

Haftfestigkeit bituminöser Bindemittel am Gestein

Schlussbericht

**Eidgenössisches Departement des Innern, Bern
Forschungsauftrag Nr. 4/73**

EMPA Nr. 30 700

CH-8600 Dübendorf

Mai 1981

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

A	EINLEITUNG	6
B	ZWECK DES FORSCHUNGS-AUFTRAGES	7
C	UEBERSICHT ZUM FORSCHUNGS-AUFTRAG	8
D	ALLGEMEINES ZUM PROBLEMKREIS DER HAFTUNG BITUMINOESER BINDEMITTEL AM GESTEIN	8
I	Allgemeines zur Haftung bituminöser Bindemittel	8
II	Grundlagen der Haftung	11
III	Einflussgruppen zur Adhäsion im Asphalt	12
1.	Materialbedingte Kraftwirkungen des Bindemittels	12
1.1	Oberflächenspannung	
1.2	Viskosität	
1.3	Zusammensetzung und Herkunft des Bindemittels	
1.4	Alterungsbeständigkeit	
2.	Materialbedingte Kraftwirkungen der mineralischen Zuschlagstoffe, Eigenschaften der Gesteine	17
2.1	Mineralogie	
2.2	Oberflächenrauigkeit	} Geometrie der Oberfläche
2.3	Porosität	
2.4	Oberflächenüberzüge	
3.	Eigenschaften des Wassers	22
4.	Zusammenstellung der Parameter, welche die Adhäsion im Asphalt beeinflussen. (Tabelle)	24

	<u>Seite</u>
IV Theoretische Betrachtung der Haftung, Adhäsion	27
5. Benetzung	27
6. Der Mechanismus der Haftung, Allgemeines	30
7. Theorien zur Haftung, Adhäsion	32
7.1 Mechanische Adhäsion	
7.2 Spezifische Adhäsion	
V Theoretische Betrachtung der Ablösung des Bindemittels (Stripping) vom Mineral, Einfluss des Wassers	34
8. Allgemeines	34
9. Beschreibung der Theorien	35
9.1 Verdrängungstheorie	
9.2 Trennung- oder Ablösungstheorie	
9.3 Filmbruchtheorie	
9.4 Porendrucktheorie	
VI Prüftechnik	38
10. Allgemeines	38
11. Kategorien von Prüfverfahren	39
12. Zusammenstellung der bestehenden Prüfverfahren	40
13. Wertung von Prüfverfahren	45
E AUSGANGSLAGE FUER DIE UNTERSUCHUNGEN INNERHALB DES FOR- SCHUNGS-AUFTRAGES	46
VII Kurze Zusammenfassung und Stand der theoretischen Be- trachtung von Haftung und Ablösung des Bindemittels und Trend in der Prüftechnik	46
14. Allgemeines zur Haftung und Ablösung	46
15. Trend in der Prüftechnik	48

	<u>Seite</u>
VIII Untersuchungsprogramm zur Durchführung des 2. Teils des Forschungsauftrages	48
16. Prüfverfahren	49
17. Lagerungsarten	49
18. Baustoffe	49
 F DIE ENTWICKLUNG DES NEUEN SERVOHYDRAULISCHEN WASSERDRUCK- AGGREGATES DER EMPA	 50
 IX Allgemeines	 50
 X Der Bau und Betrieb des Wasserdruckaggregates	 50
19. Ausgangslage	50
20. Konzept	51
21. Bau und Funktion	52
21.1 Uebersicht Aufbau, Schema	
21.2 Betrieb	
21.3 Belastungsfälle	
 G DURCHGEFUEHRTE UNTERSUCHUNGEN	 60
 XI Programm	 60
 XII Uebersicht zu den Versuchen	 60
22. Zusammenstellung der Versuche (Tabelle 6)	61
23. Definition der Lagerungsarten (Tabelle 7)	62
24. Verwendete Baustoffe	63
24.1 Mineralstoffe	
24.2 Bindemittel	

	<u>Seite</u>
XIII Umhüllungsversuche	70
XIV Splittablösprüfungen	73
XV Mechanische Festigkeitsprüfung, Marshall-Versuch	86
H KOMMENTAR ZU DEN UNTERSUCHUNGSERGEBNISSEN	99
XVI Allgemeines	99
XVII Umhüllungsversuche	99
XVIII Splittablösprüfungen	100
XIX Mechanische Festigkeitsprüfung, Marshall-Versuch	102
I SCHLUSSFOLGERUNGEN	104
XX Untersuchungsergebnisse	104
XXI Prüftechnik	104
XXII Allgemeine Situation und weitere Forschungsarbeiten	105
K LITERATURVERZEICHNIS (Anhang = blaues Papier)	106 - 116

A EINLEITUNG

=====

Nebst der geeigneten Zusammensetzung eines Mischgutes bezüglich Korngrößenverteilung der Mineralstoffe und Bindemittelgehalt ist für die mechanische Festigkeit einer eingebauten und verdichteten Schicht - des Asphalts - ausser der Qualität der Mineralstoffe und des Bindemittels auch die Haftung des Bindemittels am Gestein massgebend.

Untersuchungen von Schadenfällen an bituminösen Tragschichten und Belägen haben gezeigt, dass ganze Teile einzelner Schichten zerfallen waren. Solche Schäden können jeweils verschiedenen Ursprung haben, z. B. Zerrüttung des Belages durch zu wenig tragfähigen Untergrund, zu grosse Verkehrsbelastung (Achslasten) auf zu wenig stark dimensioniertem Strassenoberbau, unzuweckmässige Baustoffe sowie Einwirkung von Frost.

Neben diesen möglichen Ursachen zeigt es sich immer wieder, dass viele Schäden auf ein Ablösen des Bindemittels vom Gestein zurückzuführen sind. Diese Ablösung des Bindemittels vom Gestein ist als eines der schwierigsten Probleme der Strassenbautechnik seit Einführung der Asphaltbauweisen anzusprechen.

Da im Forschungsauftrag "Anforderungen an Strassenbaubitumen" keine Versuche zur Ermittlung des Haftverhaltens bituminöser Bindemittel an Mineralstoffen ausgeführt wurden, war die Durchführung solcher Versuche in einem getrennten Forschungsauftrag gegeben, da

- neben Strassenbaubitumen auch Teerbitumen zu untersuchen waren, und
- das Untersuchungsprogramm für die Haftfestigkeitsversuche damals noch nicht im Detail festgelegt werden konnte.

Ebenso wie es zahlreiche Faktoren gibt, welche die Haftfestigkeit zwischen Bindemittel und Gestein beeinflussen (z. B. Eigenschaften der Baustoffe, die angewandten Bauprozesse und die verschiedenartigsten äusseren Bedingungen), bestehen auch verschiedene Theorien hinsichtlich Haftung, Haftfestigkeit und Ablösung, die sogar in den einfachsten Fällen umstritten sind. Deshalb ist es klar, dass zur Zeit keine bestimmte Theorie verbindliche Aussagen über das Ablösungsphänomen bituminöser Mischungen

zulässt. Entsprechend ist das Prüfen der Haftfestigkeit bituminöser Bindemittel am Gestein sehr komplex, was sofort daraus ersichtlich ist, dass heute dazu bereits eine Vielzahl von Versuchen bestehen, die jedoch alle nur teilweise befriedigen.

Im ersten Teilbericht des Forschungsauftrages FA 4/73, "Haftfestigkeit bituminöser Bindemittel am Gestein", wurde in der Folge eine umfangreiche Literaturübersicht zum Problemkreis der Haftfestigkeit und eine Zusammenstellung der Grundlagen der Haftung, der bestehenden grundsätzlichen Theorien zur Haftung und Ablösung des Bindemittels am resp. vom Gestein sowie eine Zusammenstellung bestehender Prüfverfahren aufgeführt. Die im Rahmenprogramm des Forschungsauftrages vorgesehenen Untersuchungen wurden soweit möglich ausgeführt. Die ermittelten Resultate und wesentliche Teile des ersten Teilberichtes sind in diesem Schlussbericht zusammengefasst.

B ZWECK DES FORSCHUNGS-AUFTRAGES

Um aus der Vielfalt der bestehenden Theorien und den zahlreichen Prüfmethoden zur Haftfestigkeit bestimmtere und praxisgerechtere Aussagen abzuleiten, sollten an bituminösem Mischgut, bestehend aus verschiedenen Mineralstoffen und bituminösen Bindemitteln, Untersuchungen mit verschiedenen Lagerungsarten und Prüfverfahren durchgeführt werden.

Die erarbeiteten Resultate und Schlussfolgerungen sollen die Grundlagen für weitere Forschungsarbeiten und, soweit möglich, Anhaltspunkte für das vorgesehene Erarbeiten von Prüf- und Qualitätsvorschriften zum Problemkreis der Haftfestigkeit bituminöser Bindemittel am Gestein bilden.

C UEBERSICHT ZUM FORSCHUNGS-AUFTRAG

Im ersten Teilbericht des Forschungsauftrages FA 4/73 wurden die Grundlagen, Theorien von Haftung (Adhäsion) und Ablösung (Stripping) sowie die zahlreichen bestehenden Prüfverfahren und Prüfmethoden durch ein Literaturstudium erfasst und zusammengestellt. Anschliessend wurde ein Rahmenprogramm für die Untersuchungen formuliert.

Im vorliegenden Schlussbericht sind die wesentlichen Abschnitte des ersten Teilberichtes und die Ergebnisse der ausgeführten Untersuchungen enthalten.

D ALLGEMEINES ZUM PROBLEMKREIS DER HAFTUNG BITUMINOESER BINDEMITTEL AM GESTEIN

I ALLGEMEINES ZUR HAFTUNG BITUMINOESER BINDEMITTEL

[nach Lit. 6 und 9]

Die Aufgabe der bituminösen Bindemittel, z. B. des Bitumens, besteht im Strassenbau darin, die Mineralstoffe als eigentlichen Träger der Verkehrslasten miteinander zu verkitten und zu einem unlösbaren Ganzen, einem neuen, festen Strassenbaustoff, dem Asphalt, zu verbinden. Ihre Fähigkeit dazu beruht auf ihren adhäsiven und kohäsiven Kräften, ihrer Benetzungsfähigkeit und Haftfähigkeit einerseits und ihrer Festigkeit andererseits. Eine dieser Eigenschaften allein reicht nicht aus, die gestellte Aufgabe zu erfüllen. So hat z. B. ein Mineralöl zwar eine genügende Benetzungsfähigkeit, aber nicht die notwendige Zähigkeit (zu tiefe Viskosität), um die Mineralstoffe fest zu verkitten. Mit einem festen oder sehr zähflüssigen (hoch viskosen) Bindemittel kann man wiederum die Mineralien nicht benetzen und umhüllen. Ein solches muss vielmehr erst dünnflüssig gemacht werden, was im allgemeinen durch Erhitzen geschieht. Man nennt diese Eigenschaft der bituminösen Bindemittel, bei hoher Temperatur dünn-

flüssig zu sein und bei niedriger Temperatur zähflüssig bis fest zu werden, ihr thermoplastisches Verhalten. Da nun die hergestellten Mischungen auch beim Einbau plastisch verformbar sein müssen, um ausgebreitet und verdichtet werden zu können, erfolgt der Einbau im allgemeinen im warmen oder heissen Zustand.

Die Gesteine werden hoch erhitzt, getrocknet und dadurch von Wasser befreit, entstaubt und mit heissem, dünnflüssigem Bindemittel überzogen. Durch die Abkühlung kehrt das Bindemittel bald wieder in einen so zähen Zustand zurück, dass es nicht wieder vom Gestein entfernt werden kann. Damit kommen gleichzeitig auch die kohäsiven Kräfte zur Wirkung. Anders ausgedrückt, ist die Viskosität der im Heisseinbau verwendeten Bindemittel im abgekühlten Zustand im allgemeinen so gross, dass sie sich nicht aufgrund ihrer Oberflächenspannung tropfenförmig zusammenziehen und dadurch vom Gestein lösen können. Unabhängig von der viskositätsbedingten Kontraktion kann allerdings auch ein zähes Bindemittel sich vom Gesteinskorn lösen und umhüllt dieses dann nur noch als loser Film.

Die Haftfestigkeit der Bindemittel beruht auf ihrem Gehalt an polaren Verbindungen und den daraus resultierenden adsorptiven Kräften zwischen ihnen und der Gesteinsoberfläche, wobei auch die Art und Natur des Gesteins eine wichtige Rolle spielen. Die Haftfestigkeit muss also als Eigenschaft angesehen werden, an der beide Partner, das Gestein und das Bindemittel, gleichermaßen beteiligt sind und die in Frage gestellt ist, wenn bei einer der beiden Komponenten Mängel vorhanden sind. Dies kann der Fall sein, wenn das verwendete Bindemittel nicht die notwendige Menge an polaren Stoffen enthält oder das Gestein als solches eine ungenügende Haftfähigkeit besitzt. Da die in bituminösen Bindemittel enthaltenen Stoffe im allgemeinen saurer Natur sind, ist die Haftfestigkeit an basischen Gesteinen, wie Kalkstein, Basalt und dgl., normalerweise besser als an sauren Gesteinen, wie Graniten, Porphyren und derartigen Eruptivgesteinen oder an quarzitischem Kies, Flint und ähnlichen Vorkommen.

Das eigentliche Problem der Haftfestigkeit ist aber das Verhalten in Gegenwart von Wasser bzw. bei Wassereinwirkung, da erst unter diesen Umständen ein echter Haftfestigkeitsmangel auftreten kann. Beim Heisseinbau ist eine vollständige Trocknung der Gesteine eine der wesentlichen Grundvoraussetzungen. Ein Wasserzutritt während des Einbaus oder kurz danach, solange das Bindemittel noch flüssigbeweglich ist, kann als Ausnahme betrachtet werden. Möglich ist eine spätere Wassereinwirkung. Bei offenen, makadamartigen Belägen vermag das Wasser ungehindert einzudringen.

Nach dem Betonprinzip aufgebaute Beläge, die heiss aufbereitet und eingebaut wurden, können je nach Art und Sorte unterschiedliche Hohlraumgehalte aufweisen, wobei Wasser immer eindringen kann. Hier können durchaus Schäden durch mangelnde Haftfestigkeit auftreten, besonders wenn Gesteine mit schlechtem Haftvermögen verwendet und keine speziellen Vorsichtsmassnahmen getroffen werden. Der nur lose aufliegende, nicht mehr festhaftende Bindemittelfilm kann dann unter Verkehrseinwirkung leicht beschädigt und schliesslich ganz zerstört werden. Bei Gussasphaltbelägen erreichen die Hohlraumgehalte ein Minimum (0 bis etwa 1 Vol.-%). Hier sind Schäden durch mangelnde Haftfestigkeit nicht denkbar, da das Wasser nicht einzudringen vermag.

Anders liegen die Dinge beim sogenannten Warm- oder Kalteinbau. Hierbei kommen dünnflüssige Bindemittel (z. B. Verschnittbitumen), deren Viskosität durch einen Zusatz von Teer- und Mineralölen als Verschnittmittel herabgesetzt ist und die beim Mischen nicht nochmals erhitzt, sondern nur erwärmt werden müssen, zur Verwendung. Ebenso sollen die Gesteine nicht über 100°C erhitzt werden, da bei zu heissem Gestein die Verschnittmittel vorzeitig verdunsten und dadurch eine Lagerfähigkeit des Mischgutes bzw. ein späterer Einbau, was der Sinn dieser Bauweise ist, beeinträchtigt oder sogar unmöglich gemacht würde. Schliesslich dürfen solche Verschnittbitumenbeläge nicht dicht gebaut werden, sondern müssen "offen" sein, damit die enthaltenen Verschnittöle allmählich doch entweichen können. Eine endgültig dichte Beschaffenheit erhalten derartige "Kompressionsbeläge" erst nach längerer Zeit durch

die knetende und verdichtende Wirkung der Verkehrslasten. Ein echter Kalteinbau, wobei die Bindemittel ohne jede Erwärmung sehr dünnflüssig sind und die Gesteinstoffe überhaupt nicht erwärmt zu werden brauchen, gelangt vor allem in ländlichen Gebieten mit schwachem Verkehr zur Anwendung.

II GRUNDLAGEN DER HAFTUNG [Lit. 13 und 62]

Asphalte sind Gemische von bituminösen Bindemitteln mit Mineralstoffen. Für ihre technische Verwendung ist es von ganz besonderer Bedeutung, dass das Bindemittel und die Mineralstoffe im Gemisch nicht nebeneinander als Gemenge vorliegen, sondern dass sie miteinander verbunden sind. Dies Verbundensein nennt man "Haften". Eine Haftung besteht an der Grenzfläche zwischen zwei Phasen, das Haftproblem ist ein Grenzflächenproblem.

Ein Haften wird durch Adhäsionskräfte bewirkt. Zwischen einer Festkörperoberfläche und einer Flüssigkeit wirken nur dann Adhäsionskräfte, wenn die Flüssigkeit den Festkörper benetzt. Ein Haften setzt folglich eine Benetzung voraus.

Es bestehen verschiedene Theorien, wie auch Prüfmethoden, die das adhäsive Verhalten als wenig definierte "Klebekraft", "Haftfestigkeit", "Benetzungsfähigkeit", "Wasserempfindlichkeit", "Bindevermögen", "Verschleiss- und Abriebwiderstand", "Affinität" zu erfassen trachteten.

Die allen vorgenannten Formulierungen gemeinsame Einflussgrösse ist die Adhäsion, eine Erscheinungsform der Molekularkräfte, die bewirkt, dass Moleküle verschiedener Stoffe aneinander haften bleiben. Berührt eine Flüssigkeit einen festen Körper, so tritt infolge der Verschiedenheit der molekularen Anziehungskräfte an der Grenzfläche beider Phasen eine Spannung auf, die man als "Haftspannung" bezeichnet; definiert ist sie als reversibel zu gewinnende "Adhäsionsarbeit" pro Flächeneinheit. Zu beachten ist, dass diese Adhäsionsarbeit, nicht aber die "Adhäsion", die physikalisch definierte Grösse ist, und dass es sich nicht um eine charakteristische Stoff-

konstante handelt, sondern stets um das Resultat einer Wechselwirkung zwischen mehreren Materialien. "Adhäsion", "Haftfestigkeit" und "Klebekraft" beispielsweise eines Bitumens sind daher ohne Angabe der Bezugssubstanz unzureichende Begriffe. Erschwerend kommt schliesslich hinzu, dass in Asphalten bei allen praktisch relevanten Hafteffekten stets Wasser als dritte Komponente beteiligt ist. Die "Adhäsion" ist also eine Eigenschaft des Asphalts und nicht allein des Bindemittels, das nur einen Beitrag zum Hafteffekt leistet. Zur "Adhäsion" von Asphalten tragen verschiedene Einflussgruppen bei.

III EINFLUSSGRUPPEN ZUR ADHAESION IM ASPHALT

1. Materialbedingte Kraftwirkungen des Bindemittels
2. Materialbedingte Kraftwirkungen der mineralischen Zuschlagstoffe, Eigenschaften der Gesteine
3. Eigenschaften des Wassers
4. Zusammenstellung der Parameter, welche die Adhäsion im Asphalt beeinflussen

1. Materialbedingte Kraftwirkungen des Bindemittels

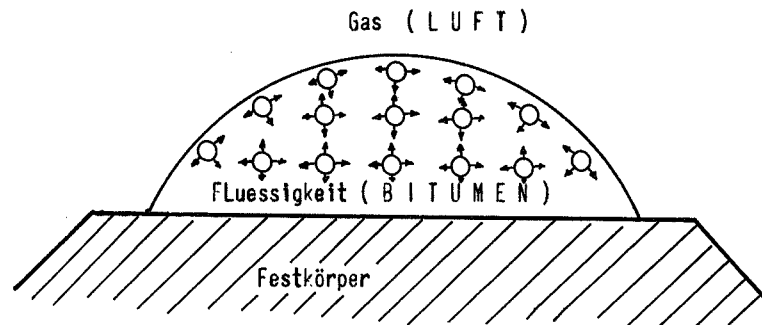
1.1 Oberflächenspannung

Begriffe

Die Begriffe Oberflächenspannung und freie Oberflächenenergie sind zwei ähnliche Parameter, die oft abwechselungsweise gebraucht werden, um die Eigenschaften der Oberflächenphasen von Grenzflächen zwischen zwei Materialien zu beschreiben.

Die Grenzfläche zwischen Flüssigkeiten und Gasen verhält sich wie unter der Wirkung einer Kraft, bekannt als Oberflächenspannung, welche die Tendenz hat, die Oberfläche zusammenzuziehen.

Die Oberflächenspannung, ausgedrückt in Kraft/Länge, beruht auf dem Ungleichgewicht der Anziehungskräfte zwischen den Oberflächenmolekülen, wie Figur 1 zeigt. Die Moleküle im Innern werden gleichmässig in allen Richtungen angezogen, wogegen die Oberflächenmoleküle nur gegen innen angezogen werden, was die Spannung in der Oberfläche bewirkt [1].



Figur 1: Anziehungskräfte zwischen Molekülen an der Oberfläche und im Inneren einer Flüssigkeit [1].

Der Begriff Oberflächenenergie bedeutet die Arbeit pro Flächeneinheit, die erforderlich ist, um die Oberflächenphase von zwei Materialien auszudehnen.

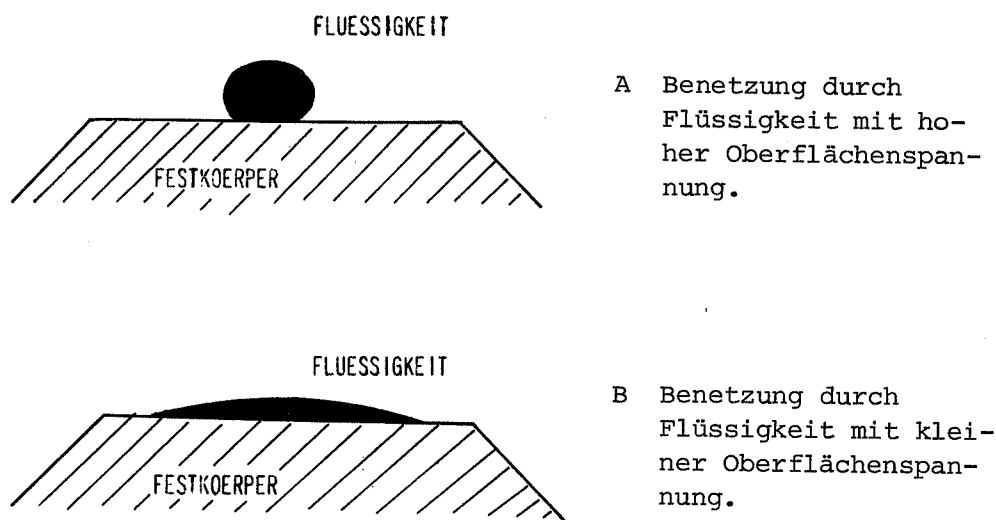
Diese Arbeit ist in der Oberfläche gespeichert und kann wieder gewonnen werden, wenn sich die Oberfläche wieder zusammenziehen kann.

Oberflächenenergie und Oberflächenspannung sind numerisch gleichwertig und werden ausgedrückt in N/mm^2 [1 und 2].

Benetzung und Ausbreiten

Die Oberflächenspannung ist einer der Hauptfaktoren, die die Benetzungs- und Ausbreitfähigkeit des bituminösen Bindemittels auf der Gesteinsoberfläche bedingen. Die Benetzung hängt von der relativen Anziehung zwischen den Molekülen des Bindemittels und des Gesteins, verglichen mit der Anziehung zwischen den Molekülen im Innern des Bindemittels, ab. Mit abnehmender Oberflächenspannung nimmt die Benetzungsfähigkeit des Bindemittels zu (siehe Figur 2, Seite 14).

Ein Phänomen, das ebenfalls mit der Benetzung in Zusammenhang steht, ist das Ausbreiten von Flüssigkeiten auf Flüssigkeits- oder Feststoffoberflächen. Darunter versteht man spontanes Auseinanderfliessen auf der jeweiligen Auflagefläche. Voraussetzung für die Ausbreitung ist, dass die Adhäsion der aufgetragenen Flüssigkeit grösser ist als ihre Kohäsion. Ausserdem muss die Oberflächenspannung der Auflagefläche grösser als die der ausbreitenden Flüssigkeit sein. In Ausbreitschichten kommt es zur Orientierung der Moleküle. Dadurch ändern sich die physikalischen Kenndaten des Stoffes. So nimmt beispielsweise bei bituminösen Stoffen die Strukturviskosität zu, die Benetzbarkeit der Filmoberfläche verändert sich. Häufig ist zunehmende Neigung zur Ausbreitung mit einer Verbesserung der Hafteigenschaften verbunden [87].



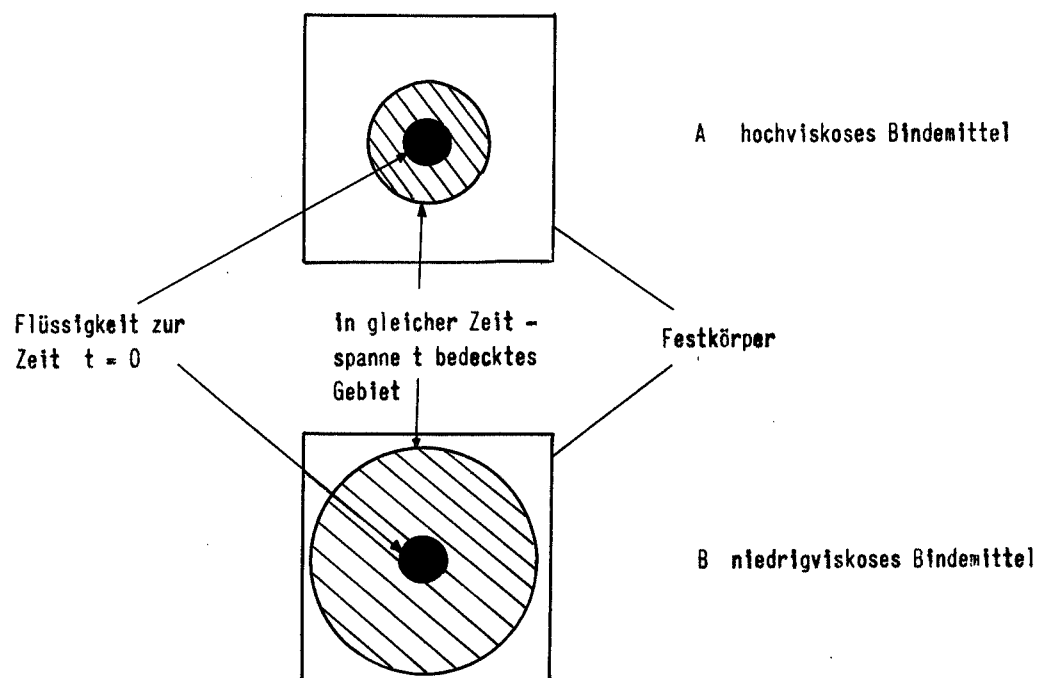
Figur 2: Einfluss der Oberflächenspannung auf die Benetzung einer Flüssigkeit.

Die Figur 2 zeigt schematisch, dass die Benetzung gross ist, wenn die Oberflächenspannung der Flüssigkeit niedrig ist und umgekehrt.

1.2 Viskosität

Die Viskosität ist temperaturabhängig und zeigt den Grad der molekularen Beweglichkeit und die Grösse der Anziehungskräfte in Flüssigkeiten an. Wird die Temperatur erhöht, so nehmen die zwischenmolekularen Kräfte und die Oberflächenspannung der Flüssigkeit ab, woraus sich eine grössere Benetzungsfähigkeit ergibt. Hinsichtlich der Bindemittelablösung vom Gestein ist festzustellen, dass Bindemittel mit hoher Viskosität der Verdrängung durch Wasser besser widerstehen als niedrig viskose Bindemittel [1 und 2].

Ein schematisches Diagramm, das den Effekt der verschieden hohen Viskosität von 2 Bindemitteln wiedergibt, zeigt die Figur 3.



Figur 3: Einfluss der Bindemittelviskosität auf die Benetzung.

1.3 Zusammensetzung und Herkunft des Bindemittels

In bezug auf den Einfluss der Zusammensetzung und Herkunft des bituminösen Bindemittels ergibt sich kein völlig klares Bild. Einerseits wird die Feststellung erwähnt, dass Bitumen verschiedener Herkunft eine unterschiedliche Neigung zur Ablösung vom Gestein aufweisen können; andererseits nennen Verfasser als Ergebnis umfangreicher Untersuchungen, dass bisher ein bestimmter Zusammenhang zwischen verschiedenen chemischen Verbindungen des Bindemittels und der Haftung am Gestein nicht überzeugend gezeigt werden konnte, und dass i. a. die meisten Arten von Bindemitteln der Ablösung vom Gestein unterworfen sind.

Der Einfluss der Zusammensetzung bituminöser Stoffe auf die Oberflächenspannung scheint unbedeutend zu sein. Verschiedene Forscher haben sehr ähnliche Werte für die Oberflächenspannung mitgeteilt.

1.4 Alterungsbeständigkeit

Welche Rolle die Alterungsbeständigkeit der bituminösen Bindemittel im Hinblick auf die Haftfestigkeit spielt, ist noch nicht genügend erforscht. Unter dem Einfluss der atmosphärischen Bedingungen können die Bindemittelfilme eine Aenderung der Viskosität, der Oberflächenspannung und der Zusammensetzung des Bindemittels erfahren, die natürlich auch das Haftverhalten beeinflusst.

./.

2. Materialbedingte Kraftwirkungen der mineralischen Zuschlagstoffe, Eigenschaften der Gesteine

2.1 Mineralogie

Eine grosse Bedeutung im Zusammenhang mit den Hafterscheinungen hat die mineralogische Zusammensetzung. Gesteine haben, wie andere Stoffe, unausgeglichene Oberflächenladungen, die eine Oberflächenspannung zur Folge haben. Die Gesteinsoberflächen befriedigen, wenn sie mit einer Flüssigkeit von entgegengesetzter Polarität bedeckt werden, ihren Energiebedarf und bilden eine Haftverbindung aus. Die Flüssigkeit, die den grösseren Energiebedarf befriedigt, hat die grössere Haftfestigkeit und ist in der Lage, den Film einer anderen Flüssigkeit zu ersetzen. Diese Erscheinung ist im Falle der bituminösen Bindemittel als Bindemittelablösung (Stripping) bekannt, wobei das Wasser den Bindemittelfilm von der Gesteinsoberfläche verdrängen kann.

Die Gesteine werden meist in zwei Arten eingeteilt: Hydrophobe und hydrophile Gesteine. Vielfach hat man angenommen, dass die sauren Gesteine hydrophil und die basischen hydrophob sind.

Eine eingehende Untersuchung der Wirkung der mineralogischen Zusammensetzung auf das Haftverhalten hat ergeben, dass Orthoklas, Biotit und Hornblende zu schlechter Haftfestigkeit führen; Quarz und Labradorit haben eine mittlere Wirkung, während Olivin und Augit sehr gute Hafteigenschaften zu haben scheinen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Klassifizierung in saure und basische Gesteine eine geologische Einteilung ist, die nicht notwendig auf die Wechselwirkung zwischen Bindemittel und Gestein hindeutet. Man hat gezeigt, dass an einigen basischen Gesteinen, wie Gabbro, die bituminösen Bindemittel besser haften als an sauren Gesteinen. Auf der anderen Seite haben "KARIUS" und "DALTON" mit sauren Quarziten bessere Ergebnisse erhalten

als mit basischen Dolomiten und Doleriten. Daraus ergibt sich, dass die bekannte Feststellung, wonach saure Gesteine der Bindemittelablösung unterliegen, basische aber nicht, ungenau ist, wenn sie auch im grossen ganzen zutrifft.

Tabelle 1: Klassifikation der Gesteine nach SiO_2 -Gehalt

Klassifikation	Prozente SiO_2	
	nach Knight	nach Kraus
saure Gesteine	66 oder mehr	65 bis 80
dazw. liegende Gesteine	55 bis 66	52 bis 65
basische Gesteine	weniger als 55	weniger als 52
ultra basische Gesteine	----	----

Generell kann gesagt werden:

- Saure oder hydrophile Gesteine sind jene, die mehr als 50 % saure Anteile aufweisen.
- Die basischen Anteile der Gesteine sind: Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O und K_2O [1 und 2].

./.

Tabelle 2: Mineralogische Zusammensetzung in Prozenten (Minerale, Anteile in %)

Gestein	E r u p t i v - G e s t e i n e						
	Quarz	Orthoclas	Plagioclas	Augit	Hornblende	Biotit	Muskovit
Granit	30	41	8	--	--	3	3
Diorit	8	7	30	3	27	4	0.1
Gabbro	0.5	--	44	28	9	2	--
Diabas	--	--	44	46	--	--	--
Rhyolit	32	45	3	--	0.7	3	2
Trachyt	3	42	1	2	6	0.5	8
Andesit	0.6	--	48	14	3	--	3
Basalt	--	--	36	35	--	--	--
M e t a m o r p h o s e G e s t e i n e							
Quarzit	84	3	--	--	1	2	2
Feldspat-quarzite	46	27	1	--	--	2	5
Hornblende-gneiss	10	16	15	3	45	3	1
Granitgneiss	37	32	3	--	--	7	11
Biotitschiefer	34	13	3	--	1	38	3
Glimmerschief.	37	16	1	--	--	13	26
Schlacke	29	4	--	--	--	--	55
Marmor	3	0.2	0.2	--	--	--	Kalcit = 96
Amphibolit	3	1	8	--	70	1	0.2
S e d i m e n t g e s t e i n e							
Sandstein	79	5	0.3	--	--	0.2	1
Feldspatsandstein	35	26	2	--	--	0.6	2
Kalksandstein	46	3	2	--	--	--	Kalcit = 42
Hornstein	93	--	--	--	--	--	Kalcit = 1
Ton	6	--	--	--	Dolomit = 8	--	Kalcit = 83
Dolomit	5	--	--	--	Dolomit = 82	--	Kalcit = 11

2.2 Oberflächenrauigkeit

Die Oberflächenrauigkeit beeinflusst sowohl die Benetzung als auch die Festigkeit der Klebeverbindung. Die in den feinen Oberflächenrissen des Gesteins eingeschlossene Luft und Feuchtigkeit können die Benetzung erschweren. Auf der anderen Seite wird die Oberflächenrauigkeit hinsichtlich der Bindefestigkeit als ein nützlicher Faktor angesehen, vorausgesetzt, dass zwischen Bindemittel und Gestein eine "richtige" Verbindung besteht. Die Oberflächenrauigkeit bringt eine Vergrößerung der Kontaktfläche mit sich und führt daher zu einer niedrigeren Zugbeanspruchung in der Grenzfläche. Die Rauigkeit ist dadurch allgemein als wichtige und bekannte Messgrösse für die Beurteilung der Güte von Oberflächen bezüglich Haftfähigkeit anzusehen.

