kennwerte von Bitumen aufgrund dynamischer Versuche. BTAP, 25. Jahrg. 1974.
- [12] Neubauer O.: Zum Kälteverhalten bituminöser Bindemittel. Forschungsauftrag FA 22/7, EDI/VSS, 1984.
- [13] Fritz H.W., Meier B.: Mechanische Eigenschaften von Filler-Bitumen-Gemischen - Rheologische Messungen. Forschungsauftrag FA 31/77, EDI/VSS, 1980.
- [14] Gragger F.: Untersuchungen über den Einfluss der Bitumenhärte auf die Standfestigkeit von Asphaltbeton. Bitumen 4, 1982.
- [15] Gubler R.: Anforderungen an Strassenbaubitumen. Forschungsauftrag FA 8/77, EDI/VSS, 1977.

Haftfestigkeit

- [16] Scott J.A.N.: Adhesion and disbonding mechanisms of asphalt used in Highway constructions and maintenance. Shell Research.
- [17] Charif K.: Mechanisches Verhalten von Asphaltprüfkörpern nach dynamischer Beanspruchung in Gegenwart von Wasser. Dissertation Techn. Hochschule Karlsruhe, 1976.
- [18] Ajour A.-M.: Le problème de l'adhésivité hauts hydrocarbonés/granulats. Cahier 17, BM/Nr. 3/1979 des Laboratoire Central des Ponts et Chaussées/Paris, herausgegeben von der RILEM, Techn. Kommission 17 BM (Zenke G.: Deutsche Bearbeitung und Kurzfassung, Bitumen 3, 1980).
- [19] Junker J.P.: Zur Haftfestigkeit bituminöser Bindemittel am Gestein. Forschungsauftrag FA 4/73, EDI/VSS, 1981.

Asphalt, Belagsbau, Prüftechnik

- [20] Nievelt G.: Gedanken und Bemühungen zur Verbesserung der Verschleissfestigkeit und Verformungsbeständigkeit von Asphaltbetondecken. Bitumen, 34. Jahrg., 5/1972, S. 138.. ..146.
- [21] Paulmann G.: Zur Frage der Steifigkeit. Bitumen, 34. Jahrgang, 2/1972, S. 34...39.
- [22] Nakkel E.: Verformungswiderstand flexibler Fahrbahnbe-
festigungen. Bitumen 5/1976.
- [23] Arand W.: Standfeste bituminöse Beläge. Bericht der Kom-
mission XII (ATR, FG, VSS), Schriftenreihe, Heft 12, 1980.
- [24] Fritz H.W.: Standfeste bituminöse Beläge. Strasse und Ver-
kehr 10/82.
- [25] Baum G.: Zur Analyse der Verformungseigenschaften der
Strassen. Strasse und Autobahn, 16. Jahrg., 2/1965,
S. 53...60.
- [26] Nies V.: Erhebung über die Ursachen plastischer Verformun-
gen in bituminösen Fahrbahndecken. Bitumen 4/1975.
- [27] Wester K.: Empirie und Theorie im Asphaltstrassenbau. Bi-
tumen, 24. Jahrg., 1/2 1962, S. 4...14.
- [28] Chomton G., Valayer P.-J.: Recherches sur les enrobés bi-
tumineux. Revue Générale des Routes et Aérodrômes, 39.
Jahrg., 445 VII/VIII/69, S. 37...44.
- [29] Blumer M.: Zum Verformungsverhalten bituminöser Beläge und
Tragschichten. Bitumen, 37. Jahrg., 3/1975.
- [30] Stinsky F.: Verformungsfeste bituminöse Beläge. Bitumen,
Teere, Asphalte, Peche, 26. Jahrg., 5/1975, S. 19.

Forschung und allgemeine Prüftechnik der Festigkeitsuntersuchung
an Asphalten

- [31] Zipkes E.: Strassenbauforschung in der Schweiz. Mitteilung
Nr. 29 des Instituts für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau
der ETH Zürich, ISETH, 1974.
- [32] Junker J.P., Fritz H.W.: Festigkeitsuntersuchungen an
Prüfkörpern aus verdichtetem bituminösem Mischgut. For-
schungsauftrag FA 22/75, EDI/VSS, Schlussbericht, EMPA
Nr. 35'100, 1976.

- [33] Junker J.P., Fritz H.W.: Festigkeitseigenschaften von bituminösen Baustoffen am Beispiel von statischen Kriech- und dynamischen Ermüdungsversuchen. EMPA-Festschrift, 1980.
- [34] Krebs H.G., Arand W., Deugiz A., Jäger W.: Mechanisches Verhalten von Asphaltprüfkörpern. Forschung, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 334, 1981.
- [35] Div. Autoren der Arbeitsgruppe "Asphaltstrassen" der FGS: Merkblatt über die mechanischen Eigenschaften von Asphalt, Ausgabe 1985.
- [36] Mayer H.G., Motz H.: Erprobung von Untersuchungsverfahren zur Ermittlung der Einflüsse auf den Verformungswiderstand bituminöser Mischungen. Forschungsbericht FA 7.051 der Versuchsanstalt für Strassenwesen, TH Darmstadt, Juni 1980.
- [37] Motz H.: Die Beurteilung des Verformungswiderstandes von Asphalt aufgrund unterschiedlicher Prüfverfahren im Laboratorium. Dissertation, TH Darmstadt, 1984.
- [38] Eustacchio E.: Mechanische Eigenschaften von Asphalt. Heft 165 Strassenforschung, Wien, 1981.
- [39] Proksch H.: Beschreibung des Verhaltens von Asphaltbeton in verschiedenen Temperaturbereichen mit Hilfe physikalischer Materialkennwerte in der UdSSR. Bitumen 1/1975.
- [40] Arand W.: Verhalten von Asphalt bei tiefen Temperaturen. Die Asphaltstrasse 3, 1983.
- [41] Lempe U., Maleki N.: Die experimentelle Ermittlung thermischer Spannungen, Zugfestigkeiten und des Relaxationsvermögens von Gussasphaltbelägen bei tiefen Temperaturen. Bitumen Heft 1, 1985.

Empirische Prüfverfahren, Marshall-Versuch u.a.

- [42] Vizi L.: Das Marshall-Verfahren - Probleme und Möglichkeiten. Bitumen, 35. Jahrg., 3/1973, S. 75...79.
- [43] Assef A.H., Pigois M.L., Dumont A.G.: Essai de compression diamétrale appliqué aux enrobés hydrocarbonés. Forschungsauftrag Nr. 27/81 der VSS/EDI.
- [44] Messmer W., Nellen A., Bruusgard H., Dähler F. (Walo Bertschinger AG); Fritz H.W., Seeberger M., Gubler R. (EMPA): Bituminöse Beläge - Optimierung mit dem Marshall-Versuch. FA 9/75, EDI/VSS, 1981.

- [45] Seeberger M.: Marshall-Versuche - Vergleich Standardprüfkörper und modifizierte, "grosse" Prüfkörper. EMPA F+E, Nr. 11'024, unveröffentlicht.
- [46] Colombier G, Moniot B.: Essai Duriez adapté à l'étude d'enrobés 0/25. bull. Liaison Lab., Nr. 23/1967, S. 1...3.

Kriechversuche

- [47] Bericht über das Kolloquium 1977: Plastische Verformbarkeit von Asphaltmischungen. Verschiedene Autoren. Mitteilung Nr. 37 des Instituts für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau der ETH Zürich, ISETH, 1977.
- [48] Krass K.: Formänderungen von Asphaltprobekörpern unter statischer Beanspruchung. Bitumen, Teere, Asphalte, Peche, 22. Jahrg., 11/1971, S. 467...473, und 12/1971, S. 512...522.
- [49] Van de Loo P.J.: Creep testing, a simple tool to judge asphalt mix stability. Proceeding of the AAPT, Williamsburg, Vol. 43, 1974.
- [50] Hills J.F., Brien D., Van de Loo P.J., Sommer P.: Der Zusammenhang zwischen Spurbildungs- und Kriechprüfungen an Asphaltmassen. Strasse und Autobahn, 26. Jahrg., 1/1975, S. 15...21, und 2/1975, S. 54...59.
- [51] Van de Loo P.J.: A practical approach to the prediction of rutting in asphalt pavements. Proceedings of the Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, 1976.
- [52] Huschek S.: Der Kriechversuch. Strasse und Verkehr, Heft 4, 1976.
- [53] Huschek S., Staub P.: Die Beurteilung des Verformungswiderstandes bituminöser Mischungen durch den Kriechversuch. Mitteilung Nr. 42 des ISETH, ETH Zürich, 1979.
- [54] Bolk H.J.N.A.: The creep test. Study Centre for Road Construction, SCW Record 5, 1981.
- [55] Hürtgen H.: Zur Verwendung von Kriechversuchen für die Bestimmung der bleibenden Verformung von Asphalt. Bitumen, Heft 2, 1981.
- [56] Junker J.P.: Kriechversuche als Ergänzung zur Normuntersuchungen. Strasse und Verkehr 8, 1983.
- [57] Ugé P., Van de Loo P.J.: Les déformations permanentes des enrobés bitumineux. Shell Centre de recherche de Grand Couronne und Koninklijke Shell Lab. Amsterdam, 1974.

- [58] Hintsteiner E. et al.: Verformungsverhalten von Gussasphalten. Heft 149, Bundesministerium für Bauten + Technik, Strassenforschung, Wien, 1980.
- [59] Hanzik V., Luxemburk F.: Die Eigenschaften von Gussasphalt bei Dauerbelastung. Bitumen 1, 1978.

Triaxiale Versuche

- [60] Smith V.R.: Application of the Triaxialtest to bituminous mixtures. California Research Corporation Method. ASTM Special Technical Publication No. 106, S. 55...72.
- [61] Krass K.: Kriechuntersuchungen an zylindrischen Asphaltprobekörpern. Dissertation, Veröffentlichung des Instituts für Strassenbau- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Heft 5, 1971.
- [62] Tinic C.: Näherungsverfahren zur Berechnung des zeit- und temperaturabhängigen Verhaltens eines Gussasphalts unter einaxialer Beanspruchung. Dissertation, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion der ETH Zürich, Mai 1979.
- [63] Partl M.: Zum isothermen Kriechen eines bituminösen Mörtels unter mehrstufiger Belastung. Dissertation, Institut für Baustoffe, Werkstoffe und Korrosion der ETH Zürich, 1983.
- [64] Huschek S.: Zum Verformungsverhalten von Asphaltbeton unter Druck. ISETH, Mitteilung Nr. 54, 1983, Forschungsauftrag Nr. 35/77 des EDI/VSS, 1983, und Dissertation ETH Zürich.

Ermüdung

- [65] Saunier J.: Module complexe des enrobés bitumineux, Revue Générale des Routes et Aérodrômes, 421, 1967, S. 51.
- [66] Buseck H.: Ein Beitrag zur Bestimmung von Werkstoffkennwerten an bituminösen Strassenbaustoffen. Heft 288, 1980. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik.
- [67] Francken L., Verstraeten S.: Methods for Predicting Moduli and Fatigue Laws of Bituminous Road Mixes under Repeated Bending. Transportation Research Record No. 515, Washington, 1974.
- [68] Raithby K.D., Sterling A.B.: Ermüdungsprüfung an Walzasphalt im Laboratorium (gek. Übersetzung von P. Sommer). Bitumen 7, 1973.
- [69] Brown S.F., Cooper K.E.: A Fundamental Study of the stress-Strain characteristics of a bituminous material. Paper Meeting AAPT, 1980.

- [70] Fijn van Draat W.E., Sommer P.: Ein Gerät zur Bestimmung der dynamischen Elastizitätsmoduln von Asphalt. Strasse und Autobahn 6, 1965.
- [71] Soliman S.: Influence des paramètres de formulation sur le comportement à la fatigue d'un enrobé bitumineux. LCPC Rapport de Recherche No. 5f.

Schubversuche

- [72] ASSI Marwan: Une methode d'étude du comportement des enrobés bitumineux à la fatigue en cission. Rapport de recherche LCPC, No. 118.
- [73] Eisenmann J., Lempe U.: Ermittlung der Werkstoffkonstanten und der Dauerfestigkeit von bituminös gebundenen Baustoffen. Strasse und Autobahn, 21. Jahrg., 3/1970, S. 89...97.
- [74] Lempe U.: Dynamischer Schubmodul und Dauerschubfestigkeit bituminös gebundener Baustoffe. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 1972, Heft 130, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr.
- [75] Hilmer A.: Untersuchungen zum Einfluss des Verdichtungsgrades auf den dynamischen Schubmodul von Asphalt. Die Asphaltstrasse 5/1983.
- [76] Velske S.: Erscheinungsbilder der Verformung im Asphalt bei einer Schubbeanspruchung. Bitumen 1/1982, S. 22...28.

Verschleiss, Spurrinnen

- [77] Chomton G., Valayer P.-J.: Etude de l'orniérage en laboratoire - l'essai de fluage dynamique. Revue Générale des Routes et Aérodrômes, 40. Jahrg., 458 X/70, S. 95...104.
- [78] Peffekoven W.: Möglichkeiten der Verschleissvorhersage von Strassendeckenschichten aus Laborversuchen. Strasse und Autobahn, 25. Jahrg., 7/1974, S. 252...257.
- [79] Eisenmann J., Hilmer A.: Versuche zur Quantifizierung der Spurrinnenbildung. Die Naturstein-Industrie 3/1982.

Verdichtung von bituminösem Mischgut

- [80] Loos H.: Gesetzmässigkeiten der Kornzerkleinerung bei der Beanspruchung von Splittkörnung durch Schlag-, Druck- und Scherkräfte im Laboratorium.

- [81] Busching H.W., Goetz W.H.: Use of a Gyrotory Testing Machine in the Evaluation of Bituminous Mixtures. Highway Research Record 51, 1964, S. 19...43.
- [82] Paulmann G.: Vorgänge und Gesetzmässigkeiten bei schlag- und gyratorisch verdichtetem Mischgut. Dissertation Technische Hochschule Darmstadt, 1969.
- [83] Gauer P.K.: Eine Analyse der Verdichtungswilligkeit und des Verformungswiderstandes von bituminösem Mischgut. Dissertation Technische Hochschule Darmstadt, 1975.
- [84] Moutier F.: La presse à cisaillement giratoire. Modèle de série Bulletin de Liaison Laboratoires No. 74/1974, S. 137.
- [85] Suss G.: Der Einfluss der Korngrösse auf das Verformungsverhalten von Filler-Bitumen-Gemischen. Dissertation Technische Hochschule Darmstadt, 1971.
- [86] Junker J.P., Weber J.: Untersuchungen von Steinmehlen zur Erarbeitung von Prüf- und Qualitätsvorschriften für Filler. Forschungsauftrag FA10/68 und 6/71, EDI/VSS, Schlussbericht 1973.
- [87] Renken P.: Verdichtbarkeit von Asphaltgemischen und ihr Einfluss auf die Standfestigkeit. Schriftenreihe "Strassenwesen" des Lehrstuhls für Strassenwesen und Erdbau, TU Braunschweig, Heft 3, 1980.
- [88] Anst Ch., Huschek S.: Mechanische Eigenschaften von Filler-Bitumen-Gemischen - Einfluss der Verdichtungsart auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltkörpern. ISETH, Mitteilung Nr. 44, 1980.
- [89] Junker J.P.: Bituminöses Mischgut - Herstellen geeigneter Laborprüfkörper und Vergleich mit Bohrkernen. Forschungsauftrag FA 4/81, EDI/VSS, 1987.
- [90] Dumont A.G.: Bituminöses Mischgut - Herstellen von Prüfkörpern durch Vibrationsverdichtung. Forschungsauftrag FA 18/83 des EDI/VSS, 1987.
- [91] Stinsky F., Merz R.: Versuche mit einem Labor-Vibrationsverdichter. Interner Bericht der Marti AG, Strassenbauunternehmung, Bern 1983.
- [92] Stefan K., Schnieper A.: Interner Bericht zur Herstellung von zwei Mischgutreihen eines AB 16 im Anschluss an eine Eignungsprüfung. SPAG, Strassenbauunternehmung AG, Rotzloch, 1982.
- [93] Van Geffen M.: Walzverdichtung im Labor. Interner Bericht des Dienstes Weg-en Waterbouwkunde des Rijkswaterstaates der Niederlande, DWW/NL, 1982.

