EMPA

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

Untersuchung stark beanspruchter bituminöser Autobahnbeläge

Etude de revêtement bitumineux d'autoroutes fortement sollicitées

Eidgenössisches Departement des Inneren

Forschungsauftrag 25/78

EMPA Nr. 130586
CH-8600 Dübendorf

Juli 1992

EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, CH-8600 Dübendorf

ZUSAMMENFASSUNG

Die Forschungsarbeit 25/78 "Untersuchung stark beanspruchter bituminöser Autobahnbeläge" basiert auf acht Autobahnteilstrecken des schweizerischen Mittellandes, die in den Jahren 1966 bis 1975 dem Verkehr übergeben wurden. Diese ausgewählten Strekken haben sich unter starker Verkehrsbeanspruchung sehr unterschiedlich verhalten und stellen eine repräsentative Auswahl damals in der Schweiz gebräuchlicher Beläge auf Kiessand dar.

1978/79 wurden in den acht Autobahnteilstrecken in je drei bis vier Profilen Belagsausschnitte entnommen. Im Jahre 1990, rund 12 Jahre nach der Entnahme, waren noch zwei Beläge vollständig und fünf teilweise in Betrieb und konnten somit auch hinsichtlich Langzeitverhalten beurteilt werden. Die entnommenen Ausschnitte umfassten jeweils die gesamte Breite des Normalfahrstreifens, in einem Fall des Kriechstreifens, und wiesen die Abmessungen von etwa 3.80 x 1.50 m auf. Im Jahre 1978 lagen die täglichen äquivalenten Verkehrslasten TF in den acht Strecken etwa zwischen 1600 und 3400 (TF: Schweizer Norm SN 640'320 "Aequivalente Verkehrslast"). Bis 1990 erhöhten sich diese TF-Werte bei den heute noch unter Betrieb stehenden Strecken auf etwa 2400 bis 5300. Zum Zeitpunkt der Ausschnittsentnahme 1978/79 betrug somit die gesamte äquivalente Verkehrslast W zwischen 2.9 bis 7.2 Millionen, und in den verbleibenden Belägen ergab sich bis 1990 ein W zwischen 15 und 24 Millionen (W = 0.5 x ESAL, wobei ESAL: Cumulative both directional expected 8.16 t "*E*quivalent *S*ingle *A*xle *L*oads" during the analysis period, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1986). Die gesamte äquivalente Verkehrslast W - und nicht die tägliche äquivalente Verkehrslast TF - ist jeweils für den Vergleich des Langzeitverhaltens von Belägen als massgebend zu betrachten.

Im Rahmen der Forschungsarbeit 25/78 wurden alle Belagsschichten sämtlicher Ausschnitte der acht Autobahnteilstrecken umfassend untersucht. Ermittelt wurde das Ausmass der bleibenden Deformationen, die Eigenschaften der eingebauten Belagsschichten, die Zusammensetzung der Beläge sowie die Eigenschaften des zurückgewonnenen löslichen Bindemittels. Aus Marshall- und Kriechprüfungen im Labor resultierten Anhaltspunkte über die mechanischen Belagseigenschaften. Der verhältnismässig kleine Abrieb der Verschleissschichten bis zum Zeitpunkt der Entnahme der Belagsausschnitte betrug nicht mehr als 2 mm und konnte daher für die Betrachtung der bleibenden Deformationen vernachlässigt werden.

Bei keiner der untersuchten Autobahnteilstrecken bildeten der Untergrund, der Unterbau oder die Fundationsschichten weder die Ursache noch eine der Ursachen für die bleibenden Deformationen in den bituminösen Belägen.

Um bleibende Deformationen aber auch Rissbildung in Belägen zu verhindern, sind grundsätzlich verschiedene Belagsparameter optimal aufeinander abzustimmen. Dabei ist darauf zu achten, dass Massnahmen zur Vermeidung von Spurrinnen häufig die Gefahr der Rissbildung erhöhen. Ein Beispiel dafür ist die Verwendung von Bitumen mit einem Penetrationsindex über +1 (speziell in der Verschleissschicht). Deshalb kommt der ganzheitlichen Betrachtungsweise der Belagsschichten im Belagssystem und dem ausgewogenen Optimieren der Eigenschaften der einzelnen Belagsschichten grösste Bedeutung zu.

In den untersuchten Belägen wurden bleibende Deformationen im Zusammenhang mit Spurrinnenbildung hauptsächlich festgestellt bei Mischgutsorten mit zu kleinem Grösstkorn (speziell in den Ausgleichsschichten), zu kleinem Hohlraumgehalt, zu grossen Anteilen an löslichem Bindemittel, zu grossem Hohlraumfüllungsgrad, zu weichen Bindemitteln und zu geringen Anteilen an gebrochenen Mineralstoffen in den Tragschichten, besonders in den oberen Tragschichten.

Ergebnisse und wichtige Erkenntnisse dieser Forschungsarbeit standen bei der Bearbeitung verschiedener Schweizer Normen rechtzeitig zur Verfügung und konnten durch direkte Mitarbeit in den entsprechenden technischen Kommissionen umgehend berücksichtigt werden. Besonders gilt dies für die seit 1989 gültige Schweizer Norm SN 640'431a "Asphaltbetonbeläge; Konzeption, Anforderungen, Ausführung". In die Schweizer Norm SN 640'431a fanden Eingang:

- Ganzheitliche Betrachtungsweise der Belagsschichten im Belagssystem.

- Ausgleichsschichten werden nicht mehr ausgeführt. Direkt unter der Deckschicht sind entsprechend der Beanspruchung geeignete Schichten, insbesondere eine geeignete obere Tragschicht, anzuordnen.

- Für stark bis sehr stark beanspruchte bituminöse Beläge sind vorzusehen:

  - praktisch ausschliesslich gebrochene Mineralstoffe
  - Mischgutsorten mit grossem Grösstkorn, besonders in den oberen Tragschichten
  - eng begrenzte Hohlraumgehalte und Hohlraumfüllungsgrade mit Bitumen sowohl der Marshall-Prüfkörper als auch der Belagsschichten durch entsprechende Wahl der Mischgutzusammensetzung
  - harte Bindemittel, besonders in den Tragschichten.

Die Eignung eines bituminösen Mischguts als Deck- oder Tragschichtmaterial für höchste Beanspruchungen lässt sich mit den bisher genormten Untersuchungensmethoden nur partiell feststellen. Diese sind zwar zur Charakterisierung der Beläge erforderlich, liefern aber hinsichtlich Praxisverhalten der Beläge gegenüber bleibender Deformationen nur teilweise aussagekräftige Beurteilungskriterien. Im Gegensatz zur Marshall-Prüfung ergibt die physikalisch besser fundierte Kriechprüfung an Bohrkernen deutlich stärker differenzierende Aussagen. Bezüglich nicht durch Abrieb entstandene Spurrinnen liefert die Kriechprüfung an Bohrkernen zudem zu den normierten Prüfungen oft ergänzende Aussagen, die jeweils dem Praxisverhalten eher entsprechen. Insbesondere ist festzustellen, dass schlechtes Deformationsverhalten der Beläge in der Praxis jeweils mit ungünstigem Kriechverhalten von Bohrkernen im Labor zusammenfällt. Allerdings ist zu beachten, dass auch Kriechprüfungen zur Beurteilung des Praxisverhaltens von Belägen allein nicht ausreichen. Deformationsverhalten, Abrieb und Vermeiden der Rissbildung von Belägen können nicht mit einer einzigen Laborprüfung optimiert werden. Daher sind in weiteren Forschungsarbeiten zusätzliche Prüfmethoden und Prüfverfahren zu entwickeln, welche physikalische Kennwerte und Aussagen über das Verhalten der Schichten und des Belagssystems liefern und es ermöglichen, die mechanischen Eigenschaften realistischer zu beurteilen.

EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, CH-8600 Dübendorf

RESUME

Le travail de recherche 25/78 "Etude de revêtements bitumineux d'autoroutes fortement sollicités" se base sur l'observation de huit tronçons d'autoroute situés sur le Plateau suisse qui ont été ouverts au trafic dans les années 1966 à 1975. Les tronçons d'autoroute sélectionnés pour cette étude, qui ont fait preuve d'un comportement très différent sous les fortes sollicitations du trafic, constituent un échantillon représentatif des revêtements bitumineux sur grave, courants en Suisse à cette époque.

En 1978/79, on a procédé au prélèvement de trois à quatre découpes du profil de la chaussée sur chacun des tronçons. En 1990, soit environ 12 ans après ce prélèvement, sur deux de ces tronçons les revêtements originaux étaient encore entièrement en place et partiellement en place sur cinq autres tronçons, ce qui a également permis une appréciation de leur comportement à long terme. Les découpes prélevées, qui englobaient la totalité de la largeur de la piste de roulement normale et dans un cas la piste pour véhicules lents, présentaient des dimensions de 3.80 x 1.50 m. En 1978, sur les huit tronçons d'autoroute, le trafic pondéral équivalent journalier moyen TF atteignait des valeurs situées entre 1600 et 3400 (TF: norme suisse SN 640'320 "Trafic pondéral équivalent"). Jusqu'en 1990, ces valeurs de TF ont augmenté pour atteindre 2400 à 5300 sur les tronçons encore en service. Au moment du prélèvement des découpes en 1978/79, le trafic pondéral équivalent moyen total W atteignait donc 2.6 à 7.2 millions et en 1990, sur les revêtements encore en service, une valeur de W de 15 et 24 millions (W = 0.5 x ESAL, ESAL: Cumulative both directional expected 8.16 t "*E*quivalent *S*ingle *A*xle *L*oads" during the analysis period, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1986). Le trafic pondéral équivalent moyen total W - et pas le trafic pondéral équivalent journalier moyen TF - est à considérer comme valeur déterminante pour les comparaisons du comportement à long terme des revêtements.

Dans le cadre du mandat de recherche 25/78 toutes les couches du revêtement de la totalité des decoupes ont été soumises à des examens approfondis. On a déterminé l'ampleur des déformations permanentes, les caractéristiques des couches du revêtement en place, la composition des revêtements ainsi que les caractéristiques du liant soluble récupéré. Les essais Marshall et les essais de fluage effectués en laboratoire ont fourni des indications sur les caractéristiques mécaniques des revêtements. L'abrasion subie par la couche d'usure jusqu'au moment du prélèvement des découpes était relativement faible et n'atteignait pas plus de 2 mm; elle a ainsi pu être négligée dans les considérations sur les déformations permanentes.

Sur aucun des tronçon d'autoroute inclus dans cette étude, la cause ou l'une des causes des déformations permanentes des revêtements bitumineux n'était attribuable au terrain, à l'infrastructure de la chaussée ou encore aux couches de fondation.

Pour prévenir l'apparition de déformations permanentes ainsi que de fissures sur les revêtements bitumineux, il est nécessaire d'ajuster de manière optimale entre eux plusieurs paramètres du revêtement. Il faut tenir compte, que les mesures contre les ornièrages souvent augmentent le risque de la fissuration, par exemple en employant un bitume avec un indice de pénétration au-dessus de +1 (particulièrement dans les couches d'usure). La prise en considération globale des couches de revêtements dans le système de revêtement ainsi que l'optimalisation équilibrée des caractéristiques de chaque couche du revêtement est donc d'une importance éminente.

Sur les revêtements étudiés, on a constaté des déformations permanentes, principalement avec les types d'enrobés présentant un diamètre de grain maximum trop faible (particulièrement dans les couches d'égalisation), une teneur en vides trop basse, une trop forte teneur en liant soluble, un degré de remplissage des vides par le bitume trop élevé, un liant trop mou et une teneur insuffisante en granulats concassés dans les couches de support, plus spécialement dans les couches de support supérieures.

Les résultats et les conclusions importantes de ce travail de recherche ont été disponibles à temps pour le remaniement de différentes normes suisses et ont pu être pris en compte grâce à une collaboration directe dans le cadre de commissions techniques correspondantes. Ceci est particulièrement valable pour la norme suisse SN 640'431a "Revêtements en béton bitumineux; conception, exigences, exécution" en vigueur depuis 1989. Les points suivantes ont fait leur entrée dans la norme SN 640'431a:

- Prise en considération globale des couches de revêtements dans le système de revêtement.

- Renoncement à la mise en place de couches d'égalisation. Pose directement sous la couche de surface de couches adaptées aux sollicitations, en particulier d'une couche de support supérieure appropriée.

- Pour les revêtements bitumineux fortement à très fortement sollicités, on prévoira:

  - une utilisation pratiquement exclusive de granulats concassés
  - des types d'enrobés avec un diamètre de grain maximum élevé,particulièrement dans les couches de support supérieures
  - des valeurs de la teneur en vides et du degré de remplissage des vides par le bitume strictement limitées, aussi bien dans l'essai Marshall que sur les couches du revêtement en place, par un choix approprié de la composition de l'enrobé
  - des liants durs, spécialement dans les couches de support.

Les essais normalisés actuels ne permettent de déterminer que partiellement la qualification d'un enrobé bitumineux comme matériau de couche de surface ou de support destiné à résister à des sollicitations très sévères. Ces essais sont certes nécessaires pour caractériser les enrobés, mais les informations qu'ils fournissent ne sont que partiellement utilisables comme critères d'évaluation. Au contraire de l'essai Marshall, l'essai de fluage sur des carottes, mieux fondé sur le plan physique, livre des informations nettement plus différenciées. Ce qui concerne les ornièrages à l'exclusion des déformations dues à l'abrasion par le trafic, l'essais de fluage fournit le plus souvent des informations complémentaires à celles des essais normalisés, et qui correspondent davantage au comportement des enrobés dans la pratique. En particulier, on constate que le mauvais comportement des enrobés à la déformation dans la pratique, coincide souvent avec un comportement au fluage défavorable des carottes en laboratoire. Il faut toutefois relever que l'essais de fluage ne suffit pas non plus à lui seul pour apprécier le comportement en pratique des revêtements. Le comportement des enrobés à la déformation, à l'abrasion et aux fissures ne peut pas être optimisé à l'aide d'un seul essai de laboratoire. C'est aussi la raison pour laquelle d'autres travaux de recherche devront être consacrés au développement de méthodes d'essai qui permettent une détermination de caractéristiques physiques et ainsi une évaluation des systèmes de revêtement et de leurs différentes couches basée sur des caractéristiques mécaniques plus réalistes.

EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, CH-8600 Dübendorf

SUMMARY

The research project 25/78 "Investigation of Bituminous Highway Pavements Subject to Heavy Traffic Loading" is based on eight highway sections selected in the Swiss Central Plateau which were opened to traffic in the years 1966 to 1975. These selected sections showing quite a different behaviour under the influence of heavy traffic loading, can be considered representative for the commonly used pavements placed on gravel sand in Switzerland at that time.

In 1978/79, pavement sections were removed in three or four profiles from each of the eight highway sections. In 1990, about 12 years later, two of the highway sections were still under traffic with all and five with some parts of the original structure of the pavement. Thus it was also possible to comment on the long-term performance of these highway sections. The pavement sections taken were about 3.80 x 1.50 m in size. They comprized in each case the entire breadth of the normal traffic lane and in one case of the low-speed lane. In 1978, the daily equivalent traffic loading TF in the eight highway sections was between 1600 and 3400, approximately (TF: Swiss standard SN 640'320 "Equivalent Traffic Loading"). On the highway sections still under traffic in 1990 these TF values increased to about 2400 to 5300. Hence in 1978/79, when the pavement sections were removed, the total equivalent traffic load W was between 2.9 and 7.2 million and, until 1990, W accumulated to values from 15 to 24 million for the highway sections still under traffic (W = 0.5 x ESAL, with ESAL: Cumulative both directional expected 8.16 t "*E*quivalent *S*ingle *A*xle *L*oads" during the analysis period, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1986). The total equivalent traffic load W (not the daily equivalent traffic loading TF) is to be considered as the decisive value when comparing long-term deformation behaviour of pavements.

Within the scope of the research project 25/78 all pavement courses of all pavement sections of the eight highway sections were extensively investigated. The extent of permanent deformation, the properties of the placed pavement courses, the mixture compositions of the pavements and the properties of the soluble binder content were determined. Indications of the mechanical properties are provided by the laboratory results of Marshall and creep tests. As the abrasion of the wearing course was comparatively low and did not exeed 2 mm at the time of removal of the pavement sections it could be neglected when considering permanent deformations.

In none of the highway sections investigated it was possible to attribute or even partly attribute the permanent deformation of the bituminous pavement to the natural ground, the embankment or the sub-base.

To prevent permanent deformations as well as crack formation in pavements it is always necessary to choose the optimum values of more than one different pavement parameter. However, it has to be noted that measures to prevent rutting often increase the risk of crack formation in pavements. This is true, for instance, when bitumen with an index of penetration higher than +1 is used (in particular for wearing courses). Thus, global consideration of the pavement courses as part of the pavement system as well as well-balanced optimization of the properties of the individual pavement course is of outstanding importance.

In the pavements investigated permanent deformations were mainly observed on mixture types where the maximum particle size was too small (especially in the levelling binder course), the void content too low, the content of soluble binder too great, the void/binder filling ratio too great, the binder too soft and the fraction of crushed aggregates in the road base courses, especially in the upper road base course, too small.

As the results and important findings of this research project were available just in time for the preparation of several Swiss standards, they could immediately be taken into

consideration by direct cooperation with the corresponding technical board. This especially applies for the Swiss standard SN 640'431a "Asphalt Concrete Pavements; Conception, Requirements, Realization" which has been introduced in 1989. The following items have now been introduced into the Swiss standard SN 640'431:

- Global consideration of the pavement courses as part of the pavement as a system.

- The renouncement of levelling binder courses; according to the type of loading, placement of appropriate courses, especially of an appropriate upper road base course, directly under the surface course.

- Heavy or extremly heavy loaded bituminous pavements require:

  - almost exclusively crushed aggregates
  - mixture types with large maximum aggregate size, especially in the upper road base course
  - appropriate mix-design within very limited void contents and void/binder filling ratios not only for the Marshall specimens but also for the pavement courses
  - hard binders, especially in the upper road base course.

The suitability of a bituminous mixture for surface and road base courses subject to very heavy traffic loading can only be determined satisfactorily partially with the conventionally used standardized tests. These are necessary for a characterization of the pavements, but they only provide restricted tools to describe the behaviour of pavements in practice with respect to permanent deformation. In contrast to the Marshall test the creep test on cores is physically better based. As far as rutting not due to abrasion is concerned creep tests obviously lead to more differentiating results which correspond to the behaviour in practice more accurately. In particular one can observe, that large permanent pavement deformations in practice in most cases coincide with bad creep behaviour of cores in the laboratory. However, it has to be noticed, that also creep tests alone are not sufficient to understand and predict the behaviour of pavements in practice and that deformations, abrasion and crack formation in pavements cannot be prevented using only one single laboratory test for optimization. For this reason, further research projects have to be realized to develop test methods and procedures that will provide physical parameters and make it possible to evaluate mechanical properties in a more realistic way.

EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, CH-8600 Dübendorf

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
ZUSAMMENFASSUNG		1
RESUME		3
SUMMARY		5
1.	EINLEITUNG	9
	1.1 Ausgangslage	9
	1.2 Auftrag	9
	1.3 Berichterstattung	10
2.	AUSGEWAEHLTE AUTOBAHNTEILSTRECKEN	11
3.	VORGEHEN BEI DER ENTNAHME UND IM LABOR	13
	3.1 Entnahme der Belagsausschnitte	13
	3.2 Vorgehen im Labor	16
4.	DURCHFUEHREN DER UNTERSUCHUNGEN	17
	4.1 Schichtverläufe und Dicken	17
	4.2 Belagseigenschaften	18
	4.3 Kriechprüfung	18
	4.4 Zurückgewonnenes lösliches Bindemittel	22
	4.5 Bituminöses Mischgut	22
5.	BELAGSAUFBAU, ALLGEMEINE ANGABEN, ZUSAMMENSTELLUNG DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE	23
	5.1 Autobahnteilstrecke A	23
	5.2 Autobahnteilstrecke B	29
	5.3 Autobahnteilstrecke C	35
	5.4 Autobahnteilstrecke D	41
	5.5 Autobahnteilstrecke E	47
	5.6 Autobahnteilstrecke F	53
	5.7 Autobahnteilstrecke G	59
	5.8 Autobahnteilstrecke H	65
6.	PRAXISVERHALTEN UND BEANSPRUCHUNG DER ACHT AUTOBAHNTEILSTRECKEN BIS 1990	71
	6.1 Praxisverhalten	71
	6.2 Beanspruchung	72

Seite

7. VERGLEICH UND BEURTEILUNG 75

7.1 Bleibende Deformationen 75
7.2 Vergleich der Autobahnteilstrecken hinsichtlich Materialeigenschaften 83

8. URSACHEN DER BLEIBENDEN DEFORMATIONEN IN DEN BITUMINOESEN BELAEGEN 98

9. SCHLUSSFOLGERUNGEN 99

9.1 Beanspruchungen 99
9.2 Massnahmen zur Erzielung standfester bituminöser Beläge 100
9.3 Vermeidung von Rissbildungen 100
9.4 Auswirkungen der Untersuchung auf die Praxis 101
9.5 Beurteilung der mechanischen Eigenschaften mit normierten Untersuchungen und neuen Laborprüfungen 102
9.6 Weiteres Vorgehen 102

ANHANG 104

- Verwendete wichtige Abkürzungen und Bezeichnungen 104
- Ermittelte Kriechdehnungen der Kriechversuche bei 40 °C 105
- Vergleich materialtechnischer Daten 116

1. EINLEITUNG

1.1. Ausgangslage

Die Eignung von bituminösem Mischgut als Deck- oder Tragschichtmaterial für höchste Beanspruchungen lässt sich mit den bisher in den Schweizer Normen enthaltenen Untersuchungsmethoden nur ungenügend feststellen. Hinweise über mechanische Eigenschaften geben lediglich die Ergebnisse von Stabilität und Fliessen aus der Marshall-Prüfung, wobei sich erfahrungsgemäss aus diesen beiden Werten nur beschränkt Schlussfolgerungen über das Langzeitverhalten in der Praxis ableiten lassen.

Abzuklären bleibt daher, inwieweit die mechanischen Eigenschaften einschliesslich Verformungsverhalten von bituminösem Mischgut durch andere Prüfungen aussagekräftig erfasst und charakterisiert werden können. Notwendige Voraussetzung dafür bildet die Erweiterung der heutigen Kenntnisse über die mechanischen Eigenschaften und die volumetrischen Kenngrössen bituminöser Belagsschichten sowie der Vergleich des in der Praxis festgestellten Verhaltens von Belägen mit im Labor bestimmten Eigenschaften.

1.2 Auftrag

Vor diesem Hintergrund wurde der Abteilung Strassenbau/Abdichtungen der EMPA Dübendorf der Forschungsauftrag 25/78 "Untersuchung stark beanspruchter bituminöser Autobahnbeläge" erteilt. Die Zielsetzung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Durch vergleichende Untersuchungen minimal bis extrem bleibend deformierter, stark beanspruchter bituminöser Autobahnbeläge ist festzustellen, in welchem Masse die einzelnen Belagsschichten irreversibel deformiert werden und welche mechanischen Eigenschaften die einzelnen Schichten aufweisen. Die Untersuchungen sollen einen Beitrag liefern, den Bezug zwischen Ergebnissen aus Laborprüfungen und dem Verhalten typischer schweizerischer Deck- und Tragschichten in der Praxis herzustellen. Es ist anzustreben, nicht nur technologische Vergleichswerte sondern auch physikalisch begründete Kennwerte zu ermitteln.

Das Arbeitsprogramm umfasste 2 Etappen:

1. Etappe: Feststellen der Anteile an bleibender Deformation in den verschiedenen Belagsschichten der in die Untersuchung einbezogenen Autobahnteilstrecken; Durchführung materialtechnischer Untersuchungen.

2. Etappe: Bestimmen der mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Belagsschichten mit normierten Untersuchungen (z.B. Marshall-Prüfung) und neuen Laborprüfungen (z.B. Kriechprüfung).

Im Arbeitsprogramm enthalten ist die Entnahme und Prüfung von Belagsausschnitten einer möglichst repräsentativen Auswahl in der Schweiz gebräuchlicher Autobahnbeläge. Damit wird eine Basis geschaffen, die nicht zuletzt auch der Weiterentwicklung von Prüfmethoden (beispielsweise von Schwingprüfungen) im Rahmen gesonderter Forschungsaufträge dienen kann. Die in der Forschungsarbeit durchgeführten Untersu-

chungen helfen ausserdem, die mechanischen Anforderungen an bituminöse Schichten zu definieren und eignen sich auch als Unterlage, Probleme im Zusammenhang mit Belagserneuerungen zu lösen.

1.3 Berichterstattung

Im vorliegenden Schlussbericht zum Forschungsauftrag 25/78 sind die wesentlichsten Untersuchungsergebnisse zusammengefasst und kommentiert. Die ermittelten Daten sind im übrigen nach Autobahnteilstrecken A, B, C, D, E, F, G, H geordnet in vier Einzelberichten detailliert aufgeführt:

Autobahnteilstrecken A und B	Bericht 18 des Eidgenössischen Departements des Inneren zur Forschungsarbeit 25/78 vom April 1981, EMPA Nr. 40 500
Autobahnteilstrecken C und D	EMPA Untersuchungsbericht zur Forschungsarbeit 25/78 vom November 1990, EMPA Nr. 40 500/1
Autobahnteilstrecken E und F	EMPA Untersuchungsbericht zur Forschungsarbeit 25/78 vom November 1990, EMPA Nr. 40 500/2
Autobahnteilstrecken G und H	EMPA Untersuchungsbericht zur Forschungsarbeit 25/78 vom November 1990, EMPA Nr. 40 500/3

2. AUSGEWAEHLTE AUTOBAHNTEILSTRECKEN

In fünf Kantonen des Schweizer Mittellandes wurden acht repräsentative Autobahnteilstrecken A, B, C, D, E, F, G, H ausgewählt und daraus jeweils quer zur Fahrrichtung drei bis vier Belagsausschnitte mit Abmessungen von etwa 3.80 x 1.50 m entnommen. Es handelt sich um Beläge, die auf einer Fundationsschicht aus Kiessand bzw. vereinzelt aus Kiessand mit darunter liegender hydraulischer Stabilisation (Sandwichbauweise) eingebaut wurden. Die Ausschnitte umfassten jeweils die gesamte Breite des Normalfahrstreifens, im Falle der Autobahnteilstrecke E des Kriechstreifens, und zeichnen sich u.a. durch unterschiedliche Schichtdicken aus (*Abbildung 2.1*).

Die Autobahnteilstrecken wurden in den Jahren 1966 bis 1975 dem Verkehr übergeben und haben sich unter starker Beanspruchung sehr unterschiedlich verhalten (*Tabelle 2.1*).

Zur Beachtung:

Mit Bezug auf die bei Verkehrsübergabe der Autobahnteilstrecken geltenden Schweizer Normen werden die folgenden damals üblichen Begriffe im vorliegenden Bericht weiterverwendet:

- Verschleissschicht (VS)
- Ausgleichsschicht (AS)
- obere Heissmischtragschicht (oHMT)
- untere Heissmischtragschicht (uHMT)

Als Masszahlen für die Verkehrsbelastung dienen in dieser Arbeit die Grössen:

- TF ("*T*raffic *F*actor"): tägliche äquivalente Verkehrslast gemäss Schweizer Norm SN 640'320, (1971)
- W = 0.5 x ESAL, wobei ESAL: Cumulative both directional expected 8.16 t "*E*quivalent *S*ingle *A*xle *L*oads" during the analysis period, gemäss AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, (1986)

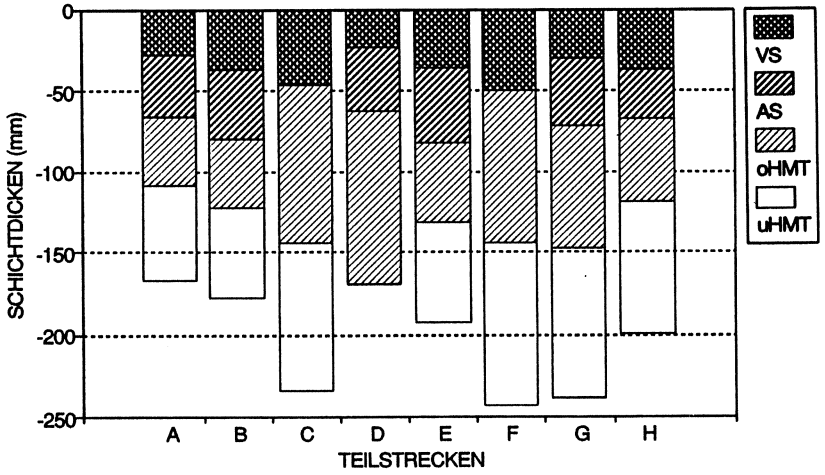
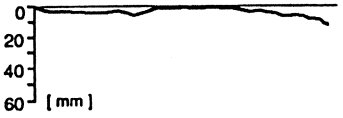


Abbildung 2.1: Schichtdicken (Mittelwerte) der Belagsausschnitte aus den Teilstrecken A,B,C,D,E,F,G,H. Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT)

Autobahnteilstrecke	Verkehrsübergabe	Zustand 1978/1979		Gesamte äquiv. Verkehrslast bis 1978/79 (Millionen)	Sanierung	Querprofil (Ausschnitt)	
		Spurrinnen	typisches Querprofil (Oberfläche)			Bezeichnung	Proben- oder Bohrkern-Nr.
A *)	1966	stark		7.2 3.6 (VS)	teilsaniert: Verschleissschicht (VS) 1973 ersetzt	A/1 A/2 A/3	11 000 - 11 999 12 000 - 12 999 13 000 - 13 999
B *)	1966	schwach		7.2 2.3 (VS)	teilsaniert: VS 1975 ersetzt	B/1 B/2 B/3	14 000 - 14 999 15 000 - 15 999 16 000 - 16 999
C	1974	schwach		2.9	Totalersatz des Aufbaus von 1967 im Jahre 1974	C/1 C/2 C/3 C/4	26 000 - 26 199 26 200 - 26 399 26 400 - 26 599 26 600 - 26 799
D	1967	stark		6.8	Totalersatz 1978	D/1 D/2 D/3 D/4	27 000 - 27 199 27 200 - 27 399 27 400 - 27 599 27 600 - 27 799
E	1970	stark		4.2	Sanierung: 120 mm ersetzt 1978	E/1 E/2 E/3 E/4	28 000 - 28 199 28 200 - 28 399 28 400 - 28 599 28 600 - 28 799
F	1975	schwach		3.5	Totalersatz des Aufbaus von 1969 im Jahre 1975	F/1 F/2 F/3 F/4	29 000 - 29 199 29 000 - 29 399 29 400 - 29 599 29 600 - 29 799
G **)	1972	stark		6.1	Sanierung erforderlich 1978/79	G/1 G/2 G/3 G/4	30 000 - 30 199 30 200 - 30 399 30 400 - 30 599 30 600 - 30 799
H **)	1972	schwach		6.1	-	H/1 H/2 H/3 H/4	31 000 - 31 199 31 200 - 31 399 31 400 - 31 599 31 600 - 31 799

*) Die Teilstrecken A und B befinden sich in demselben Autobahnabschnitt, liegen jedoch einige Kilometer voneinander entfernt in entgegengesetzter Fahrbahn. A und B weisen einen ähnlichen Aufbau auf, da der Einbau in demselben Zeitabschnitt stattfand und die Rezepturen der entsprechenden Schichten gleich waren.

**) Die Teilstrecken G und H liegen in verschiedenen Kantonen. Sie weisen zwar unterschiedliche Aufbauten aber dieselbe Verkehrsbeanspruchung auf, da sie sich zwischen den gleichen Autobahnausfahrten befinden. Die Ausschnitte /1 und /2 stammen aus der einen Fahrbahn, /3 und /4 aus der Fahrbahn der Gegenrichtung.

Tabelle 2.1: Uebersicht über die untersuchten Autobahnteilstrecken und Belagsausschnitte inklusive Bezeichnungen

3. VORGEHEN BEI DER ENTNAHME UND IM LABOR

3.1 Entnahme der Belagsausschnitte

In jeweils drei bzw. vier ausgewählten Querprofilen der Autobahnteilstrecken A, B, C, D, F, G, H wurde vom Normalfahrstreifen, im Falle der Teilstrecke E vom Kriechstreifen, ein Belagsausschnitt mit den Abmessungen von etwa 3.80 x 1.50 m entnommen (*Abbildung 3.1*), der seinerseits zur besseren Bearbeitung in vier Stücke von etwa 1.90 x 0.75 m und bei zwei Teilstrecken in zwei Stücke von etwa 1.90 x 1.50 m unterteilt wurde. Vor der Entnahme wurde Lage und Höhe der Belagsausschnittsstücke bezüglich Profilachse in Querrichtung mit vier Stahlbolzen fixiert.

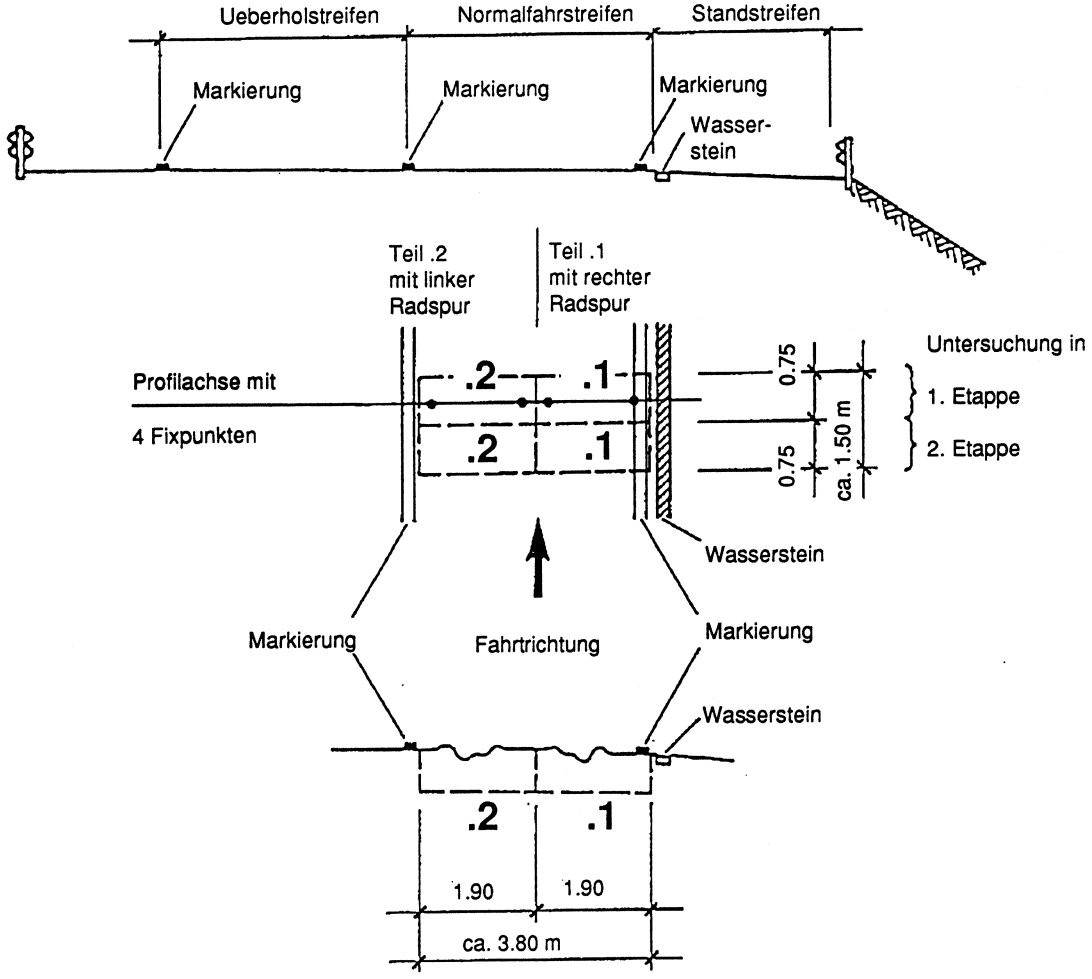


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Lage eines Belagsausschnittes; gestrichelt eingezeichnet sind die entsprechenden Belagsausschnittsstücke

Vorgehen bei der Entnahme:

Die Entnahme der Belagsausschnitte und Belagsausschnittsstücke umfasste folgende Schritte (*Abbildung 3.1* bis *Abbildung 3.4*):

- Festlegen der Entnahmeprofile.
- Anzeichnen der Frässchnitte sowie Beschriften von Ausschnitten und Ausschnittsstücken (rechte Radspur im Ausschnitt .1, linke Radspur im Ausschnitt .2).
- Setzen der vier Fixpunkte in die Profilachse (Stahlbolzen in den Belag einschiessen).
- Planum der Profilachse aufnehmen und darin Fixpunkte markieren; Einmessen der Fixpunkte.
- Bestimmen der Fixpunkthöhen mit dem Nivellierinstrument.
- Fräsen der Ausschnittsstücke.
- Herausheben der Ausschnittsstücke an Dübeln.

  Bemerkung: Bei zwei Teilstrecken war mit schlechtem HMT-Material zu rechnen. Die zugehörigen Ausschnittsstücke mit den Abmessungen von etwa 1.90 x 1.50 m wurden daher seitlich freigelegt und mit Stahlträgern unterlegt, so dass die Ausschnittsstücke von unten angehoben werden konnten.
- Einmörteln der Ausschnittsstücke in offene Kisten für Lagerung und Transport. Dazu die Ausschnittsstücke in den Kisten auf ein lockeres etwa 30 bis 40 mm dickes Mörtelbett legen und die Kisten mit Mörtel bis zur Oberkante der Ausschnittsstücke auffüllen.
- Transport der Ausschnittsstücke an die EMPA.
- Instandstellen der Fahrbahn im Entnahmebereich, bzw. Sanieren des ganzen Autobahnabschnittes.

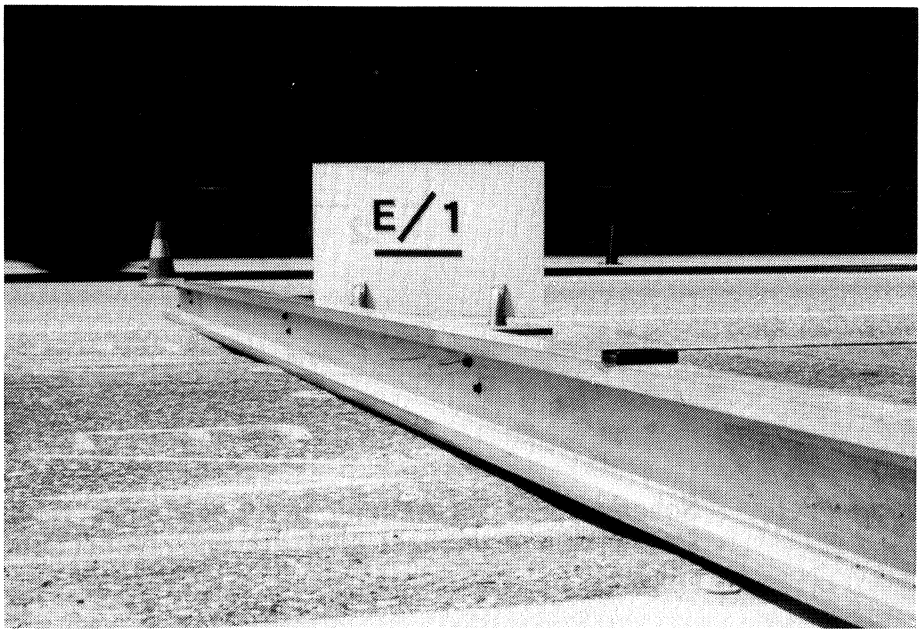


Abbildung 3.2: Profilachse mit Fixpunkten (in den Belag eingeschossene Stahlbolzen), EMPA-Foto Nr. 77306/14

Abbildung 3.3: Beschriftete und gefräste Belagsausschnitte bzw. Belagsausschnittsstücke, EMPA-Foto Nr. 77306/11

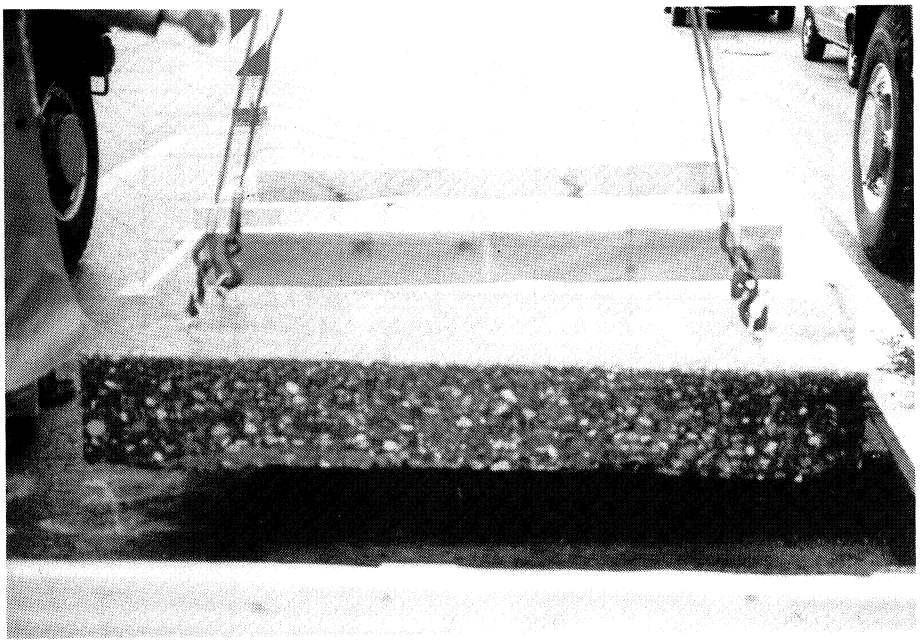


Abbildung 3.4: Herausheben der einzelnen Belagsausschnittsstücke mittels Dübeln, EMPA-Foto Nr. 77306/7

3.2 Vorgehen im Labor

Für die im Rahmen dieses Forschungsauftrages durchgeführten Untersuchungen wurden jeweils die beiden Belagsausschnittsstücke mit den Abmessungen 1.90 x 0.75 m verwendet, welche die mit Stahlbolzen definierte Profilachse enthalten. Die grösser entnommenen Stücke wurden vorgängig im Labor entsprechend halbiert.

Die Belagsausschnittstücke wurden an der EMPA mit einer Fräse entlang der Profilachse geschnitten. Dadurch ergaben sich Teilstücke von etwa 1.90 x 0.35 m. Von den in Fahrtrichtung gesehenen "hinteren" Teilstücken wurden die sauberen und trockenen Schnittflächen fotografiert, anschliessend die einzelnen Schichten angezeichnet und ausgemessen (*Abbildung 3.5*). Die beiden "hinteren" Teilstücke sowie das "vordere" Teilstück mit der rechten Radspur (.1) dienten in der Folge der Bohrkernentnahme für die Kriechprüfungen.

Am "vorderen" Teilstück mit der linken Radspur (.2) wurden in jeder Belagsschicht umfangreiche materialtechnische Untersuchungen durchgeführt. Das prinzipielle Vorgehen ist aus *Abbildung 3.5* ersichtlich.