Sie lässt sich mit verschiedenartigen Messverfahren in unterschiedlich definierten Zahlenwerten eindeutig festlegen. Aus diesen Ergebnissen lässt sich auf die geometrische Gestalt, z. B. die Rauhtiefe als dem Abstand höchster Erhebungen zu den tiefsten Tälern des "zerklüfteten Mikrogebirges" einer sogenannten technischen Oberfläche schliessen; andere Messverfahren gestatten zu dem nicht nur Höhenunterschiede, sondern auch die Form der Höhen und Täler zu erfassen [21].

Technische Oberfläche bedeutet, dass die Oberfläche, resp. deren Zustand durch ein Oberflächen-Behandlungsverfahren (wie Bürsten, Schmirgeln, Schleifen, Polieren, Ätzen etc.) erreicht wurde, während als natürliche Oberfläche z. B. die Oberfläche von Rundkies, aber auch die Oberfläche von gebrochenen Splittkörnern, zu bezeichnen wären.

Soll die Rauigkeit von natürlichen Oberflächen bestimmt werden, so entspricht dieses Problem praktisch der Bestimmung der spezifischen Oberfläche, das bis anhin nicht gelöst ist (siehe auch Forschungsauftrag 10/68, Abschnitt V/6).

Es ist jedoch z. B. bekannt und beweisbar, dass der Grad der technischen Rauheit, den ein Oberflächen-Vorbehandlungsverfahren hervorruft, und der Grad der Haftfähigkeit, den es ergibt, mit einigen Ausnahmen in keinerlei eindeutigen Zusammenhang miteinander stehen.

So geht z. B. die Grösse der wahren Oberfläche eines Metalls aus Rauheitsmessungen nicht hervor, vielmehr sind Adsorptionsverfahren mit Sorbarsubstanzen bekannter Grösse und Struktur heranzuziehen, aus denen sich anhand von Adsorptionsisothermen die Grösse der wahren Oberfläche errechnen lässt.

Durch Verfeinerung der Versuchsmethodik sollte auf diesem wichtigen Gebiet der Oberflächenmesstechnik jedoch weitergearbeitet werden, da die Kenntnis der wahren Oberflächengrösse neben der Kenntnis anderer Eigenschaften zum Beurteilen der Haftfähigkeit von grossem Nutzen sein kann.

2.3 Porosität

Die Porosität kann sich insofern auf die Haftung auswirken, als sie eine Verankerung des Bindemittels am Gestein ermöglicht. Zisman hat darauf hingewiesen, dass bei Vorhandensein nennenswerter Poren, Risse und Kapillaren in der Gesteinsoberfläche das Bindemittel in die Poren eindringt und dadurch physikalisch am Gestein verankert wird.

Dabei kommt es aber, wie man glaubt, auf die Art der Herstellung und Anwendung des Bindemittels-Gesteingemisches an. Werden heisses Gestein und Bindemittel verwendet, so verringert die in den Poren eingeschlossene Luft bei der Abkühlung ihr Volumen, wodurch das Bindemittel in die Poren eingesaugt und eine bessere Verbindung geschaffen wird. Andererseits führt bei Verwendung eines kalten Bindemittels später eintretendes heisses Wetter zur Ausdehnung der eingeschlossenen Luft und zum Abdrängen des Bindemittelfilms.

2.4 Oberflächenüberzüge

Die im Strassenbau verwendeten Gesteine haben oft einen Oberflächenüberzug in Form von Staub oder adsorbierter Feuchtigkeit. Staub an der Oberfläche des Gesteins vermindert die Ausbreitung und Benetzung des Bindemittels und kann zu einer ungenügenden Haftverbindung führen. Um die Benetzung zu verbessern, empfiehlt es sich in solchen Fällen ein Bindemittel von niedrigerer Viskosität zu verwenden. Auch die verhärtete Staubschicht an der Oberfläche einiger Gesteine wird für sehr schädlich gehalten.

Die Trockenheit der Gesteinsoberfläche ist ebenfalls ein wichtiger Faktor für die Bildung der Klebeverbindung. Die frischen Bruchflächen trocknen, gebrochenen Gesteins adsorbieren an der Luft in wenigen Minuten einen Wasserfilm von nur einigen Molekülen Dicke. Die Verdampfung dieses Wasserfilms erfordert extrem hohe Temperaturen und ist daher unwirtschaftlich. Man nimmt an, dass das adsorbierte Wasser nur an der Oberfläche des Gesteins, nicht aber in den Poren und Kapillaren im Innern der einzelnen Gesteinskörner enthalten ist.

3. Eigenschaften des Wassers

Wasser in dampfförmiger oder flüssiger Form ist die Hauptursache vieler Haftmängel bei Strassenbaumischungen. In flüssiger Form dringt es durch die Hohlräume der Mischung in das Innere der Decke ein. Die bituminösen Filme um die Gesteinskörner besitzen, wie man annimmt, sehr kleine Poren, durch die das Wasser eindringen kann. In Heissmischbelägen, die extrem hohlraumarm sind und die deshalb wasserundurchlässig sind, spielt die Bindemittelablösung kaum eine Rolle.

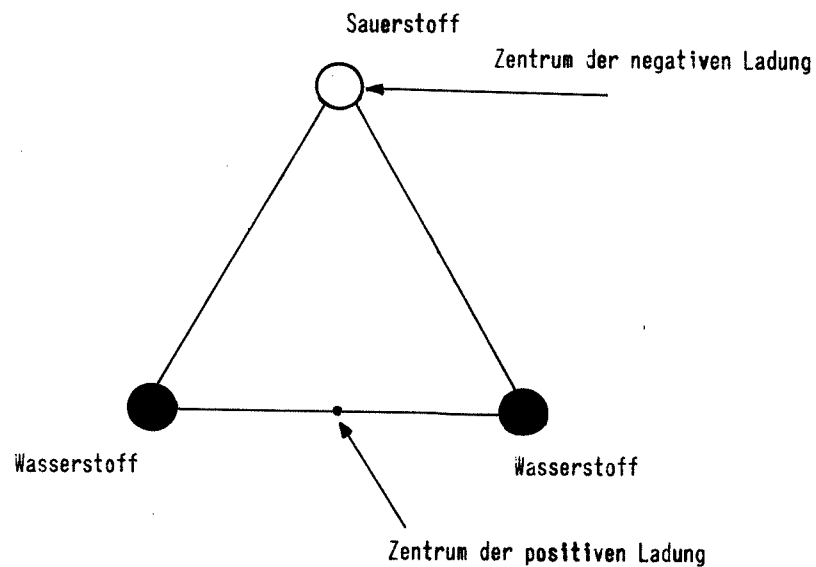
Bei gering bis stärker wasserdurchlässigen Belägen und speziell bei offenen Mischungen, wie Asphaltmakadam und Oberflächenbehandlungen, wo immer Wasser zugegen ist, ist die Bindemittelablösung ein Problem. Auch in Dampfform kann Wasser in die Mischung eindringen und eine Bindemittelablösung hervorrufen [1 und 2].

Wasser ist eine dipolare Flüssigkeit, und seine Moleküle werden im elektrischen Felde von der Oberfläche saurer Gesteine angezogen, wobei sie deren elektrische Ladungen absättigen (siehe Figur 4).

Der pH-Wert des Wassers soll bei den Hafterscheinungen eine gewisse Bedeutung haben; die Auffassungen in dieser Hinsicht sind aber zur Zeit noch geteilt.

Die chemische Zusammensetzung des Wassers und sein pH-Wert ist abhängig von der Geologie eines Gebietes, von menschlichen Eingriffen, von der Topographie, vom Klima und von der Vegetation.

Den pH-Wert des Wassers in Verbindung mit verschiedenen Gesteinsarten gibt die Tabelle 3, Seite 24, wieder.



Figur 4: Die Polarität von Wassermolekülen [1 und 2].

Tabelle 3: Gesteinsart und pH-Wert des Wassers

Substanz	pH-Wasser
nicht kalkhaltige Gesteine	6,0...6,6
kalkhaltige Gesteine	8,0...8,4
Humus	4,0...4,8
Regenwasser	5,9
Siderite (FeCO_3)	4,5

4. Zusammenstellung der Parameter, welche die Adhäsion im Asphalt beeinflussen

Dieser Ueberblick zeigt die relative Bedeutung vieler Eigenschaften von Gestein und Bindemittel im Adhäsions- und Ablösungs(Stripping)-Mechanismus.

Schlüsse und Hypothesen verschiedener Forscher bezüglich der Faktoren, die Adhäsion und Ablösung betreffen, sind in der Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Zusammenstellung der Parameter, welche die Adhäsion beeinflussen.

Autor und Methode	Aussage
Dr. A.R. Lee Direkte Messung des Kontaktwinkels	<u>Mineral-Zusammensetzung:</u> Für eine Oberfläche, die stark poliert und vorher benetzt ist, scheint die Mineral-Zusammensetzung die Adhäsion nicht zu beeinflussen. <u>Oberflächenstruktur:</u> Bei zum voraus benetzten Oberflächen hat das Bindemittel mehr Mühe, eine rauhe Oberfläche zu benetzen als eine glatte Oberfläche.
Bartell & Osterhof Ablösungsdruck	<u>Mineral-Zusammensetzung:</u> Die Adhäsionsarbeit zwischen Flüssigkeit und Festkörper variiert entsprechend den Eigenschaften des Festkörpers.

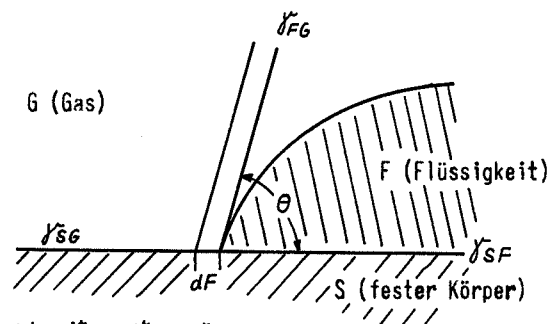
Autor und Methode	Aussage
Dow Adsorption des Bindemittels	<u>Mineral-Zusammensetzung:</u> Die Eigenschaften des Festkörpers beeinflussen die Stärke der Adsorption. Eine Einordnung nach fallender Adsorptionskraft wurde erhalten: Granit (hoch), Feldspat, Kentucky rock, Quarz. <u>Oberflächenstruktur:</u> Der Autor betrachtet die Kornform als unwichtig.
Wilhelmi Adsorption des Bindemittels	<u>Mineral-Zusammensetzung:</u> Die Eigenschaften des Festkörpers beeinflussen die Stärke der Adsorption. Eine Einordnung nach fallender Adsorptionskraft ergab sich wie folgt: Trinidad-Filler (hoch), Basaltschiefer, Kaolin, Porphyr, Granit, Kalk, Quarz, Kalkspat.
Ramchandani Adsorption des Bindemittels	<u>Mineral-Zusammensetzung:</u> Eine Skala nach fallender Adsorptionskraft wurde erhalten: Penmaenmawr (hoch), Delafilla, Quarzite, Mountsorrel-Granit, Kalkstein, Portlandzement (niedrig); der Autor vermutet, dass diese Einteilung nicht gültig ist für mineralogische und chemische Zusammensetzung.
Dr. A.R. Lee Ablösung des Bindemittels	<u>Oberflächentrockenheit:</u> Geringste Ablösung zeigt sich bei trocken umhüllten Gesteinen. So ergeben sich beim Plate Test gute Resultate bei Gesteinen mit trockener Oberfläche. <u>Eigenschaften des Bindemittels:</u> Schwach aromatische Teere zeigen nur geringe Ablösung, hoch viskose Bindemittel werden weniger leicht abgelöst als niedrig viskose.
Riedel und Weber	<u>Oberflächenstruktur:</u> unwichtig <u>Oberflächenspannung:</u> unwichtig <u>Porosität:</u> unwichtig <u>Mineral-Zusammensetzung:</u> Diese beeinflusst die Adhäsion.

Autor und Methode	Aussage
Geissler Riedel und Weber Test	<u>Mineral-Zusammensetzung:</u> Diese beeinflusst die Adhäsion nicht. Gesteine werden klassifiziert nach der bestimmten Adhäsion. <u>Gute Adhäsion:</u> Kalkstein, Basalt, Quarz, Porphy, Grauwacke, Schlacke. <u>Schlechte Adhäsion:</u> Syenit, Granit, Porphy, Trass.
Dr. Knight Riedel und Weber Test und mikroskopische Untersuchung	<u>Oberflächenstruktur:</u> Diese bestimmt vor allem die Adhäsion. Glasartige oder cryptokristalline Strukturen geben schlechte Adhäsion. <u>Gute Adhäsion:</u> Hornblende, Kalzit, Dolomit. <u>Schlechte Adhäsion:</u> Quarz, Flint, Kreide, oolithischer Kalkstein.
Williams pH-Messung	Chemische Reaktion der Oberfläche. Es wird gezeigt, dass sich alle Gesteine gegenüber Wasser alkalisch verhalten, ausgenommen Quarz, welcher schwach sauer ist, sowie neutrale Gesteine. Die pH-Werte liegen ziemlich dicht beisammen und geben keine Möglichkeit zur Berechnung von Unterschieden in der Grösse der Adhäsion.

IV THEORETISCHE BETRACHTUNG DER HAFTUNG; ADHAESION5. Benetzung

Wie in Kapitel II erwähnt, ist die Benetzung eine wesentliche Voraussetzung für das Haften. Die Ermittlung von Benetzungsvorgängen und grenzflächenenergetischen Messungen ist wohl das älteste und bekannteste Messverfahren der Adhäsionsforschung. In der Literatur sind darüber ebenso zahlreiche wie widersprüchliche Ergebnisse und Theorien zu finden.

Ausgangspunkt aller grenzflächenenergetischen Untersuchungen ist der bekannte Tropfen einer Flüssigkeit bekannter Oberflächenspannung auf einem Festkörper mit einem bestimmten Randwinkel θ [21].



$$\begin{aligned}
 W_a &= \gamma_{SG} + \gamma_{FG} - \gamma_{SF} \\
 \gamma_{SF} \cdot dF + \gamma_{FG} \cos \theta \cdot dF - \gamma_{SG} \cdot dF &= 0 \\
 \gamma_{SG} &= \gamma_{SF} + \gamma_{FG} \cdot \cos \theta \\
 W_a &= \gamma_{FG} (1 + \cos \theta) \\
 \text{Für } \theta &= 0 \\
 W_a &= 2 \gamma_{FG} = W_K
 \end{aligned}$$

Figur 5: Schema der Benetzung eines Festkörpers durch eine Flüssigkeit.

Unter der Voraussetzung, dass zwischen Flüssigkeit und Festkörper keine Vermischung, also keine irreversible oder chemisorptive Bindung eintritt, lassen sich mit Hilfe der Oberflächenspannungen, die definitionsgemäss Energien sind, die bekannten Youngschen, Dupréschen und Wenzelschen reversiblen Gleichgewichtsgesetze aufstellen. Wichtigste Gleichung ist diejenige von Dupré, die Auskunft über

die Grösse der "Adhäsionsarbeit" erteilt, jener Energie also, die bei der Entstehung der Grenzfläche Flüssig-Fest gegenüber dem unbenetzten Zustand frei geworden ist. Sie muss nämlich, da Reversibilität angenommen wird, zum Trennen der Flüssigkeit vom Festkörper wieder zugeführt werden und sollte daher ein direktes Mass für die Haftfestigkeit sein.

Sowohl die Oberflächenspannung γ_{FG} der Flüssigkeit (wobei auch Lack oder Klebstoff dienen können) als auch der sich einstellende Randwinkel θ auf dem Festkörper sind exakt messbar. Nachdem es in neuerer Zeit auch gelungen ist, die Oberflächenspannungen γ_{SG} von Festkörpern mit Hilfe der kritischen Oberflächenspannung messtechnisch zu bestimmen, steht einer experimentellen und rechnerischen Ermittlung von Adhäsionsarbeiten in benetzenden Systemen nichts im Wege. Allerdings stellte sich nun heraus, dass die immer noch vertretene Hypothese über den direkten Zusammenhang zwischen Adhäsionsarbeit und wirklicher Haftfestigkeit nicht zutrifft. Auch die Hypothese von Sharpe und Schonhorn, dass die Adhäsion um so besser sein müsse, je grösser die Oberflächenspannung des Festkörpers gegenüber derjenigen der Flüssigkeit sei, ist nicht haltbar. Zwar gelang es in jüngster Zeit erneut, an Klebverbindungen von Polydimethylsiliconen und Polyäthylen durch ionisierte Gase die Oberflächenspannung zu erhöhen und Zuordnungen zur Steigerung der Haftfestigkeit zu finden. Dennoch reicht diese einfache Betrachtungsweise, welche die Natur der Adhärenzen nicht berücksichtigt, kaum aus, und einfache Versuche beweisen die sehr beschränkte Gültigkeit.

Sicherlich besteht kein Zweifel daran, dass eine Benetzung des Festkörpers durch den anderen Adhärenzen unbedingte Voraussetzung für das Entstehen der Adhäsion ist. Die Oberflächenspannung des Festkörpers muss also gleich oder grösser als die des flüssigen sein. Zur Feststellung dieser Tatsache sind Benetzungsmessungen durchaus auch in der Praxis brauchbar. Hinreichend für fest Adhäsion aber sind die erwähnten Voraussetzungen nicht, vermutlich deswegen, weil die theoretisch notwendige Randbedingung dieser Betrachtungen, nämlich Reversibilität der Benetzung, nicht oder nur in

wenigen Fällen erfüllt ist, da Chemosorption ein entscheidender Faktor der Adhäsion ist, wie wir heute sehr genau wissen, und was man auch beweisen kann. Man kann es daher einfach formulieren: "Was die Adhäsion wirklich ausmacht, kommt nach der Benetzung".

Dennoch wandte sich die Grenzflächenthermodynamik völlig neuen Ueberlegungen zu, deren Ergebnis wesentlich sinnvoller ist als das, was anhand der Adhäsionsarbeitstheorie bis heute zuweilen und unbewiesen behauptet wird. Betrachtet man nämlich die Grenzflächenenergie zwischen Festkörper und Adhärenz als eine Energiediskontinuität im System der haftenden Körper, an der bevorzugt durch Spannungs-konzentrationen der Bruch unter Last entstehen kann, dann gelangt man zu dem Schluss, dass die Haftfestigkeit steigen muss, wenn diese Diskontinuität abnimmt. Und das heisst nichts anderes, als dass die Grenzflächenenergie zwischen den Adhärenzen möglichst klein sein soll. Diese Annahme von Wolf steht zwar in direktem Widerspruch zu noch 1970 veröffentlichten Ausführungen von Zurbrück, der eine direkte Proportionalität zwischen Grenzflächenspannung und Haftfestigkeit postuliert. Trotzdem ist aber die Wolfsche Hypothese richtig, weil sie von Dykerhoff und Sell bewiesen werden konnte.

Sie wählten polierte Edelstahloberflächen, und adsorbierten an ihnen Carbonsäuren unterschiedlicher Kettenlänge. Auf diese Weise erhielten sie geometrisch und auch sonst vollkommen gleichartige Oberflächen, die sich ausschliesslich durch ihre Grenzflächenenergie unterschieden. Daneben gelangten auch Kunststoffe zum Einsatz. Auf die Oberflächen applizierten sie verschiedene Kunststoffe und Lacke bekannter Oberflächenspannungen und ermittelten die Haftfestigkeit, wobei kontrolliert wurde, inwieweit der Bruch tatsächlich in der Grenzschicht zwischen sorbierten Säuremolekülen und den aufgetragenen Adhärenzen verlief. Optimale Haftfestigkeiten ergaben sich jeweils dann, wenn Festkörper und Adhäsiv praktisch die gleiche Oberflächenspannung besaßen, was für gute Benetzung voll und ganz genügt. Darüberhinaus ergab sich in allen Fällen mit abnehmender Grenzflächenspannung, also der Verringerung der Energiediskontinuität, eine Steigerung der Haftfestigkeit.

Aus diesen Messergebnissen lassen sich nun tatsächlich für Adhäsionsvorgänge und deren Voraussage praktische Konsequenzen ziehen, so dass Messungen der Oberflächen- und Grenzflächenspannungen sowie der Randwinkel zum Ermitteln von Adhäsionsvorgängen geeignet erscheinen.

Immerhin bleiben auch diese Erkenntnisse nicht ohne Problematik. Denn einerseits sind die Haftfestigkeiten der Adhäsive auf Kunststoffen und Metall trotz vollkommen gleicher Grenzflächenspannungen verschieden. Die gewonnenen Erkenntnisse sind also noch nicht beliebig auf andere Adhäsionssysteme übertragbar. Daraus folgt, dass bisher grenzflächenenergetische Untersuchungen sicher einen Einblick in bestimmte Zusammenhänge von Adhäsionserscheinungen geben. Ein allgemein gültiges Messverfahren für die Vorausbestimmung von Adhäsionsvorgängen in unterschiedlichen Haftkombinationen sind sie jedoch im derzeitigen Stadium noch nicht.

6. Der Mechanismus der Haftung; Allgemeines

Die Haftung bituminöser Bindemittel an Strassenbausteinen ist ein sehr komplexer Vorgang, bei dem viele Faktoren zusammenwirken. Von den vorgetragenen Theorien geben die meisten keine befriedigende Erklärung für die Hafterscheinungen. Die wichtigsten dieser Theorien hat Rice in seiner systematischen Uebersicht zusammengefasst, die im folgenden wiedergegeben ist. Nach der mechanischen Theorie stehen die Oberflächentextur und die mechanische Verankerung des Bindemittels im Vordergrund der Betrachtung. Diese Theorie wurde zuerst von Mc Bain (1926) aufgestellt, der darauf hinwies, dass das Klebemittel in die Poren und Unregelmässigkeiten der Oberfläche gedrückt und so eine mechanische Verankerung herbeigeführt wird. Wenn eine gute Benetzung zustande kommt, ist in einem solchen System die Verbindung viel fester als bei einer glatten Oberfläche.

Die Theorie hat viele Anhänger gefunden. Unter anderem haben Oberbach (1936) und Knight (1938) sich die Auffassung zu eigen gemacht, dass die von der mineralogischen Zusammensetzung abhängige Oberflächentextur die mechanische Verankerung des Bindemittels beeinflusst, und dass raue Gesteinsoberflächen und unregelmässige Formen der Gesteinsteilchen die Haftung verbessern.

Auf Mc Bain und Lee sowie auf Mack geht die Theorie der molekularen Orientierung zurück, die besagt, dass sich die Moleküle der chemischen Verbindungen im Bitumen, wenn sie mit einer Gesteinsoberfläche in Berührung kommen, so ausrichten, dass sie den Energiebedarf der Gesteinsoberfläche in höchstmöglicher Masse befriedigen. Die Dicke der orientierten Molekülschicht wird als extrem gering angesehen, in der Grössenordnung von Nanometern (10^{-9} m).

Eine weitere Auffassung geht dahin, die Haftung auf eine chemische Reaktion zwischen den Verbindungen des Gesteins und des Bindemittels zurückzuführen. In Uebereinstimmung mit dieser Theorie haben einige Forscher eine chemische Einteilung der Gesteine in saure und basische Arten vorgenommen, die sich in ihren Hafteigenschaften und chemischen Reaktionen unterscheiden. Andere Forscher haben die Vorstellung einer chemischen Reaktion heftig bestritten und jeden Zusammenhang zwischen chemischer Zusammensetzung und Hafteigenschaften abgelehnt.

Am meisten Anklang gefunden hat wohl die Theorie der Grenzflächenenergie, die sowohl die Benetzung und Ausbreitung als auch die Ablösung des Bindemittels vom Gestein als thermodynamische Vorgänge betrachtet, mit deren Ablauf Änderungen der freien Oberflächenenergie des Systems verbunden sind.

Bei dieser Theorie wird der Einfluss der Polarität der Moleküle auf die Haftung besonders betont. Polare Flüssigkeiten, die leichter in der Lage sind, ihre freie Oberflächenenergie auf den thermodynamisch stabilen Zustand des Energieminimums zu verringern, werden von einer Gesteinsoberfläche stärker angezogen als nicht polare Flüssigkeiten. Diese Vorstellung ist geeignet, die Ablösung oder Trennung des Bindemittels vom Gestein durch Wasser als einer stark polaren Flüssigkeit zu erklären.

7. Theorien zur Haftung, Adhäsion [87]

Die Adhäsion ist keine spezifische Materialeigenschaft. Sie wird erst erkennbar, wenn zwei Stoffe miteinander in engster Berührung stehen. Die Ursachen für das Zustandekommen der Erscheinung "Adhäsion" werden unterschiedlich beschrieben. Verschiedene Theorien bzw. Hypothesen wurden aufgestellt, die sich zum Teil ergänzen, teilweise aber widersprechen.

7.1 Mechanische Adhäsion

Dabei wird angenommen, dass das verklebende Bindemittel rein mechanisch in der Feststoffoberfläche verankert ist.

7.2 Spezifische Adhäsion

Unter diesem Begriff sind verschiedene Erscheinungen zwischenmolekularer Anziehungskräfte zusammengefasst:

P o l a r i s a t i o n
D i f f u s i o n
A d s o r p t i o n
D i s p e r s i o n
C h e m i s o r p t i o n u.a.

Polarisationstheorie

Sie beruht auf der Ueberlegung, dass sich Moleküle mit asymmetrischer Ladungsverteilung, sogenannte Dipole, gegenseitig beeinflussen. Dabei unterscheidet man zwischen permanent elektrischen und induzierten Dipolen. Die Polarisationstheorie ist nicht imstande, die Adhäsion an unpolaren Stoffen zu erklären. Trotzdem ist es ziemlich sicher, dass die Polarität bei Vorgängen an Grenzflächen eine wichtige Rolle spielt. Häufig ist es möglich, durch Zugabe polarer Substanzen zu wenig polaren Medien, deren Hafteigenschaften auf Feststoffoberflächen wesentlich zu verbessern. Besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang der Wasserstoffbrückenbindung zu.

Diffusionstheorie

Sie erklärt die Adhäsion durch Molekularbewegung, d. h. Moleküle sollen vom Bindemittel zur Feststoffoberfläche und umgekehrt wandern. Untersuchungen haben die Theorie bestätigen können. So wurden z. B. Diffusionsgeschwindigkeiten in der Grössenordnung um 10^{-10} mm/sec gemessen. Es besteht eine Abhängigkeit zur Molekülstruktur und zum Molekulargewicht.

Adsorptionstheorie

Sie geht von dem Grundgedanken aus, dass Adhäsion und Benetzung gleiche Bedeutung zukommt; und widerspricht damit den Vorstellungen der Polarisations-theorie. Die Adhäsion eines Bindemittels auf einer Feststoffoberfläche wird von der Oberflächenenergie der flüssigen Phase, bzw. deren Benetzungswinkel festgelegt. Dabei muss die Energie der Feststoffoberfläche kleiner sein als die des Bindemittels. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass die Adhäsionstheorie von vielen Ausnahmen durchbrochen wird.

Dispersionstheorie

Die Dispersionskräfte, auch London-Kräfte genannt, wirken im molekularen Bereich durch die gegenseitige Beeinflussung von Kernladungen und Elektronen. Sie sind nichtpolar. Die Dispersionskräfte stellen bei organischen Verbindungen den Grossteil der Kohäsionskräfte. Die Dispersionstheorie zieht die London-Kräfte auch zur Erklärung der Adhäsion heran, wobei man von der Vorstellung ausgeht, dass sich die äusseren Elektronenschalen der Moleküle etwas durchdringen und auf diese Weise Bindungskräfte entstehen.

Chemisorption

Im Gegensatz zur physikalischen Adsorption, bei der nur schwache Bindungskräfte wirksam werden, tritt bei der chemischen Adsorption oder Chemisorption im Verlauf einer echten Reaktion eine stabile Verankerung auf der Feststoffoberfläche ein. Bezeichnend für den Ablauf der Chemisorption ist, dass der

Vorgang zum Stillstand kommt, wenn die Oberfläche des Feststoffes mit einer ein Molekül starken Schicht des Adsorbats bedeckt ist. Meistens erscheint die Oberfläche des Feststoffes heterogen und weist unterschiedliche Adsorptionskraft auf. Ecken, Kanten und Grate bilden sogenannte aktive Zentren, Punkte mit besonders hoher Energiedichte. Auf diese konzentriert sich die Chemisorption.

Allgemeines

In den meisten Fällen läuft ein Adhäsionsvorgang nicht nach einem bestimmten theoretischen Weg ab, vielmehr sind immer mehrere Vorgänge zu erwarten, die nebeneinander und gleichzeitig stattfinden. Es liegt in der Natur der komplexen physikalischen und chemischen Grenzflächenprozesse, dass eine Beschreibung der Geschehnisse auf Schwierigkeiten stösst. Aus diesem Grunde sind viele theoretische Ueberlegungen als Modellvorstellungen zu betrachten.

V THEORETISCHE BETRACHTUNG DER ABLOESUNG DES BINDEMITTELS (STRIPPING) VOM MINERAL, EINFLUSS DES WASSERS

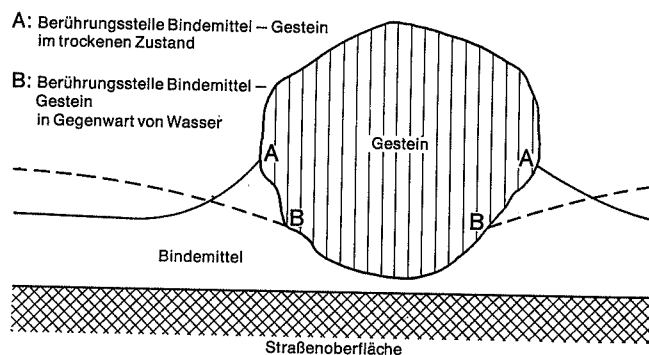
8. Allgemeines

Es können zwei Fehlermöglichkeiten unterschieden werden: Mangelhafte Kohäsion und mangelhafte Adhäsion. Im ersteren Fall liegt die Fehlerebene innerhalb des Bindemittels, das die Gesteinsteilchen voneinander trennt. Für die mangelhafte Adhäsion dagegen ist es kennzeichnend, dass die Trennung ganz oder teilweise in der Grenzfläche zwischen Bindemittel und Gestein verläuft. Bei Mischungen, für die trockenes, sauberes Gestein verwendet wurde, trifft man gewöhnlich nur Mängel hinsichtlich der Kohäsion an. Adhäsionsfehler andererseits treten bei bituminösen Mischungen in Gegenwart von Wasser in Erscheinung. Im folgenden Abschnitt sollen die verschiedenen Theorien betrachtet werden, die man zur Erklärung von Haftungsmängeln in Form der Bindemittelablösung und der Trennung des Bindemittels von der Gesteinsoberfläche entwickelt hat.

9. Beschreibung der Theorien

9.1 Verdrängungstheorie

Die Bindemittelverdrängung, vielfach als Bindemittelablösung bezeichnet, ist eine bekannte Erscheinung. Zu ihrer Erklärung betrachtet Blott den Gleichgewichtszustand eines Gesteinsteilchens, das in einen Bindemittelfilm eingebettet ist (siehe Figur 6). Die in trockenem Zustand durch den Punkt A gegebene Berührungsstelle befindet sich nach Wasserzutritt nicht mehr im Gleichgewicht, sondern zieht sich auf der Gesteinsoberfläche bis zu Punkt B zurück. In dieser Position hat der Randwinkel für das verwendete Gestein und das verwendete Bindemittel seinen Gleichgewichtswert.



Figur 6: Zurückdrängen des Bindemittels auf der Gesteinsoberfläche durch Wasser.

Aus den Versuchen von Blott auf der Strasse und im Laboratorium geht hervor, dass die Bindemittelverdrängung nur dann zu eigentlichen Haftschäden führt, wenn das Gestein nicht ausreichend benetzt war. Im Gegensatz dazu machen Lee und Nicholas die Bindemittelkontraktion für viele durch Wassereinwirkung hervorgerufene Schäden verantwortlich. Allerdings hängt die Verdrängung des Bindemittels von dessen Viskosität ab, d. h. hochviskose Bindemittel setzen ihrer Verdrängung durch Wasser einen grösseren Widerstand entgegen.

Die Vorstellung von der Bindemittelverdrängung gibt in erster Linie eine Erklärung für Haftschäden, wie sie bei Oberflächenbehandlungen und teilweise umhüllten Gesteinsmischungen beobachtet werden. Sie reicht aber nicht aus, solche Fehler bei gut umhülltem Gestein zu erklären, es sei denn, dass die Gleichmässigkeit der Umhüllung zerstört wurde und die Grenzfläche dem Wasser ausgesetzt ist.

9.2 Trennungs- oder Ablösungstheorie

Die Theorie der Trennung des Bindemittels von der Gesteinsoberfläche (detachment) betrachtet den Fall, wo zwar die bituminöse Umhüllung des Gesteins erhalten bleibt, eine Bindemittel und Gestein aber nicht mehr besteht. Man schreibt diese Trennung einem thermodynamisch bedingten Ersatz des Bitumens durch einen dünnen Wasserfilm zu, wobei das Wasser von aussen oder aus dem Gestein kommen kann.

Es wird angenommen, dass eine enge Verbindung zwischen der Gesteinsoberfläche und dem Wasser in der Grenzfläche eintreten kann. Mit Staub verunreinigte Gesteinskörner können ebenfalls zu einer Trennung zwischen Bindemittel und Gestein Veranlassung geben. Die Vorstellung von der Trennung des Bindemittels vom Gestein wurde von Hubbard (1938), Wilhelmi und Schulze (1955) und Hughes (1960) entwickelt und ihre Gültigkeit experimentell bewiesen.

Nach Hughes tritt die Trennung am häufigsten bei Mineralien mit hohem Quarz- und Feldspatgehalt auf. Dieser Autor führt auch an, dass bei umhülltem Gestein, das sich im Zustand der Trennung befindet, in trockener Luft eine Wiederverklebung stattfindet, und zwar leichter, wenn es sich um niedrigviskose Bindemittel handelt.