Prüfmaschinen, Prüfeinrichtungen und F+E-Berichte der EMPA

- [94] Erismann T.H.: Servohydraulik, ein universelles Mittel der Prüftechnik. EMPA-Jubiläumsschrift, 1980.
- [95] Erismann T.H.: Grundsätzliche Aspekte der Automation in der Materialprüfung. Material und Technik, Nr. 3, 1978, S. 113...116.
- [96] Leutert W., Erismann T.H.: Neue Geräte der EMPA Dübendorf für die zerstörende Materialprüfung. EMPA-Jubiläumsschrift 1880 - 1980, S. 148...156.
- [97] Keller H.: Die technische Entwicklung einer Rundlaufanlage zur Dauerbelastung von Strassen. Strasse und Autobahn, 25. Jahrg., 8/1974, S. 283...288.
- [98] Scazziga I.: Der Rundlauf als Mittel der Oberbaudimensionierung. Vorstudie zu einem Forschungsbericht, ISETH, Mitteilung Nr. 25.
- [99] Francken L., Hampson A.H.: Appareillage de compression sous charges répétées. La Technique Routière 1/1972.
- [100] Junker J.P. und Mitverfasser gemäss Angabe. Interne EMPA-Berichte, Forschung und Entwicklung, unveröffentlicht.
- 10'428, Niederer H.: Vier Druckgefässe für statischen und schwingenden Wasserdruck an Prüfkörpern.
 - 10'429, Niederer H.: Vier Behälter für die Vakuumlagerung von Prüfkörpern.
 - 10'430, Niederer H.: Entwicklung neuer Schlag-Verdichtungs-Geräte (Marshall modifiziert).
 - 10'504, Leutert W., Bischof W., Brenner M.: DYNASPHALT, 1. Ausbaustufe der Prüfanlage (Mehrfachprüfstand).
 - 10'520: GYRATOR-Verdichtung, Bericht zu Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der TH Darmstadt (Prof. Paulmann, Dr. P. Motz), dem Dienst Weg-en Waterbouwkunde der Niederlande (IR. H. Bolk und M. van Geffen) und dem Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris-Orly (Mr. Noret).
 - 10'556, Niederer H.: Entwicklung einer Ausstoss- und Verdichtungspressen für Prüfkörper.
 - 10'587, Leutert W., Sennhauser W., Brenner M.: Servohydraulisches Wasserdruckaggregat für die statische und schwingende Wasserdruckerzeugung.
 - 10'660, Stürzinger E.: Kriechversuche an bituminösen Randabschlüssen.

- 10'692 (10'918), Sennhauser W., Feusi Ch.: Entwicklung neuer TRIAXIAL-Zellen mit Seitendruckelementen zur Erzeugung von statischem oder schwingendem Seitendruck (Radialspannungen σ_{23}).
- 10'693, Niederer H.: Zugvorrichtung für die Prüfung bituminöser Dichtungsbahnen (Einbau zur Universalprüfmaschine UVP 150 kN für das gleichzeitige Prüfen von 6 Prüfkörpern).
- 10'723, Gubler R.: Beschaffung einer EDV-Anlage.
- 10'741, Sennhauser W., Brenner M.: Entwicklung und Bau der Universalprüfmaschine UVP 150 kN.
- 10'813, Gubler R., Brenner M.: DYNASPHALT, Vollausbau der Prüfanlage (Mehrfachprüfstand).
- 10'814, Sennhauser W.: Einbauten zur Prüfanlage DYNASPHALT für monoaxiale Wechselbelastung und 4-Punkt-Biegung.
- 10'946, Sennhauser W.: Einbau zur UVP 150 kN für das Prüfen von Fugendichtungsmassen (4 Prüfkörper gleichzeitig) in Anlehnung an das Fugenmodell nach Rabe (Dehnen).
- 11'126, Sennhauser W.: Einbau zur UVP 150 kN für das Prüfen von Fugendichtungsmassen (4 Prüfkörper gleichzeitig) für das Dehnen und Stauchen der Fugenkörper.
- 11'215, Sennhauser W., Niederer M., Feusi Ch.: Einbauten zum Prüfverfahren B-SA, Bindemittel-Schub-Axial und Einbauten zum Prüfverfahren PK-BSA, Prüfkörper-Biege-Schub-Axial.

Abdichtungsmaterialien

- [101] Evard C., Chaize A.: Contribution à l'étude du comportement des revêtements d'étanchéité sous l'effet des mouvements différentiels du support. Cahiers du centre scientifique et technique du bâtiment No. 133, CSTB Paris, 1972.
- [102] Schellenberg K., Blumer, M. Romer B., Badzong H.-J.: Sanierung und Abdichten von Brückenbauwerken. Sonderdruck Fachtagung der ATAG, Strassenbau AG Luzern, 1983.
- [103] Türler H.-J.: Die neue Norm SIA 281, Polymer-Bitumen-Dichtungsbahnen. Schweizer Ingenieur und Architekt 4/1984.
- [104] Junker J.P., Kehrli W.: Sanieren und Abdichten von schadhafte Dichtungsbelägen mit Polymer-Bitumen-Dichtungsbahnen (PBD) - Anwendungsbeispiel und Fragen der Materialprüfung. Schweizer Ingenieur und Architekt 4/1984.

Normen

- [105] VSS: Gedanken zur Normenpolitik, Februar 1981.
- [106] Norm DIN 1'996.
- [107] Norm DIN 18'540.
- [108] Norm DIN 52'455.
- [109] Norm SN 56'001.
- [110] Norm SN 564'281 (SIA 281)
- [111] Norm SN 640'431 (VSS)
- [112] Norm SN 671'969 (VSS).

Computerprogramme

Gubler R., Junker J.P.: Programme [113...118] zur Prüfanlage DYNASPHALT und Universalprüfmaschine UVP 150 kN.

- [113] DYDIR, Datenbank für Proben und Versuche.
- [114] DYVEVO, Versuchsvorbereitung (Erstellen von Command-Files).
- [115] DYNITZ, Berechnen der Zeittabelle für Steuerung und Erfassen.
- [116] DYNA, Versuchssteuerung und Datenerfassung.
- [117] DYKUS, Datenspeicherung und Auswerten.
- [118] DYBER, Berechnen abgeleiteter Grössen und Tabellierung (davon ausgehend Erzeugen von Command-Files für das unmittelbare Erstellen von Plots).
- [119] Gubler R.: Programm WLF nach [7] und [15].
- [120] Institut für Informatik der ETH Zürich, verschiedene Autoren: Programm FLOWERS (Manual), FINITE-ELEMENTE-Berechnungen.
- [121] BISAR, Programm der SHELL, SHELL pavement design manual-Asphalt pavements and overlays for road traffic, SHELL International Petroleum Company Limited, London, 1978.

A N H A N G I I

VERSUCHSERGEBNISSE

VERSUCHSERGEBNISSE

- Tab. A1: **B-SA**, Prüfverfahren Bindemittel-Schub-Axial. Ergebnisse der Untersuchungen an einem Bindemittel B 80/100.
- Tab. A2: **PBD-Ermüdung**. Untersuchung der Risse-Überbrückung und Ermüdung von Polymer-Bitumen-Dichtungsbahnen, nach [110].
- Tab. A3: **Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung** von AB 16 Mischungen M1 bis M5.
- Abb. A4: **Korngrößenverteilung** von AB 16, Mischungen M1 bis M5. Sollkurve und Korngrößenverteilung der Mischungen M1 und M5 nach [111].
- Tab. A5: **Marshallverdichtung** an AB 16, Mischungen M1 bis M5, an Prüfkörpern PK 1006 durch Schlagverdichtung Standard nach [112] und Schlagverdichtung Modifiziert.
- Tab. A6,
Tab. A7: **Schlagverdichtung** an AB 16, Mischungen M1 bis M5, der **Prüfkörper PK 1006/1012** und **1510/1520** unter Verwendung der Zusatzmasse beim Fallkörper sowie unter Anpassung der Schlagzahl S für das Erreichen von Verdichtungsgrad VG 100 % für alle Prüfkörper.
- Tab. A8: **Gyratorverdichtung** an AB 16, Mischungen M1 bis M5, an Prüfkörpern PK 1006. Kennwerte der Volumetrie in Funktion der Umdrehungszahl U_G des Gyrators.
- Tab. A9: **Vibroverdichtung** an AB 16, Mischungen M1 bis M5, an Prüfkörpern PK 1004, 1006, 1008 sowie 1504, 1506 und 1508.
- Tab. A10: **Walzverdichtung** an AB 16, Mischungen M1 bis M5, an Platten der Abmessungen 70 mm x 500 mm x 1000 mm.
- Tab. A11: **Marshallversuch** an AB 16, Mischungen M1 bis M5, Kennwerte der Festigkeit Stabilität SM, Fließwert FM und Quotient SM/FM der Prüfkörper PK 1006 nach **Marshall-Standard** sowie Prüfkörper PK 1510 nach **Marshall-Gross**.
- Tab. A12: **Spaltzugversuche** an AB 16, Mischungen M1 bis M5 an Prüfkörpern 1006, 1012 sowie 1510 und 1512.
- Tab. A13: **Monoaxiale Druckversuche** (Bruchversuche) an AB 16, Mischungen M1 bis M5, an Prüfkörpern PK 1012 unter Variation der Verformungsgeschwindigkeit.
- Tab. A14: **Monoaxiale Kriechversuche** an AB 16, Mischungen M1 bis M5, an Prüfkörpern PK 1012.

- Tab. A15: **4-Punkt-Biegung** an AB 16, Mischungen M1 bis M5, an Prismen 40 mm x 40 mm x 500 mm, hergestellt durch Walzverdichtung und Vergleichswerte PK-BSA.
- Tab. A16: **Prüfverfahren PK-BSA, Schubmodul G^*** an AB 16, Mischungen M1 bis M5, an Prüfkörpern PK 1506 S/V/W.
- Tab. A17: **Prüfverfahren PK-BSA, Phasenwinkel ϕ_{F-x}** an AB 16, Mischungen M1 bis M5, an Prüfkörpern PK 1506 S/V/W.
- Tab. A18: **Vergleichswerte der Schubmoduln G^*** an AB 16, Mischungen M1 bis M5, als G^* (%) der Prüfkörper PK 1506 V und W, bezogen auf G^* (%) = 100 % der Prüfkörper PK 1506 S.
- Tab. A19: **Prüfverfahren PK-BSA an Prüfkörpern PK 1506W**, AB 16, Mischungen M1 bis M5. Versuch der Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzips (ZTSP) auf die ermittelten komplexen Schubmoduln G^* . Zusammenstellung der Ergebnisse der Berechnungen nach [119], unter Einsetzen der Moduln G' und G'' .
- Tab. A20: **AB 10 und AB 25, AB 16/2 und HMT 40s.** Zusammensetzung und Kennwerte der Bindemittel im Anlieferungszustand sowie Marshallversuche der in den verschiedenen Abschnitten untersuchten Mischgutsorten.
- Tab. A21: **AB 10 und AB 25, Untersuchungen der Bohrkerne** des zweischichtigen Belagsaufbaues der Mischgutsorten AB 10 und AB 25 nach Tab. A19 im **Prüfverfahren PK-BSA. Vergleich** der durch Einsetzen der an den **Einzel-schichten** bestimmten Schubmoduln aus Tab. 23 berechneten Verschiebungen DY_{BER} mit den gemessenen Verschiebungen DY_{γ} im Experiment. $T = 20^{\circ}\text{C}$, $f = 10 \text{ s}^{-1}$.
- Tab. A22: AB 16, Mischungen M1 bis M5. **Mittelwerte der Variationskoeffizienten verschiedener Materialkennwerte.** Mittelwerte CV_m , gebildet über die Mischungen M1 bis M5. Gegenüberstellung der mittleren Variationskoeffizienten verschiedener Materialkennwerte aus verschiedenen Prüfverfahren.
- Abb. A23: Experimentelle Bestimmung des Schubmoduls G' des im Prüfverfahren PK-BSA für die Verklebung der Prüfkörper verwendeten Epoxidharzes (Zweikomponenten-Giessharz).
- Abb. A24: Marshall-Versuch MV, Schematische Darstellungen der Kraft-Verformungskurve und des Bruchvorganges im Marshall-Prüfkörper.
- Abb. A25: Schematische Zusammenhänge der KW-FE (Festigkeitskennwerte) und der KW-VOL (Kennwerte der Volumetrie) nach Marshall, in Funktion des Bindemittelgehaltes und des Füllergehaltes.
- Tab. A26: KW-VOL, Kennwerte der Volumetrie und Rohdichten, Berechnungsformeln.

B-SA		Prüfverfahren <u>Bindemittel-Schub-Axial</u>									
B 80/100	T (°C)	T (°C)									
		-20		0		20		40		60	
Kennwert	f (s ⁻¹)	G* (N/mm ²)	φ (°B)	G* (N/mm ²)	φ (°B)	G* (N/mm ²)	φ (°B)	G* (N/mm ²)	φ (°B)	G* (N/mm ²)	φ (°B)
G* (N/mm ²)	10	101,00	0,9	31,30	24,6	1,26	53,5	64	70,1	-	-
		104,00	1,4	25,90	23,8	1,13	56,4	64	69,4	-	≈90
		131,00	1,1	26,80	24,1	1,27	54,2	52	72,3	-	-
	MW	112,00	1,2	28,00	24,2	1,22	54,7	60	70,6	-	≈90
	ΔEW (%)	16,9	25	11,8	16,5	7,4	3,1	13,3	2,4	-	-
	1	57,00	4,3	12,10	30,2	0,49	63,1	14	76,1	-	92
		62,50	4,0	10,30	30,6	0,41	61,9	9	73,3	-	88
		69,40	4,0	10,60	29,8	0,44	62,5	16	72,0	-	94
	MW	61,30	4,1	11,00	30,2	0,45	62,5	13	73,8	-	≈90
	ΔEW (%)	7,0	4,9	10,0	1,2	9,6	1,0	30	3,1	-	-
	0,1	40,20	5,1	2,95	37,9	0,11	74,5	-	≈90	-	-
		49,10	5,4	3,18	37,8	0,13	73,6	-	86	-	-
42,10		5,1	3,77	34,7	0,11	70,6	-	85	-	-	
MW	43,80	5,2	3,30	36,8	0,11	72,9	-	≈88	-	-	
ΔEW (%)	12,1	3,8	14,2	5,7	18,0	2,2	-	5	-	-	
0,01	34,70	6,7	2,70	41,8	-	≈80	-	92	-	-	
	25,80	6,6	1,85	40,3	-	≈81	-	91	-	-	
	25,90	6,2	1,90	40,6	-	≈78	-	89	-	-	
MW	30,20	6,5	2,15	40,9	-	≈80	-	≈90	-	-	
ΔEW (%)	14,9	4,6	15,6	2,2	-	2,5	-	≈2	-	-	
S _{bit} * = 3G* (N/mm ²)	10	336,0		84,0		3,66		0,18		-	
	1	184,0		33,0		1,34		0,04		-	
	0,1	131,4		9,9		0,33		0,01		-	
	0,01	90,6		6,5		-		-		-	
Regelamplituden	a _F	2'000 N		1'000 N		-		-		-	
	a _x	-		-		0,25/0,5 mm		0,5 mm		1 mm	

Tab. A1: B-SA, Prüfverfahren Bindemittel-Schub-Axial. Ergebnisse der Untersuchungen an einem Bitumen B 80/100 mit Pen = 91 1/10 mm, T_{RuK} = 49,8°C, PI = 0,4 (-), Brechpunkt T_{BP} = -20,5°C, Dichte = 1,023 g/cm³.