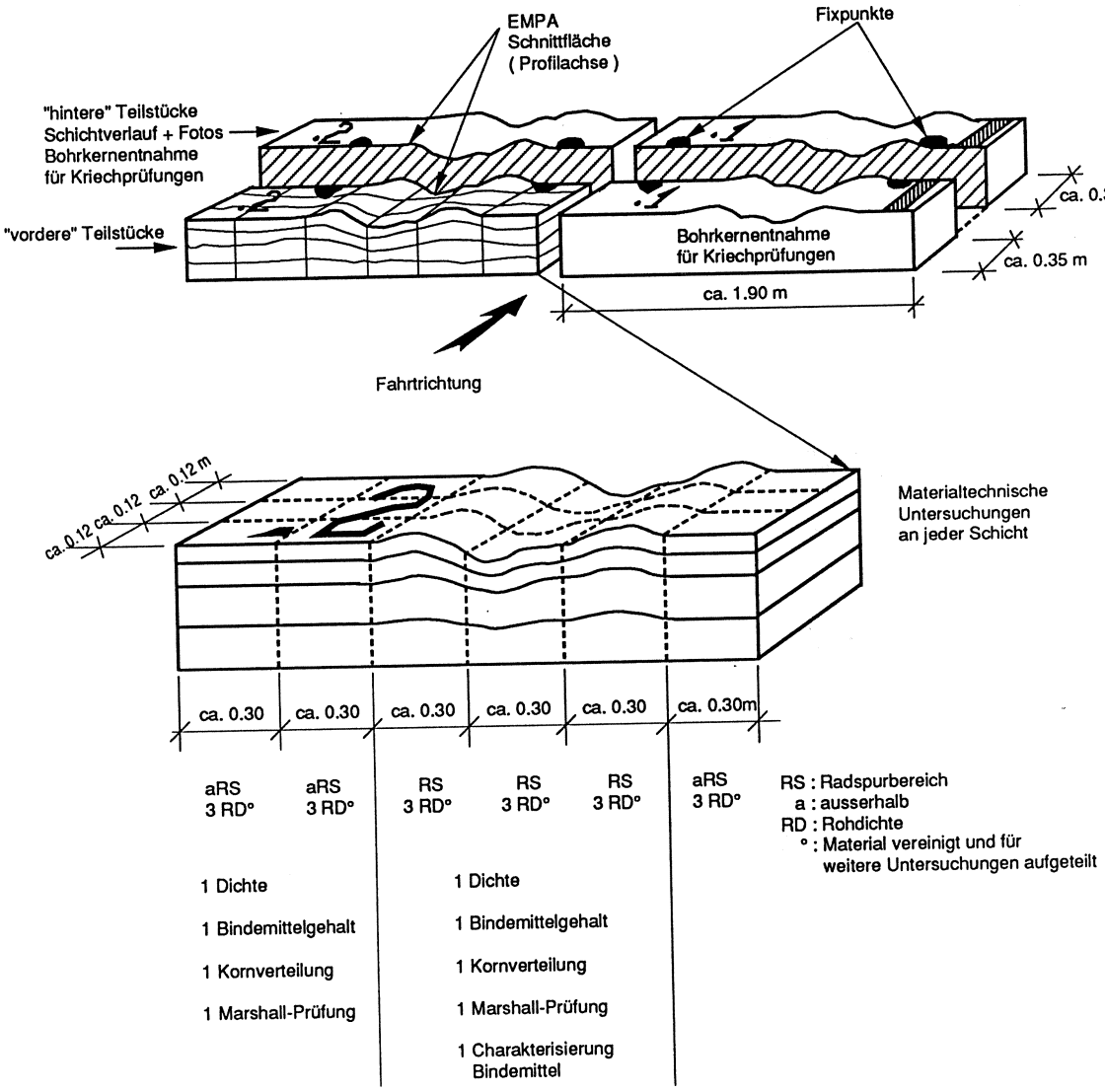


Abbildung 3.5: Prinzipielles Vorgehen bei der Untersuchung der Belagsausschnittstücke

4. DURCHFUEHREN DER UNTERSUCHUNGEN

Vorbemerkung:

Die in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen aller acht Autobahnteilstrecken wurden ab 1979 bis Mai 1981 auf Basis der im Zeitpunkt der Entnahme der Belagsausschnitte gültigen Schweizer Normen durchgeführt, um die Beurteilung nach gleichem Massstab durchführen zu können. Eine Ueberprüfung des Einhaltens der Vertragsbedingungen auf Basis der im Zeitpunkt des Einbaus geltenden Schweizer Normen entsprach nicht der Zielsetzung dieses Forschungsprojektes und war daher nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

4.1 Schichtverläufe und Dicken

An der Schnittfläche entlang der Profilachse der Ausschnittststücke wurden die Schichtverläufe angezeichnet und die Schichtdicken alle 50 mm mit einem elektronischen Dickenmessgerät bestimmt. Die Messergebnisse wurden direkt auf einem Lochstreifen gespeichert und in einem späteren Arbeitsgang mit einem an der EMPA entwickelten Computerprogramm ausgewertet. In einem Messprotokoll wurden die Mittel-

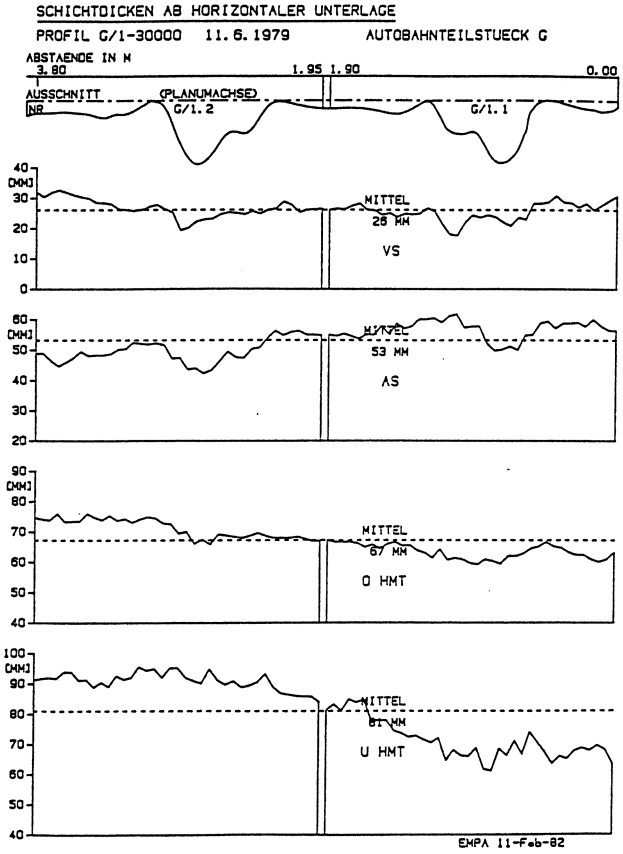


Abbildung 4.1: Beispiel eines Computerplots der gemessenen Schichtdicken ab gedachter horizontaler Unterlage (Autobahnteilstrecke G)

und Extremwerte der Schichtdicken ausgedruckt und gleichzeitig die Schichtverläufe und Dicken absolut sowie ab gedachter horizontaler Unterlage von einem Plotter gezeichnet. Details enthalten die erwähnten Einzelberichte.

Die Darstellung der einzelnen Schichtdicken ab horizontaler Unterlage ist gut geeignet, deren Veränderungen im Querprofil aufzuzeigen. Dazu wurden, wie im Beispiel von *Abbildung 4.1*, jeweils die unteren Grenzflächen der Schichten als ebener Bezugshorizont definiert und ab dieser horizontalen Unterlage die Schichtdicken eingetragen. Besonders deutlich wird in dieser Darstellung, dass die Veränderungen der Schichtdicken im Querprofil nicht nur auf bleibende Verformungen durch Verkehrsbeanspruchung im Betrieb sondern auch auf bereits vorhandenen Unebenheiten der Schichtgrenzflächen, speziell auch auf die unebene Planie der Fundationsschicht zurückzuführen sind.

Beim Betrachten der Trennflächen der Belagsschichten stellt man lokal einen relativ unregelmässigen Verlauf fest, der in der grafischen Darstellung der gemessenen Verläufe durch die markante Ueberhöhung optisch noch verstärkt wird. Solche Unregelmässigkeiten treten einerseits bei undeformierten Schichten auf, die sich durch eine gewisse von Anfang an vorhandene Oberflächenrauhigkeit auszeichnen, anderseits aber auch bei stark verformten Belagsausschnitten mit Mineralstoffkörnern, die in die benachbarte Schicht eingedrückt werden, insbesondere, wenn sie auf mastixreiche Stellen treffen.

4.2 Belagseigenschaften

Die Untersuchung der aus den Belagsausschnitten entnommenen Bohrkerne wurde gemäss den im Zeitpunkt der Entnahme geltenden Schweizer Normen (SN) durchgeführt:

SN 671 965	Bestimmen des spezifischen Gewichtes (Dichte), Ausgabe 1971
SN 671 967	Bestimmen der Rohdichte und Berechnen des Hohlraumgehaltes, Ausgabe 1971

4.3 Kriechprüfung

Zusammenfassung der wichtigsten Prüfbedingungen und -abläufe

Prüfkörperdurchmesser		VS, AS: 100mm; oHMT, uHMT: 150mm
Entnahmeort	RS:	Innerhalb Radspur, Prüfung aller Schichten der Autobahnteilstrecken A,B,G,H (siehe Anhang)
	aRS:	Ausserhalb Radspur, Prüfung aller Schichten sämtlicher Autobahnteilstrecken
Temperierdauer im Wasserbad	5400 s (1.5 h)	

Bemerkung: Um die Prüfungen rationeller durchführen zu können, wurde nach entsprechenden Vorabklärungen die Temperierdauer für die Bohrkerne der Verschleiss- und Ausgleichsschicht (Durch-

	messer 100 mm) auf 3600 s reduziert und die Entlastungszeit auf 1200 s festgelegt.
Prüftemperatur	40°C
Vorlast	25 N
Vorbelastungszeit	180 s
Belastung	0.1 MN/m^2 (0.1 N/mm^2), einachsige Druckspannung
Belastungszeit	3600 s (1 h)
Entlastungszeit	3600 s

Die Prüfabläufe werden an der EMPA automatisch gesteuert. Dabei werden die Längenänderungen der Prüfkörper, die Prüftemperatur und die Belastung periodisch gemessen und auf Lochstreifen gespeichert.

Auswertung der Prüfergebnisse

Die Kriechdehnungen ε_{kr} (‰) in Funktion der Zeit t (s) infolge einer einachsigen Druckspannung σ (N/mm^2) lassen sich mit den materialspezifischen Parametern a und q durch einen einfachen Potenzansatz der Form

$$\varepsilon_{kr}(\sigma,t) = a(\sigma)\, t^q \qquad (4.1)$$

ausdrücken. Im doppeltlogarithmischer Darstellung entspricht dies einer Geraden mit dem y-Achsenabschnitt log(a) zur Zeit t=1s und der Steigung q, die leicht experimentell durch Regressionsanalyse berechnet werden kann.

Für die Beurteilung des Kriechverhaltens von bituminösen Belägen empfiehlt es sich, die Dehnungen gemäss *Abbildung 4.2* aufgrund einfacher Kriech-Erholungsversuche in zwei Anteile aufzuspalten

$$\varepsilon_{kr}(\sigma,t) = \varepsilon_{re}(\sigma,t) + \varepsilon_{ir}(\sigma,t) \qquad (4.2)$$

Der reversible Anteil $\varepsilon_{re}(\sigma,t)$ bezeichnet die zeitabhängigen Dehnungen, die während der Erholungsphase bis zum Zeitpunkt $t=2t_1$ sukzessive wieder abgebaut werden, während der irreversible Anteil $\varepsilon_{ir}(\sigma,t)$ den bis zu diesem Zeitpunkt noch verbleibenden Dehnungen entspricht. Beide Dehnungsanteile können jeweils durch einen einfachen Potenzansatz der Form (4.1) angenähert werden:

$$\varepsilon_{re}(\sigma,t) = a_{re}(\sigma)\, t^{q_{re}} \qquad (4.3)$$

$$\varepsilon_{ir}(\sigma,t) = a_{ir}(\sigma)\, t^{q_{ir}} \qquad (4.4)$$

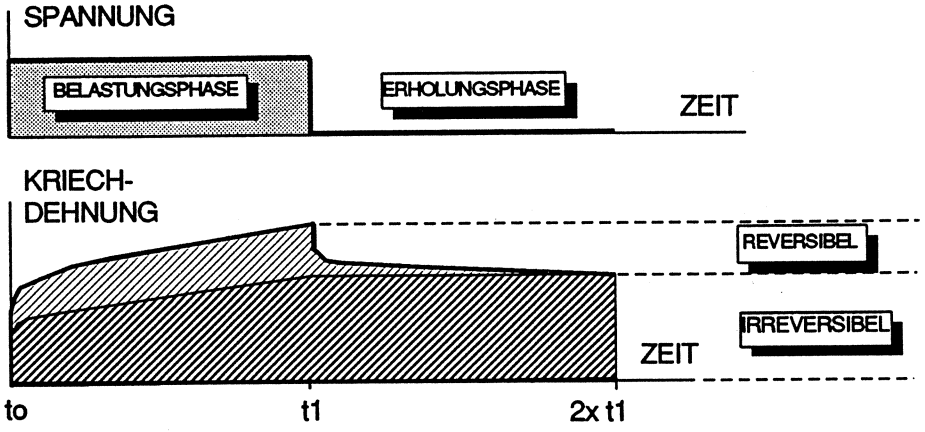


Abbildung 4.2: Aufspaltung der Dehnungen eines einachsigen Kriech-Erholungsversuchs in einen reversiblen und irreversiblen Anteil $\varepsilon_{re}(\sigma,t)$, $\varepsilon_{ir}(\sigma,t)$

Spurrinnen sind bleibende Deformationen. Daher wird im folgenden bei der Beurteilung des Kriechverhaltens der untersuchten Beläge im Hinblick auf die bis zur Entnahme der Belagsausschnitte erfolgte Verkehrsbelastung das Schwergewicht den irreversiblen Dehnungsanteilen beigemessen. Zur Bewertung des Kriechverhaltens wird aufbauend auf (4.4) die folgende *Kriechvergleichsgrösse* e_{ir} gewählt:

$$e_{ir} = a_{ir}\, t^{q_{ir}} \quad , (t=3600s) \qquad (4.5)$$

Grundlage für die hauptsächliche Betrachtung der irreversiblen Dehnungsanteile liefert die Dehnungsverfestigungshypothese, die dem Umstand Rechnung trägt, dass bei wiederholter Be- und Entlastung jeder neue Lastzyklus kleinere irreversible Deformationen verursacht als der vorangehende. In *Abbildung 4.3* ist dies schematisch für eine idealisierte rechteckförmige wiederholte Verkehrslast dargestellt. Die entsprechende im Laufe der Zeit kumulierte irreversible Deformation führt analog zu (4.4) auf eine Beziehung der Form

$$\varepsilon_{ir}(\sigma,t) = a_{ir}(\sigma)\, t'^{q_{ir}} \qquad (4.6)$$

Hierin bezeichnet t' die Summe der einzelnen Belastungszeiten t_i bis zum aktuellen Zeitpunkt. Der Zeitparameter t' repräsentiert demnach die "inneren Uhr" des Materials, die im jeweiligen Entlastungsmoment stillsteht und erst bei neuerlicher Belastung weiterläuft. Unter der stark vereinfachenden Annahme einer zyklischen Verkehrsbeanspruchung aus gleich lange wirkenden, gleich grossen Rechtecklasten kann t' als proportional zur Anzahl aufgetretener Lastwechsel und somit zur gesamten äquivalenten Verkehrslast W angesehen werden. Es ergibt sich dann

$$t' = t_I\, W \qquad (4.7)$$

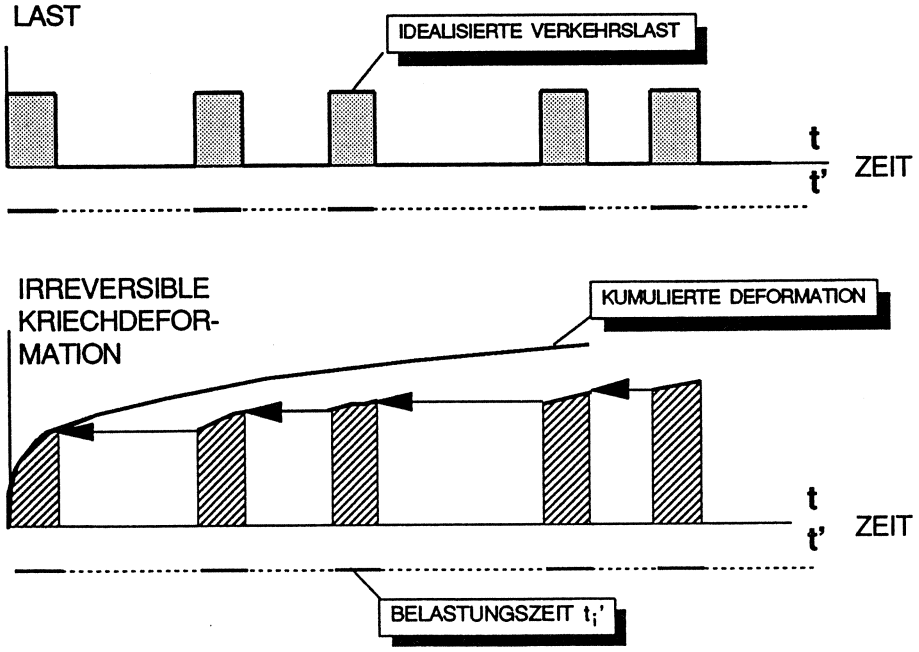


Abbildung 4.3: Vorgehensweise bei der Berechnung der irreversiblen Deformationen bei wiederholter idealisierter Verkehrsbeanspruchung aufgrund der Dehnungsverfestigungshypothese

Der Proportionalitätsfaktor t_I bezeichnet die mittlere massgebende Impulszeit einer Ueberfahrt und wird im folgenden realistischerweise zu $t_I = 0.01$ s angenommen. Dies entspricht für Schwerverkehr einer Geschwindigkeit von etwa 80 km/h. Aufgrund dieser Ueberlegungen lässt sich basierend auf (4.6) der nachstehende *Kriechbeanspruchungswert K_{ir}* definieren

$$K_{ir} = a\,(0.01\ W)^q \qquad (4.8)$$

mit

$$a = a_{ir}(\sigma)$$

$$q = q_{ir} \qquad (4.9)$$

wobei W für die gesamte äquivalente Verkehrslast bis zum jeweils betrachteten Zeitpunkt, (hier bis zum Zeitpunkt der Entnahme der Belagsausschnitte) steht. Die materialspezifischen Parameter a und q wurden mit den aus dem einfachen Kriech-Erholungsversuch bestimmten Grössen a_{ir} und q_{ir} gleichgesetzt.

4.4 Zurückgewonnenes lösliches Bindemittel

Die Bindemitteluntersuchungen erfolgten an den zurückgewonnenen löslichen Bindemittelanteilen. Dazu wurde das in Benzol gelöste Bindemittel im Anschluss an die Bindemittelgehaltsbestimmung unverzüglich mit Hilfe eines Vakuum-Rotationsverdampfers zurückgewonnen und gleichentags untersucht. Die verwendeten Schweizer Normen (SN) lauten:

SN 671 713b	Dichte, Ausgabe 1978
SN 671 719	Bestimmung der Asche, Ausgabe 1969
SN 671 722	Dynamische Viskosität, Ausgabe 1975
SN 671 740a	Bestimmung der Penetration, Ausgabe 1968 (Prüftemperatur gemäss Norm 25°C. Bei den Temperaturen 15°C und 35°C wurde in Anlehnung an diese Norm gearbeitet)
SN 671 743a	Bestimmung und Erweichungspunkt Ring und Kugel (RuK), Ausgabe 1968
SN 671 744a	Penetrationsindex (PI), Ausgabe 1978
SN 671 755a	Bestimmung des Brechpunktes nach Fraass, Ausgabe 1969
SN 671 955a	Bestimmen des löslichen Bindemittelanteils, Ausgabe 1980

4.5 Bituminöses Mischgut

Die Untersuchung des aus den Schichten der Belagsausschnitte gewonnenen bituminösen Mischguts wurde gemäss den im Zeitpunkt der Entnahme geltenden Schweizer Normen (SN) durchgeführt:

SN 670 810b	Siebanalyse, Ausgabe 1979
SN 671 969b	Marshall-Prüfung, Ausgabe 1976

5. BELAGSAUFBAU, ALLGEMEINE ANGABEN, ZUSAMMENSTELLUNG DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

5.1 Autobahnteilstrecke A

Es handelt sich um einen vierschichtigen Belagsaufbau gemäss *Tabelle 5.1*, grundsätzlich gleich wie Teilstrecke B mit einer aus den Querprofilen der drei entnommenen Belagsausschnitte bestimmten mittleren Belagsdicke von 173 mm.

Chronologie: 1966 Verkehrsübergabe, tägl. äquivalente Verkehrslast TF rund 1100
1973 Einbau einer neuen Verschleissschicht, TF rund 1700
1978 Entnahme der drei Belagsausschnitte, TF rund 2200
1989 Beanspruchung etwa 10 Jahre nach Entnahme: TF rund 3300

Zustand bei Entnahme der Belagsausschnitte:

Festzustellen ist eine starke Spurrinnenbildung (*Abbildung 5.1*) auch nach Einbau der neuen Verschleissschicht. Grösste Deformationen treten unter den Radspuren in der Grenzfläche zwischen Verschleiss- und Ausgleichschicht auf (*Abbildung 5.2*). Bezogen auf das Maximum dieser Deformationen (maximaler Mittelwert aus drei Belagsausschnitten) entfallen auf die einzelnen Schichten: AS=34%, oHMT=27%, uHMT=39%. Der entsprechende Wert für die jüngere Verschleissschicht beträgt VS=55%.

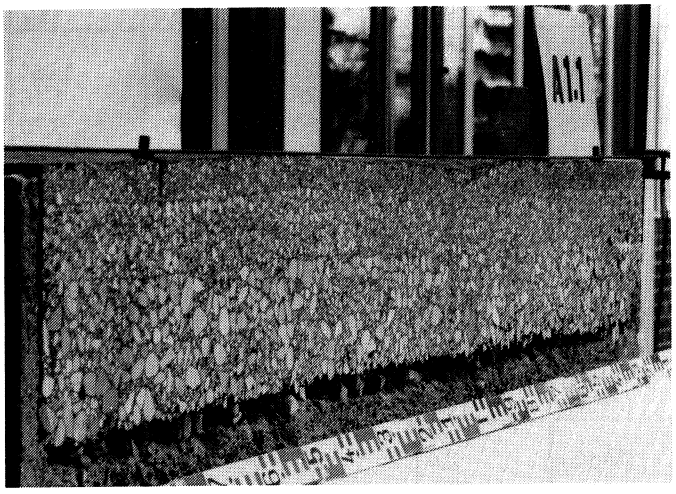


Abbildung 5.1:
Typische Schnittfläche eines Belagsausschnittstücks der Autobahnteilstrecke A, EMPA-Foto Nr. 77'306/3

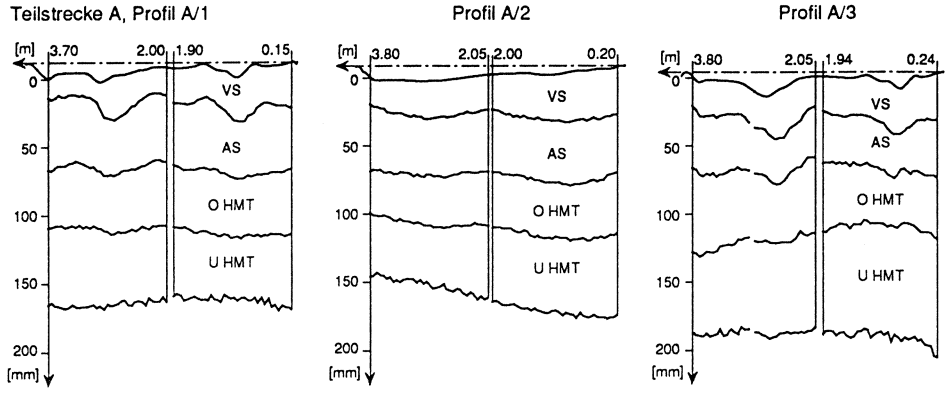
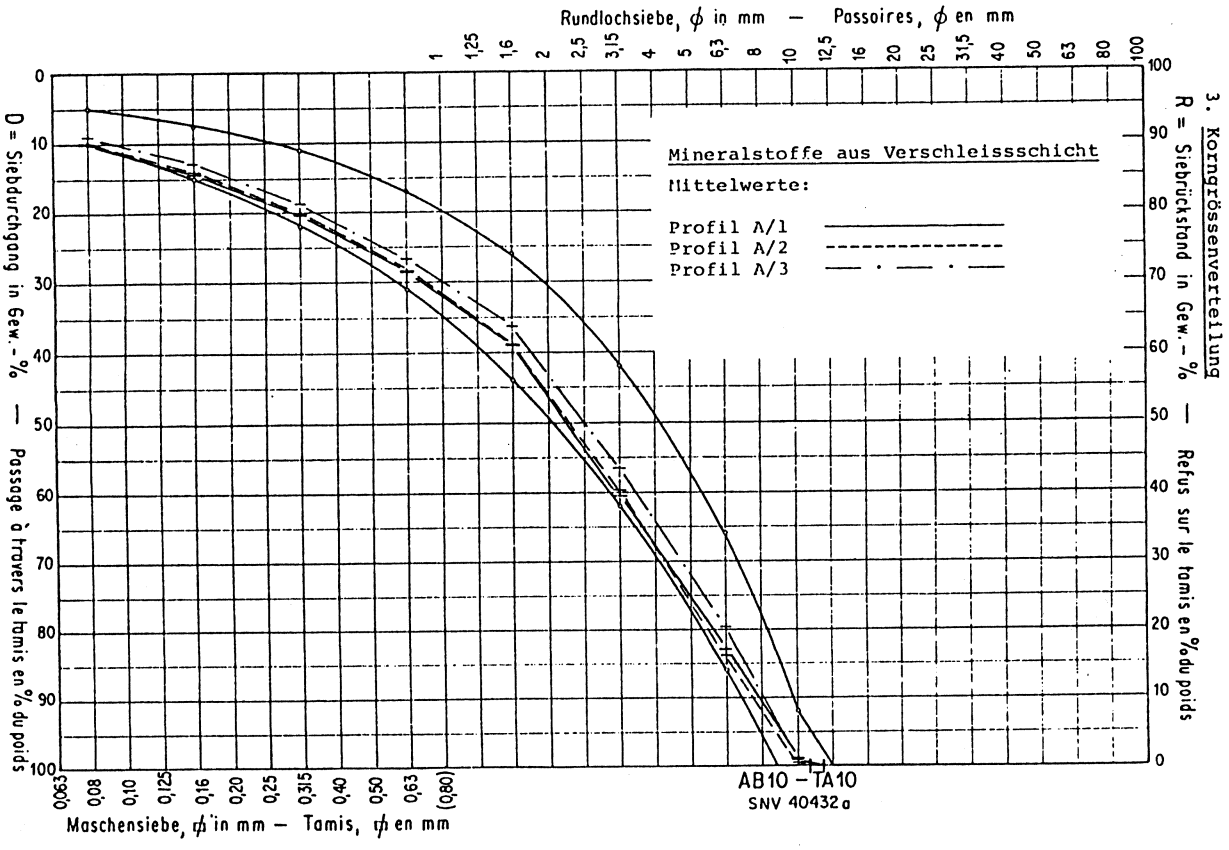


Abbildung 5.2: Schichtverlauf der Belagsausschnittstücke von Autobahnteilstrecke A

VS: Verschleissschicht
AS: Ausgleichsschicht
oHMT, uHMT: obere, untere HMT

AUTOBAHNTEILSTRECKE :	A	(Mittelwerte für 3 Profile)			
	SCHICHT	VS	AS	oHMT	uHMT
MATERIAL	Mischgutsorte	AB10	AB16	HMT32	HMT32
	Bindemittelsorte (Einbau)	B60/70	B130/150	TB200/500	TB200/500
	Trinidad Pulver 50/50 (M-o/o)	3.50	-	-	-
	Trinidad Epuré (M-o/o)	-	-	-	-
BLEIB. DEFORMATION IM QUERPROFIL	Max. Einzelwert (mm)	14.0	21.0	16.0	7.0
	Max. Mittelwert (mm)	9.0	16.3	10.7	6.3
	Max. Anteil d. Schicht (mm)	9.0	5.6	4.4	6.3
	Max. Anteil am Gesamtmax. (o/o)	55.2	34.4	27.0	38.7
EINGEBAUTE BELAGSSCHICHT	Schichtdicke (mm)	28	43	44	59
	Rohdichte (t/m3)	2.328	2.385	2.448	2.437
	Dichte (t/m3)	2.423	2.461	2.527	2.531
	Hohlraumgehalt (V-o/o)	4.0	3.1	3.1	3.7
	Verdichtungsgrad (o/o)	98.4	99.7	101.3	100.9
	Hohlraumfüllungsgrad (o/o)	77.9	80.9	74.2	70.3
MINERALSTOFFE (SIEBDURCHGANG)	40 mm (M-o/o)	-	-	-	-
	32 mm (M-o/o)	-	-	99.7	99.8
	25 mm (M-o/o)	-	100.0	93.8	93.0
	16 mm (M-o/o)	100.0	99.2	70.5	69.8
	10 mm (M-o/o)	99.2	80.1	51.5	50.9
	6.3 mm (M-o/o)	82.1	58.8	39.3	38.7
	3.15 mm (M-o/o)	58.9	40.1	28.1	27.5
	0.08 mm (M-o/o)	9.7	8.3	5.0	5.7
ZURUECK-GEWONNENES LOESLICHES BINDEMITTEL	Dichte aschefrei (t/m3)	1.031	1.021	1.050	1.051
	Aschegehalt (M-o/o)	1.59	2.28	1.88	1.18
	Bindemittelanteil (M-o/o)	5.90	5.50	3.80	3.70
	Penetration bei 15oC (.1mm)	16	28	24	25
	" bei 25oC (.1mm)	36	76	57	60
	" bei 35oC (.1mm)	81	189	132	139
	Erweichung RuK (oC)	59.6	50.5	54.0	53.2
	Penetrationsindex PI	0.2	0.0	0.0	-0.1
	Brechpunkt nach Fraass (oC)	-16	-18	-18	-16
	Dyn. Viskosität bei 60oC (100Pas)	12.9	2.1	4.6	4.3
	" bei 70oC (100Pas)	-	-	-	-
	" bei 80oC (100Pas)	-	-	-	-
	" bei 130oC (.1Pas)	11.2	5.4	5.4	5.0
MARSHALL-PRUEFUNG	Hohlraumgehalt: HM (V-o/o)	2.4	2.9	4.3	4.6
	Hohlraumfüllungsgrad (o/o)	85.0	81.7	76.0	65.0
	Stabilität: SM (kN)	12.8	7.6	7.6	6.7
	Fliessen: FM (mm)	3.1	2.6	2.5	2.2
	SM/FM (kN/mm)	4.1	2.9	3.0	3.0
IRREVERSIBLES KRIECHEN, 40oC	a (o/oo,s)	3.48	2.93	3.64	3.89
	q (o/oo,s)	0.099	0.107	0.108	0.094
	W: Ges. äquiv. Verkehrslast (Millionen)	3.6	7.2	7.2	7.2
(Bohrkerne ausserhalb	Kir = a (0.01 x W)^q (o/oo)	9.83	9.70	12.18	11.13
Radspuren entnommen)	eir = a t ^q, t=3600s (o/oo)	7.83	7.04	8.81	8.40

Tabelle 5.1: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse von Autobahnteilstrecke A. Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT)



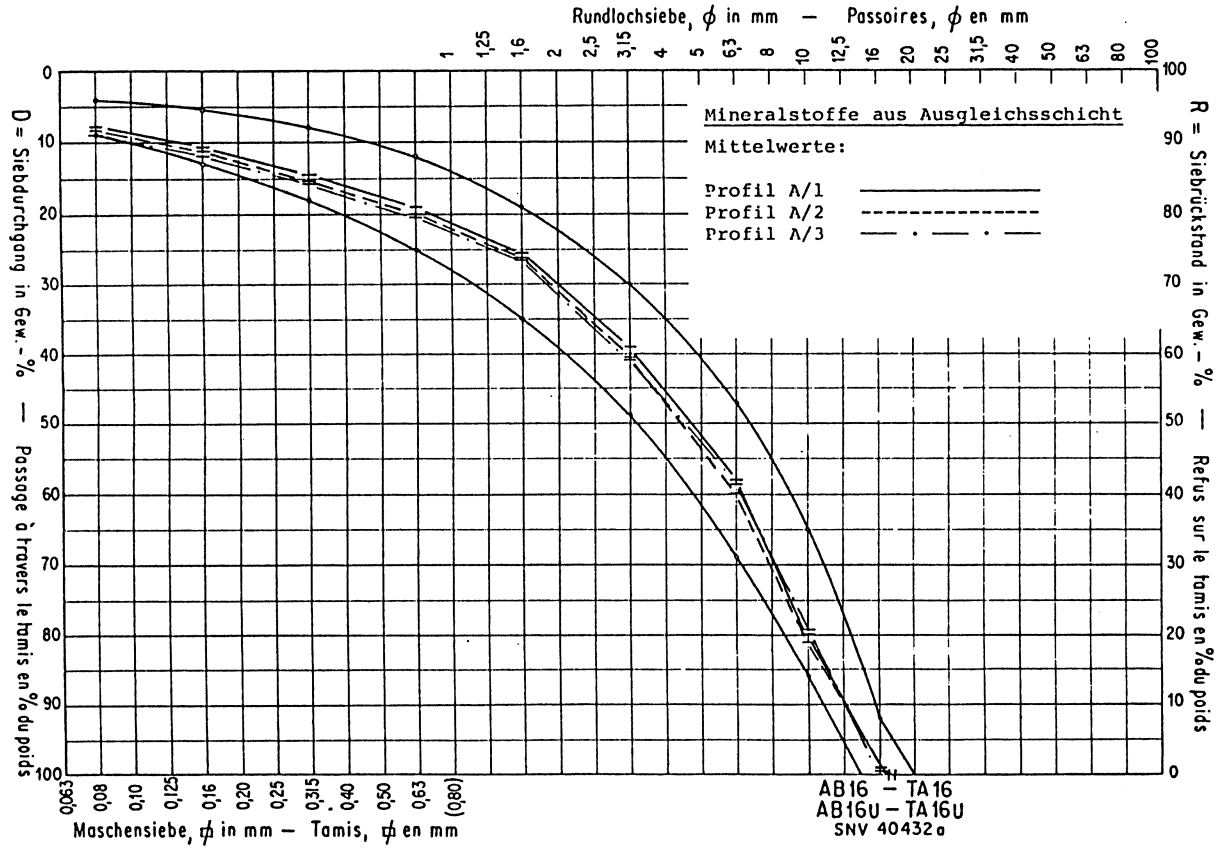
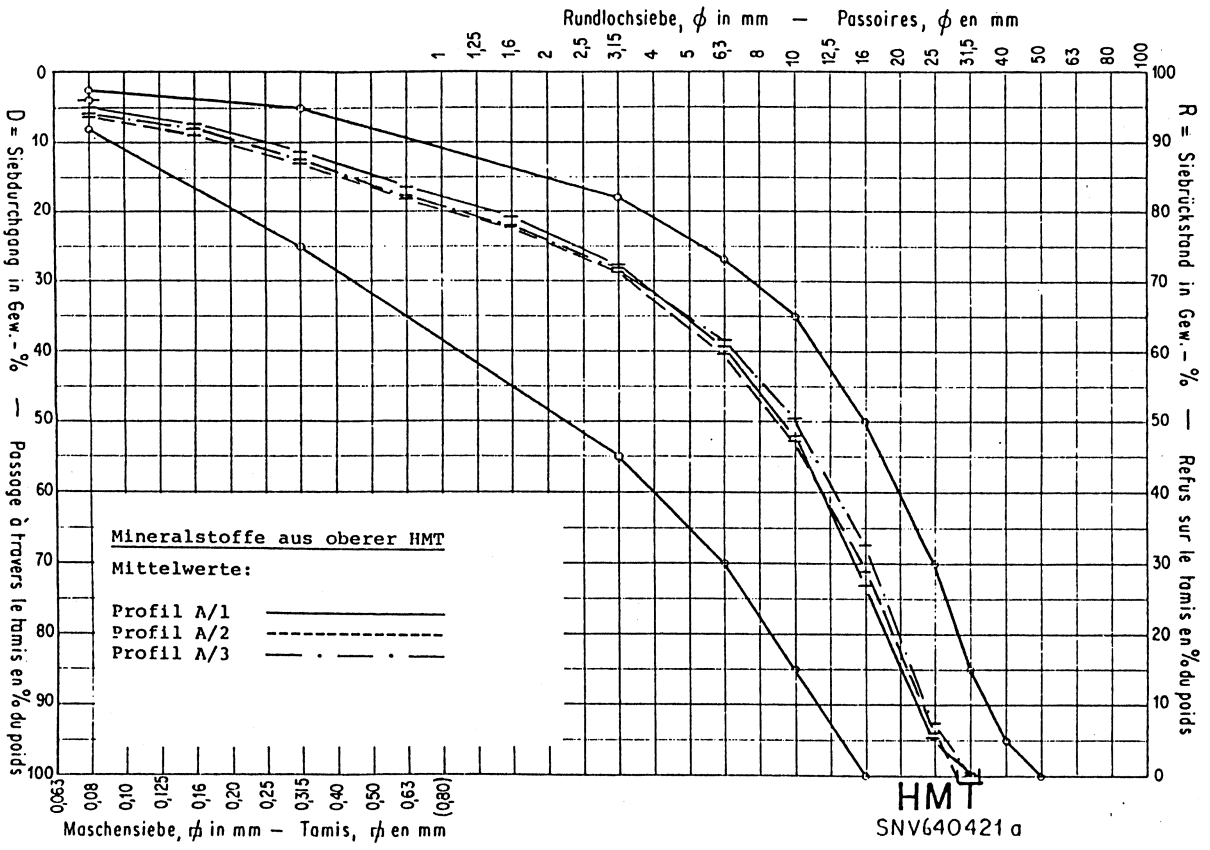


Abbildung 5.3: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke A; *oben:* Verschleissschicht AB 10, *unten:* Ausgleichsschicht AB 16



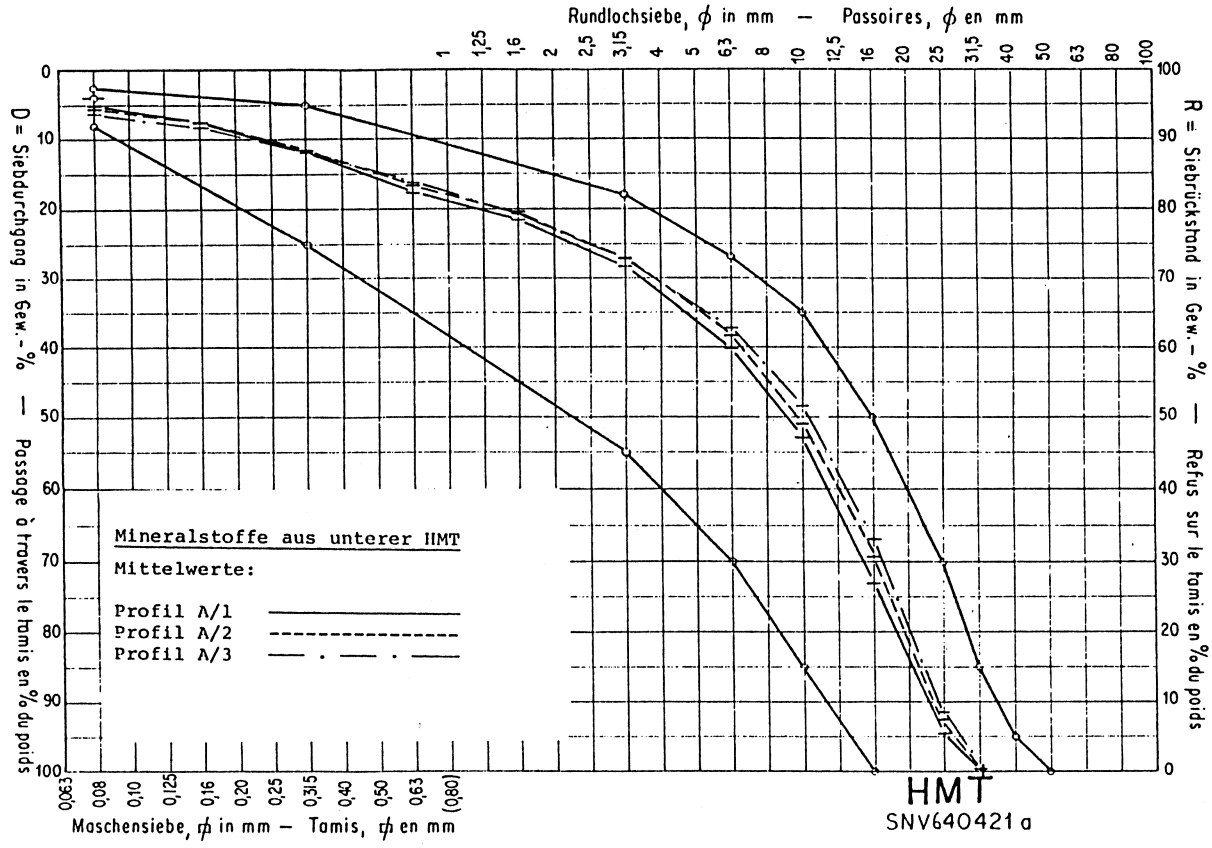


Abbildung 5.4: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke A; *oben:* obere Heissmischtragschicht HMT 32, *unten:* untere Heissmischtragschicht HMT 32

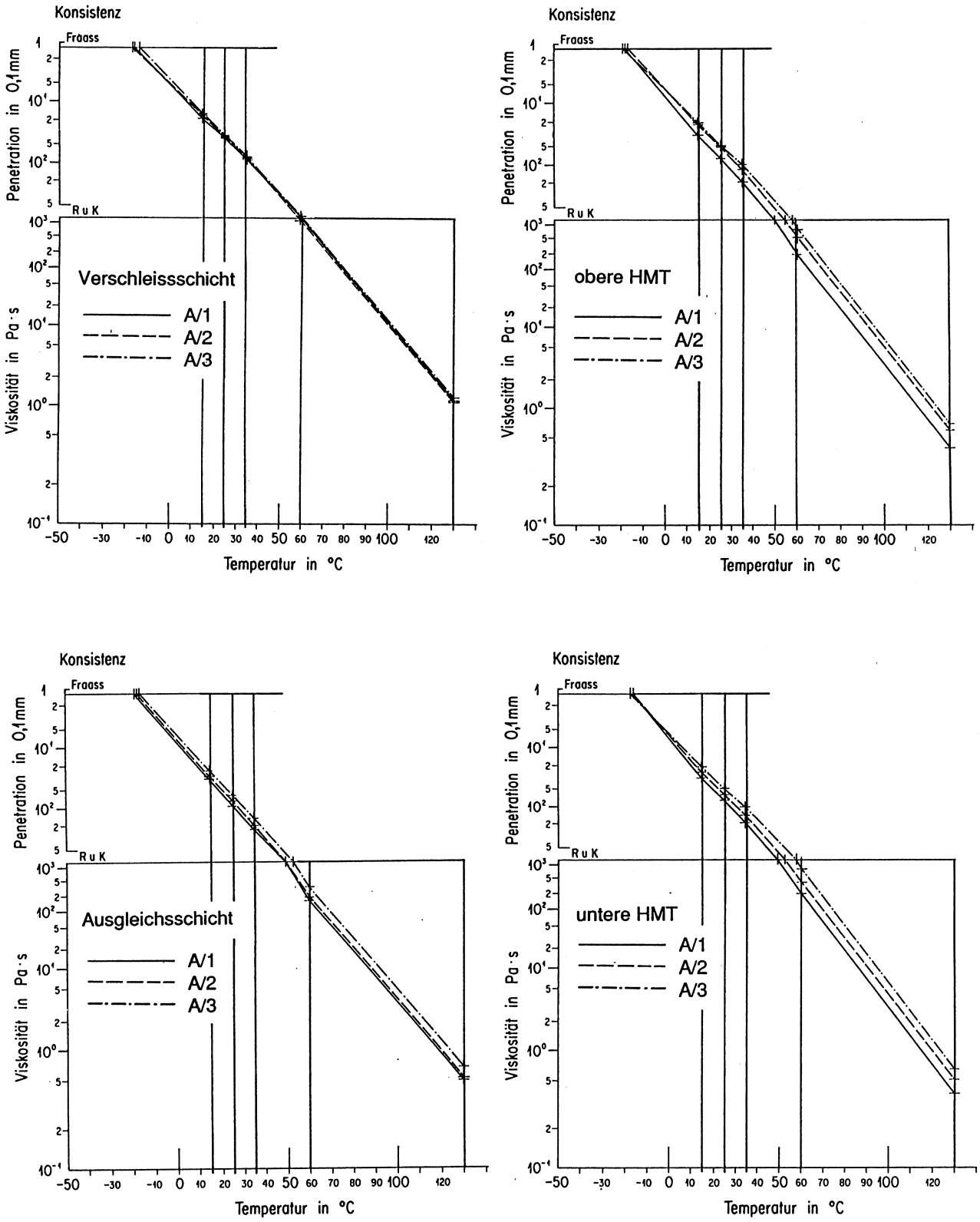


Abbildung 5.5: Konsistenz/Temperatur-Diagramme von Autobahnteilstrecke A

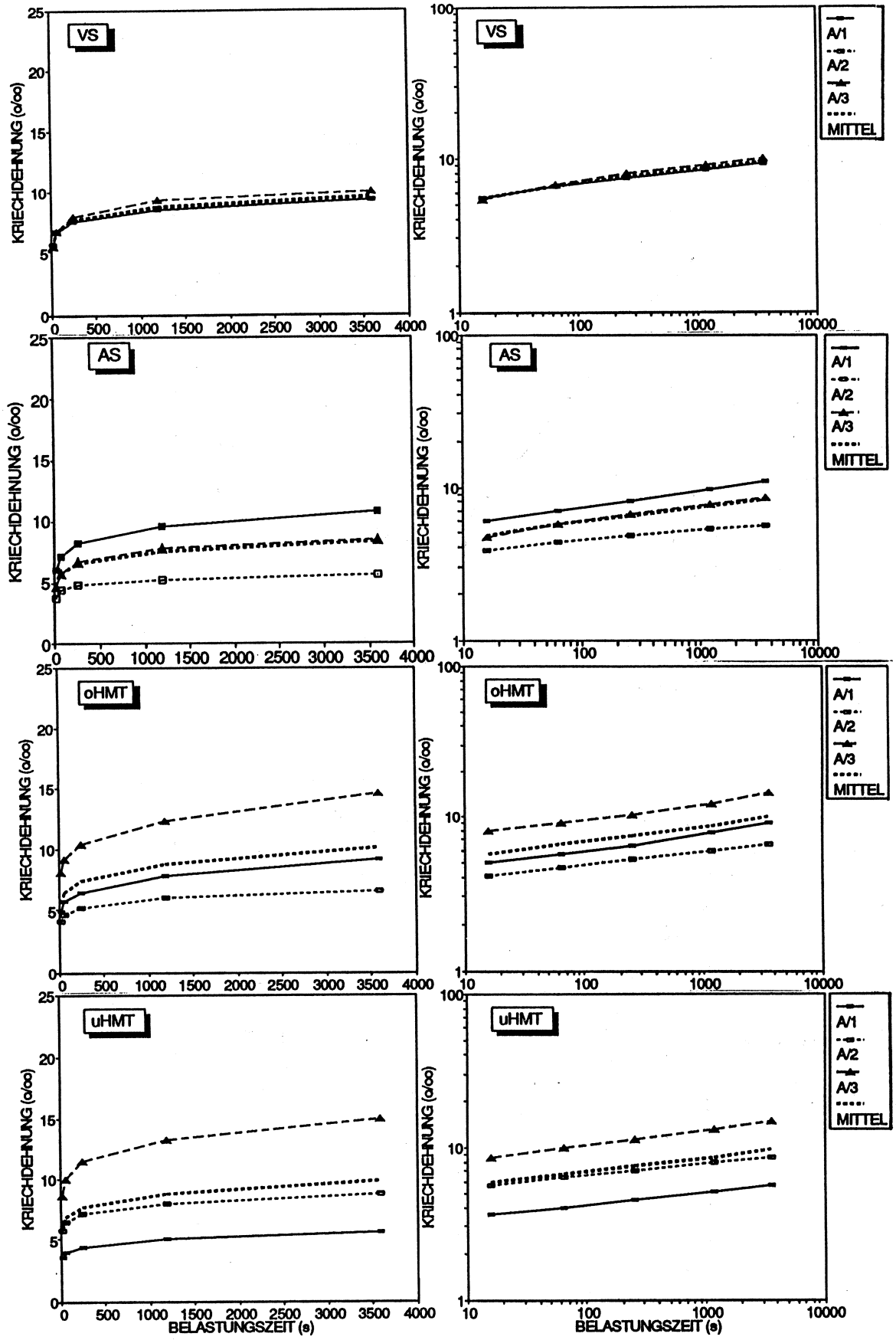


Abbildung 5.6: Kriechdehnungen ε_{kr} (°/oo) bei 40°C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2 , ermittelt an Bohrkernen *ausserhalb der Radspuren von Autobahnteilstrecke A*; Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT);links linear, rechts doppeltlogarithmisch dargestellt

5.2 Autobahnteilstrecke B

Es handelt sich um einen vierschichtigen Belagsaufbau gemäss *Tabelle 5.2*, grundsätzlich gleich wie Autobahnteilstrecke A mit einer aus den Querprofilen der drei entnommenen Belagsausschnitte bestimmten mittleren Belagsdicke von 180 mm.