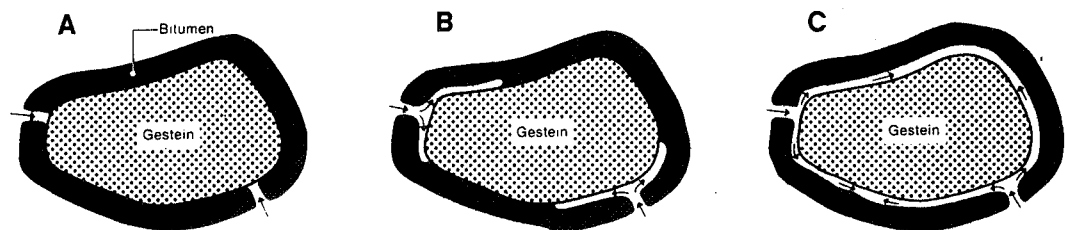
9.3 Filmbruchtheorie

Bei bituminösen Mischungen mit völlig umhülltem Gestein kann die Bindemittelablösung durch die bisher diskutierten Theorien nicht erklärt werden, es sei denn, man nähme an, dass bereits ein Reißen des Bindemittelfilms eingetreten ist. Eine solche Filmzerstörung ist am ehesten an den scharfen Kanten des Gesteins, wo der Film am dünnsten ist, zu erwarten. Sie kann ausgelöst werden durch die Spannungen, die unter der dynamischen und knetenden Wirkung des Verkehrs entstehen. Wenn der Bindemittelfilm unterbrochen ist, kann das Bitumen durch Wasser von der Oberfläche des Gesteins verdrängt werden.

9.4 Porendrucktheorie

Die Einwirkung des Wassers auf bituminöse Mischungen ist so verwickelt, dass eine einzige Theorie resp. Hypothese zur Erklärung vielleicht nicht ausreicht. Lee und Nicholas nehmen als mögliche Ursache für Fehlschläge dieser Art die Entwicklung eines Porendruckes in der Decke an. Bei Mischungen mit hohem Porenvolumen, z. B. bei gewissen Tragschichtmischungen, kann sich das Wasser in den Hohlräumen frei bewegen. Oft wird infolge der Nachverdichtung unter dem Verkehr in einer Decke Wasser eingeschlossen oder am Abfluss gehindert. Dieses Wasser ist in häufiger Bewegung und kann daher zu beträchtlichem Porendruck Anlass geben. Diese Druckkräfte, die wesentlich grösser sein können als die thermodynamischen Kräfte, werden als Ursache für die Bindemittelablösung betrachtet.

Wie der Angriff des Wassers auf ein mit Bitumen umhülltes Steinkorn vor sich geht, wird in Figur 7, durch drei schematische Zeichnungen veranschaulicht.



Figur 7: Modellvorstellung einer Bindemittelablösung durch Wasserdruck.

Im ersten Stadium (A) sucht sich das Wasser einen Weg zum Kontakt mit der Gesteinsoberfläche, dann unterwandert es die Umhüllung von den Kontaktstellen aus (B), bis es am Ende das Korn umhüllt und das Bindemittel völlig vom Korn getrennt ist (C).

Allgemeines

Von diesen vier Theorien (Abs. 9.1 bis 9.4) können die Verdrängungs-, die Ablösungs- sowie die Porendrucktheorie als die wichtigsten angesehen werden, während Filmbruch nur in geringerem Masse zu dem Phänomen Haftfestigkeit beiträgt.

VI PRUEFTECHNIK

10. Allgemeines

Für die Prüfung der Haftfestigkeit im Laboratorium sind in der Literatur zahlreiche Verfahren beschrieben worden.

In der Prüftechnik komplizieren sich die Verhältnisse dadurch, dass

- "adhäsive" - zwischen Bitumen und Gestein wirkende - und "kohäsive" - innerhalb des Bindemittels wirkende Kräfte - messtechnisch kaum zu trennen sind;
- die "Adhäsion" im Zweiphasensystem Bindemittel/Gestein kaum praktische Bedeutung hat, vielmehr das im ternären System Bindemittel/Gestein/Wasser aus den unterschiedlichen Grenzflächenspannungen resultierende Verhalten für Prüfung und Anwendung ausschlaggebend ist;
- wegen der hohen Bindemittelviskosität die Verdrängung des Bindemittels durch Wasser von der Gesteinsoberfläche zeitabhängig wird. Expositionsdauer und -temperatur, Filmdicke*) und Konsistenz des Bindemittels, Grösse der durch Bindemittel und Wasser effektiv benetzten Oberflächenanteile, Hohlraumgehalt und Porendurchmesser von Asphalten

bekommen damit bestimmenden Einfluss auf das Prüfungsergebnis, das zudem wegen der im Strassenbelag abweichenden Verhältnisse und der meist fehlenden dynamischen Beanspruchung nicht willkürlich vom Laboratorium auf die Praxis zu übertragen ist [13].

Fünf Variable, vorwiegend thermodynamischer Art, liegen jeder Prüfung der "Adhäsion" zugrunde und gehen in das Prüfungsergebnis ein: Kontaktwinkel und Grenzflächenspannung, Oberflächengrösse, -rauigkeit und -energie.

Die mannigfaltig vorgeschlagenen Prüfverfahren lassen sich grob nach der Art der Beanspruchung, der Messgrösse und des Prüfgutes gliedern. Es sind dabei folgende Kategorien zu unterscheiden:

11. Kategorien von Prüfverfahren

- ① Bestimmung von Materialkennwerten (z.B. Bindemittel: Kontaktwinkel; Asphalt: E-Modul etc.)
- ② Splittablösprüfung. Lockerung eingebetteter Einzelsplittkörner nach Wasserlagerung.
- ③ Wasserlagerungsprüfungen, Aenderung des Umhüllungszustandes loser Kornhaufwerke nach Wasserlagerung
 - a) unter statischen Bedingungen
 - b) unter dynamischer Beanspruchung
 - c) unter chemischer und/oder thermischer Beanspruchung

./.

-
- *) Bei vergleichenden Untersuchungen von Gesteinen an Einzelkörnungen mit festgesetztem Gewichtsanteil Bindemittel wird oft der individuelle Bindemittelanspruch übersehen. Höhere Gesteinsdichten führen zu einer geringeren Anzahl von Einzelkörnern pro Bitumenmenge und somit - bei vergleichbarer Kornform und Rauigkeit - zu einer kleineren Oberfläche. Aus dem dann dickeren Bindemittelfilm ergibt sich für Gesteine höherer Dichte eine viskositätsbedingt langsamere Verdrängung des Bindemittelfilms bei Wassereinwirkung und somit eine zügünstige Beurteilung gegenüber Gesteinen geringerer Dichte.

- ④ Wasserlagerungsprüfungen unter Nachahmung der Verkehrsbeanspruchung. Verschleissprüfungen an verdichteten, meist wassergelagerten Modell-asphalten.
- ⑤ Mechanische Prüfungen nach Wasserlagerung. Verformungswiderstand/Kohäsionsverlust an verdichteten, wassergelagerten Asphalten.
- ⑥ Zerstörungsfreie Prüfung mit Schall an Prüfkörpern
- ⑦ Prüfung mit Ultraschall an Mischgut
- ⑧ Versuchsbahnen. Prüfstandversuche an Modell-asphalten oder Ausbaustücken unter dem rollenden Rad.

12. Zusammenstellung der bestehenden Prüfverfahren

Tabelle 5

Nr.	Methode/Autor	Gruppe	Prüfgut/Weg	Messgrösse
①	<u>Bestimmung von Materialkennwerten</u>			
1	Thelen u.a.	(1)	Schattenriss eines Asphaltfilms auf Gesteinsplatte. Wasser und Temperatur.	Kontaktwinkel, direkt
2	Barth + Nellen Steyn	(1)	wie vor, aus Tropfdimensionen berechnet.	Kontaktwinkel, indirekt
3	Fowkes + Harkins / Tilting Plate Methode	(1)	Orientierung eines drehbar angeordneten Gesteinsplättchens beim Eintauchen.	Kontaktwinkel, indirekt
4	Statens Väg Institute	(1)	Kornabgestuftes Mineral; konkurrierende Benetzung durch Wasser/Bindemittel	hydrostatische Grenzlast

Nr.	Methode/Autor	Gruppe	Prüfgut/Weg	Messgrösse
5	Ensley + Scholz Benetzungswärme	(1)	Kornfraktion in schmelzflüssiges Bitumen einwerfen (Kalorimeter).	Wärmetönung
6	Ariano	(1)	Geschliffene, bindemittelverklebte Platten; 2 Referenzgesteine.	Abreisskraft
7	Bikermann (Peeling Test)	(1)	Sandwich aus Gesteinsplatte/Bitumen/Aluminium	Zeit bis zur Ablösung unter konstantem Zug
② <u>Splittablösprüfung</u>				
8	Detachment-Test	(a,3a)	Splitt in Bindemittel in Schale leicht eingedrückt, Wasserlagerung.	Ablösen in Gew.-%
9	Ewers + Walter	(2,3a)	Splitt in Schale in Bindemittel eingebettet, Wasserlagerung.	Fallversuch mit Schale, Splittbindevermögen in Gew.-%
③ <u>Wasserlagerungsprüfung</u>				
10	Lee-Test	(3a)	Mineral in Asphaltfilm eingepresst, Wasserlagerung	Haftvermögen
11	DIN 1995 U 36 Wasserlagerung	(3a)	"Norm"-Basaltsplitt 8/12, umhüllt, unverdichtet.	Ablösungsgrad, geschätzt
12	ASTM D 1'664-	(3a)	Kornfraktion 6,3 bis 9,5 mm umhüllt, unverdichtet.	Ablösungsgrad, geschätzt

Nr.	Methode/Autor	Gruppe	Prüfgut/Weg	Messgrösse
13	Hveem/Skog + Zube Safranin-Adsorption	(3a)	Unbehandelter sowie umhüllter, wassergelagerter Splitt jeweils mit Farbstoff behandelt.	kolorimetrisch (Quotient)
14	Tracer-Technik	(3a)	Vorimprägnation der Gesteinsoberfläche mit radioaktivem CaCl_2 , Umhüllung, Wasserlagerung.	α β γ , n-Stahlung des Eluats
15	Li + -Technik	(3a)	wie 14, aber mit Lice imprägniert.	flammenphotometrische Untersuchung des Eluats
16	Paulmann u.a. Berechnungstest	(3c)	Umhüllter Splitt, unverdichtet, mit temperiertem Wasser überbraust.	Ablösungsgrad geschätzt
17	Nicholson-Test	(3b)	Umhüllter Splitt, temperiertes Wasser, mechanische Bewegung.	Ablösung geschätzt
18	Wash-Test (Tyler)	(3b)	Wie 17, schütteln.	Ablösungsgrad geschätzt Skala 0 - 10 0: keine Ablösung 10: starke Ablösung
19	Riedel + Weber	(3c)	Umhüllter Splitt, unverdichtet, Kochen in Na_2CO_3 -Lösungen steigender Konzentration.	kritische Sodakonzentration
20	Holmes Displacement-Test	(3a)	Aehnlich Riedel + Weber.	Ablösungsgrad geschätzt
21	Oberbach J.	(3a)	Aehnlich Riedel + Weber.	Ablösungsgrad geschätzt

Nr.	Methode/Autor	Gruppe	Prüfgut/Weg	Messgrösse
<u>④ Wasserlagerungsprüfungen unter Nachahmung der Verkehrsbeanspruchung</u>				
22	Schulze + Breuer Abriebtest	(4)	Korngestuftes, zu Prüfkörpern verdich- teter Modellasphalt; Wasserlagerung; Schütteln unter Was- ser.	Abriebverlust
23	Cold Water Ab- ration Test	(3b,4)	Asphalt-Probekörper in Schüttelgerät, 4 Tage Wasserlage- rung.	Abriebverlust in Gew.-%
24	Surface Water Abrasion, Test nach ZUBE/SKOG Prallabrieb	(3b,4)	Verdichtete Proben oder Ausbaustücke, Abrieb durch auf- prallende Gummibälle.	Abriebverlust
25	Brit. Road. Res. Labora- tory Immersed Wheel Tracking Test	(4)	Offenporiger, ver- dichteter Makadam; Wasserlagerung (40° C), Radüber- gänge.	Zahl der Ueber- gänge bis zum Bruch
<u>⑤ Mechanische Prüfungen nach Wasserlagerung</u>				
26	Brand Spaltzugfe- stigkeit	(5)	Korngestuftes, zu Prüfkörpern verdich- teter Modellasphalt; Wasserlagerung; Druckbeanspruchung.	Zugbruchspan- nung
27	Ewers/Riedel/ Walther	(3b,5)	Feinkörniger, zu Prüfkörpern verdich- teter Modellasphalt; Stahlkeil.	Anzahl Schläge bis zur Spal- tung
28	Immersion-Com- pression-Test nach ASTM 1'075-54; Druckfestig- keitsabfall nach Wasser- lagerung	--	Zylindrische Probe- körper, verschiedene Wasserlagerungen.	Quotient Druckfestig- keiten vor und nach Was- serlagerung

Nr.	Methode/Autor	Gruppe	Prüfgut/Weg	Messgrösse
29	Water-Susceptibility-Test, Wasserempfindlichkeitstest	(5)	Wasserlagerung von Prüfkörpern mit Bohrung Vakuum, Wassereinsaugen.	Stabilität, Kohäsion und Quellung
30	Marshall-Versuch	(5)	Verschiedene Wasserlagerungen und Frostwechsel.	Stabilität und Fließwert
<u>⑥ Zerstörungsfreie Prüfung mit Schall an Prüfkörpern</u>				
31	Andersland Schallprüfung	(6a)	Prüfkörper oder gesägte Ausbaustücke werden mit 20 bis 20'000 Hertz durchschallt.	Änderung der Vibrationsfrequenz nach Wasserlagerung (E-Modul)
<u>⑦ Prüfung mit Ultraschall an Mischgut</u>				
32	Lassalle, H.J. Ultraschall	(6b)	Mischgut, Beschallung	Ablösung in Gew.-%
33	Schmidt J./Schniering A. Ultraschall	(6b)	Mischgut, Beschallung in destilliertem Wasser bzw. Salzlösung.	Ablösung des Bindemittels in Gramm, in Funktion der Salzkonzentration
<u>⑧ Versuchsbahnen</u>				
34	Mack u.a. Versuchsbahn mit rollendem Rad	(7)	Asphalt in Rundlauf	Abriebmessung Verformung

13. Wertung von Prüfverfahren [13]

Wichtige Kriterien für die Aussagekraft von Prüfverfahren sind:

- zeitgeraffte und einfache Durchführung
- realistische, d. h. möglichst praxisbezogene, Prüfbedingungen
- objektiv messbare Ergebnisse sowie exakte Dimensionen
- äquidistante Wertung
- hinreichende Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit
- zur Differenzierung ausreichende Spannbreite

In der Prüfpraxis werden die oben erwähnten, teils gegenläufigen Forderungen bisher nur unzureichend erfüllt. Das den adhäsiven Beitrag von Bindemitteln kennzeichnende Ergebnis fällt nur indirekt in so unterschiedlichen Dimensionen, wie "Umhüllungsgrad (% Oberfläche)", "Abriebsverlust (Massen-%)", "Zeit bis zum Versagen (min)", Stabilitätsverlust (Δ kN)", Benetzungsentalpie (μ cal/sec/g)", "Grenzflächen-spannung (N/mm²)", "kritische Ablösetemperatur (°C)" und "Konzentration kritischer Sodalösung (g/ml)", an, so dass die Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander und mit der Praxis nur sehr beschränkt möglich ist. Hervorzuheben ist ferner die Schwierigkeit, definierte Referenzsubstanzen (Bezugsgestein oder -bindemittel) über längere Zeit bereitzustellen und die Oberflächenbeschaffenheit von Referenzgesteinen durch exakte Konditionierung stets und überall konstant zu halten. Eine Reihe üblicher Prüfverfahren ist in Tabelle 5, Seiten 40 bis 44, zusammengestellt.

Bei solchen Verfahren ist es nicht unproblematisch, zwecks Zeitraffung praxisfremde Temperaturen und/oder praxisfremdes Milieu (Alkali!) einzusetzen, da dann das individuelle Viskositäts/Temperatur-Verhalten (η /T-Verhalten) oder chemische Reaktionen das Prüfergebnis bestimmen können. Auch ist zu kritisieren, dass eine Vorimprägnierung von Gesteinsoberflächen mit Indikatoren (LiCl oder radioaktives CaCl₂), deren Originalzustand erheblich verändern kann.

Die vorstehend geschilderten komplexen Verhältnisse, methodischen Schwierigkeiten und stark unterschiedlichen Beanspruchungsbedingungen sind der Hauptgrund gewesen, dass zwar manche der für die Praxis relevanten Teilerkenntnisse erarbeitet, eine geschlossene, allseits akzeptierte Gesamtkonzeption zu diesem Fragenkomplex aber noch nicht gefunden werden konnte. Dennoch lassen sich aufgrund vorliegender Ergebnisse einige allgemein gültige Aussagen zumindest qualitativer Art machen. Ebenso kann ein Trend in der Richtung der Entwicklung der Prüftechnik abgeleitet werden.

E AUSGANGSLAGE FÜR DIE UNTERSUCHUNGEN INNERHALB FA 4/73

VII ZUSAMMENFASSUNG UND STAND DER THEORETISCHEN BETRACHTUNG
VON HAFTUNG UND ABLOESUNG DES BINDEMITELS UND TREND IN
DER PRUEFTECHNIK

14. Allgemeines zur Haftung und Ablösung

Ueber die Haftung und Ablösung des Bindemittels bestehen - wie bereits erwähnt - verschiedene theoretische Anschauungen bzw. Hypothesen, welche die überaus komplexen Verhältnisse zu erfassen und zu klären suchen. Diese sind im ersten Teilbericht und vorstehend ausführlich dargestellt worden. In diesem Abschnitt folgt eine kurze Zusammenfassung.

Haftung

Zur Klärung des Mechanismus der Haftung ergeben sich aus den erarbeiteten Grundlagen über die Eigenschaften des Bindemittels (Benetzungsvermögen, Bestimmung der Oberflächenspannung, Randwinkel) und des Gesteins (Mineralogie, Oberflächenbeschaffenheit) einige Anhaltspunkte.

Die Wirkung dieser verschiedenen Parameter im Dreiphasensystem Bindemittel-Mineral-Wasser sind, obwohl theoretisch erfasst, experimentell kaum oder nur sehr schwer zu erfassen. Die erarbeiteten Resultate durch chemisch-physikalische Studien am Dreiphasensystem Bindemittel-Mineral-Wasser sind somit bis jetzt nur als in ihrer Aussage beschränkt zu bezeichnen.

Ablösung (Stripping)

Zum Phänomen der Ablösung des Bindemittels durch Einwirkung von Wasser bestehen verschiedene, teils widersprüchliche theoretische Anschauungen und Hypothesen.

Die klassische Theorie der Bindemittelverdrängung, abgeleitet von thermodynamischen Betrachtungen, kann die in bituminösen Mischungen festgestellten Ablöseerscheinungen nur teilweise erklären. Sie dient jedoch einigermaßen zur Erklärung von Ablösungserscheinungen bei Oberflächenbehandlungen, da dort die Grenzfläche Bindemittel-Mineral dem Wasser ausgesetzt ist.

Es muss versucht werden, den Mechanismus der Ablösung durch weitere Untersuchungen abzuklären. Die Ablösungs- Filmbruch- und Porenwasserdrucktheorien zeigen einen möglichen Weg zur Erfassung des Problems.

Vorhandenes Wasser in der Grenzfläche Bindemittel-Mineral kann zu Ablösungserscheinungen führen. Die Ablösung kann in Zusammenhang stehen mit der Adsorption von Wasser an der Mineraloberfläche. An der Mineraloberfläche wird dadurch eine Erhöhung des pH-Wertes bewirkt. Der Grad der Ablösung scheint abhängig von der Grösse des Anteiles an Quarz und Feldspat im Gestein zu sein.

15. Trend der Prüftechnik

Die Entwicklung in der Prüftechnik strebt dahin, die unbestreitbaren Vorteile der aufwendigen Versuchsbahnen (praxisübliches Mischgut unter verkehrsmässiger Beanspruchung), mit denen der bisherigen Laborverfahren (Schnellprüfung, handliche Grössenordnung, bessere Konstanz der Bedingungen hinsichtlich Zusammensetzung und Beanspruchung) zu kombinieren. So treten die oben erwähnten Messungen unter statischen Bedingungen an polierten Gesteinsplatten oder ausgewählten Einzelkörnungen, an Modellasphalten mit methodenbedingten Einschränkungen ihrer Zusammensetzung sowie an definierten Referenzsubstanzen zunehmend zurück. Messungen an Asphaltmischgut praxisüblicher Zusammensetzung, sei es nach Laborverdichtung, z. B. Marshall-Prüfkörpern, sei es in Form von Ausbaustücken oder Bohrkernen aus Asphaltstrassen, schieben sich dementsprechend in den Vordergrund der Betrachtung. Derzeit werden in verschiedenen Instituten Wege zum laboratoriumsmässigen Erreichen einer definierten, zeitgerafften, gleichwohl aber der dynamischen Verkehrsbelastung angepassten Verschleissbeanspruchung erprobt. Bewusst wird dabei das Abgehen vom Anspruch einer physikalisch exakten Bestimmung thermodynamischer Komponenten der Adhäsionserscheinungen zugunsten praxisorientierter Aussagen in Kauf genommen.

VIII UNTERSUCHUNGSPROGRAMM

Im Untersuchungsprogramm war definitiv die Verwendung verschiedener Baustoffe (Bindemittel, Mineralstoffe), die Durchführung von Untersuchungen mittels verschiedener Prüfverfahren an unverdichtetem Mischgut (bei ausgewählter Körnung) und an Prüfkörpern, hergestellt aus üblichem Mischgut, enthalten.

Im Sinne des Abschnittes 15 wurde insbesondere die Entwicklung eines servohydraulischen Wasserdruckaggregates (beschrieben unter Kapitel F) durch die Abteilung für Strassenbau - Isolierstoffe der EMPA gemäss Lit [93] - angegangen, um die Beanspruchung des Baustoffs Asphalt unter schwingendem Wasserdruck zu simulieren.

16. Prüfverfahren

Prüfverfahren an Mischgut aus ausgewählten Gesteinskörnungen:

- statische Wasserlagerungen
- dynamische Wasserlagerungen
- Splittablösprüfung

Prüfverfahren an Prüfkörpern:

- Festigkeitsprüfungen, Marshall-Versuche

Bemerkung:

Auf im Rahmenprogramm vorgesehenes Beschallen der Prüfkörper vor und nach den durchzuführenden Lagerungsarten musste in erster Linie aus apparativen Gründen verzichtet werden. Zudem war in einem ersten Schritt im Marshall-Versuch die Beeinflussung mechanischer Eigenschaften durch verschiedene Lagerungsarten abzuklären, bevor der doch grosse Aufwand für die Durchführung von Schallprüfungen betrieben werden sollte.

17. Lagerungsarten

Die Beschreibung der Lagerungsarten ① bis ⑥ (gemäss Tabelle 7, Seite 62) für die verschiedenen Prüfverfahren ist unter den Kapiteln F und G aufgeführt.

18. Baustoffe

Bindemittel: B Bitumen B 80/100
TB Teerbitumen TB 2000

Mineralstoffe: Q Quarz, Taunusquarz
K Kalk, Jura
ETS EMPA-Testsplitt

Mischgut: Für die Prüfungen an Mischgut (Wasserlagerungen und Splittablösprüfungen) wurden ausgewählte Körnungen der Mineralstoffe verwendet (Fraktion 10/16).

Prüfkörper: Prüfkörper mit verschieden hohen Hohlraumgehalten, ca. 3 - 4 Vol.-% resp. 10 - 12 Vol.-%.

F DIE ENTWICKLUNG DES NEUEN SERVOHYDRAULISCHEN WASSERDRUCK-
AGGREGATES DER EMPA

IX ALLGEMEINES

Die EMPA-Abteilung 113 - Strassenbau- und Isolierstoffe - konnte das von den EMPA-Abteilungen 173 - Elektronik - und 174 - Konstruktion und Werkstätten - gemäss Konzept und Entwurf des Sachbearbeiters, Lit. [93] , entwickelte und gebaute Wasserdruckaggregat 1979 in Betrieb nehmen. Das Wasserdruckaggregat wurde mit EMPA-eigenen Mitteln und hohem Aufwand auch für die im Forschungsauftrag FA 4/73 des Eidg. Departement des Innern durchzuführenden Versuche gebaut. Es kann aber durch seine weitgehend universelle Einsatzmöglichkeit für weitere Untersuchungen an bituminösen und anderen Baustoffen verwendet werden.

Die über das Wasserdruckaggregat erzeugte Belastung der Proben durch schwingenden (dynamischen) Wasserdruck sowie unter Wechselbelastung im Druck- und Unterdruckbereich (p_{rel}) dient insbesondere zur Simulation der unter Verkehrs- und Klimabelastung auftretenden Beanspruchung des Baustoffes Asphalt und kann zusätzlich für Durchlässigkeitsprüfungen von Prüfkörpern eingesetzt werden.

X BAU UND BETRIEB DES SERVOHYDRAULISCHEN WASSERDRUCK-
AGGREGATES

19. Ausgangslage

Für die im ersten Teil des Forschungsauftrags FA 4/73 im Rahmenprogramm für weitere Untersuchungen im zweiten Teil vorgesehenen dynamischen Wasserlagerungen von bituminösem Mischgut und Prüfkörpern aus verdichtetem bituminösem Mischgut wurde der Bau eines Betriebsaggregates zur Erzeugung des Wasserdrucks angegangen. Der Einsatz des Betriebsaggregates sollte in erster Linie der speziellen Lagerung von Prüfkörpern vor der eigentlichen Fe-

stigkeitsuntersuchung dienen. Als zusätzliche Möglichkeit einer eigentlichen Prüfung mit dieser prüftechnischen Einrichtung wurde die Durchlässigkeitsprüfung unter statischem Druck und wechseln- dem, schwingendem Wasserdruck vorgesehen.

20. Konzept

Die ursprüngliche Absicht, ein mechanisches Element (z. B. Kurbelantrieb in Verbindung mit einem Kolben) als Betriebsaggregat einzusetzen, wurde aufgrund von Randbedingungen, wie sie der Betrieb unter Wechselbelastung im Druck- und Unterdruckbereich sowie die Bedingung der Möglichkeit des Aufbringens eines statischen Drucks darstellen, aufgegeben. Ebenso führten auch längerdauernde Bestrebungen, ein von privater Seite patentiertes spezielles Druckaggregat für diese dynamische Wasserlagerung einzusetzen, nicht zum Ziel.

Es wurde daher der Eigenbau eines Wasserdruckaggregates an der EMPA beschlossen, da zudem die Möglichkeit eines Anschlusses an die Druckölversorgung der Prüf- anlage "DYNASPHALT" der Abteilung Strassenbau- und Isolierstoffe gegeben war. Dass damit eine längere Entwicklungsphase eingeleitet wurde, erklärt sich mit der verzögerten Durchführung des zweiten Teils von FA 4/73.

./.

21. Funktion und Bau des servohydraulischen Betriebs- aggregates

21.1 Uebersicht Aufbau, Schema

Die in der Uebersicht (siehe Figur 8, Seite 53) dargestellte Anordnung beschreibt Bereiche und Betrieb des Betriebsaggregates in Verbindung mit den gemäss Lit. [93] entwickelten und gebauten Druckgefässen.

Das servohydraulische Wasserdruckaggregat enthält einen Hochdruckkolben, der mit einem Niederdruckkolben verbunden ist. Ab diesem Niederdruckkolben wird über Oel und einen Druckmedienwandler Oel/Wasser (Membranspeicher 1'000 ml) der Wasserdruck in den Druckgefässen erzeugt.

Das Betriebsaggregat und die Druckgefässe wurden zu einer Einheit (vgl. Photo 1, Seite 54) verbunden, was eine wesentliche Erleichterung für die Versuchsdurchführung und zusätzlich eine grosse Platzersparnis darstellt.

21.2 Betrieb

Sicherheitseinrichtungen

Um mit Sicherheit den für den Betrieb der Druckgefässe vorgesehenen Maximaldruck von 10 bar nicht zu überschreiten, wurde im Druckölsystem (250 bar) vor der Druckölzapfstelle des Betriebsaggregates eine Druckreduzierung auf 100 bar eingebaut.

Da der wechselnde Wasserdruck über einen Membranspeicher als Druckmedienwandler erzeugt wird, mussten elektronische Positionsendschalter für den Kolben montiert werden, da sonst ein Anliegen der Membrane unter Pulsieren zu einer Zerstörung derselben führen könnte. Die Ausgangsstellung der Membrane muss dabei durch ein Zurückdrücken von Wasserseite her und anschliessendes Ablassen eines gewissen Wasservolumens erzeugt werden. Zusätzlich wurde ein Ueberdruck (15 bar) - Oelkreislauf - zugeschaltet, der bei Erreichen der unteren Endstellung des Kolbens diesen durch Nachladen zurück in die obere Endlage drückt.

Fig. 8

WASSERDRUCKAGGREGAT

Servohydraulisches Betriebsaggregat für die Wasserlagerung von Prüfkörpern unter statischem & schwingendem Wasserdruck sowie unter Wechselbelastung ($p_{abs.}$ 0,5 ... 11 bar)

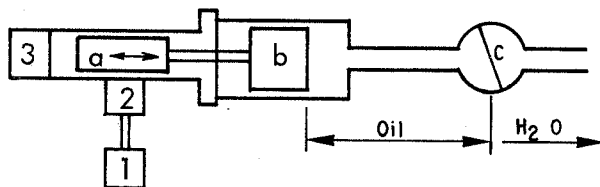
Bereich: $p_{w_{abs.}}$ = 0,5 ... 11 bar, Druck-Schwellbelastung und/oder Wechselbelastung
 f = (0,1) 1 ... 2 Hz
 n = bis 2×10^6 / Versuch

Betrieb, Druckregelung über Servoanlage gemäss Schema

1 Drucköl ab 5. Zapfstelle Druckölversorgung Prüfanlage "DYNASPHALT" im Labor 146

2 Seryoventil

3 Wasserdruckaggregat, besteht aus



a) Hochdruckkolben

b) Niederdruckkolben
(-Variante Oel und c)

c) Druckmedienwandler
(Membranspeicher, Oel/Wasser)

4 Funktionsgenerator

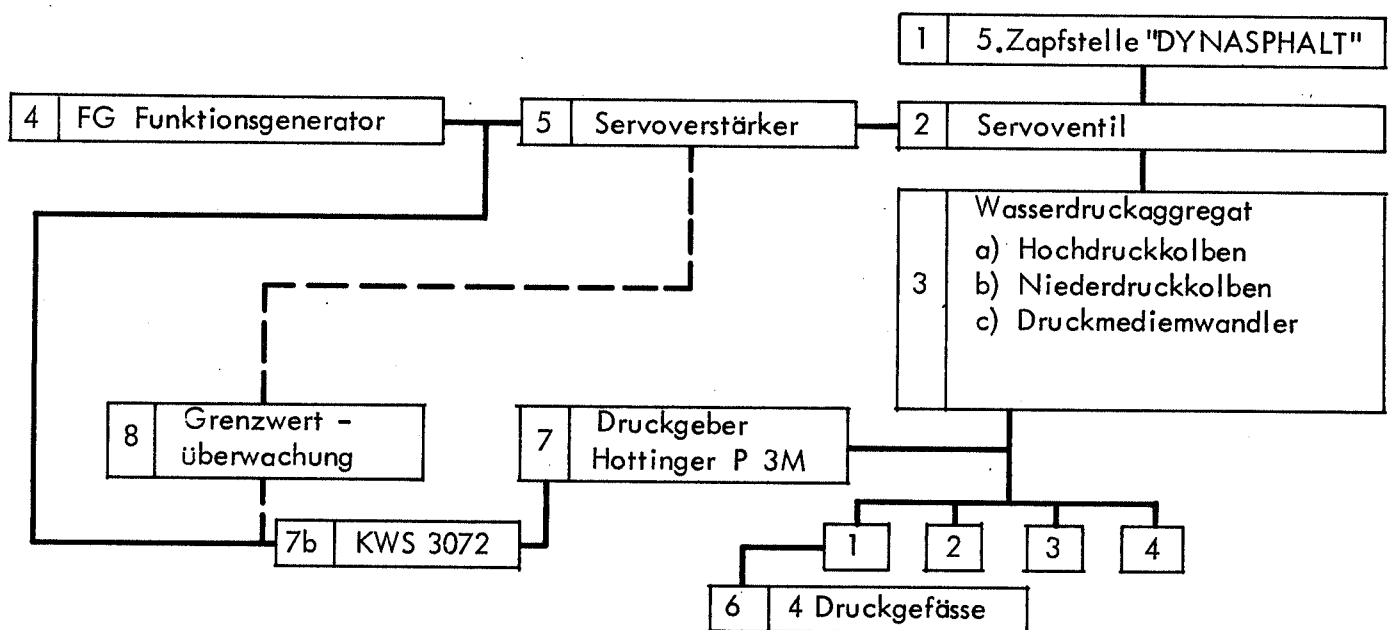
5 Servoverstärker

6 4 Druckgefässe

7 Druckgeber Hottinger P 3M, 20bar

7b Messverstärker KWS 3072

8 Grenzwertüberwachung



4 Vakuumgefässe

Vorgängige Lagerung der Prüfkörper
in diesen Gefässen

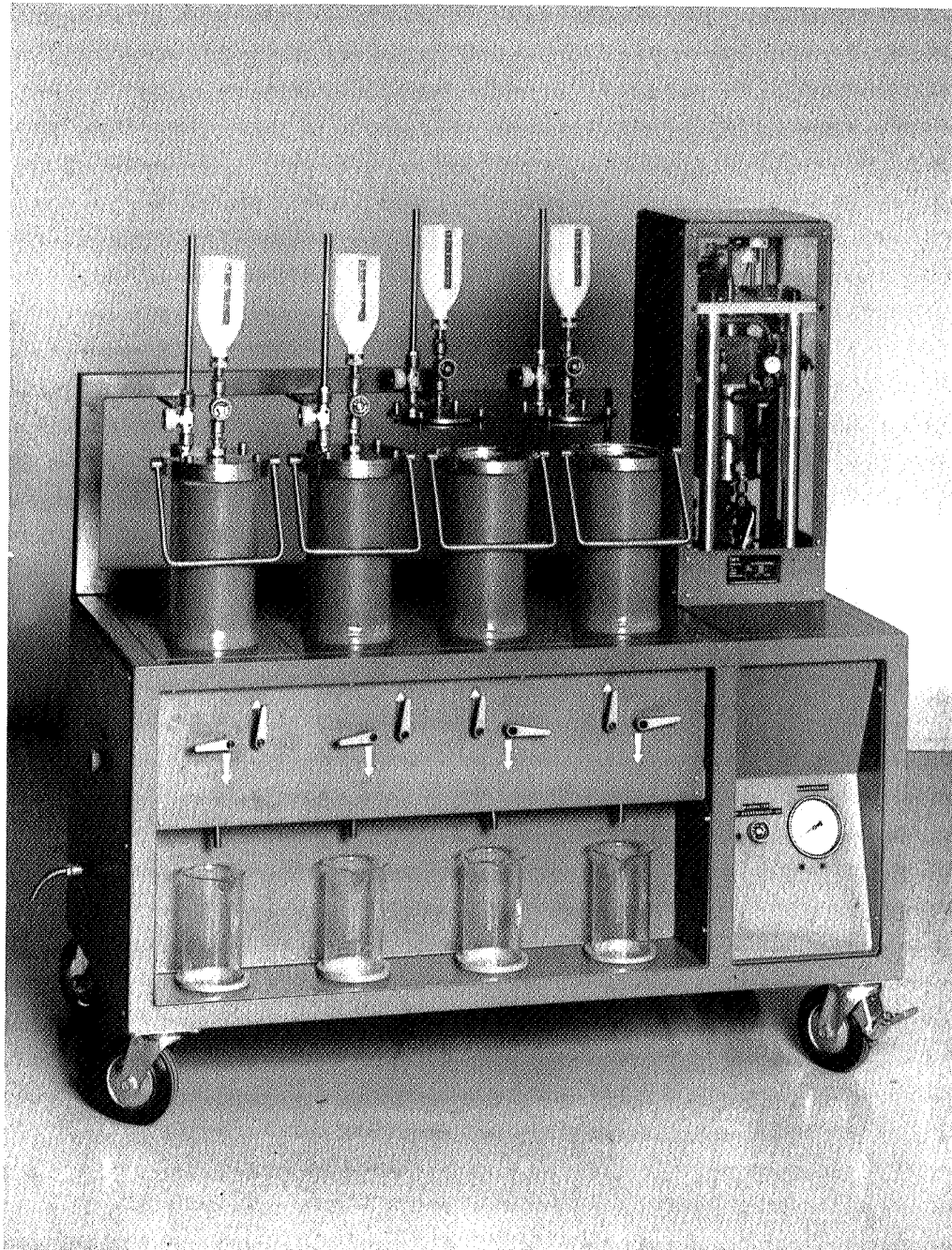


Photo 1: Servohydraulisches Wasserdruckaggregat.