PBD-Ermüdung "Rissüberbrückung"		$A_0 \leftrightarrow \leftrightarrow AR - AR \leftrightarrow \leftrightarrow MR$ 60s / 60s REL / (n/f)s				$A_0 = 0$ $AR = a_h$ $MR = 2a_h$		$T = -10^\circ C$ $f = 1 s^{-1}$	
a_h Amplitude	(mm)	0,25*	0,50	1	1,5*	2			
PK Anzahl	(-)	3	4	4	4	5			
Dehnung von	t	n	F± CV	F± CV	F± CV	F± CV	F± CV	F± CV	
A_0 nach AR in t = 60s, F+ (kN/50 mm)	s	-	$\frac{kN}{50 mm}$ %	$\frac{kN}{50 mm}$ %	$\frac{kN}{50 mm}$ %	$\frac{kN}{50 mm}$ %	$\frac{kN}{50 mm}$ %	$\frac{kN}{50 mm}$ %	
	60	-		1,22	1,44 8,5			1,83 10,6	
Relaxation bei A F+	10 30 60	- - -		0,72 28,8 0,61 41,0 0,58 37,0	1,09 13,2 0,81 15,8 0,75 16,5			1,35 15,0 1,15 9,1 1,05 7,8	
Ermüdung AR $\leftrightarrow \leftrightarrow$ MR (a_h) ($2a_h$)	1 10	1 10		1,52 10,7 0,25	1,74 9,3 0,34			1,84 10,9 0,40 13,7	
F+ (kN/50 mm) Zug im PK	(id) +	20		1,30 11,7 0,25	1,47 8,7 0,30			1,63 21,0 0,37 23,3	
F- (kN/50 mm) Druck im PK		50		1,24 13,6 0,25	1,39 8,8 0,30			1,52 11,4 0,37 14,5	
		100		1,18 16,3 0,25	1,34 10,0 0,29			1,46 7,9 0,37 19,2	
		200		1,13 15,9 0,25	1,28 11,5 0,31			1,39 5,1 0,36 22,6	
		400		1,08 16,1				1,39 14,8 0,37 28,7	
		600		1,06 14,2 0,26	1,18 10,6			1,31 16,1 0,36 25,6	
		800		1,04 14,8 0,26				1,29 16,3 0,36 25,1	
		1'000		1,03 15,4 0,27	1,14 15,4 0,32			1,23 12,5 0,34 27,8	
		2'000		0,98 17,6 0,28	1,08 11,9 0,34				
		4'000		0,94 16,3 0,30	1,02 14,1 0,31				
		6'000		0,92 16,9 0,32	0,98 14,7 0,29				
		8'000		0,90 16,5 0,33	0,95 16,9 0,28				
		10'000		0,88 16,8 0,33	0,93 17,0 0,27				
		15'000		0,86 14,2 0,28					
		20'000		0,83 0,23					
		25'000		0,83 13,6 0,25					
		40'000		0,81 14,2 0,26					
undicht bei	n (-)		$0,98 \cdot 10^6$	41'000	10'350	3'120	1'760		
Variationskoeff.	CV (%)		11,8	44,0	37,1	27,0	30,0		

Tab. A2: PBD - Ermüdung unter Variation der statischen Anfangsöffnung AR ab $A_0 = 0$ am Riss (Rissüberbrückung) und der schwingenden Rissdehnung a_h (Amplitude Halbwelle), wobei $a_h = AR = MR - AR$, n = Zyklenzahl bis undicht.

Mischung	M 1		M 2		M 3		M 4		M 5		AB 16
Kennwert	MW	EW+	MW	EW+	MW	EW+	MW	EW+	MW	EW+	bis Sollwert von
		σ		σ		σ		σ		σ	
Prüfsieb \emptyset in mm	Siebdurchgänge in Masse-%										1) zul. EW \pm von MW*
25,0	100,0		100,0		100,0		100,0		100,0		2) zul. MW \pm von SW
16,0	99,4	100,0 0,8 97,3	99,4	100,0 0,5 98,1	99,2	100,0 0,6 98,1	99,6	100,0 0,3 98,8	99,5	100,0 0,4 98,8	100 5,0 100,0 82 2,0
10,0	68,1	71,4 1,9 65,8	71,5	74,1 1,8 69,0	70,3	73,1 2,0 67,5	71,9	75,2 2,9 67,5	73,1	77,0 2,4 69,8	82 5,0 71,0 55 2,0
6,3	50,6	53,3 1,9 48,1	51,2	54,2 2,3 48,3	51,4	53,4 1,1 48,9	51,0	54,0 1,7 48,6	51,7	54,2 2,0 48,8	65 5,0 51,0 41 2,0
3,15	32,3	34,9 1,9 29,6	34,3	36,2 1,6 31,5	35,1	37,3 1,8 32,8	34,7	38,9 2,6 30,0	34,6	37,7 1,9 32,4	49 4,0 34,0 28 1,5
1,6	23,9	26,2 1,4 21,3	25,0	27,2 1,5 22,6	25,4	27,9 1,8 23,1	25,3	27,4 1,7 21,8	25,7	27,6 1,3 23,0	38 4,0 24,5 19 1,5
0,63	16,2	18,1 1,1 14,3	17,9	19,5 0,9 15,8	18,2	19,4 0,8 16,9	17,8	19,3 1,0 16,2	18,6	20,1 1,1 17,1	29 4,0 17,5 13 1,0
0,315	11,4	11,9 0,4 10,8	12,4	13,1 0,6 11,6	13,1	13,9 0,6 12,2	13,3	14,0 0,6 12,2	13,9	14,8 0,5 13,0	22 2,0 13,0 9 1,0
0,16	9,1	10,2 0,6 8,4	9,5	10,7 0,5 8,8	10,4	11,0 0,4 9,6	10,3	10,8 0,4 9,4	11,0	12,1 0,6 9,7	15 - 10,0 6 -
0,08	7,1	7,5 0,2 6,8	7,6	8,1 0,3 7,2	7,8	8,4 0,3 7,2	8,0	8,5 0,3 7,4	8,6	9,1 0,3 8,2	10 1,5 7,5 4 0,5
Bindemittelgehalt (Masse-%)	3,9	4,15 0,20 3,65	4,7	4,85 0,10 4,60	** 5,0	5,10 0,14 4,75	5,3	5,45 0,11 5,15	5,9	6,10 0,18 5,65	** 0,30 5 -- 0,15
Filler/Bindemittelverhältnis	1,90 (0,53)		1,60 (0,63)		1,55 (0,65)		1,50 (0,67)		1,45 (0,69)		

* Zulässige Abweichungen gemäss [111], MW Mittelwert, EW Einzelwert.

** Richtwert S-Belag AB 16, Bindemittelgehalt 5 Masse-%.

| Bereiche der Korngrößenverteilung AB 16.

() Kehrwert

Tab. A3: AB 16, Mischungen M1 bis M5, Bindemittelgehalt, Füllergehalt und Korngrößenverteilung nach Abbildung A4. Jeweils 5 Untersuchungen an jeder Mischung (n = 5).

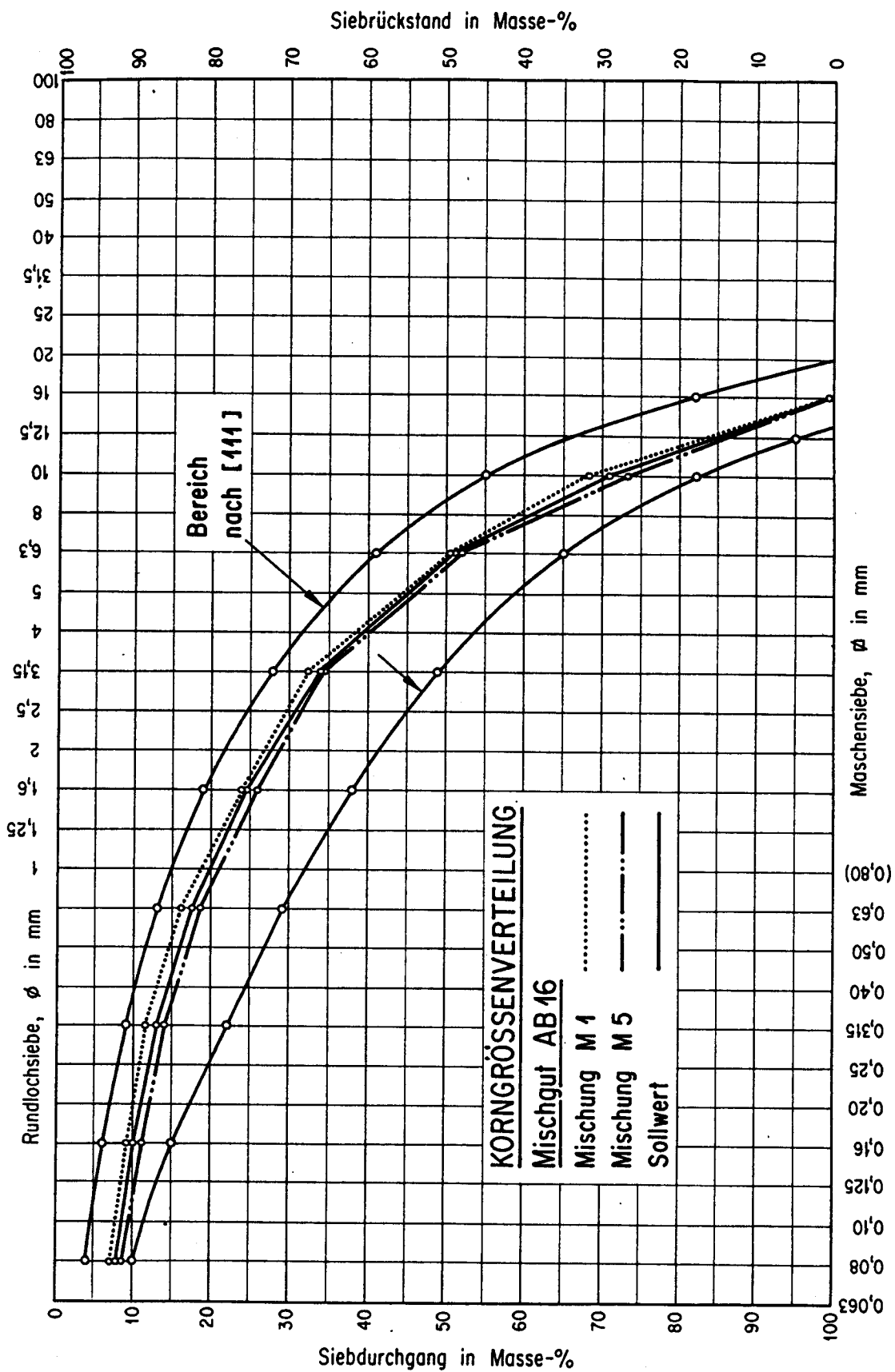


Abb. A4: AB 16, Mischungen M1 bis M5, Korngrößenverteilung der Mineralstoffe der Mischungen M1 bis M5 sowie der Sollkurve nach Tabelle A3.

S Schlagverdichtung S = 2 x (-)		* Marshall-Standardverdichtung (S = 2 x 50) Marshall-Modifiziert (S var. 2 x (-))							PK 1006
Mischung	Kennwert	5	15	25	35	50*	75	100	125
AB 16	VG ₁₀₀ (%)	90,50	93,30	95,50	96,50	97,70	99,90	100,00	100,04
	DI (g/cm ³)	-	-	-	-	2,525	-	-	-
	RODI (g/cm ³)	2,120	2,187	2,237	2,251	2,290	2,341	2,343	2,344
	HM (Vol.-%)	16,00	13,40	11,40	10,45	9,30	7,30	7,20	7,15
	VG ₅₀ (%)	92,60	95,50	97,70	98,70	100,00	102,00	102,30	102,36
M2	VG ₁₀₀ (%)	89,90	93,10	94,80	96,10	97,80	99,20	100,00	100,25
	DI (g/cm ³)	-	-	-	-	2,491	-	-	-
	RODI (g/cm ³)	2,163	2,241	2,282	2,312	2,352	2,386	2,406	2,412
	HM (Vol.-%)	13,20	10,00	8,40	7,20	5,60	4,20	3,40	3,20
	VG ₅₀ (%)	92,00	95,30	97,00	98,30	100,00	101,40	102,30	102,50
M3	VG ₁₀₀ (%)	90,60	93,30	95,30	96,70	98,30	99,40	100,00	100,30
	DI (g/cm ³)	-	-	-	-	2,478	-	-	-
	RODI (g/cm ³)	2,196	2,260	2,309	2,342	2,381	2,408	2,423	2,430
	HM (Vol.-%)	11,40	8,80	6,80	5,50	3,90	2,80	2,20	1,95
	VG ₅₀ (%)	92,20	94,00	97,00	98,40	100,00	101,10	101,80	102,10
M4	VG ₁₀₀ (%)	91,50	94,40	95,80	96,90	98,50	99,60	100,00	100,04
	DI (g/cm ³)	-	-	-	-	2,466	-	-	-
	RODI (g/cm ³)	2,212	2,281	2,316	2,342	2,380	2,407	2,417	2,418
	HM (Vol.-%)	10,30	7,50	6,10	5,00	3,50	2,40	2,00	1,95
	VG ₅₀ (%)	92,90	95,80	97,30	98,40	100,00	101,10	101,55	101,60
M5	VG ₁₀₀ (%)	95,50	97,40	98,20	98,70	99,30	99,90	100,00	100,04
	DI (g/cm ³)	-	-	-	-	2,441	-	-	-
	RODI (g/cm ³)	2,297	2,341	2,360	2,372	2,387	2,402	2,404	2,405
	HM (Vol.-%)	5,90	4,10	3,30	2,85	2,20	1,60	1,50	1,475
	VG ₅₀ (%)	96,20	98,10	98,90	99,40	100,00	100,60	100,60	100,75

Tab. A5: S Schlagverdichtung nach Marshall-Standard* und nach Marshall-Modifiziert, an Prüfkörpern PK 1006 der Mischungen M1 bis M5, AB 16.

DI: Dichte

RODI: Rohdichte

HM: Hohlraumgehalt

S: Schlagzahl, 2 x (-)

VG₅₀*: Verdichtungsgrad nach Marshall-Standard mit Schlagzahl S = 2 x 50 (-)

VG₁₀₀: Verdichtungsgrad für die Schlagzahl S = 2 x 100 (-)

PK 1006 n = 25	Mischung 1			Mischung 2			Mischung 3			Mischung 4			Mischung 5		
	E-	-σ	MW	+σ	E+	E-	-σ	MW	+σ	E+	E-	-σ	MW	+σ	E+
BIGE (Masse-%)	-	-	3,9	-	-	-	-	5,0	-	-	-	-	5,3	-	-
FIGE (Masse-%)	-	-	7,1	-	-	-	-	7,8	-	-	-	-	8,0	-	-
FIBI (-)	-	-	1,50	-	-	-	-	1,55	-	-	-	-	1,50	-	-
DI (g/cm ³)	-	-	2,525	-	-	-	-	2,478	-	-	-	-	2,466	-	-
RODI (g/cm ³)	2,300	2,295	2,290	2,285	2,280	2,359	2,344	2,341	2,376	2,371	2,395	2,392	2,387	2,382	2,380
HOGI (Vol.-%)	8,9	9,1	9,3	9,5	9,7	5,3	5,9	6,0	4,1	4,3	1,9	2,0	2,2	2,4	2,5
σ (Vol.-%)	-	-	0,20	-	-	-	-	0,20	-	-	-	-	0,20	-	-
DIM (g/cm ³)	-	-	2,684	-	-	-	-	2,678	-	-	-	-	2,677	-	-
ROMI (g/cm ³)	2,210	2,205	2,201	2,196	2,191	2,248	2,241	2,234	2,257	2,252	2,260	2,254	2,249	2,246	2,240
HOMI (Vol.-%)	17,66	17,85	18,00	18,20	18,40	16,10	16,40	16,80	15,35	15,71	15,90	15,55	15,60	15,80	16,20
HFB (%)	49,6	48,9	48,4	47,8	47,2	67,1	65,9	64,6	73,8	72,9	79,4	79,0	77,9	76,9	84,6
BIVD (Vol.-%)	8,75	8,73	8,71	8,69	8,68	10,80	10,80	10,75	11,60	11,59	12,34	12,33	12,30	12,28	13,70
VG (%)	100,4	100,2	100,0	99,8	99,6	100,7	100,3	100,0	100,2	99,5	100,4	100,2	100,0	99,8	99,7
SM (kN)	-	-	10,00	-	-	-	-	10,75	-	-	-	-	10,10	-	-
FM (mm)	-	-	3,1	-	-	-	-	3,0	-	-	-	-	3,4	-	-
SN/FM (kN/mm)	-	-	3,2	-	-	-	-	3,5	-	-	-	-	3,0	-	-
BIDI (g/cm ³)	-	-	1,025	-	-	-	-	1,025	-	-	-	-	1,025	-	-

PK 1012 n = 25	Mischung 1			Mischung 2			Mischung 3			Mischung 4			Mischung 5		
	E-	-σ	MW	+σ	E+	E-	-σ	MW	+σ	E+	E-	-σ	MW	+σ	E+
BIGE (Masse-%)	-	-	3,9	-	-	-	-	5,0	-	-	-	-	5,3	-	-
FIGE (Masse-%)	-	-	7,1	-	-	-	-	7,8	-	-	-	-	8,0	-	-
FIBI (-)	-	-	1,80	-	-	-	-	1,55	-	-	-	-	1,50	-	-
DI (g/cm ³)	-	-	2,525	-	-	-	-	2,478	-	-	-	-	2,466	-	-
RODI (g/cm ³)	2,300	2,293	2,285	2,278	2,267	2,347	2,339	2,332	2,327	2,327	2,359	2,352	2,375	2,370	2,373
HOGI (Vol.-%)	8,9	9,2	9,5	9,8	10,2	5,6	5,8	6,4	4,2	4,5	3,4	3,5	3,7	3,9	2,8
σ (Vol.-%)	-	-	0,3	-	-	-	-	0,3	-	-	-	-	0,2	-	-
DIM (g/cm ³)	-	-	2,684	-	-	-	-	2,678	-	-	-	-	2,677	-	-
ROMI (g/cm ³)	2,210	2,204	2,196	2,189	2,179	2,241	2,237	2,222	2,218	2,218	2,248	2,241	2,240	2,240	2,233
HOMI (Vol.-%)	17,66	17,90	18,20	18,45	18,80	16,40	16,50	16,80	17,10	17,25	15,40	15,50	15,80	16,10	16,44
HFB (%)	49,6	48,7	47,8	47,0	45,8	65,9	65,1	63,7	73,4	71,9	70,6	78,3	77,9	76,9	83,1
BIVD (Vol.-%)	8,75	8,72	8,69	8,67	8,63	10,80	10,80	10,69	11,58	11,54	12,32	12,30	12,28	12,25	13,66
VG (%)	100,4	100,1	99,8	99,5	99,0	100,0	99,8	99,1	100,0	99,7	99,4	100,1	100,0	99,6	99,4
BIDI (g/cm ³)	-	-	1,025	-	-	-	-	1,025	-	-	-	-	1,025	-	-

Tab. A6:

S Schlagverdichtung Prüfkörper PK 1006 nach Marshall-Standard (S = 2x50, VG = 100 %) und Prüfkörper PK 1012 nach Marshall-Modifiziert (S = 2x75Z, Z = Zusatzmasse) der Mischungen M1 bis M5, AB 16.