Chronologie: 1966 Verkehrsübergabe, tägl. äquivalente Verkehrslast TF rund 1100
1975 Einbau einer neuen Verschleissschicht, TF rund 1900
1978 Entnahme der drei Belagsausschnitte, TF rund 2200
1989 Beanspruchung etwa 10 Jahre nach Entnahme: TF rund 3300

Zustand bei Entnahme der Belagsausschnitte:

Festzustellen ist eine eher schwache Spurrinnenbildung (*Abbildung 5.7*) nach Einbau der neuen Verschleissschicht. Grösste Deformationen treten unter den Radspuren in der Grenzfläche zwischen Verschleiss- und Ausgleichschicht auf (*Abbildung 5.8*). Bezogen auf das Maximum dieser Deformationen (maximaler Mittelwert aus drei Belagsausschnitten) entfallen auf die einzelnen Schichten: AS=35%, oHMT=22%, uHMT=43%. Der entsprechende Wert für die jüngere Verschleissschicht beträgt VS=40%.

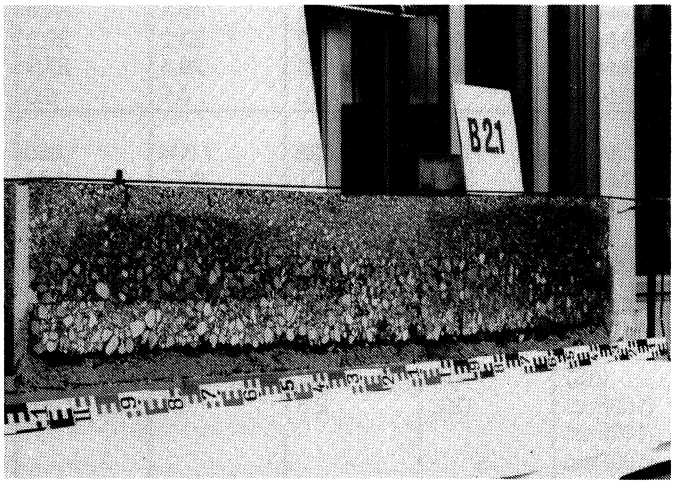


Abbildung 5.7:
Typische Schnittfläche eines Belagsausschnittstücks der Autobahnteilstrecke B, EMPA-Foto Nr. 77'305/5

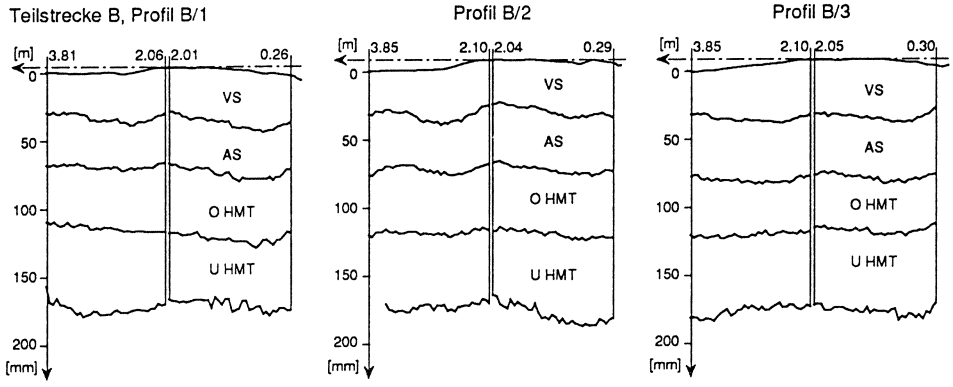
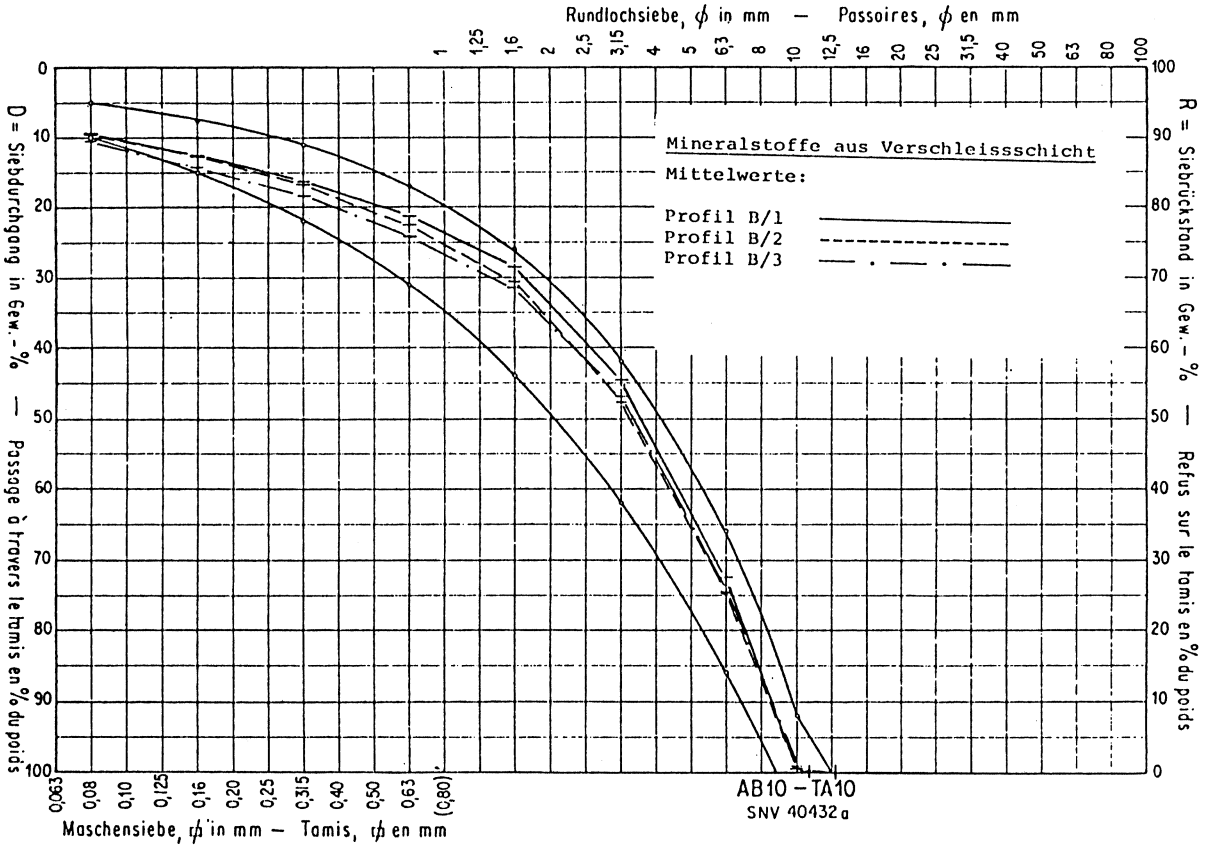


Abbildung 5.8: Schichtverlauf der Belagsausschnittstücke von Autobahnteilstrecke B

VS: Verschleissschicht
AS: Ausgleichsschicht
oHMT, uHMT: obere, untere HMT

AUTOBAHNTEILSTRECKE :	B	(Mittelwerte für 3 Profile)			
	SCHICHT	VS	AS	oHMT	uHMT
MATERIAL	Mischgutsorte	AB10	AB16	HMT32	HMT32
	Bindemittelsorte (Einbau)	B60/70	B130/150	TB200/500	TB200/500
	Trinidad Pulver 50/50 (M-o/o)	3.50	-	-	-
	Trinidad Epuré (M-o/o)	-	-	-	-
BLEIB. DEFORMATION IM QUERPROFIL	Max. Einzelwert (mm)	6.0	14.0	8.0	5.0
	Max. Mittelwert (mm)	4.3	10.7	7.0	4.6
	Max. Anteil d. Schicht (mm)	4.4	3.7	2.4	4.6
	Max. Anteil am Gesamtmax. (o/o)	41.1	34.6	22.4	43.0
EINGEBAUTE BELAGSSCHICHT	Schichtdicke (mm)	37	44	44	56
	Rohdichte (t/m3)	2.319	2.381	2.421	2.444
	Dichte (t/m3)	2.438	2.459	2.528	2.526
	Hohlraumgehalt (V-o/o)	4.9	3.2	4.2	3.2
	Verdichtungsgrad (o/o)	97.6	100.2	101.4	101.5
	Hohlraumfüllungsgrad (o/o)	73.3	80.0	66.0	73.3
MINERALSTOFFE (SIEBDURCHGANG)	40 mm (M-o/o)	-	-	-	-
	32 mm (M-o/o)	-	-	99.6	99.8
	25 mm (M-o/o)	-	100.0	92.2	92.9
	16 mm (M-o/o)	100.0	98.6	65.2	69.6
	10 mm (M-o/o)	99.4	77.2	45.4	50.6
	6.3 mm (M-o/o)	73.9	57.9	34.2	38.6
	3.15 mm (M-o/o)	46.4	38.6	24.4	27.3
	0.08 mm (M-o/o)	9.0	8.0	4.6	5.0
ZURUECK-GEWONNENES LOESLICHES BINDEMITTEL	Dichte aschefrei (t/m3)	1.031	1.023	1.044	1.050
	Aschegehalt (M-o/o)	2.16	2.01	0.74	0.81
	Bindemittelanteil (M-o/o)	5.90	5.40	3.30	3.80
	Penetration bei 15oC (.1mm)	15	25	26	23
	" bei 25oC (.1mm)	35	63	62	55
	" bei 35oC (.1mm)	79	156	150	130
	Erweichung RuK (oC)	60.1	52.3	52.2	53.9
	Penetrationsindex PI	0.3	-0.1	-0.2	0.0
	Brechpunkt nach Fraass (oC)	-16	-19	-18	-16
	Dyn. Viskosität bei 60oC (100Pas)	12.2	2.8	3.1	3.6
	" bei 70oC (100Pas)	-	-	-	-
	" bei 80oC (100Pas)	-	-	-	-
	" bei 130oC (.1Pas)	11.8	6.2	5.1	5.2
MARSHALL-PRUEFUNG	Hohlraumgehalt: HM (V-o/o)	2.6	3.4	5.6	4.7
	Hohlraumfüllungsgrad (o/o)	84.0	78.8	57.7	64.9
	Stabilität: SM (kN)	10.7	8.1	5.3	6.5
	Fliessen: FM (mm)	3.2	2.6	2.3	2.5
	SM/FM (kN/mm)	3.4	3.1	2.3	2.6
IRREVERSIBLES KRIECHEN, 40oC	a (o/oo,s)	3.68	2.41	2.90	3.31
	q (o/oo,s)	0.110	0.076	0.065	0.070
	W: Ges. äquiv. Verkehrslast (Millionen)	2.3	7.2	7.2	7.2
(Bohrkerne ausserhalb	Kir = a (0.01 x W)^q (o/oo)	11.09	5.64	6.00	7.24
Radspuren entnommen)	eir = a t ^q, t=3600s (o/oo)	9.06	4.49	4.94	5.87

Tabelle 5.2: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse von Autobahnteilstrecke B. Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT)



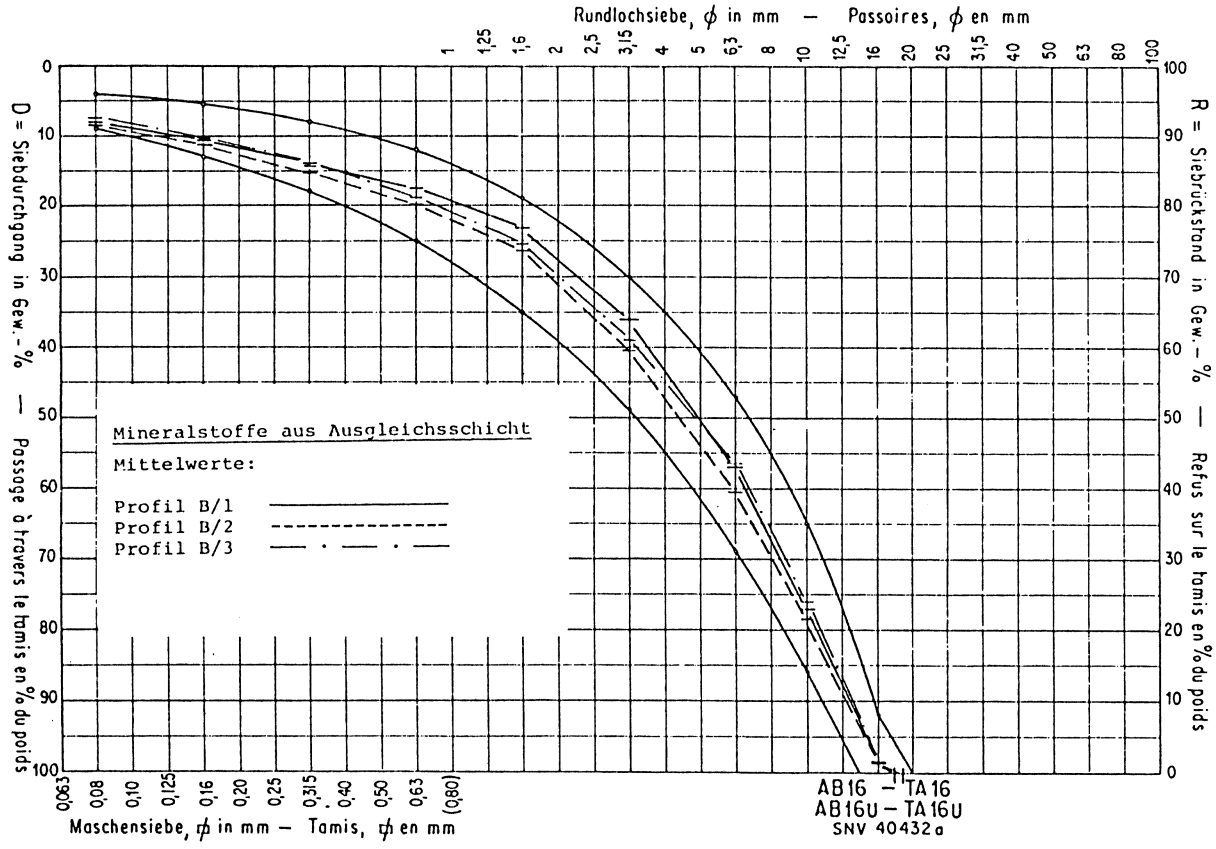
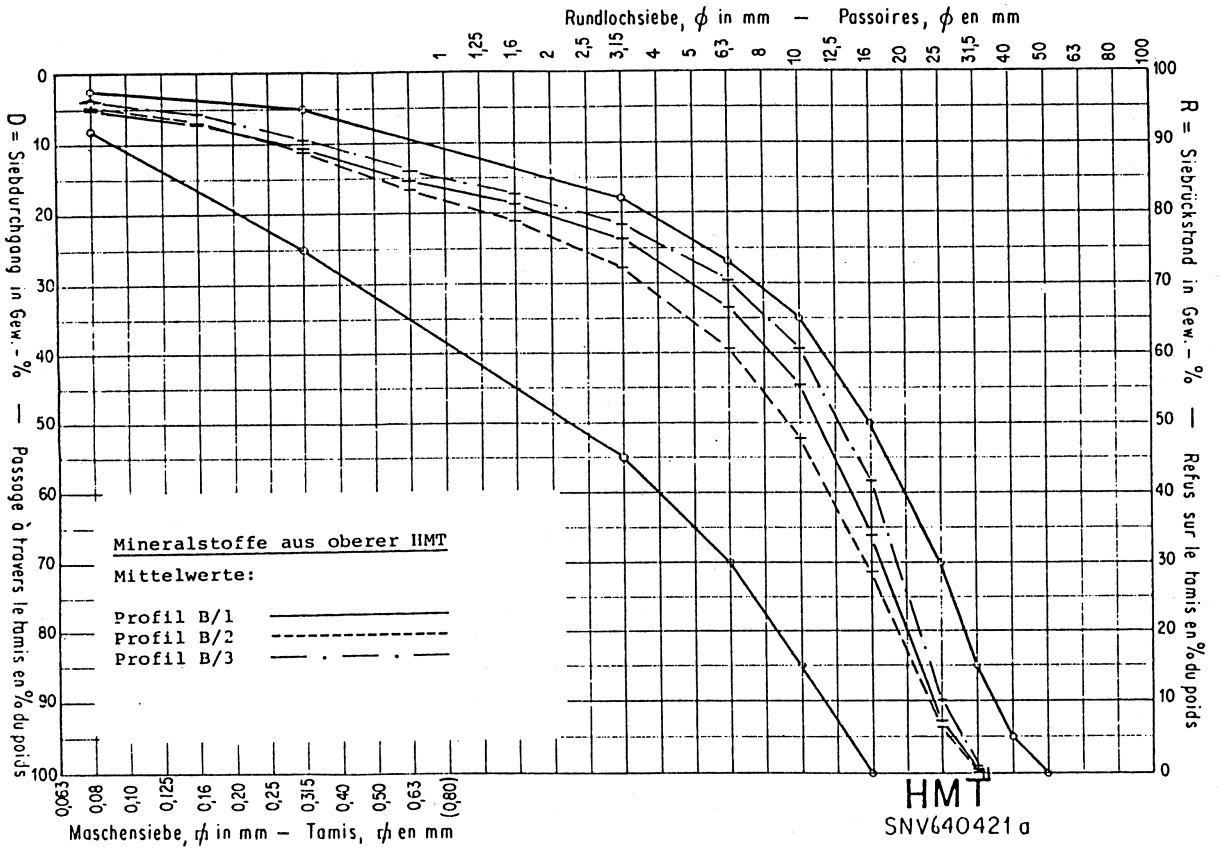


Abbildung 5.9: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke B; *oben:* Verschleissschicht AB 10, *unten:* Ausgleichsschicht AB 16



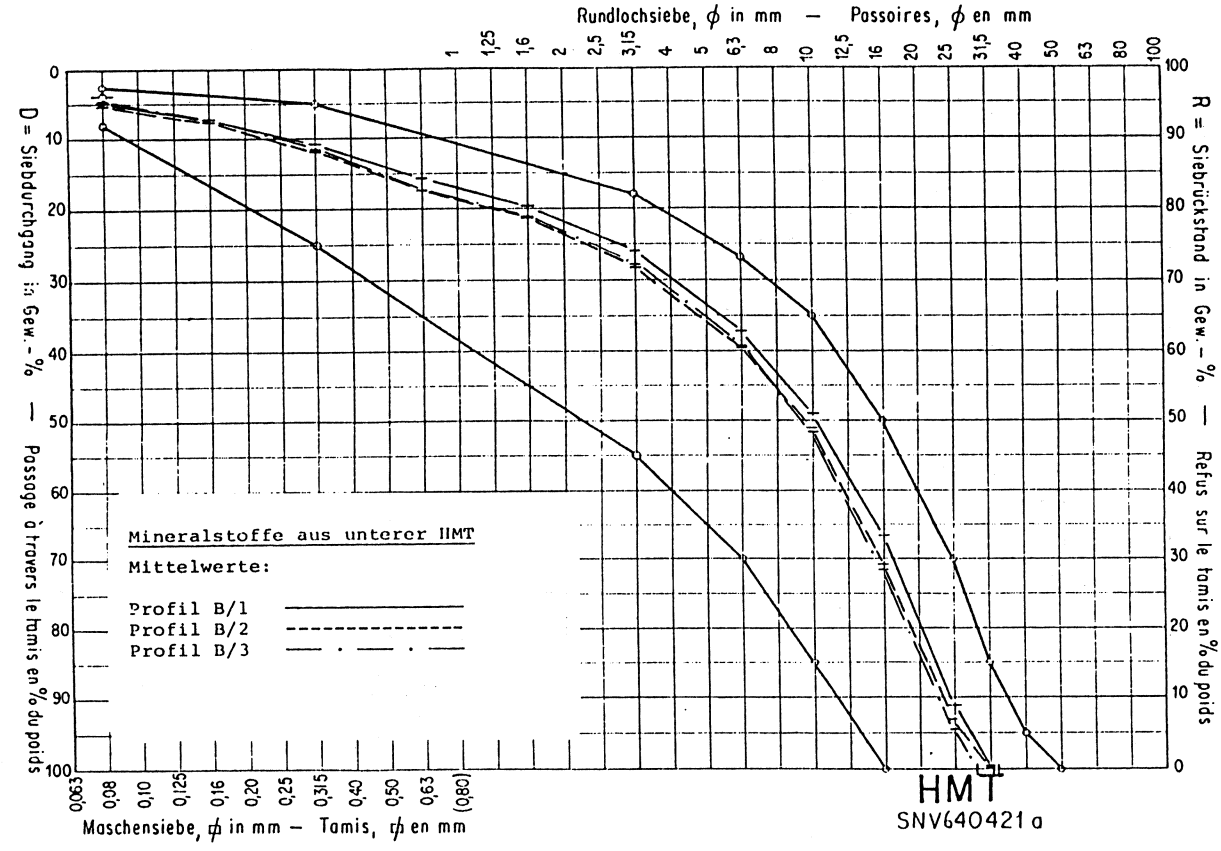


Abbildung 5.10: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke B; *oben:* obere Heissmischtragschicht HMT 32, *unten:* untere Heissmischtragschicht HMT 32

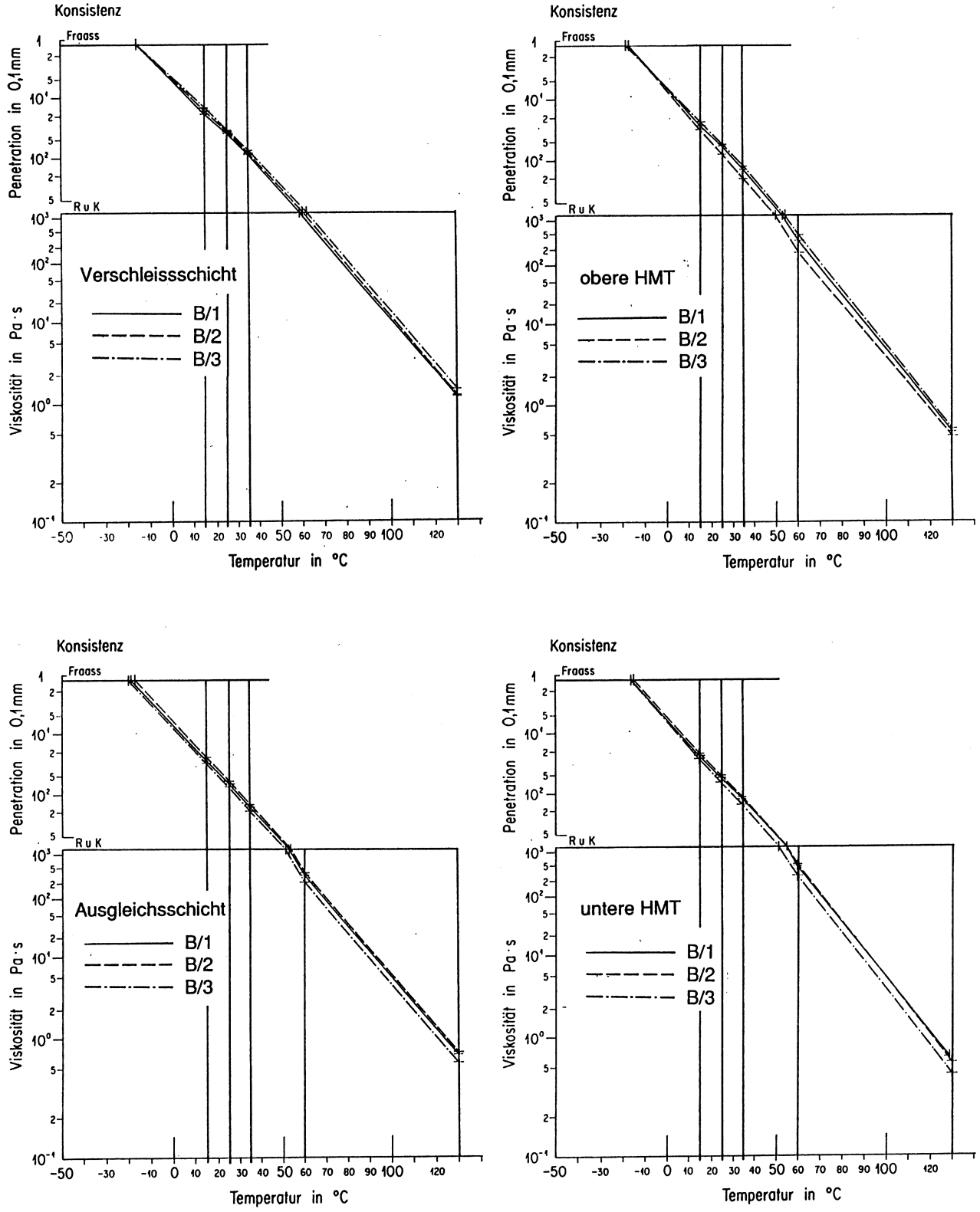


Abbildung 5.11: Konsistenz/Temperatur-Diagramme von Autobahnteilstrecke B

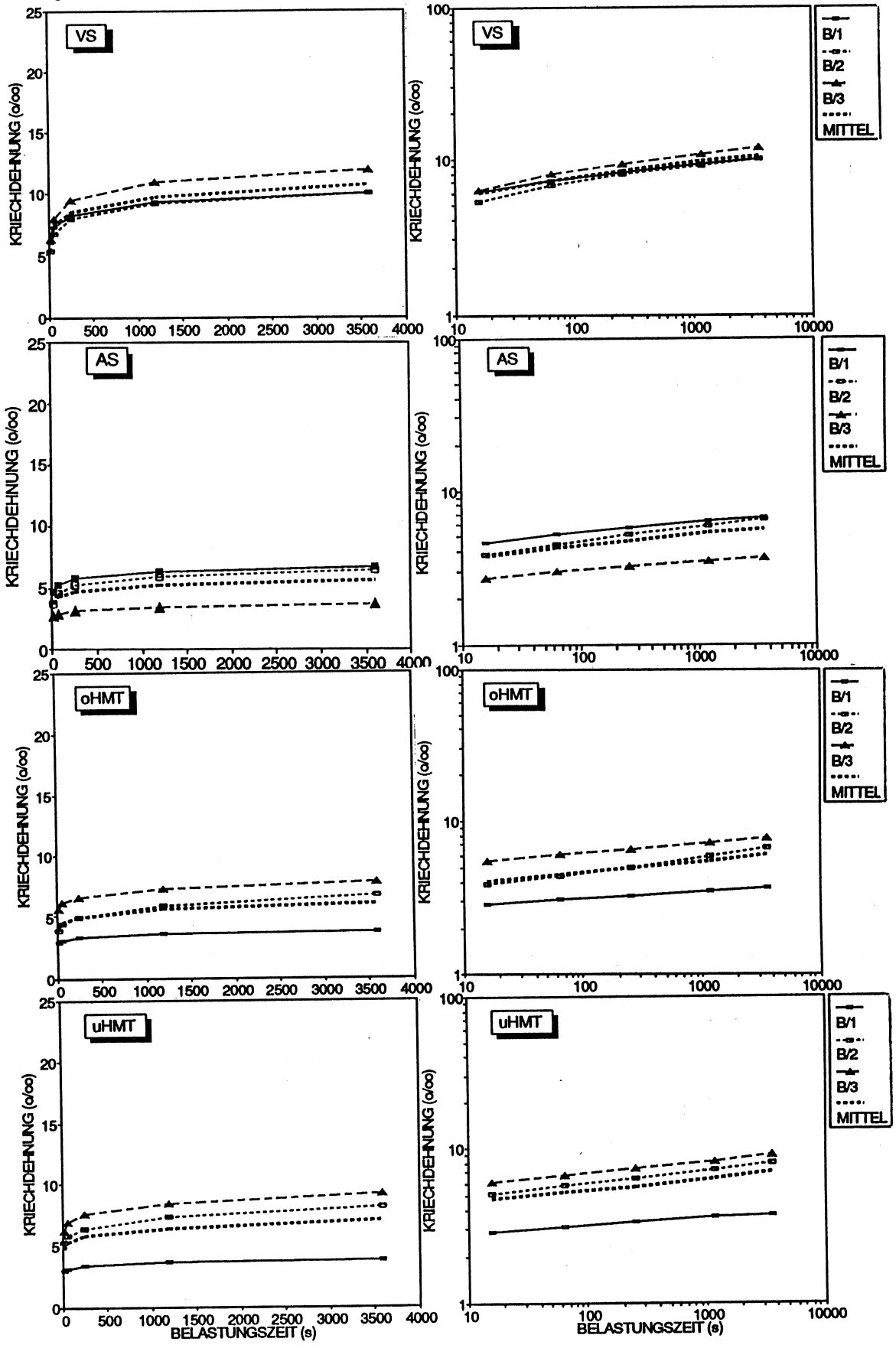


Abbildung 5.12: Kriechdehnungen ε_{kr} (°/oo) bei 40°C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2 , ermittelt an Bohrkernen *ausserhalb der Radspuren von Autobahnteilstrecke B*; Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT);links linear, rechts doppeltlogarithmisch dargestellt

5.3 Autobahnteilstrecke C

Es handelt sich um einen dreischichtigen Belagsaufbau gemäss *Tabelle 5.3*, mit einer aus den Querprofilen der vier entnommenen Belagsausschnitte bestimmten mittleren Belagsdicke von 236 mm.

Chronologie: 1974 Verkehrsübergabe, tägl. äquivalente Verkehrslast TF rund 1800
1978 Entnahme der vier Belagsausschnitte, TF rund 2200
1989 Beanspruchung etwa 10 Jahre nach Entnahme: TF rund 3300

Zustand bei Entnahme der Belagsausschnitte:

Festzustellen ist eine eher schwache Spurrinnenbildung (*Abbildung 5.13*), die ausschliesslich auf Abrieb der Verschleissschicht zurückzuführen ist. Dies geht insbesondere auch aus dem Schichtverlauf hervor (*Abbildung 5.14*).

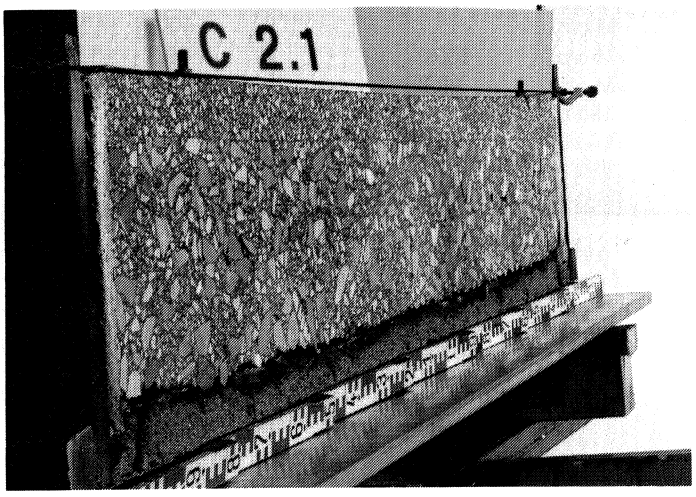


Abbildung 5.13: Typische Schnittfläche eines Belagsausschnittstücks der Autobahnteilstrecke C, EMPA-Foto Nr. 81'149

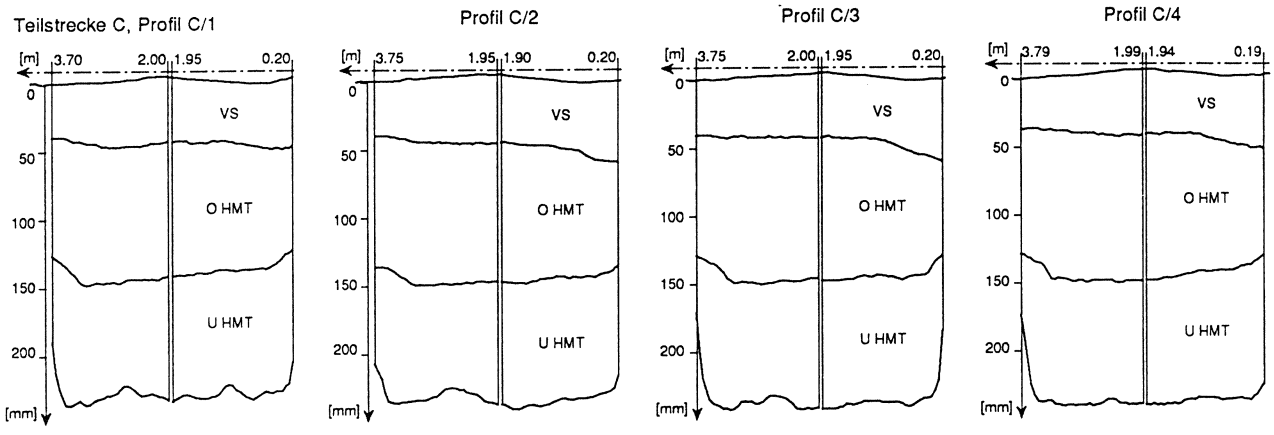


Abbildung 5.14: Schichtverlauf der Belagsausschnittstücke von Autobahnteilstrecke C

VS: Verschleissschicht
AS: Ausgleichsschicht
oHMT, uHMT: obere, untere HMT

AUTOBAHNTEILSTRECKE : C (Mittelwerte für 4 Profile)						
	SCHICHT		VS	AS	oHMT	uHMT
MATERIAL	Mischgutsorte		AB16s	-	HMT40s	HMT40s
	Bindemittelsorte (Einbau)		B40/50	-	B40/50	B40/50
	Trinidad Pulver 50/50	(M-o/o)	-	-	-	-
	Trinidad Epuré	(M-o/o)	-	-	-	-
BLEIB. DEFORMATION IM QUERPROFIL	Max. Einzelwert	(mm)	6.0	-	0.0	0.0
	Max. Mittelwert	(mm)	6.0	-	0.0	0.0
	Max. Anteil d. Schicht	(mm)	6.0	-	0.0	0.0
	Max. Anteil am Gesamtmax.	(o/o)	100.0	-	0.0	0.0
EINGEBAUTE BELAGSSCHICHT	Schichtdicke	(mm)	47	-	99	90
	Rohdichte	(t/m3)	2.395	-	2.462	2.456
	Dichte	(t/m3)	2.460	-	2.515	2.506
	Hohlraumgehalt	(V-o/o)	2.7	-	2.1	2.0
	Verdichtungsgrad	(o/o)	100.3	-	102.4	102.0
	Hohlraumfüllungsgrad	(o/o)	82.5	-	81.4	82.3
MINERALSTOFFE (SIEBDURCHGANG)	40 mm	(M-o/o)	-	-	94.4	96.9
	32 mm	(M-o/o)	-	-	77.2	78.8
	25 mm	(M-o/o)	100.0	-	69.3	70.9
	16 mm	(M-o/o)	98.7	-	60.7	60.5
	10 mm	(M-o/o)	71.5	-	49.4	49.3
	6.3 mm	(M-o/o)	52.7	-	39.5	40.7
	3.15 mm	(M-o/o)	37.5	-	31.3	32.1
	0.08 mm	(M-o/o)	6.8	-	5.1	5.7
ZURUECK-GEWONNENES LOESLICHES BINDEMITTEL	Dichte aschefrei	(t/m3)	1.030	-	1.028	1.028
	Aschegehalt	(M-o/o)	0.54	-	0.66	1.1
	Bindemittelanteil	(M-o/o)	5.31	-	3.77	3.9
	Penetration bei 15oC	(.1mm)	14	-	18	14
	" bei 25oC	(.1mm)	25	-	37	26
	" bei 35oC	(.1mm)	47	-	72	49
	Erweichung RuK	(oC)	72.8	-	64.1	72.1
	Penetrationsindex PI		1.6	-	1.0	1.6
	Brechpunkt nach Fraass	(oC)	-14	-	-17	-15
	Dyn. Viskosität bei 60oC	(100Pas)	-	-	-	-
	" bei 70oC	(100Pas)	28.6	-	8.5	24.5
	" bei 80oC	(100Pas)	-	-	-	-
	" bei 130oC	(.1Pas)	39.3	-	19.5	36.7
MARSHALL-PRUEFUNG	Hohlraumgehalt: HM	(V-o/o)	3.0	-	4.4	3.9
	Hohlraumfüllungsgrad	(o/o)	80.6	-	66.9	70.3
	Stabilität: SM	(kN)	15.2	-	17.5	17.5
	Fliessen: FM	(mm)	3.4	-	3.1	3.2
	SM/FM	(kN/mm)	4.5	-	5.6	5.5
IRREVERSIBLES KRIECHEN, 40oC	a	(o/oo,s)	2.26	-	1.30	1.44
	q	(o/oo,s)	0.117	-	0.208	0.248
	W: Ges. äquiv. Verkehrslast	(Millionen)	2.9	-	2.9	2.9
(Bohrkerne ausserhalb	Kir = a (0.01 x W)^q	(o/oo)	7.53	-	11.05	18.48
Radspuren entnommen)	eir = a t ^q, t=3600s	(o/oo)	5.89	-	7.14	10.97

Tabelle 5.3: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse von Autobahnteilstrecke C. Verschleissschicht (VS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT)

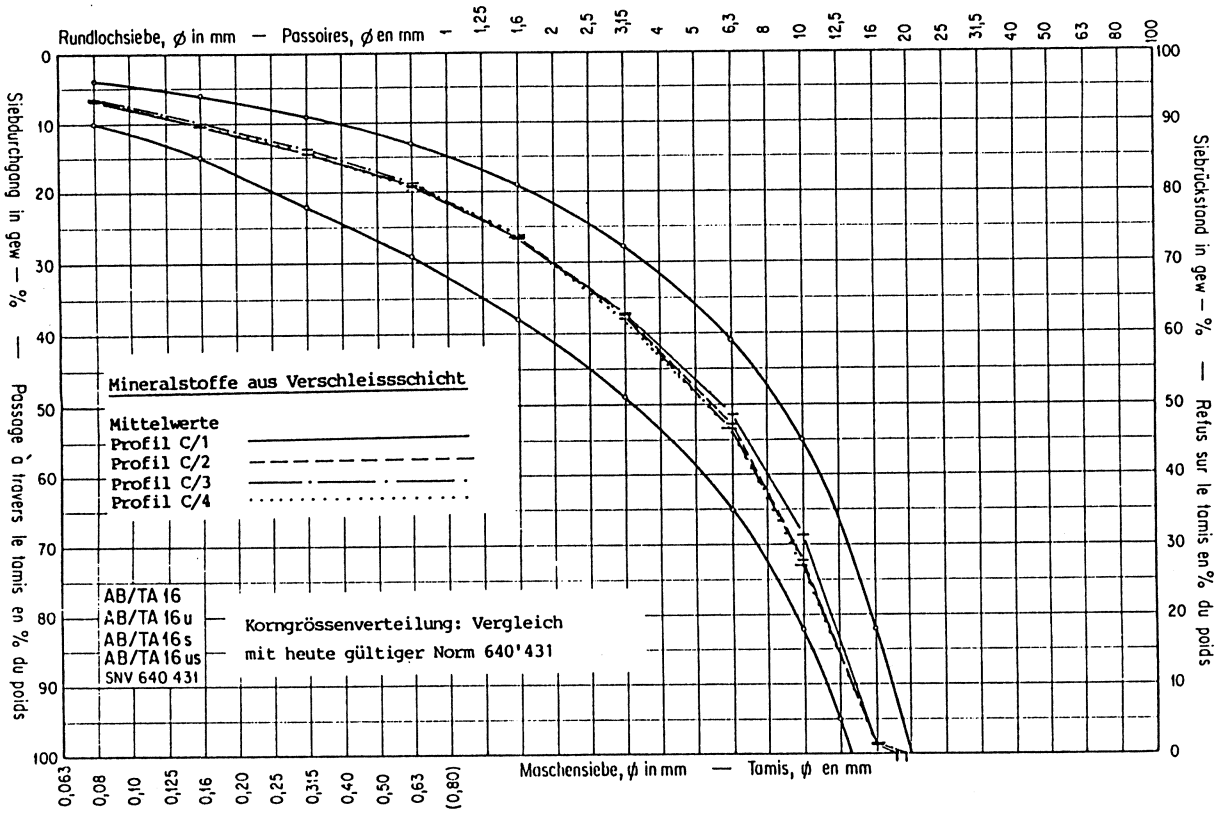
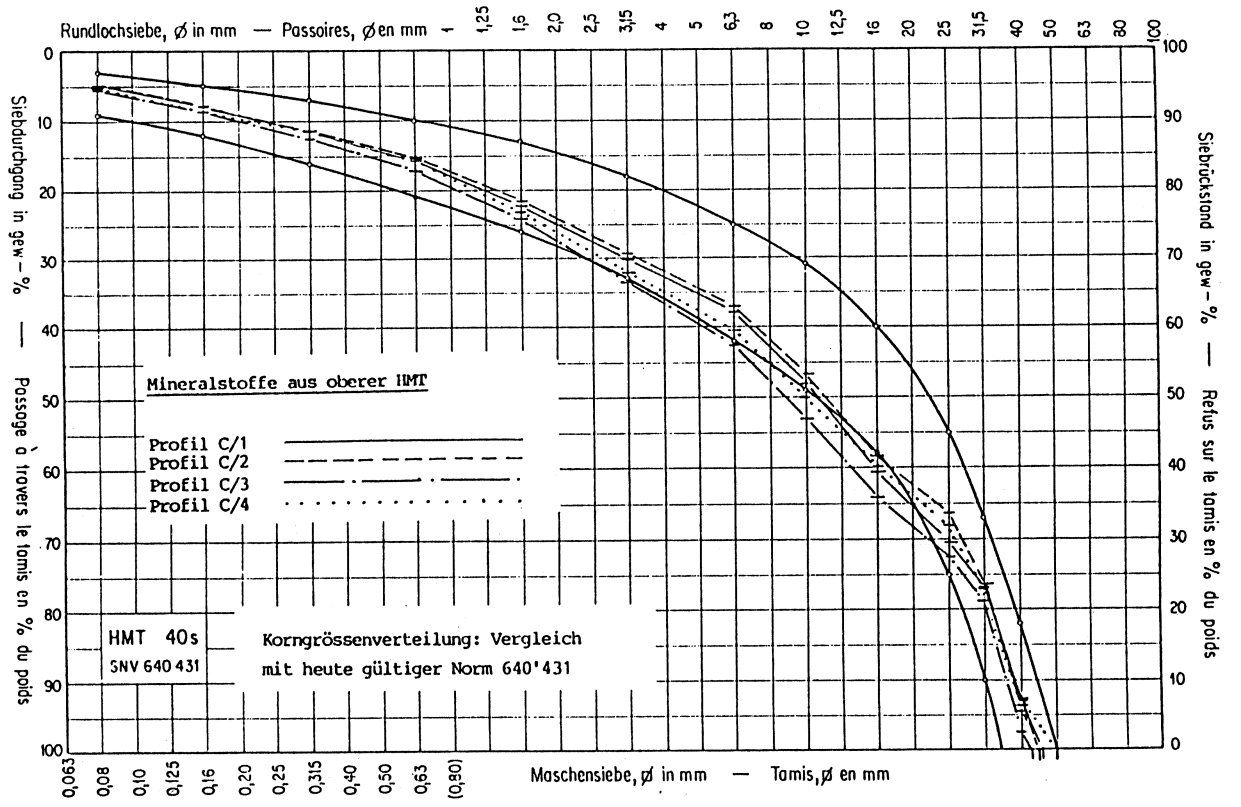


Abbildung 5.15: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke C; Verschleissschicht AB 16s