Rechts

im Gehäuse: Hochdruck- mit Niederdruckkolben verbunden.

Links:

Druckgefässe zur Aufnahme von Prüfkörpern, Umhüllungsschalen etc.

Unten:

Auffanggefässe für Durchlässigkeitsversuche.

Steuerung, Elektronik

Der servohydraulische Regelkreis wurde von den Abteilungen 173 (Elektronik) und 174 (Konstruktion) aus an der EMPA vorhandenen Elementen aufgebaut, die der Abteilung Strassenbau und Isolierstoffe grosszügig zur Verfügung gestellt wurden.

Vorversuche, Funktionsprüfung

Die Vorversuche unter Anschluss des Betriebsaggregates an eine mobile Druckölpumpe und unter Beizug eines "DYNASPHALT"-Regelkreises waren erfolgreich. Die Funktion des Zylinders und des ganzen Wasserdrukaggregates war einwandfrei und erfüllte die gestellten Anforderungen.

Der Betrieb im Druckbereich ($P_{rel} = 0$ bis 10 bar) ist absolut problemlos. Regelprobleme der Servohydraulik treten dagegen aus physikalischen Gründen beim Betrieb unter Wechselbelastung im Bereich von $P_{rel} = -0,5$ bis +10 bar ($P_{abs} = 0,5$ bis 11 bar) auf, infolge Druckwechsel (hartes System) auf Unterdruck (weiches System).

Die resultierende asymmetrische Belastung des Prüfkörpers kann beim Betrieb mit dem definitiven Regelkreis durch entsprechende Einstellung 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. Diese ist bei dieser Betriebsart beschränkt, da schnell ein Abreissen der Membrane von der Wassersäule oder des Niederdruckkolbens von der Oelsäule auftritt. Entsprechend dieser tiefen Frequenz von 2 Hz dauern Versuche mit grosser Schwingungszahl relativ lange.



Photo 2: Gesamtansicht der Prüfanlage.

Links: Regelkreis

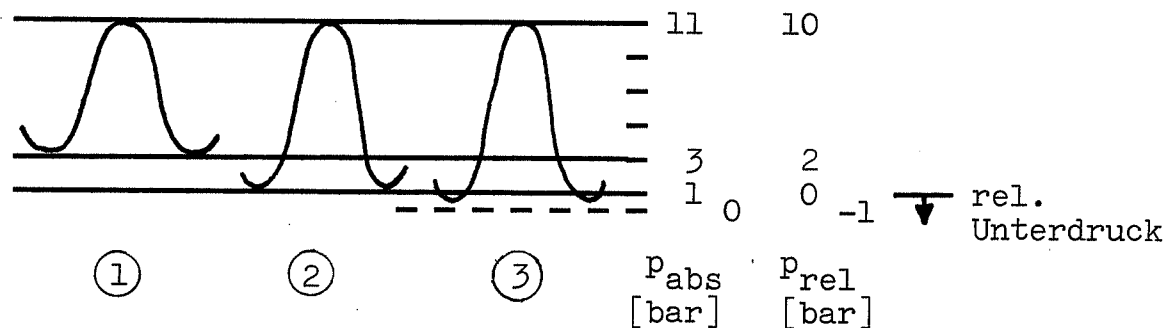
Rechts: Wasserdrukaggregat

Oben: Zapfstelle mit Druckdosierung

21.3 Belastungsfälle

Ueber den Regelkreis wird ab Sollwertgeber und Funktionsgenerator mittels einer elektrischen Grösse durch das Servoventil eine mechanische Grösse, der zu erzeugende Wasserdruck auf das System aufgebracht.

Dabei ist festzustellen, dass bei Vorgabe einer Sinusfunktion ab Funktionsgenerator eine asymmetrische Belastungsfunktion im Drucksystem auftritt. Diese Asymmetrie hat ihre Ursache in der im Druckbereich gegenüber dem Unterdruckbereich (rel Druck) unterschiedlichen "Härte" des Systems, d. h. in der unterschiedlichen Regelcharakteristik innerhalb einer Schwingung. Diese Asymmetrie wird dann ausgeprägt, wenn $p_{u\ abs} \sim 1$ bar beträgt, und stark ausgeprägt, wenn $p_{u\ abs}$ unter 1 bar liegt (im rel. Unterdruck); vgl. Belastungsfälle ② und ③. Die Bezeichnung der Belastungsfälle ist in Figur 9 dargestellt.



Figur 9: Belastungsfälle ① bis ③, siehe auch Photos 3 bis 5, Seiten 58 und 59.

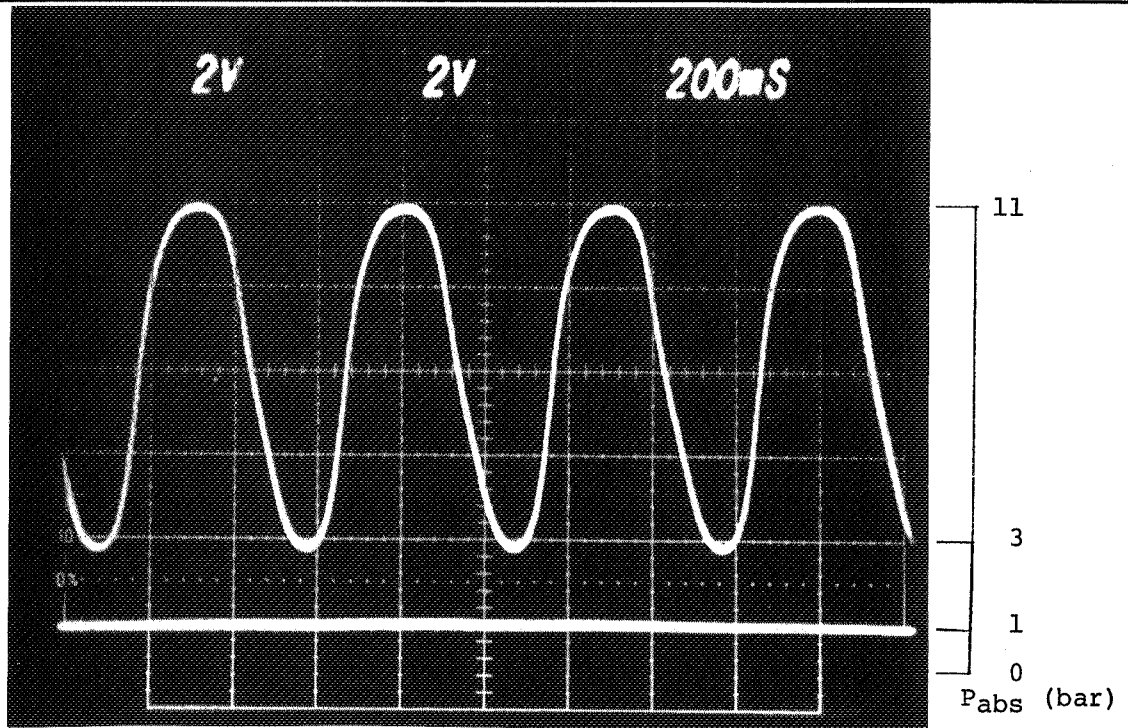


Photo 3: Belastungsfall ①

Aufnahme ab KO. Betrieb: Schwelllast im rel. Druckbereich, $p_{u\text{ rel}} = 2\text{ bar}$; Belastungsfunktion annähernd symmetrisch.

$p_{o\text{ abs}} = 11\text{ bar}$

$f = 2\text{ Hz}$

$p_{u\text{ abs}} = 3\text{ bar}$

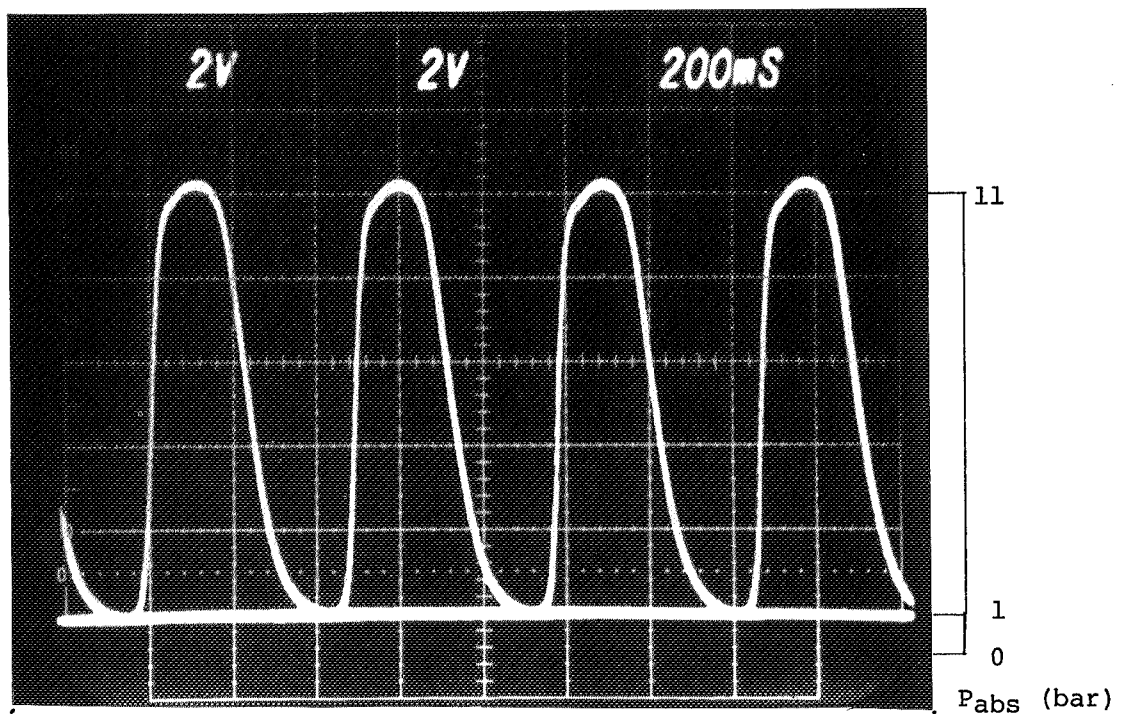


Photo 4: Belastungsfall ②

Aufnahme ab KO. Betrieb: Schwelllast im rel. Druckbereich mit $p_{u\text{ rel}} = 0\text{ bar}$; Belastungsfunktion asymmetrisch.

$p_{o\text{ abs}} = 11\text{ bar}$

$f = 2\text{ Hz}$

$p_{u\text{ abs}} = 1\text{ bar}$

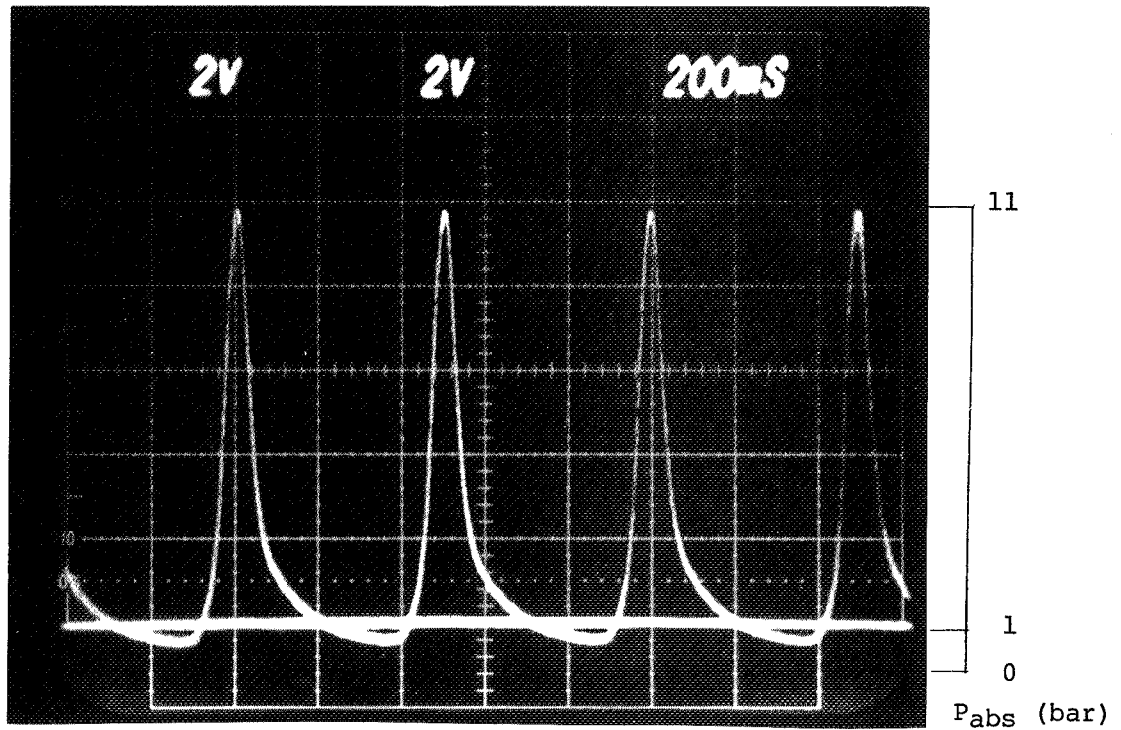


Photo 5: Belastungsfall ③

Aufnahme ab KO. Betrieb: Wechsellast im rel. Druckbereich mit $p_{u rel} = -0,5$ bar; Belastungsfunktion ausgeprägt asymmetrisch.

$P_{o abs} = 11$ bar

$f = 2$ Hz

$P_{u abs} = 0,5$ bar

G DURCHGEFUEHRTE UNTERSUCHUNGEN

XI PROGRAMM

Das definitive Untersuchungsprogramm wurde gemäss Tabelle 6, Seite 61, festgelegt und ist vorstehende in Abschnitt VIII aufgeführt. Es entspricht weitgehend dem Rahmenprogramm gemäss erstem Teilbericht. Nach der Durchführung von weiteren Vorversuchen musste, bezogen auf dieses Rahmenprogramm, verzichtet werden auf:

Beschallen der Prüfkörper

Ein Beschallen der Prüfkörper vor und nach den durchzuführenden Lagerungsarten (zerstörungsfreie Prüfung), somit vor der zerstörenden Prüfung in mechanischen Festigkeitsuntersuchungen war im Rahmenprogramm enthalten. Nach den durchgeführten Vorversuchen war jedoch mit der an der EMPA vorhandenen niederfrequenten Beschallungsanlage in Funktion der verschiedenen Lagerungsarten keine Differenzierung der Resultate feststellbar, das heisst, eine Aenderung der Durchlaufgeschwindigkeit der Schallwellen durch die Prüfkörper konnte mit den vorhandenen Messgeräten nicht festgestellt. Auf ein Beschallen der Prüfkörper wurde in der Folge verzichtet.

Kriech-, Schwing- und Torsionsversuche

Auf die Durchführung dieser Prüfverfahren wurde verzichtet, da der erforderlichlich grosse Aufwand für dieses Prüfverfahren ohne erste Resultate bezüglich Einfluss der Lagerungsarten aus der einfachen empirisch-technologischen Prüfung nach Marshall nicht zu verantworten war.

XII UEBERSICHT ZU DEN VERSUCHEN

22. Zusammenstellung der Versuche, Tabelle 6, Seite 61
23. Definition der Lagerungsarten, Tabelle 7, Seite 62
24. Verwendete Baustoffe

22. Tabelle 6: Zusammenstellung der durchgeführten Versuche

Prüfverfahren	Lagerungsarten Definition IA ① - ⑥ gemäss Tabelle 7	Baustoffe Mineralstoffe			Bindemittel B TB	Parameterprodukt, Anzahl Versuche
		Q	K	ETS		
UH Umhüllung	① - ⑥	Q	K	ETS	B TB	36
SPL Splittablösung nach Ewers + Halter	① - ⑥	Q	K	ETS	B TB	36
MV Marshall-Ver- such	① - ⑥	Q	K	ETS	B TB	36

Es bedeuten: ● o Q Quarz (Splittkörnung bzw. Mineralstoffgemisch) Herkunft gemäss
 ▲ Δ K Kalk (Splittkörnung bzw. Mineralstoffgemisch) Abschnitt 25
 ■ □ ETS EMPA-Test-Splitt bzw. Mineralstoffgemisch

 └─ B Bitumen B 80/100
 └─ TB Teerbitumen TB 2000

23. Tabelle 7: Definition der Lagerungsarten

LA Lagerungsart	UH Umhüllung	SPL Splittablösung	MV Marshall-Versuch
① t "trocken"	nach EMPA-Vorschrift	Versuch trocken, nach Abkühlen	gemäss SNV Nr. 671'969 b
② WLS 28 T	① anschliessend 28 Tage statische Wasserlagerung	nach Abkühlen 28 Tage statische Wasserlagerung	28 Tage statische Wasserlagerung, anschliessend ①
③ V + WLS 28 T	ohne ①, Vakuum, anschliessend 28 Tage statische Wasserlagerung gemäss ②	Vakuum, anschliessend ②	Vakuum, anschliessend ②, danach ①
④ WLD/2/n	①, anschliessend dynamische Wasserlagerung (2 Hz, $u > 10^5$, $p_{\text{abs}} = 0,6$ bar, $p_o = 11$ bar)	dynamische Wasserlagerung (2 Hz, $u = 10^6$, $p_{\text{abs}} = 0,6$ bar, $p_o = 11$ bar)	dynamische Wasserlagerung (2 Hz, $u = 10^6$, $p_{\text{abs}} = 0,6$ bar, $p_o = 11$ bar), anschliessend ①
⑤ V + WLD/2/n	ohne ①, Vakuum, anschliessend dynamische Wasserlagerung gemäss ④, $u = 10^5$	Vakuum, anschliessend ④	Vakuum, anschliessend ④, danach ①
⑥ V + WLS 28 T + WLD/2/n	ohne ①, Vakuum, anschliessend 28 Tage statische Wasserlagerung, danach dynamische Wasserlagerung gemäss ④, $u = 10^5$	Vakuum, anschliessend ②, danach ④	Vakuum, anschliessend ②, danach ④ und anschliessend ①

Legende:

p: Druck absolut

 $n = 10^5$: Betrieb ca. 14 h $n = 10^6$: Betrieb ca. 140 h = ca. 6 Tage

24. Verwendete Baustoffe24.1 MineralstoffeTabelle 8

Bezeichnung	Abkürzung	Fraktion	Herkunft
Quarz	Q	Filler und Sand	Taunusquarzit A = Amberg
		Splitte 3/7; 7/15 und 15/30	St. Leonard, Kanton Wallis
Kalk	K	Filler und Sand 03	St. Ursanne
		Splitte 3/6; 6/10 und 10/16	Asuel, Kanton Jura
EMPA-Test-Splitt	ETS (1)	gemäss FA 9/75 Marshall-Versuche	Hüntwangen
EMPA-Test-Splitt (nur Zusatzver- suche)	ETS (2)	6/10	Rozloch

Korngrößenverteilung

Die für die Herstellung der Mischgute AB/TA 16 massgebenden Sollwerte der Siebdurchgänge D sind in der Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9

Prüfsieb (mm)	0,08	1,6	10,0
Massen-%	8	28	65

Die Ergebnisse der Siebanalyse, des Bindemittelgehaltes, des spezifischen Gewichtes und des Hohlraumgehaltes der Prüfkörper sind in den Figuren 10, 11 und 12, Seiten 64 und 65, sowie den Tabellen 10, 11 und 12, Seiten 66 bis 68, zusammengefasst.

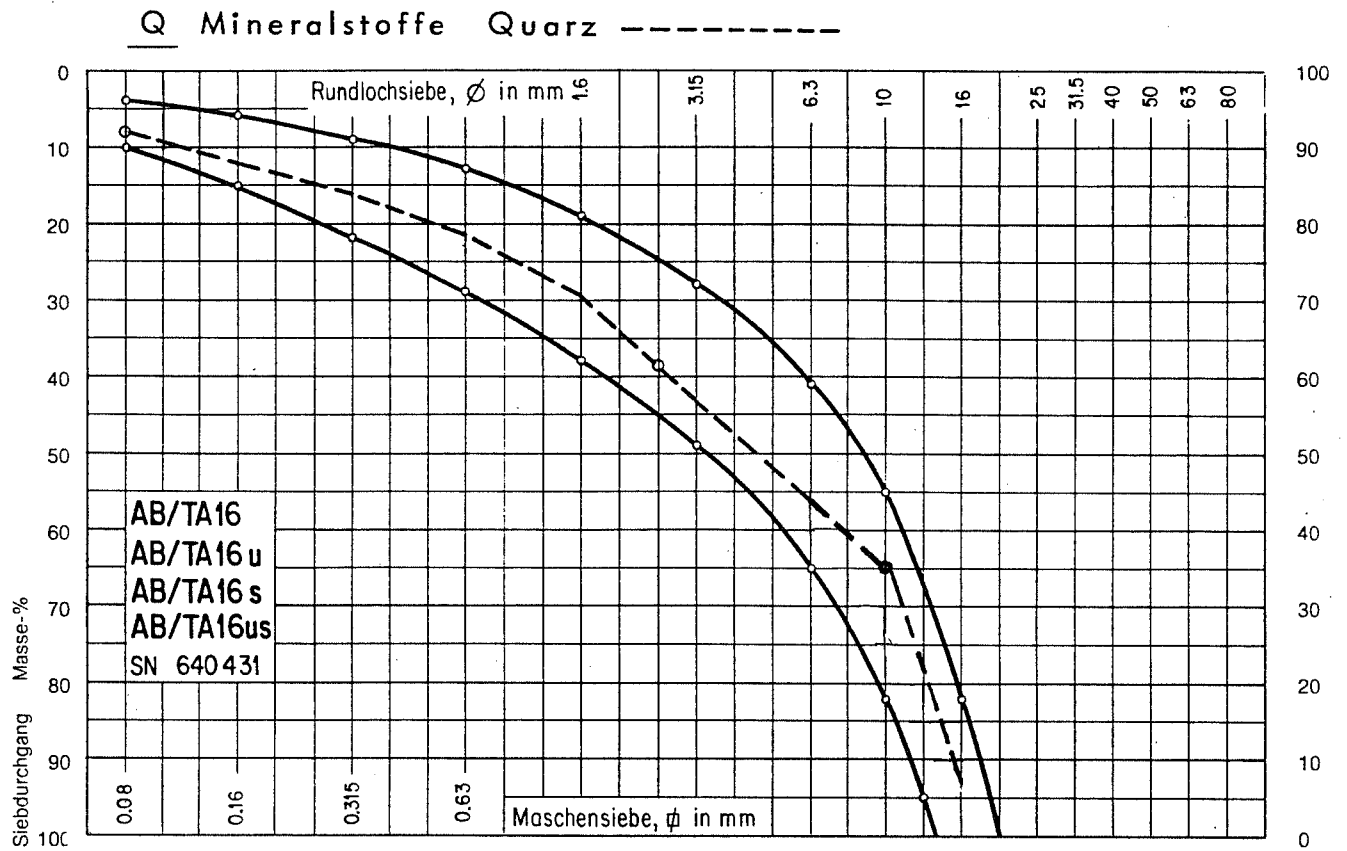


Fig.10: Korngrößenverteilung, Mittelwerte AB/TBA 16Q, Werte Tab. 10, Seite 66

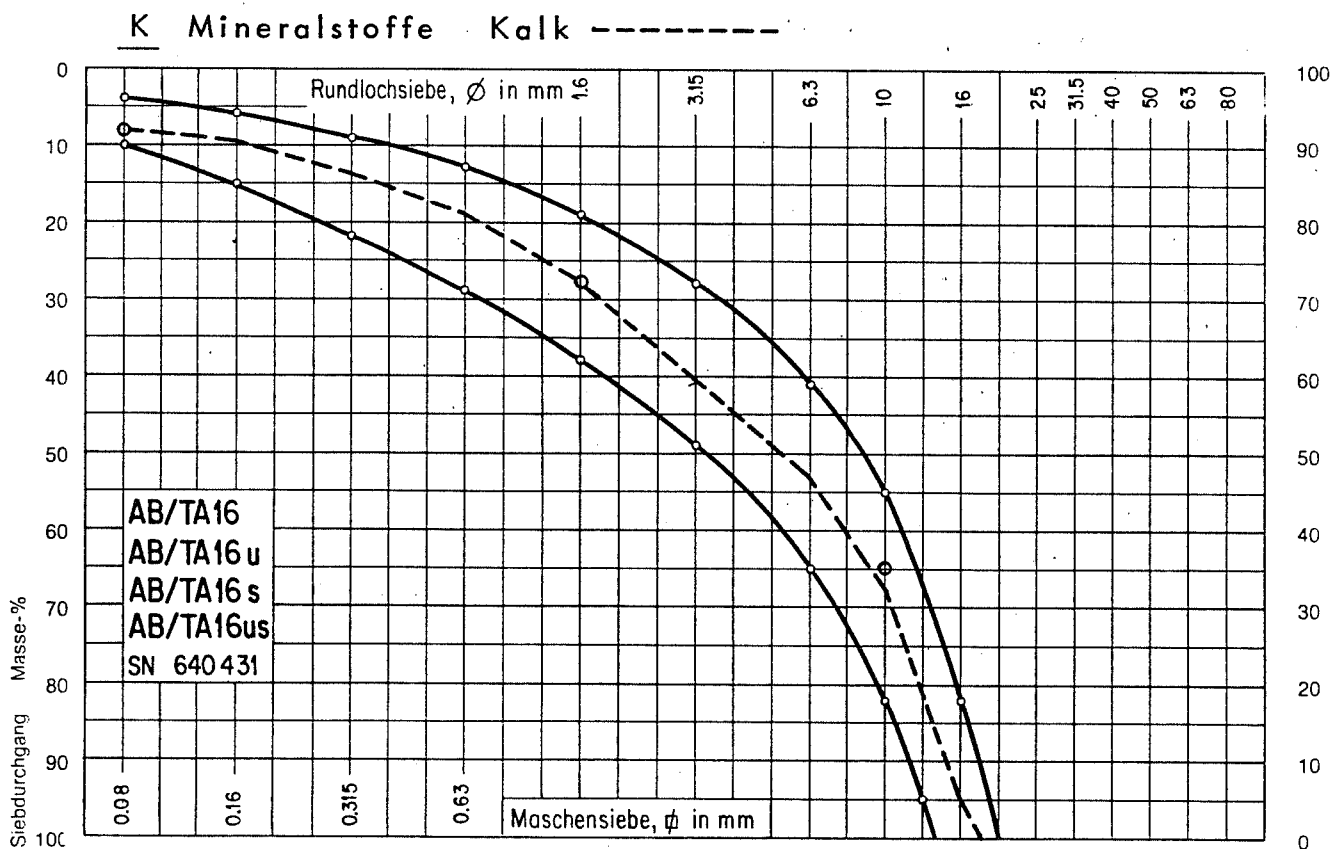


Fig.11: Korngrößenverteilung, Mittelwerte AB/TBA 16 K, Werte Tab. 11, Seite 67

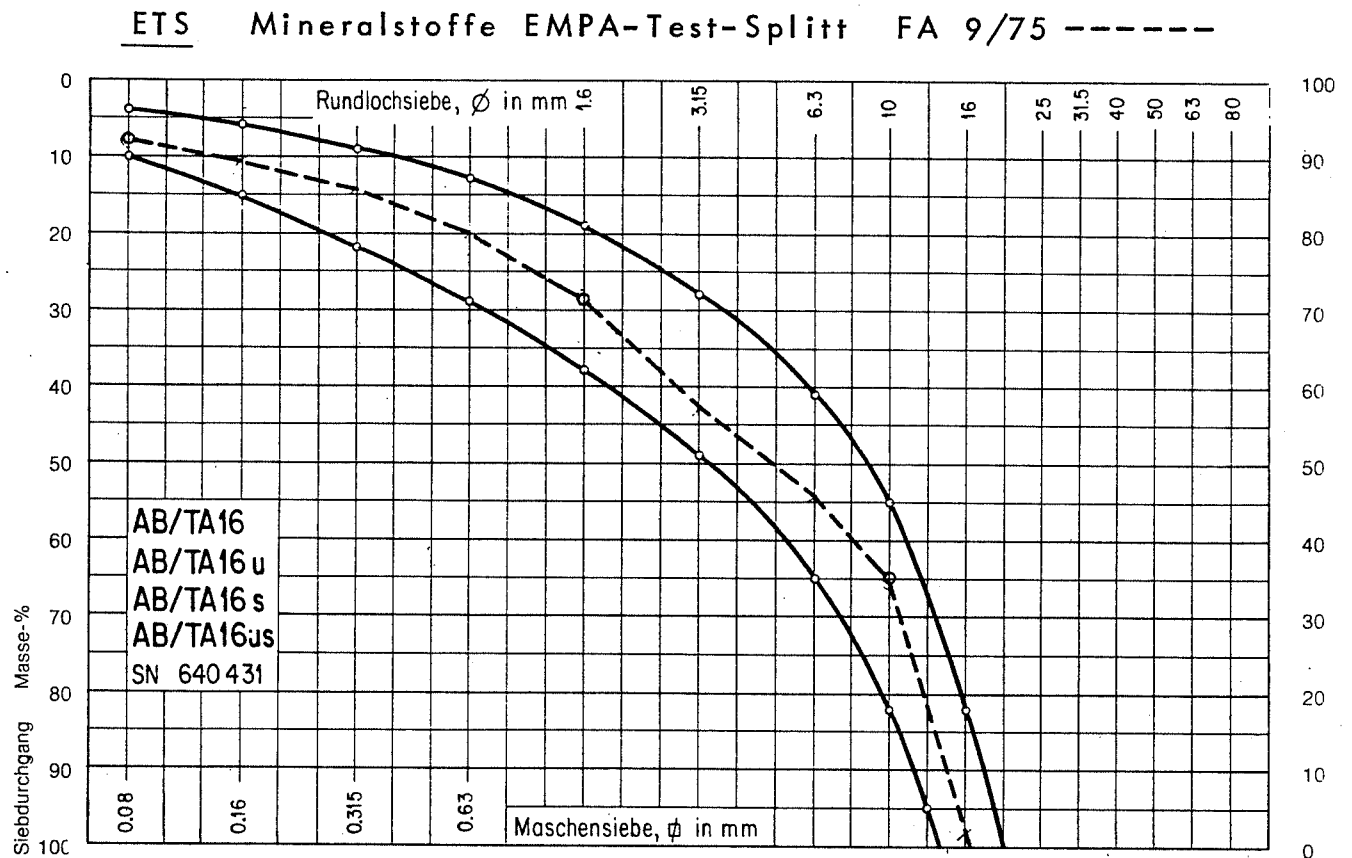


Fig.12: Korngrößenverteilung, Mittelwerte AB/TBA 16 ETS, Werte Tab.12, Seite 68

Tabelle 10: Prüfkörper mit Quarzmineralstoffen

		Quarz mit Bitumen (QB)			Quarz mit Teerbitumen (TQB)		
Hohlraumgehalt		HG ~ 3-4 Vol-%	HG ~ 10-12 Vol-%	Mittel	HG ~ 3-4 Vol-%	HG ~ 10-12 Vol-%	Mittel
Mischungen Nr.		1 bis 8	9 bis 16	1 bis 20	118 bis 125	108 bis 114	108 bis 114 116 bis 127
Bindemittel- gewicht		Mw σ 5,08 0,07	Mw σ 5,01 0,05	Mw σ 5,03 0,07	Mw σ 5,06 0,07	Mw σ 4,92 0,07	Mw σ 4,98 0,10
Spez. Gewicht		2,457 0,003	2,462 0,004	2,459 0,004	2,462 0,004	2,469 0,002	2,465 0,004
Durchgang bei Sieb	Soll	Massen-%			Massen-%		
		94,00 1,10 66,10 1,77 56,34 1,71 44,11 1,28 29,92 0,98 21,21 0,33 15,75 0,25 11,58 0,24 8,77 0,22	92,91 1,16 64,57 2,05 54,62 1,34 43,35 1,16 29,30 0,86 21,04 0,32 15,76 0,25 11,60 0,26 8,81 0,26	93,25 1,27 65,28 1,87 55,32 1,62 43,62 1,17 29,58 0,90 21,11 0,34 15,76 0,28 11,62 0,28 8,81 0,26	93,41 0,68 65,01 1,44 54,24 1,23 42,72 1,06 29,41 0,87 20,94 0,52 15,66 0,44 11,62 0,34 8,86 0,27	92,34 1,13 64,54 1,97 53,63 1,46 42,13 0,98 28,58 0,62 20,46 0,40 15,21 0,47 11,18 0,40 8,46 0,33	93,09 1,03 64,74 1,49 53,85 1,34 42,31 1,12 28,93 0,82 20,69 0,49 15,45 0,46 11,41 0,40 8,68 0,34
Hohlraumgehalt grosse Prüfk.		3,75 0,41	10,32 0,42	---	3,53 0,53	11,61 0,55	---
Hohlraumgehalt kleine Prüfk.		4,52 0,42	11,13 0,71	---	4,10 0,37	12,75 0,43	---

Tabelle 11: Prüfkörper mit Kalkmineralstoffen

	Kalk mit Bitumen (KB)				Kalk mit Teerbitumen (KTB)			
	HG ~ 3-4 Vol-%	HG ~ 10-12 Vol-%	Mittel		HG ~ 3-4 Vol-%	HG ~ 10-12 Vol-%	Mittel	
Hohlraumgehalt								
Mischungen Nr.	200 bis 206 + C	207 bis 214	200 bis 207 + C		300 bis 307	308 bis 315	300 bis 318	
Bindemittelge- wicht	Mw σ 5,03 0,03	Mw σ 4,97 0,06	Mw σ 4,99 0,05		Mw σ 4,93 0,06	Mw σ 4,95 0,06	Mw σ 4,94 0,08	
Spez. Gewicht	2,495 0,003	2,497 0,003	2,496 0,003		2,500 0,003	2,504 0,003	2,503 0,004	
Durchgang bei Sieb	Massen-%				Massen-%			
16 mm	95,19 0,83	95,80 0,74	95,28 0,95		94,87 0,67	96,21 0,67	95,67 0,96	
10 mm	68,74 0,90	67,15 2,20	67,48 1,99		66,56 1,75	68,25 1,07	67,28 1,59	
6,3 mm	54,40 0,99	52,69 1,89	53,28 1,68		53,46 1,20	53,70 1,34	53,36 1,31	
3,15 mm	41,82 0,59	40,56 1,26	41,06 1,11		40,89 0,76	40,86 1,12	40,69 0,96	
1,6 mm	28,07 1,27	27,47 1,56	27,79 1,34		27,46 1,06	27,32 1,16	27,27 1,09	
0,63 mm	19,32 0,61	19,17 0,87	19,31 0,72		18,48 0,65	18,74 0,68	18,59 0,61	
0,32 mm	13,92 0,31	13,84 0,60	13,92 0,45		13,15 0,54	13,42 0,50	13,28 0,48	
0,16 mm	10,22 0,16	10,12 0,36	10,19 0,27		9,51 0,42	9,80 0,34	9,64 0,37	
0,08 mm	7,74 0,15	7,65 0,23	7,69 0,18		7,06 0,37	7,26 0,25	7,16 0,29	
Hohlraumgehalt grosse Prüfk.	3,63 0,41	11,15 0,73	---	--	3,39 0,29	10,65 0,75	---	--
Hohlraumgehalt kleinde Prüfk.	3,10 0,13	11,71 0,47	---	--	3,88 0,16	10,91 0,46	---	--

Tabelle 12: Prüfkörper mit Mineralstoffe ETS 1 (EMPA-Test-Splitt) gemäss
FA 9/75 mit Bitumen und Teerbitumen

Hohlraumgehalt	HG ~3-4 Vol-%		HG ~10-12 Vol-%	
Mischungen Nr.	401 bis 404		501 bis 504	
Bindemittelge- wicht	Mw 5,11	σ 0,04	Mw 5,16	σ 0,07
Spez. Gewicht	2,488	--	2,488	--
Durchgang Soll bei Sieb	Massen-%			
16 mm	97,20	1,30	98,10	1,40
10 mm 65	66,30	1,60	67,10	1,30
6,3 mm	54,40	1,10	54,80	1,20
3,15 mm	43,80	1,20	44,70	0,90
1,6 mm 28	27,40	0,50	28,30	0,70
0,63 mm	20,70	0,30	20,60	0,40
0,32 mm	14,30	0,20	14,10	0,20
0,16 mm	11,10	0,30	12,30	0,20
0,08 mm 8,5	8,20	0,20	8,40	0,30
	Werte für Mi- schungen mit Bitumen und Teerbitumen B + TB		Werte für Mi- schungen mit Bitumen und Teerbitumen B + TB	

Herstellen der Prüfkörper

Die Prüfkörper wurden gemäss Marshall-Verdichtung nach Norm SNV 671'969, jedoch mit spezifisch abgestimmten Schlagzahlen für das Erreichen bestimmter Verdichtungswerte (Hohlraumgehalte) hergestellt.