PK 1510 n = 15	Mischung 1				Mischung 2				Mischung 3				Mischung 4				Mischung 5				
	E-	-σ	MW	+σ	E+	E-	-σ	MW	+σ	E+	E-	-σ	MW	+σ	E+	E-	-σ	MW	+σ	E+	
BIGE (Masse-%)	-	-	3,9	-	-	-	-	4,7	-	-	-	-	5,0	-	-	-	-	5,3	-	-	-
FIGE (Masse-%)	-	-	7,1	-	-	-	-	7,6	-	-	-	-	7,8	-	-	-	-	8,0	-	-	-
FIBI (-)	-	-	1,80	-	-	-	-	1,60	-	-	-	-	1,55	-	-	-	-	1,50	-	-	-
DI (g/cm ³)	-	-	2,525	-	-	-	-	2,491	-	-	-	-	2,478	-	-	-	-	2,466	-	-	-
RODI (g/cm ³)	2,308	2,303	2,298	2,293	2,283	2,366	2,364	2,354	2,344	2,341	2,399	2,384	2,389	2,380	2,375	2,397	2,395	2,390	2,385	2,390	2,385
HÖGE (Vol.-%)	8,6	8,8	9,0	9,2	9,6	5,0	5,1	5,5	5,9	6,0	3,2	3,4	3,6	3,8	3,9	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	2,1
σ	-	-	0,2	-	-	-	-	0,4	-	-	-	-	0,2	-	-	-	-	0,2	-	-	0,2
DIM (g/cm ³)	-	-	2,684	-	-	-	-	2,680	-	-	-	-	2,678	-	-	-	-	2,677	-	-	-
ROMI (g/cm ³)	2,218	2,213	2,208	2,204	2,194	2,255	2,253	2,243	2,234	2,231	2,279	2,274	2,270	2,265	2,262	2,267	2,263	2,259	2,254	2,249	2,244
HDMI (Vol.-%)	17,40	17,55	17,70	17,90	18,27	15,90	15,94	16,30	16,65	16,80	14,90	15,10	15,25	15,40	15,53	15,30	15,40	15,60	15,80	16,00	15,70
HFB (%)	50,5	49,9	49,3	48,7	47,5	68,4	68,0	66,3	64,6	64,1	78,6	75,5	76,4	75,4	74,8	80,9	80,0	79,0	77,9	76,9	88,5
BIVO (Vol.-%)	8,78	8,76	8,74	8,72	8,69	10,85	10,84	10,79	10,75	10,73	11,70	11,68	11,65	11,63	11,61	12,38	12,36	12,33	12,30	12,28	13,80
VG (%)	100,8	100,6	100,3	100,1	99,7	100,6	100,5	100,1	99,7	99,5	100,8	100,5	100,3	100,1	100,0	100,6	100,4	100,2	100,0	99,8	100,3
BIDI (g/cm ³)	-	-	1,025	-	-	-	-	1,025	-	-	-	-	1,025	-	-	-	-	1,025	-	-	-

PK 1520 n = 5	Mischung 1				Mischung 2				Mischung 3				Mischung 4				Mischung 5				
	E-	-σ	MW	+σ	E+	E-	-σ	MW	+σ	E+	E-	-σ	MW	+σ	E+	E-	-σ	MW	+σ	E+	
BIGE (Masse-%)	-	-	3,9	-	-	-	-	4,7	-	-	-	-	5,0	-	-	-	-	5,3	-	-	-
FIGE (Masse-%)	-	-	7,1	-	-	-	-	7,6	-	-	-	-	7,8	-	-	-	-	8,0	-	-	-
FIBI (-)	-	-	1,80	-	-	-	-	1,60	-	-	-	-	1,55	-	-	-	-	1,50	-	-	-
DI (g/cm ³)	-	-	2,525	-	-	-	-	2,491	-	-	-	-	2,478	-	-	-	-	2,466	-	-	-
RODI (g/cm ³)	2,288	2,285	2,278	2,270	2,257	2,344	2,341	2,337	2,332	2,327	2,384	2,379	2,374	2,369	2,366	2,382	2,380	2,372	2,365	2,362	2,382
HÖGE (Vol.-%)	9,4	9,5	9,8	10,1	10,6	5,9	6,0	6,2	6,4	6,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,5	3,4	3,5	3,8	4,1	4,2	2,3
σ	-	-	0,3	-	-	-	-	0,2	-	-	-	-	0,2	-	-	-	-	0,3	-	-	0,2
DIM (g/cm ³)	-	-	2,684	-	-	-	-	2,680	-	-	-	-	2,678	-	-	-	-	2,677	-	-	-
ROMI (g/cm ³)	2,199	2,196	2,189	2,181	2,169	2,234	2,231	2,227	2,222	2,218	2,265	2,260	2,255	2,251	2,248	2,256	2,254	2,246	2,240	2,237	2,244
HDMI (Vol.-%)	18,10	18,25	18,45	18,70	19,20	16,65	16,76	16,90	17,10	17,25	15,42	15,60	15,80	16,00	16,10	15,70	15,80	16,10	16,30	16,43	16,00
HFB (%)	48,1	47,8	47,0	46,1	44,4	64,6	64,1	63,4	62,6	61,8	75,4	74,4	73,4	72,4	71,9	78,9	77,9	76,3	74,9	74,3	85,7
BIVO (Vol.-%)	8,71	8,69	8,67	8,64	8,59	10,80	10,73	10,72	10,69	10,67	11,63	11,60	11,58	11,56	11,54	12,32	12,30	12,26	12,23	12,21	13,73
VG (%)	99,9	99,8	99,5	99,1	98,6	99,7	99,5	99,4	99,2	98,9	100,1	99,9	99,7	99,5	99,4	100,1	100,0	99,7	99,4	99,3	99,9
BIDI (g/cm ³)	-	-	1,025	-	-	-	-	1,025	-	-	-	-	1,025	-	-	-	-	1,025	-	-	-

Tab. A7:

S Schlagverdichtung Prüfkörper PK 1510 (Marshall-Gross), (S = 2x100Z, Z = Zusatzmasse) und Prüfkörper 1520 (S = 2x300Z) der Mischungen M1 bis M5, AB 16.

GYRATOR		Verdichtung AB 16, Mischungen M1 bis M5																			
Umdrehungs- zahl	M1				M2				M3				M4				M5				
	U _G	VG	RODI	HOGE	U _G	VG	RODI	HOGE	U _G	VG	RODI	HOGE	U _G	VG	RODI	HOGE	U _G	VG	RODI	HOGE	
	(-)	-	%	g/cm ³	Vol.-%	-	%	g/cm ³	Vol.-%	-	%	g/cm ³	Vol.-%	-	%	g/cm ³	Vol.-%	-	%	g/cm ³	Vol.-%
1	8	90,0	1,923	23,80	11	90,0	1,834	22,90	14	90,0	1,921	22,50	15	90,0	1,900	23,00	8	90,0	1,923	21,10	
10			2,061	18,40			2,109	15,30			2,106	15,00			2,108	14,50			2,148	12,10	
20	39	95,0	2,124	15,90	43	95,0	2,169	13,30	65	95,0	2,143	13,60	66	95,0	2,142	13,10	33	95,0	2,225	9,00	
50			2,065	18,20			2,117	15,00			2,167	12,50			2,163	12,30			2,267	7,10	
100			2,236	11,50			2,294	7,90			2,294	7,50			2,294	7,00	71	98,0	2,339	4,20	
	112	98,0	2,244	11,10													113	100,0	2,387	2,20	
150			2,262	10,40	117	98,0	2,305	7,45			2,324	6,25			2,324	5,75			2,412	5,50	
200			2,277	9,80			2,321	6,80	171	98,0	2,330	5,85	165	98,0	2,332	5,43			2,425	0,70	
250			2,287	9,45	233	100,0	2,352	5,60			2,344	5,40			2,348	4,80			2,433	0,30	
300	275	100,0	2,290	9,30			2,355	5,45			2,359	4,80			2,363	4,15			+	2,440	= 0
			2,294	9,15			2,369	4,90			2,374	4,20	300	100,0	2,380	3,50	+	300	102,2	2,440	= 0
									339	100,0	2,381	3,90									
350			2,299	8,95			2,373	4,73			2,382	3,88			2,387	3,20					
400			2,303	8,85			2,376	4,60			2,387	3,65			2,394	2,95					
450			2,304	8,75			2,379	4,50			2,390	3,60			2,396	2,85					
500			2,306	8,65			2,381	4,40			2,392	3,45			2,399	2,70					
550	+		2,307	8,62			2,383	4,35			2,393	3,42			2,402	2,60					
600	565	100,8	2,308	8,60			2,385	4,27			2,395	3,35			2,405	2,50					
	VEN				+		2,387	4,19			2,397	3,30			2,408	2,40					
650					645	101,5	2,387	4,19			2,398	3,95									
					VEN				+		2,397	3,30									
700									671	100,7	2,398	3,95									
									VEN						+						
														700	101,2	2,410	2,33				
														VEN							

Tab. A8:

G Gyrator-Verdichtung, AB 16, Mischungen M1 bis M5. KW-VOL Kennwerte der Volumetrie und VG Verdichtungsgrade in Funktion der Umdrehungszahl U_G des Gyrotors. Mittelwerte bestimmt an 3 Prüfkörpern PK 1006. RODI Rohdichte, HOGE Hohlraumgehalt, VG Verdichtungsgrad. Verdichten bei T = 155°C bis VG 98 %, anschliessend Verdichten bei T = 60°C bis VEN Verdichten ENDE. $\sigma_v = 0,7 \text{ N/mm}^2$, $\alpha_G = 1^\circ\text{B}$.

V		VIBROVERDICHTUNG					
Prüfkörper PK		1004	1006	1008	1504	1506	1508
t_v	(sec)	3	5	7	13	17	22
(S)	2x (-)		(50)			(62Z)	
Mischung KW							
M1	DI (g/cm ³)	2,525	→	→	→	→	→
	RODI (g/cm ³)	2,303	2,299 (2,290)	2,305	2,309	2,314	2,294
	HOGE (Vol.-%)	8,8	9,0 (9,3)	8,7	8,6	8,4	9,1
	VG (%)	100,6	100,4	100,7	100,8	101,0	100,2
M2	DI (g/cm ³)	2,491	→	→	→	→	→
	RODI (g/cm ³)	2,354	2,344 (2,352)	2,359	2,362	2,364	2,357
	HOGE (Vol.-%)	5,5	5,9 (5,6)	5,3	5,2	5,1	5,4
	VG (%)	100,1	99,7	100,3	100,4	100,5	100,2
M3	DI (g/cm ³)	2,478	→	→	→	→	→
	RODI (g/cm ³)	2,374	2,381 (2,381)	2,386	2,388	2,384	2,384
	HOGE (Vol.-%)	4,2	3,9 (3,9)	3,7	3,6	3,8	3,8
	VG (%)	99,7	100,0	100,2	100,3	100,1	100,1
M4	DI (g/cm ³)	2,466	→	→	→	→	→
	RODI (g/cm ³)	2,370	2,372 (2,380)	2,382	2,387	2,382	2,377
	HOGE (Vol.-%)	3,9	3,8 (3,5)	3,4	3,2	3,4	3,6
	VG (%)	99,6	99,7	100,0	100,3	100,1	99,9
M5	DI (g/cm ³)	2,441	→	→	→	→	→
	RODI (g/cm ³)	2,373	2,385 (2,387)	2,382	2,397	2,395	2,395
	HOGE (Vol.-%)	2,8	2,3 (2,2)	2,4	1,8	1,9	1,9
	VG (%)	99,4	99,9	99,8	100,4	100,3	100,3

Tab. A9: V Vibroverdichtung, Prüfkörper PK 1004 bis 1508 der Mischungen M1 bis M5, AB 16. KW-VOL Kennwerte der Volumetrie und VG Verdichtungsgrade.

t_v Verdichtungszeit, festgelegt nach Vorversuchen. DI Dichte, RODI Rohdichte, HOGE Hohlraumgehalt, VG Verdichtungsgrad, S Schlagzahl (2x) nach Marshall-Standard; (2xZ) nach Marshall-Modifiziert (mit Zusatzmasse Z).

Werte in () nach Marshall-Standard-Verdichtung.

W											
Walzverdichtung, Handwalze im Labor, Entnahme Bohrkern											
Mischung	Dichte	Ergebnisse Marshall-Versuche		Ergebnisse bei W_i (-) Anzahl Walzübergänge							Platte
AB 16	DI (g/cm ³)	RM (g/cm ³)	HM (Vol.-%)	RODI (g/cm ³)	HOGE (Vol.-%)	VG (%)	MA (kg)	W1 (-)	W2 (-)	W3 (-)	Nr.
M1	2,525	2,290	9,3	2,247	11,00	98,1	≈80	20	20	120	1
				2,340	7,30	102,1		20	20	180*	2
				2,294	9,20	100,2		20	20	150*	3 +
M2	2,491	2,352	5,5	2,307	7,40	98,9	≈80	20	20	120	1
				2,392	4,00	101,7		20	20	180*	2
				2,349	5,70	99,8		20	20	150*	3 +
M3	2,478	2,381	3,9	2,361	4,70	99,2	≈80	20	20	120	1
				2,392	3,50	100,5		20	20	120	2
				2,376	4,10	99,8		20	20	120	3 +
M4	2,466	2,380	3,5	2,348	4,80	98,6	≈80	20	20	120	1
				2,377	3,60	99,9		20	20	120	2 +
				2,363	4,20	99,3		20	20	120	3
M5	2,441	2,387	2,2	2,390	2,50	99,7	≈80	20	20	120	1
				2,400	1,60	100,5		20	20	120	2
				2,395	2,05	100,3		20	20	120	3 +

* Die aus Vorversuchen abgeleitete Anzahl der Walzenübergänge W_i musste für die Mischungen M1 und M2 erhöht werden, um den Verdichtungsgrad VG 100 % zu erreichen.

Tab. A10: W Walzverdichtung mit Handwalze im Labor, Mischungen M1 bis M5, AB 16. KW-VOL Kennwerte der Volumetrie; RODI Rohdichte; HOGE Hohlraumgehalt; VG Verdichtungsgrad im Vergleich zu den Ergebnissen nach Marshall-Standardverdichtung mit Rohdichte RM und Hohlraumgehalt HM. + Platten für Prüfverfahren PK-BSA verwendet (VG ≈ 100 %). Masse der Walze bei W1 = 56 kg, bei W2 = 108 kg und bei W3 = 132 kg.