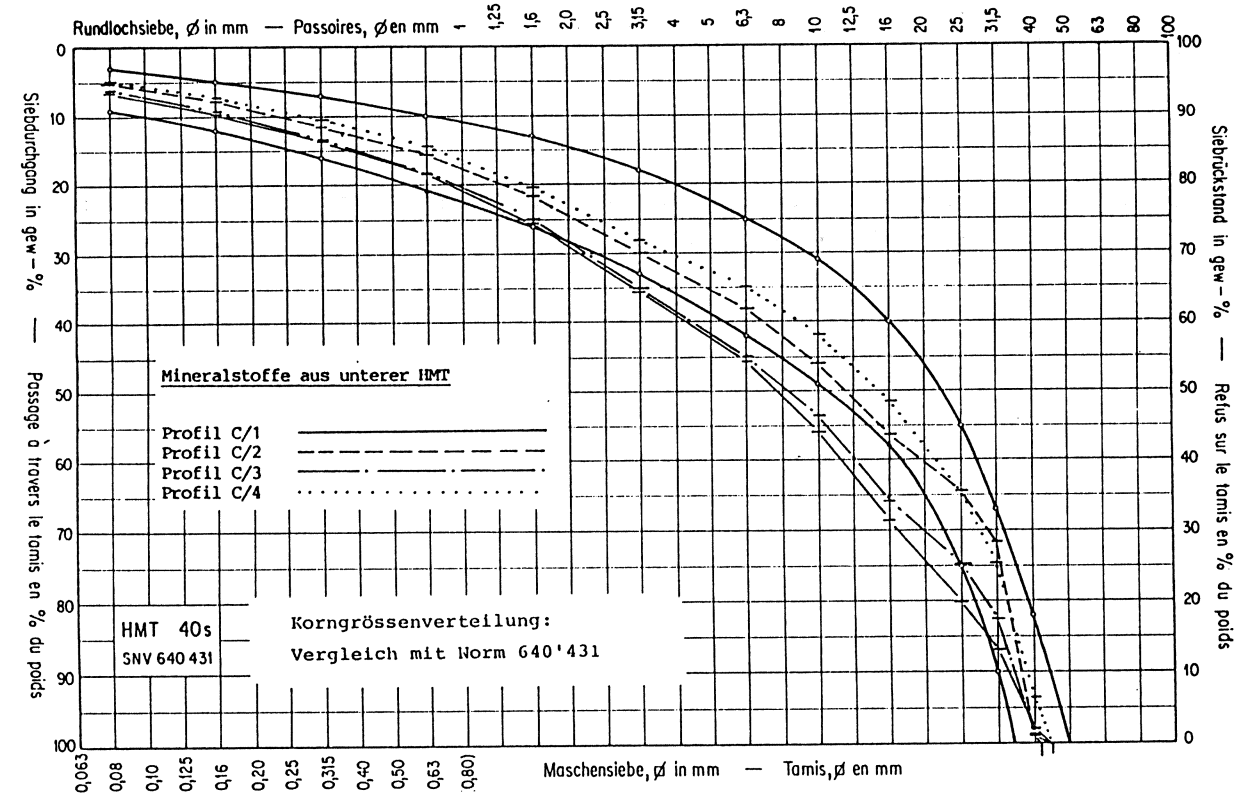


Abbildung 5.16: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke C; *oben:* obere Heissmischtragschicht HMT 40s, *unten:* untere Heissmischtragschicht HMT 40s

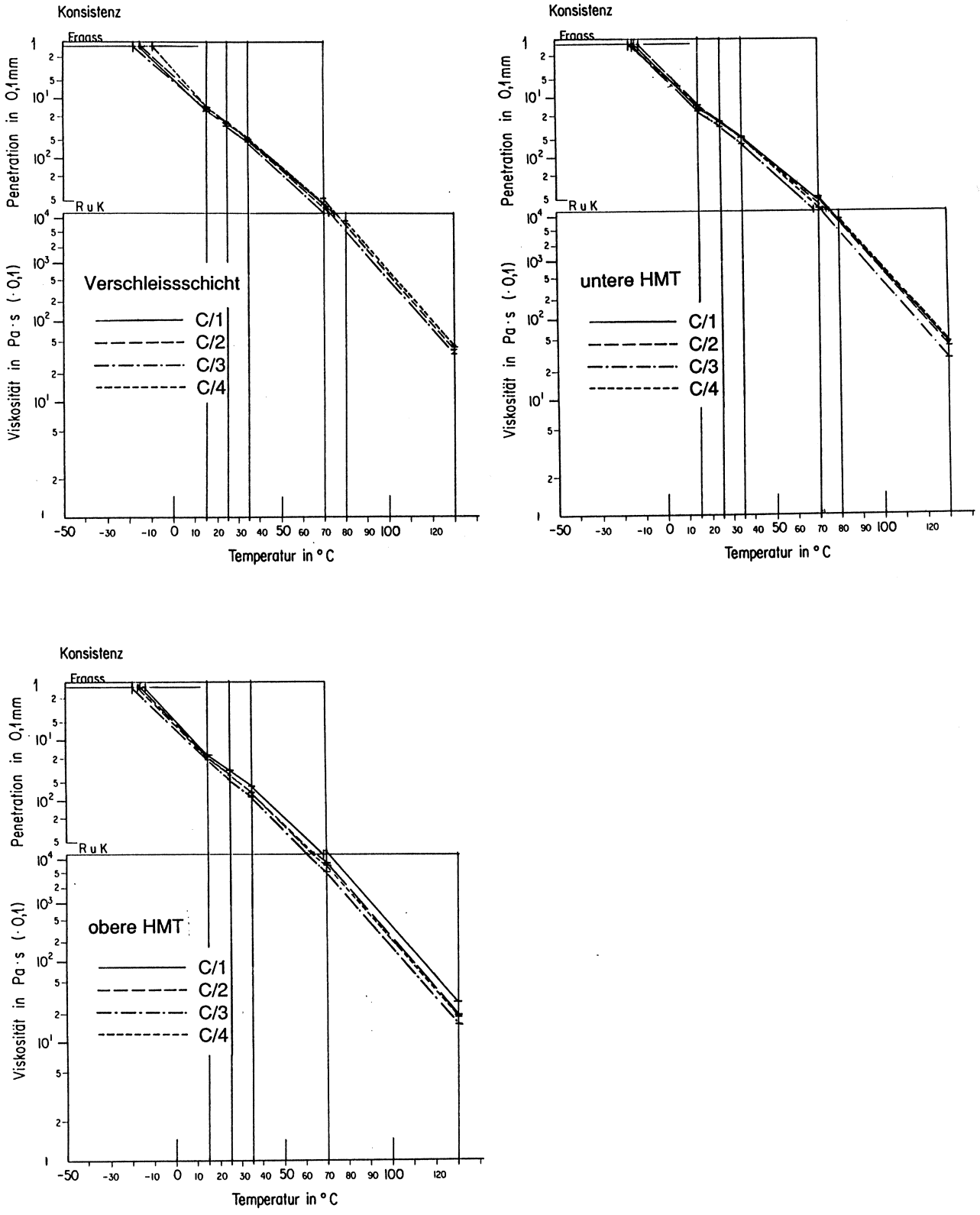


Abbildung 5.17: Konsistenz/Temperatur-Diagramme von Autobahnteilstrecke C

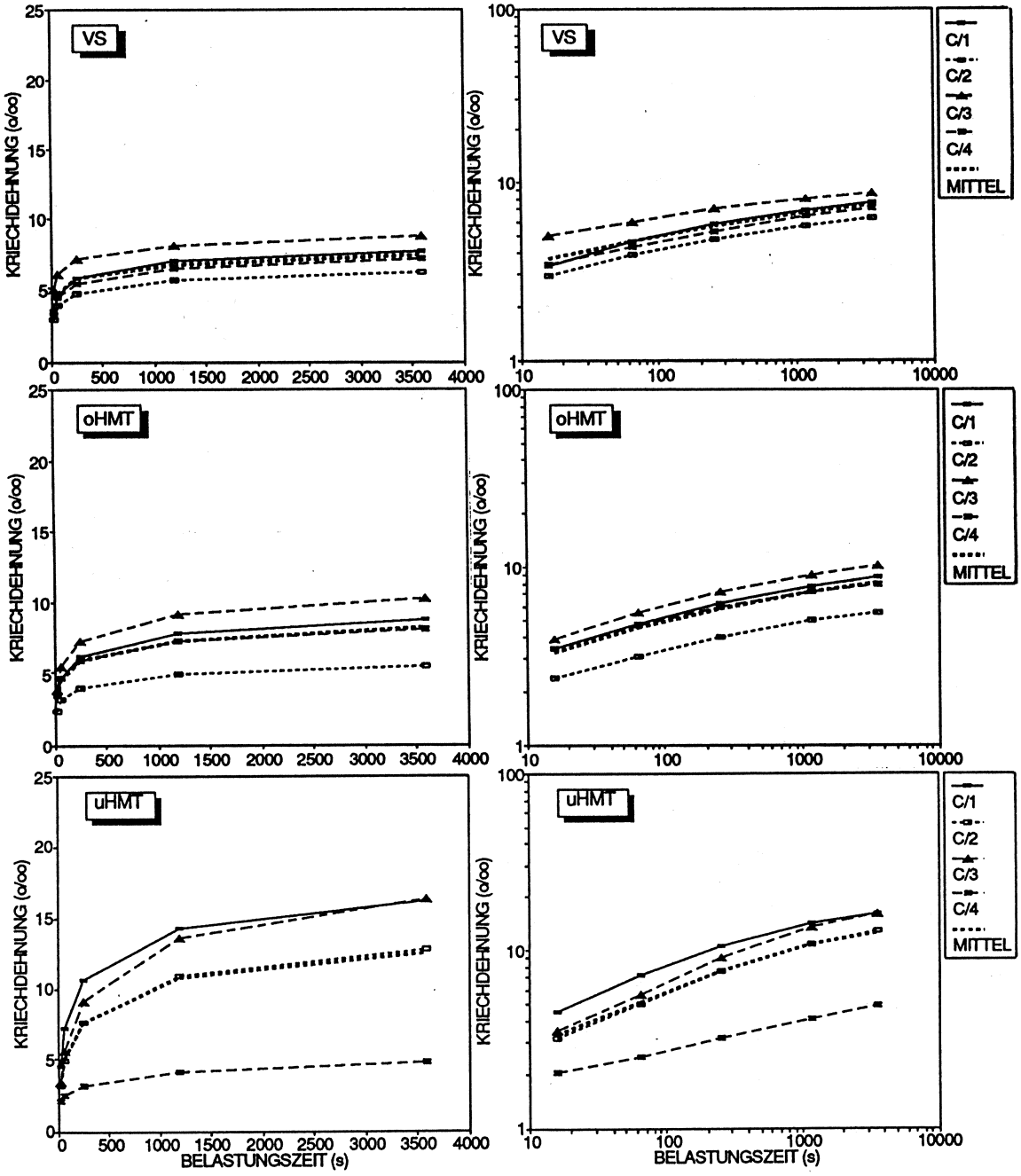


Abbildung 5.18: Kriechdehnungen ε_{kr} (°/oo) bei 40°C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2 , ermittelt an Bohrkernen *ausserhalb der Radspuren von Autobahnteilstrecke C*; Verschleissschicht (VS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT); links linear, rechts doppeltlogarithmisch dargestellt

5.4 Autobahnteilstrecke D

Es handelt sich um einen dreischichtigen Belagsaufbau gemäss *Tabelle 5.4*, mit einer aus den Querprofilen der vier entnommenen Belagsausschnitte bestimmten mittleren Belagsdicke von 171 mm.

Chronologie: 1967 Verkehrsübergabe, tägl. äquivalente Verkehrslast TF rund 1200
1978 Entnahme der vier Belagsausschnitte, TF rund 2200
1989 Beanspruchung etwa 10 Jahre nach Entnahme: TF rund 3300

Zustand bei Entnahme der Belagsausschnitte:

Festzustellen ist eine starke Spurrinnenbildung (*Abbildung 5.19*). Grösste Deformationen treten unter den Radspuren an der Oberfläche der Verschleissschicht auf (*Abbildung 5.20*). Bezogen auf das Maximum dieser Deformationen (maximaler Mittelwert aus vier Belagsausschnitten) entfallen auf die einzelnen Schichten: VS=49%, AS=18%, HMT=33%.

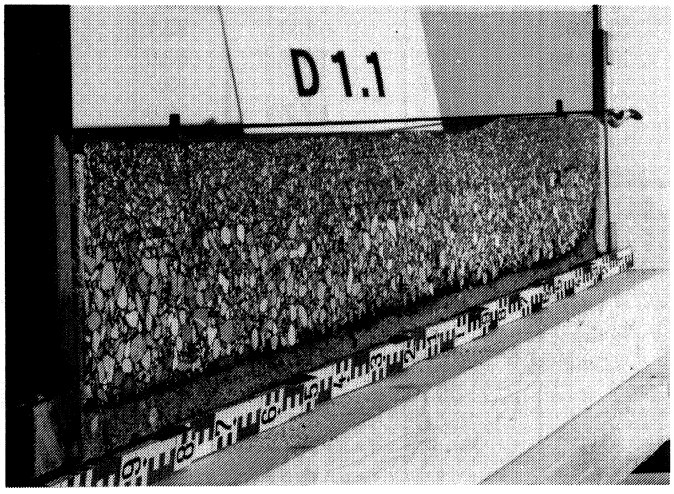


Abbildung 5.19: Typische Schnittfläche eines Belagsausschnittstücks der Autobahnteilstrecke D, EMPA-Foto Nr. 81'142/37

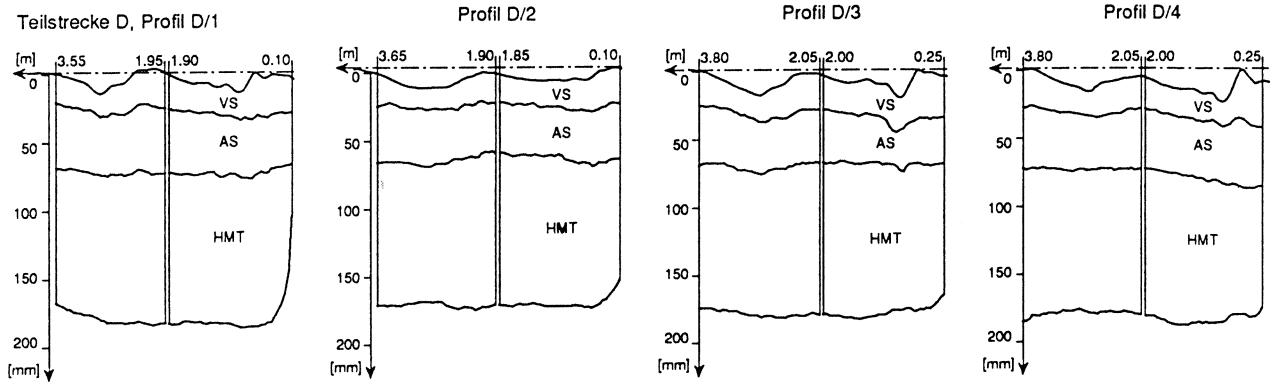
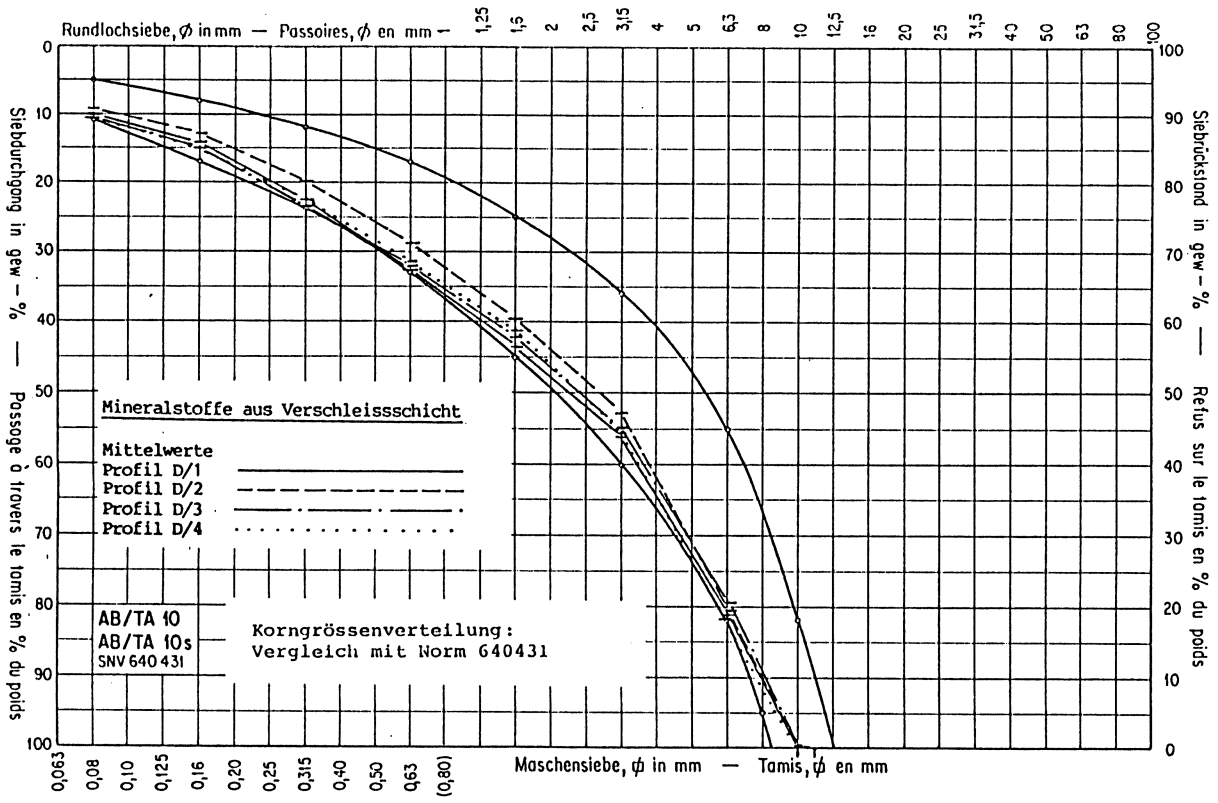


Abbildung 5.20: Schichtverlauf der Belagsausschnittstücke von Autobahnteilstrecke D

VS: Verschleissschicht
AS: Ausgleichsschicht
oHMT, uHMT: obere, untere HMT

	AUTOBAHNTEILSTRECKE : D (Mittelwerte für 4 Profile)					
	SCHICHT		VS	AS	oHMT	uHMT
MATERIAL	Mischgutsorte		AB10	AB16u	HMT A/B32	-
	Bindemittelsorte (Einbau)		B180/220	B180/220	TB200/500	-
	Trinidad Pulver 50/50	(M-o/o)	-	-	-	-
	Trinidad Epuré	(M-o/o)	-	-	-	-
BLEIB. DEFORMATION IM QUERPROFIL	Max. Einzelwert	(mm)	24.0	15.0	9.0	-
	Max. Mittelwert	(mm)	18.0	9.2	6.0	-
	Max. Anteil d. Schicht	(mm)	8.8	3.2	6.0	-
	Max. Anteil am Gesamtmax.	(o/o)	48.9	17.8	33.3	-
EINGEBAUTE BELAGSSCHICHT	Schichtdicke	(mm)	23	41	107	-
	Rohdichte	(t/m3)	2.393	2.360	2.441	-
	Dichte	(t/m3)	2.441	2.476	2.524	-
	Hohlraumgehalt	(V-o/o)	2.0	4.7	3.3	-
	Verdichtungsgrad	(o/o)	99.8	99.6	101.8	-
	Hohlraumfüllungsgrad	(o/o)	87.5	71.3	72.5	-
MINERALSTOFFE (SIEBDURCHGANG)	40 mm	(M-o/o)	-	-	-	-
	32 mm	(M-o/o)	-	-	100.0	-
	25 mm	(M-o/o)	-	100.0	93.1	-
	16 mm	(M-o/o)	100.0	99.3	69.0	-
	10 mm	(M-o/o)	99.9	79.7	49.7	-
	6.3 mm	(M-o/o)	80.7	57.7	38.6	-
	3.15 mm	(M-o/o)	55.1	41.5	26.7	-
	0.08 mm	(M-o/o)	10.1	8.5	4.9	-
ZURUECK-GEWONNENES LOESLICHES BINDEMITTEL	Dichte aschefrei	(t/m3)	1.023	1.027	1.051	-
	Aschegehalt	(M-o/o)	1.61	0.76	0.52	-
	Bindemittelanteil	(M-o/o)	5.67	4.92	3.69	-
	Penetration bei 15oC	(.1mm)	28	23	24	-
	" bei 25oC	(.1mm)	75	67	59	-
	" bei 35oC	(.1mm)	180	171	143	-
	Erweichung RuK	(oC)	50.7	51.0	52.5	-
	Penetrationsindex PI		0.0	-0.2	-0.2	-
	Brechpunkt nach Fraass	(oC)	-17	-14	-16	-
	Dyn. Viskosität bei 60oC	(100Pas)	3.2	2.4	3.9	-
	" bei 70oC	(100Pas)	-	-	-	-
	" bei 80oC	(100Pas)	-	-	-	-
	" bei 130oC	(.1Pas)	6.4	5.9	5.5	-
MARSHALL-PRUEFUNG	Hohlraumgehalt: HM	(V-o/o)	1.8	4.3	5.0	-
	Hohlraumfüllungsgrad	(o/o)	88.3	72.6	62.8	-
	Stabilität: SM	(kN)	9.6	8.5	6.2	-
	Fliessen: FM	(mm)	3.4	2.8	2.5	-
	SM/FM	(kN/mm)	2.8	3.0	2.5	-
IRREVERSIBLES KRIECHEN, 40oC	a	(o/oo,s)	5.46	2.62	2.68	-
	q	(o/oo,s)	0.061	0.032	0.101	-
	W: Ges. äquiv. Verkehrslast	(Millionen)	6.8	6.8	6.8	-
(Bohrkerne ausserhalb	Kir = a (0.01 x W)^q	(o/oo)	10.76	3.74	8.24	-
Radspuren entnommen)	eir = a t ^q, t=3600s	(o/oo)	9.00	3.40	6.13	-

Tabelle 5.4: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse von Autobahnteilstrecke D. Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), Heissmischtragschicht (HMT) = obere Heissmischtragschicht (oHMT)



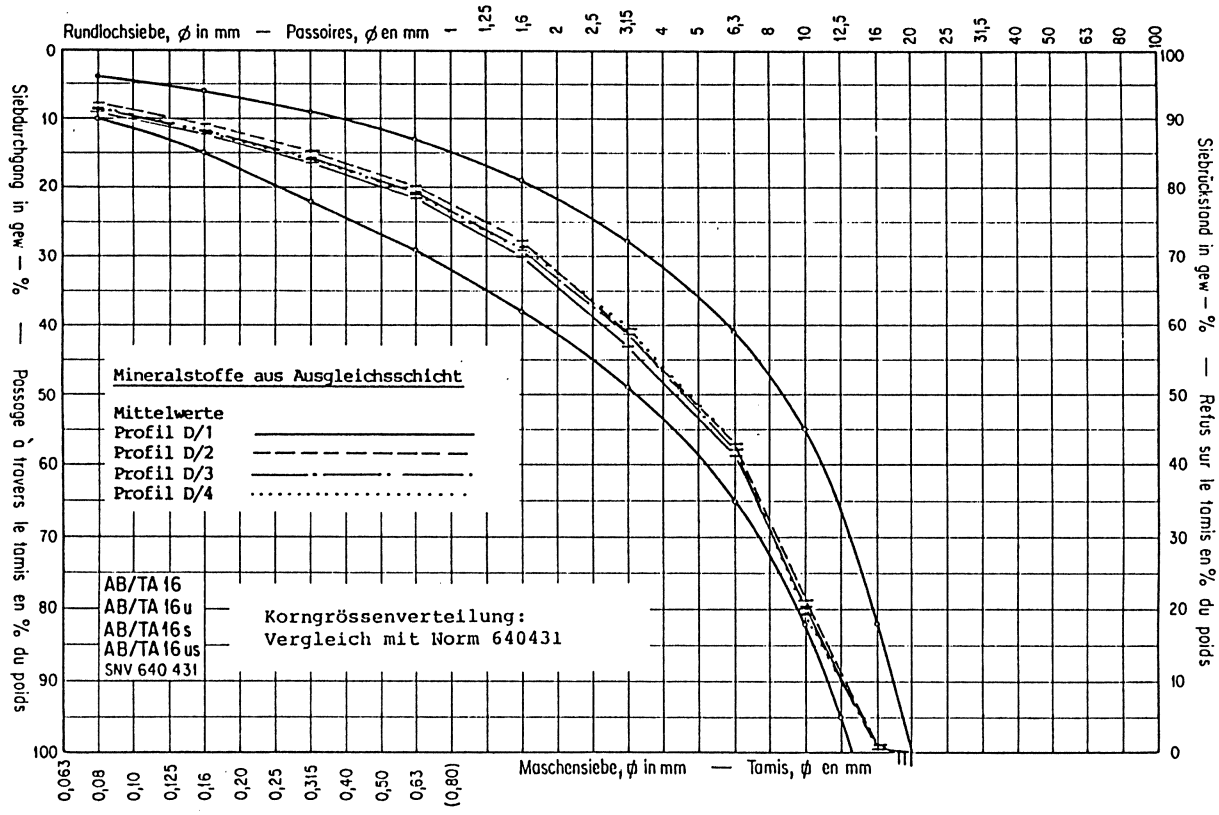


Abbildung 5.21: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke D; *oben:* Verschleissschicht AB 10, *unten:* Ausgleichsschicht AB 16u

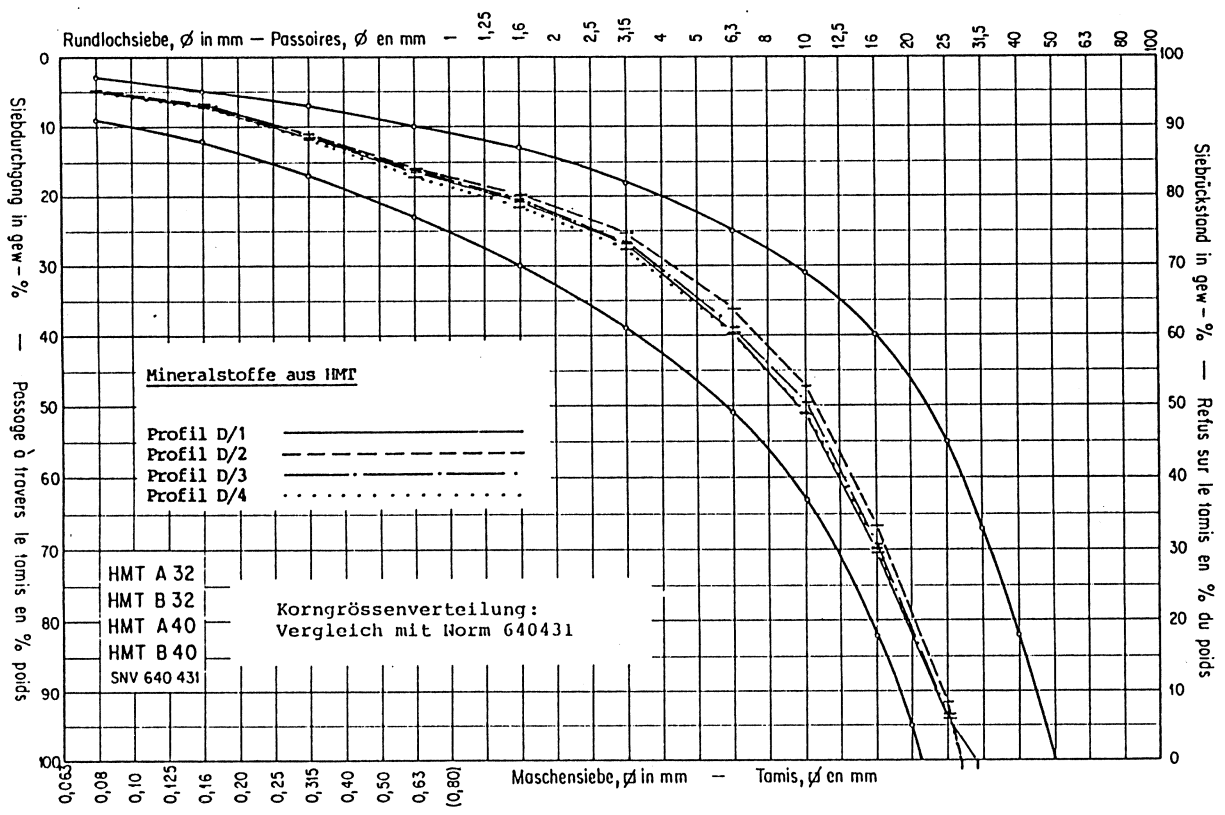


Abbildung 5.22: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke D; Heissmischtragschicht HMT A/B 32

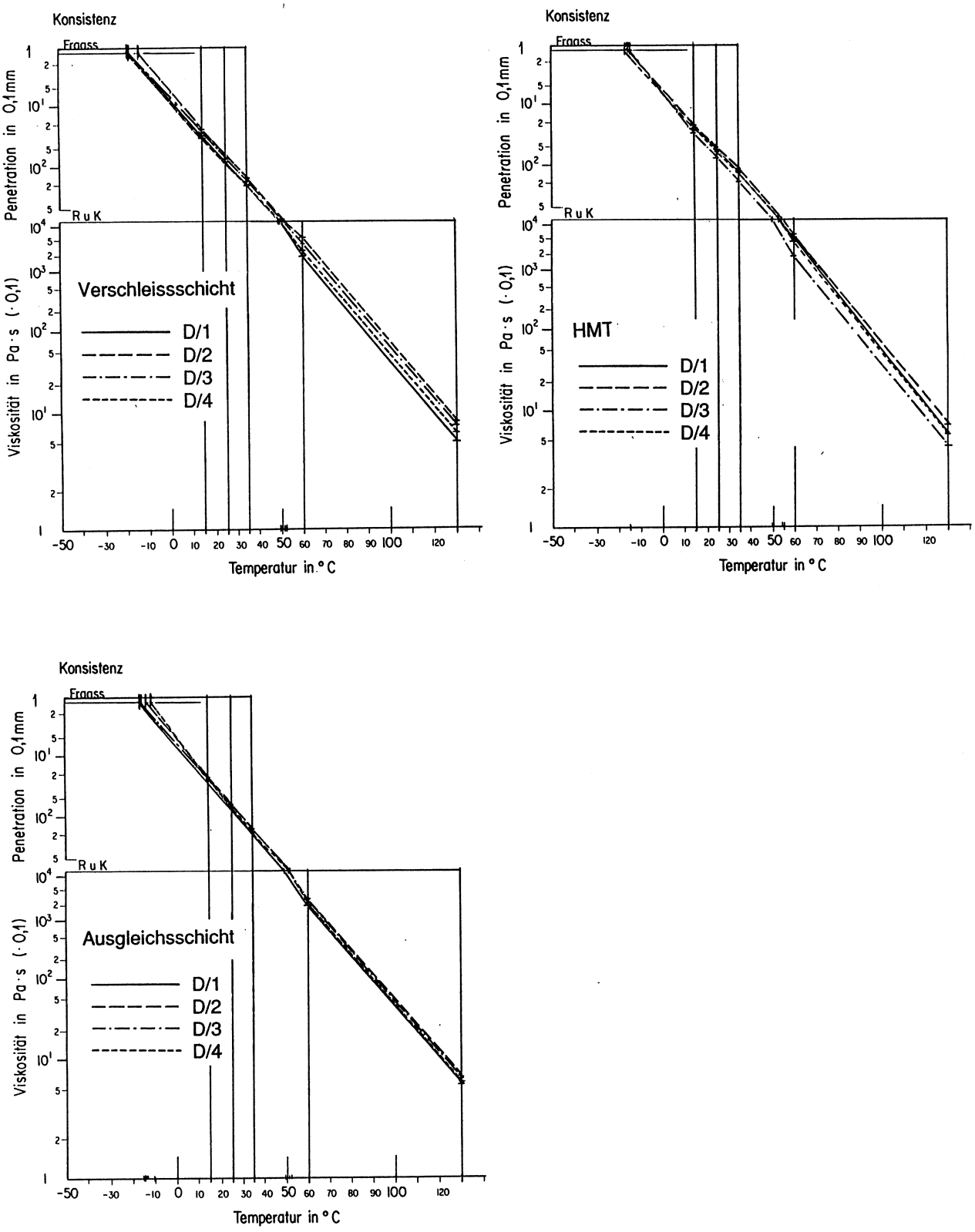


Abbildung 5.23: Konsistenz/Temperatur-Diagramme von Autobahnteilstrecke D

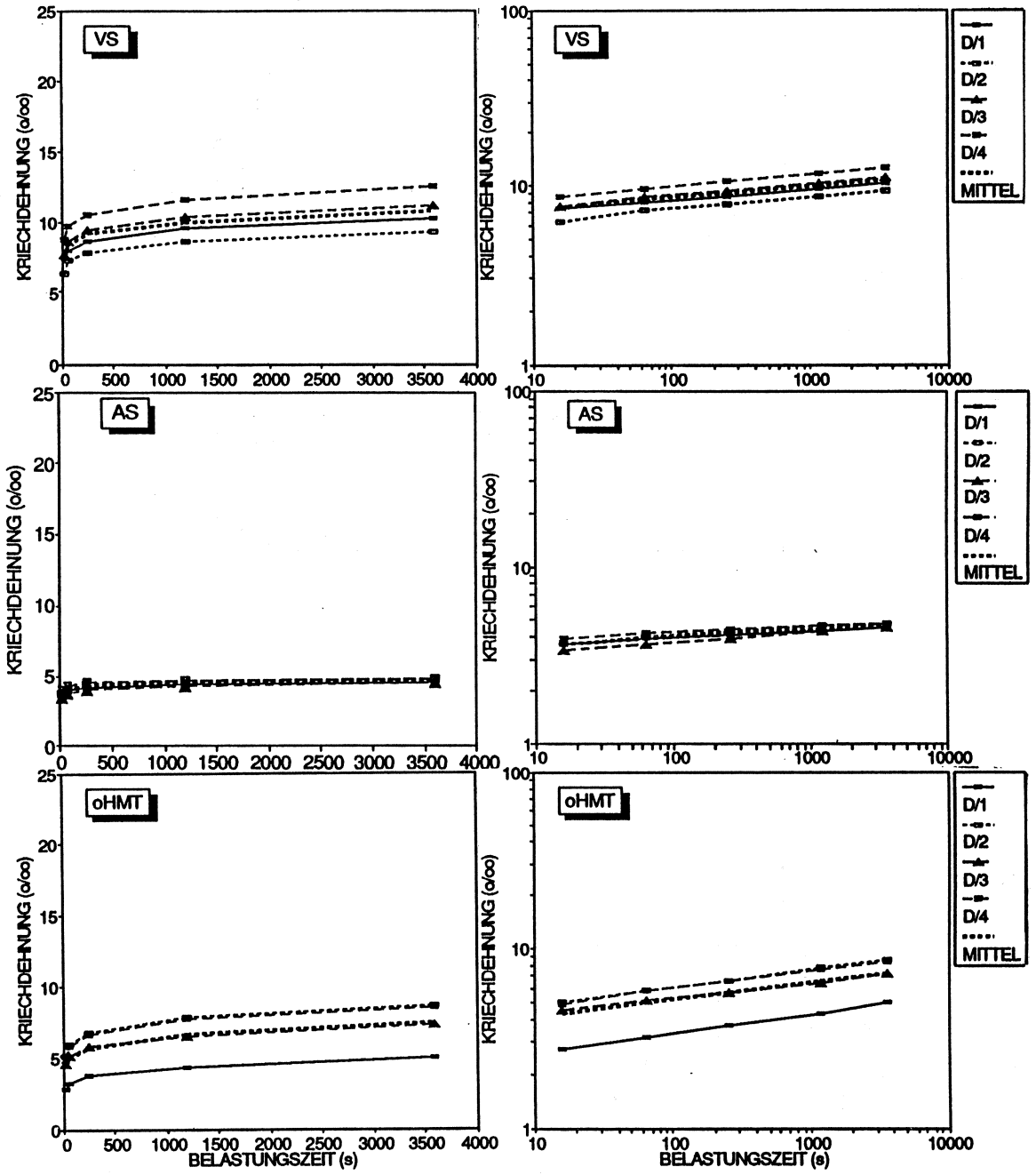


Abbildung 5.24: Kriechdehnungen ε_{kr} (°/oo) bei 40°C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2 , ermittelt an Bohrkernen *ausserhalb der Radspuren von Autobahnteilstrecke D*; Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), Heissmischtragschicht (HMT) = obere Heissmischtragschicht (oHMT); links linear, rechts doppeltlogarithmisch dargestellt

5.5 Autobahnteilstrecke E

Es handelt sich um einen vierschichtigen Belagsaufbau gemäss *Tabelle 5.5*, mit einer aus den Querprofilen der vier entnommenen Belagsausschnitte bestimmten mittleren Belagsdicke von 195 mm.

Chronologie: 1970 Verkehrsübergabe, tägl. äquivalente Verkehrslast TF rund 1200
1978 Entnahme der vier Belagsausschnitte, TF rund 1600
1989 Beanspruchung etwa 10 Jahre nach Entnahme: TF rund 2400

Zustand bei Entnahme der Belagsausschnitte:

Festzustellen ist eine starke Spurrinnenbildung (*Abbildung 5.25*). Grösste Deformationen treten unter den Radspuren an der Oberfläche der Verschleissschicht auf (*Abbildung 5.26*). Bezogen auf das Maximum dieser Deformationen (maximaler Mittelwert aus vier Belagsausschnitten) entfallen auf die einzelnen Schichten: VS=50%, AS=30%, oHMT=20%, uHMT=0%.

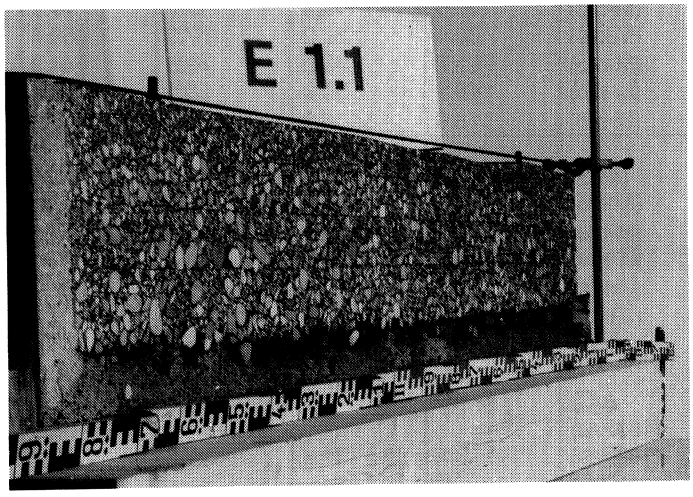


Abbildung 5.25: Typische Schnittfläche eines Belagsausschnittstücks der Autobahnteilstrecke E, EMPA-Foto Nr. 81'137/32

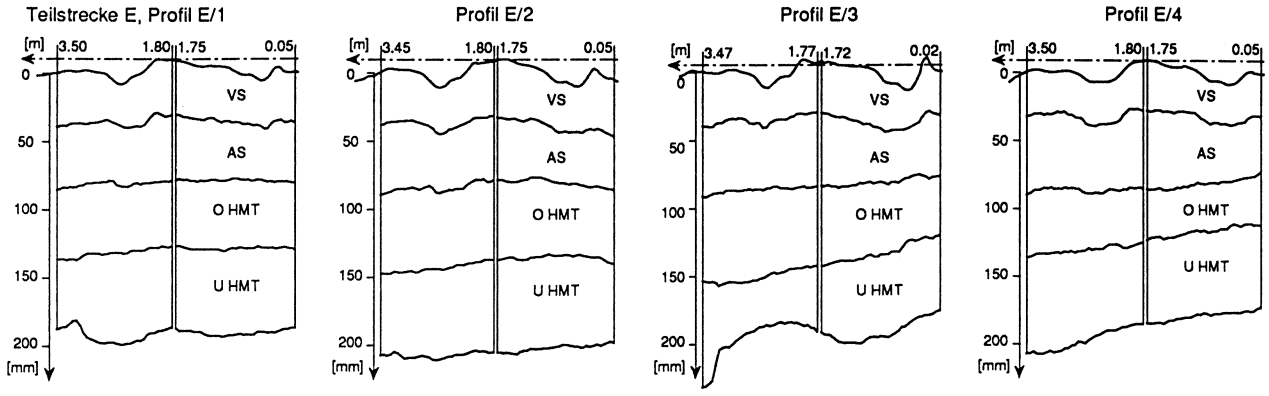


Abbildung 5.26: Schichtverlauf der Belagsausschnittstücke von Autobahnteilstrecke E

VS: Verschleissschicht
AS: Ausgleichsschicht
oHMT, uHMT: obere, untere HMT

AUTOBAHNTEILSTRECKE :	E	(Mittelwerte für 4 Profile)			
	SCHICHT	VS	AS	oHMT	uHMT
MATERIAL	Mischgutsorte	TA16	TA25u	HMT B32	HMT B32
	Bindemittelsorte (Einbau)	TB2000	TB2000	TB2000	TB2000
	Trinidad Pulver 50/50 (M-o/o)	-	-	-	-
	Trinidad Epuré (M-o/o)	-	-	-	-
BLEIB. DEFORMATION IM QUERPROFIL	Max. Einzelwert (mm)	24.0	14.0	6.0	0.0
	Max. Mittelwert (mm)	19.5	9.8	4.0	0.0
	Max. Anteil d. Schicht (mm)	9.7	5.8	4.0	0.0
	Max. Anteil am Gesamtmax. (o/o)	49.7	29.7	20.5	0.0
EINGEBAUTE BELAGSSCHICHT	Schichtdicke (mm)	36	47	51	61
	Rohdichte (t/m3)	2.366	2.390	2.379	2.380
	Dichte (t/m3)	2.449	2.489	2.509	2.511
	Hohlraumgehalt (V-o/o)	3.4	4.0	5.2	5.2
	Verdichtungsgrad (o/o)	98.8	100.1	100.0	99.7
	Hohlraumfüllungsgrad (o/o)	79.1	73.2	64.1	64.8
MINERALSTOFFE (SIEBDURCHGANG)	40 mm (M-o/o)	-	-	-	-
	32 mm (M-o/o)	-	100.0	99.3	99.1
	25 mm (M-o/o)	100.0	99.2	92.7	94.1
	16 mm (M-o/o)	99.5	79.8	77.3	77.1
	10 mm (M-o/o)	80.4	60.2	57.9	59.4
	6.3 mm (M-o/o)	63.7	46.0	43.5	44.3
	3.15 mm (M-o/o)	46.5	31.8	30.6	31.4
	0.08 mm (M-o/o)	8.6	6.3	5.6	5.5
ZURUECK-GEWONNENES LOESLICHES BINDEMITTEL	Dichte aschefrei (t/m3)	1.046	1.048	1.054	1.055
	Aschegehalt (M-o/o)	0.90	0.58	0.84	0.74
	Bindemittelanteil (M-o/o)	5.71	4.74	4.01	4.15
	Penetration bei 15oC (.1mm)	14	15	12	13
	" bei 25oC (.1mm)	29	32	25	25
	" bei 35oC (.1mm)	58	67	51	51
	Erweichung RuK (oC)	65.7	62.3	65.9	66.6
	Penetrationsindex PI	0.9	0.5	0.6	0.7
	Brechpunkt nach Fraass (oC)	-12	-13	-10	-7
	Dyn. Viskosität bei 60oC (100Pas)	-	-	-	-
	" bei 70oC (100Pas)	8.2	4.8	7.2	9.7
	" bei 80oC (100Pas)	-	-	-	-
	" bei 130oC (.1Pas)	15.1	11.7	16.0	16.2
MARSHALL-PRUEFUNG	Hohlraumgehalt: HM (V-o/o)	2.2	4.0	5.2	5.0
	Hohlraumfüllungsgrad (o/o)	85.3	72.7	63.6	65.5
	Stabilität: SM (kN)	13.5	11.3	11.4	12.2
	Fliessen: FM (mm)	3.7	3.3	2.9	2.7
	SM/FM (kN/mm)	3.6	3.4	3.4	4.5
IRREVERSIBLES KRIECHEN, 40oC	a (o/oo,s)	3.52	3.37	2.41	2.22
	q (o/oo,s)	0.070	0.079	0.085	0.063
	W: Ges. äquiv. Verkehrslast (Millionen)	4.2	4.2	4.2	4.2
(Bohrkerne ausserhalb	Kir = a (0.01 x W)^q (o/oo)	7.42	7.82	5.96	4.34
Radspuren entnommen)	eir = a t ^q, t=3600s (o/oo)	6.24	6.44	4.83	3.72

Tabelle 5.5: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse von Autobahnteilstrecke E. Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT)