Die definierten Schlagzahlen für das Erreichen eines tiefen Hohlraumgehaltes von ca. 3 - 4 Vol.-% und eines hohen Hohlraumgehaltes von ca. 10 - 12 Vol.-% wurden gemäss Tabelle 11 wie folgt festgelegt.

Tabelle 13: Marshall-Prüfkörper, Herstellung

Mineral-sort		Bindemittelsorte	Hohlraumgehalt Vol.-%	Schlagzahl n je Sorte	Verdichtungs- temperatur °C
Q	Quarz	B 80/100	3 - 4	50	145
Q	Quarz	B 80/100	10 - 12	20	145
K	Kalk	B 80/100	3 - 4	40	145
K	Kalk	B 80/100	10 - 12	10	145
Q	Quarz	TB 2000	3 - 4	50	165
Q	Quarz	TB 2000	10 - 12	20	165
K	Kalk	TB 2000	3 - 4	50	145
K	Kalk	TB 2000	10 - 12	15	145

24.2 Bindemittel

Bitumen: B 80/100 aus EMPA-Bestand
 Pen 97 1/10 mm
 R.u.K.: 48,6° C
 P I: +0,2

Teerbitumen: TB 2000
 Pen: 74 1/10 mm

./.

XIII UMHUELLUNGSVERSUCHE

Die Versuche wurden nach den Lagerungsarten ① bis ⑥ gemäss Definition in der Tabelle 7, Seite 62, durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 14, Seite 71, zusammengefasst.

Die aufgeführten Werte sind ausgeglichene Werte aus 4 Schätzungen von 4 Laboranten.

Zusammenstellung der Umhüllungsversuche siehe Figur 13, Seite 72.

./.

Tabelle 14: Umhüllungsversuche

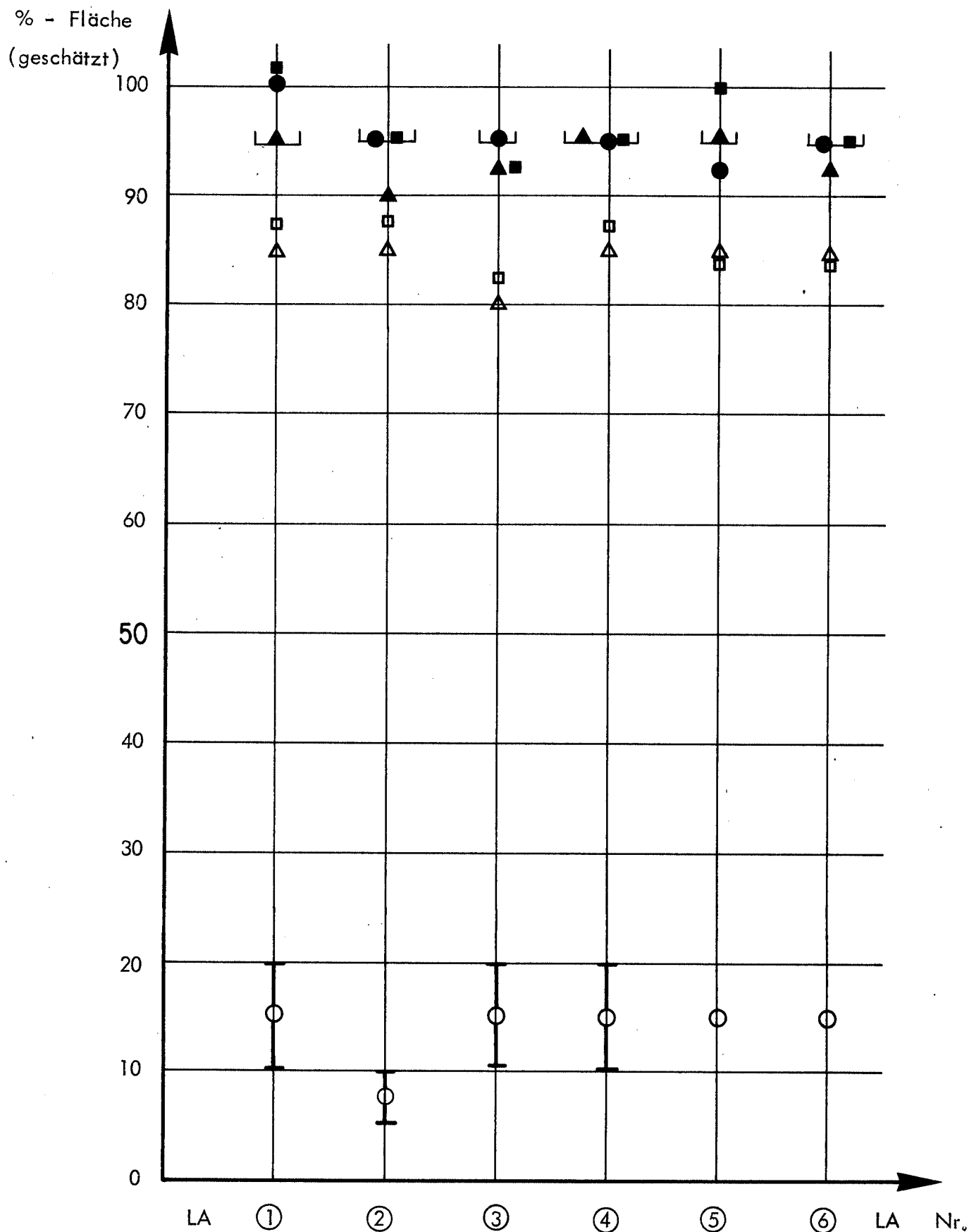
Lagerungsart Mineralstoffe	① trocken	② WLS 28 d	③ V + WLS 28 d	④ WLD/2 Hz/10 ⁵ Pu = 0,6 bar Po = 11 bar	⑤ V + ④	⑥ V + ② + ④	Binde- mittel	Sig.
Quarz Q	10 - 20	5 - 10	10 - 20	10 - 20	10 - 20	10 - 20	B 80/100	○
Kalk K	80 - 90	80 - 90	75 - 85	80 - 90	80 - 90	80 - 90	B 80/100	△
ETS 1, FA 9/75	85 - 90	85 - 90	80 - 85	85 - 90	80 - 90	80 - 90	B 80/100	□
ETS 2, Roz- Loch	85 - 90	85 - 90	85 - 90	80 - 90	70 - 80	80 - 90	B 80/100	□
Quarz Q	100	> 95	> 95	> 95	90 - 95	> 95	TB 2000	●
Kalk K	> 95	85 - 90	90 - 95	90 - 95	> 95	90 - 95	TB 2000	▲
ETS 1, FA 9/75	100	> 95	90 - 95	> 95	100	> 95	TB 2000	■
ETS 2, Roz- Loch	100	> 95	> 95	> 95	100	> 95	TB 2000	■

WLS: statische Wasserlagerung

WLD: dynamische Wasserlagerung

V: Vakuum

Fig. 13: UMHÜLLUNG NACH LAGERUNGSART



Legende:

Mineralstoffe

Q K
Quarz Kalk ETS *)

○ △ □
● ▲ ■

Bindemittel

B Bitumen
TB Teerbitumen

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

┌ = grösser als ,

*) EMPA-Test-Splitt

XIV SPLITTABLOESPRUEFUNG

Versuchsdurchführung

Nach dem Verfahren nach "Ewers + Walter" gemäss Lit. [29].

Splittablösgerät siehe Photo 6.

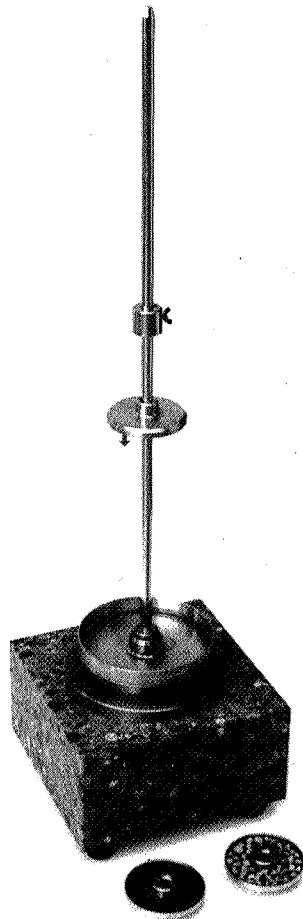


Photo 6: Splittablösgerät

Die Teller werden mit 6 g Bitumen gefüllt, heiss gelagert (horizontal) und mit Splitt überhäuft.

Nach dem Abkühlen nicht haftender Splitt entfernen. Der haftende Splitt gilt als Einwage (100 %).

Nach Lagerungsart wird durch 10-maliges Fallenlassen der umgekehrten Teller der abgelöste Splitt gewogen und die Splittablösung in % zur Einwage bestimmt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse sind aufgeführt in:

Tabelle 15,
Seite 75:

Splittablösung (Mittelwerte) in Funktion der Lagerungsarten ① bis ⑥ in:

- Massen-%, bezogen auf Einwaage $\equiv 100 \%$
- % relativ, bezogen auf Lagerungsart
LA ① $\equiv 100 \%$

Tabelle 16,
Seite 76:

Splittablösung (Mittelwerte) in Funktion der Lagerungsarten ① bis ⑥ in:

- Massen-%, Mittel und max.- sowie min.- Einzelwerte

Figuren 14 bis
17, Seiten 77
bis 80:

Splittablösung in Funktion der Lagerungsarten ① bis ⑥ in:

- Massen-%, bezogen auf Einwaage $\equiv 100 \%$

Figuren 18 bis
21, Seiten 81
bis 84:

Splittablösung in Funktion der Lagerungsarten ① bis ⑥ in:

- % relativ, bezogen auf Lagerungsart
LA ① $\equiv 100 \%$

Figur 22,
Seite 85:

Splittablösung in:

- Massen-% nach statischer Wasserlagerung mit und ohne Vakuum

./.

Tabelle 15: Splittablösung nach Lagerungsarten ① bis ⑥

LA Lagerungsart Nr.	B TB		Q		Δ ▲		K		ETS 1	
	Massen-%	LA 1 = 100 %	Massen-%	LA 1 = 100 %	Massen-%	LA 1 = 100 %	Massen-%	LA 1 = 100 %	Massen-%	LA 1 = 100 %
① t trocken	29 37	100 100	24 24	100 100	24 24	100 100	24 25	100 100	24 25	100 100
② WLS 28 d	47 35	162 95	16 20	67 83	16 20	67 83	27 17	113 68	27 17	113 68
③ V+WLS 28 d	52 21	179 57	44 14	183 58	44 14	183 58	31 17	129 68	31 17	129 68
④ t+WLD 10 ⁶ Po = 11 bar Pu = 0,6 bar	62 31	214 84	46 22	192 92	46 22	192 92	23 17	96 68	23 17	96 68
⑤ V+WLD 10 ⁶ Po = 11 bar Pu = 0,6 bar	61 31	210 84	17 17	71 71	17 17	71 71	16 14	67 56	16 14	67 56
⑥ V+WLS 28 d + WLD 10 ⁶ Po = 11 bar Pu = 0,6 bar	63 37	217 100	26 25	108 104	26 25	108 104	23 24	96 96	23 24	96 96

Verlust in

Massen-% (eff.

Werte) Fig. 14 bis 17, Seiten 77 bis 80

%-relativ, bezogen auf LA ① = 100 %, Fig. 18 bis 21, Seiten 81 bis 84

Tabelle 16: Splittablösung in Massen-% (effektive Werte)

LA Lagerungsart Nr.	B TB	o	Q	Δ	K	□	ETS 1			
						■				
① trocken t	B TB	26,2 33,0	29,0 37,1	34,0 44,1	21,6 21,9	24,5 24,2	29,4 24,0	20,1 22,8	23,6 24,8	27,0 27,0
② WLS 28 d	B TB	43,1 33,2	47,3 35,2	52,8 37,5	14,1 15,5	16,2 19,5	19,9 23,4	23,8 15,8	27,0 16,6	29,5 18,0
③ V+WLS 28 d	B TB	47,8 20,3	52,1 20,8	56,6 21,3	29,3 10,2	43,8 13,5	58,1 18,0	26,2 16,6	30,8 16,9	39,1 17,5
④ t+WLD 10 ⁶	B TB	61,1 29,6	62,5 31,3	63,6 33,3	42,4 20,4	45,8 21,7	49,4 23,5	19,8 15,4	22,7 16,6	27,1 17,2
⑤ V+WLD 10 ⁶	B TB	59,4 28,8	62,5 30,8	63,6 33,2	16,2 17,0	17,0 17,4	18,2 17,8	14,9 12,0	15,5 13,8	16,1 15,8
⑥ V+WLS 28 d + WLD 10 ⁶	B TB	55,8 32,6	63,2 37,2	65,5 40,4	22,4 20,2	26,2 24,8	33,0 26,4	21,5 20,0	22,8 24,3	24,0 27,3
		EW -	MW	EW +	EW -	MW	EW +	EW -	MW	EW +

Legende: B: Bitumen B 80/100

EW -: minimaler Einzelwert

TB: Teerbitumen TB 2000

EW +: maximaler Einzelwert

Q: Quarzsplitt

MW: Mittelwert Serie (5 Einzelwerte)

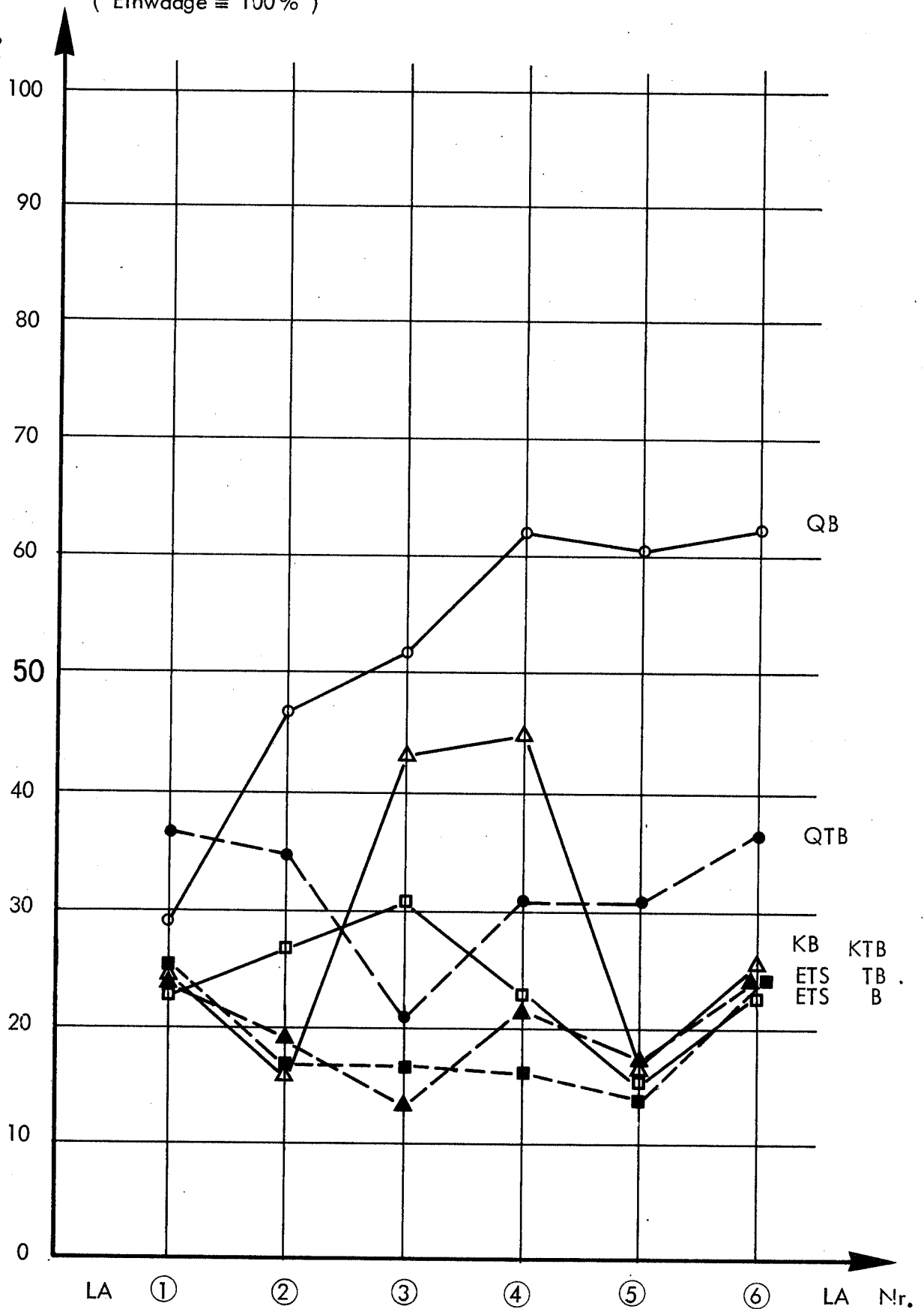
K: Kalksplitt

ETS: EMPA-Test-Splitt

SPLITTABLÖSUNG IN MASSEN-%
(Einwaage $\equiv$ 100%)

Fig. 14

Verlust in
Massen - %

Legende :

Mineralstoffe
Q K
Quarz Kalk ETS *)

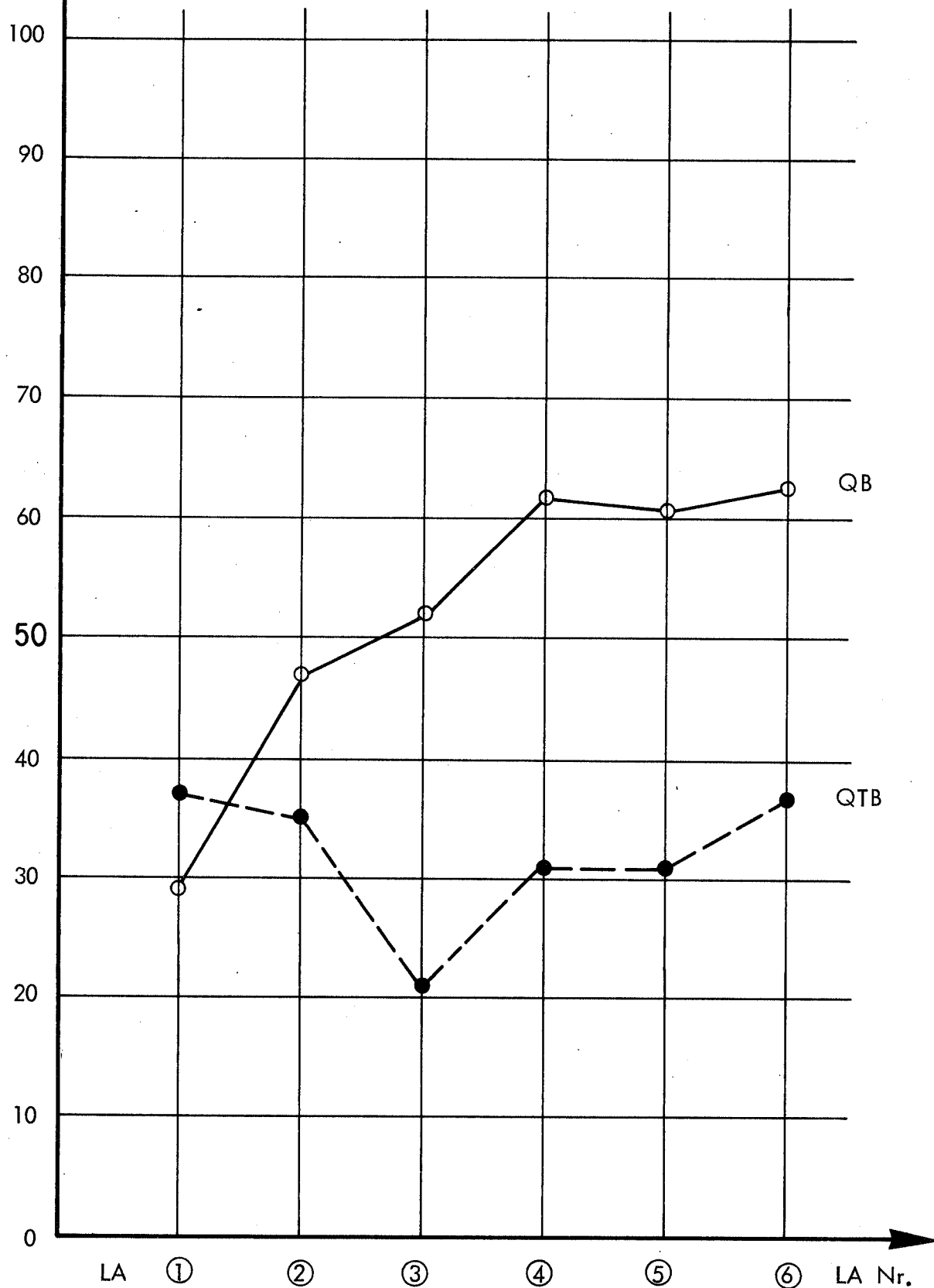
○ △ □
● ▲ ■

Bindemittel

B Bitumen
TB Teerbitumen

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

*) EMPA-Test-Splitt

SPLITTABLÖSUNG IN MASSEN-%Fig. 15Verlust in
Massen-%(Einwaage $\equiv$ 100%)Legende :Mineralstoffe
Q Quarz

Bindemittel

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

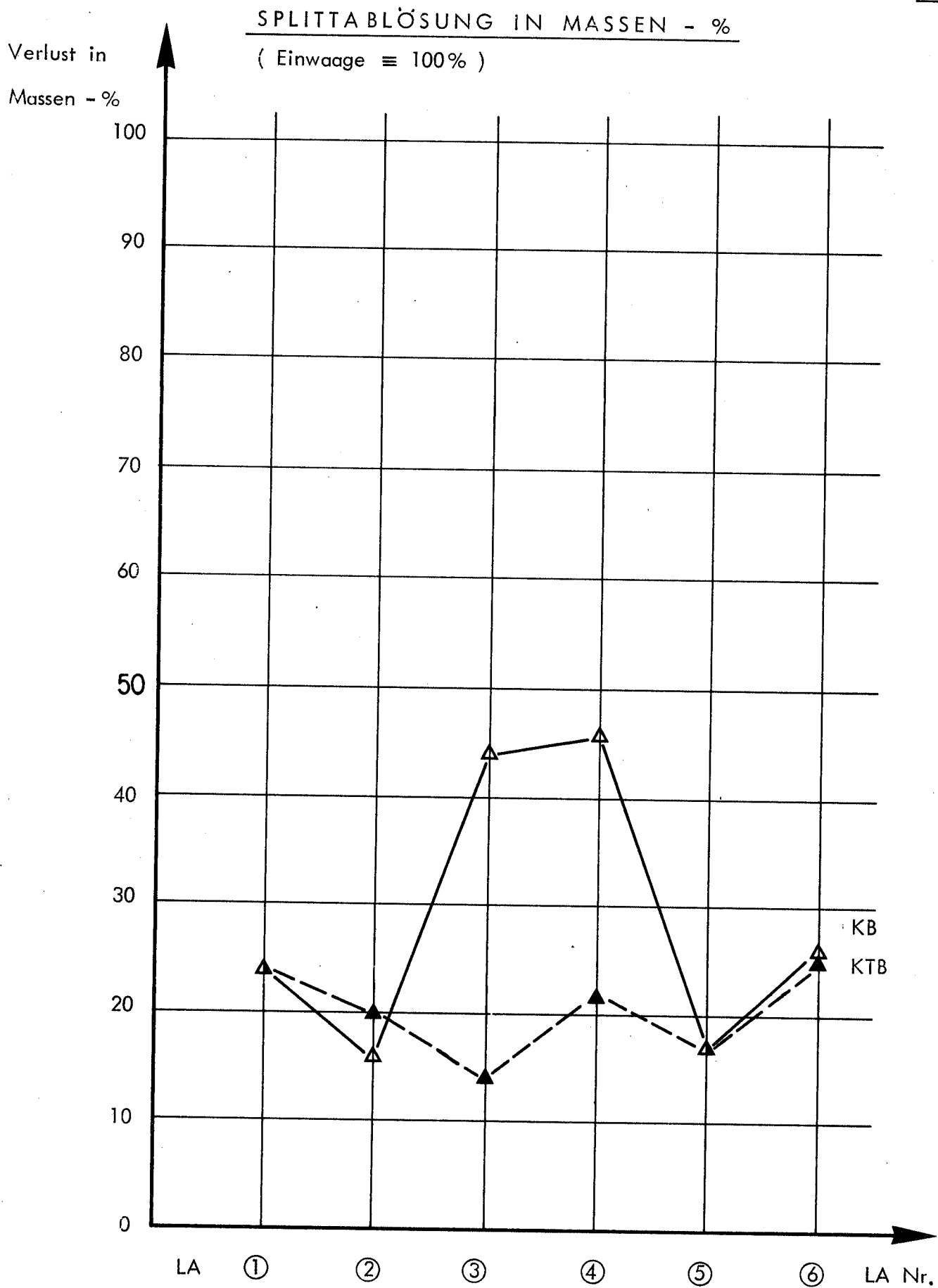
○

B Bitumen

●

TB Teerbitumen

Fig. 16

Legende :

Mineralstoffe

K Kalk

Bindemittel

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

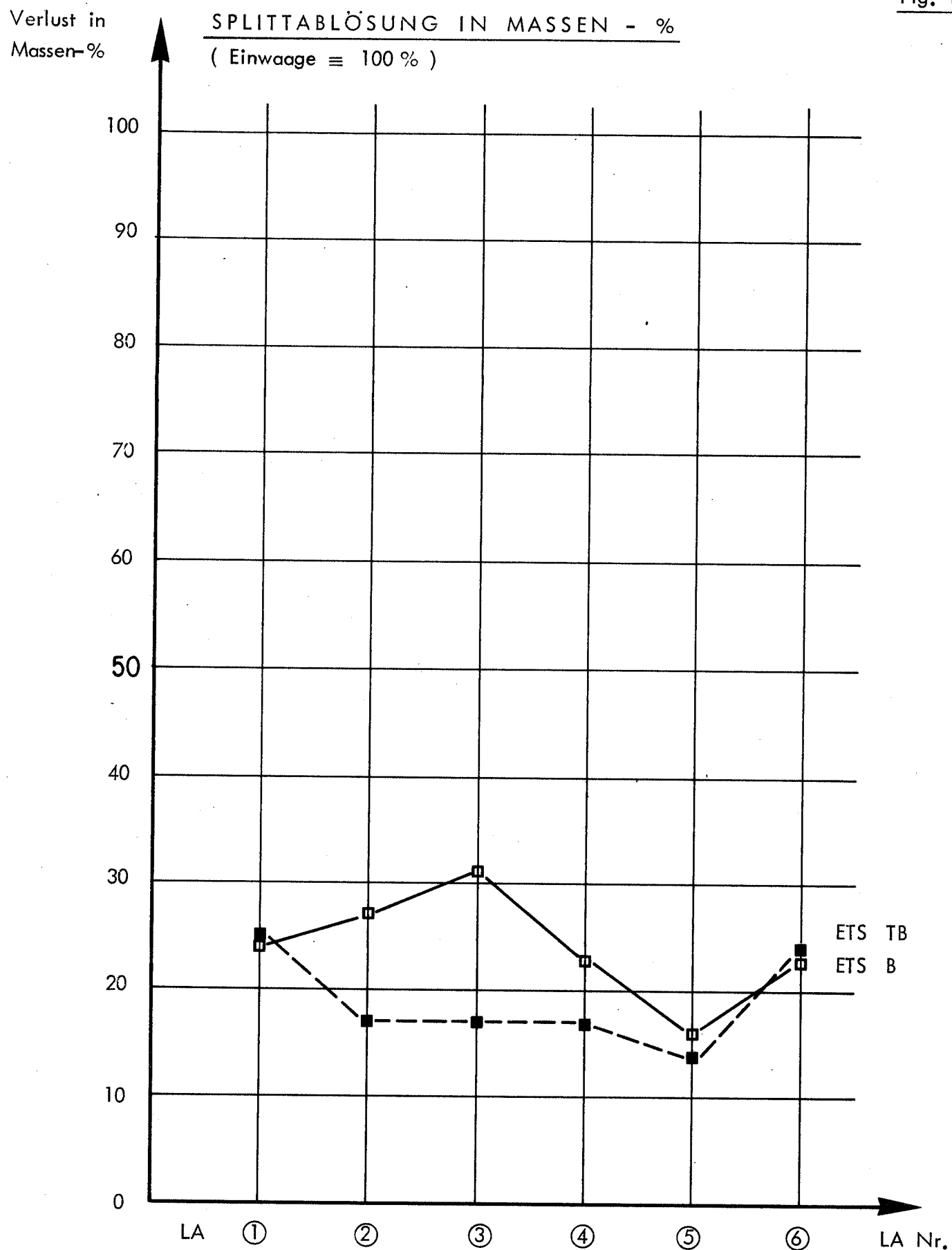
△

B = Bitumen

▲

TB= Teerbitumen

Fig. 17



Legende :