MV		Marshall-Versuche an Prüfkörpern PK 1006 und PK 1510, T = 60°C, $\bar{v}_x = 50$ mm/min										
Mischgutreihe AB 16			Mischungen									
Prüfverfahren			M1		M2		M3		M4		M5	
Mittelwert	Var.koeff.		MW	CV (%)	MW	CV (%)	MW	CV (%)	MW	CV (%)	MW	CV (%)
Marshall-Standard PK 1006 n = 5	SM	(kN)	10,30	13,7	10,75	7,3	10,50	9,3	10,10	9,3	9,25	7,5
	FM	(mm)	3,15	12,9	3,05	8,8	3,20	13,2	3,40	15,7	3,90	7,8
	SM/FM	(kN/mm)	3,20	22,0	3,50	11,5	3,10	18,7	2,95	23,2	2,40	6,3
Marshall-Gross PK 1510 n = 5	SM	(kN)	26,70	10,4	29,50	15,3	36,40	7,8	31,50	10,5	24,00	17,6
	FM	(mm)	2,80	15,5	2,75	17,4	4,60	12,1	4,90	8,2	7,70	6,0
	SM/FM	(kN/mm)	9,50	22,4	10,90	14,8	8,00	14,0	6,50	14,8	3,10	22,5

Tab. A11: MV Marshall-Versuche an Mischungen M1 bis M5, AB 16.
Kennwerte der Festigkeit der

- Prüfkörper PK 1006 nach Marshall-Standard und der
- Prüfkörper PK 1510 nach Marshall-Gross.

SPV		Spaltzugversuche an Prüfkörpern PK 1006 und 1012 sowie PK 1510 und 1512 bei $T = -10^{\circ}\text{C}$ und $\bar{v}_x = 50 \text{ mm/min}$										
Mischgutreihe AB 16			Mischungen									
Prüfung an Prüfkörpern			M1		M2		M3		M4		M5	
Mittelwert	Var.koeff.		MW	CV (%)	MW	CV (%)	MW	CV (%)	MW	CV (%)	MW	CV (%)
PK 1006 $n = 5$	σ_{BR}	(N/mm^2)	3,75	6,6	4,80	2,8	4,90	6,9	4,60	3,4	4,33	7,8
	x_{BR}	(mm)	0,77	6,7	0,90	7,3	0,80	5,6	0,78	7,3	0,76	7,0
PK 1012 $n = 5$	σ_{BR}	(N/mm^2)	3,76	2,2	4,44	7,3	4,64	4,2	4,19	5,8	4,05	4,8
	x_{BR}	(mm)	0,80	9,0	0,85	7,9	0,81	6,1	0,80	8,5	0,75	8,1
PK 1510 $n = 5$	σ_{BR}	(N/mm^2)	3,84	3,5	4,25	6,1	4,75	3,2	4,18	5,9	4,15	3,6
	x_{BR}	(mm)	1,06	4,3	1,17	6,7	0,87	5,1	1,12	4,4	1,54	7,2
PK 1512 $n = 5$	σ_{BR}	(N/mm^2)	3,59	2,5	4,13	4,0	4,61	3,5	4,40	3,2	4,19	4,6
	x_{BR}	(mm)	1,07	9,4	1,23	4,1	1,21	4,9	1,16	7,5	1,55	4,4

Tab. A12: SPV Spaltzugversuche an Prüfkörpern PK 1006, 1012, 1510 und 1512 der Mischungen M1 bis M5, AB 16. Alle Prüfkörper hergestellt durch Schlagverdichtung; Kennwerte der Volumetrie nach Tabellen A6 und A7.

MDV		Monoaxialer Druckversuch (Essai Duriez) bei T = 40°C									
PK 1012, n = 5		Mischungen									
Mischgutreihe AB 16		M1		M2		M3		M4		M5	
\vec{v}_x	Kennwert	MW	CV	MW	CV	MW	CV	MW	CV	MW	CV
0,5 mm/min	S_{BR} (N/mm ²)	126,2	11,9	131,0	12,5	120,3	13,1	105,0	11,2	69,3	14,9
	ϵ_{BR} (%)	1,06	10,2	1,23	8,9	1,21	8,5	1,28	9,5	1,76	6,9
	$S_{2\beta BR}$ (N/mm ²)	185,0	10,0	208,0	9,4	211,0	6,7	180,0	11,9	112,3	10,3
	$\epsilon_{2\beta BR}$ (%)	0,48	6,3	0,52	8,0	0,46	11,3	0,50	14,9	0,73	8,9
5 mm/min	S_{BR} (N/mm ²)	153,0	12,2	183,0	11,4	174,0	11,2	156,0	12,8	86,0	13,4
	ϵ_{BR} (%)	1,21	4,9	1,15	7,2	1,15	9,4	1,16	8,6	1,75	7,7
	$S_{2\beta BR}$ (N/mm ²)	267,0	8,8	264,0	8,0	250,0	12,0	240,0	11,5	125,0	12,6
	$\epsilon_{2\beta BR}$ (%)	0,46	10,8	0,53	7,9	0,52	15,1	0,56	8,3	0,80	10,1
50 mm/min	S_{BR} (N/mm ²)	227,0	15,4	241,0	11,8	240,0	19,7	231,0	16,2	129,0	19,1
	ϵ_{BR} (%)	1,28	14,7	1,21	10,6	1,25	13,4	1,21	13,8	1,83	12,2
	$S_{2\beta BR}$ (N/mm ²)	308,0	10,5	312,0	13,9	333,0	16,0	288,0	9,2	193,0	20,3
	$\epsilon_{2\beta BR}$ (%)	0,63	16,6	0,65	3,7	0,60	8,1	0,65	11,8	0,80	9,6

Tab. A13: MDV Monoaxiale Druckversuche an Prüfkörpern PK 1012 der Mischungen M1 bis M5, AB 16. Prüfkörper hergestellt durch Schlagverdichtung; Kennwerte der Volumetrie gemäss Tabelle A6 .

MKV	Monoaxialer Kriechversuch										
PK 1012	n = 5	AB 16, Mischungen M1 bis M5									
Belastung	Zeit	M1		M2		M3		M4		M5	
$\sigma = 0,2 \text{ N/mm}^2$ $T = 40^\circ\text{C}$	t sec	MW	CV (%)	MW	CV (%)	MW	CV (%)	MW	CV (%)	MW	CV (%)
$S_{\text{mix}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	0	150,4	15,8	298,6	23,6	206,0	11,2	156,6	28,2	138,9	15,6
	5	91,6	6,8	167,4	21,6	111,0	12,4	78,9	24,8	62,9	15,8
	10	81,6	7,4	136,9	23,3	94,8	12,2	60,4	17,7	53,2	14,9
	100	64,1	8,5	81,6	18,5	61,5	8,8	39,5	12,8	38,4	8,6
	500	58,5	9,8	69,0	11,1	52,1	9,8	32,5	13,0	30,7	5,1
	1'200	55,9	9,6	64,3	7,4	48,1	9,0	29,8	9,5	26,6	2,6
	2'400	53,8	8,3	61,6	5,5	45,8	9,8	27,9	11,4	24,5	3,5
	3'599	52,4	7,1	60,4	5,4	44,7	11,1	26,6	12,0	23,0	4,2
EP1 (‰)	EPD	1,33	15,6	0,70	26,8	0,97	9,4	1,28	33,0	1,44	17,3
	EL	0,46	--	0,26	--	0,38	--	0,48	--	0,44	--
	PL	0,88	--	0,43	--	0,56	--	0,87	--	1,00	--
	VE	0,54	--	0,67	--	0,84	--	1,12	--	0,78	--
	V + VP	1,95	--	1,94	--	2,51	--	5,05	--	6,14	--
($\cong 100 \%$)	EP1 _{TOT}	3,83	7,4	3,31	20,8	4,47	10,9	7,52	12,2	8,70	4,6
Verformungs- anteile in % von EP1 _{TOT} (*)	EPD	35,1	15,6	20,9	19,3	20,7	9,4	18,0	33,0	16,5	17,3
	● EL	11,9	14,7	7,9	14,2	8,2	12,8	6,4	34,3	5,2	31,4
	■ PL	23,2	21,6	13,1	22,3	12,5	10,0	11,6	29,0	11,6	28,1
	▼ VE	14,0	19,0	20,3	14,6	18,8	15,5	14,9	34,9	9,0	19,0
	◆ V + VP	50,9	7,7	58,8	8,6	56,2	11,8	67,1	7,5	70,6	5,3
Verhältnisse der Verfor- mungsanteile	EL/VE	0,87	22,5	0,39	20,1	0,44	19,1	0,48	52,2	0,57	26,6
	EL/PL	0,53	30,2	0,61	11,7	0,65	12,9	0,55	28,8	0,49	46,2
	VE/V + VP	0,28	20,4	0,35	20,9	0,34	17,5	0,22	40,0	0,13	18,0
DEP1 (‰/sec) bei BEL -	t = 0	142,0	24,5	85,0	27,2	121,0	10,6	178,0	12,8	291,0	11,1
	t = 5	0,071	15,2	0,056	23,5	0,089	16,3	0,144	11,4	0,153	7,4
	t = 10	0,034	13,3	0,031	21,8	0,054	25,4	0,072	10,6	0,087	11,7
DEP1 (‰/sec) bei ENTL +	(3600) 0	62,30	14,1	61,40	22,5	73,10	27,0	76,80	13,7	62,10	10,7
	5	0,016	19,8	0,050	22,6	0,023	27,3	0,024	10,0	0,019	12,9
	10	0,009	12,4	0,006	31,8	0,015	34,6	0,015	12,4	0,010	20,0
R (-)	10	0,08	63,7	0,18	26,3	0,19	19,3	0,14	24,0	0,32	12,7
	500	0,10	38,2	0,23	20,8	0,24	16,7	0,25	20,0	0,38	10,5
	1'200	0,11	42,1	0,26	20,2	0,29	14,2	0,30	13,5	0,43	8,4
	2'400	0,14	49,0	0,28	18,2	0,31	11,6	0,31	11,6	0,46	8,8
	3'599	0,16	47,0	0,29	10,9	0,32	12,3	0,33	10,3	0,48	11,3

Tab. A14: MKV Monoaxiale Kriechversuche an Prüfkörpern PK 1012 der Mischungen M1 bis M5, AB 16.

* Signaturen nach Abbildung 108.

4-PKT-B		4-Punkt-Biegung DWW/NL, Wechsellast $a_x \approx 150 \cdot 10^{-6} \text{ m}$				
E^* (N/mm ²)		Mischungen				
T (°C)	f	M1	M2	M3	M4	M5
20	5	6'360	6'351	5'480	4'308	4'415
		5'837	6'005	5'458	4'364	4'323
		6'098	6'178	5'469	4'336	4'369
	10	7'077	7'012	6'179	5'090	5'036
		6'417	6'634	6'290	5'104	4'882
		6'747	6'868	6'234	5'097	4'959
	20	7'670	7'680	7'060	5'690	5'520
		6'960	7'360	6'910	5'730	5'530
		7'315	7'371	6'985	5'710	5'530
	30	8'110	8'070	7'180	6'040	5'950
		7'080	7'550	7'100	6'200	6'000
		7'595	7'810	7'140	6'120	5'975
G^* (N/mm ²)		$G^* = E^*/2(1+\nu) = E^*/2,7$ für $\nu = 0,35$				
T (°C)	f	M1	M2	M3	M4	M5
20	5	2'258	2'288	2'025	1'605	1'618
	10 (PK-BSA)	2'498 (1'508)	2'543 (1'852)	2'308 (2'035)	1'888 (1'628)	1'837 (1'215)
	20	2'709	2'730	2'587	2'114	2'046
	30	2'812	2'892	2'644	2'267	2'212

Tab. A15: Prüfverfahren 4-Punkt-Biegung an Prismen, hergestellt durch Walzverdichtung W nach Tab. A10, Mischungen M1 bis M5, AB 16. Wechsellast, Auslenkung $a_x \approx 150 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

PK-BSA		G* (N/mm ²), CV (%) der PK 1506 S/V/W, AB 16, Mischungen M1 bis M5														
Mischungen		M1			M2			M3			M4			M5		
T (°C)	f	S	V	W	S	V	W	S	V	W	S	V	W	S	V	W
-20	10	-	-	3' 725 8,5	-	-	3' 830 7,5	4' 590 9,3	-	4' 670 10,5	-	-	4' 826 8,4	-	-	3' 826 9,8
	1	-	-	3' 561 8,8	-	-	3' 611 6,9	4' 410 8,5	-	4' 321 10,5	-	-	4' 341 11,2	-	-	3' 577 8,1
	0,1	-	-	3' 293 9,6	-	-	3' 201 5,8	4' 070 10,2	-	3' 936 9,5	-	-	3' 780 9,4	-	-	3' 112 8,4
	0,01	-	-	2' 917 10,3	-	-	2' 954 9,6	3' 605 13,8	-	3' 417 10,5	-	-	3' 319 10,2	-	-	2' 738 12,1
0	10	3' 279 15,3	2' 918 10,4	2' 820 6,2	4' 015 11,5	3' 775 12,0	3' 292 8,7	4' 136 12,4	3' 516 11,6	3' 640 11,1	3' 745 8,9	3' 333 10,4	3' 520 9,6	3' 942 10,8	3' 870 6,0	3' 191 8,5
	1	2' 348 12,7	2' 170 12,3	1' 973 7,1	3' 124 9,7	2' 840 9,4	2' 530 9,3	3' 580 10,0	3' 114 11,1	3' 293 10,6	3' 285 11,5	3' 022 12,1	2' 891 11,4	2' 719 13,5	2' 501 12,4	2' 447 11,2
	0,1	1' 781 12,0	1' 585 10,2	1' 550 9,8	2' 476 12,0	2' 402 13,2	2' 004 9,0	3' 203 11,0	3' 107 14,4	2' 691 11,1	2' 368 13,7	2' 060 13,8	1' 942 12,6	2' 025 14,6	1' 903 14,3	1' 620 13,6
	0,01	1' 353 23,3	1' 190 16,0	1' 096 10,9	1' 754 7,8	1' 631 13,5	1' 475 7,3	2' 149 10,8	1' 977 10,3	1' 870 8,8	1' 621 8,9	1' 588 16,6	1' 475 15,3	1' 410 18,4	1' 275 16,2	1' 055 19,0
20	10	1' 714 10,2	1' 457 9,3	1' 508 6,6	2' 230 7,5	2' 118 9,3	1' 852 10,9	2' 576 15,6	2' 138 15,4	2' 035 8,2	2' 084 11,1	1' 735 14,0	1' 628 11,8	1' 413 13,5	1' 342 12,7	1' 215 12,1
	1	1' 259 8,9	1' 095 11,3	982 9,2	1' 383 9,6	1' 272 10,6	1' 134 7,3	1' 543 8,9	1' 327 17,0	1' 265 9,4	991 10,3	907 12,8	771 11,2	579 8,8	527 12,5	539 15,8
	0,1	612,0 9,2	551,0 12,0	502,0 11,2	694,0 15,0	618,0 9,4	611,0 11,4	862,0 8,5	771,0 12,3	714,0 15,5	564,0 12,3	485,0 17,1	436,0 12,2	297,2 15,2	246,3 15,5	255,0 19,2
	0,01	284,0 21,7	266,5 18,5	244,0 13,6	342,0 17,8	287,0 15,1	277,0 10,6	437,0 9,9	408,0 17,8	355,0 26,8	202,5 20,4	172,3 18,2	163,0 17,2	63,5 15,1	59,1 10,1	56,5 12,1
40	10	550,5 10,3	479,0 9,6	506,0 9,1	677,0 10,4	637,0 5,9	603,3 10,8	870,0 11,9	785,0 6,3	731,0 11,2	482,0 8,2	427,0 11,2	381,0 11,3	216,2 11,4	188,2 19,5	199,0 17,6
	1	241,0 14,3	198,8 13,4	208,0 8,7	388,0 14,3	341,0 9,0	314,0 11,0	319,5 8,4	301,0 16,0	271,0 13,6	165,2 17,3	138,5 14,9	134,5 14,0	60,6 14,4	58,2 13,3	51,5 13,2
	0,1	65,6 17,6	63,1 8,8	54,2 11,9	129,0 12,8	118,5 10,0	111,0 17,9	127,5 14,8	105,2 15,4	103,0 14,8	66,1 14,6	59,3 20,2	50,2 18,3	≈5 -	≈5 -	≈5 -
	0,01	15,8 25,0	12,1 21,5	12,6 14,1	47,8 15,9	42,4 12,5	43,6 15,0	34,6 12,3	28,3 19,2	30,6 15,8	18,8 23,7	20,2 18,2	14,1 25,8	≈1 -	≈1 -	≈1 -
60	10	-	-	78,3 21,0	-	-	14,2 10,8	118,5 15,9	-	113,0 13,1	-	-	52,3 19,7	-	-	24,5 13,2
	1	-	-	13,5 20,7	-	-	53,0 9,1	39,3 11,3	-	23,1 12,0	-	-	12,3 14,1	-	-	≈10 -
	0,1	-	-	≈5 -	-	-	20,6 21,4	11,3 21,2	-	≈10 -	-	-	≈2 -	-	-	≈1 -
	0,01	-	-	≈1 -	-	-	≈7 -	-	-	-	≈1 -	-	-	-	-	-

Tab. A16

PK-BSA, G*, komplexer Schubmodul, Mittelwerte und Variationskoeffizienten der Prüfkörper S/V/W, n = 5, Mischungen M1 bis M5, AB 16. (S = Schlagverdichtung, V = Vibroverdichtung, W = Walzverdichtung), a_F = Amplitude, Kraft bei sinusförmiger Wechselbelastung.