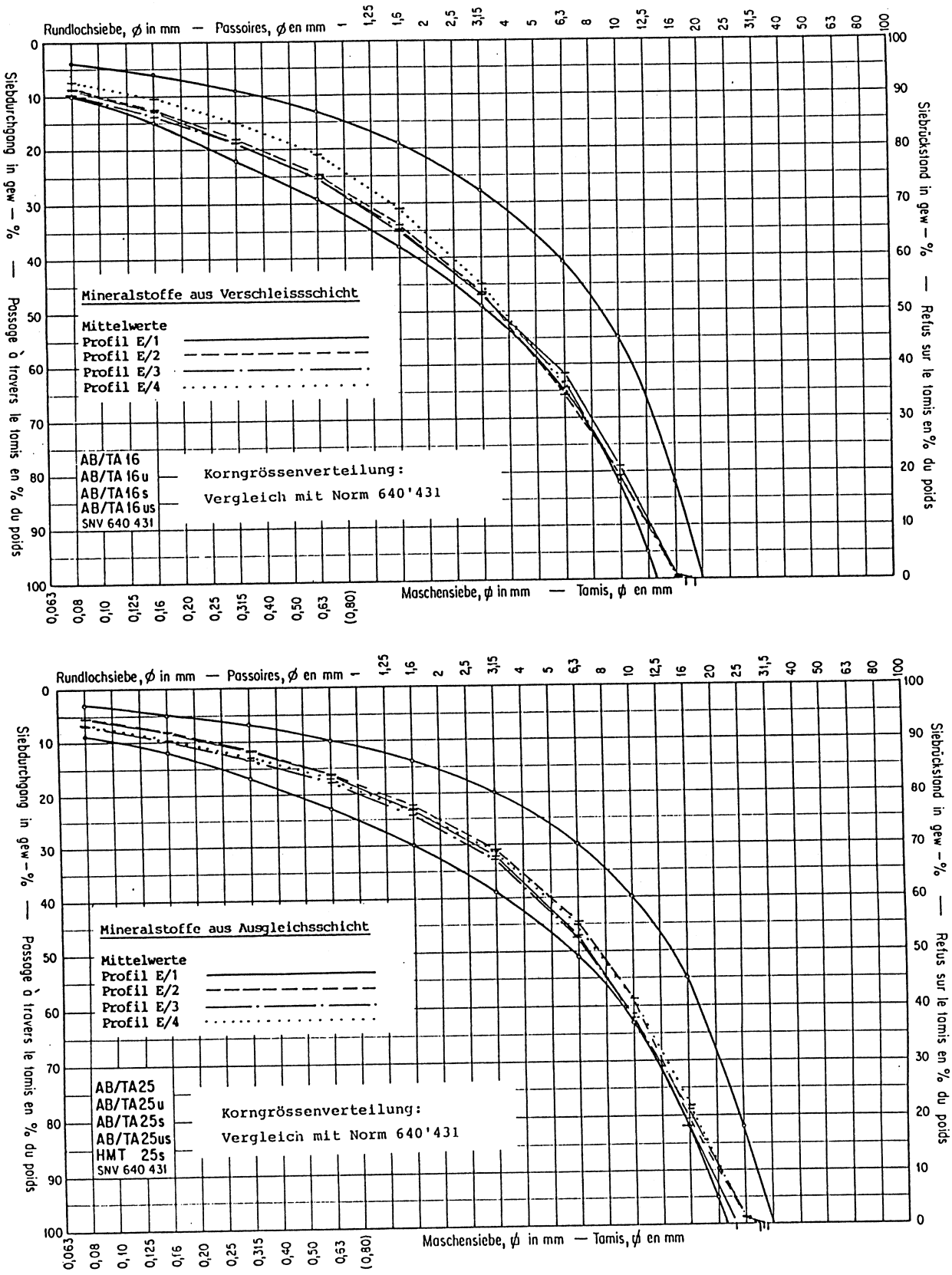
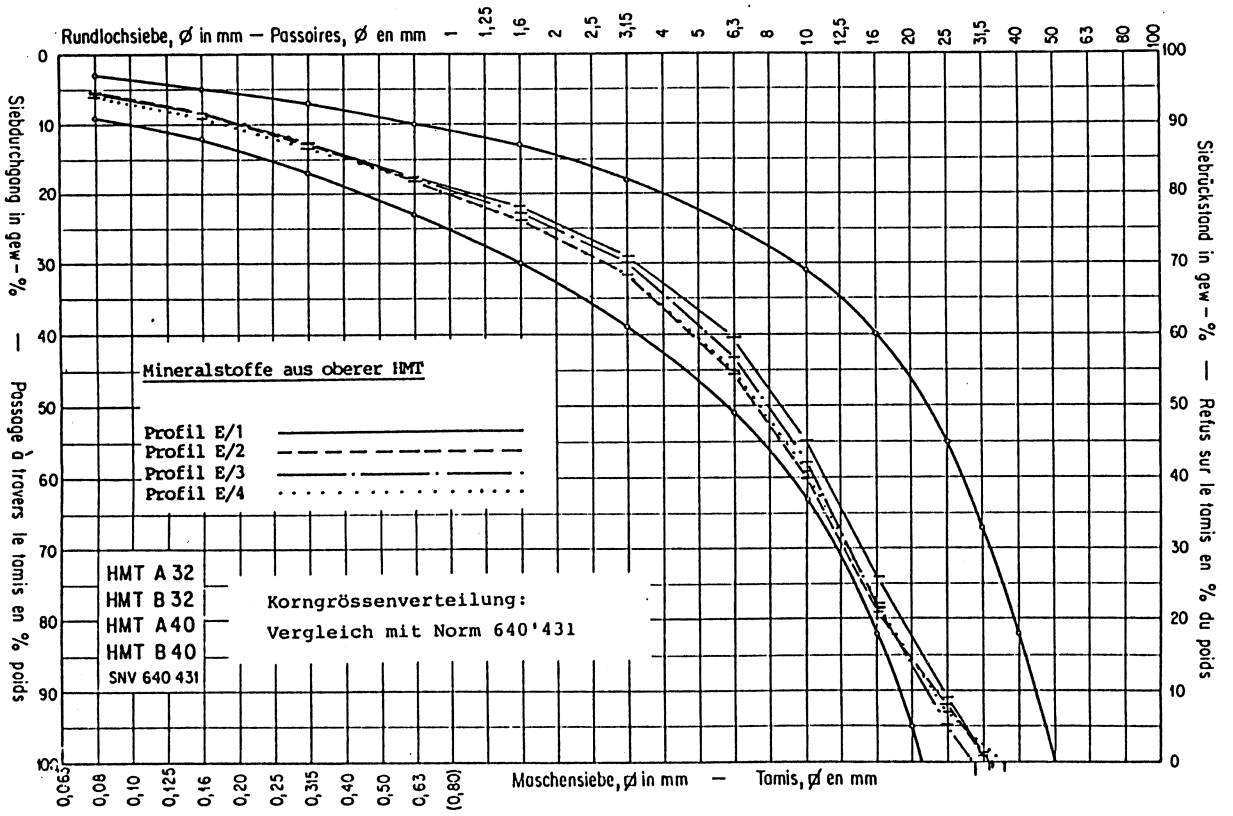


Abbildung 5.27: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke E; *oben:* Verschleissschicht TA 16, *unten:* Ausgleichsschicht TA 25u



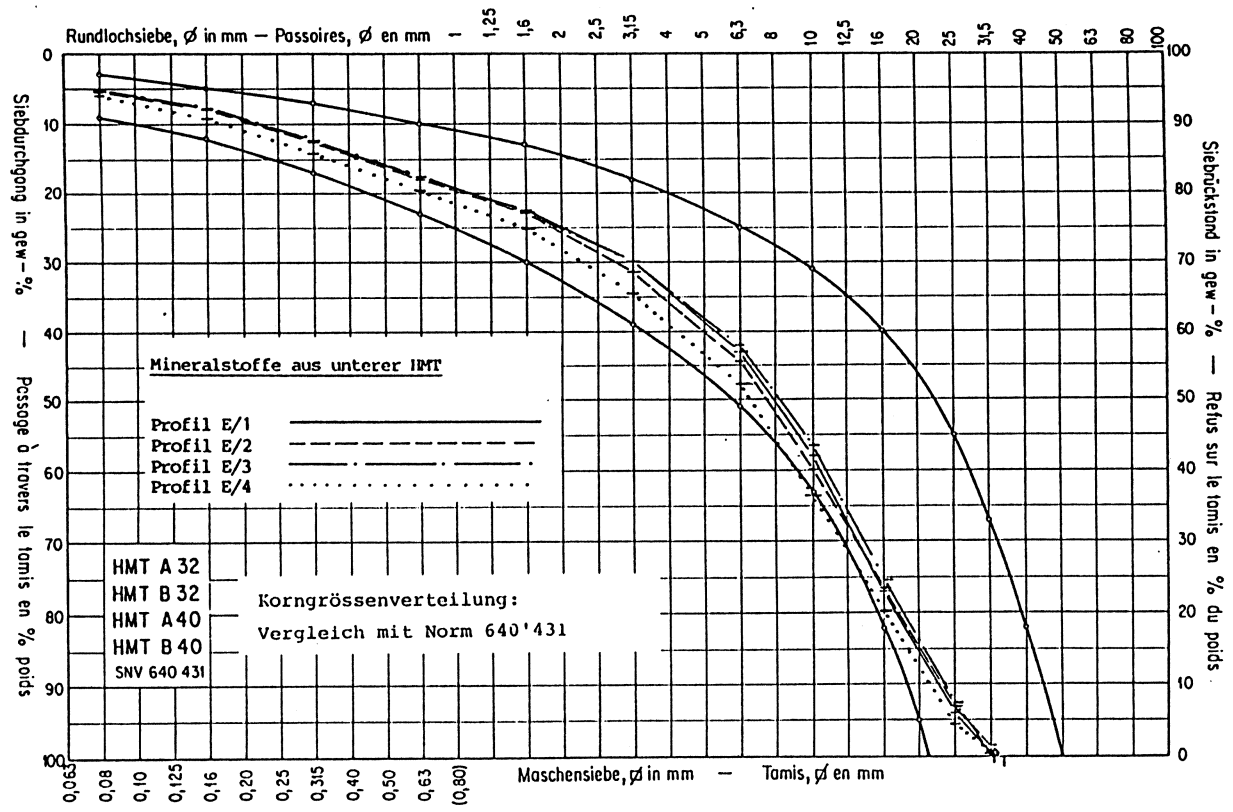


Abbildung 5.28: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke E; *oben:* obere Heissmischtragschicht HMT B32, *unten:* untere Heissmischtragschicht HMT B32

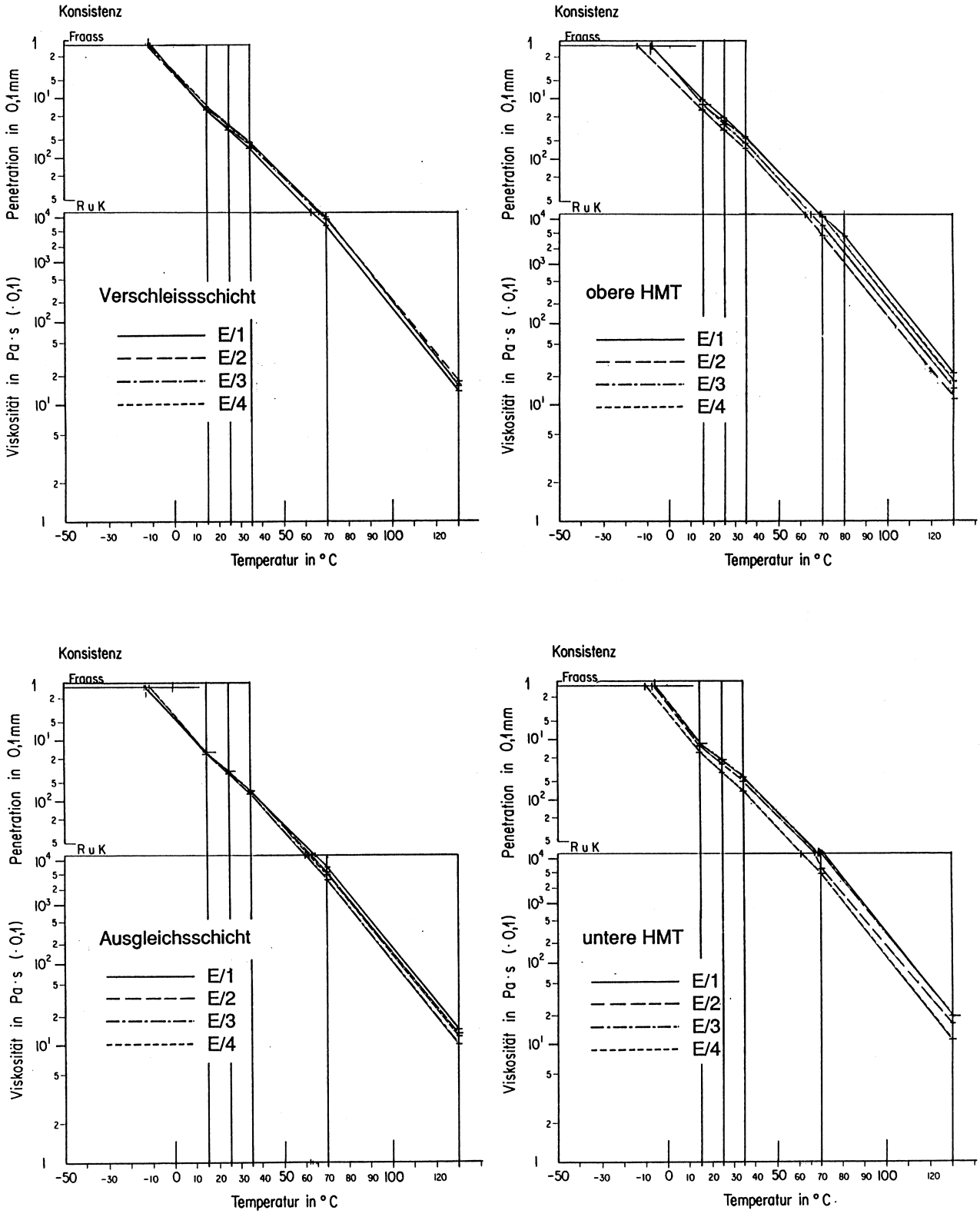


Abbildung 5.29: Konsistenz/Temperatur-Diagramme von Autobahnteilstrecke E

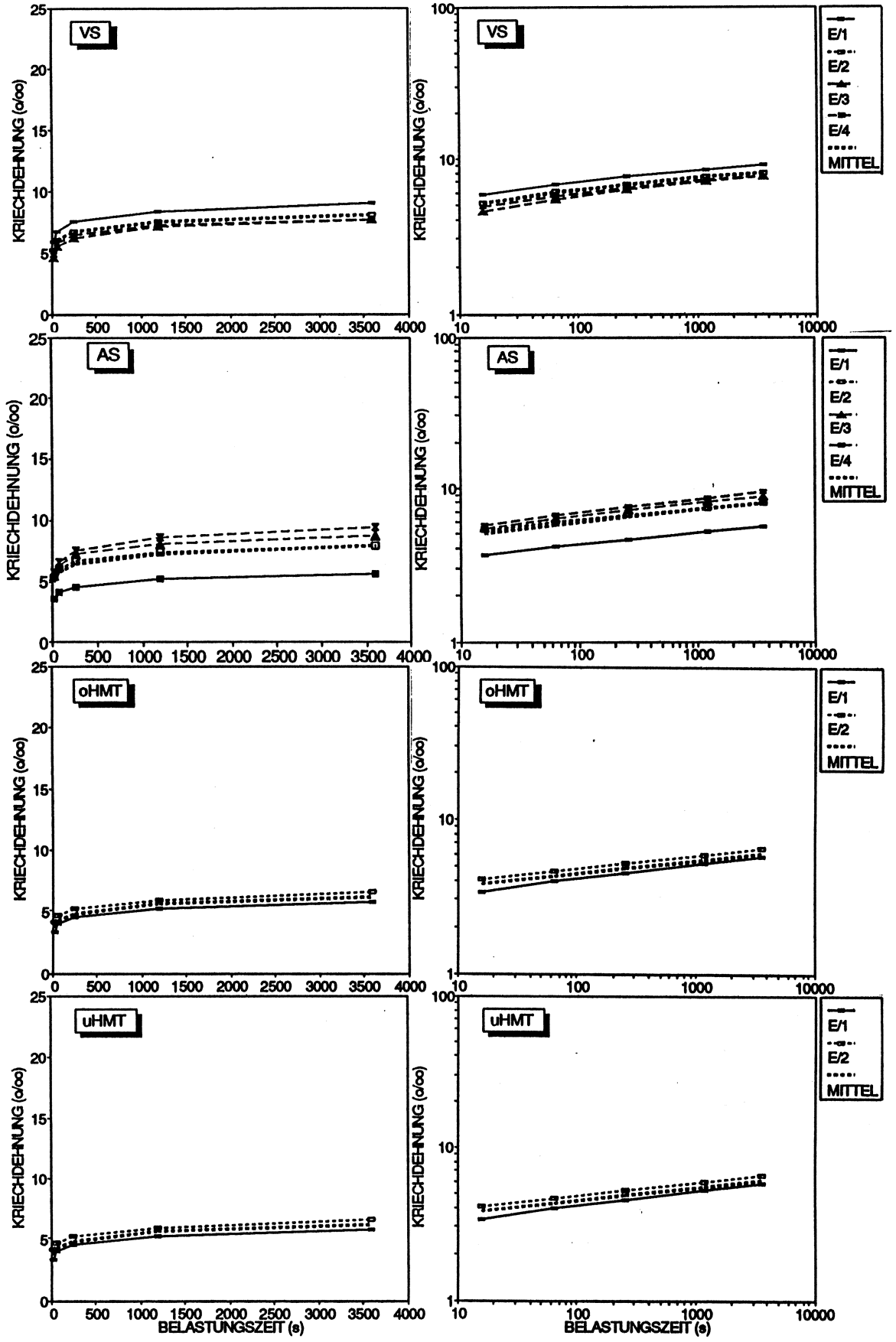


Abbildung 5.30: Kriechdehnungen ε_{kr} (°/oo) bei 40°C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2 , ermittelt an Bohrkernen *ausserhalb der Radspuren von Autobahnteilstrecke E*; Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT); links linear, rechts doppeltlogarithmisch dargestellt

5.6 Autobahnteilstrecke F

Es handelt sich um einen dreischichtigen Belagsaufbau gemäss *Tabelle 5.6*, ähnlich wie Teilstrecke C, mit einer aus den Querprofilen der vier entnommenen Belagsausschnitte bestimmten mittleren Belagsdicke von 245 mm.

Chronologie: 1975 Verkehrsübergabe, tägl. äquivalente Verkehrslast TF rund 2900
1978 Entnahme der vier Belagsausschnitte, TF rund 3400
1989 Beanspruchung etwa 10 Jahre nach Entnahme: TF rund 5300

Zustand bei Entnahme der Belagsausschnitte:

Festzustellen ist eine eher schwache Spurrinnenbildung (*Abbildung 5.31*), die ausschliesslich auf Abrieb der Verschleissschicht zurückzuführen ist. Dies geht insbesondere auch aus dem Schichtverlauf hervor (*Abbildung 5.32*).

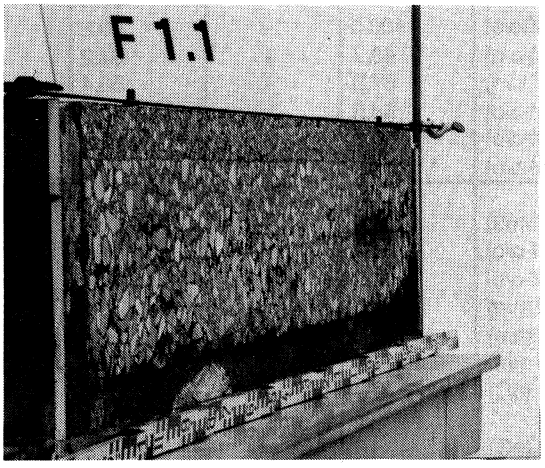


Abbildung 5.31:
Typische Schnittfläche eines Belagsausschnittstücks der Autobahnteilstrecke F, EMPA-Foto Nr. 81'522

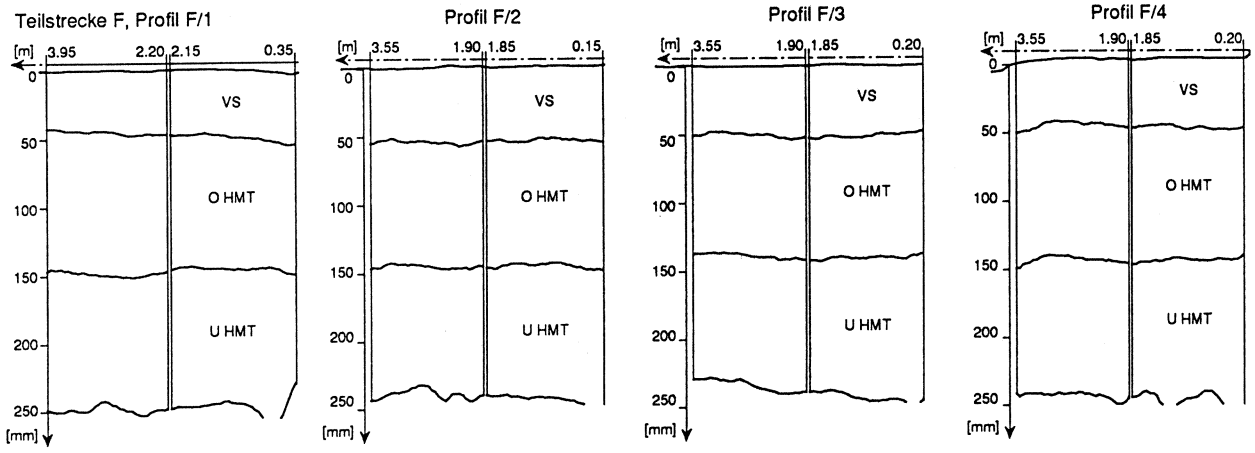


Abbildung 5.32: Schichtverlauf der Belagsausschnittstücke von Autobahnteilstrecke F

VS: Verschleissschicht
AS: Ausgleichsschicht
oHMT, uHMT: obere, untere HMT

AUTOBAHNTEILSTRECKE :	F	(Mittelwerte für 4 Profile)			
	SCHICHT		VS	AS	oHMT	uHMT
MATERIAL	Mischgutsorte		AB16s	-	HMT40s	HMT40s
	Bindemittelsorte (Einbau)		B40/50	-	B40/50	B40/50
	Trinidad Pulver 50/50	(M-o/o)	-	-	-	-
	Trinidad Epuré	(M-o/o)	-	-	-	-
BLEIB. DEFORMATION IM QUERPROFIL	Max. Einzelwert	(mm)	2.0	-	0.0	0.0
	Max. Mittelwert	(mm)	1.9	-	0.0	0.0
	Max. Anteil d. Schicht	(mm)	1.9	-	0.0	0.0
	Max. Anteil am Gesamtmax.	(o/o)	100.0	-	0.0	0.0
EINGEBAUTE BELAGSSCHICHT	Schichtdicke	(mm)	50	-	95	100
	Rohdichte	(t/m3)	2.296	-	2.414	2.385
	Dichte	(t/m3)	2.476	-	2.509	2.527
	Hohlraumgehalt	(V-o/o)	7.3	-	3.8	5.6
	Verdichtungsgrad	(o/o)	96.8	-	101.1	99.8
	Hohlraumfüllungsgrad	(o/o)	60.3	-	71.2	60.4
MINERALSTOFFE (SIEBDURCHGANG)	40 mm	(M-o/o)	-	-	98.5	99.7
	32 mm	(M-o/o)	-	-	90.3	87.7
	25 mm	(M-o/o)	100.0	-	80.2	74.7
	16 mm	(M-o/o)	98.7	-	64.2	56.1
	10 mm	(M-o/o)	67.3	-	50.4	43.1
	6.3 mm	(M-o/o)	54.5	-	42.7	38.7
	3.15 mm	(M-o/o)	42.0	-	34.4	30.9
	0.08 mm	(M-o/o)	8.3	-	7.2	6.5
ZURUECK-GEWONNENES LOESLICHES BINDEMITTEL	Dichte aschefrei	(t/m3)	1.036	-	1.030	1.032
	Aschegehalt	(M-o/o)	0.53	-	0.60	0.50
	Bindemittelanteil	(M-o/o)	4.95	-	4.00	3.60
	Penetration bei 15oC	(.1mm)	11	-	14	13
	" bei 25oC	(.1mm)	19	-	25	24
	" bei 35oC	(.1mm)	36	-	46	44
	Erweichung RuK	(oC)	79.3	-	74.1	73.9
	Penetrationsindex PI		2.0	-	1.9	1.7
	Brechpunkt nach Fraass	(oC)	-8	-	-12	-11
	Dyn. Viskosität bei 60oC	(100Pas)	-	-	-	-
	" bei 70oC	(100Pas)	-	-	-	-
	" bei 80oC	(100Pas)	15.4	-	9.0	9.3
	" bei 130oC	(.1Pas)	66.4	-	41.8	42.7
MARSHALL-PRUEFUNG	Hohlraumgehalt: HM	(V-o/o)	4.3	-	4.8	5.4
	Hohlraumfüllungsgrad	(o/o)	72.6	-	65.8	60.6
	Stabilität: SM	(kN)	19.7	-	-	-
	Fliessen: FM	(mm)	3.9	-	-	-
	SM/FM	(kN/mm)	5.1	-	-	-
IRREVERSIBLES KRIECHEN, 40oC	a	(o/oo,s)	1.74	-	0.94	0.93
	q	(o/oo,s)	0.062	-	0.095	0.098
	W: Ges. äquiv. Verkehrslast	(Millionen)	3.5	-	3.5	3.5
(Bohrkerne ausserhalb	Kir = a (0.01 x W)^q	(o/oo)	3.33	-	2.54	2.59
Radspuren entnommen)	eir = a t ^q, t=3600s	(o/oo)	2.89	-	2.05	2.07

Tabelle 5.6: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse von Autobahnteilstrecke F. Verschleissschicht (VS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT)

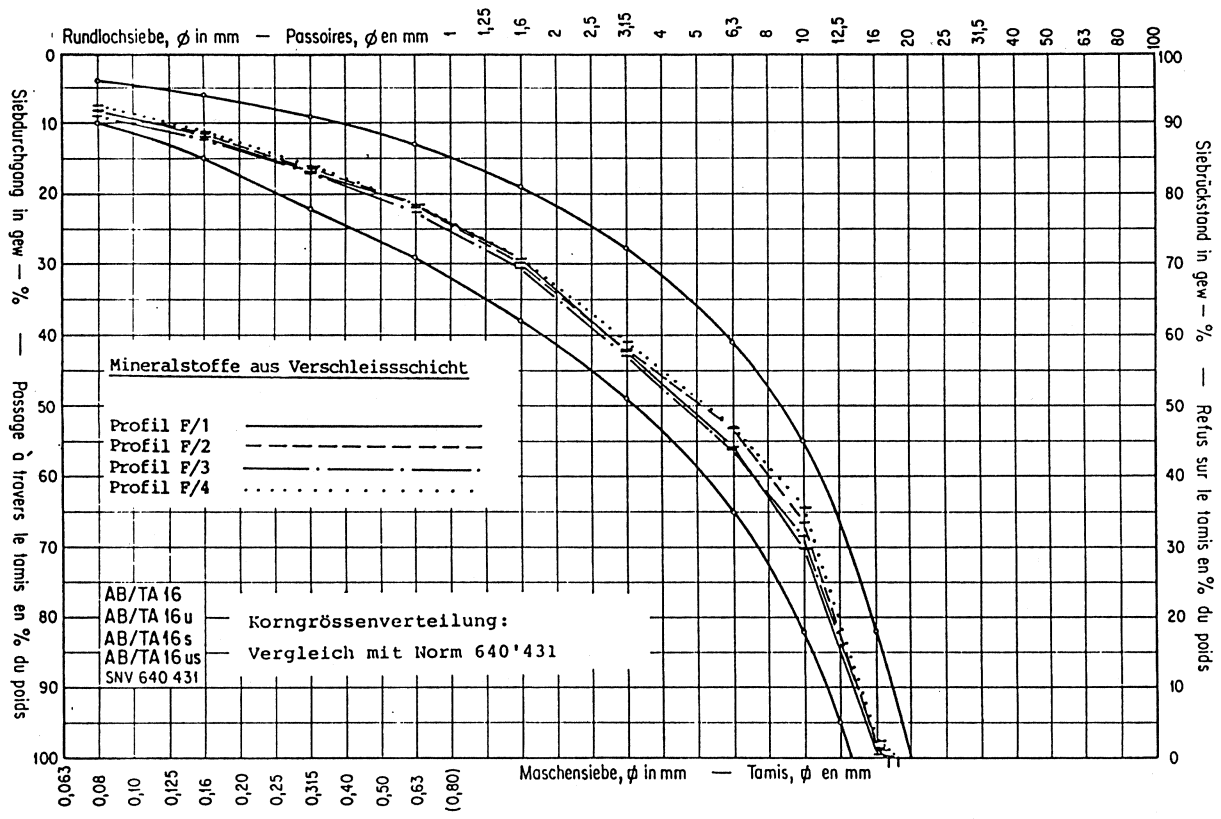
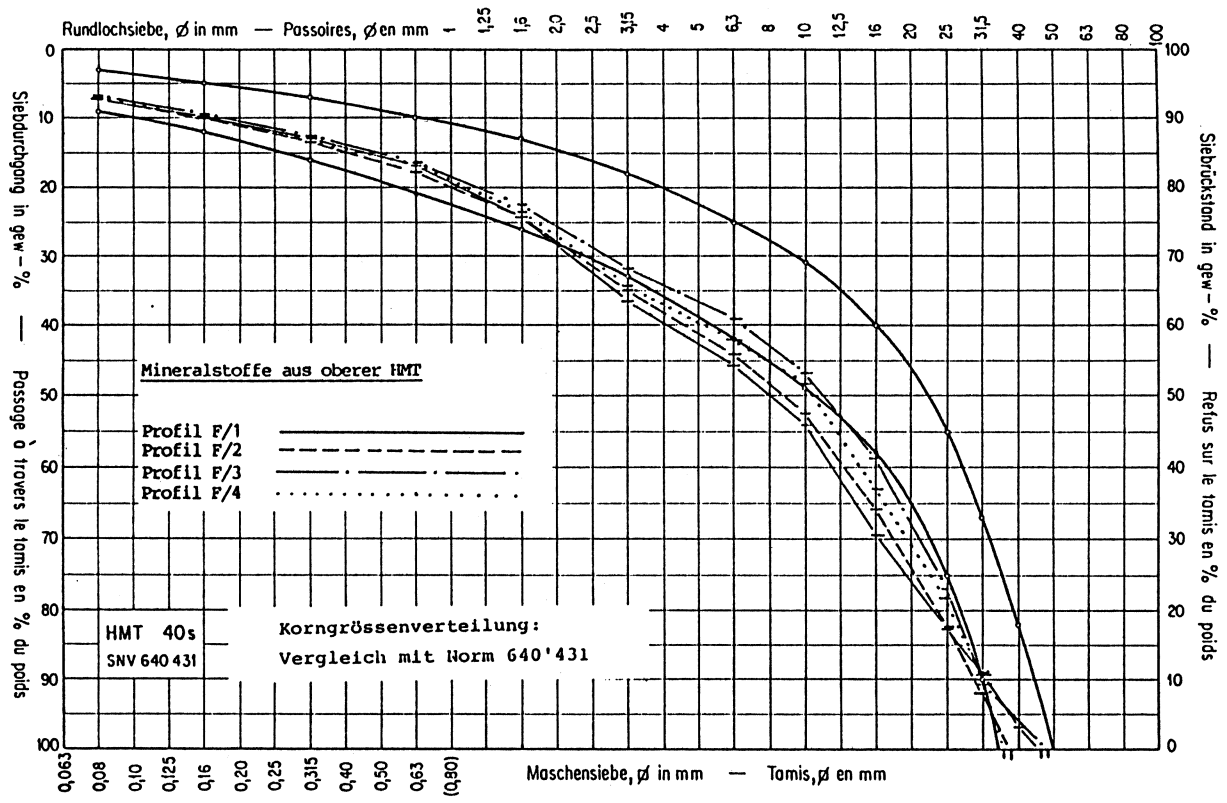


Abbildung 5.32: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke F; Verschleissschicht AB 16s



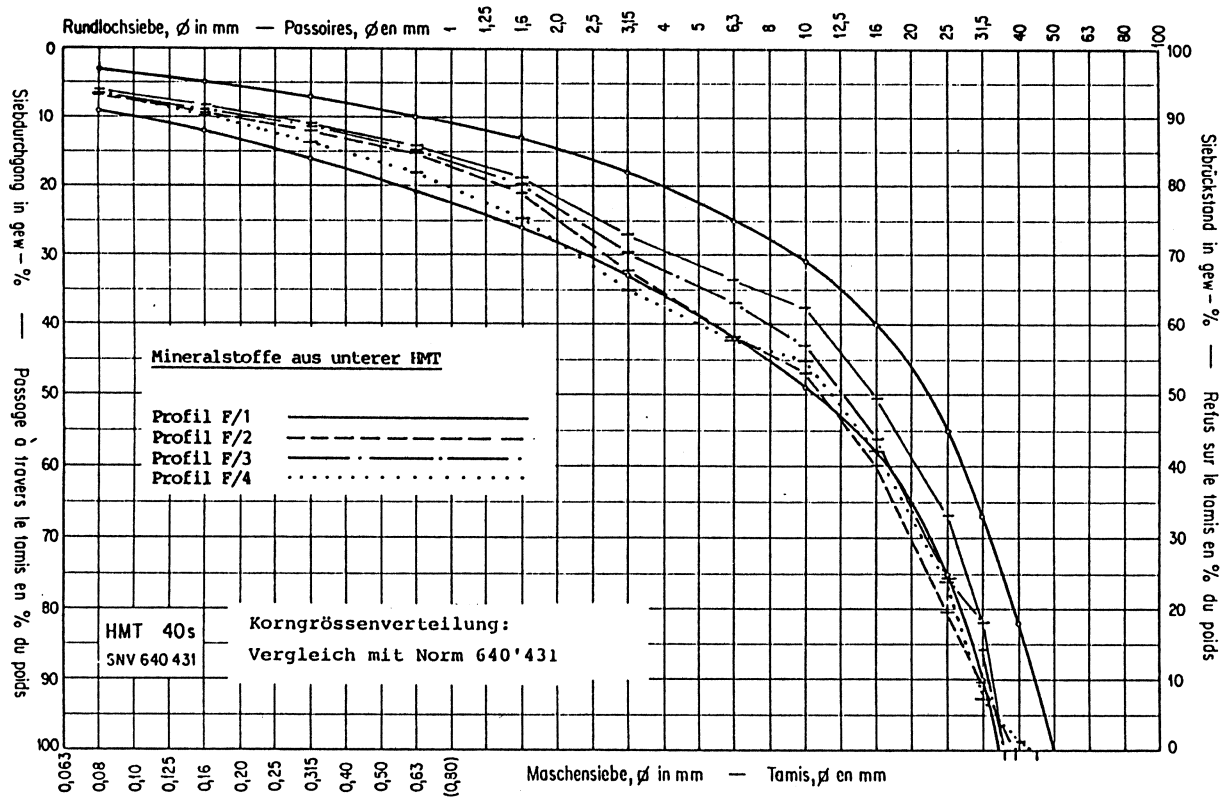


Abbildung 5.33: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke F; *oben:* obere Heissmischtragschicht HMT 40s, *unten:* untere Heissmischtragschicht HMT 40s

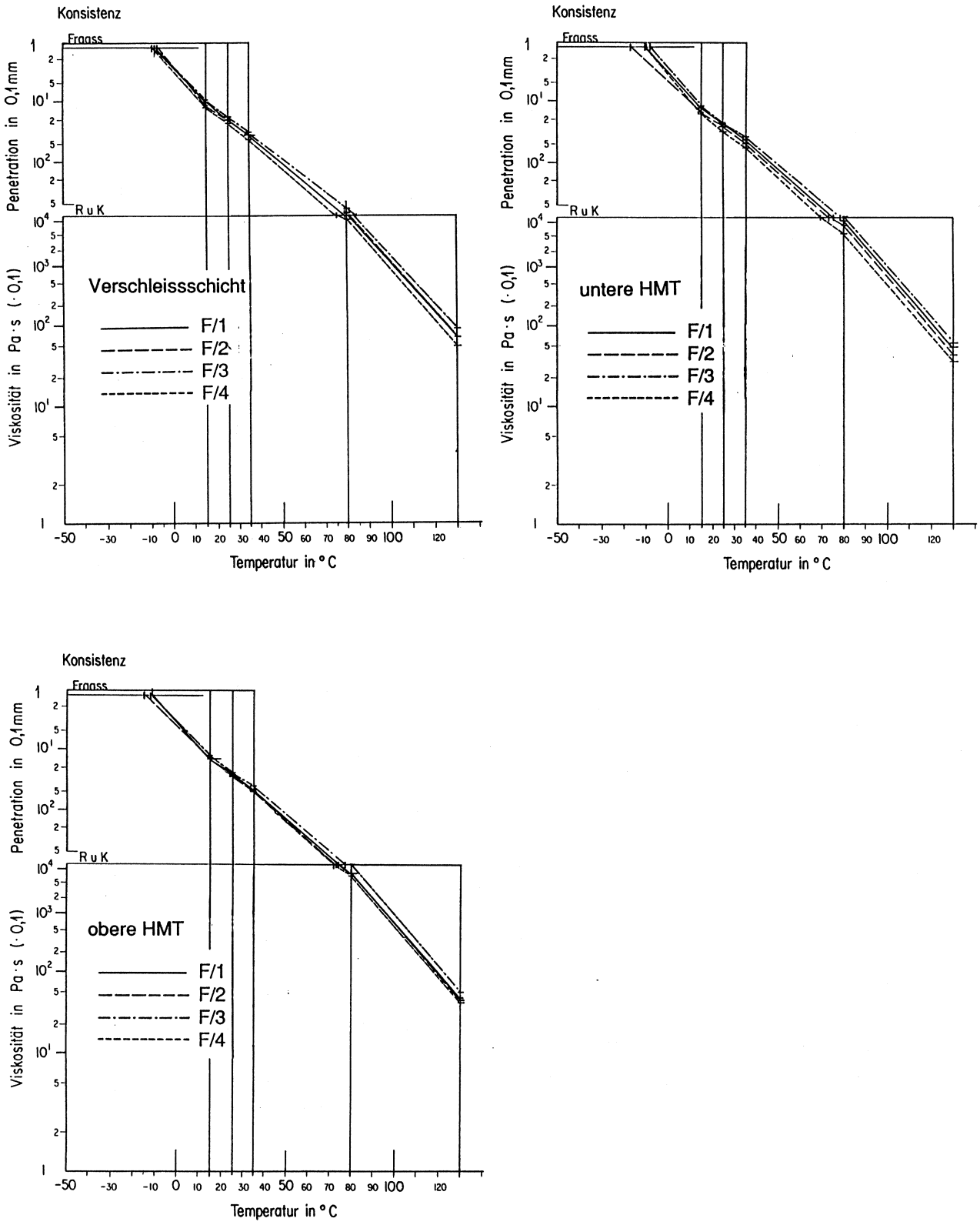


Abbildung 5.34: Konsistenz/Temperatur-Diagramme von Autobahnteilstrecke F

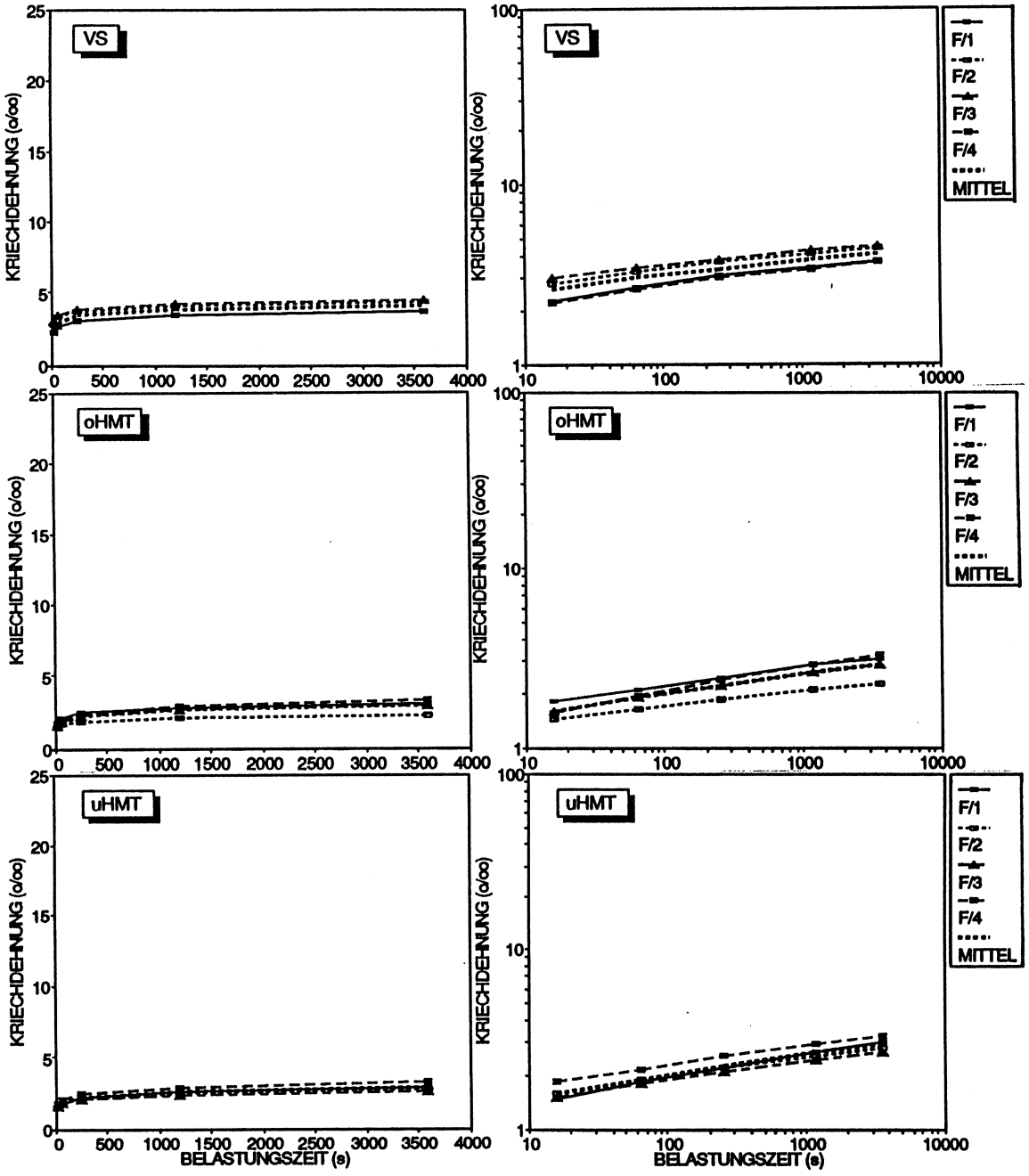


Abbildung 5.35: Kriechdehnungen ε_{kr} (‰) bei 40°C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2 , ermittelt an Bohrkernen *ausserhalb der Radspuren von Autobahnteilstrecke F*; Verschleissschicht (VS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT); links linear, rechts doppeltlogarithmisch dargestellt

5.7 Autobahnteilstrecke G

Es handelt sich um einen vierschichtigen Belagsaufbau gemäss *Tabelle 5.7*, mit einer aus den Querprofilen der vier entnommenen Belagsausschnitte bestimmten mittleren Belagsdicke von 241 mm.

Chronologie: 1972 Verkehrsübergabe, tägl. äquivalente Verkehrslast TF rund 1700
1978 Entnahme der vier Belagsausschnitte, TF rund 2800
1989 Beanspruchung etwa 10 Jahre nach Entnahme: TF rund 4400

Zustand bei Entnahme der Belagsausschnitte:

Festzustellen ist eine starke Spurrinnenbildung (*Abbildung 5.36*). Grösste Deformationen treten unter den Radspuren an der Oberfläche der Verschleissschicht auf (*Abbildung 5.37*). Bezogen auf das Maximum dieser Deformationen (maximaler Mittelwert aus vier Belagsausschnitten) entfallen auf die einzelnen Schichten: VS=36%, AS=29%, oHMT=18%, uHMT=17%.