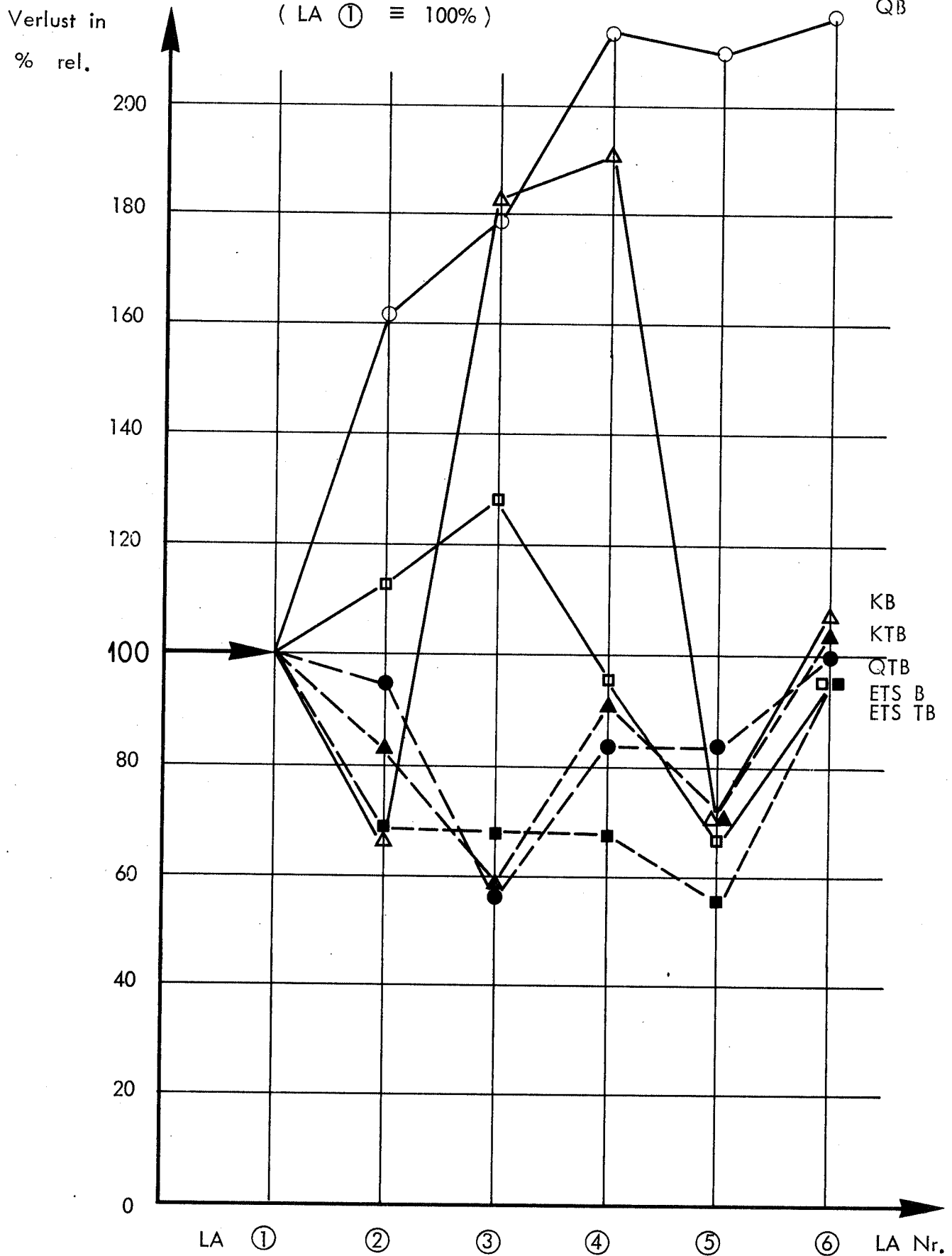
Mineralstoffe ETS *)	Bindemittel
□	B = Bitumen
■	TB= Teerbitumen

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

*) EMPA-Test-Splitt

Fig. 18

SPLITTABLÖSUNG RELATIV

(LA ① $\equiv$ 100%)

Legende :

Mineralstoffe		
Q	K	ETS*)
Quarz	Kalk	
○	△	□
●	▲	■

Bindemittel

B = Bitumen

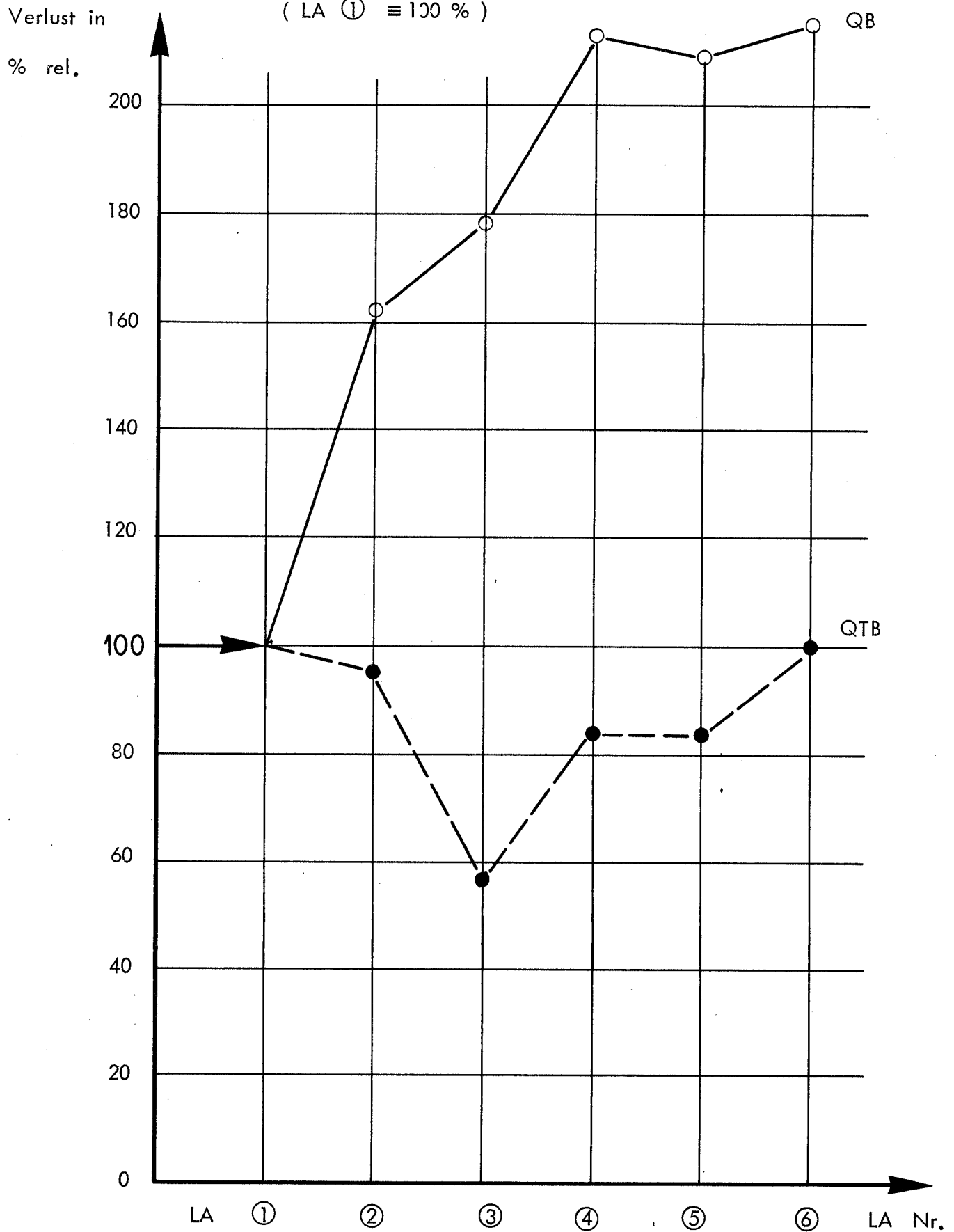
TB= Teerbitumen

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

*) EMPA-Test-Splitt

Fig. 19

SPLITTABLÖSUNG RELATIV
(LA ① $\equiv$ 100 %)

Legende :

Mineralstoffe
Q Quarz

Bindemittel

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

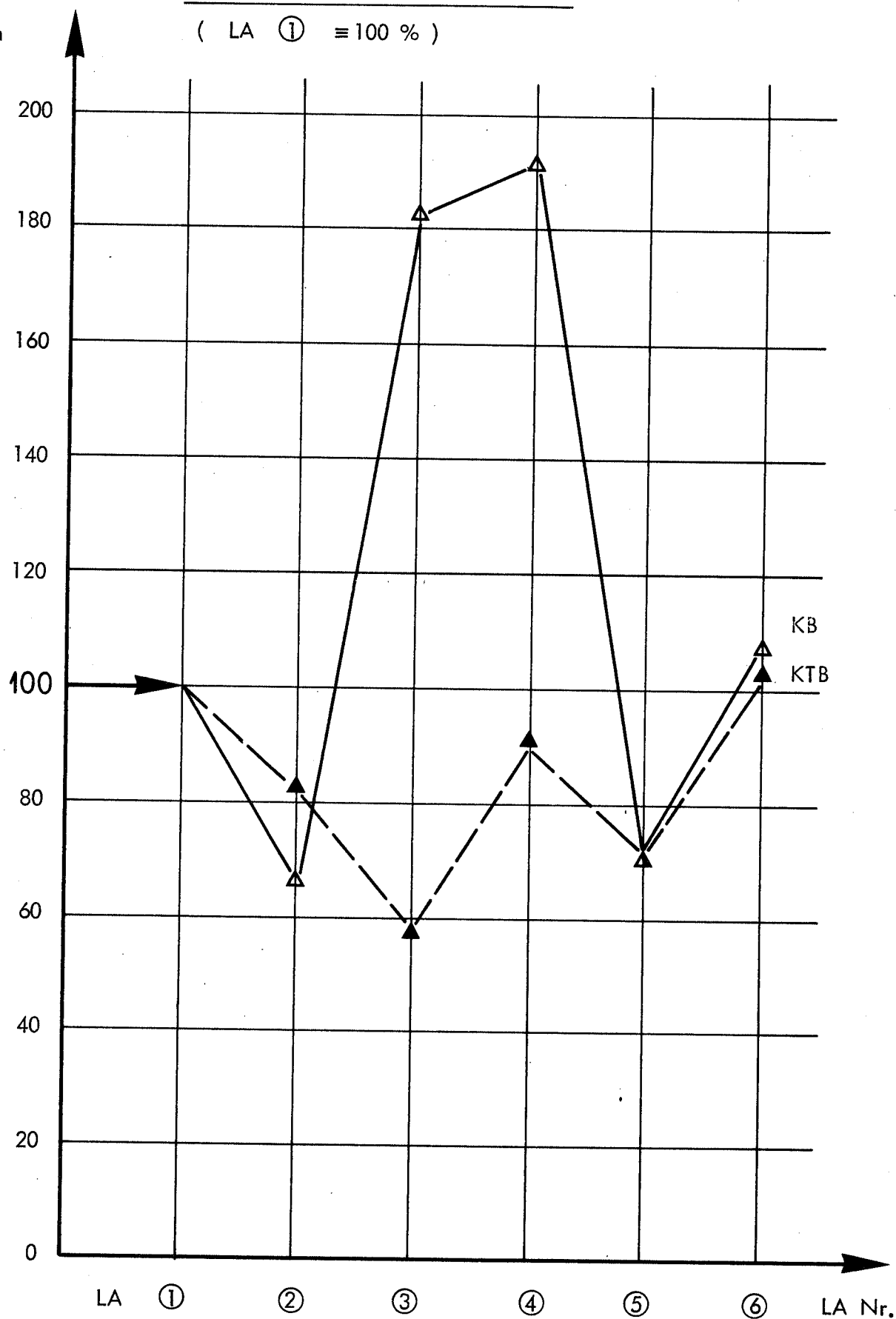
○

B = Bitumen

●

TB= Teerbitumen

SPLITTABLÖSUNG RELATIV

(LA ① $\equiv$ 100 %)Verlust in
% rel.

Legende :

Mineralstoffe
K Kalk

Bindemittel

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

△

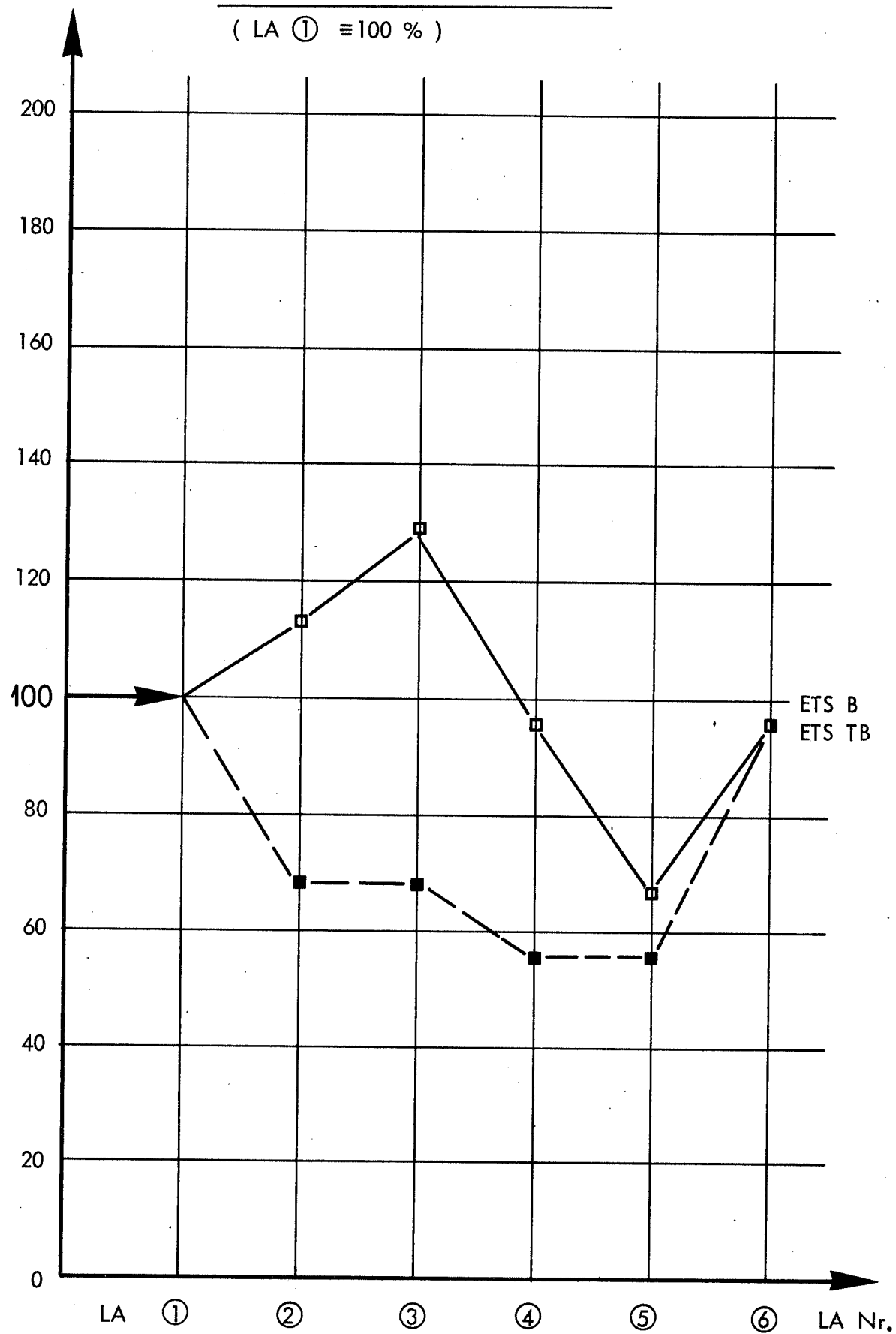
B = Bitumen

▲

TB = Teerbitumen

SPLITTABLÖSUNG RELATIV

Fig. 21

Verlust in
% rel.(LA ① $\equiv$ 100 %)Legende :Mineralstoffe
ETS *)

Bindemittel

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

□

B = Bitumen

*) EMPA-Test-Splitt

■

TB= Teerbitumen

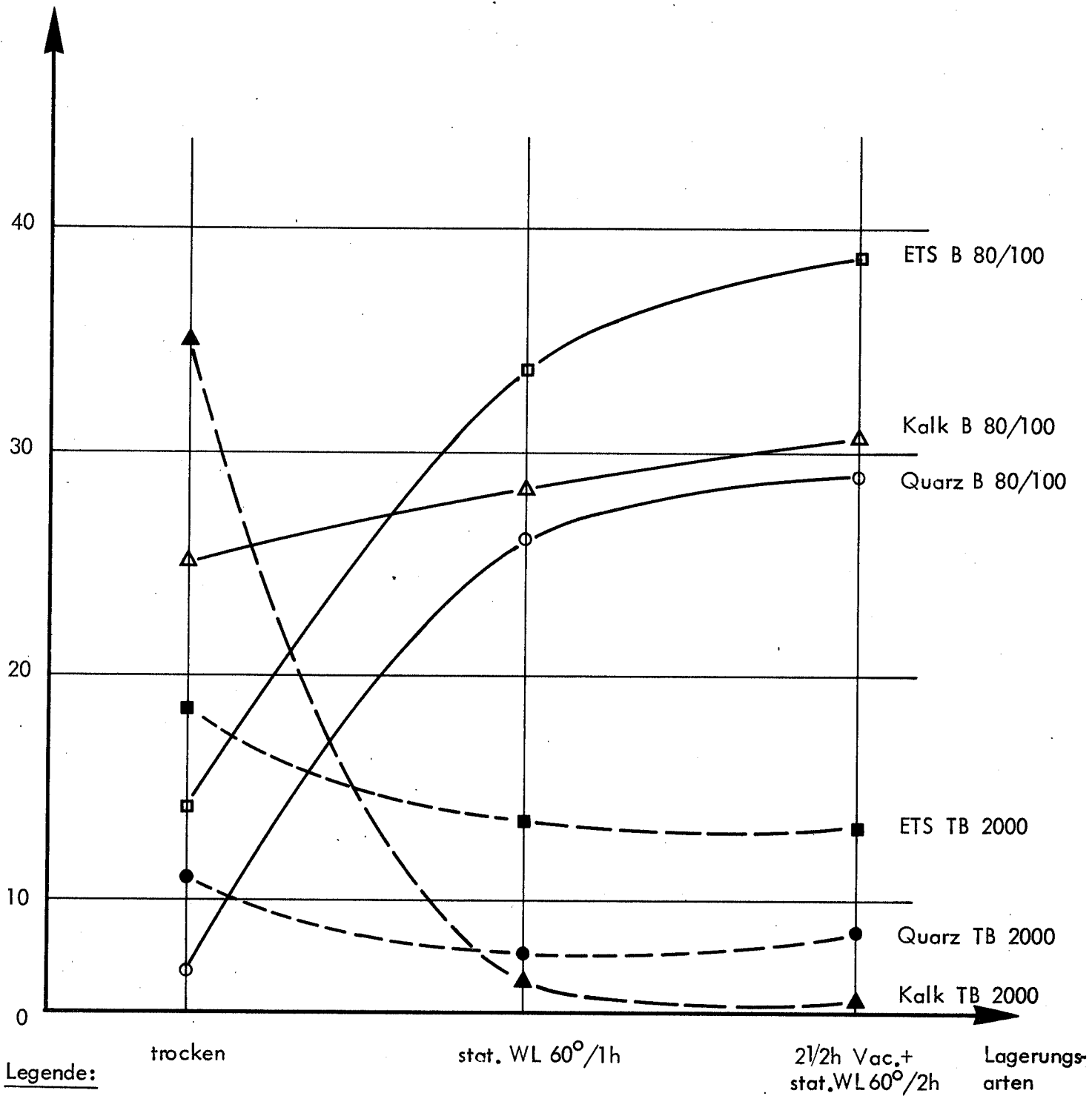
4 - 41274

Fig. 22

VORVERSUCHE SPLITTABLÖSUNG

Mittelwerte aus 2 Versuchen (2 x 4 Teller)
 Splittablösung in Massen-% (Einwaage $\equiv$ 100%)

Verlust in Massen-%



Legende:

Mineralstoffe			Bindemittel
Q Quarz	K Kalk	ETS*)	
○	△	□	B = Bitumen
●	▲	■	TB= Teerbitumen

*) EMPA-Test-Splitt

XV MECHANISCHE FESTIGKEITSPRUEFUNG, MARSHALL-VERSUCHEVersuchsdurchführung

Versuche mit Lagerungsart (1) gemäss Norm SN 671'969b.

Lagerungsarten gemäss Tabelle 7, Seite 62.

Herstellen der Prüfkörper gemäss Tabelle 13, Seite 69, mit modifizierten Schlagzahlen für tiefe und hohe Hohlraumgehalte.

- Hohlraumgehalt tief: ca. 3 - 4 Vol.-%
- Hohlraumgehalt hoch: ca. 10 - 12 Vol.-%

Ergebnisse

Figur 23,
Seite 87:

SM Stabilität nach
Marshall

Figur 24,
Seite 88:

FM Fliesswert nach
Marshall

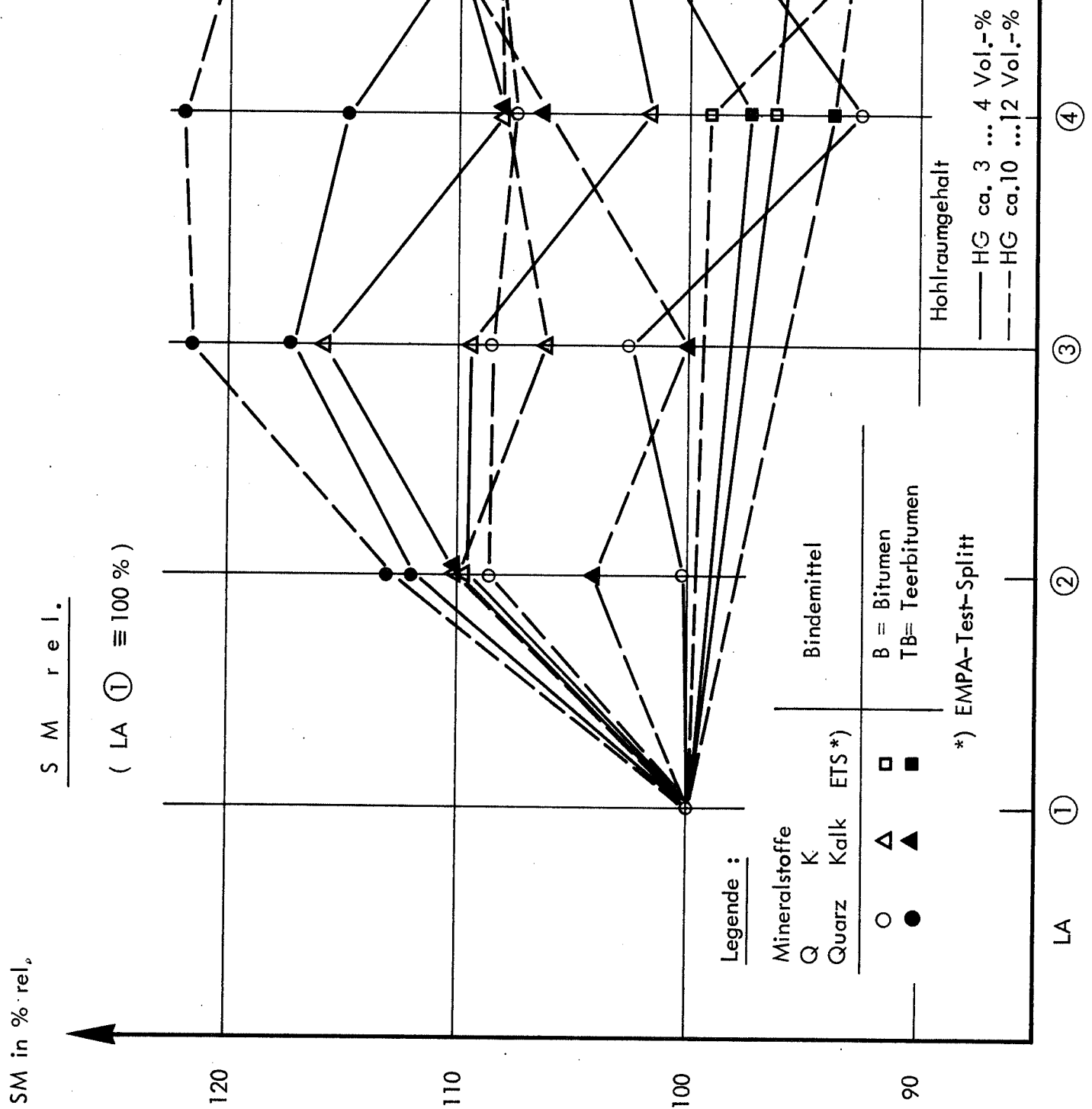
Figur 25,
Seite 89:

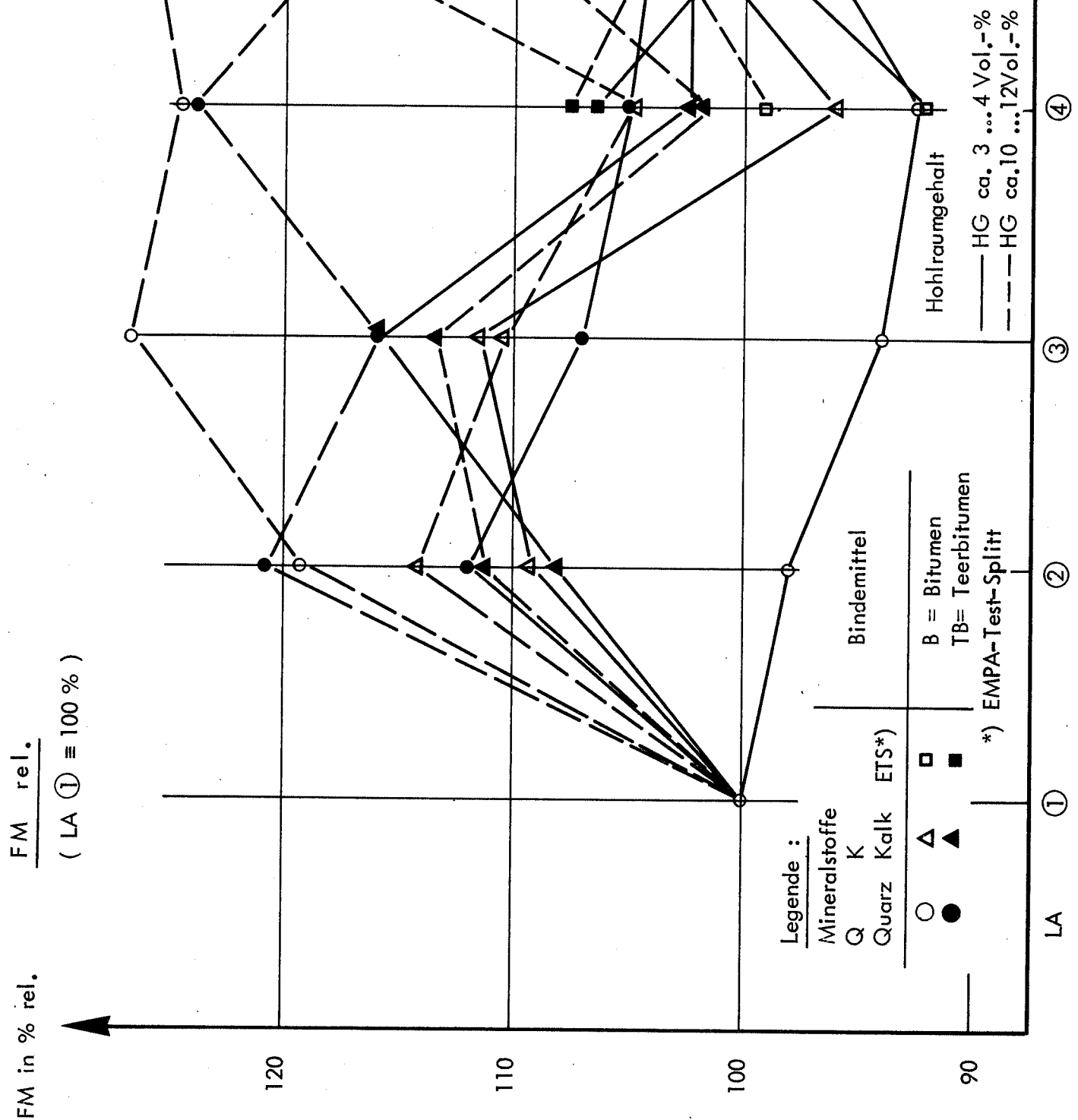
SM/FM Steifigkeit
nach Marshall

} Sammeldarstellungen
für Mineralstoffe Q,
K, ETS je mit Binde-
mitteln B Bitumen und
TB Teerbitumen nach
Lagerungsarten (1) bis
(6) in:
- % relativ, bezogen
auf LA (1) = 100 %

Figuren 26 bis
34, Seiten 90
bis 98:

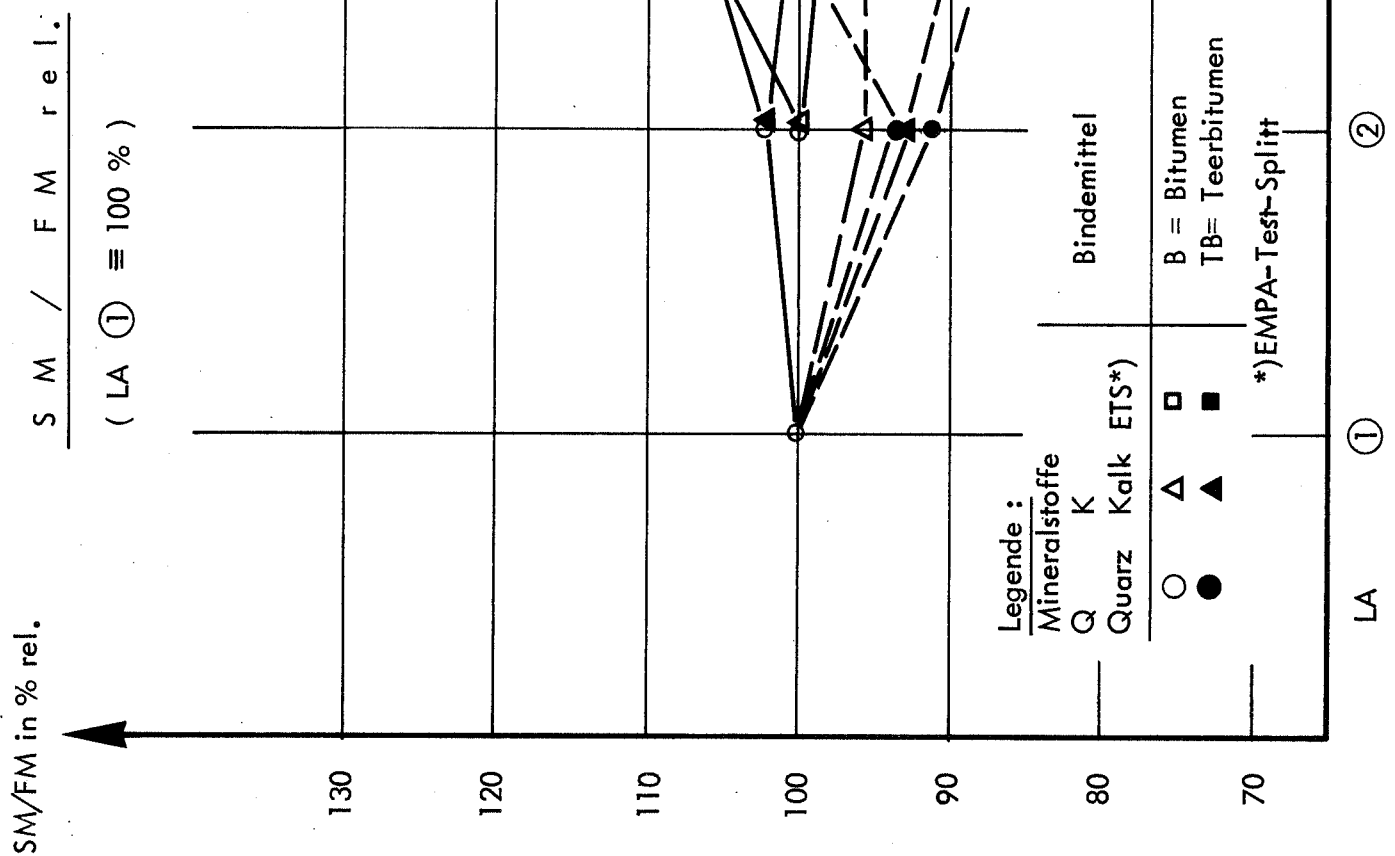
SM, FM, SM/FM für Mineralstoffe Q, K und
ETS einzeln, je für Bindemittel B Bitumen
und TB Teerbitumen nach Lagerungsarten (1)
bis (6) in:
- % relativ, bezogen auf LA (1) = 100 %





LA Nr. = Lagerungsart Nr.

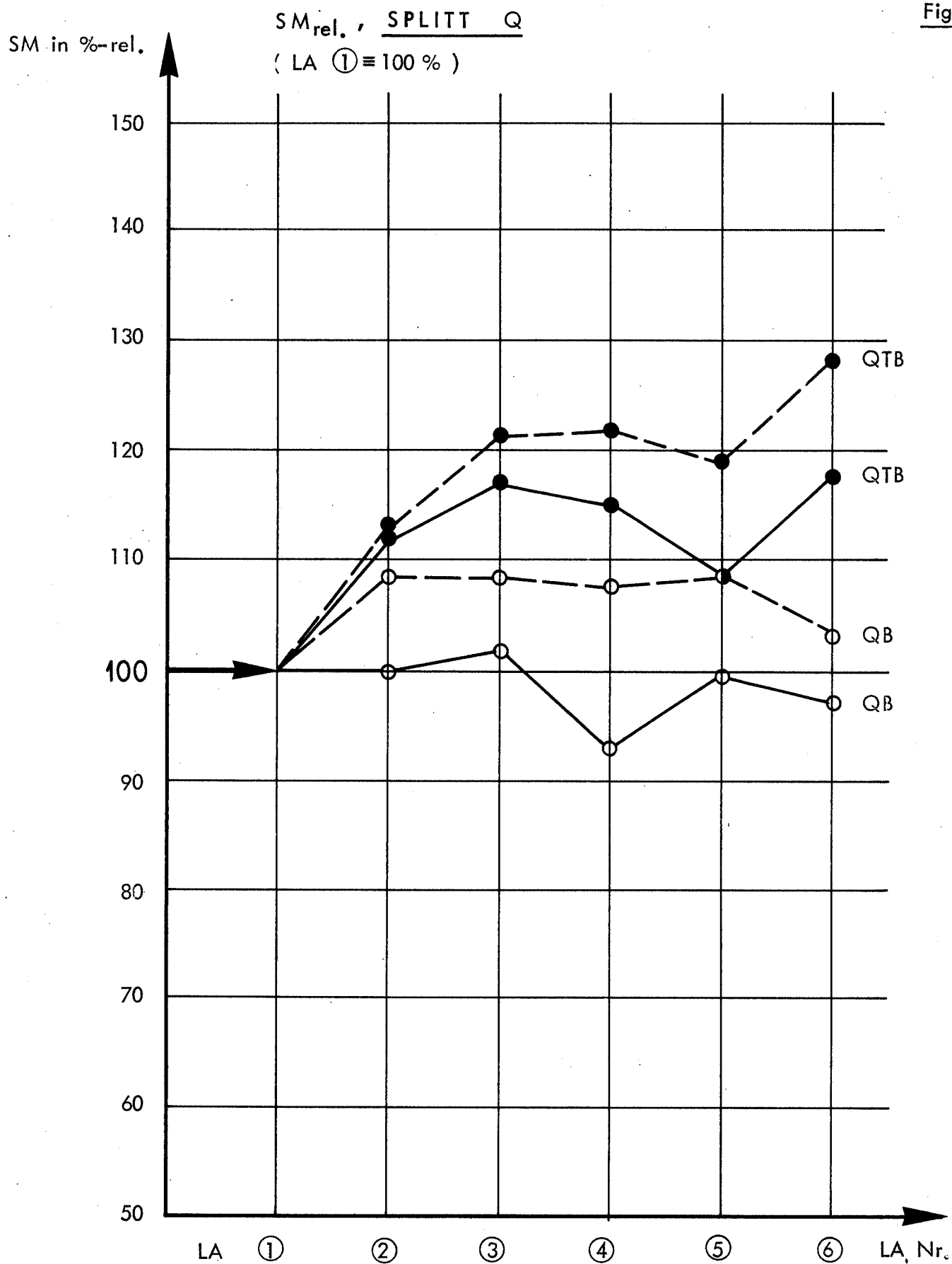
4 - 41277



LA Nr. = Lagerungsart Nr.