PK-BSA		ϕ_{F-x} ($^{\circ}B$), CV (%) der PK 1506 S/V/W, AB 16, Mischungen M1 bis M5														
Mischungen		M1			M2			M3			M4			M5		
T ($^{\circ}C$)	f (s^{-1})	S	V	W	S	V	W	S	V	W	S	V	W	S	V	W
-20	10			1,7 0,4			1,6 0,4			2,3 0,3			2,8 0,6			2,9 0,4
	1			2,0 0,6			2,0 0,7			2,5 0,3			3,1 0,5			3,5 0,5
	0,1			2,1 0,6			3,2 0,7			3,1 0,3			4,4 0,6			5,0 0,8
	0,01			2,2 0,6			5,0 1,1			5,8 0,8			7,1 0,9			7,7 0,6
0	10	1,7 0,3	5,5 0,3	3,2 0,7	3,0 0,5	5,1 0,4	3,3 0,5	3,9 0,4	5,2 0,4	3,3 0,4	4,6 0,5	5,4 0,5	3,3 0,6	5,5 0,6	4,5 0,8	4,0 0,7
	1	2,2 -	5,7 -	4,6 0,9	3,5 -	6,5 -	4,8 0,8	5,0 -	6,2 -	4,0 0,5	5,5 -	6,4 -	4,8 1,2	7,3 -	6,1 -	5,2 0,6
	0,1	4,0 -	8,0 -	6,3 1,2	6,2 -	7,8 -	7,4 1,3	6,9 -	8,8 -	5,3 0,5	7,6 -	8,4 -	7,0 1,6	9,8 -	8,0 -	8,2 1,0
	0,01	8,0 -		12,2 1,5	11,6 -		12,2 2,0	11,6 -		8,5 1,5	12,6 -		11,8 2,2	15,5 -	12,5 -	13,8 1,5
20	10	7,5 0,7	13,8 1,8	11,1 2,0	10,2 1,5	11,5 1,3	14,5 2,5	9,1 1,1	11,6 1,3	11,0 1,5	10,0 1,0	10,1 1,4	15,4 2,7	12,1 1,6	12,8 1,5	15,4 1,3
	1	10,1 -	19,3 -	16,5 1,7	14,1 -	15,6 -	20,8 2,9	12,0 -	14,8 -	17,1 1,9	13,6 -	18,1 -	23,5 2,4	19,5 -	22,0 -	23,7 2,5
	0,1	18,4 -	26,8 -	23,0 4,7	21,8 -	22,3 -	30,1 2,9	18,5 -	19,9 -	22,9 2,5	20,6 -	27,5 -	29,1 2,3	25,8 -	28,2 -	30,1 2,7
	0,01	28,1 -		29,1 3,7	30,5 -		39,1 2,6	26,2 -		30,9 2,0	29,5 -		39,5 2,0	35,2 -		40,5 2,1
40	10	28,0 -	33,5 -	33,0 4,5	31,2 -	36,8 -	38,1 3,5	22,7 -	33,9 -	32,0 2,3	29,1 -	30,6 -	35,0 3,9	29,6 -	30,2 -	39,1 2,9
	1	32,8 -	38,4 -	41,1 6,1	33,1 -	38,5 -	42,1 3,5	29,1 -	34,6 -	33,1 2,3	37,0 -	38,4 -	42,1 3,9	35,4 -	38,5 -	45,5 2,3
	0,1	36,1 -	45,2 -	43,5 6,7	34,2 -	46,7 -	46,5 2,8	34,7 -	43,3 -	41,0 2,4	42,2 -	43,8 -	48,0 2,3	41,2 -	44,0 -	49,1 3,6
	0,01	37,8 -		44,6 7,5	32,6 -		47,0 2,8	36,5 -		43,2 2,8	44,8 -		54,2 4,0	45,0 -		56,0 2,3
60	10			51,0 7,7			49,0 2,4			40,1 3,5			43,6 3,6			48,0 3,4
	1			52,8 3,7			56,0 2,5			43,5 4,0			48,4 2,7			~5,4 4,1
	0,1			52,9 7,1			51,1 3,2			46,8 3,7			57,0 3,0			~56,0 ~3,0
	0,01			55,0 8,1			52,0 3,2			48,1 6,2						

Tab. A17: PK-BSA, ϕ_{F-x} , σ_{ϕ} der Prüfkörper PK 1506 S/V/W, AB 16, Mischungen M1 bis M5, - bedeutet Nachmessung (nur Einzelwert) nach erfolgter Programmentwicklung Phasenmessungen nach [119]. Vorgängig Phasenmessung über Phasenmessgerät nur für $f > 1$ (s^{-1}).

G* (%) T. Herst.	G* (%) / S = 100 % PK 1506 S/V/W				f = 10 (s ⁻¹)			f = 1 (s ⁻¹)			f = 0,1 (s ⁻¹)			f = 0,01 (s ⁻¹)							
	An- zahl n	HÖGE MW Vol.-%	RODI MW g/cm ³	VG MW	G* (%) bei T (°C)			G* (%) von S bei T (°C)			G* (%) von S bei T (°C)			G* (%) von S bei T (°C)							
M1	S	9,6	2,2	2,300	100,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	V	8,4	4,1	2,314	101,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	W	9,2	5,4	2,294	100,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
M2	S	5,5	6,3	2,355	100,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	V	5,1	2,6	2,364	100,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	W	5,7	6,4	2,349	99,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
M3	S	3,0	5,1	2,382	100,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	V	3,8	3,8	2,384	100,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	W	4,1	4,6	2,376	99,8	102	88	79	84	95	98	92	82	85	84	97	84	83	81	87	
M4	S	3,5	5,7	2,386	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	V	3,8	6,1	2,372	99,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	W	4,2	8,1	2,363	99,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
M5	S	2,2	9,1	2,402	100,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	V	2,3	4,8	2,385	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	W	2,1	3,6	2,395	100,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
MW G* (%)	MW G* (%)																				
	S 100,0																				
	V 89,1																				
G* (%)	M1 bis M5																				
	W 84,2																				
	MW G* (%)																				
S 100,0	M2 bis M4																				
	V 88,7																				
	W 84,3																				
T 0...40	Temperatur																				
f 10...0,01	T(°C)	-20	0	20	40	*	-20	0	20	40	*	-20	0	20	40	*	-20	0	20	40	*

) Mittelwerte G (%) für T = 0...40°C.

Tab. A18: G* (%) der Prüfkörper PK 1506 V (hergestellt durch Vibroverdichtung) und der Prüfkörper PK 1506 W (hergestellt durch Walzverdichtung), bezogen auf G* der Prüfkörper PK 1506 S (hergestellt durch Schlagverdichtung), G* (%) S = 100 %.

ZTSP	G* PK-BSA	AB 16, Mischungen M1 bis M5				
Kennwert	T (°C)	M1	M2	M3	M4	M5
log a _T gemäss [119]	von -20					
	nach -10	2,311	0,967	0,964	1,095	0,979
	0	3,568	2,220	2,194	2,566	2,230
	10	4,745	3,563	3,778	4,079	3,385
	20	5,618	4,526	5,104	5,341	4,967
	40	7,684	6,497	7,188	7,499	7,087
	60	9,546	8,276	9,091	9,486	8,463
log G* _∞	-	3,590	3,766	3,820	3,863	3,672
C ₁	-	-18,3	1'099,0	62,9	573,0	128,1
C ₂	-	80,4	10'206,0	-589,7	4'644,0	-1'193,0
G* _∞	(N/mm ²)	3'890	5'834	6'607	7'295	4'699
ZTSP	G' PK-BSA	Ab 16, Mischungen M1 bis M5				
Kennwert	T (°C)	M1	M2	M3	M4	M5
log a _T gemäss [119]	von -20					
	nach -10	2,311	0,968	0,958	1,085	0,974
	0	3,567	2,213	2,176	2,539	2,208
	10	4,752	3,595	3,783	4,083	3,392
	20	5,648	4,586	5,114	5,362	4,982
	40	7,865	6,632	7,308	7,549	7,156
	60	9,788	8,474	9,220	9,465	8,737
log G' _∞	-	3,590	3,803	3,825	3,778	3,659
C ₁	-	-19,5	218,6	52,2	327,9	78,0
C ₂	-	87,1	-2'040,7	-494,8	-2'679,0	-739,0
G' _∞	(N/mm ²)	3'890	6'353	6'683	5'998	4'560

Tab. A19: ZTSP, Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzip. Versuch einer Anwendung auf die im Parameterfeld Temperatur/Frequenz (T/f) ermittelten komplexen Schubmoduln G* aus dem Prüfverfahren PK-BSA an Prüfkörpern PK 1506 W. Berechnungen nach [119] unter Einsetzen der Moduln G' und G". WLF-Kenngrößen der Moduln G* und G' für Masterkurven bezogen auf T = -20°C.

Bindemittel, Zusammensetzung und Marshall-Versuch									
Kennwerte	Einheit	AB 10		AB 25		AB 16/2		HMT 40s	
<u>Bindemittel</u>	Sorte	B 60/70		B 60/70		B 80/100		B 60/70	
Dichte	g/cm ³	1,030		1,030		1,022		1,030	
Pen	1/10 mm	67		67		96		64	
R.u.K.	°C	50,6		50,6		48,6		51,7	
T _{BP}	°C	-		-		-21		-	
PI	-	-		-		+0,2		-	
<u>Zusammensetzung</u>									
- Bindemittel- gehalt	Masse-%	5,6		4,4		4,5		3,8	
- Korngrößen- verteilung	Sieb mm								
	40	-		-		-		100,0	
	32	-		100,0		-		89,0	
	25	-		95,8		100,0		67,7	
	16	100,0		71,0		99,1		51,4	
Durchgang in	10	91,6		52,9		66,4		43,9	
Masse-% bei	6,3	70,6		40,2		55,1		37,1	
	3,15	52,4		32,9		39,4		29,6	
	1,60	36,0		21,6		25,9		20,3	
	0,63	25,0		14,9		18,8		14,9	
	0,315	17,6		11,2		14,5		11,7	
	0,160	12,0		8,9		10,4		9,1	
	0,080	8,0		6,8		7,0		6,6	
<u>Marshall-Ver- such</u>									
	PK	1006	1510	1006	1510	1006	1510	1006	1510
DI	g/cm ³	2,447	2,447	2,512	2,512	2,523	2,523	2,516	2,516
RODI (RM)	g/cm ³	2,387	2,386	2,401	2,431	2,361	2,372	2,417	2,433
HOGE (HM)	Vol.-%	3,6	3,7	4,3	3,2	6,4	6,0	4,0	3,3
SM	kN	18,7	47,0	14,1	41,7	10,5	-	17,1	36,3
FM	mm	3,3	4,0	3,6	4,0	3,3	-	3,4	3,3
SM/FM	kN/mm	5,7	11,7	4,0	10,4	4,6	-	5,1	10,9

Tab. A20: Zusammensetzung und Bindemittelleigenschaften der Mischgutsorten AB 10 und AB 25 des zweischichtigen Belagsaufbaues sowie der Mischgutsorten AB 16/2 und der HMT 40s.

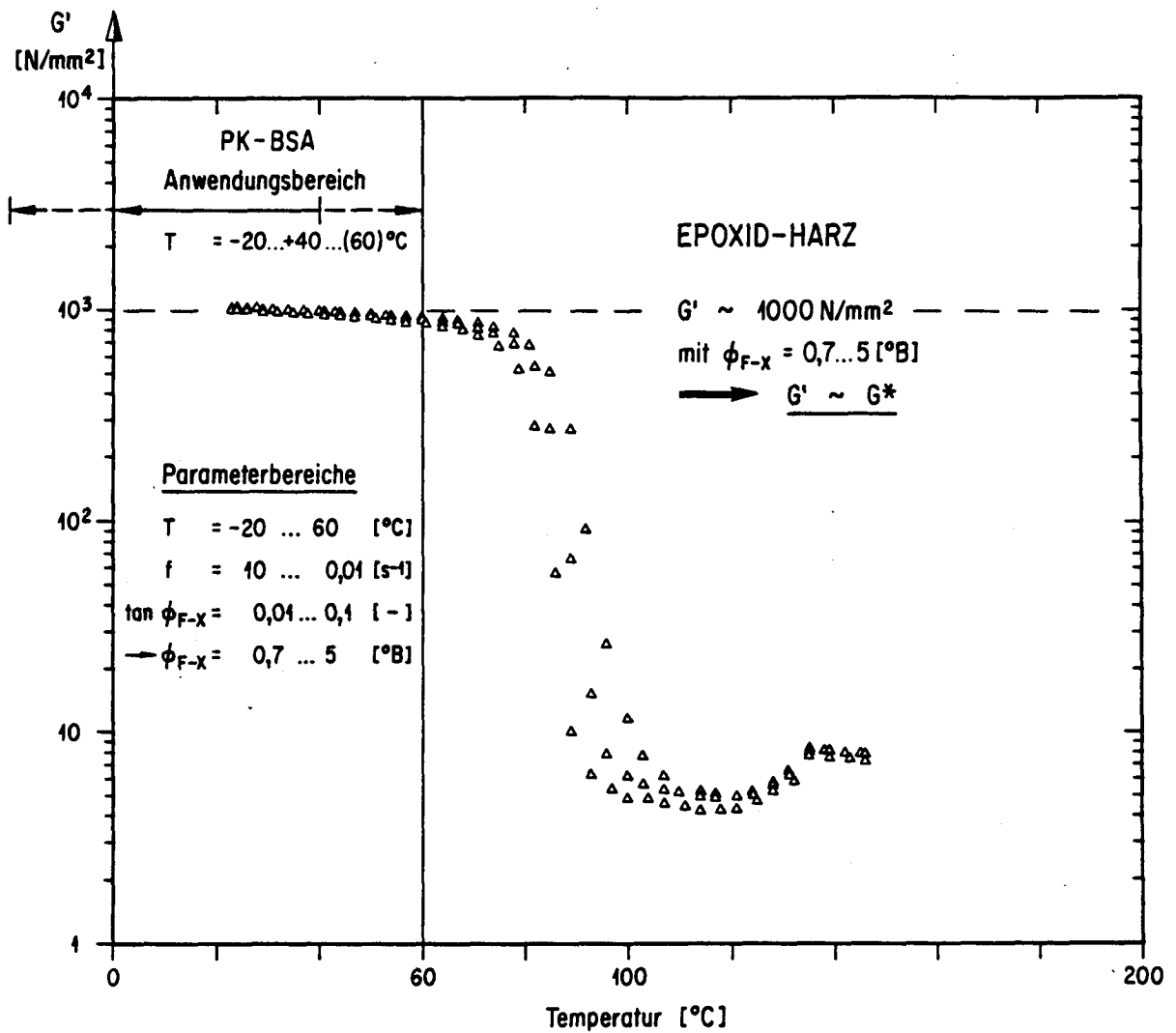
PK-BSA		Verschiebungen DY_v und DY_{BER} am zweischichtigen Aufbau AB 10/AB 25 infolge $F_{ST} = 2'000$ N, bei $T = 20^\circ C$, $f = 10^{-1}$ s											In % bezügl. Lastfall 2 ● ($\equiv 100$ %)				
BK	FE Ber.	R ₀	R ₁	R ₂	R ₃	h ₁	h ₂	h	DY_{vo}	ΔDY_{SYST}	DY_v	DY_{BER}	E_1^*	E_2^*	Lastfall	DY_v (%)	DY_{BER} (%)
Nr.	Nr.	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	$\cdot 10^{-3}$ mm	$\cdot 10^{-3}$ mm	$\cdot 10^{-3}$ mm	$\cdot 10^{-3}$ mm	N/mm ²	N/mm ²	Nr. Sig.	%	%
2010/1	1	23,5	26	102	104	40	60	100	8,73	2,4	5,40	5,017	2'740	3'165	1 ▲	121,8	96,5
2010/2									6,88		4,48	5,484	2'535	3'253	2 ●	103,9	→100,0
2010/3									4,38		1,98	2,238	2'740	3'165	1 ▲	83,3	94,1
2010/4	2	50,5	53	102	104	40	60	100	4,34	2,4	1,94	→2,378	2'420	3'253	2 ●	81,6	→100,0
3010/1									4,30		1,90	2,446	2'510	2'890	3 ■	79,9	102,9
3010/2									9,70		7,60	7,444	2'740	3'165	1 ▲	104,8	102,6
3010/3	3	23,5	26	146	151	28	72	100	8,15	2,1	6,80	→7,253	2'740	3'495	2 ●	93,8	→100,0
3010/4									8,25		6,05	8,132	2'510	2'890	3 ■	83,4	112,1
3010/5									6,72		4,62	4,105	2'740	3'165	1 ▲	112,1	99,6
3010/6									6,98		4,88	→4,120	2'790	2'951	2 ●	118,5	→100,0
3010/7	4	50,5	53	146	151	28	72	100	6,20	2,1	4,55	4,485	2'510	2'890	3 ■	99,5	108,9
3010/8									6,68		4,68					113,6	

Tab. A21:

PK-BSA, Untersuchungen eines zweischichtigen Belagaufbaues mit den Mischgutsorten AB 10 und AB 25. Berechnete Verschiebungen DY_{BER} (unter Einsatz der an den Einzelschichten bestimmten komplexen Moduln G^* resp E^*) und im Versuch gemessene Verschiebungen DY_v der zweischichtigen Bohrkern unterschiedlicher Abmessungen. Beschreibung der Lastfälle 1, 2 und 3 siehe Abschnitt 18.3, Abbildung 125.