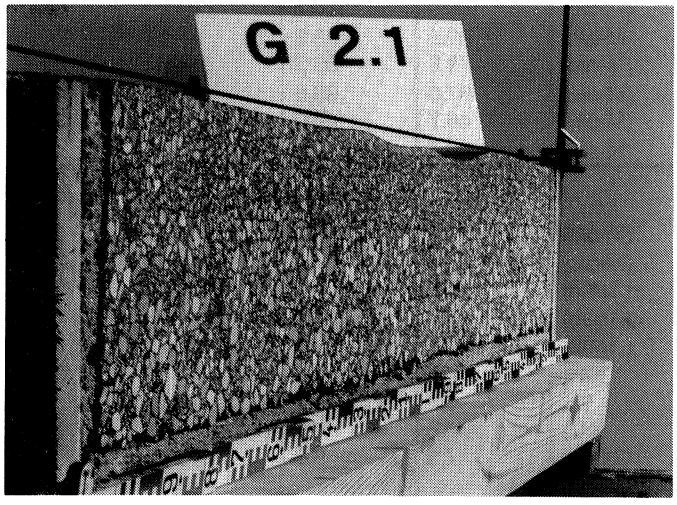


Abbildung 5.36: Typische Schnittfläche eines Belagsausschnittstücks der Autobahnteilstrecke G, EMPA-Foto Nr. 78'454

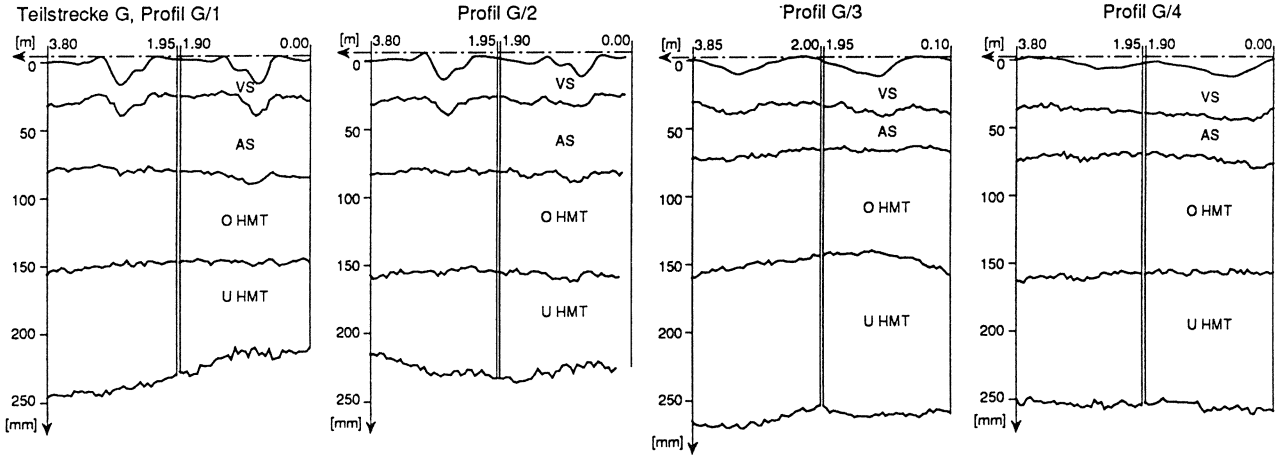
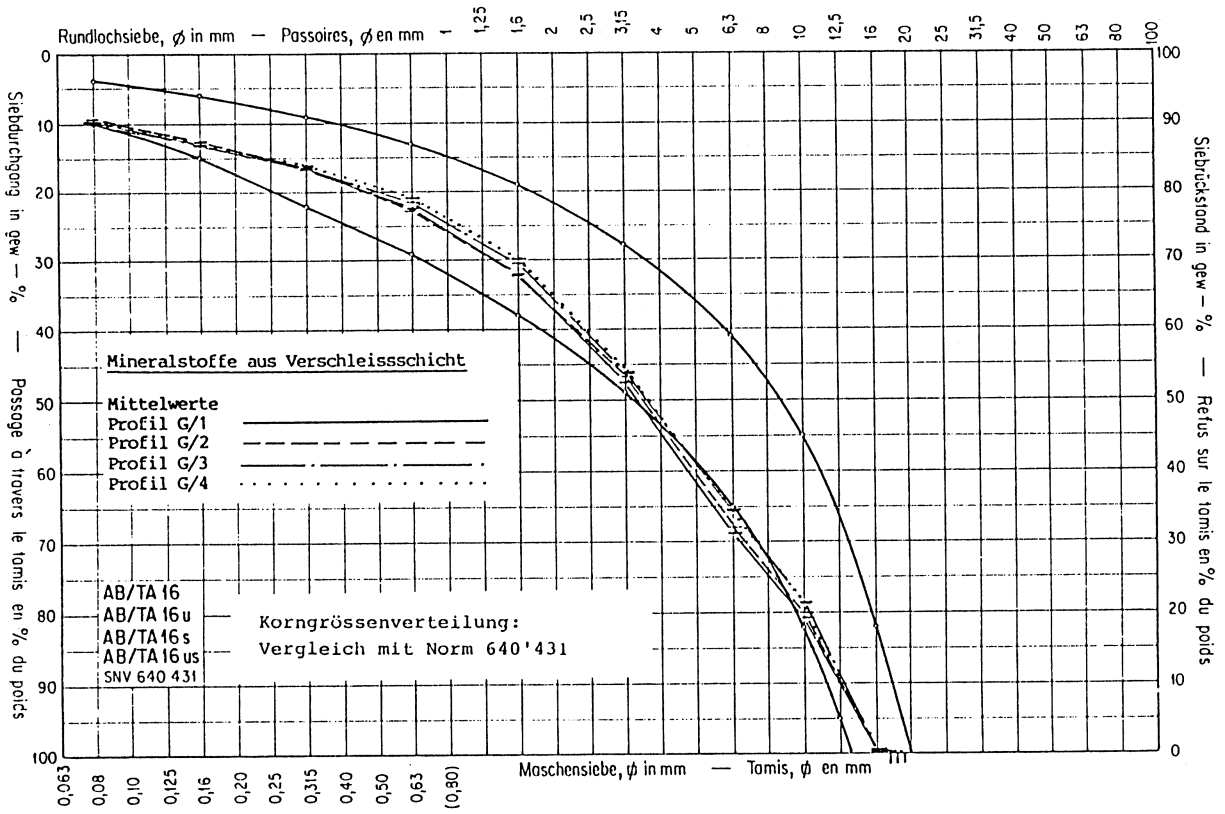


Abbildung 5.37: Schichtverlauf der Belagsausschnittstücke von Autobahnteilstrecke G

VS: Verschleissschicht
AS: Ausgleichsschicht
oHMT, uHMT: obere, untere HMT

	AUTOBAHNTEILSTRECKE : G (Mittelwerte für 4 Profile)					
	SCHICHT		VS	AS	oHMT	uHMT
MATERIAL	Mischgutsorte		AB16	AB16	HMT32	HMT32
	Bindemittelsorte (Einbau)		B80/100	B80/100	B80/100	B80/100
	Trinidad Pulver 50/50	(M-o/o)	-	-	-	-
	Trinidad Epuré	(M-o/o)	1.25	-	-	-
BLEIB. DEFORMATION IM QUERPROFIL	Max. Einzelwert	(mm)	21.0	16.0	9.0	6.0
	Max. Mittelwert	(mm)	17.2	11.0	6.0	3.0
	Max. Anteil d. Schicht	(mm)	6.2	5.0	3.0	3.0
	Max. Anteil am Gesamtmax.	(o/o)	36.0	29.1	17.4	17.4
EINGEBAUTE BELAGSSCHICHT	Schichtdicke	(mm)	30	43	77	91
	Rohdichte	(t/m3)	2.358	2.356	2.446	2.456
	Dichte	(t/m3)	2.442	2.471	2.512	2.514
	Hohlraumgehalt	(V-o/o)	3.5	4.7	2.6	2.3
	Verdichtungsgrad	(o/o)	98.1	97.5	100.8	100.9
	Hohlraumfüllungsgrad	(o/o)	80.4	73.1	78.8	80.9
MINERALSTOFFE (SIEBDURCHGANG)	40 mm	(M-o/o)	-	-	-	-
	32 mm	(M-o/o)	-	-	99.6	98.9
	25 mm	(M-o/o)	100.0	100.0	94.9	93.3
	16 mm	(M-o/o)	99.5	99.3	76.0	76.2
	10 mm	(M-o/o)	79.6	83.3	54.5	55.8
	6.3 mm	(M-o/o)	67.0	66.5	44.4	45.8
	3.15 mm	(M-o/o)	46.7	46.0	34.1	34.1
	0.08 mm	(M-o/o)	9.7	9.5	5.4	5.8
ZURUECK-GEWONNENES LOESLICHES BINDEMITTEL	Dichte aschefrei	(t/m3)	1.033	1.028	1.030	1.026
	Aschegehalt	(M-o/o)	1.55	1.16	0.75	0.83
	Bindemittelanteil	(M-o/o)	6.14	5.44	4.06	3.95
	Penetration bei 15oC	(.1mm)	16	21	20	22
	" bei 25oC	(.1mm)	40	52	50	54
	" bei 35oC	(.1mm)	99	129	122	134
	Erweichung RuK	(oC)	57.1	54.9	54.7	54.4
	Penetrationsindex PI		-0.1	0.0	-0.1	0.0
	Brechpunkt nach Fraass	(oC)	-12	-15	-14	-13
	Dyn. Viskosität bei 60oC	(100Pas)	7.8	5.7	5.5	5.0
	" bei 70oC	(100Pas)	-	-	-	-
	" bei 80oC	(100Pas)	-	-	-	-
	" bei 130oC	(.1Pas)	10.2	9.3	8.9	8.5
MARSHALL-PRUEFUNG	Hohlraumgehalt: HM	(V-o/o)	1.6	2.3	3.4	3.2
	Hohlraumfüllungsgrad	(o/o)	89.9	84.9	73.9	74.9
	Stabilität: SM	(kN)	10.7	10.9	9.0	8.6
	Fliessen: FM	(mm)	4.1	3.5	2.4	2.4
	SM/FM	(kN/mm)	2.6	3.1	3.8	3.6
IRREVERSIBLES KRIECHEN, 40oC	a	(o/oo,s)	6.84	4.76	2.79	2.79
	q	(o/oo,s)	0.086	0.085	0.090	0.090
	W: Ges. äquiv. Verkehrslast	(Millionen)	6.1	6.1	6.1	6.1
(Bohrkerne ausserhalb	Kir = a (0.01 x W)^q	(o/oo)	17.64	12.14	7.52	7.52
Radspuren entnommen)	eir = a t ^q, t=3600s	(o/oo)	13.83	9.55	5.83	5.83

Tabelle 5.7: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse von Autobahnteilstrecke G. Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT)



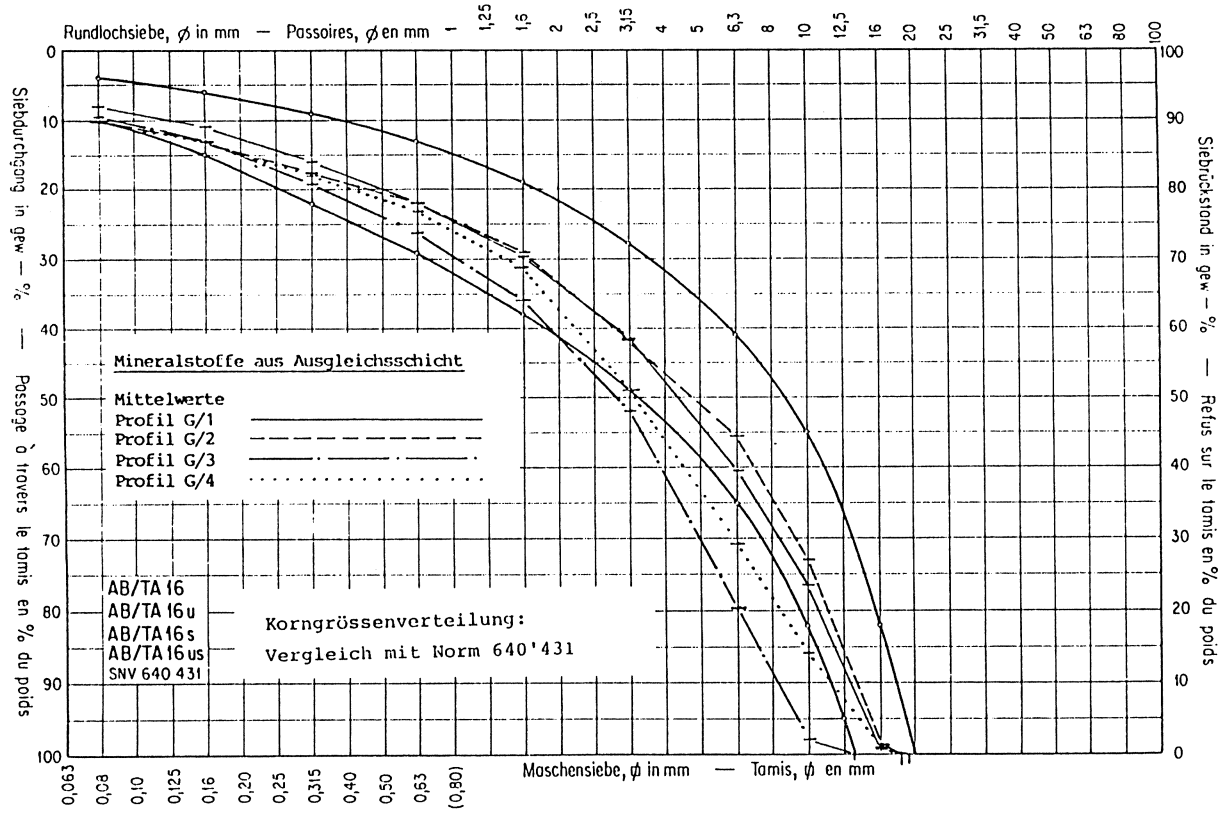
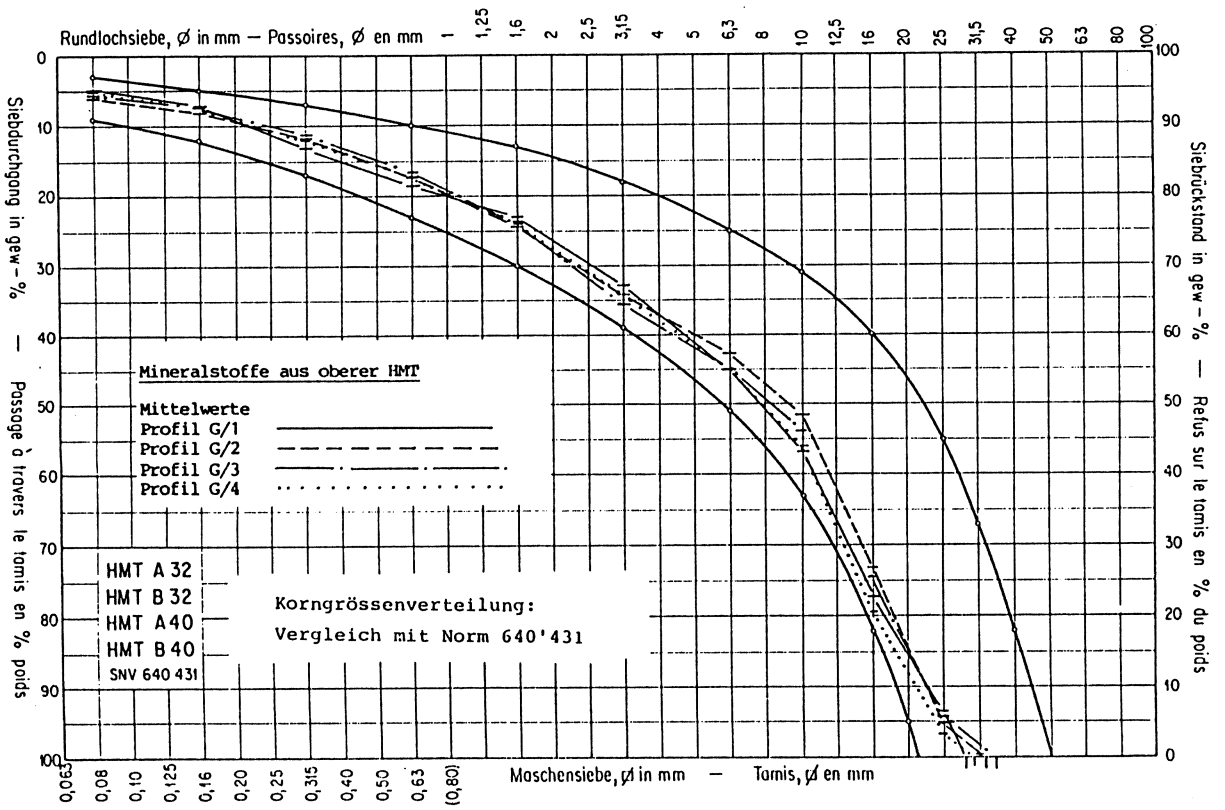


Abbildung 5.38: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke G; *oben:* Verschleissschicht AB 16, *unten:* Ausgleichsschicht AB 16



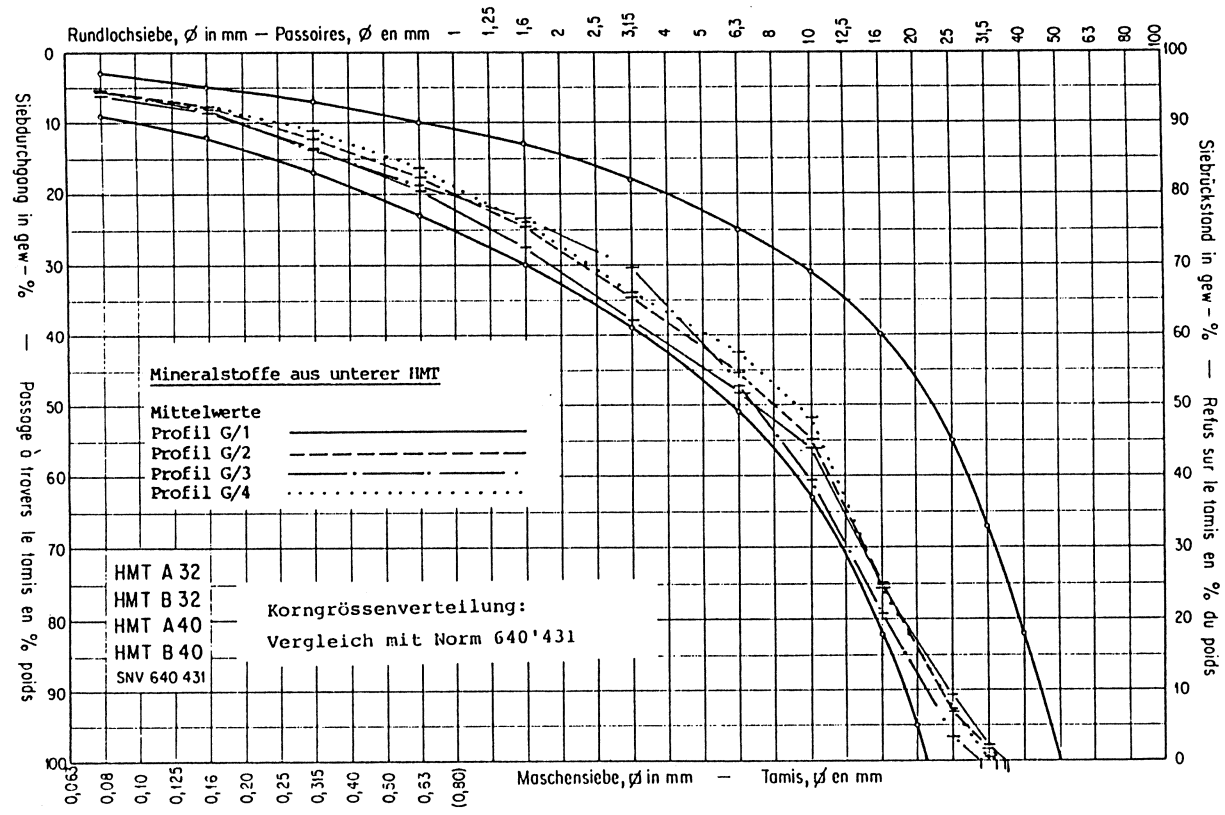


Abbildung 5.39: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke G; *oben:* obere Heissmischtragschicht HMT 32, *unten:* untere Heissmischtragschicht HMT 32

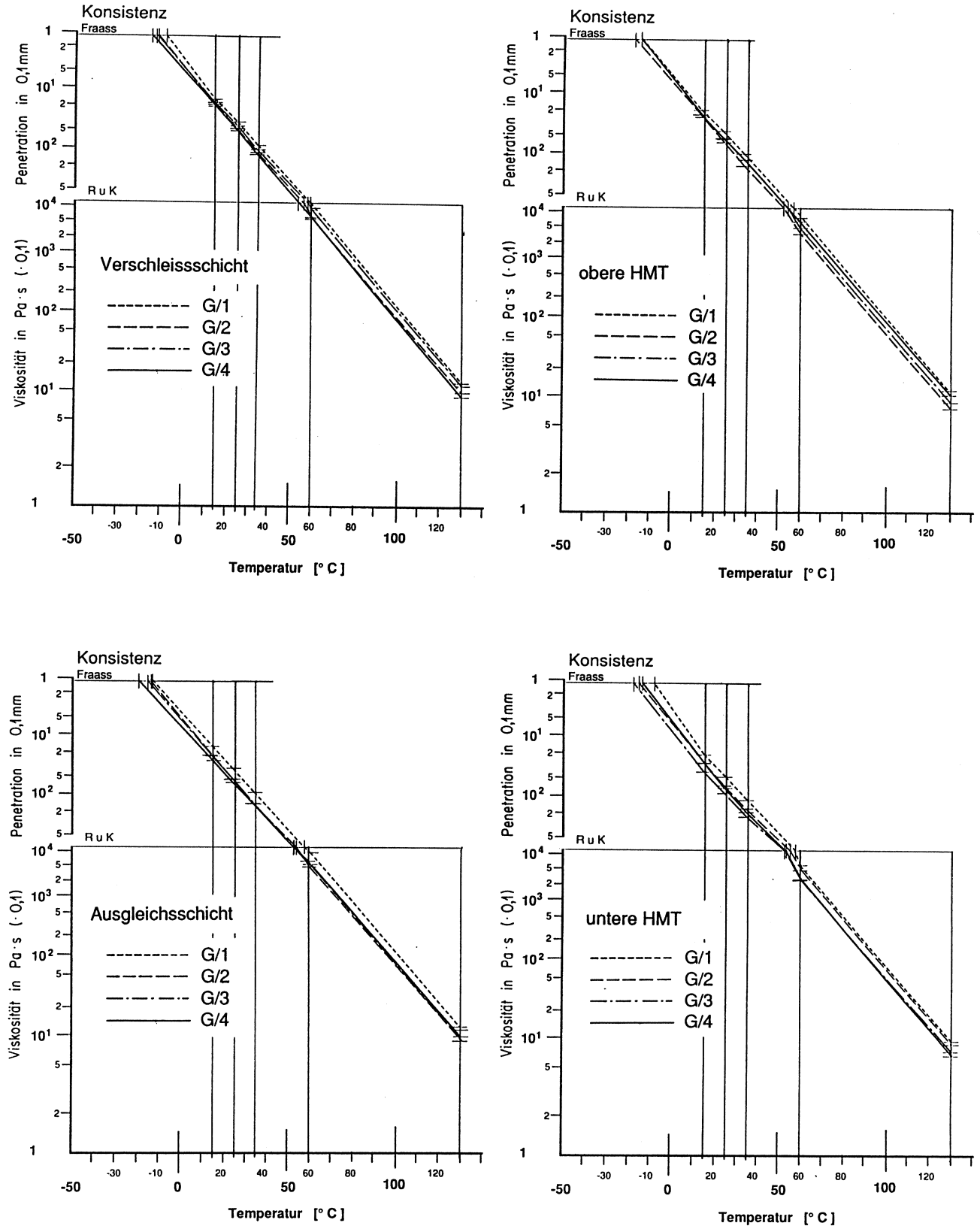


Abbildung 5.40: Konsistenz/Temperatur-Diagramme von Autobahnteilstrecke G

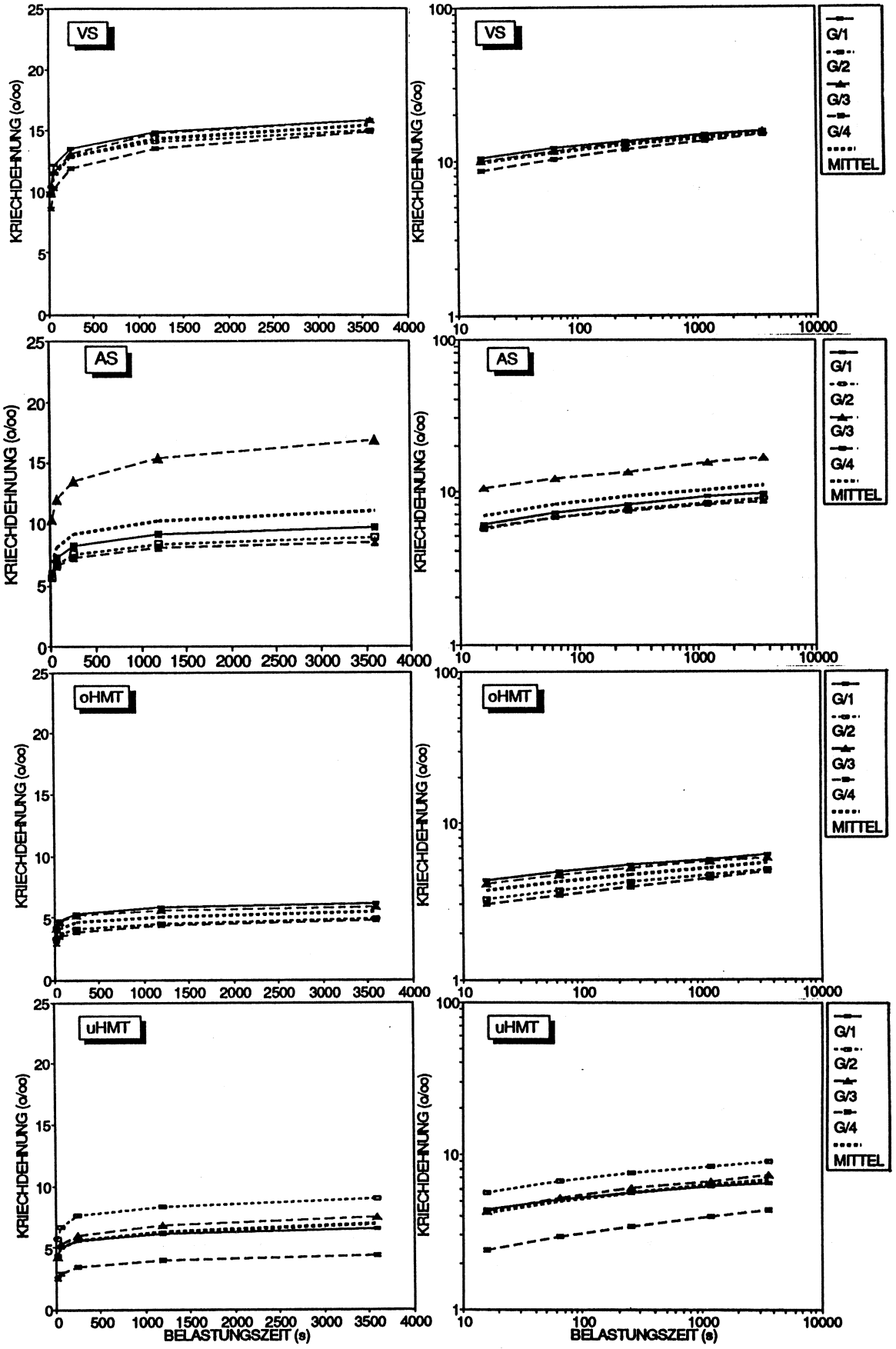


Abbildung 5.41: Kriechdehnungen ε_{kr} (°/oo) bei 40°C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2 , ermittelt an Bohrkernen *ausserhalb der Radspuren von Autobahnteilstrecke G*; Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT); links linear, rechts doppeltlogarithmisch dargestellt

5.8 Autobahnteilstrecke H

Es handelt sich um einen vierschichtigen Belagsaufbau gemäss *Tabelle 5.8*, A mit einer aus den Querprofilen der vier entnommenen Belagsausschnitte bestimmten mittleren Belagsdicke von 201 mm.

Chronologie: 1972 Verkehrsübergabe, tägl. äquivalente Verkehrslast TF rund 1700
1978 Entnahme der vier Belagsausschnitte, TF rund 2800
1989 Beanspruchung etwa 10 Jahre nach Entnahme: TF rund 4400

Zustand bei Entnahme der Belagsausschnitte:

Festzustellen ist eine eher schwache Spurrinnenbildung (*Abbildung 5.42*). Dies geht auch aus dem Schichtverlauf hervor (*Abbildung 5.43*). Bezogen auf das Maximum der Deformationen unter den Radspuren an der Oberfläche der Verschleisssschicht (maximaler Mittelwert aus vier Belagsausschnitten) entfallen auf die einzelnen Schichten: VS=64%, AS=4%, oHMT=23%, uHMT=9%.

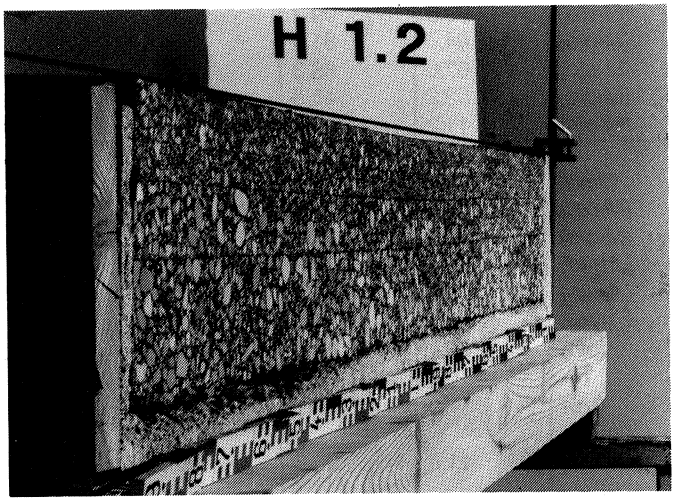


Abbildung 5.42:
Typische Schnittfläche eines Belagsausschnittstücks der Autobahnteilstrecke H, EMPA-Foto Nr. 78'468

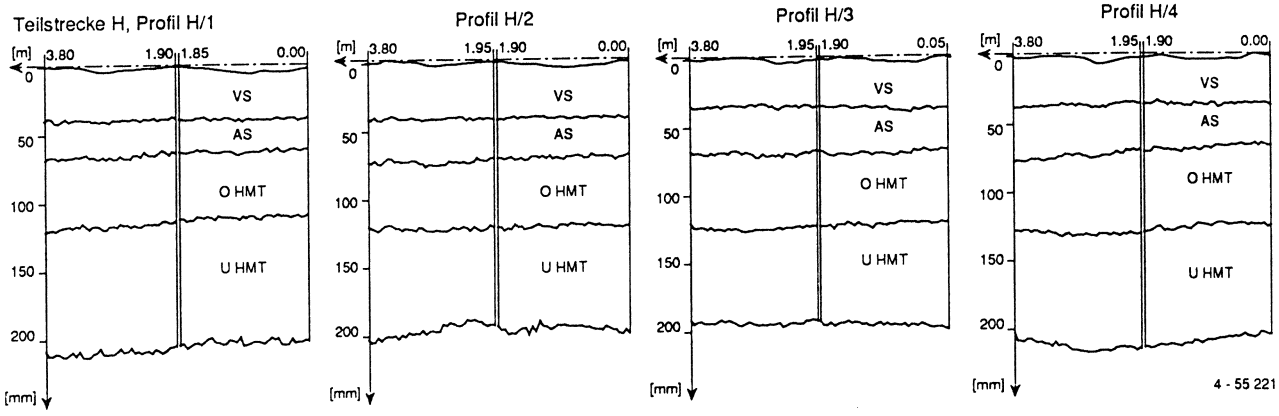
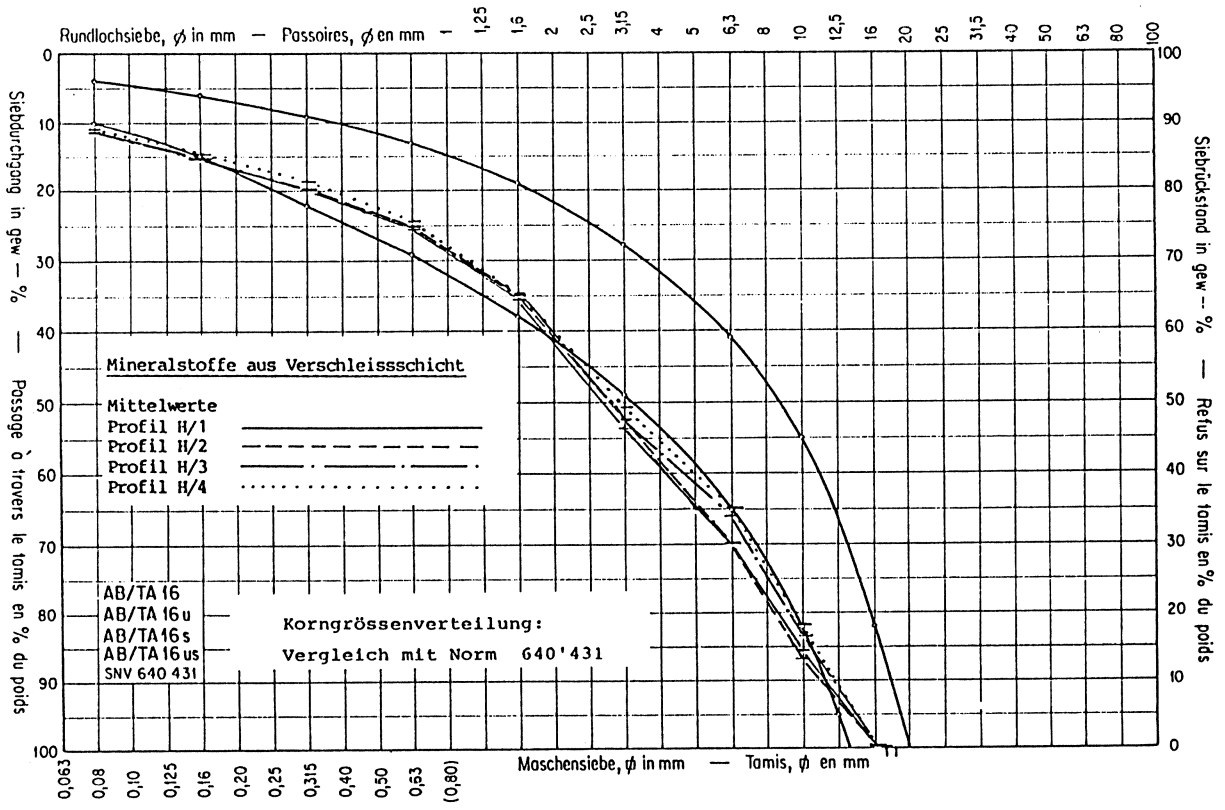


Abbildung 5.43: Schichtverlauf der Belagsausschnittstücke von Autobahnteilstrecke H

VS: Verschleissschicht
AS: Ausgleichsschicht
oHMT, uHMT: obere, untere HMT

AUTOBAHNTEILSTRECKE :	H	(Mittelwerte für 4 Profile)			
	SCHICHT		VS	AS	oHMT	uHMT
MATERIAL	Mischgutsorte		TA16	TA16	HMT32	HMT32
	Bindemittelsorte (Einbau)		TB2000	TB2000	TB2000	TB2000
	Trinidad Pulver 50/50	(M-o/o)	-	-	-	-
	Trinidad Epuré	(M-o/o)	1.25	-	-	-
BLEIB. DEFORMATION IM QUERPROFIL	Max. Einzelwert	(mm)	8.0	4.0	3.0	2.0
	Max. Mittelwert	(mm)	5.6	2.0	1.8	0.5
	Max. Anteil d. Schicht	(mm)	3.6	0.2	1.3	0.5
	Max. Anteil am Gesamtmax.	(o/o)	64.3	3.6	23.2	8.9
EINGEBAUTE BELAGSSCHICHT	Schichtdicke	(mm)	37	31	53	81
	Rohdichte	(t/m3)	2.400	2.360	2.427	2.432
	Dichte	(t/m3)	2.464	2.480	2.519	2.532
	Hohlraumgehalt	(V-o/o)	2.6	4.8	3.7	3.9
	Verdichtungsgrad	(o/o)	99.3	98.9	100.9	102.2
	Hohlraumfüllungsgrad	(o/o)	83.3	72.2	73.2	69.4
MINERALSTOFFE (SIEBDURCHGANG)	40 mm	(M-o/o)	-	-	-	-
	32 mm	(M-o/o)	-	-	98.5	98.8
	25 mm	(M-o/o)	100.0	100.0	93.8	91.5
	16 mm	(M-o/o)	99.6	99.2	83.1	74.9
	10 mm	(M-o/o)	84.7	81.9	68.7	59.0
	6.3 mm	(M-o/o)	67.6	66.3	54.4	46.6
	3.15 mm	(M-o/o)	52.2	45.8	38.1	38.1
	0.08 mm	(M-o/o)	11.2	9.2	6.0	6.0
ZURUECK-GEWONNENES LOESLICHES BINDEMITTEL	Dichte aschefrei	(t/m3)	1.041	1.037	1.046	1.046
	Aschegehalt	(M-o/o)	1.39	0.76	0.79	0.52
	Bindemittelanteil	(M-o/o)	5.64	5.30	4.24	3.82
	Penetration bei 15oC	(.1mm)	13	13	12	11
	" bei 25oC	(.1mm)	26	27	25	24
	" bei 35oC	(.1mm)	53	53	49	46
	Erweichung RuK	(oC)	67.1	68.6	69.6	72.4
	Penetrationsindex PI		0.8	1.1	1.1	1.4
	Brechpunkt nach Fraass	(oC)	-10	-11	-10	-9
	Dyn. Viskosität bei 60oC	(100Pas)	-	-	-	-
	" bei 70oC	(100Pas)	11.6	20.8	30.5	14.4
	" bei 80oC	(100Pas)	-	-	-	50.5
	" bei 130oC	(.1Pas)	20.6	20.5	23.7	30.7
MARSHALL-PRUEFUNG	Hohlraumgehalt: HM	(V-o/o)	2.0	3.8	4.6	6.0
	Hohlraumfüllungsgrad	(o/o)	87.1	76.3	68.1	59.2
	Stabilität: SM	(kN)	16.7	16.1	15.0	11.8
	Fliessen: FM	(mm)	4.2	3.1	2.5	2.2
	SM/FM	(kN/mm)	4.0	5.2	6.0	5.4
IRREVERSIBLES KRIECHEN, 40oC	a	(o/oo,s)	3.11	2.65	1.91	1.33
	q	(o/oo,s)	0.108	0.077	0.060	0.076
	W: Ges. äquiv. Verkehrslast	(Millionen)	6.1	6.1	6.1	6.1
(Bohrkerne ausserhalb	Kir = a (0.01 x W)^q	(o/oo)	10.22	6.19	3.70	3.07
Radspuren entnommen)	eir = a t ^q, t=3600s	(o/oo)	7.53	4.98	3.12	2.48

Tabelle 5.8: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse von Autobahnteilstrecke H. Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT)



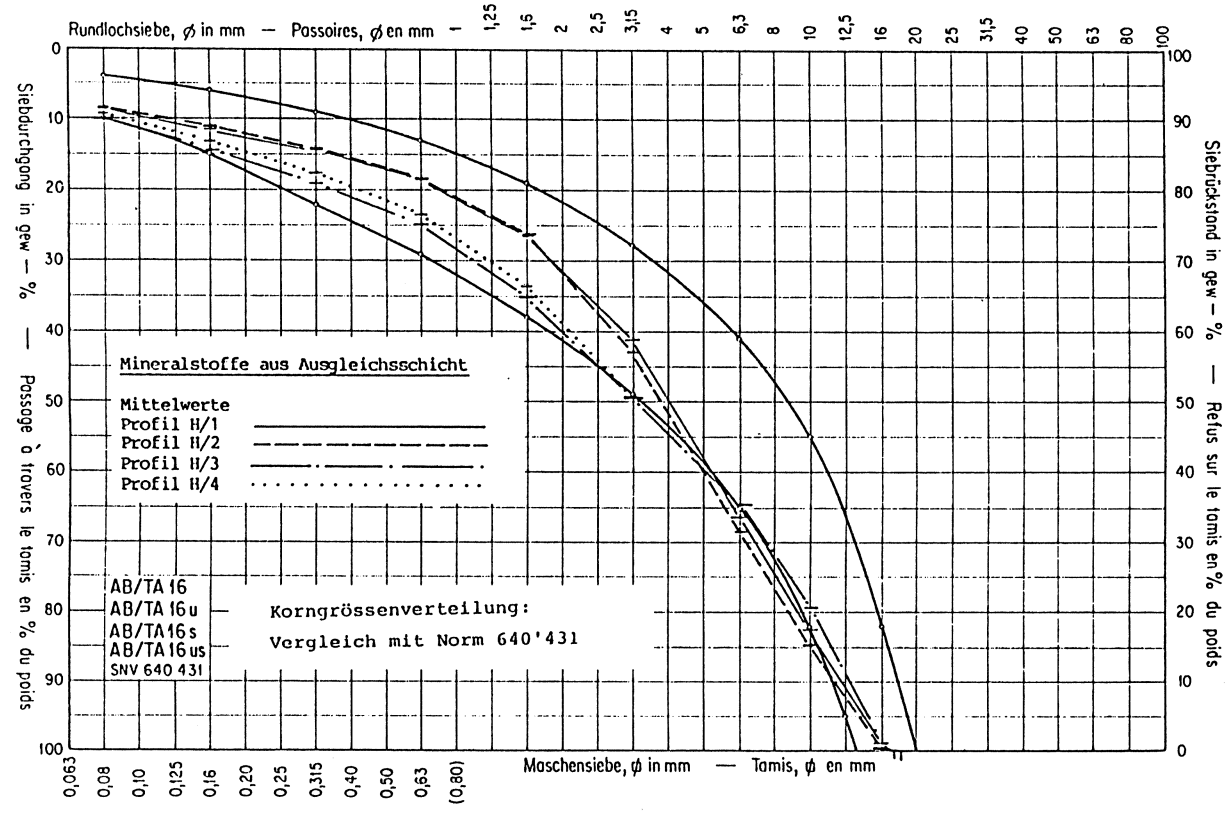
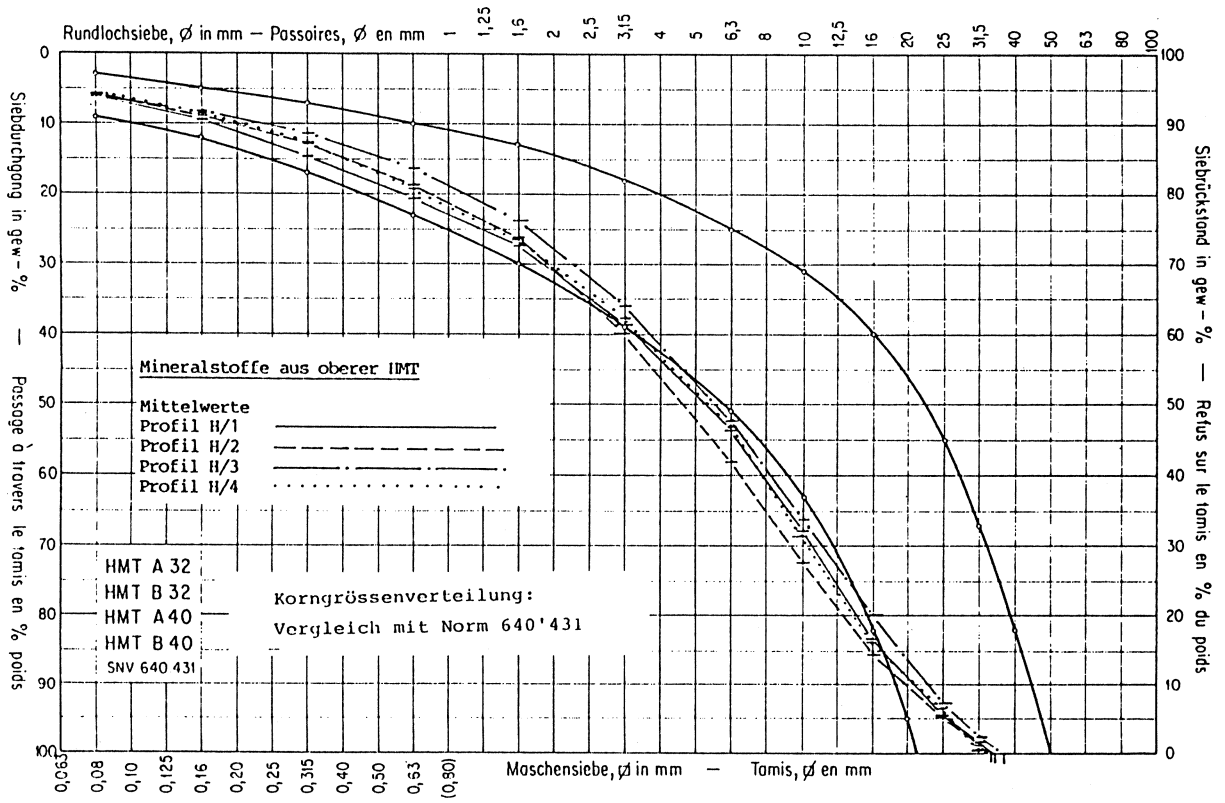


Abbildung 5.44: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke H; *oben:* Verschleissschicht TA 16, *unten:* Ausgleichsschicht TA16