4 - 41278

Fig. 26

Legende :Mineralstoffe
Q Quarz

Bindemittel

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

○

B = Bitumen

Hohlraumgehalt

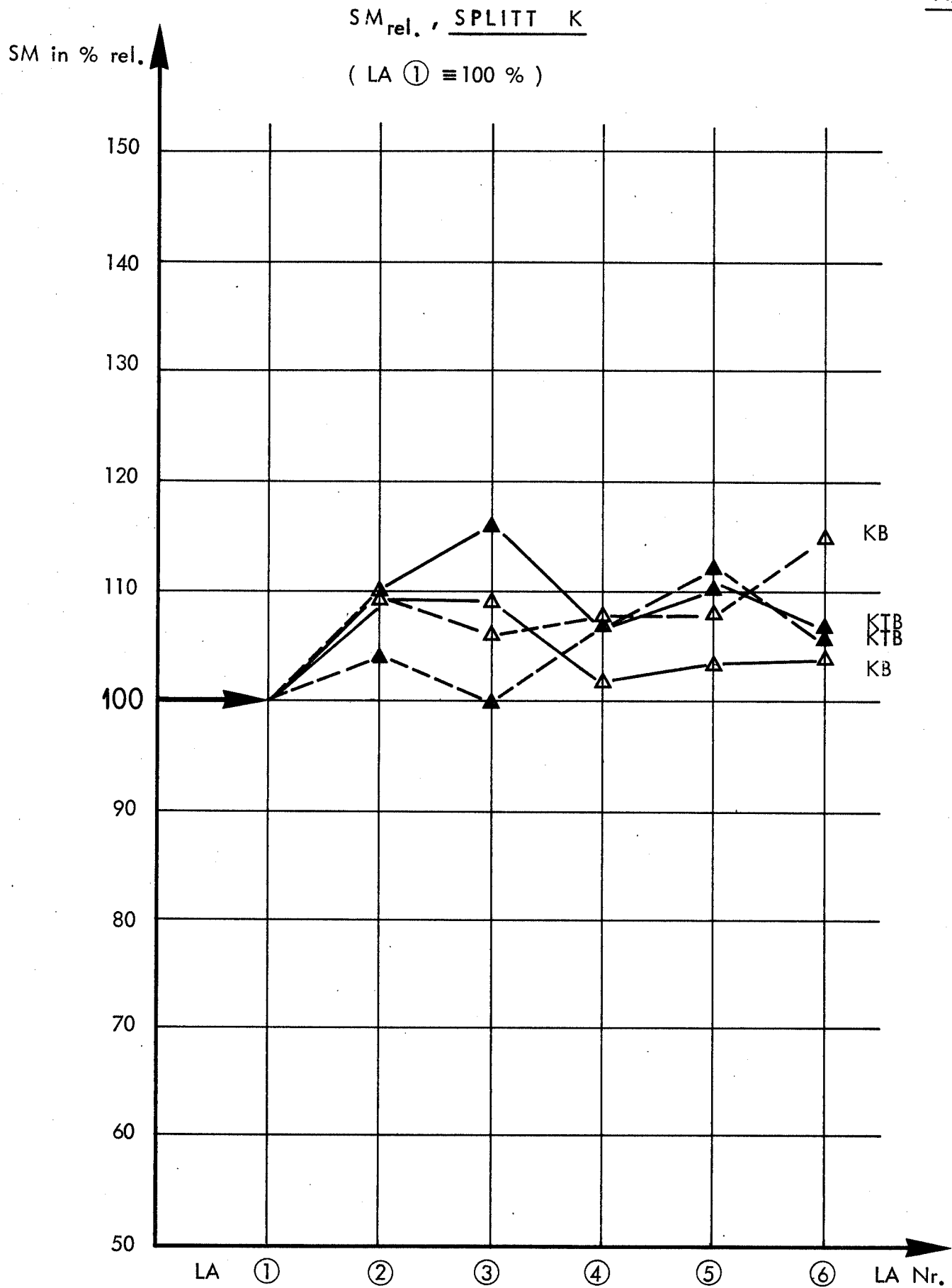
●

TB = Teerbitumen

—— HG ca. 3 ... 4 Vol.-%

- - - HG ca. 10 ... 12 Vol.-%

Fig. 27

Legende:Mineralstoffe
K Kalk

△

▲

Bindemittel

B = Bitumen

TB=Teerbitumen

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

Hohlraumgehalt

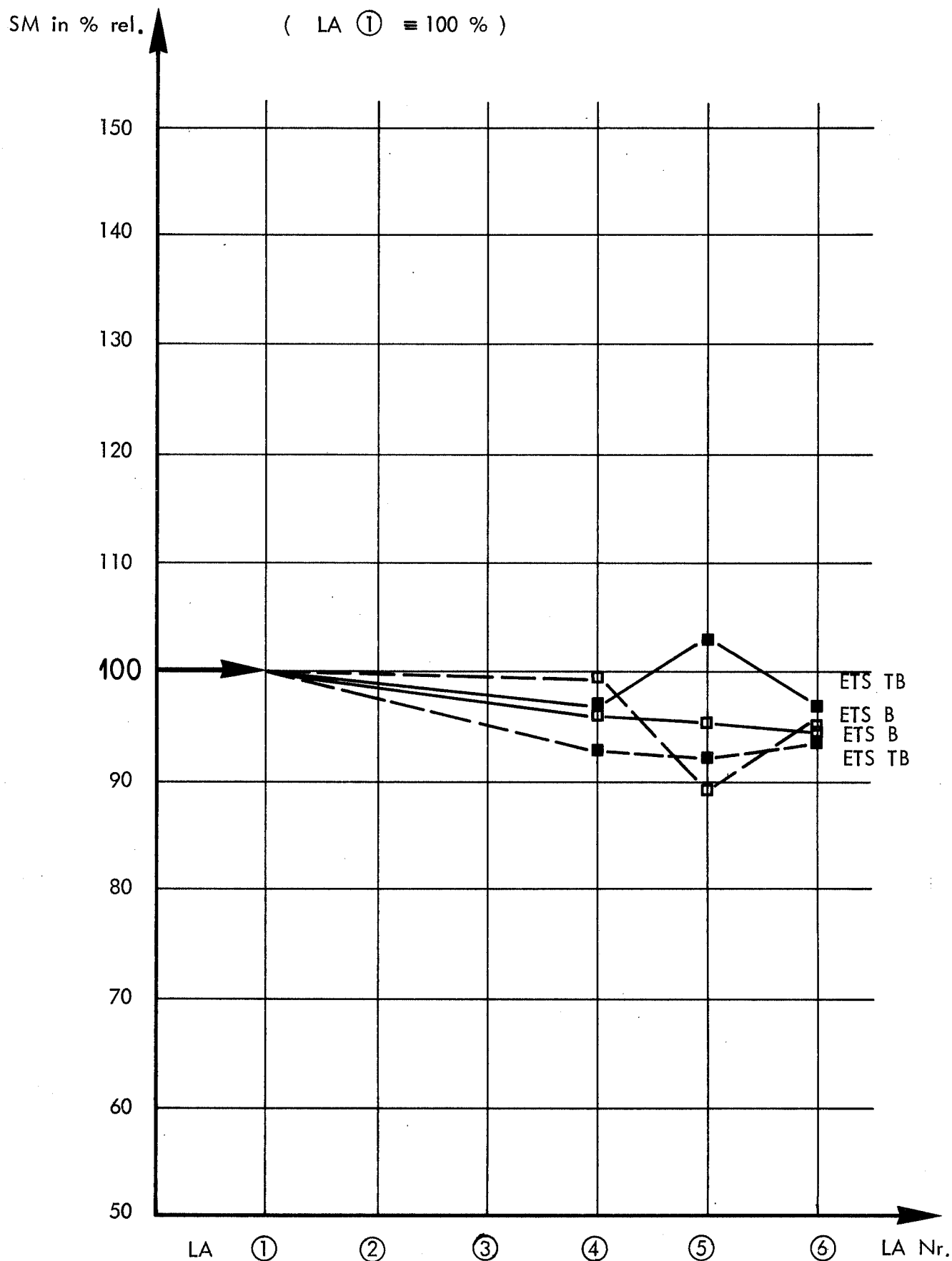
— HG ca. 3 ... 4 Vol.-%

- - - HG ca. 10 ... 12 Vol.-%

4 - 41280

SM_{rel.}, SPLITT E T S

(LA ① ≡ 100 %)



Legende :

Mineralstoffe
ETS *)

Bindemittel

□

B = Bitumen

■

TB = Teerbitumen

*) EMPA-Test-Splitt

LA Nr. ≡ Lagerungsart Nr.

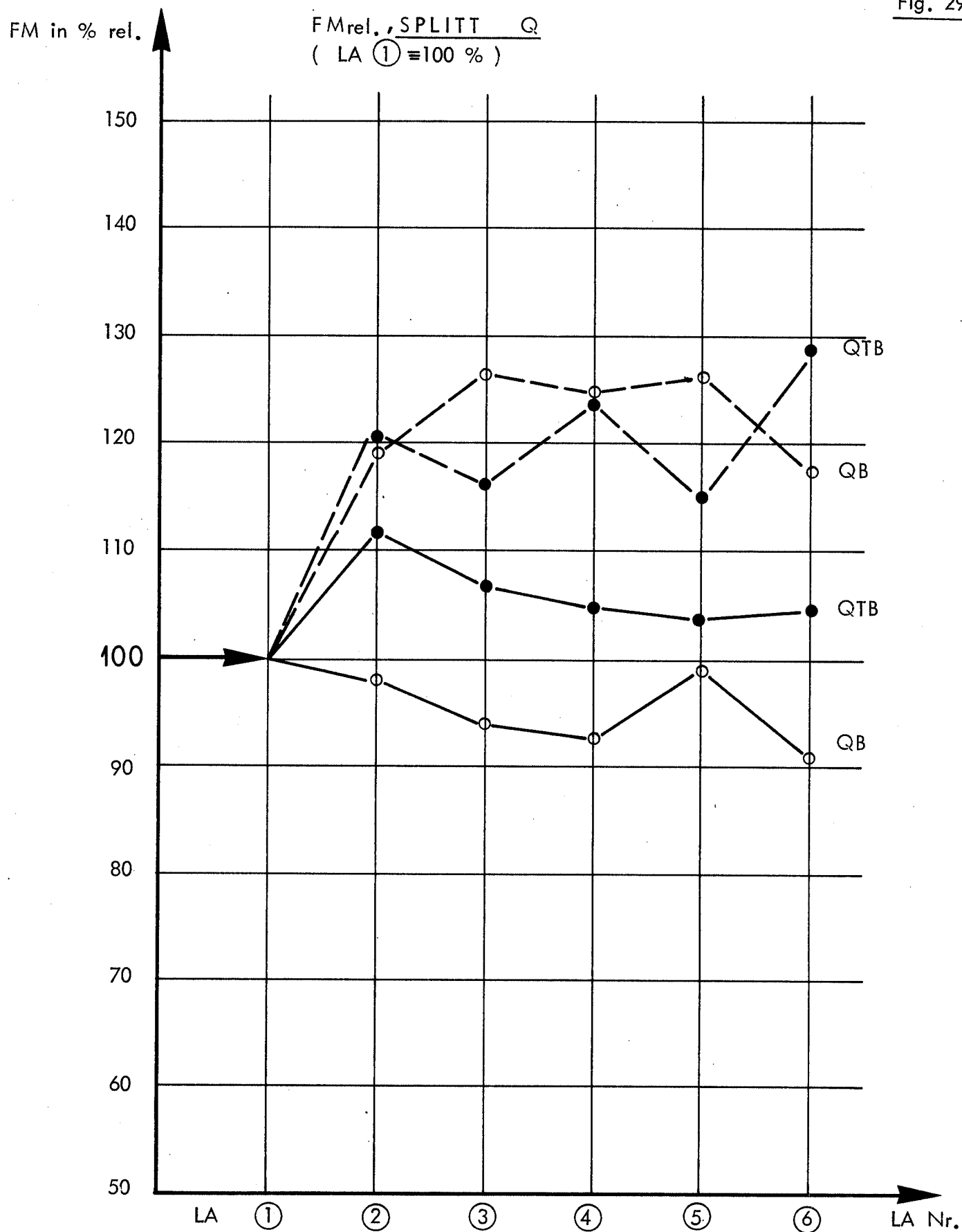
Hohlraumgehalt

— HG ca. 3 ... 4 Vol.-%

- - - HG ca. 10 ... 12 Vol.-%

4 - 41281

Fig. 29

Legende :Mineralstoffe
Q Quarz

Bindemittel

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

○

B = Bitumen

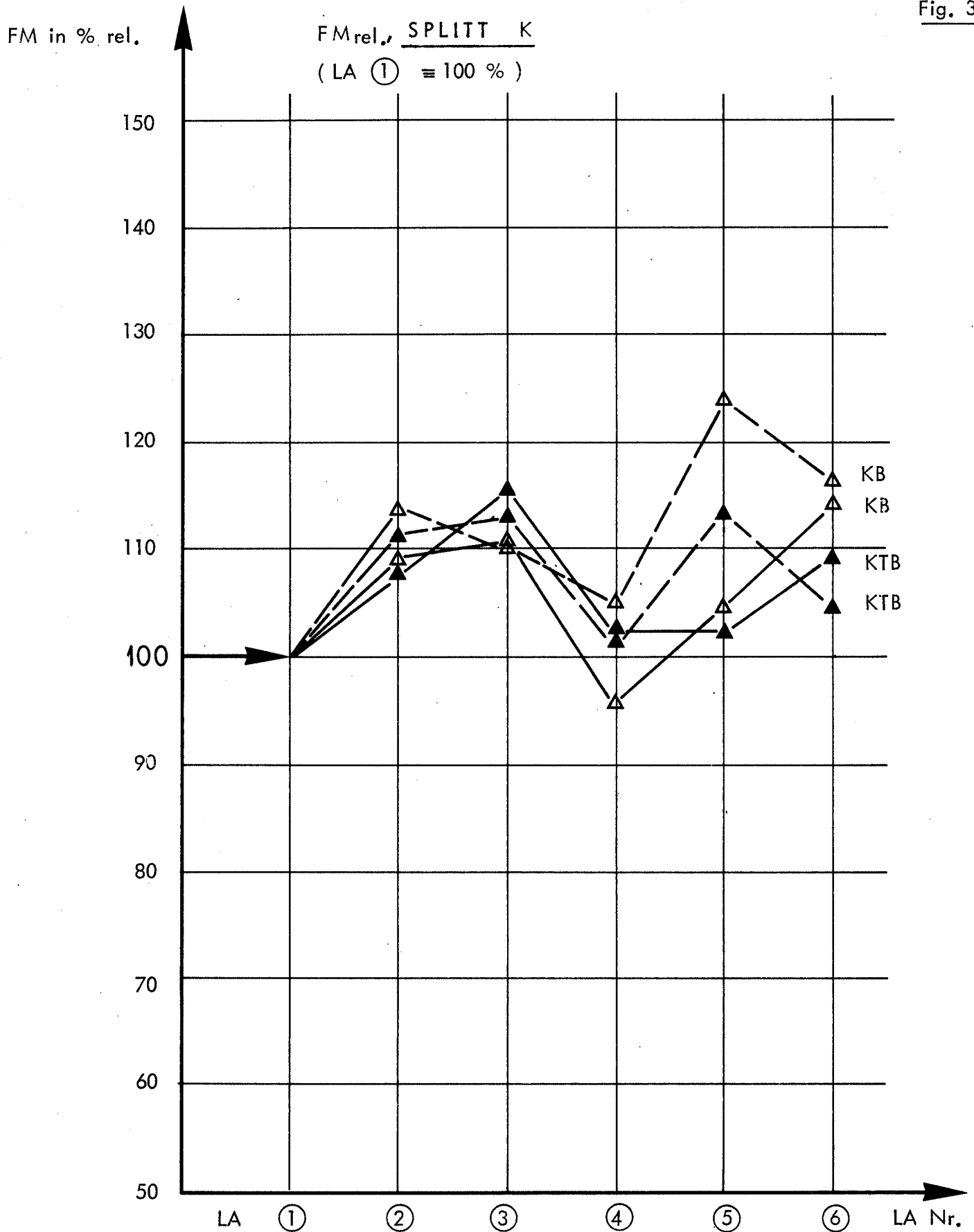
Hohlraumgehalt
—— HG ca. 3 ... 4 Vol.-%

●

TB= Teerbitumen

--- HG ca. 10 ... 12 Vol.-%

Fig. 30

Legende :

Mineralstoffe
K Kalk



Bindemittel

B = Bitumen

TB = Teerbitumen

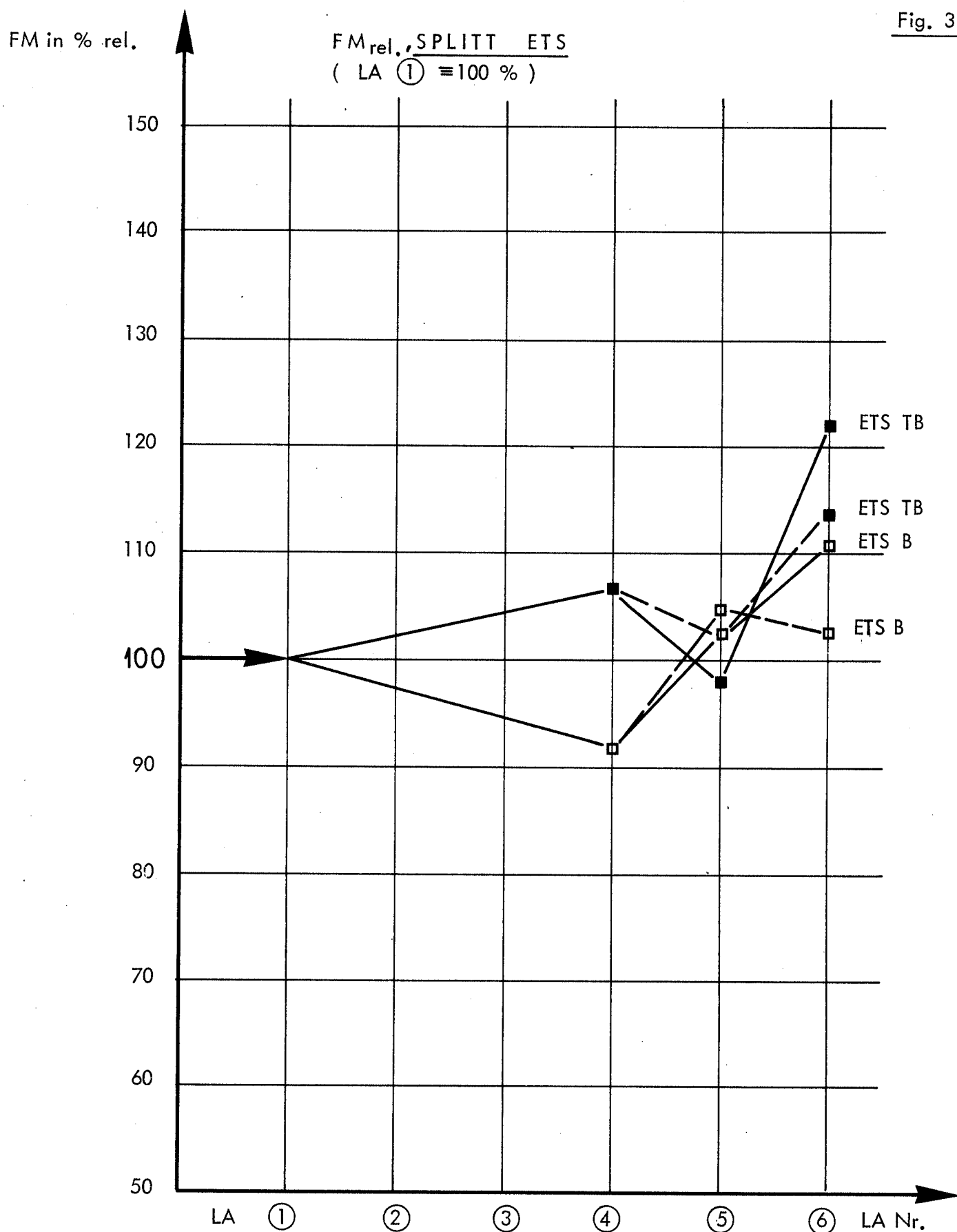
LA Nr. = Lagerungsart Nr.

Hohlraumgehalt

—— HG ca. 3 ... 4 Vol.-%

--- HG ca. 10 ... 12 Vol.-%

Fig. 31

Legende :Mineralstoffe
ETS *)

Bindemittel

B = Bitumen

TB = Teerbitumen

*) EMPA-Test-Splitt

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

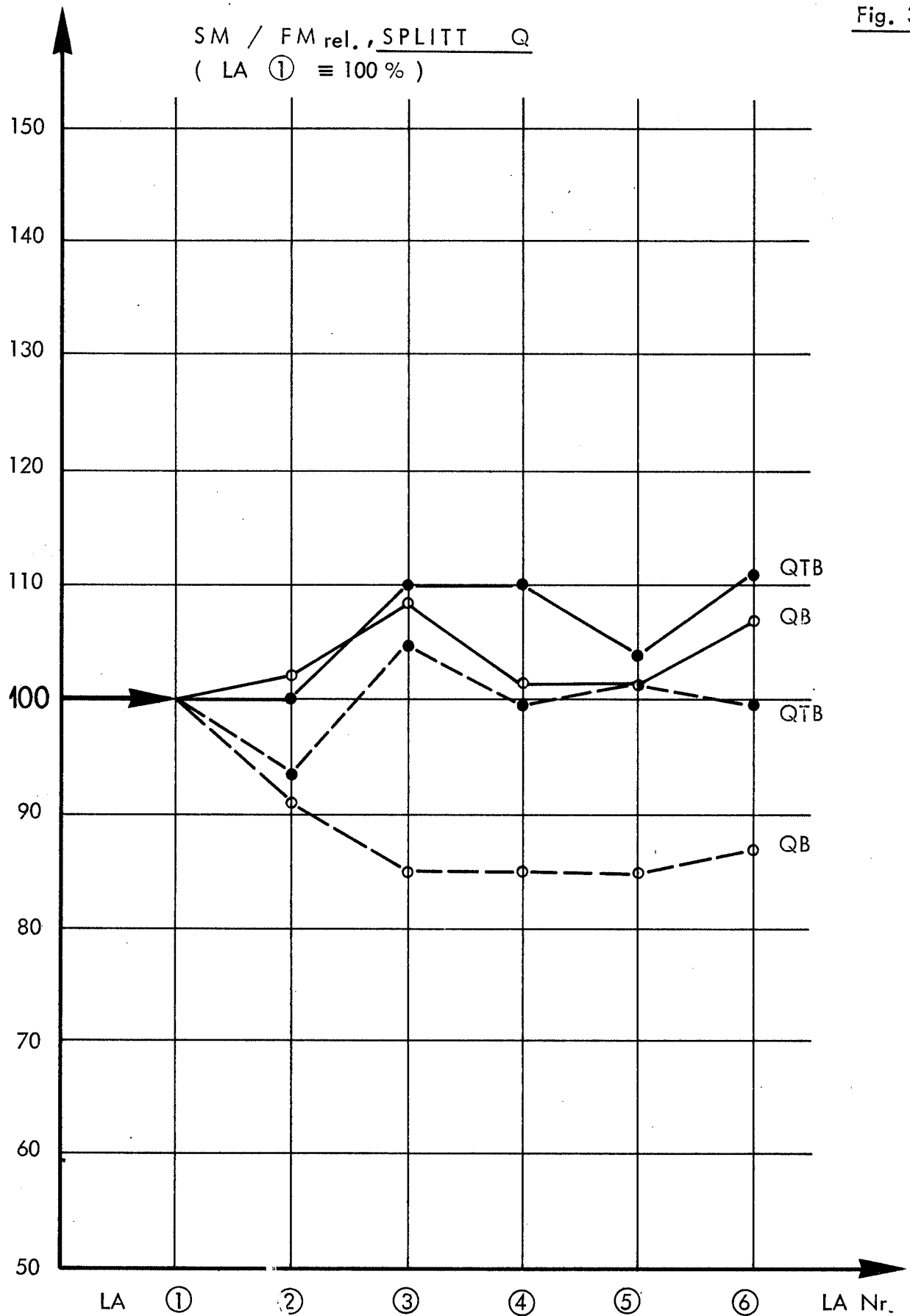
Hohlraumgehalt

— HG ca. 3 ... 4 Vol.-%

--- HG ca. 10 ... 12 Vol.-%

4 - 41284

Fig. 32

SM/FM in
% rel.SM / FM rel., SPLITT Q
(LA ① $\equiv$ 100 %)Legende :

Mineralstoffe Q Quarz	Bindemittel
○	B = Bitumen
●	TB= Teerbitumen

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

Hohlraumgehalt

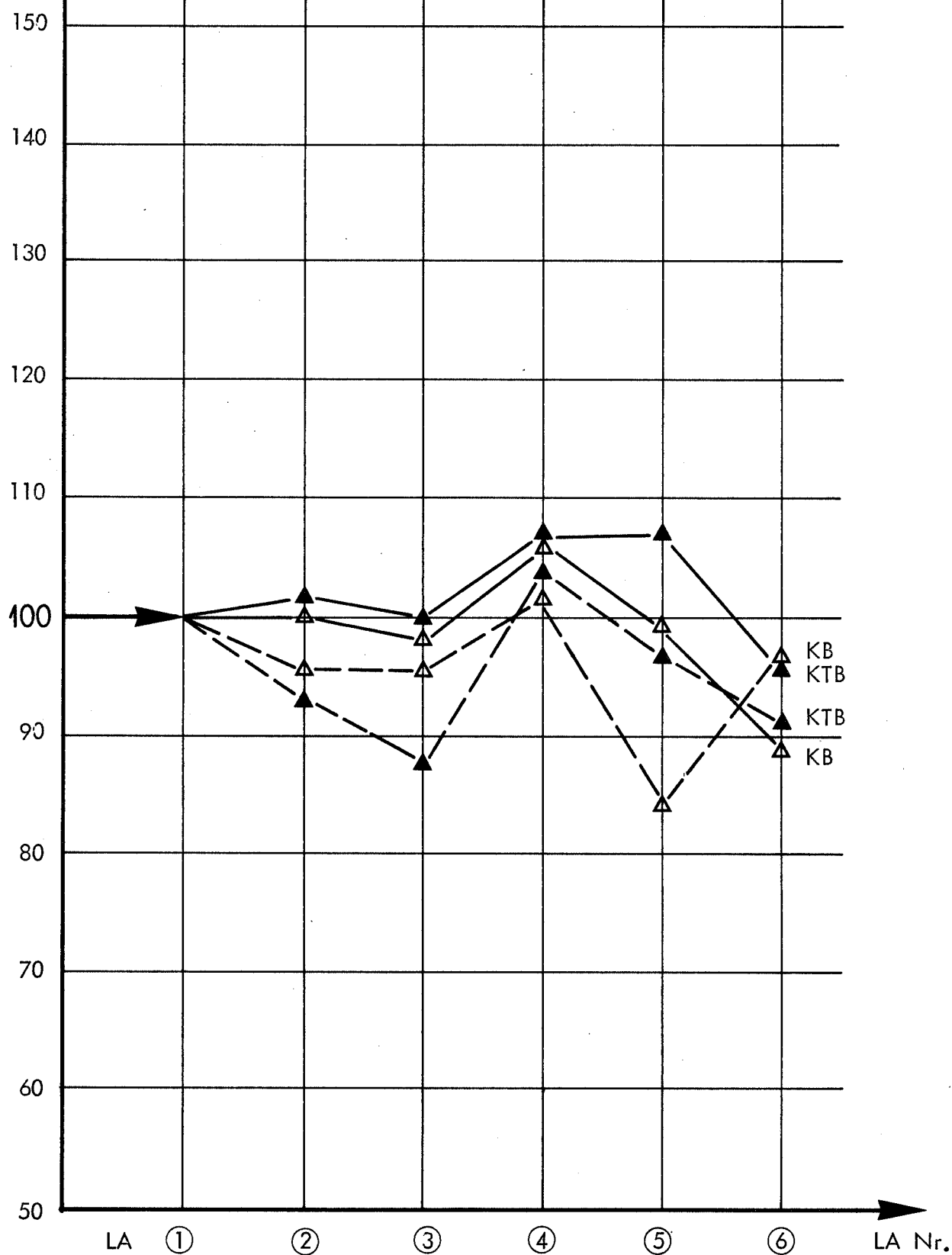
—— HG ca. 3 ... 4 Vol.-%

- - - HG ca. 10 ... 12 Vol.-%

Fig. 33

SM/FM in
% rel.SM / FM_{rel.}, SPLITT K

(LA ① ≡ 100 %)

Legende :

Mineralstoffe

K Kalk

△

▲

Bindemittel

B = Bitumen

TB= Teerbitumen

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

Hohlraumgehalt

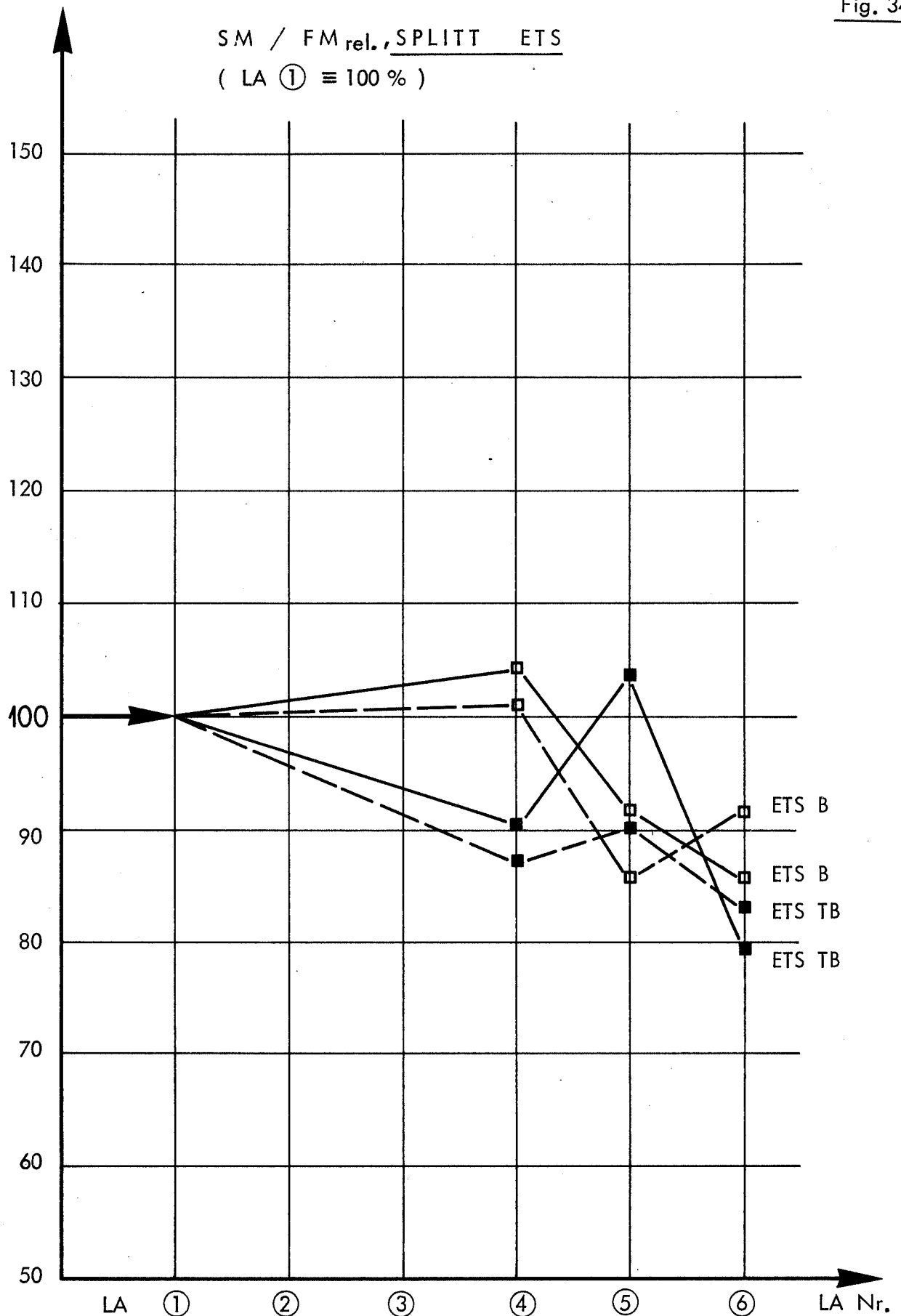
——— HG ca. 3 ... 4 Vol.-%

- - - - HG ca. 10 ... 12 Vol.-%

Fig. 34

SM/FM in
% rel.

SM / FM_{rel.}, SPLITT ETS
(LA ① ≡ 100 %)



Legende :

Mineralstoffe
ETS *)



Bindemittel

B = Bitumen

TB = Teerbitumen

*) EMPA-Test-Splitt

LA Nr. = Lagerungsart Nr.

Hohlraumgehalt

—— HG ca. 3 ... 4 Vol.-%

--- HG ca. 10 ... 12 Vol.-%
4 - 41287

H KOMMENTAR ZU DEN UNTERSUCHUNGSERGEBNISSEN

XVI ALLGEMEINES

Festzustellen ist allgemein, dass für alle drei Versuchsgruppen (Umhüllungsversuche, Splittablösprüfungen und mechanische Festigkeitsprüfungen) die über einen grossen Aufwand realisierte Möglichkeit des Ansetzens dynamischer Wasserlagerungen, mittels des unter Kapitel F beschriebenen Wasserdruckaggregates, nicht die erwarteten Unterschiede in den Ergebnissen bezüglich Mineralstoffsarten oder Bindemittelsorten erbrachte. Dies speziell bezüglich Einfluss der Lagerungsarten unter dynamischem (schwingendem) Wasserdruck im Vergleich zu den statischen Wasserlagerungen.