CV _m , Mittlere Variationskoeffizienten verschiedener Materialkennwerte (mittlere CV aus fünf Prüfkörpern der Mischungen M1 bis M5, AB 16)					
Prüfverfahren	Prüfkörper PK	Kennwert	CV _m (%)	0 10 % 20 30	
MV - Marshall-Versuch T = 60°C v _x = 50 mm/min	1006	SM ————	9,4		
	1006	FM - - - - -	11,7		
	1510	SM ————	12,3		
	1510	FM - - - - -	14,0		
SPV - Spaltzugversuch T = -10°C v _x = 50 mm/min	1006	c _{BR} ————	5,5		
	1006	x _{BR} - - - - -	6,8		
	1012	c _{BR} ————	4,9		
	1012	x _{BR} - - - - -	7,9		
	1510	c _{BR} ————	4,5		
	1510	x _{BR} - - - - -	5,5		
	1512	c _{BR} ————	3,6		
	1512	x _{BR} - - - - -	6,0		
MDV - Monoaxialer Druckversuch T = 40°C v _x = 0,5 mm/min	1012	S _{BR} ————	12,7		
	1012	e _{BR} - - - - -	8,8		
	1012	S _{2BR} ————	9,7		
	1012	e _{2BR} - - - - -	9,9		
	T = 40°C v _x = 5 mm/min	1012	S _{BR} ————		12,2
		1012	e _{BR} - - - - -		7,6
		1012	S _{2BR} ————		10,6
		1012	e _{2BR} - - - - -		10,4
T = 40 °C v _x = 50 mm/min	1012	S _{BR} ————	16,4		
	1012	e _{BR} - - - - -	12,9		
	1012	S _{2BR} ————	14,0		
	1012	e _{2BR} - - - - -	10,0		
MKV - Monoaxialer Kriechversuch T = 40°C	1012	MO ST t = 0	18,9		
	1012	t = 1'200	7,6		
	1012	t = 2'400	7,7		
	1012	t = 3'600	8,0		
	1012	Verf. Ant. E ₀	19,2		
	1012	● EL	21,5		
	1012	■ PL	22,3		
	1012	▼ VE	20,6		
	1012	◆ V + VP	8,2		
	PK-BSA - Biege-Schub-Axial T = -20°C	1506 W	G* f = 10,0 s ⁻¹		8,9
1506 W		f = 1,0 s ⁻¹	9,9		
1506 W		f = 0,1 s ⁻¹	8,5		
1506 W		f = 0,01 s ⁻¹	10,5		
T = 0°C		1506 W	G* f = 10,0 s ⁻¹	8,8	
		1506 W	f = 1,0 s ⁻¹	9,9	
		1506 W	f = 0,1 s ⁻¹	11,2	
		1506 W	f = 0,01 s ⁻¹	12,3	
T = 20°C		1506 W	G* f = 10,0 s ⁻¹	9,9	
		1506 W	f = 1,0 s ⁻¹	10,6	
		1506 W	f = 0,1 s ⁻¹	13,9	
		1506 W	f = 0,01 s ⁻¹	16,1	
T = 40°C	1506 W	G* f = 10,0 s ⁻¹	12,0		
	1506 W	f = 1,0 s ⁻¹	12,1		
	1506 W	f = 0,1 s ⁻¹	15,7		
	1506 W	f = 0,01 s ⁻¹	17,7		
T = 60°C	1506 W	G* f = 10,0 s ⁻¹	15,6		
	1506 W	f = 1,0 s ⁻¹	14,0		
	1506 W	f = 0,1 s ⁻¹	21,4		
	1506 W	f = 0,01 s ⁻¹	--		

Tab. A22: AB 16, Mischungen M1 bis M5; CV_m Mittelwerte der Variationskoeffizienten verschiedener Materialkennwerte. Mittelwerte gebildet über die Mischungen M1 bis M5. Vergleichende Darstellung der mittleren Variationskoeffizienten aus den Untersuchungen in verschiedenen Prüfverfahren.



Tab. A23: Schubmodul G' des für die Verklebung der Prüfkörper im Prüfverfahren PK-BSA verwendeten Epoxidharzes. Experimentelle Überprüfung des nach Angaben des Herstellers im Temperaturbereich von $-20 \dots +60^\circ\text{C}$ annähernd konstanten Schubmoduls.

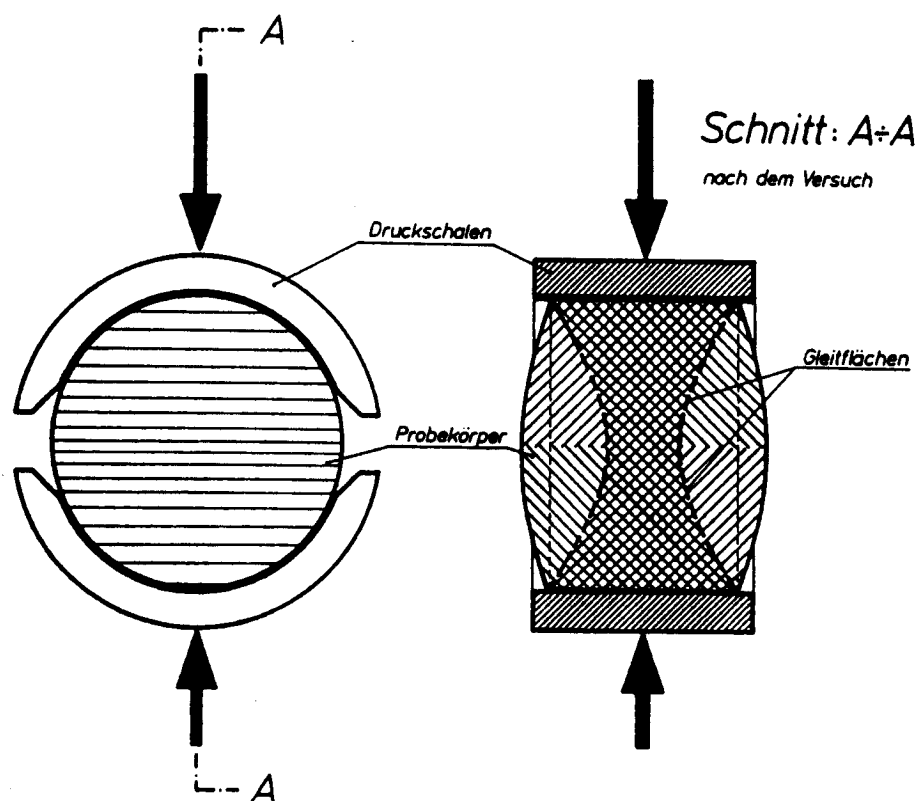
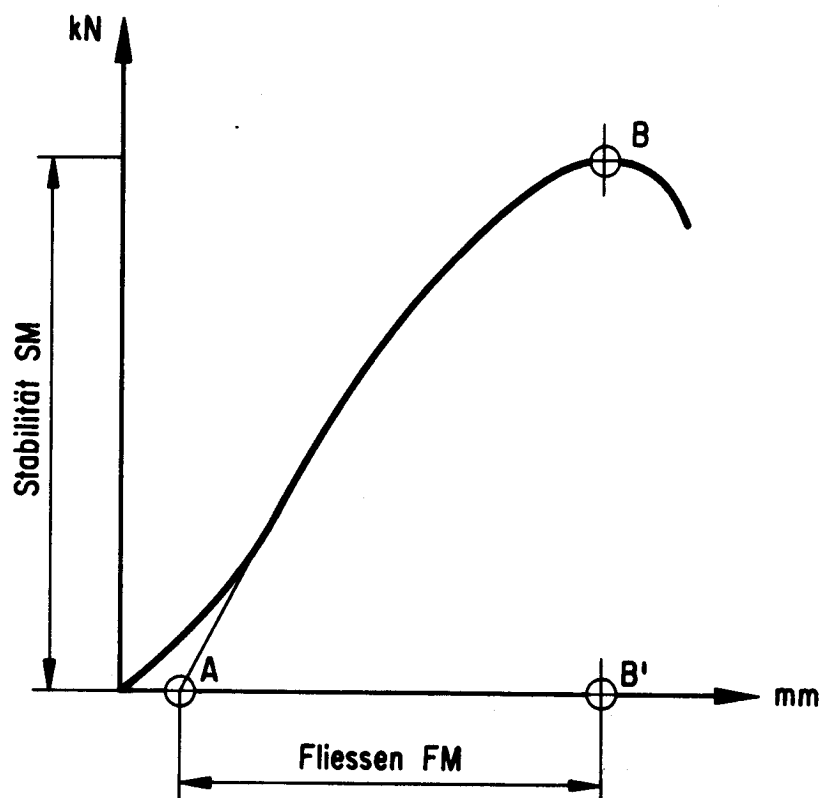


Abb. A24: Marshall-Versuch nach [112].

Oben: Schematische Kraft-Verformungskurve

Unten: Bruchvorgang im Marshall-Prüfkörper

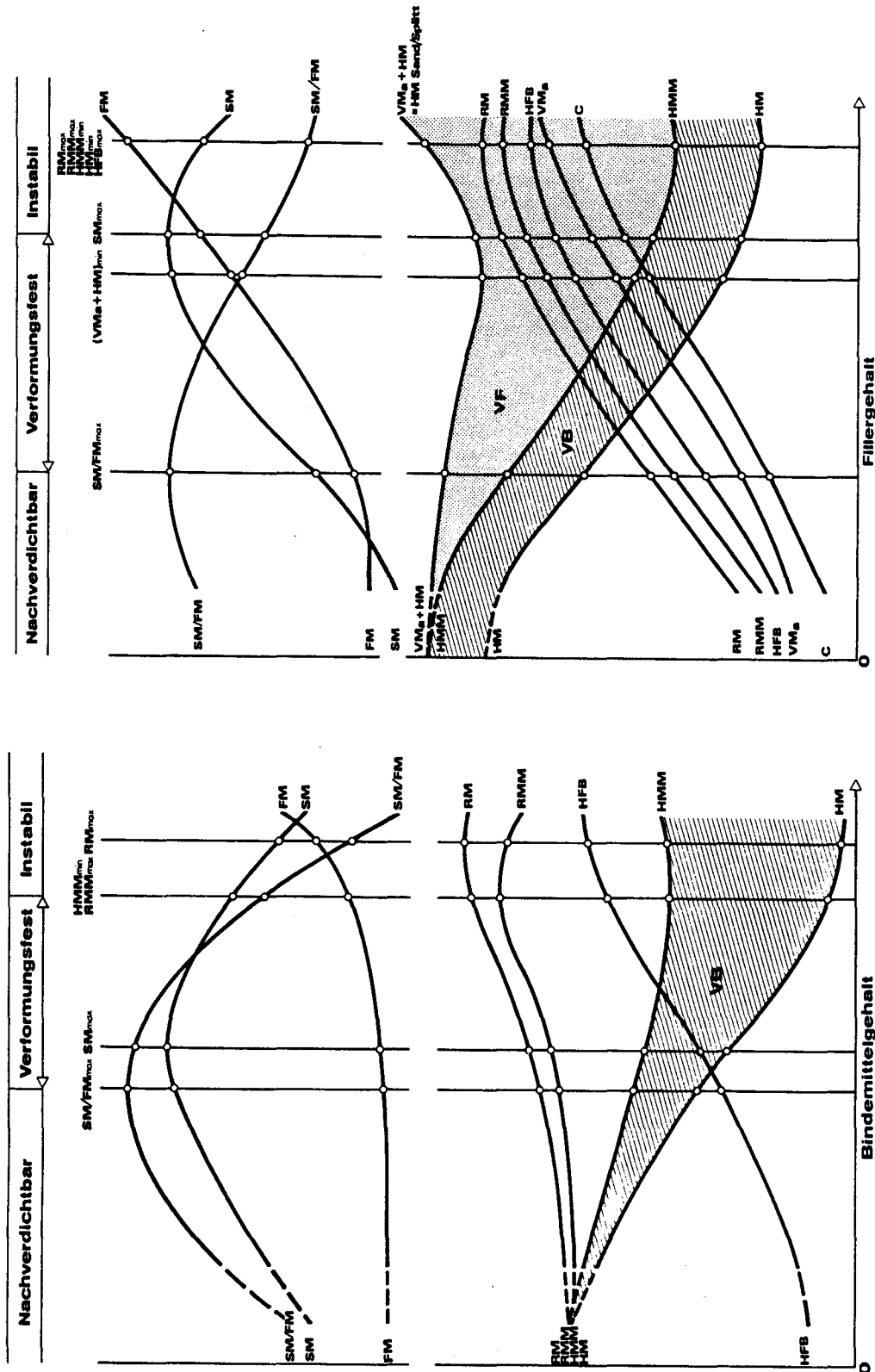


Abb. A25: KW-FE = Kennwerte der Festigkeit nach Marshall und KW-VOL = Kennwerte der Volumetrie nach Marshall [44].

Prinzipskizze links: Zusammenhänge in Funktion des Bindemittelgehaltes.
 Prinzipskizze rechts: Zusammenhänge in Funktion des Füllergehaltes.

$$VB = \frac{BIGE \cdot RM}{DIBI}$$

$$VF = \frac{FIGE \cdot RMM}{DIFI} = \frac{FIGE \cdot RM \left(1 - \frac{BIGE}{100}\right)}{DIFI}$$

$$HM = \left(1 - \frac{RM}{DIMI}\right) \cdot 100$$

$$HFB = \frac{VB \cdot 100}{VB + HM} = \frac{(VB)}{HMM} \cdot 100$$

$$\begin{aligned} HMM &= VB + HM = \left(\frac{BIGE \cdot RM}{DIBI} + \left(1 - \frac{RM}{DIMI}\right) \cdot 100\right) \\ &= \left(1 - \frac{RMM}{ROMI}\right) \cdot 100 \end{aligned}$$

$$RMM = RM \cdot \left(1 - \frac{BIGE}{100}\right)$$

$$C = \frac{VF}{VF + VB}$$

$$VMa = VF + VB$$

$$HFMa = \frac{VMa}{VMa + HM}$$

Tab. A26: KW-VOL, Kennwerte der Volumetrie und Rohdichte, Berechnungsformeln.