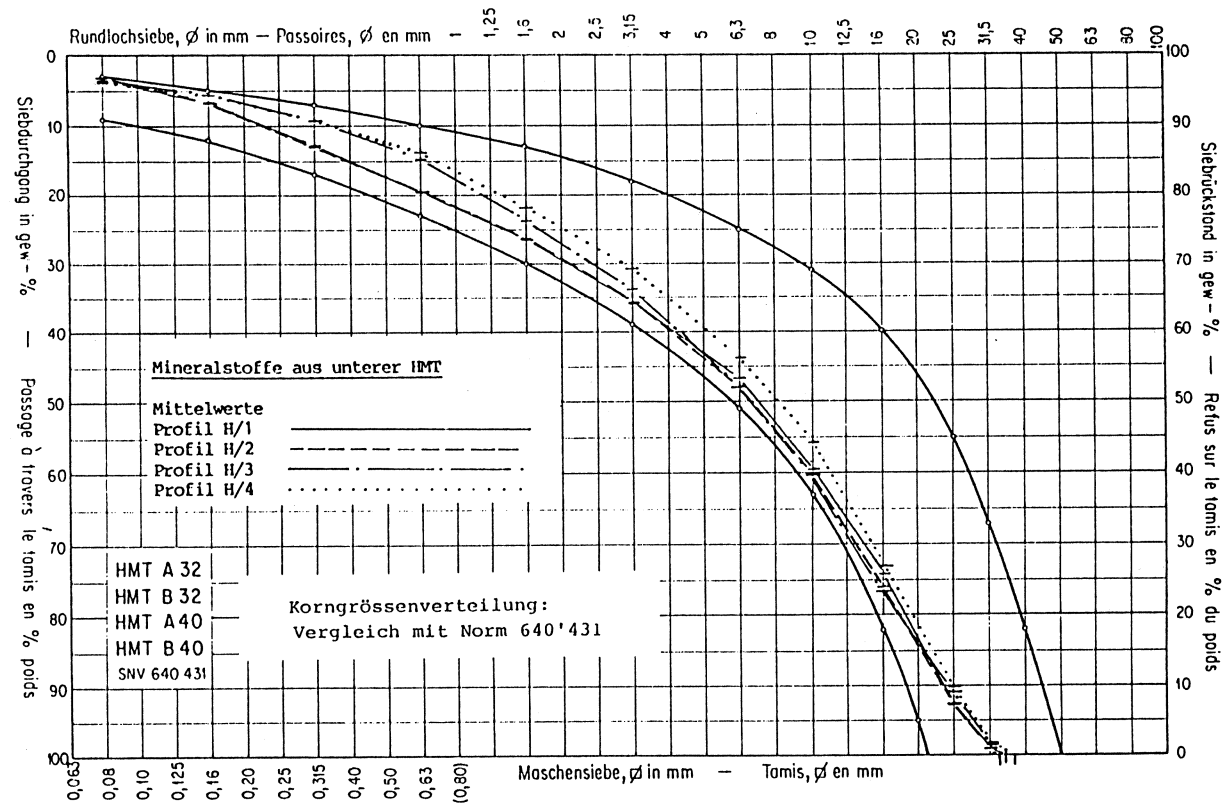


Abbildung 5.45: Korngrössenverteilung der Mineralstoffe von Autobahnteilstrecke H; *oben:* obere Heissmischtragschicht HMT 32, *unten:* untere Heissmischtragschicht HMT 32

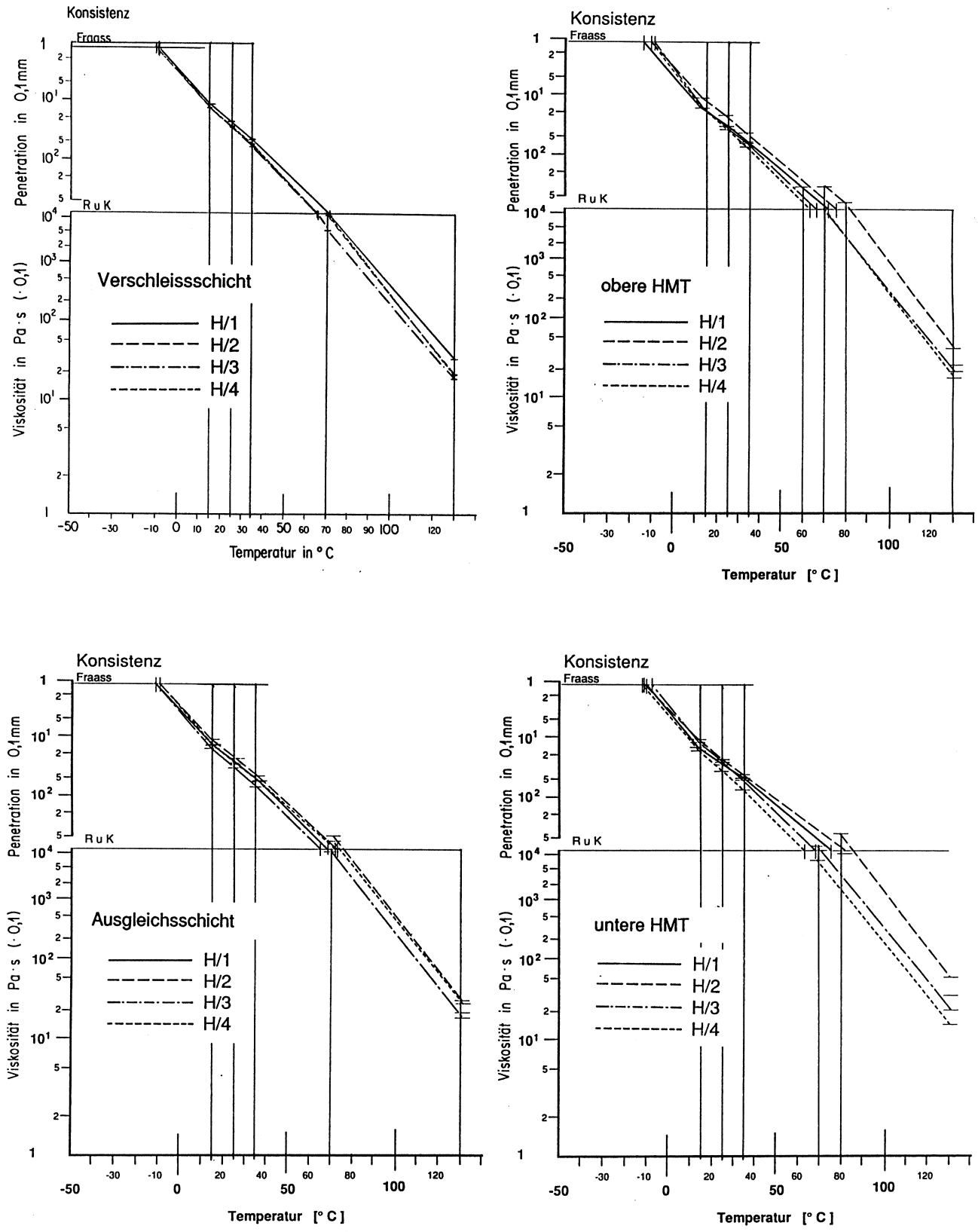


Abbildung 5.46: Konsistenz/Temperatur-Diagramme von Autobahnteilstrecke H

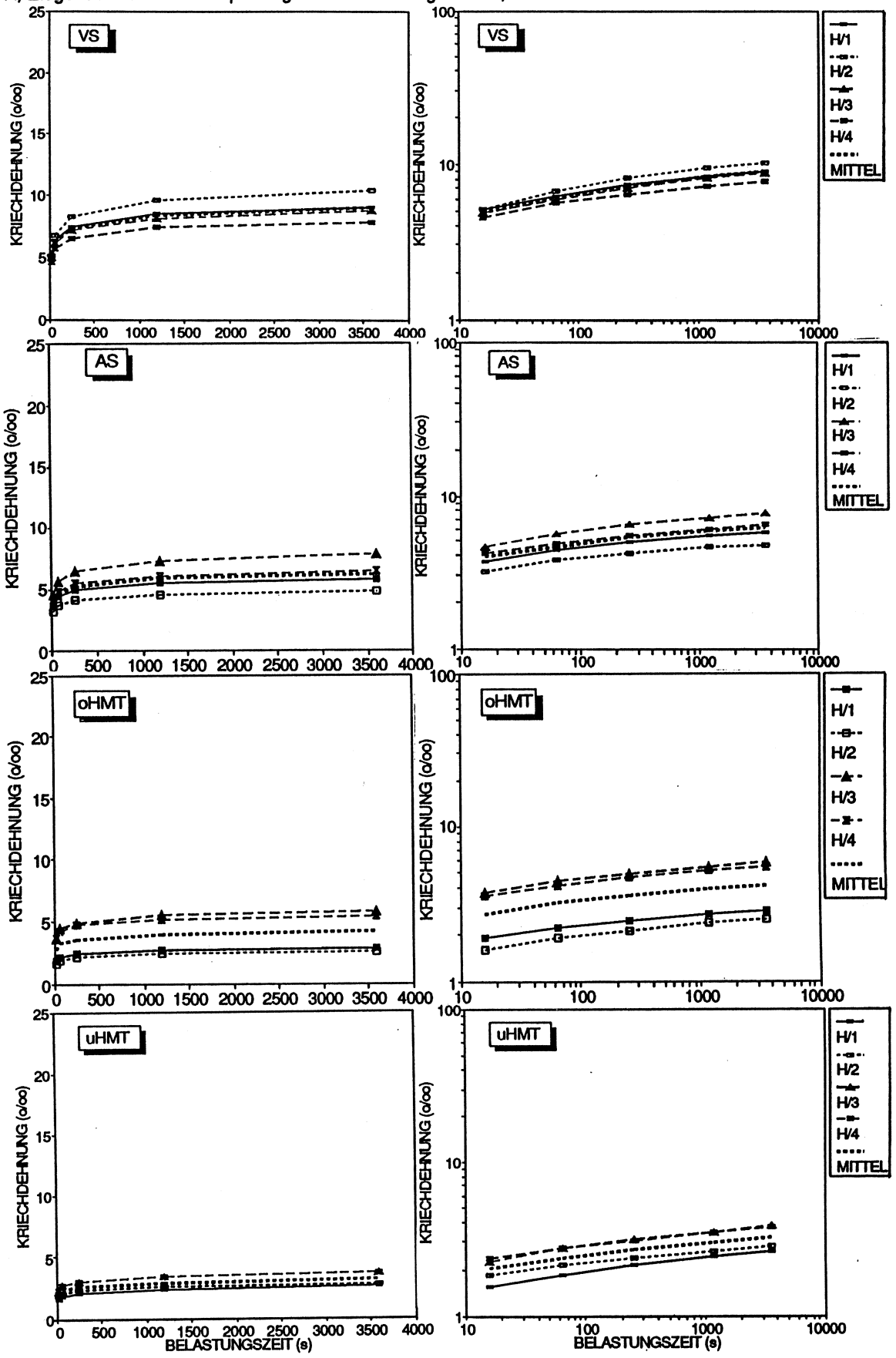


Abbildung 5.47: Kriechdehnungen ε_{kr} (°/oo) bei 40°C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2 , ermittelt an Bohrkernen *ausserhalb der Radspuren von Autobahnteilstrecke H*; Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT);links linear, rechts doppeltlogarithmisch dargestellt

6. PRAXISVERHALTEN UND BEANSPRUCHUNG DER ACHT AUTOBAHNTEILSTRECKEN BIS 1990

6.1 Praxisverhalten

Autobahnteilstrecken A und B:

Die 1966 dem Verkehr übergebenen Teilstrecken A und B weisen grundsätzlich einen gleichen Belagsaufbau auf. Sie befinden sich in demselben Autobahnabschnitt, liegen jedoch einige Kilometer voneinander entfernt in entgegengesetzter Fahrtrichtung.

Der Belag wurde bis 1990 wiederholt durch Auffüllen von Spurrinnen sowie Ersetzen der Verschleissschicht (recycling in place) saniert.

Autobahnteilstrecke C:

Der 1974 eingebaute Belag weist auch im Jahre 1990 keine bleibenden Deformationen auf. Im Verlauf der bisherigen Nutzung magerte die Belagsoberfläche aus (Absanden), und es traten zahlreiche Kornausbrüche auf. Seit etwa 1983 sind Risse zu beobachten.

Um ein Fortpflanzen der Risse in die Heissmischtragschichten und damit einen erhöhten Wasserzutritt zu vermeiden, ist demnächst der Ersatz der Verschleissschicht vorgesehen.

Autobahnteilstrecke D:

Mit dem Totalersatz im Jahre 1978 ist der Endpunkt der Nutzungsdauer dieses seit 1967 genutzten Belags erreicht. Die hier untersuchten Belagsausschnitte wurden anlässlich des Totalersatzes entnommen.

Autobahnteilstrecke E:

Dieser Belag wurde 1970 unter Verkehr gesetzt. Die Entnahme der Belagsausschnitte erfolgte unmittelbar vor dem Teilersatz der obersten 120 mm des Belages. Neu eingebaut wurden zwei Schichten, 80 mm Heissmischtragschicht HMT 40s und 40 mm Deckschicht AB/TA 16s. Von dem seit 1970 befahrenen Belag blieb im wesentlichen somit nur die untere Heissmischtragschicht HMT B 32 bestehen.

Im teilsanierten Belag waren bis 1990 praktisch keine bleibenden Deformationen zu verzeichnen. Die belassene untere Heissmischtragschicht HMT B32 hat folglich, überdeckt mit zwei sehr standfest konzipierten neuen Belagsschichten, ihrem Verwendungszweck weiter genügt.

Autobahnteilstrecke F:

Erste Rissbildungen traten 1979 an der Oberfläche des 1975 eingebauten Belags auf. In der Folge nahm das Ausmass der Risse stetig zu und machte schliesslich 1987 einen Ersatz der Verschleissschicht AB 16s notwendig. Wie sich nach dem Abfräsen dieser Schicht herausstellte, wies die obere Heissmischtragschicht HMT 40s nur vereinzelt Risse auf.

In der gesamten Nutzungsdauer ergaben sich praktisch keine bleibenden Deformationen.

Autobahnteilstrecke G:

Die Autobahnteilstrecken G und H wurden 1972 dem Verkehr übergeben und liegen in verschiedenen Kantonen. Sie weisen zwar unterschiedliche Belagsaufbauten auf, unterliegen aber denselben Verkehrsbeanspruchungen, da sie sich zwischen den gleichen Autobahnausfahrten befinden.

Bis 1990 wurde wiederholt der oberste Teil des Belages ersetzt, doch bildeten sich jeweils sehr rasch wieder Spurrinnen.

Diese Sanierungsmassnahmen waren darauf ausgelegt, die Belagsoberfläche auszuebnen. Da sich aber auch die seit 1972 befahrenen unteren Schichten bleibend deformieren, war das erneute Auftreten von Spurrinnen nicht zu vermeiden.

Autobahnteilstrecke H:

Bis 1990 mussten keine grösseren Sanierungsmassnahmen ergriffen werden.

In diesem Belag, befahren seit 1972, nahmen die bleibenden Deformationen zwar sukzessive, betragsmässig jedoch relativ wenig zu. In den letzten Jahren konnte zudem ein Auftreten von Rissen beobachtet werden. Die Deckschichten wurden in den Jahren 1991/1992 ersetzt. Vereinzelt musste in Zonen starker Rissbildung eine HMT 22s von 80 mm Dicke eingebaut werden.

6.2 Beanspruchung

Für alle acht Autobahnteilstrecken sind die klimatischen Beanspruchungen sehr ähnlich und entsprechen extremen im schweizerischen Mittelland herrschenden Verhältnissen des gemässigten Klimas. Die absoluten Extremtemperaturen betragen im Juli 38 °C als absolutes Maximum und im Januar -24 °C als absolutes Minimum. Die entsprechenden mittleren Juli- bzw. Januartemperaturen betragen etwa 20 °C bzw. -1 °C.

Die Belastungen durch den Verkehr sind für alle acht Autobahnteilstrecken in *Tabelle 6.1* und *Abbildung 6.1* zusammenfassend festgehalten. Um die Verkehrsbelastung der verschiedenen Strecken vergleichen zu können, genügt es nicht, die tägliche äquivalente Verkehrslast TF einzelner bestimmter Zeitpunkte zu betrachten (TF: tägliche äquivalente Verkehrslast gemäss Schweizer Norm SN 640'320). Vielmehr muss wegen des unterschiedlichen Alters der verschiedenen Autobahnteilstrecken die gesamte äquivalente Verkehrslast W zu bestimmten Zeitpunkten berücksichtigt werden (W = 0.5 x ESAL, wobei ESAL: Cumulative both directional expected 8.16 t "*E*quivalent *S*ingle *A*xle *L*oads" during the analysis period, gemäss AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1986). Im vorliegenden Fall wurden in *Tabelle 6.1* und *Abbildung 6.1* aus naheliegenden Gründen die Zeitpunkte der Entnahme der Belagsausschnitte (1978/79) sowie des Abschlusses der erwähnten Einzelberichte EMPA Nr. 40 500/1...3 (1990) gewählt.

Bis zur Entnahme der Belagsausschnitte im Jahre 1978/79 waren die verschiedenen Strecken drei bis zwölf Jahre in Gebrauch und erfuhren bereits gesamte äquivalente Verkehrslasten W zwischen 2.3 und 7.2 Millionen. Beläge, die im Zeitpunkt der Ent-

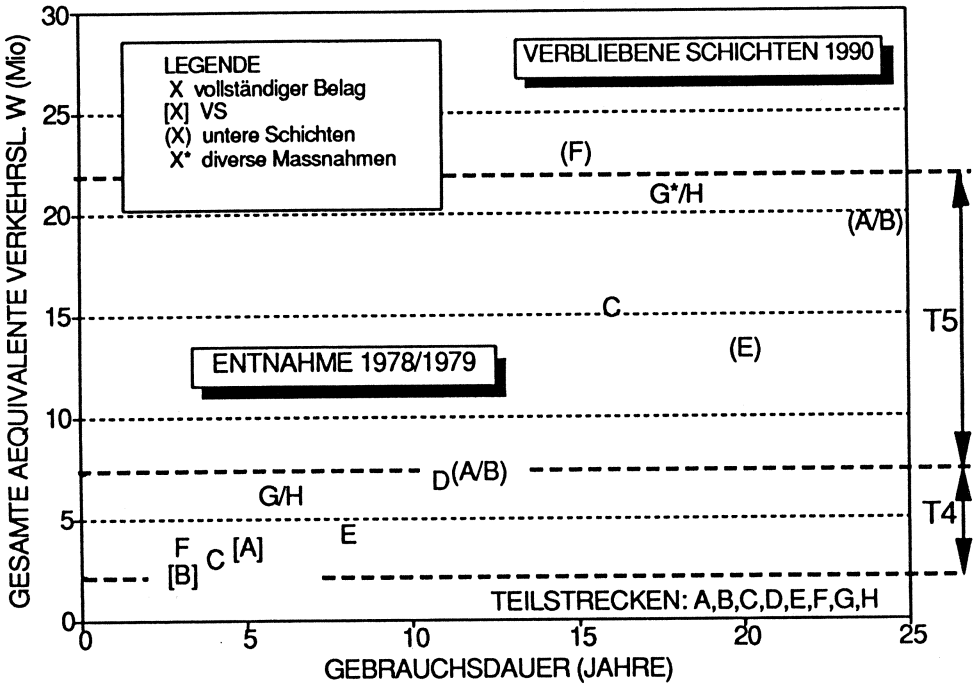


Abbildung 6.1: Gesamte äquivalente Verkehrslast W der Autobahnteilstrecken in Funktion der Gebrauchsdauer bis zum Zeitpunkt der Belagsausschnittsentnahme (1978/79) bzw. bis 1990, verglichen mit Verkehrsklasse T5 nach Schweizer Norm SN 640'423 (1988)

nahme ersetzt oder saniert wurden, haben damit lediglich einer Belastung standgehalten, welche der Verkehrslastklasse T4 für schweren Verkehr entspricht. Dies betrifft namentlich den gesamten Belag der Autobahnteilstrecke D, die obersten 120 mm des Belags von E sowie den Belag von G, dessen Oberfläche durch diverse zeitlich nicht einheitlich zuordenbaren Massnahmen ab 1978/79 wiederholt ausgeebnet wurde. Aus den obigen bis zum Zeitpunkt der Entnahme festgestellten gesamten äquivalenten Verkehrslasten W, die der Verkehrslastklasse T4 entsprechen, können die durchschnittlichen täglichen äquivalenten Verkehrslasten TF berechnet werden. Für die untersuchten Autobahnteilstrecken ergeben sich TF von rund 1400 bis 3200, also Werte, die im damaligen Zeitpunkt der Verkehrslastklasse T5 für sehr schweren Verkehr entsprachen. Im Gegensatz zur Beurteilung aufgrund von W führt also die Betrachtungsweise über TF auf die Zuordnung zu einer höheren Verkehrslastklasse (T5 statt T4) bzw. auf eine Ueberschätzung der effektiven Beanspruchung und damit auf eine zu günstige Einschätzung des Praxisverhaltens der erwähnten Beläge. Die um etwa einen Faktor 2 differierenden Extremwerte von TF täuschen zudem geringere Unterschiede in den Verkehrsbeanspruchungen der einzelnen Autobahnteilstrecken vor, als dies bei Betrachtung der effektiv massgebenden gesamten äquivalenten Verkehrslasten W der Fall ist. Der Unterschied der Extremwerte beträgt hier etwa einen Faktor 3.

Bis zum Jahre 1990 erfuhren die verbliebenen Beläge bzw. Schichten gesamte äquivalente Verkehrslasten W von 13.2 bis 23 Millionen. Für die effektive Gebrauchsdauern von 15 bis 24 Jahren bedeutet dies, dass sich die Verkehrsbelastungen im Bereich von

der Mitte bis über die obere Grenze der Verkehrslastklasse T5 erstreckten. Dies trifft namentlich für die Autobahnteilstrecken G und H zu. Die obere und untere Heissmischtragschicht der am stärksten belasteten Autobahnteilstrecke F erfuhr innerhalb der Gebrauchsdauer von 15 Jahren sogar eine Verkehrsbeanspruchung, welche deutlich über der oberen Grenze der Verkehrslastklasse T5 liegt, während die 1987 nach zwölf Betriebsjahren ersetzte Verschleissschicht AB 16s von F mit einer gesamten äquivalenten Verkehrslast W von 18.1 Millionen ebenfalls im oberen Bereich der Verkehrslastklasse T5 belastet war.

Tabelle 6.1 und *Abbildung 6.1* zeigen also mit aller Nachdrücklichkeit, dass sämtliche untersuchten Autobahnteilstrecken stark bis extrem beansprucht sind.

Autobahnteilstrecke	Schicht	Entnahme 1978/1979		Verbliebene Schichten 1990	
		Gebrauchsdauer (Jahre)	W: gesamte äquivalente Verkehrslast (Millionen)	Gebrauchsdauer (Jahre)	W: gesamte äquivalente Verkehrslast (Millionen)
A	VS	5	3.6	-	-
	AS, oHMT, uHMT	12	7.2	24	19.5
B	VS	3	2.3	-	-
	AS, oHMT, uHMT	12	7.2	24	19.5
C	VS, oHMT, uHMT	4	2.9	16	15.3
D	VS, AS, oHMT	11	6.8	-	-
E	VS, AS, oHMT	8	4.2	-	-
	uHMT	8	4.2	20	13.2
F	VS	3	3.5	-	-
	oHMT, uHMT	3	3.5	15	23.0
G	VS, AS, oHMT, uHMT	6	6.1	*	*
H	VS, AS, oHMT, uHMT	6	6.1	18	20.9

* Diverse, zeitlich nicht einheitlich zuordenbare Massnahmen
Hinweis: Verkehrslastklasse T5 nach Schweizer Norm SN 640 324 (1988):
W = 7.3 ... 21.9 (Millionen), für eine Gebrauchsdauer von 20 Jahren

Tabelle 6.1: Autobahnteilstrecken, Belagsschichten, Gebrauchsdauer (Jahre) und gesamte äquivalente Verkehrslast W (in Millionen) bis zum Zeitpunkt der Belagsausschnittsentnahme (1978/79) bzw. bis 1990

7. VERGLEICH UND BEURTEILUNG

Die wesentlichsten Ergebnisse dieser Forschungsarbeit wurden bereits bei der Bearbeitung der seit 1989 gültigen Schweizer Norm SN 640'431a "Asphaltbetonbeläge, Konzeption, Anforderungen, Ausführung" berücksichtigt und zur Erarbeitung der heutigen Belagsphilosophie in der Schweiz mitverwendet. Entsprechend konzentrieren sich die folgenden Ausführungen auf die materialspezifischen Ursachen der bleibenden Deformationen und nicht auf eine Beurteilung allfälliger Abweichungen von den beim Einbau ab 1964 bis 1978 gültigen Normen. Dieses Vorgehen ist aus verschiedenen Gründen sinnvoll, beispielsweise weil die Eigenschaften und das Verhalten dieser Beläge auch in Bezug auf die heutigen gültigen Schweizer Normen sowie auf bevorstehende Europa-Normen wichtig sind und weil die Verkehrsentwicklung nahezu bei allen in die Forschungsarbeit einbezogenen Autobahnteilstrecken weit stärker zugenommen hat, als dies beim Bau angenommen wurde.

Nachfolgende Vergleiche und Beurteilungen beruhen vor allem auf den Untersuchungsresultaten und dem Praxisverhalten der verschiedenen Autobahnteilstrecken bis zur Entnahme der Belagsabschnitte. Der verhältnismässig kleine Abrieb der Verschleissschichten bis zu diesem Zeitpunkt betrug nicht mehr als 2 mm und konnte daher für die Betrachtung der bleibenden Deformationen vernachlässigt werden. Sofern die verschiedenen ursprünglichen Autobahnteilstrecken oder Belagsteile davon noch 1990 in Gebrauch standen, wurde auch deren Verhalten bis 1990 in diese Vergleiche und Beurteilungen miteinbezogen.

Im folgenden Abschnitt 7.1 ist Wichtiges betont, das bezüglich bleibender Deformationen von allgemeinem Interesse ist. Der nachfolgende Abschnitt 7.2 enthält zusätzlich wesentliche belags- und materialspezifische Angaben sowie Aussagen, welche die Erfassung und Beurteilung der Materialeigenschaften im Labor betreffen.

7.1 Bleibende Deformationen

Um die bleibenden Deformationen quer zur Fahrrichtung besser bewerten zu können, sind in *Abbildung 7.1* die Mittelwerte der maximalen bleibenden Deformationen der einzelnen Schichten unter den Radspuren der Belagsausschnitte, der zugehörige jeweilige Anteil der einzelnen Schicht an der maximalen bleibenden Deformation im Belag und die aus den Kriechversuchen bei 40 °C mit (4.5) ermittelte Kriechvergleichsgrösse e_{ir} aufgetragen. Die einzelnen Werte sind in *Tabelle 5.1* bis *5.8* angegeben. *Abbildung 7.1* bildet jeweils eine Grundlage für die Vergleiche und Folgerungen von Abschnitt 7.1, 7.2 sowie von Kapitel 9, so dass sich eine detaillierte Diskussion an dieser Stelle erübrigt.

Von den im Kriechversuch ermittelten Werten genügt es, sich im weiteren bei der Beurteilung des Kriechverhaltens bei 40 °C auf die irreversiblen Kriechdehnungen e_{ir} der Bohrkerne nach 3600 s zu konzentrieren. Dies geht aus der Gegenüberstellung der Werte der einzelnen Belagsschichten in *Abbildung 7.2* hervor. Zwischen der Kriechvergleichsgrösse e_{ir} gemäss (4.5) und dem Kriechbeanspruchungswert K_{ir} nach (4.8) besteht im vorliegenden Fall wegen der nicht allzu unterschiedlichen starken Verkehrsbelastung der untersuchten Autobahnteilstrecken ein annähernd linearer Zusammenhang.

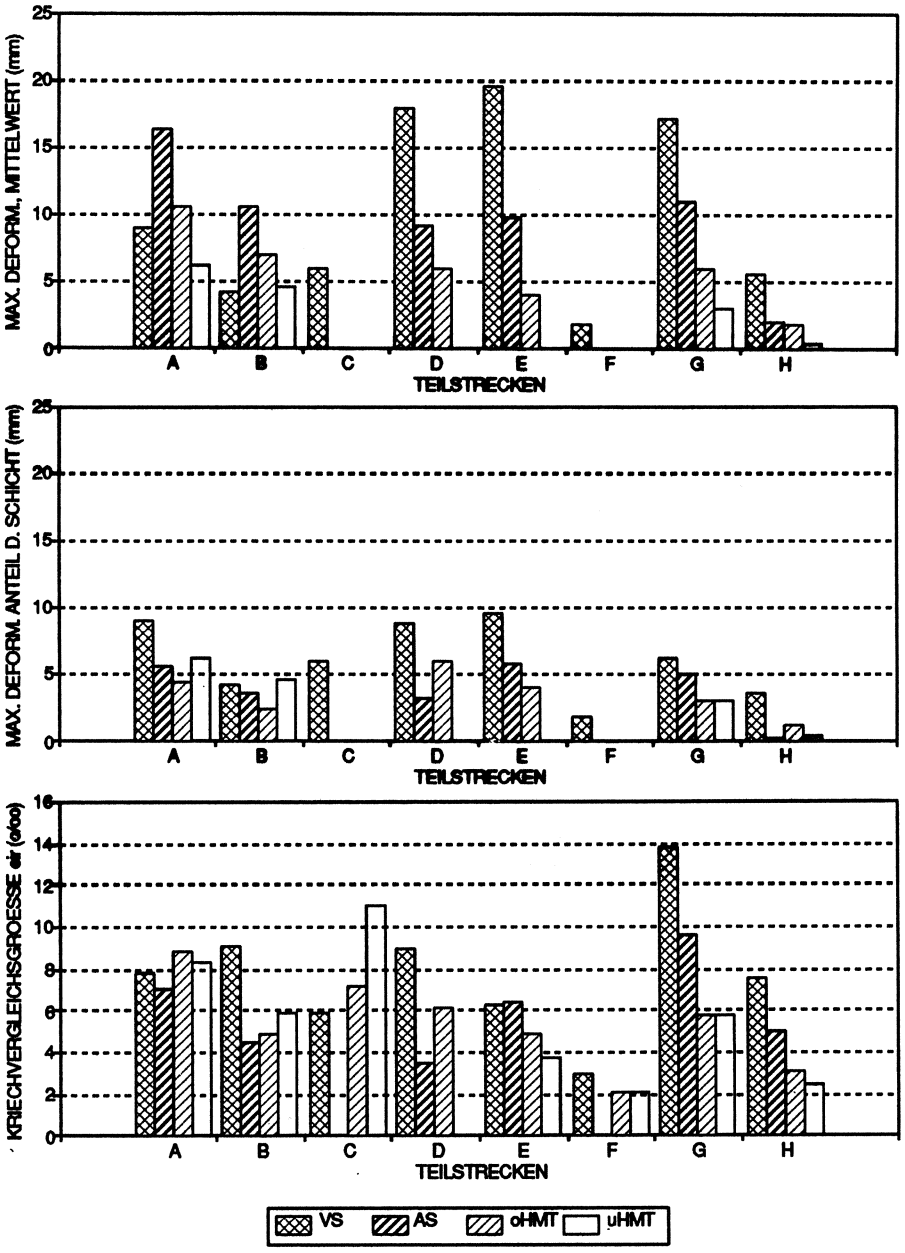


Abbildung 7.1: Bleibende Deformationen der Autobahnteilstrecken A, B, C, D, E, F, G, H. Mittelwerte aus den Belagsausschnitten für die Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT) und untere Heissmischtragschicht (uHMT). Der Abrieb der Verschleissschicht bis zum Zeitpunkt der Entnahme der Belagsausschnitte ist mit maximal 2 mm vernachlässigbar klein.
oben: maximale Querdeformation der einzelnen Schichten unter den Radspuren
Mitte: maximaler Anteil der einzelnen Schicht an der grössten Querdeformation im gesamten Belag
unten: Kriechvergleichsgrösse e_{ir} (4.5), aus den Kriechversuchen bei 40 °C, ermittelt an Bohrkernen, die ausserhalb des Radspurbereichs entnommen wurden

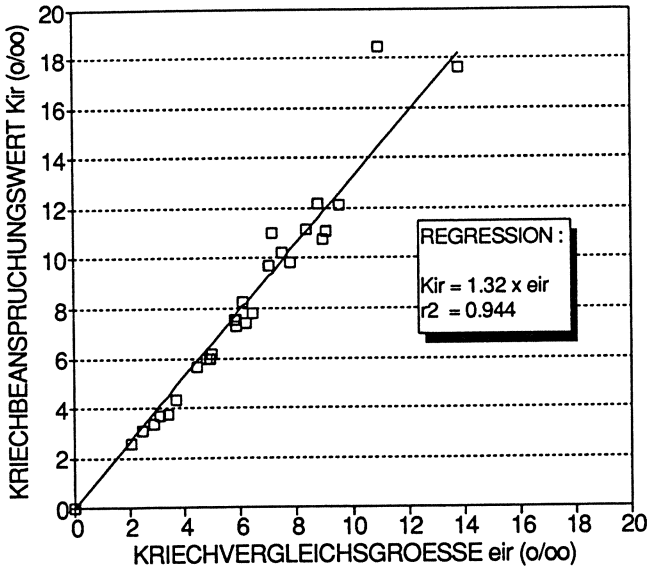


Abbildung 7.2: Zusammenhang zwischen der Kriechvergleichsgrösse e_{ir} der untersuchten Belagsschichten nach (4.5) und dem entsprechenden Kriechbeanspruchungswert K_{ir}, ermittelt in Kriechversuchen bei 40 °C an Bohrkernen, die ausserhalb des Radspurbereichs entnommen wurden

Autobahnteilstrecken A und B

In beiden seit 1966 unter Verkehr stehenden Autobahnteilstrecken traten in allen vier Schichten Deformationen auf.

Verschleissschicht AB 10 mit Bitumen B 60/70 und 3.5 Masse-% Trinidad Pulver 50/50 (eingebaut 1973 bzw. 1975):

Die vorliegenden Verschleissschichten wurden 1973 bzw. 1975 in den Autobahnteilstrecken A und B eingebaut. Vom stark bleibend deformierten Belag wurde vorgängig die bestehende Verschleissschicht entfernt. Aus heutiger Sicht war mit dieser Massnahme erwartungsgemäss das erneute Auftreten von bleibenden Deformationen nicht zu vermeiden.

Die neu eingebaute Verschleissschicht AB 10 mit einem beachtlichen Anteil an eher hartem Bindemittel (Bitumen 60/70 und 3.5 Masse-% Trinidad Pulver 50/50) ist etwas standfester als die ursprünglich eingebaute Verschleissschicht und genügend flexibel, um den erneut aufgetretenen bleibenden Deformationen der unteren Schichten rissefrei zu folgen. Entsprechend niedrig sind mit 2.4 Vol-% bzw. 2.6 Vol-% die Hohlraumgehalte der Marshall-Prüfkörper. Während sich die dünnere Verschleissschicht von Autobahnteilstrecke A durch einen relativ hohen Feinsandanteil auszeichnet, weist die sandärmere Verschleissschicht der Autobahnteilstrecke B etwas mehr Hohlräume und eine etwas kleinere Stabilität-Marshall auf.

Die ausserhalb des Radspurbereiches entnommenen Bohrkerne von Autobahnteilstrecke B zeigen gegenüber denjenigen aus Autobahnteilstrecke A im Kriechversuch bei 40°C ein stärkeres Kriechen. Die Tatsache, dass sich unter Verkehr die Verschleissschicht der Autobahnteilstrecke B verglichen mit Autobahnteilstrecke A absolut gesehen bis zur Entnahme der Belagsausschnitte trotzdem weniger bleibend deformiert hat, ist darauf zurückzuführen, dass diese Belagsschicht bis zu diesem Datum weniger belastet wurde und ausserdem auf weniger kriechanfälligen Schichten ruht.

Ausgleichsschicht AB 16 mit Bitumen B 130/150:

Diese Schicht ist bei beiden Autobahnteilstrecken A und B als zu wenig standfest zu beurteilen. Um direkt unter der Verschleissschicht als standfeste oberste Tragschicht wirken zu können, weist sie ein zu kleines Grösstkorn, mit 5.5 Masse-% bzw. 5.4 Masse-% einen zu hohen Bindemittelanteil und ein zu weiches Bindemittel auf. Die Hohlraumgehalte der Marshall-Prüfkörper bzw. der Bohrkerne betragen für die Autobahnteilstrecken A und B 2.9 Vol-% und 3.4 Vol-% bzw. 3.1 Vol-% und 3.2 Vol-%. Diese Werte sind zusammen mit der seinerzeit gewählten Mineralstoffmischung die Hauptursachen für die ermittelten Hohlraumfüllungsgrade von 80.9 % und 80 %. Letztere sind für eine oberste Tragschicht direkt unter der Verschleissschicht als zu gross zu beurteilen.

Verglichen mit Autobahnteilstrecke A wurden beim Bindemittel von Autobahnteilstrecke B tiefere Penetrations- sowie höhere dynamische Viskositätswerte bestimmt. Dies erklärt die leicht höhere Stabilität-Marshall und das etwas günstigere Verhalten im Kriechversuch sowie in situ.

Obere und untere Heissmischtragschicht HMT 32 mit Teerbitumen TB 200/500:

In beiden Autobahnteilstrecken wurde für beide Belagsschichten grundsätzlich die gleiche Rezeptur verwendet. Es handelt sich um ein in den 60er Jahren übliches Konzept mit weichem Bindemittel, Mineralstoffkörnungen bis zu einem Maximalkorn von 32 mm und - jedenfalls für die obere Heissmischtragschicht - zu geringen Anteilen an gebrochenen Mineralstoffkörnern. Die Folge davon ist eine verhältnismässig tiefe Stabilität und ein beträchtlicher Hohlraumgehalt von maximal 5.6 Vol-% bei den Marshall-Prüfkörpern der oberen Heissmischtragschicht der Autobahnteilstrecke B.

Aus *Abbildung 7.1* geht hervor, dass die Heissmischtragschichten der Autobahnteilstrecke B verglichen mit denjenigen von Autobahnteilstrecke A zu geringeren bleibenden Deformationen neigen, ein Verhalten, welches durch die Resultate der Kriechversuche bei 40 °C bestätigt wird. Im Falle der oberen Heissmischtragschicht ist dies auf den tieferen Bindemittelgehalt und im Falle der unteren Heissmischtragschicht auf das etwas härtere Bindemittel und den leicht verminderten Filleranteil zurückzuführen.

Autobahnteilstrecke C

Bis 1990 traten praktisch keine bleibenden Deformationen auf. Die leichte Spurrinnenbildungen sind, wie an den untersuchten Ausschnitten festzustellen, auf Abrieb der Verschleissschicht zurückzuführen. Allerdings wirkte sich der etwas zu hohe Penetrationsindex des löslichen Bindemittels der Verschleissschicht von 1.6 hinsichtlich Sprödigkeit und Rissbildung ungünstig aus.

Besonders bei relativ bindemittelarmen, stark bis extrem beanspruchten Verschleiss-

schichten ist darauf zu achten, dass der Penetrationsindex PI nach Belagseinbau höchstens unwesentlich über +1 liegt. Andernfalls ist mit unerwünschter Sprödigkeit und Rissbildung zu rechnen; dies selbst bei hohlraumarmen und praktisch dichten Verschleissschichten, wie im vorliegenden Fall, wo das Bindemittel in situ wegen des sehr kleinen Hohlraumgehaltes von 2.6 Vol-%. kaum merklich altern konnte.

Das beim Einbau im Jahre 1974 gewählte, damals wegweisende und noch heute durchaus moderne Konzept hat sich hinsichtlich Spurrinnenbildung sehr gut bewährt. Wesentlichste Merkmale dieses Konzeptes für stark bis extrem stark beanspruchte Beläge sind:

- Verzicht auf eine Ausgleichsschicht
- durchwegs Verwendung gebrochener Mineralstoffe (s-Schichten)
- Einsatz von Mischgutsorten mit grossem Grösstkorn, insbesondere in den Heissmischtragschichten
- Optimierung des Bindemittel-, Filler- und Feinsandgehalts
- Verwendung harter Bindemittel
- Belagsdicke etwa 240 mm. Diese erhöhte Belagsdicke genügt selbst den Dimensionierungsvorschriften gemäss Schweizer Norm SN 640'324, (1988)

Im Vergleich mit den anderen untersuchten Autobahnteilstrecken besitzen die eingebauten Heissmischtragschichten einen niederen Hohlraumgehalt. Die ermittelten Verdichtungsgrade von 102.4 % und 102.0 % belegen klar, dass diese Schichten beim Einbau sehr gut verdichtet wurden. Obwohl sich die Bohrkerne der entsprechenden Schichten im Kriechversuch bei 40 °C teilweise ungünstig verhielten, resultierten sowohl in der oberen als auch in der unteren Heissmischtragschicht dieser Autobahnteilstrecke keine messbaren bleibenden Deformationen bis 1990.

Autobahnteilstrecke D

Die untersuchten Belagsausschnitte wurden anlässlich des Totalersatzes des Belages in dieser Autobahnteilstrecke entnommen. Der Ersatz wurde aufgrund der entstandenen grossen bleibenden Deformationen vorgenommen. In allen drei Schichten traten bleibende Verformungen auf.

Verschleissschicht AB 10 mit Bitumen 180/220:

Die starken bleibenden Deformationen dieser vergleichsweise dünnen Belagsschicht sind vor allem auf den Einsatz eines zu weichen Bindemittels sowie auf den Bindemittelanteil und die Zusammensetzung der Mineralstoffmischung zurückzuführen. Zusammen mit dem Verdichtungsgrad von 99.8 % resultiert sowohl im eingebauten Belag als auch in den Marshall-Prüfkörpern ein zu niedriger Hohlraumgehalt von 2.0 Vol-% bzw. 1.8 Vol-% sowie ein für AB 10 zu hoher Hohlraumfüllungsgrad von 87.5 %. Dies erklärt auch die relativ kleine Stabilität-Marshall und das ungünstige Verformungsverhalten im Kriechversuch bei 40 °C.

Ausgleichsschicht AB 16u mit Bitumen 180/220:

Trotz des etwas weicheren Bindemittels als in der Ausgleichsschicht der Autobahnteilstrecke B zeichnet sich diese Belagsschicht der Autobahnteilstrecke D durch etwas kleinere Verformungen aus. Wegen der jedoch noch als gering zu beurteilenden Standfestigkeit trägt diese Ausgleichsschicht wenig zur Tragfähigkeit des Gesamtaufbaus bei,

so dass sich die starke Verkehrbeanspruchung nur wenig vermindert auf die Heissmischtragschicht überträgt.

Heissmischtragschicht HMT A/B 32 mit Teerbitumen TB 200/500:

Die mit Sorte A/B bezeichnete Heissmischtagschicht HMT 32 enthält weniger gebrochene Mineralstoffkörner als die für die Sorte B vorgeschriebenen 35 Masse-% und daher einen eher zu geringen Anteil an gebrochenem Material. Wie bei den beiden oberen Belagsschichten wurde ein eindeutig zu weiches Bindemittel gewählt. Die im übrigen ebenfalls nicht optimale Zusammensetzung dieser Heissmischtragschicht führte auch zu einer ausgesprochen tiefen Stabilität-Marshall und zu einem beachtlichene Kriechen bei 40 °C.

Autobahnteilstrecke E

Der 1970 unter Verkehr genommene und anlässlich dieser Forschungsarbeit untersuchte Belag eines stark beanspruchten Kriechstreifens erlitt sehr rasch grosse bleibende Deformationen (*Abbildung 6.1*). Im Jahre 1978 wurden die Verschleissschicht, die Ausgleichsschicht und der grösste Teil der oberen Heissmischtragschicht bis zu einer Tiefe von insgesamt 120 mm ersetzt. Die untere Heissmischtragschicht wies keine bleibenden Deformationen auf und wurde belassen. Bei der Sanierung wurde aufgrund der gemachten Erfahrungen für die neue Heissmischtragschicht ein Mischgutkonzept mit grösserem Grösstkorn und ausschliesslich gebrochenem Gesteinsmaterial (s-Schicht) realisiert.

In allen vier seit 1970 befahrenen Belagsschichten wurde Teerbitumen TB 2000 eingebaut, ein verhältnismässig hartes Bindemittel, welches im Hinblick auf die starke Beanspruchung eines Kriechstreifens gewählt wurde. Nachträglich ist allerdings festzustellen, dass nach heutigen Gesichtspunkten die sonnenexponierte Lage mit grosser Steigung und die starke Beanspruchung des Kriechstreifens durch den langsamen Schwerverkehr nicht zuletzt auch hinsichtlich Schub in ihren Auswirkungen unterschätzt wurde. Der Einsatz des verwendeten Teerbitumens TB 2000 in den oberen Belagsschichten zusammen mit den generell zu wenig standfest gewählten Schichten in einem Belag mit relativ geringer Gesamtdicke sowie das damalige Belagskonzept mit Verschleiss- und Ausgleichsschicht hat sich in diesem extremen Fall nicht bewährt.

Verschleissschicht TA 16 mit Teerbitumen TB 2000:

Nachteilig auf den Widerstand gegen bleibende Deformationen ausgewirkt hat sich neben den bereits erwähnten Gründen hauptsächlich auch der mit 5.71 Masse-% beachtliche Bindemittelanteil in der Verschleissschicht, der sich in einem entsprechend niedrigen Hohlraumgehalt der Bohrkerne und der Marshall-Prüfkörper äussert. Hinzu kommt der für diese Mischgutsorte eher hohe Anteil an feinen Mineralstoffkörnern. Dies führt zu einem verhältnismässig hohen Hohlraumfüllungsgrad.

Ausgleichsschicht TA 25u mit Teerbitumen TB 2000:

Die Ausgleichsschicht TA 25u wurde verglichen mit den untersuchten Autobahnteilstrecken grobkörnig, jedoch bindemittelreich gewählt. Bei der Ausgleichsschicht handelt es sich also um ein relativ bindemittelreiches Konzept. Allerdings gelang es auch unter Verwendung ausschliesslich gebrochener Mineralstoffe nicht, eine für die hohe

Beanspruchung ausreichend standfeste und gegen bleibende Deformationen genügend widerstandsfähige Belagsschicht zu erzielen.

Obere und untere Heissmischtragschicht HMT B 32 mit Teerbitumen TB 2000:

Beide Heissmischtragschichten sind im wesentlichen gleich hinsichtlich Zusammensetzung und Eigenschaften. Die obere Heissmischtragschicht erlitt deutliche bleibende Deformationen; die untere Heissmischtragschicht dagegen wurde praktisch nicht verformt.