Grundsätzlich zeigen die Werte der Proben mit Bindemittel Teerbitumen (TB) gegenüber den Proben mit Bitumen (B) ein besseres Verhalten bezüglich Umhüllungsverlust und Splittablösung sowie Aenderung der mechanischen Eigenschaften. Gleiches besseres Verhalten zeigen bei den Mineralstoffen die Proben mit Kalksplitt (K) und EMPA-Testsplitt (ETS) gegenüber den Proben mit Quarzsplitt (Q).

XVII UMHUELLUNGSVERSUCHE (Restumhüllung in Flächen-%, geschätzt)

Hier differenzieren nur die Proben Quarz (Q) mit Bitumen (B), bezeichnet als (QB), deutlich. Sie liegen mit 10 - 20 % wesentlich tiefer als die Proben Quarz mit Teerbitumen (QTB) mit 80 - 90 % und die Proben Kalksplitt (K) und EMPA-Testsplitt (ETS) je mit Bitumen und Teerbitumen. Ein deutlicher Einfluss der Lagerungsarten ② bis ⑥ liegt gegenüber der herkömmlichen Umhüllungsmethode mit der Lagerungsart ①, gemäss Tabelle 7, Seite 62, nicht vor.

ErgebnisseTabelle 14,Seite 75:

Mittelwerte (ausgeglichene geschätzte Werte durch vier Laboranten)

Tabelle 15,Seite 76:

Mittelwerte (ausgeglichene geschätzte Werte durch vier Laboranten)

XVIII SPLITTABLOESUNG (Verlust in Massen-%, relativer Verlust in %-relativ)

Bei der Splittablösungsprüfung spielen Kornform sowie Makro- und Mikrotextur der Mineralkornoberfläche eine wesentliche Rolle, und zwar bezüglich Ausmass der Ablösung. Dies ist für die verschiedenen Mineralstoffsorten aus dem Versuch "trocken", gemäss Lagerungsart ①, feststellbar. Diese Feststellung dürfte mit der unterschiedlichen Verankerung der Splittkörner im Bindemittelfilm, aufgrund ihrer infolge der unterschiedlichen Kornform und Textur verschieden grossen mechanischen Adhäsion, zusammenhängen.

Für vergleichende Betrachtungen ist daher die Auswertung der Ergebnisse über den relativen Verlust, die relative Ablösung in %-relativ angezeigt, wobei die Ergebnisse auf die Ablösung nach Lagerungsart ① bezogen werden, d. h. den Versuch "trocken". Ein deutlich negativer Einfluss der Lagerungsarten ② bis ⑥ gegenüber dem Versuch "trocken", gemäss Lagerungsart ①, zeigte sich wiederum nur bei den Proben Quarzsplitt mit Bitumen (QB) und teilweise bei den Proben Kalksplitt mit Bitumen (KB) bei den Lagerungsarten ③ und ④. Eine geringere Ablösung als beim Versuch "trocken", gemäss Lagerungsart ①, ist für alle Proben Quarzsplitt mit Teerbitumen (QTB), Kalksplitt mit Teerbitumen (KTB) und EMPA-Testsplitt mit Teerbitumen (ETSTB) für die Lagerungsarten ② bis ⑤ festzustellen (siehe Figuren 14 bis 21, Seiten 77 bis 84). Gleiche Tendenzen wie bei den Lagerungsarten ② bis ⑥ zeigten sich auch in den durchgeführten Vorversuchen, gemäss Figur 22, Seite 85, wo gegenüber dem Versuch "trocken", gemäss Lagerungsart ①, auch nach den statischen Wasserlagerungen während 2 Stunden bei 60° C sowie bei vorausgehendem Ansetzen von Vakuum während 2 1/2 Stunden und anschlies-

sender statischer Wasserlagerung während 2 Stunden bei 60° C ein deutlich besseres Verhalten der Proben aller Splittsorten mit Teerbitumen (QTB, KTB und ETSTB) als der Proben aller Splittsorten mit Bitumen (QB, KB und ETSB) festzustellen ist.

Die wesentlich aufwendigeren Versuche mit den Lagerungsarten ② bis ⑥ mit dynamischem (schwingendem) Wasserdruck haben sich somit gegenüber diesen in den Vorversuchen sehr einfachen Lagerungsarten mit und ohne Vakuum mit anschliessender statischer Wasserlagerung nicht deutlich abgehoben.

Ergebnisse

Tabelle 15, Seite 75:

Splittablösung, Verlust nach Lagerungsarten ① bis ⑥ in:

- Massen-% und relativer Verlust in
- %-relativ für Lagerungsarten ② bis ⑥, bezogen auf Lagerungsart ①, Versuch "trocken".

Tabelle 16, Seite 76:

Splittablösung, Verlust nach Lagerungsarten ① bis ⑥, Mittelwerte und maximaler sowie minimaler Einzelwerte der Serien (5 Einzelwerte/Serie) in:

- Massen-%

(Die Streuung der Einzelwerte liegt um $\pm 10\%$, bezogen auf die Mittelwerte. Die maximalen und minimalen Einzelwerte sind jedoch in den Figuren 14 bis 22, Seiten 77 bis 85, nicht eingezeichnet.)

Figuren 14 bis 17, Seiten 77 bis 80:

Splittablösung, Verluste in:

- Massen-% nach Lagerungsarten ① bis ⑥

Figuren 18 bis
21, Seiten 81
bis 84:

Splittablösung, relativer Verlust nach Lagerungsarten ② bis ⑥, bezogen auf Lagerungsart ①, Versuch "trocken" in:
- %-relativ

Figur 22,
Seite 85:

Splittablösung, Vorversuche, Verlust in:
- Massen-% nach statischen Wasserlagerungen bei 60° C während 2 Stunden mit und ohne vorausgehendem Vakuum 2 1/2 Stunden.

XIX MECHANISCHE FESTIGKEITSPRUEFUNGEN, MARSHALL-VERSUCHE

Auch in den Festigkeitsprüfungen, den durchgeführten Marshall-Versuchen, konnten keine deutlichen Unterschiede in den Ergebnissen bezüglich der angesetzten Lagerungsarten festgestellt werden. Die Ergebnisse wurden ausschliesslich als Relativwerte in %-relativ, bezogen auf die Lagerungsart ①, Versuch "trocken", gemäss Tabelle 7, Seite 62 (Marshall-Versuch gemäss Norm SN 671'969b), ausgewertet. Insbesondere die Sammeldarstellungen in den Figuren 23 bis 34, Seiten 87 bis 98, zeigen, dass die Stabilitäten SM und der Fließwerte FM nach Marshall gesamthaft für alle Proben nach den Lagerungsarten ② bis ⑥ gegenüber der Lagerungsart ① zunehmen.

Ein Festigkeitsverlust, bestimmt über die Marshall-Steifigkeit SM infolge der Lagerungsarten ② bis ⑥ gegenüber der Lagerungsart ①, Versuch "trocken", gemäss Norm SN 671'969b, ist somit nicht vorhanden. Entsprechend der Zunahme von Stabilität SM und Fließwert FM bleibt die Marshall-Steifigkeit SM/FM als Quotient praktisch gleich. Einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen dürfte beim Marshall-Versuch bei der erfolgten Wasseraufnahme liegen, die bezogen auf den ursprünglichen Hohlraumgehalt der Prüfkörper eine Abnahme des Hohlraumvolumens bewirkte. Die Abnahme des Hohlraumvolumens durch Wasseraufnahme betrug für die Prüfkörper mit tiefem Hohlraumgehalt von 3 - 4 Vol.-% im Mittel etwa 0,2 Vol.-%. Für

die Prüfkörper mit Hohlraumgehalt von 10 - 12 Vol.-% betrug diese im Mittel etwa 0,5 Vol.-%, wobei bei den Prüfkörpern aus Quarzmineral mit Bindemitteln Bitumen und Teerbitumen (Proben QB und QTB) eine Abnahme des Hohlraumvolumens durch Wasseraufnahme bis zu 3 Vol.-% auftrat.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse muss zudem darauf hingewiesen werden, dass sich auch die Ergebnisse infolge der normalen Streuung der Einzelwerte beim Marshall-Versuch in einer sich für die verschiedenen Probenarten (Mineralstoffe und Bindemittelsorten) doch weitgehend überdeckenden Bandbreite bewegen. Dies bedeutet, dass bei der Betrachtung der Mittelwerte und der bezüglich dieser Mittelwerte vorliegenden Unterschiede nicht auf eine tatsächlich ausreichende Differenzierung der Ergebnisse geschlossen werden darf.

Ergebnisse

Figur 23,
Seite 87:

Stabilität nach Marshall relativ, SM rel,
für die Lagerungsarten (2) bis (6), bezogen
auf Lagerungsart (1), Versuch "trocken",
gemäss Norm SN 671'969b.

Figur 24,
Seite 88:

Fliesswert nach Marshall relativ, FM rel,
für die Lagerungsarten (2) bis (6), bezogen
auf die Lagerungsart (1), Versuch
"trocken", gemäss Norm SN 671'969b.

Figur 25,
Seite 89:

Steifigkeit nach Marshall relativ,
SM/FM rel, für die Lagerungsarten (2) bis
(6), bezogen auf Lagerungsart (1), Versuch
"trocken", gemäss Norm SN 671'969b.

Figuren 26 bis
34, Seiten 90
bis 98:

Einzeldarstellungen für SM, FM, und SM/FM
für alle Proben.

I SCHLUSSFOLGERUNGEN

XX UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Die durchgeführten Untersuchungen wurden gemäss Punkt 15. unter möglichst praxisnaher Beanspruchung der Proben gemäss den in Tabelle 7, Seite 62, für die verschiedenen Untersuchungen festgelegten Lagerungsarten ① bis ⑥ unter statischer und/oder schwingender Wasserdruckbeanspruchung und anschliessender Prüfung ausgeführt.

Für alle Versuchsgruppen - Umhüllungsversuche, Splittablösprüfungen und Festigkeitsprüfungen (Marshall-Versuche) - wurde aber keine deutliche Differenzierung der Ergebnisse bezüglich Einfluss der verschiedenen Lagerungsarten festgestellt.

Grundsätzlich kann festgehalten werden:

- Teerbitumen TB zeigt bezüglich der Beanspruchung in den Lagerungsarten deutlich besseres Verhalten als Bitumen B.
- Quarzmineral Q zeigt deutlich schlechteres Verhalten als Kalkmineral K und EMPA-Testsplitt resp. Mineralstoffe ETS.

XXI PRUEFTECHNIK

Hier sind grundsätzlich weitere Abklärungen bezüglich des Einflusses dynamischer Wasserlagerungen und eigentlicher Durchströmungsversuche angezeigt, was sich mit den unter Punkt 15. festgehaltenen Bemerkungen bezüglich des herrschenden Trends in der Prüftechnik deckt.

Obwohl die vorliegenden ersten Ergebnisse nicht den aufgrund von in der Praxis aufgetretenen Schadenfälle angenommenen deutlichen Einfluss der angesetzten Lagerungsarten auf die Prüfergebnisse zeigen, ist die Möglichkeit der Erarbeitung neuer Erkenntnisse über eine Erhöhung der Lastwechselzahlen und allfälliger veränderter Belastungen durch Simulation einer eigentlichen

Auswaschung im Durchströmungsversuch gegeben. Solche Untersuchungen und weitere Abklärungen mit anderen Prüfverfahren sind daher in einem anderen Forschungsauftrag vorgesehen.

XXII ALLGEMEINE SITUATION UND WEITERE FORSCHUNGSARBEITEN

Seit Erscheinen von Lit. [1] wurden vielerorts weitere Untersuchungen durchgeführt. Deutlich wird überall der wie in diesem Forschungsauftrag erforderlich gewordene notwendige grosse Aufwand bei der Realisierung möglichst praxisnaher Beanspruchungen der Baustoffe.

Als Ueberblick zu den bestehenden Prüfverfahren ist auf Lit. [95, 96] hinzuweisen, wo innerhalb einer neueren Studie der Stand der Prüftechnik und der bestehenden Prüfverfahren zum Problembereich der Haftfestigkeit bituminöser Bindemittel am Gestein zusammengefasst werden.

Insbesondere darf aber im Zusammenhang mit der aus EMPA-eigenen Mitteln erfolgten Entwicklung des unter Kapitel F beschriebenen neuen Wasserdruckaggregates der EMPA gemäss Lit. [93], festgehalten werden, dass mit dieser Prüfeinrichtung sehr vielseitig gearbeitet werden kann und vor allem Phänomene der Haftfestigkeit bituminöser Baustoffe an Beton und anderen Baustoffen (z.B. Brückenabdichtungen) untersucht werden können. Dass damit die Möglichkeit zur Durchführung vielseitiger Forschungsprojekte geschaffen wurde ist sicher zusammen mit den an den Proben ermittelten Ergebnissen als wertvolles Resultat von Forschungsauftrag FA 4/73 zu werten.

Darauf aufbauend sind einem breitangelegten Rahmen weitere Forschungsarbeiten zum Problembereich der Haftung bituminöser Bindemittel durchzuführen.

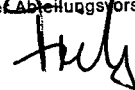
Dübendorf, 29. Mai 1981

Der Sachbearbeiter:



J.P. Junker

Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt
Abteilung Strassenbau- und Isolierstoffe
Der Abteilungsvorsteher:



H. Fritz

K LITERATURVERZEICHNIS
=====

Das Literaturverzeichnis ist ab Lit. [3 bis 91] alphabetisch nach Autoren geordnet; neuere Literaturen [92 bis 96] anschliessend.

- [1] Special Report 98 "Effect of Water on Bitumen - Aggregate Mixtures" von K. Majidzadeh und F.N. Brovold, herausgegeben vom Highway Research Board Washington D.C. 1968, Publication 1456 .
- [2] Raudenbusch, Dr. H. , Hamburg, gekürzte Wiedergabe von [1] in deutscher Uebersetzung : Einwirkung von Wasser auf Bitumen - Gesteinsmischungen , aus Bitumen 1/1970 .
- [3] Andersland, O.B. und Goetz, W.H. : Sonic Test for Evaluation of Stripping Resistance in Compacted Bituminous Mixtures. Proc. AATP 24 , 148 (1955) .
- [4] Bartell, F.E. und Osterhof, H.J. : Die Bestimmung der Benetzbarkeit von Feststoffen durch Flüssigkeiten. Ind. Eng. Chem. 19, 1277 (1927) .
- [5] Barth, E.J., Gordon and Breach, Science Publishers, New York, London 1962 ." Asphalt, Science and Technology" .
- [6] Becker, W. Zur Geschichte der Haftmittel, aus Goldschmidt Mitt. 1/71, Nr. 14 .
- [7] Becker, W. Die Verbesserung der Haftfestigkeit bituminöser Bindemittel am Gestein durch Zusätze zum Bindemittel. aus Die Strasse 8 (1941, S. 154 und Bitumen 11 (1941) , S. 91 .
- [8] Becker, W. Verfahren zur Verbesserung der Haftfestigkeit bituminöser Bindemittel (Patentübersicht) . Kolloid - Zeitschrift 92 (1940), S. 382

- [9] Becker, W. Die Bedeutung von Haftmitteln bei kalteinbaufähigen Belägen , aus Bitumen 15 (1953), S. 153 .
- [10] Bierhalter, Dr.-Ing.W., Hamburg : Adhäsion von Bitumen und Grenz - flächenerscheinungen, bearbeitete Uebersetzung von [37] , aus BTAP Heft 11/71 .
- [11] Bikermann, J.J. : The Science Adhesive Joints. Academic Press, New York , 1968 .
- [12] Bikermann, J.J. Adhesion of Asphalt to Stone, Massachusetts Inst. of Technology, Civil Eng. Publication R 64 - 3 (1964)
- [13] Bitumen 8/1970 : Adhäsives Verhalten, S. 212 - 216 , 40 Jahre ARBIT
- [14] Blokker, P.C. , und Mitarbeiter : Angewandte Chemie 43, 52 (1939), 643 - 654 . Ueber einige phys. Konstanten von Bitumen.
- [15] Blott, J.F.T. ; Lamb, D.R. und Pordes, O. : Wetting and Adhesion in Relation to the Surface Dressing of Roads with Bituminous Binder (Benetzung und Haftfestigkeit bei der Oberflächenbehandlung mit bituminösen Bindemitteln). Adhesion and Adhesives, Fundamentals and Practise, Soc. Chem. Ind. London, 1954 .
- [16] Blott, J.F.T., Hughes, R.I. und Werrett, L.A.: The Wetting of Solids by the Process of Direct Contact (Die Benetzung fester Körper durch den Vorgang des direkten Kontakts). Adhesion and Adhesives, Fundamentals and Practice, Soc. Chem. Ind., London, 1954 .
- [17] Boehm, H.P., Prof.Dr., Funktionelle Gruppen an Festkörper - Oberflächen, Angewandte Chemie 78 (1966), 617 - 628.
- [18] De Boer, J.H., Hermans, M.E.A., Keeskens, J.M. , Chemisorption und phys. Adsorption von Wasser an SiO₂, Kolloidzeitschrift , Heft 1 1957, 71 .

-
- [19] Brand, W.: Die Spaltzugprüfung bituminöser Gemische in Prüftechnik und Bauausführung, Strabag - Schriftenreihe, 8.Folge Heft 1, Seiten 105 - 128 .
- [20] Breuer, J.U. : Prüfung der Wasserempfindlichkeit von Gesteins - mehlfüllern, aus Bitumen 29 (1967) , Heft 3 , S. 60 - 77 .
- [21] Brockmann, W., Dr. Ing. , AFAM, Bremen : Probleme bei der Messung von Adhäsionsvorgängen, Vortrag gehalten auf der 39. Vortragsstagung der GDCh - Fachgruppe Anstrichstoffe und Pigmente vom 26. - 29. September 1972 in Bad Pyrmont, Sonderdruck aus "farbe + lack", 79.Jg. Nr. 3/1973, Seite 213 - 221 .
- [22] de Bruyne, M.A., Houwink, R. , : Adhesion and Adhesives, Elsevier Publishing Comp., 1951 .
- [23] Dietz, G.H. : Non - destructive testing of adhesives by ultra - sonic waves. Adhesion and Adhesives. Fundamentals and Practice. Society of Chemical Industry, London 218 (1954) .
- [24] Dow, A. : The Wash Test in Differentiating Between Aggregate for Colprovia Paving Mixtures (Der Wash - Test zur Unterscheidung von Gestein für Colprovia - Strassenbau - Mischungen) . Proc. AATP, Vol. 8 (1936), S. 75 .
- [25] Edelmann, K. : Lehrbuch der Kolloidchemie, Bd. I, 246 - 253, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1968 .
- [26] Electrical Phenomena and Solid/ Liquid Interface (Elektrische Phänomene und die Grenzfläche fest/flüssig). Sec. Intern. Congr. of Surf. Activity, Vol. 3, Butterworths Scientific Publication, London 1957 .
- [27] Enustun, B.V. : Photoelectric Estimation of Binder - Aggregate Stripping, Highway and Bridges 22, 1064 (1954) .
- [28] Eyring, H. : Viscosity, plasticity and diffusion as examples of absolute rates. Journal of Chem. Phys. 4, 238 (1936) .

- [29] Ewers , N. Prof. Dr. -Ing. und Walter, G., Ing. - Chem. :
Erfahrungen mit einem neuen Prüfgerät zum Studium des Verhaltens
von bituminösen Bindemitteln, insbesondere von Emulsionen für
Oberflächenbehandlungen. Die Strasse , 9. Jg. H. 11, Nov. 1969 .
- [30] Feil, H. : Affinität von mineralischen Zuschlagstoffen zu
bituminösen Bindemitteln, Dipl. Arb. TH Aachen, Nov. 1970
- [31] Felix, R. : Entwicklung eines Prüfverfahrens für die Hitzebeständig -
keit von Naturgestein . Arbeitsberichte auf Sitzungen des Arbeits -
ausschusses "Mineralstoffprüfung", vom 9./10. 4. 1970 und 25. 3. 1971 .
- [32] Fluss, P. : Wirkung von Wasser auf Bitumen - Mineralstoff -
Mischungen . aus BTAP 21 (1970), S. 18 .
- [33] Goetz, W.H.: Methods of Testing for Water Resistance of Bituminous
Paving Mixtures (Methoden für die Prüfung des Widerstandes bitu -
minöser Strassenbaumischungen gegen Wasser). ASTM, Spec. Techn.
Publ. 240 (1958), S. 84 .
- [34] Goetz, W.H. : Sonic Testing of Bituminous Mixtures. Proc. AATP 24
332 (1955) .
- [35] Grader, R. : Ueber die Haftfestigkeit bituminöser Bindemittel
und ihre Beeinflussung . Bitumen 10 (1940) , S. 73.
- [36] Hallberg, S. : The Adhesion of Bituminous Binders and Aggregate
in the Presence of Water (Die Haftfestigkeit zwischen bituminösen
Bindemitteln und Gestein in Gegenwart von Wasser). Statens Väginstitut
Stockholm, Meddelande Vol.78 , 1950 .
- [37] Highway Research Board, Heft 340 der HRR : 4 Beiträge zum Thema :
Asphalt Adhesion and Interfacial Phenomena.
1. Dibenedetto, A.: Allgemeine Vorstellungen über die Adhesion
(General Concepts of Adhesion)
 2. Lottann, R und Johnson, D.: Druckbeeinflusste Bindemittelablösung
bei Asphaltbeton (Pressure - Induced Stripping
in Asphalt Concrete)

3. Cratin, P. : Grenzflächenverhalten von Asphalten (Interfacial Behaviour of Asphaltenes) .
4. Ensley, E. und Scholz, H. : Untersuchung über die Adhäsion zwischen Bitumen und Mineralstoffen durch Messung der Eintauchwärme (An Investigation of Asphalt - Aggregate by Measurements of Heat of Immersion) .
- [38] Hubbard, P. : Adhesion of Asphalt to Aggregates in Presence of Water (Haftfestigkeit von Bitumen zu Gestein in Gegenwart von Wasser) .
HRB Proc.Vol. 18 (1939), Teil I, S. 238 .
- [39] Hughes, R.I. , Lamb, D.R. und Pordes, O.: Adhesion in Bitumen Macadam (Haftfestigkeit bei Asphaltmakadam). J.Appl. Chem. Vol. 10 (1960), S.433 .
- [40] Hveem, F.N. : Quality Tests for Asphalts - A Progress Report (Qualitätsteste für Bitumen - ein Fortschrittsbericht). Proc. AATP, Vol.15 (1943), S. 153 .
- [41] Kaufmann, N. , Paulmann, G. , und Steinmetz, P.H. : Zur Prüfung bituminöser Massen auf ihr Verhalten gegenüber Wasser, aus Bitumen 29(1967), H. 8, S. 215 - 220 .
- [42] Kleinert, H. : Haftmittel, ihre Wirkung und Anwendung im bituminösen Strassenbau, Die Strasse 2 (1962) 4. S. 211 .
- [43] Kleinert, H. : Haftfestigkeitsverbesserung bituminöser Bindemittel, Die Strasse 5 (1965) 4, S. 181 .
- [44] Kohler, G. : Untersuchungen über das thermische Verhalten von im Strassenbau verwertbaren Gesteinen. Dissertation TH Aachen 1970 , bzw. Forschungsbericht des Landes Nordrhein - Westfalen Nr. 2187 (1971) .
- [45] Kloubek, J. : Einfluss der Kettenlänge aliphatischer Amine auf die Hydrophobierung des Quarzes, Tenside 3 (1966), 229 .
- [46] Kuhn, Dr. A. : Kolloidchem. Taschenbuch, 336 - 345 , Akad. Verlagsgesellschaft, Leipzig, Geest u. Portig KG .
- [47] Lassalle, Dr. H.J. Ultraschallverfahren zur Haftfestigkeitsprüfung, aus Bitumen 1/1972 .

-
- [48] Lee, A.R. : Ueber die Verwendung von Adhäsionsmitteln im Teerstrassenbau. Strasse und Autobahn 1 (1950), S. 6 .
- [49] Lee, A.R. und Nicholas, J.W. : Adhesion in the Construction and Maintenance of Roads (Haftfestigkeit beim Bau und bei der Unterhaltung von Strassen). Adhesion, Fundamentals and Practice, Soc. Chem.Industry, London, 1954 .
- [50] Lee, A.R. : Adhesion in Relation to Bituminous Road Materials (Haftfestigkeit in Verbindung mit bituminösen Strassenbaustoffen). J. Soc. Chem.Ind. Vol. 55 (1936), S. 23 .
- [51] Leins, W. : Untersuchungen der Hafteigenschaften von Splitt zu Verschnittbitumen für die Oberflächenbehandlung der Strassenbaustelle Waza - Maltam in Kamerun, Gutachten Aachen 1969 .
- [52] Leins, W. : Labortechnische Untersuchungen über die Haftfestigkeit eines mit Kunststoff modifizierten Bitumens. Gutachten Aachen, Juni 1971 .
- [53] Lortscher, L.L. , Snyder, M.J. und Filber, R. B.jr. : Improved Method of Estimating Stripping Area in Asphalt Stripping Test. Proc. Highway Research Board 35, 314 (1956) .
- [54] Mack, C. : Research on Bituminous Road Materials (Forschungen über bituminöse Stoffe im Strassenbau) . Canad.Chemistry and Proc. Industry, Vol. 22 (1938), S. 365 .
- [55] Majidzadeh, K. u. Brovold, F. N. : Effect of Water on Bitumen - Aggregate Mixtures. Highway Research Board, = Lit. [1] Special Report 98, Washington DC 1968 .
- [56] Majidzadeh, K. und Herrin, M. : Modes of Failure and Strength of Asphalt Films Subjected to Tensile Stresses. Highway Research Board 67, 98 (1965).

- [57] Majidzadeh, K. : Stripping in Hot - Sand Asphalt Mixtures (Ablösung bei Heiss- Sand - Bitumen - Mischungen). Progr.Rep. of Proj. DR - 6669 Florida Eng. and Ind. Experiment Station, Univ. Florida, 1966 .
- [58] Majidzadeh, K. und Stander, R.R. jr. : Highway Research Record Nr. 273, S. 99 - 109 "Effect of Water on Behaviour of Sand - Asphalt Mixtures under Repeated Loading".
- [59] Matthews, D. H. : Adhesion of Bituminous Road Materials : A Survey of Present Knowledges (Haftfestigkeit bituminöser Strassenbaustoffe , Uebersicht über den gegenwärtigen Stand der Kenntnisse). J. Inst. of Petr. Vol. 44 (1958), S. 423 .
- [60] Meyer, G. : Schlacken - und Aschenverwertung unter besonderer Berücksichtigung von Steinkohlenschlacken im bituminösen Strassen - bau. Dissertation TH Aachen, Nov. 1971 .
- [61] Müller, F. : Anwendung der Spaltzugfestigkeit im bituminösen Strassenbau. Die Strasse 10 (1970) , H. 2 , S. 83 ff .
- [62] Neumann, Dr. H.J. : Ueber die Grundlagen des Haftens von Bitumen an Mineralstoffen, aus Bitumen 8/71 .
- [63] Neumann, Dr. H.J. : Kappillarkräfte und Bewegung von Oel in Porenräumen, Erdöl - Kohle - Erdgas Petrochem. 16 (1963), 1000 - 1004 .
- [64] Neumann, Dr. H.J. und Kroepelin H. : Eine thermodynamische Ableitung der Antonowschen Regel und Abgrenzung ihres Gültigkeitsbereiches; III. Intern. Kongress für grenzflächenaktive Stoffe 1960, Bd. 2, S. 19 - 22 .
- [65] Neumann, Dr. H.J. : Beitrag zum Problem der Verdrängung von Bitumen, aus BTAP 2, 41 (1971) .

-
- [66] Nüssel, H. : Ueber die Haftfestigkeit und Haftmittel in " Asphalt - und Teerstrassenbau". Veröffentlichung der Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen e. V. Köln, 1949, S. 30 .
- [67] Oberbach, J. : Die Kochprobe auf Haftfestigkeit nach Riedel und Weber und die Praxis. Teer und Bitumen 34 (1936), S. 271, 287 .
- [68] Osipow, L.I. : Surface Chemistry, Theorie and Industrial Applications - Reinhold Publishing Corporation, New York, Chapman u. Hall, Ltd. London.
- [69] Raudenbusch, Dr. H. : Zur Frage der Wasseraufnahmefähigkeit und der Wasseraufnahmebestimmung bei bit. Stoffen, aus Bitumen 4 (1968), 98 - 102
- [70] Raudenbusch, Dr. H. : Haftfestigkeit und Grenzflächenerscheinungen Bearbeitete Uebersetzung von HRB 340 (Lit. [37]), aus Bitumen 1/72 .
- [71] Riedel, W. und Weber, H. : Ueber die Haftfestigkeit bituminöser Bindemittel am Gestein, Asphalt und Teer 33 (1933), S. 677,693,713, 729,749,793,809 .
- [72] Riedel, W.: Ueber die Ursachen der Haftfestigkeit. Asphalt und Teer, Strassenbautechnik 34(1934), S. 209,429,483,924,941,961 u. 979 .
- [73] Riedel, W. : Die Adhäsion in Theorie und Praxis. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen, Leipzig 1 (1961), S. 61 .
- [74] Schmidt, Dr. H. : Zur Frage der Verschleissfestigkeit von Asphalt - decken. Bitumen 1 (1968), 1 - 6 .
- [75] Schmidt, H. : Ueber die für das Verhalten in der Praxis wichtigen Eigenschaften von Strassenbaubitumen, aus BTAP 8, 287 (1967) .
- [76] Schmidt, Dr. H. : Uebersetzung und Bearbeitung von [58] : Einfluss des Wassers auf das Verhalten von Sandasphaltemischungen unter wiederholter Lasteinwirkung, aus Bitumen 4/ 1970 .

- [77] Schmidt, J. und Schniering, A. , Essen : Haftfestigkeit bituminöser Bindemittel auf Mineralstoffen bei hydrodynamischer Beanspruchung und deren Prüfung mit Ultraschall in Tausalzlösungen, aus Strasse und Autobahn, 12 /1971 .
- [78] Schmuck, Dr. Ing. A. : Gesichtspunkte für den Entwurf flexibler Strassenbefestigungen, aus Bitumen 6 (1969), 158 - 167 .
- [79] Shaw, D.J. : Introduction to Colloid and Surface Chemistry, Butterworths, London 1966 .
- [80] Skog, J. und Zube, E. : New Test Methods for Studying Effect of Water Action on Bituminous Mixtures (Neue Methoden für die Untersuchung der Einwirkung von Wasser auf bituminöse Mischungen. Proc. AAPT, Vol. 32 (1963), S. 380 .
- [81] Sprague, J.C. : Laboratory Investigations of antistripping admixtures used for promoting wetting power and adhesion between bitumen and aggregates. American Society for Testing Materials (ASTM) - June 24 - 28, 1946 . Forty ninth Annual Meeting.
- [82] Swanberg, J.H. und Hindermann, W.L. : The Use of an Abrasion Test as a Measure of Durability of Bituminous Mixtures (Die Anwendung einer Abnutzungsprüfung zur Bewertung der Lebensdauer bituminöser Mischungen). ASTM Spec. Techn. Publ. No. 94 (1949), S. 63 .
- [83] Thelen, E. : Surface Energy and Adhesion Properties in Asphalt - Aggregate Systems (Oberflächenenergie und Haftfestigkeitseigenschaften von Bitumen - Mineralstoff - Gemischen). HRB Bull. 192 (1958) , S. 67 .
- [84] Tröbs, H. und Helling, S. : Untersuchungen über die Kohäsion und Hafteigenschaften von Füller - Bitumengemischen mit der Schlagzahlmethode nach Ewers und Walter, Strasse, Nr. 4/1973, S. 145-148 .

-
- [85] Ullmanns Enzyklopädie d. techn. Chemie, Urban u. Schwarzenberg, München/Berlin 1957, Band IX , 578 - 608 .
- [86] Walter, Dr. A. : Die Grundlagen der Adhäsionstheorien, Adhäsion Heft 12 (1968) , 542 - 548 .
- [87] Wagner, H. : Die Beständigkeit bituminöser Strassendecken im Blickwinkel der Adhäsion Bindemittel/Gestein, aus Goldschmidt Mitt. 1/71, Nr. 14 .
- [88] Wilhelmi, Dr. Ing.R. , Schulze, K. Dipl. Ing. : Grenzflächen - vorgänge am System Wasser - bit. Bindemittel und ihre Bedeutung für die Baupraxis., aus BTAP 5, Heft 4 (1954), 103 - 107, (1955) 12 - 20 .
- [89] Winterkorn, H.F. : Surface Chemical Aspects of the Bond Formation between Bituminous Materials and Mineral Surfaces (Oberflächenchemische Gesichtspunkte bei der Ausbildung der Bindung zwischen bituminösen Stoffen und Gesteinsoberflächen). Proc. AATP, Vol. 7 (1936), S. 79 .
- [90] Zenke, G. : Problematik der Untersuchung und normfähige Erfassung spezieller Eigenschaftsmerkmale von Bitumen. Duktilität - Haftverhalten - Thermische Veränderung . Bericht BP, erweiterte Fassung eines Referates vor dem AK " Bitumen und Verschnittbitumen" der Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen, am 12. 7. 73 in Hamburg.
- [91] Zisman, W.A. : Influence of Constitution on Adhesion, Ind. Eng. Chem. Vol. 55, Nr. 10 (1963), 19 - 38 .

-
- [92] Charif, K., Dr. Ing: Mechanisches Verhalten von Asphaltprobe-
körpern nach dynamischer Beanspruchung in Gegenwart von Wasser.
Diss. TH Karlsruhe (1976).
- [93] Junker, J.P.: Die Entwicklung eines servorhydraulischen Was-
serdruckaggregates, Forschungs- und Entwicklungsarbeit der EMPA
Dübendorf, F+E-Bericht Nr. 10'587 (unveröffentlicht, 1979).
- [94] Vogler, H., Dr.: Untersuchungen über die Haftung von Bitumen an
verschiedenen Gesteinsarten, Bitumen 1/1980, Seiten 18 - 24.
- [95] Ajour, A.-M.: Le probleme de l'adhésivité hauts hydrocarbonés/
granulats, Cahier 17 BM/Nr. 3/1979 des Laboratoire Central des
Paris et Chaussées/Paris, herausgegeben von der RILEM, Techn.
Kommission 17 BM.
- [96] Zenke, G.: Deutsche Bearbeitung und Kurzfassung von Lit. [95]
als Technischer Bericht, Bitumen 3/1980, Seiten 79 - 84.