MW Mittelwerte Mehrstufenversuche PV PK-BSA	Temperatur T (°C)	t-Test auf 95 %-Niveau		Wilcoxon-Test auf 95 %-Niveau	
		Testgrößen t	MW Mittelwerte sind	MW Mittelwerte sind	Irrtumswahrscheinlichkeit für "verschieden"
Vergleich MW	T				
A1/C1 (Tab. 25)	0 20 40 60	0,41 < 1,86 0,43 < 1,86 0,51 < 1,86 0,77 < 1,86	gleich gleich gleich gleich		
B1/C1 (Tab. 25)	20 0 -20	2,24 > 1,86 1,95 < 1,86 0,39 < 1,86	verschieden verschieden gleich		
A2/C2 (Tab. 26)	20 40	2,23 > 1,86 0,15 < 1,86	verschieden gleich	gleich	8,7 %
$A2 / \left(\frac{C2+B2}{2} \right)$	40	0,63 < 1,86	gleich	gleich	32,0 %
B2/C2 (Tab. 26)	20 0	2,45 > 1,86 0,92 < 1,86	verschieden gleich	verschieden	1,4 %
$B2 / \left(\frac{A2+C2}{2} \right)$	0			gleich	31,2 %

Tab. A27: Mehrstufenversuche mit dem Prüfverfahren PK-BSA. Testversuche gemäss Tabellen 25, 26. Mittelwert- und Stichprobenvergleiche für kleine Stichprobenumfänge.

AN H A N G . I I I

SYMBOLS UND ABKÜRZUNGEN

S Y M B O L E U N D A B K Ü R Z U N G E N

PHYSIKALISCHE GRÖSSEN

<u>Symbol</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
F	N	Kraft
FL	N/mm	Kraft pro Streifenbreite längs
FQ	N/mm	Kraft pro Streifenbreite quer
F _{ST}	N	Kraft auf Belastungsstempel
a _F	N	Kraftamplitude
x	mm	Weg, Verschiebung
\vec{x}	mm/s	Verschiebungsgeschwindigkeit
a _x , A _x	mm	Wegamplitude
a _h	mm	Wegamplitude (Halbwelle)
l	mm	Länge
l ₀	mm	Anfangslänge, Einspannlänge
b	mm	Breite
h	mm	Höhe
d	mm	Durchmesser
r, R	mm	Radius
A ₀	mm	Anfangsrissöffnung geschlossen (o)
AR	mm	Anfangsrissöffnung
MR	mm	Maximale Rissöffnung
DY	mm	Verschiebung des Belastungsstempels im Prüfverfahren PK-BSA
DY _v	mm	Gemessene, im Experiment (Versuch) bestimmte Verschiebung
DY _{BER}	mm	Berechnete Verschiebung
DY _M	mm	Berechnete Verschiebung am Modellkörper
DY _{GRA}	mm	Graphisch ermittelte Verschiebung des Belastungsstempels, basierend auf Berechnungen an Modellkörpern

<u>Symbol</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
A	mm ²	Querschnittsfläche Prüfkörper
M	mm ²	Mantelfläche Prüfkörper (Zylinder)
FOFA	-	Formfaktor, A/M
ϵ ; EP	0/00	Verformung
ϵ_1 ; EP1	0/00	Verformung axial
ϵ_2 ; EP2	0/00	Verformung radial
ϵ_l	0/00	Verformung längs
ϵ_q	0/00	Verformung quer
$\dot{\epsilon}_1$; DEP1		Verformungsgeschwindigkeit axial
$\dot{\epsilon}_2$; DEP2		Verformungsgeschwindigkeit radial
ϵ_{IR} ; EP1R	0/00	Reversible Verformung
ϵ_{IIRR} ; EP1IRR	0/00	Irreversible (bleibende) Verformung
ν ; R	-	Querdehnungszahl (Poissonzahl) $\nu = - \epsilon_2 / \epsilon_1$
γ	-	Schiebung
σ	N/mm ²	Spannung
σ_z	N/mm ²	Zugspannung
σ_R	N/mm ²	Zugspannung am Riss
τ	N/mm ²	Schubspannung
c	N/mm ²	Kohäsion
p	MPa	Flüssigkeitsdruck
Prel	MPa	relativer Druck (1 MPa \equiv 10 bar)
Pa, Pabs	MPa	absoluter Druck (1 Pa \equiv 1 N/m ²)
ϕ	°B	Phasenverschiebung
tg ϕ	-	Verlustfaktor
ω	s ⁻¹ , Hz	Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2 \pi f$
π	-(3,1415..)	Kreiskonstante (2 $\pi \equiv$ 360°B)
f	s ⁻¹ , Hz	Kreisfrequenz, Drehzahl

<u>Symbol</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
E*	N/mm ²	Komplexer Elastizitätsmodul
E'	N/mm ²	Speichermodul
E''	N/mm ²	Verlustmodul
S _{mix;MOST}	N/mm ²	Steifigkeitsmodul der Mischung
S _{bit}	N/mm ²	Steifigkeitsmodul des Bindemittels
G	N/mm ²	Schubmodul
G*	N/mm ²	Komplexer Schubmodul
G'	N/mm ²	Speichermodul
G''	N/mm ²	Verlustmodul
G(%)	%	Schubmodul in % (z.B. Vergleichsgrösse, bezogen auf den Schubmodul der PK hergestellt durch Schlagverdichtung)
D _F	N/mm ²	Dauerdruckfestigkeit
η	Ns/m ² =1 Pa·s	Dynamische Viskosität
η'	Ns/m ²	Schwingungsviskosität, η' = G''/ω
ν	m ² /s	Kinematische (dichtebezogene) Viskosität ν = η/DIBI
n	-	Zyklenzahl
U _G	-	Umdrehungszahl des Gyrotors
t	s, min	Zeit (Dauer)
t ₀	s	Startzeit (Beginn)
t ₁	s	Belastungszeit
t ₂	s	Ganze Versuchsdauer
t _{BEL}	s	Belastungszeit (t ₁)
t _{ENTL}	s	Entlastungszeit (t ₂ - t ₁)
t _V	s	Verdichtungszeit (Vibroverdichtung)
v _{AS}	m/s	Schädigungsgeschwindigkeit
A _{AS}	Nm	Schädigungsarbeit

<u>Symbol</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
m	g	Masse
m_v	g (Masse-%)	Verlustmasse (Splittverlust)
m_R	g (Masse-%)	Rückstandsmasse (Siebrückstand)
m_D	g (Masse-%)	Durchgangsmasse (Siebdurchgang)
HFB	%	Hohlraumfüllungsgrad der Mineralstoffe mit Bindemittel
HFMa	%	Hohlraumfüllungsgrad des Mastix
DI MI	g/cm ³	Dichte Mischgut
DI FI	g/cm ³	Dichte Filler
RO DI	g/cm ³	Rohdichte Mischgut
DI BI	g/cm ³	Rohdichte Bindemittel
RMM	g/cm ³	Rohdichte der Mineralstoffe nach Marshall
RM	g/cm ³	Rohdichte Mischgut nach Marshall
RO MI	g/cm ³	Rohdichte der Mineralstoffe
HM	Vol.-%	Hohlraumgehalt nach Marshall
HO GE	Vol.-%	Hohlraumgehalt der verdichteten Mischung
HMM	Vol.-%	(Fiktiver) Hohlraumgehalt der Mineralstoffe im verdichteten Mischgut
BIVO, VB	Vol.-%	Volumen Bindemittel
VF	Vol.-%	Volumen Filler
VMa	Vol.-%	Volumen Mastix
BIGE	Masse-%, m-%	Bindemittelgehalt
FIGE	Masse-%, m-%	Fillergehalt
FIBI	-	Filler-Bindemittel-Verhältnis
C	-	Konzentration (Volumenverhältnis Filler/Mastix)
VG	%	Verdichtungsgrad nach Marshall
\ln	e ^x	x Logarithmus naturalis, zur Basis e (2,7182)
log	10 ^x	x Logarithmus zur Basis 10
i	-	Komplexe Zahl, $\sqrt{-1}$

EMPIRISCHE GRÖSSEN

<u>Symbol</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
x_s	mm	Stempeleindringtiefe
Pen	1/10 mm	Penetration (Nadel)
T_{RuK}	°C	Erweichungspunkt Ring und Kugel
PI	-	Penetrationsindex
T_{BP}	°C	Temperatur Brechpunkt (nach Fraas)
T_G	°C	Grenztemperatur (Ablaufen)
UG	%	Umhüllungsgrad
D	mm	Duktilität
E_v	°E	Viskosität nach Engler
STV	s	Viskosität STV (Strassenteerviskosimeter)
MDF	mm	Mechanische Durchschlagsfestigkeit
ST	kN	Stabilität
FL	mm	Fliesswert
ST/FL	kN/mm	Steifigkeit
SM	kN	Stabilität nach Marshall
FM	mm	Fliesswert nach Marshall
SM/FM	kN/mm	Steifigkeit nach Marshall
RF	%	Relative Luftfeuchte
C1, C2	-	WLF-Faktoren
C	42 Nm	Verdichtungsparameter für Mehrstufenschlagverdichtung
Z_{bit}	%	Zertrümmerungsgrad der Mineralstoffe beim Verdichten der bituminösen Mischung (Verhältnisse der Flächen unter der Siebsummenkurve der Korngrößenverteilung vor/nach Verdichtung)

ABKÜRZUNGEN

<u>Symbol</u>	<u>Bezeichnung</u>
EDI	Eidgenössisches Departement des Innern
EVED	Eidgenössisches Verkehrs- und Energiedepartement
ASB	Bundesamt für Strassenbau
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
EPFL	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne
RZETH	Rechenzentrum der ETH
ISETH	Institut für Strassen-Tunnel- und Eisenbahnbau, inkl. Felsmechanik der ETHZ (1935 - 1985), Teile davon jetzt IVT
IVT	Institut für Verkehrswesen und Transporttechnik
IGB	Institut für Grundbau und Bodenmechanik
LAVOC	Laboratoire des voies de circulation EPFL
TU	Technische Universität
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DWW/NL	Dienst Weg-en Waterbouwkunde des Rijkswaterstaates der Niederlande
VSS	Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SN	Schweizer Norm
DIN	Deutsche Industrie-Norm
FA	Forschungsauftrag
F+E	Forschung und Entwicklung
AB	Asphaltbeton
GA	Gussasphalt
SA	Sandasphalt
B	Bindemittel, Bitumen
M, MIGU	Mischung, Mischgut
PK	Prüfkörper
V _F	Verdichtungsform

<u>Symbol</u>	<u>Bezeichnung</u>	
BK	Bohrkern	
ABM	Abmessungen der Prüfkörper	
FOFA	Formfaktor der Prüfkörper	
Mst	Masstab	
P	Programm	
PV	Prüfverfahren	
EB	Einbau (Prüvorrichtung zu PV)	
AUVP	Ausstoss- und Verdichtungspressse	
UVP	Universalprüfmaschine	
DYNASPHALT	Mehrfachprüfstand für dynamische Asphaltprüfung	
MV	Marshallversuch	} siehe auch Abb. 127
MMV	Marshall-Mehrstufenverdichtung	
MDV	Monoaxialer Druckversuch	
KKR	Kälte-Kontraktion-Relaxation	
SPV	Spaltzugversuch	
MKV	Monoaxialer Kriechversuch	
MSV	Monoaxialer Schwingversuch	
4-PKT-B	Vierpunktbiegung	
B-SA	Bindemittel-Schub-Axial	
PK-BSA	Prüfkörper-Biege-Schub-Axial (engl.: SP-ASB)	
TV	Triaxialversuch	
TKV	Triaxialer Kriechversuch	
TSV	Triaxialer Schwingversuch	
SDE	Seitendruckelement (Erzeugung Seitendruck im TV)	
VWI	Volumenmesseinrichtung "Wicklung" (monoaxiale PV)	
VTU	Volumenmesseinrichtung "Tubus" (monoaxiale PV)	
VT	Volumenmesseinrichtung "Triax" (Zylinder)	
MT	Messkörper Triax (Kraft, Spannung axial)	
MAME 20 kN	Marshall-Messkörper Bereich 20 kN (Druck)	

<u>Symbol</u>	<u>Bezeichnung</u>
ST	Stempel (Belastungsstempel)
STR	Standrohr (Verdrängungsprinzip, VTU)
SYPR	Systemprüfung
KW-FU	Kennwert(e) der Funktion
KW-FE	Kennwert(e) der Festigkeit
KW-VOL	Kennwert(e) der Volumetrie (einer Mischung = Verdichtungszustand)
KW-VOL _i	Kennwert(e) der Volumetrie des Prüfkörpers im Initialzustand
IL	Initialzustand des Prüfkörpers nach Herstellung im Labor
IP	Initialzustand des Prüfkörpers nach Verdichtung in der Praxis, nach Entnahme aus dem Bauwerk
S	Schlagverdichtung, Schlagzahl (2x)
Z	Zusatzmasse des Fallkörpers
V	Vibroverdichtung
W, W _n	Walzverdichtung, Stufe der Walzübergänge
GY	GYRATOR-Verdichtung
VEN	Verdichten Ende
MW	Mittelwert
EW, ΔEW	Einzelwert, Abweichung des Einzelwertes vom Mittelwert
σ	Standardabweichung
CV	Variationskoeffizient
CV _m	mittlerer Variationskoeffizient
SW	Sollwert
VL	Vorlast (Last: Kraft, Verschiebung, Verformung)
GL, IGL	Grundlast, Intervalle Grundlast
WL, IWL	Wechselast, Intervalle Wechselast
STGL	Stufen Grundlast
BEL	Belasten

<u>Symbol</u>	<u>Bezeichnung</u>
ENTL	Entlasten
VA	Verformungsanteile (im Kriechversuch)
V	Viskos
PL	Plastisch
EL	Elastisch
VE	Viskoelastisch
VP	Viskoplastisch
V+VP	Viskos und viskoplastisch
K	Konstante
WLF	Gleichung nach Williams, Landell und Ferry
ZTSP	Zeit-Temperatur-Superpositions-Prinzip
var.	variabel
konst.	konstant
stat	statisch
sw	schwingend
volco	volumenkontrolliert
nvolco	nicht volumenkontrolliert
>	grösser, höher als
»	wesentlich grösser, höher als
<	kleiner, tiefer als
«	wesentlich kleiner, tiefer als
→	Von/bis, nach, Reihenfolge führt auf
...	
→ ↑	zunehmend, grösser werdend, siehe auch
← ↓	abnehmend, kleiner werdend, siehe auch

LEBENS LAUF UND BILDUNGSGANG

LEBENS LAUF UND BILDUNGSGANG

Geboren in Zürich am 27. August 1945 als Sohn von Walter F. Juncker und seiner Frau Alice, geborene Fehlmann.

Wohnhaft von 1946 bis 1966 in Alpnach-Dorf, Kanton Obwalden.

Verheiratet mit Helma Krijger seit 1971, drei Kinder, Walter-Adrian, Annette und Sarah.

Primarschule in Alpnach von 1951 bis 1957.

Mittelschule in Luzern 1958 bis 1965, Kantonsschule Luzern; Abschluss mit Matura Typus C, Math.-Natw.-Richtung.

Studium an der Eidg. Techn. Hochschule Zürich, ETHZ, an der Abteilung für Bauingenieurwesen; Diplomabschluss 1970.

Mitarbeit in Ingenieurbüro in Hergiswil, Kanton Nidwalden, AG für Bauplanung (Prof. R. Crottaz), 1969.

Assistent und wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. H. Grob am Lehrstuhl für Strassen- und Untertagbau, 1970 bis 1972.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA), Ressort Baustoffe, Abteilung Strassenbau, Abdichtungen, seit 1973, insbesondere beauftragt mit:

- Bearbeitung grösserer Schadenfälle;
- Studien und Materialkontrollen von Brückenabdichtungen;
- Bearbeitung verschiedener Forschungs- und Entwicklungsprojekte der EMPA, u.a. für die Entwicklung und Realisierung neuer prüftechnischer Einrichtungen und Prüfmaschinen;
- verschiedene Studienaufenthalte, u.a. in Holland beim Dienst Weg-en Waterbouwkunde des Rijkswaterstaates der Niederlande in Delft und in Frankreich am Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) Paris.
- Werkskontrollen von Materialproduktionen im In- und Ausland.
- Überwachungsaufgaben im Abdichtungs- und Belagsbau der Nationalstrasse N2, Abschnitt Lehnenviadukt (LVB) Beckenried, Kanton Nidwalden, 1979 bis 1980.

Mitglied der SIA (Schweiz. Ingenieur- und Architektenverein), Kommission 281, "Polymer-Bitumen-Dichtungsbahnen (PBD)", seit 1978.

Mitglied der VSS (Vereinigung Schweiz. Strassenfachleute), Kommission K4, "Baustoffe", seit 1982.

Mitglied der Dreiländerkommission ATR-FGS-VSS K XIX (F, BRD und CH), "Bitumenqualität", 1984 bis 1987.

Mitglied der internationalen Arbeitsgruppe für die Polierprüfung der Mineralstoffe (D, CH, A und NL), 1984 bis 1987.