Mit den vorliegenden Materialkomponenten hätten die beiden Heissmischtragschichten HMT B 32 nicht wesentlich standfester gemacht werden können. In Anbetracht der verwendeten harten Bindemittel (Penetration bei 25 °C von 25 x 0.1 mm) muss geschlossen werden, dass die Mischgutsorte HMT B 32 in der oberen Heissmischtragschicht für starke bis extrem starke Beanspruchungen nicht ausreicht. Wie das bei der Sanierung gewählte Konzept zeigt, ist eine Mischgutsorte mit grösserem Maximalkorn und durchwegs gebrochenen Mineralstoffkörnungen (s-Schicht) zu verwenden.

Autobahnteilstrecke F

Vom Einbau im Jahre 1975 bis zum Ersatz der stark gerissenen Verschleissschicht AB 16s im Jahre 1987 traten kaum nennenswerte bleibende Verformungen auf. Der Belagsaufbau folgt einem zur Autobahnteilstrecke C weitgehend ähnlichen Konzept.

Der äusserst standfeste, relativ dicke Belag hat sich hinsichtlich Spurrinnenbildung sehr gut bewährt. Alle Belagsschichten der Autobahnteilstrecke F zeigten im Kriechversuch bei 40 °C ebenfalls ein sehr günstiges Verhalten. Im Vergleich zu Autobahnteilstrecke C wurde aber insbesondere in der Verschleissschicht der Autobahnteilstrecke F ein härteres Bindemittel, ein kleinerer Bindemittelanteil und ein höherer Anteil an Filler sowie Sand eingesetzt. Auffallend sind die Penetrationsindices der Bindemittel aller Schichten von +2 für die Verschleissschicht bzw. von +1.9 und + 1.7 für die obere und untere Heissmischtragschicht. Da derart hohe Werte des Penetrationsindexes erfahrungsgemäss kaum dem Bindemittel im Anlieferungszustand zugeordnet werden können, ist mit grosser Wahrscheinlichkeit zu vermuten, dass im vorliegenden Fall übermässige Alterungerscheinungen aufgetreten sind (sei es infolge Alterung des Bindemittels von der Herstellung des Mischgutes bis zum Einbau des Belags, sei es im Belag durch atmosphärische Einflüsse).

Die grosse Sprödigkeit der Verschleissschicht und deren Neigung zur Rissbildung ist eine Folge der erwähnten Eigenschaften sowie vor allem des zu grossen Hohlraumgehalts der Bohrkerne aus der Verschleissschicht von 7.3 Vol-%.

Autobahnteilstrecken G und H

Die Autobahnteilstrecken G und H, in verschiedenen Kantonen gelegen, befinden sich zwischen denselben Aus- und Einfahrten und wurden gleichzeitig dem Verkehr übergeben. Sie weisen demzufolge identische Beanspruchungen durch Verkehr und Klima auf und sind daher in dieser Hinsicht direkt vergleichbar.

Beide Autobahnteilstrecken wurden 1972 in Betrieb genommen. Im Belag der Autobahnteilstrecke G bildeten sich bis zur Entnahme der Belagsausschnitte im Jahre 1979 sehr deutliche Spurrinnen, die auf bleibende Deformationen in allen vier Schichten zu-

rückzuführen sind (*Abbildung 6.1*). Der Belagsaufbau liefert ein treffendes Beispiel dafür, dass eine genügend grosse Belagsdicke allein kein ausreichendes Mittel zur Verhinderung von Spurrinnen darstellt.

Durch denselben Verkehr beansprucht, traten in der Autobahnteilstrecke H deutlich geringere Spurrinnen auf, die weniger als 30 % derjenigen der Autobahnteilstrecke G betrugen. Nicht deformiert ist die Ausgleichsschicht, die allerdings mit nur 31 mm für die Mischgutsorten mit Grösstkorn 16 mm eine äusserst geringe Schichtdicke aufweist.

Aehnlich wie beim Kriechstreifen der Autobahnteilstrecke E wurde auch bei der Autobahnteilstrecke H mit Blick auf die starke Beanspruchung der Normalfahrstreifen in allen vier Belagsschichten Bindemittel TB 2000 eingesetzt. In der Verschleissschicht wurde ausserdem wie bei der Autobahnteilstrecke G 1.25 Masse-% Trinidad Epuré zugegeben. Der gegenüber Autobahnteilstrecke G bedeutend standfestere Belag ist somit hauptsächlich auf die Wahl eines härteren Bindemittels zurückzuführen. Für sämtliche entsprechenden Schichten dieser beiden Autobahnteilstrecken sowie für das Verhalten im Kriechversuch bei 40 °C trifft diese Feststellung ebenfalls zu.

Verschleissschichten mit Grösstkorn 16 mm mit Bitumen B 80/100 bzw. Teerbitumen TB 2000 und jeweils 1.25 Masse-% Trinidad Epuré:

Als Hauptursache für den geringen Widerstand gegen bleibende Verformungen ist das für AB 16 mit Bitumen B 80/100 und 1.25 Masse-% Trinidad Epuré zu dichte Mischgutkonzept der Verschleissschicht von Autobahnteilstrecke G anzusehen, welches mit 6.14 Masse-% durch einen extrem hohen Anteil an relativ weichem Bindemittel und zudem durch die gewählte Zusammensetzung der Mineralstoffkomponenten sowie den daraus resultierenden tiefen Hohlraumgehalt der Marshall-Prüfkörper von nur 1.6 Vol-% gekennzeichnet ist. Das schlechte Verhalten in der Praxis wird durch die Resultate der Kriechversuche bei 40 °C bestätigt.

Rund zwei Drittel der bleibenden Deformationen des Belages der Autobahnteilstrecke H sind in der Verschleissschicht TA 16 mit Teerbitumen TB 2000 und 1.25 Masse-% Trinidad Epuré aufgetreten. Der Hohlraumgehalt der entnommenen Bohrkerne und der Marshall-Prüfkörper dieser filler- und eher bindemittelreichen Belagsschicht beträgt lediglich 2.6 Vol-% und 2.0 Vol-%. Bei einem Verdichtungsgrad von 99.3 % ergibt sich ein Hohlraumfüllungsgrad der eingebauten Belagsschicht von über 83.3 %. Verglichen mit der Autobahnteilstrecke G hat jedoch die Verschleissschicht von H nur etwa halb so grosse bleibende Deformationen erfahren. Entsprechend dem unterschiedlichen Verhalten der Schichten in situ resultierten auch unterschiedliche Werte im Kriechversuch.

Ausgleichsschichten mit Grösstkorn 16 mm mit Bitumen B 80/100 bzw. Teerbitumen TB 2000:

Zum Bindemittel der Ausgleichsschichten sowie der Heissmischtragschichten der beiden Autobahnteilstrecken G und H wurde kein Trinidad-Naturasphalt zugesetzt. Verglichen mit den Verschleisschichten ist das Bindemittel der Ausgleichsschicht der Autobahnteilstrecke G deutlich weicher, während dasjenige der Ausgleichsschicht von Autobahnteilstrecke H praktisch gleich und als hart zu beurteilen ist. Die Bindemittelanteile der Ausgleichsschichten sind geringer als diejenigen der Verschleissschichten, aber für stark beanspruchte Belagsschichten dieses Typs mit 5.44 Masse-% (G) und 5.30 Masse-% (H) als sehr hoch zu bezeichnen. Bei der Ausgleichsschicht der Autobahnteilstrecke G beträgt der Hohlraumgehalt-Marshall 2.3 Vol-%, und der Hohlraumgehalt der Bohrkerne ist mit 4.7 Vol-% wider Erwarten hoch. Dies sowie der ermittelte Verdichtungsgrad von 97.5% lassen auf eine etwas zu wenig intensive Verdichtung beim Einbau schliessen.

Die Ausgleichsschicht der Autobahnteilstrecke G ist verglichen mit den entsprechenden Schichten der anderen untersuchten Autobahnteilstrecken gekennzeichnet durch eine geringe Dicke von nur 31 mm. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass ein extrem dünnschichtiger Einbau von Mischgut grundsätzlich sehr hohe Anforderungen stellt und damit entsprechend heikel ist.

Obwohl die Ausgleichsschicht mit 16.1 kN eine beachtliche Stabilität-Marshall und im Kriechversuch 40 °C ein recht günstiges Verhalten aufweist, stellt diese Mischgutsorte nach den heutigen Erfahrungen für die Verwendung als stark beanspruchte tragende Belagsschicht keine geeignete Lösung dar, ist sie doch aufgrund ihres Verhaltens als relativ nachgiebig anzusehen. Da nämlich in den darunter liegenden Heissmischtragschichten bleibende Verformungen auftraten, deformierte sich die untersuchte Ausgleichsschicht bleibend ohne eigene Dickenänderung und leistete somit kaum einen Beitrag zur Gesamttragfähigkeit der Belages.

Obere und untere Heissmischtragschicht HMT 32 mit Bitumen B 80/100 bzw. Teerbitumen TB 2000:

Die oberen und unteren Heissmischtragschichten HMT 32 mit Teerbitumen TB 2000 der Autobahnteilstrecke H haben sich verglichen mit denjenigen von G mit Bitumen B 80/100 kaum bleibend deformiert. Das stark unterschiedliche Verhalten ist im wesentlichen begründet durch:

- weiches Bindemittel in der Autobahnteilstrecke G (Penetration bei 25 °C von 50 bzw. 54 x 0.1 mm)
- hartes Bindemittel in der Autobahnteilstrecke H (Penetration bei 25 °C von 25 bzw. 24 x 0.1 mm)
- sehr hohe Hohlraumfüllungsgrade mit Bitumen in den Heissmischtragschichten der Autobahnteilstrecke G

7.2 Vergleich der Autobahnteilstrecken hinsichtlich Materialeigenschaften

Im folgenden wird eine Beurteilung und ein Vergleich der Autobahnteilstrecken aufgrund der materialtechnischen Untersuchungen vorgenommen. Spezielles Augenmerk gilt dabei dem Verhalten der Beläge in situ sowie den Kriecheigenschaften bei 40 °C, repräsentiert durch die in (4.5) definierte Kriechvergleichsgrösse e_{ir} und ermittelt an Bohrkernen, die ausserhalb des Radspurbereichs entnommen wurden. Im selben Diagramm dargestellt werden jeweils die Belagsschichten gleicher Nutzung und damit ähnlicher Beanspruchung, namentlich Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere und untere Heissmischtragschicht (oHMT und uHMT). Die Daten zu den einzelnen Autobahnteilstrecken sind entsprechend ihrer Zuordnung mit den Buchstaben A, B, C, D, E, F, G, H markiert.

Wie *Abbildung 7.3* zeigt, besteht tatsächlich ein recht deutlicher tendenzieller Zusammenhang zwischen der Grösse e_{ir} und dem maximalen Anteil (in mm) der einzelnen Belagsschicht an der Stelle mit der jeweils grössten bleibenden Verformung des gesamten Belags. Offenbar bergen die Belagsschichten mit ungünstigen Kriecheigenschaften allgemein auch ein erhöhtes Risiko zu bleibenden Deformationen und damit zur Bildung von Spurrinnen in sich. Selbstverständlich kann ein Zusammenhang in dieser einfachen Form lediglich genereller qualitativer Natur sein. Dies geht auch aus dem vorhergehenden Abschnitt 7.1 hervor, der die Vielfalt der teilweise gegenläufigen Einflussgrössen verdeutlicht und die beachtlichen Unterschiede zwischen den untersuchten

Autobahnteilstrecken bezüglich Belagsaufbau, Materialien und deren anteilmässiger Zusammensetzung, den Einbaubedingungen sowie den Belastungsgeschichten demonstriert.

In *Abbildung 7.3* deutlich erkennbar sind aber auch offensichtliche Ausnahmen, die vom erwähnten tendenziellen Zusammenhang zwischen e_{ir} und dem maximalen Deformationsanteil der Schichten abweichen und spezieller Erläuterung bedürfen. Beispielsweise resultierten für die Verschleissschicht der Autobahnteilstrecke E im Kriechversuch relativ günstige Werte, während sich offensichtlich in der sonnenexponierten Kriechspur durch die extreme Beanspruchung des langsamen Schwerverkehrs verglichen mit anderen Autobahnteilstrecken grosse bleibende Deformationen bildeten. Beim Praxisverhalten der Verschleissschicht der Autobahnteilstrecke B ist zu berücksichtigen, dass diese Schicht erst drei Jahre vor Entnahme der Belagsausschnitte erneuert wurde. Das eher ungünstige Kriechverhalten der Ausgleichsschicht von Autobahnteilstrecke H wirkt sich in der Praxis kaum aus, da diese Ausgleichsschicht mit einem Grösstkorn von 16 mm in sehr kleiner Schichtdicke (nur 31 mm) eingebaut wurde. Die obere und untere Heissmischtragschicht der Autobahnteilstrecke C verhält sich in der Praxis extrem positiv, jedoch resultierten im Kriechversuch bei 40 °C Kriechvergleichsgrössen e_{ir}, die unerklärbar gross sind. Deshalb wurden gemäss (4.5) auch die materialspezifischen Parameter a_{ir} und q_{ir} als weitere Kenngrössen zur Beurteilung herangezogen (vgl. *Abbildung 7.4* und *Abbildung 7.5*). Aufgrund von *Abbildung 7.4* kann das her-

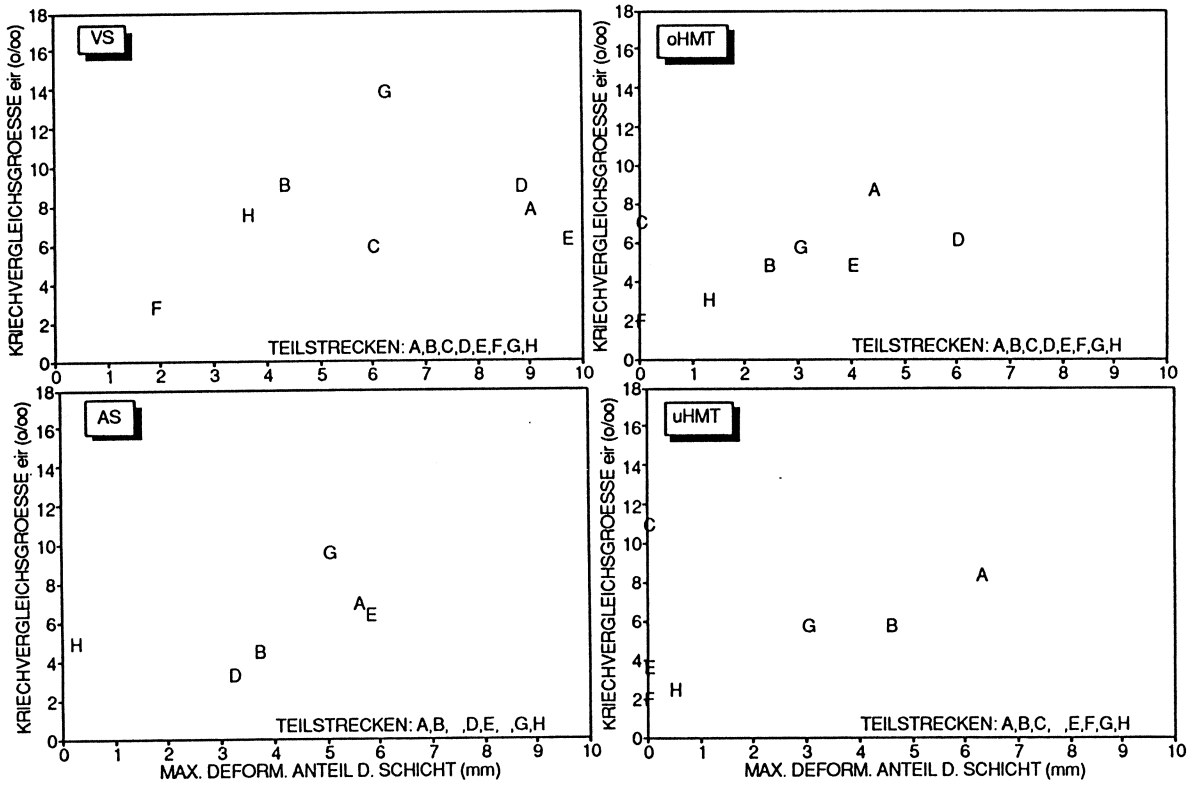


Abbildung 7.3: Kriechvergleichsgrösse e_{ir} (‰) aus den Kriechversuchen bei 40 °C, ermittelt an Bohrkernen ausserhalb des Radspurbereiches, verglichen mit dem maximalen Anteil (mm) der einzelnen Schicht an der grössten bleibenden Deformation des gesamten Belags

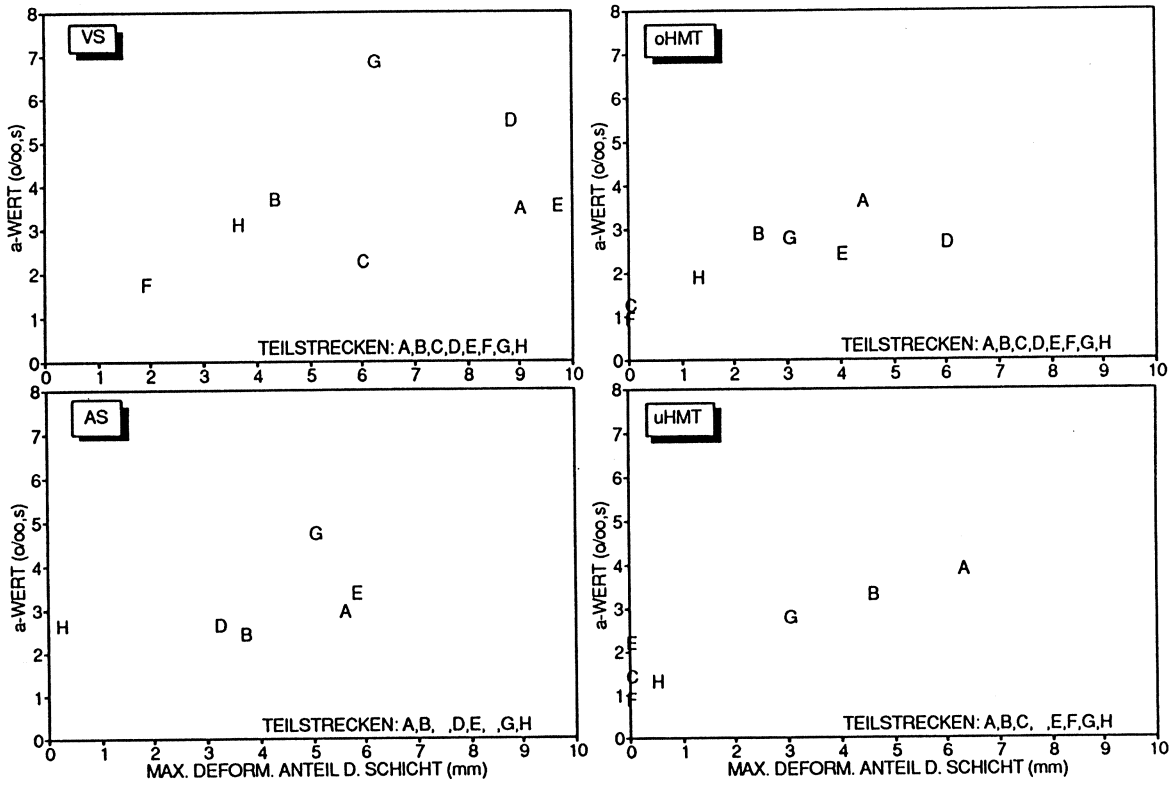


Abbildung 7.4: a_{ir}-Wert (°/oo,s) gemäss (4.5) aus den Kriechversuchen bei 40 °C, ermittelt an Bohrkernen ausserhalb des Radspurbereiches, verglichen mit dem maximalen Anteil (mm) der einzelnen Schicht an der grössten bleibenden Deformation des gesamten Belags

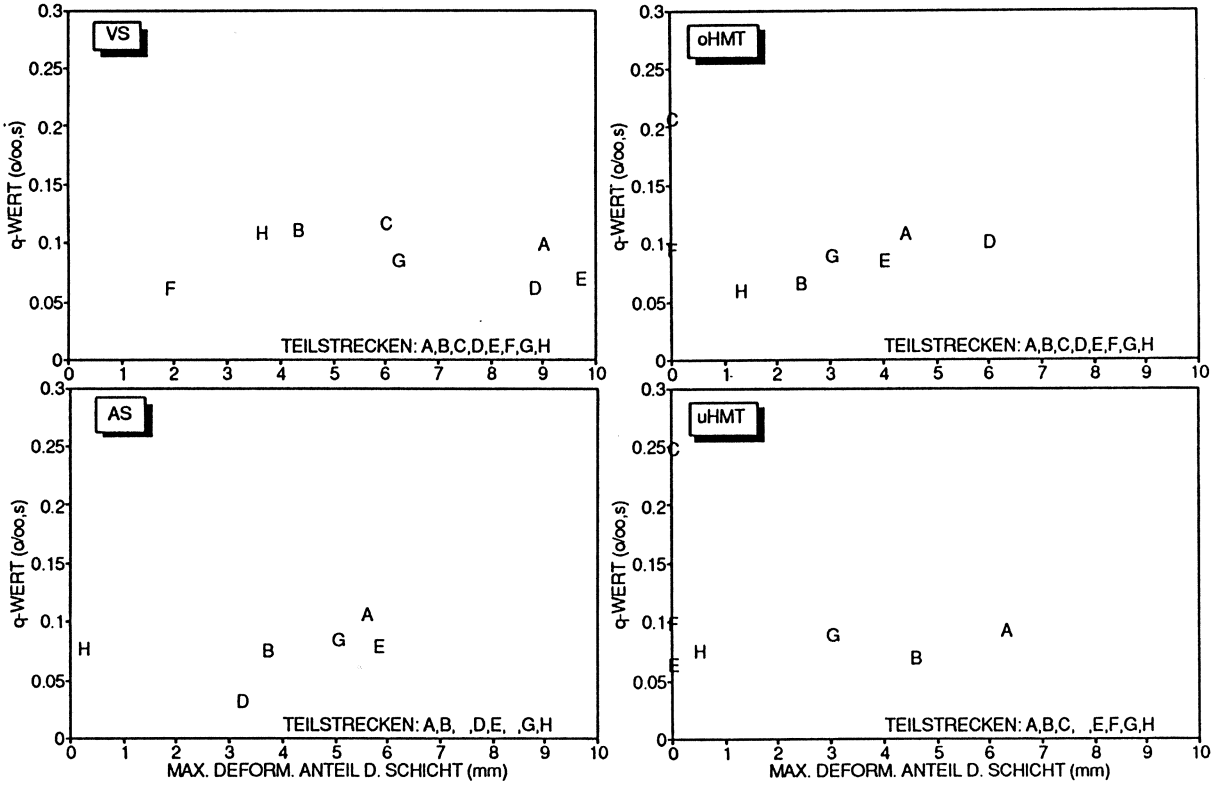


Abbildung 7.5: q_{ir}-Wert (°/oo,s) gemäss (4.5) aus den Kriechversuchen bei 40 °C, ermittelt an Bohrkernen ausserhalb des Radspurbereiches, verglichen mit dem maximalen Anteil (mm) der einzelnen Schicht an der grössten bleibenden Deformation des gesamten Belags

vorragende Verhalten der oberen und unteren Heissmischtragschicht von Autobahnteilstrecke C in der Praxis hinsichtlich bleibender Verformungen durch den Vergleich mit dem Wert a_{ir} der ebenfalls kaum bleibend deformierten entsprechenden Belagsschicht der Autobahnteilstrecke F erklärt werden. Der für beide Autobahnteilstrecken geringe Wert der Grösse a_{ir} deutet auf ein günstiges Deformationsverhalten bei kurzzeitiger Belastung hin. Das im Kriechversuch beobachtete Verhalten der Heissmischtragschichten von Autobahnteilstrecke C ist somit hauptsächlich auf die grossen q_{ir}-Werte, bzw. die grosse Kriechgeschwindigkeit bei länger dauernder konstanter Lasteinwirkung zurückzuführen.

In *Abbildung 7.6* bis *Abbildung 7.17* und *Abbildung 7.19* bis *Abbildung 7.21* ist jeweils die irreversible Kriechdehnung von Bohrkernen ausserhalb des Radspurbereichs nach 3600s (Kriechvergleichsgrösse e_{ir}) bei 40 °C, aufgetragen in Funktion von:

- Volumetrische Kenngrössen:

  Hohlraumgehalt der Belagsschicht in Vol-% (*Abbildung 7.6*), Hohlraumfüllungsgrad der Belagsschicht mit Bindemittel in % (*Abbildung 7.7*), Hohlraumgehalt-Marshall HM in Vol-% (*Abbildung 7.8*), Hohlraumfüllungsgrad-Marshall mit Bindemittel in % (*Abbildung 7.9*) und Verdichtungsgrad in % (*Abbildung 7.10*). Zusätzlich in *Abbildung 7.11* dargestellt ist ausserdem der Hohlraumfüllungsgrad der Belagsschicht in Funktion vom Hohlraumfüllungsgrad-Marshall.

- Kenngrössen des rückgewonnenen löslichen Bindemittels:

  Anteil an löslichem Bindemittel in Masse-% (*Abbildung 7.12*), Penetration bei 25 °C in 0.1 mm (*Abbildung 7.13*), Brechpunkt nach Fraass in °C (*Abbildung 7.14*), Penetrationsindex (*Abbildung 7.15*), Dynamische Viskosität bei 130 °C in 0.1 Pas (*Abbildung 7.16*), Erweichungspunkt Ring und Kugel °C (*Abbildung 7.17*). *Bemerkung:* die Penetration bei 35 °C in 0.1 mm ist im Anhang dargestellt.

- Kenngrössen der Mineralstoffkörnung:

  Filleranteil < 0.08 mm in Masse-% (*Abbildung 7.18*) sowie Sand- und Filleranteil < 3.15 mm in Masse-% (*Abbildung 7.19*)

- Kenngrössen der Marshall-Prüfung:

  Stabilität SM in kN (*Abbildung 7.21*), Fliessen FM in mm (*Abbildung 7.22*) sowie das Verhältnis SM/FM in kN/mm (*Abbildung 7.23*). Zusätzlich in *Abbildung 7.20* dargestellt ist ausserdem SM in Funktion von FM.

Für die Hohlraumgehalte in *Abbildung 7.6* und *Abbildung 7.8* sowie die Hohlraumfüllungsgrade in *Abbildung 7.7* und *Abbildung 7.9* der einzelnen Belagsschichten bzw. der entsprechenden Marshall-Prüfkörper lassen sich in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir} keine signifikanten Zusammenhänge erkennen. Aufgrund der Hohlraumgehalte ergibt sich daher in weiten Bereichen namentlich für die Werte zwischen 2 und 5 Vol-% keine Differenzierung der Beläge. Bei der untersuchten Verschleissschicht der Autobahnteilstrecke F mit einem zu hohen Hohlraumgehalt von deutlich über 6 Vol-% ist eine vergleichsweise starke Sprödigkeit und Rissanfälligkeit zu verzeichnen, eine Feststellung, die sich auch in der entsprechend kleinen Kriechvergleichsgrösse e_{ir} widerspiegelt. Erfahrungsgemäss wirkt bei bituminösen Belägen ein tiefer Hohlraumgehalt bzw. ein hoher Hohlraumfüllungsgrad einer übermässigen oxidativen Alterung des Bindemittels und damit einer raschen Versprödung entgegen. In diesem Sinne ist beispielsweise die Verschleissschicht der Autobahnteilstrecke D günstig zu beurteilen; das

Kriechverhalten sowie der Widerstand gegenüber bleibenden Deformationen in der Praxis ist jedoch bei dieser Schicht äusserst schlecht.

Zwischen dem Verdichtungsgrad und der Kriechvergleichsgrösse e_{ir} zeigt sich in *Abbildung 7.10* keine Abhängigkeit. Die enge Bandbreite des Verdichtungsgrades im vorliegenden Fall ist aber Ausdruck der allgemeinen guten Einbauqualität der einzelnen Belagsschichten und unterstreicht, dass die Vergleichbarkeit der untersuchten Autobahnteilstrecken grundsätzlich nicht durch offensichtliche Einbaumängel beeinträchtigt ist.

Die Hohlraumfüllungsgrade der einzelnen Belagsschichten sind in *Abbildung 7.11* in Funktion der Hohlraumfüllungsgrade der Marshall-Prüfkörper aufgetragen. Offensichtlich gruppieren sich die Werte eng um die Diagonale der Darstellung. Dies verdeutlicht, dass bei vorschriftsgemässer Ausführung von Belagsschichten hinsichtlich Hohlraumfüllungsgrad von Bohrkernen und Marshall-Prüfkörpern grundsätzlich ähnliche Aussagen erwartet werden dürfen.

In Bezug auf die Kenngrössen des rückgewonnenen löslichen Bindemittels ist für den Anteil an löslichem Bindemittel ebenfalls keine Beziehung zur Kriechvergleichsgrösse e_{ir} nachweisbar (*Abbildung 7.12*).

Wie aus *Abbildung 7.13* hervorgeht, ergeben sich dagegen für die Penetration in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir} relativ deutliche Abhängigkeiten, indem weichere Bindemittel tendenziell zu grösseren Werten von e_{ir} führen. Dieser markante Einfluss der Bindemittelkonsistenz auf die Kriechvergleichsgrösse e_{ir} wird auch durch *Abbildung 7.16* und *Abbildung 7.17* untermauert. Allerdings ist auch klar ersichtlich, dass weitere wichtige Parameter, wie Bindemittelanteil, Grösstkorn und Mineralstoffgemisch, das Kriechverhalten massgeblich mitbeeinflussen.

Zwischen dem Brechpunkt nach Fraass und der Kriechvergleichsgrösse e_{ir} (*Abbildung 7.14*) ist allgemein kein eindeutiger Zusammenhang festzustellen. Der hohe Brechpunkt nach Fraass der Verschleissschicht von Autobahnteilstrecke F bei gleichzeitig geringer Kriechneigung deckt sich jedoch mit der in der Praxis festgestellten Rissanfälligkeit dieses Belages. *Abbildung 7.15* demonstriert ebenfalls die aussergewöhnliche Sprödigkeit der Bindemittel von Autobahnteilstrecke F. Nach dreijähriger Gebrauchsdauer liegt der Penetrationsindex des rückgewonnenen löslichen Bindemittels der Verschleissschicht bei +2 und derjenige der oberen und unteren Heissmischtragschicht bei +1.9 und + 1.7. Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass derart hohe Werte des Penetrationsindexes erfahrungsgemäss kaum dem Bindemittel im Anlieferungszustand zugeordnet werden können. Mit grosser Wahrscheinlichkeit ist daher zu vermuten, dass im vorliegenden Fall übermässige Alterungserscheinungen aufgetreten sind. Bemerkenswert ist ebenfalls der zu hohe Penetrationsindex PI des Bindemittels der hohlraumarmen und relativ dichten Verschleissschicht der Autobahnteilstrecke C.

Die Darstellungen von Filler- sowie Filler- und Sandanteil in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir} lassen keine signifikanten Abhängigkeiten erkennen (*Abbildung 7.18* und *Abbildung 7.19*). Um solche Zusammenhänge grundsätzlich feststellen zu können, müssten die anderen mischungsrelevanten Parameter, deren Einfluss sich offensichtlich überlagert, in engen Grenzen konstant gehalten werden.

Bezüglich Kenngrössen der Marshall-Prüfung (*Abbildung 7.20* bis *Abbildung 7.23*) ist es vor allem darauf hinzuweisen, dass das Fliessen-Marshall FM tatsächlich kaum Aussagen bezüglich Kriechverhalten ermöglicht (*Abbildung 7.22*). Bei allen Belagsschichten liegen die FM-Werte unabhängig vom Kriechverhalten bei 40 °C innerhalb einer relativ engen Bandbreite von etwa 1 mm, wobei sich eine Parallelverschiebung um etwa 1 mm ergibt zwischen dem Wertebereich der obersten und untersten Belagsschichten. Dies zeigt, dass Kriechversuche an Bohrkernen hinsichtlich bleibender Deformationen besser zu differenziern vermögen als Marshall-Versuche.

Trotz der relativ beschränkten, statistisch nicht relevanten Zahl untersuchter repräsentativer Autobahnteilstrecken lässt sich aus *Abbildungen 7.6* bis *Abbildung 7.23* augenfällig ableiten, dass die bisher in den Schweizer Normen enthaltenen Untersuchungsmethoden und die verschiedenen daraus resultierenden Kenngrössen alleine keine eindeutigen, zweifelsfreien und durchwegs gültigen Aussagen über die Bildung bleibender Deformationen in der Praxis ermöglichen. Ebenso liefern diese Kenngrössen losgelöst betrachtet keine klaren Aussagen bezüglich Kriechverhalten von Bohrkernen im Labor. Es sind jedoch gewisse Tendenzen erkennbar, die vorsichtige Hinweise über Zusammenhänge vermuten lassen und gleichzeitig Hinweise über die Aussagemöglichkeiten verschiedener heute üblicher Einflussgrössen erlauben.

Allgemein ist darauf hinzuweisen, dass die erwähnten Darstellungen jeweils losgelöst nur als Hilfsmittel und Orientierungshilfe zur umfassenderen Interpretation der Zusammenhänge angesehen werden dürfen. Insbesondere sind andeutungsweise in den Diagrammen sich abzeichnende, möglicherweise erkennbare Tendenzen stets in Verbindung mit anderen Einflussgrössen zu sehen. Die grosse Bandbreite und Unschärfe dieser Zusammenhänge untermauert nicht zuletzt auch die Wichtigkeit, sich bei der Beurteilung und Abschätzung des Verhaltens von Strassenbelägen nicht alleine auf die Betrachtung einiger weniger Einflussgrössen zu verlassen. In diesem Sinne bedeutet Optimieren von Mischgut nach der geeigneten Wahl von Bindemittel und Mineralstoffen sowohl Variieren des Bindemittelgehalts als auch Variieren der Mineralstoffmischungen. Bei isolierter Betrachtung einzelner Parameter ist oft mit nicht zutreffenden Aussagen zu rechnen. Zutreffende Aussagen sind erst in vergleichenden Serienuntersuchungen möglich, wie sie im Rahmen von Eignungsprüfungen notwendig sind. Aus diesen Gründen ist auch kein einfacher Zusammenhang zwischen einzelnen Einflussgrössen (wie Filler- oder Bindemittelgehalt) in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir} zu erwarten.

Im Bewusstsein dieser Erkenntnisse und Einschränkungen lassen sich anhand von *Abbildung 7.6* bis *Abbildung 7.23* somit folgende allgemeine Feststellungen treffen:

Erhöhte Weichheit des Bitumens und zunehmende Füllung der Hohlräume mit Bitumen weist somit bei praktisch allen Belagsschichten auf ein wachsendes Risiko bleibender irreversibler Deformationen hin, wobei sich Zusammensetzung, Mineralstoffmischungen, Kornform und Anteil an löslichem Bindemittel eindeutig auswirkt. Im übrigen führt auch ein hartes Bindemittel nicht immer a priori zu geringeren Kriechverformungen, wie das Beispiel der unteren Heissmischtragschicht der Autobahnteilstrecke C demonstriert (z.B. *Abbildung 7.13*). In diesem Fall scheint der Einfluss des extrem tiefen Hohlraumgehaltes der Bohrkerne die Vorteile des härteren Bindemittels zu überwiegen (*Abbildung 7.6*).

Die Eignung eines bituminösen Mischgutes als Deck- und Tragschichtmaterial für höchste Beanspruchungen lässt sich mit den bisher in den Schweizer Normen enhaltenen Prüfungen nur ungenügend feststellen. Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen, dass einzelne der üblicherweise bestimmten Mischgut- und Belagseigenschaften, einschliesslich einiger dieser Ergebnisse in Kombination, für die Beurteilung des mechanischen Verhaltens von stark beanspruchten bituminösen Belägen nicht ausreichen. Kriechuntersuchungen liefern teilweise aussagekräftigere Beurteilungskriterien (*Abbildung 7.3*).

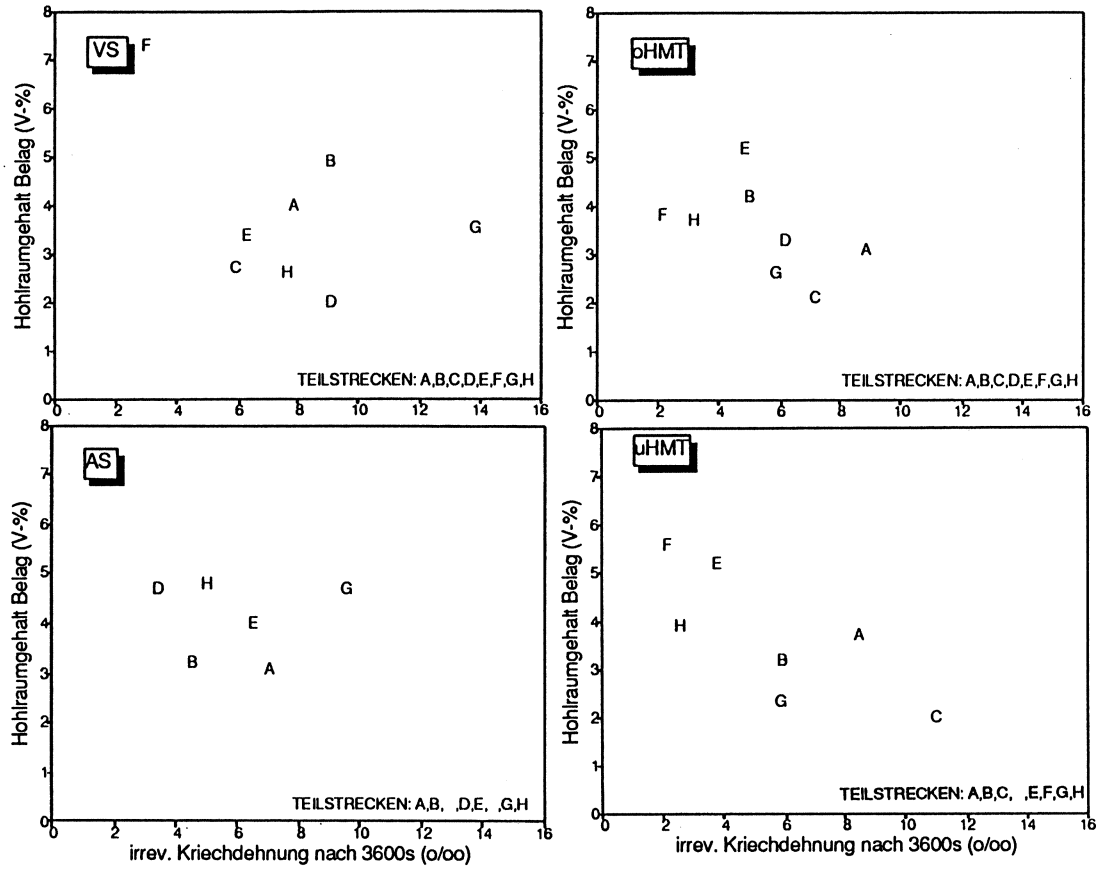


Abbildung 7.6: **Hohlraumgehalt der Belagsschichten in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}**

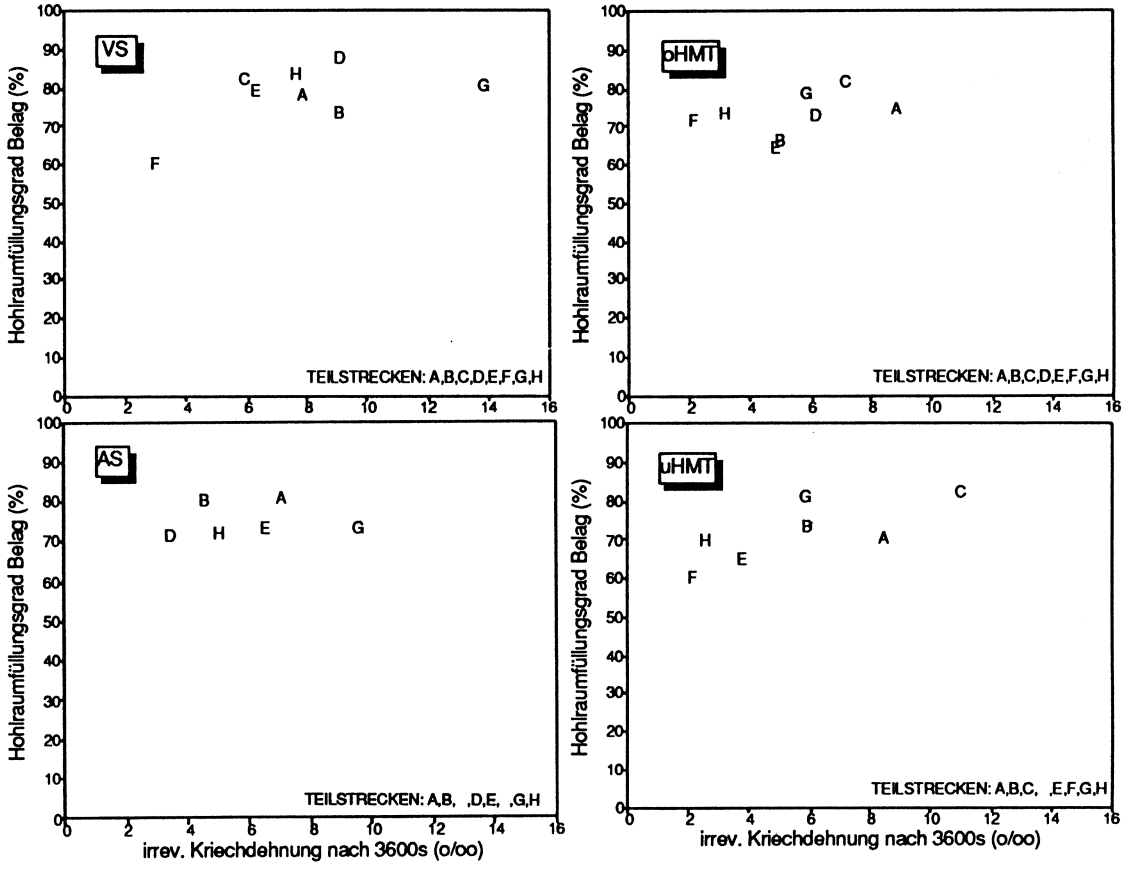


Abbildung 7.7: **Hohlraumfüllungsgrad der Belagsschichten mit Bindemittel in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}**

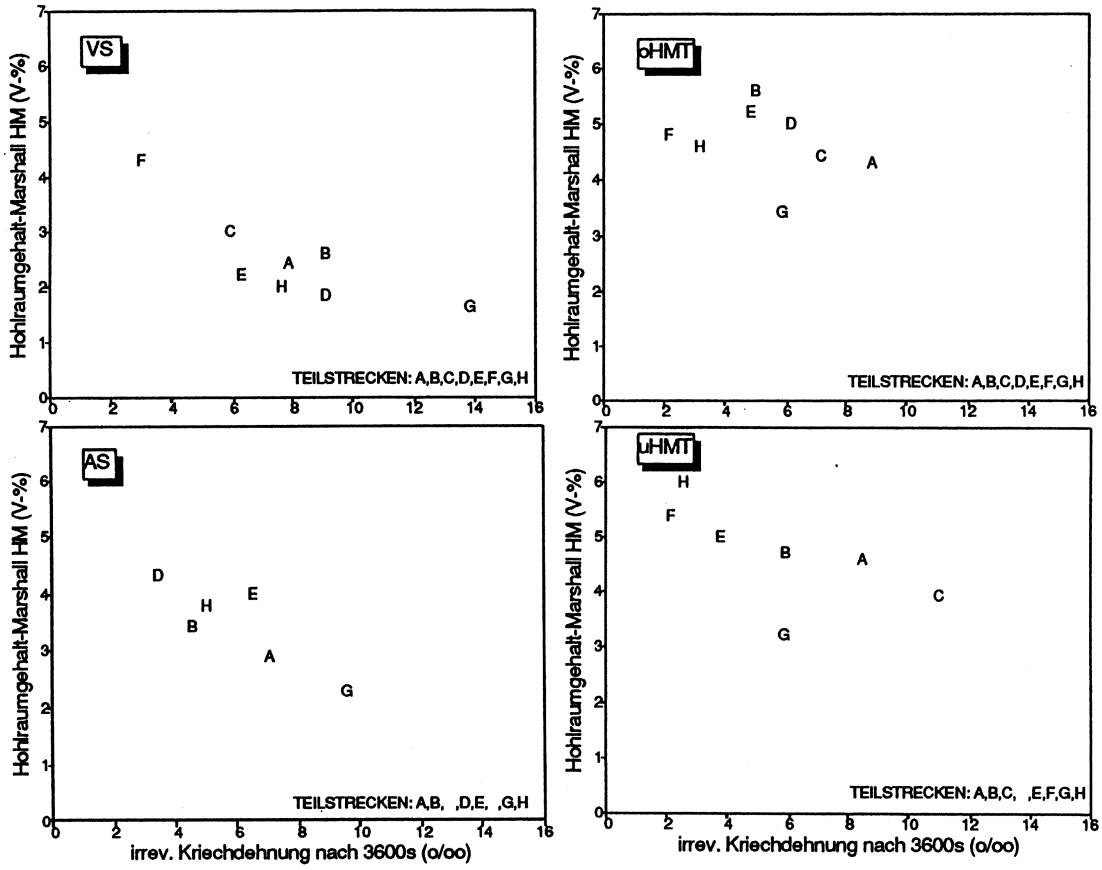


Abbildung 7.8: Hohlraumgehalt-Marshall in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}

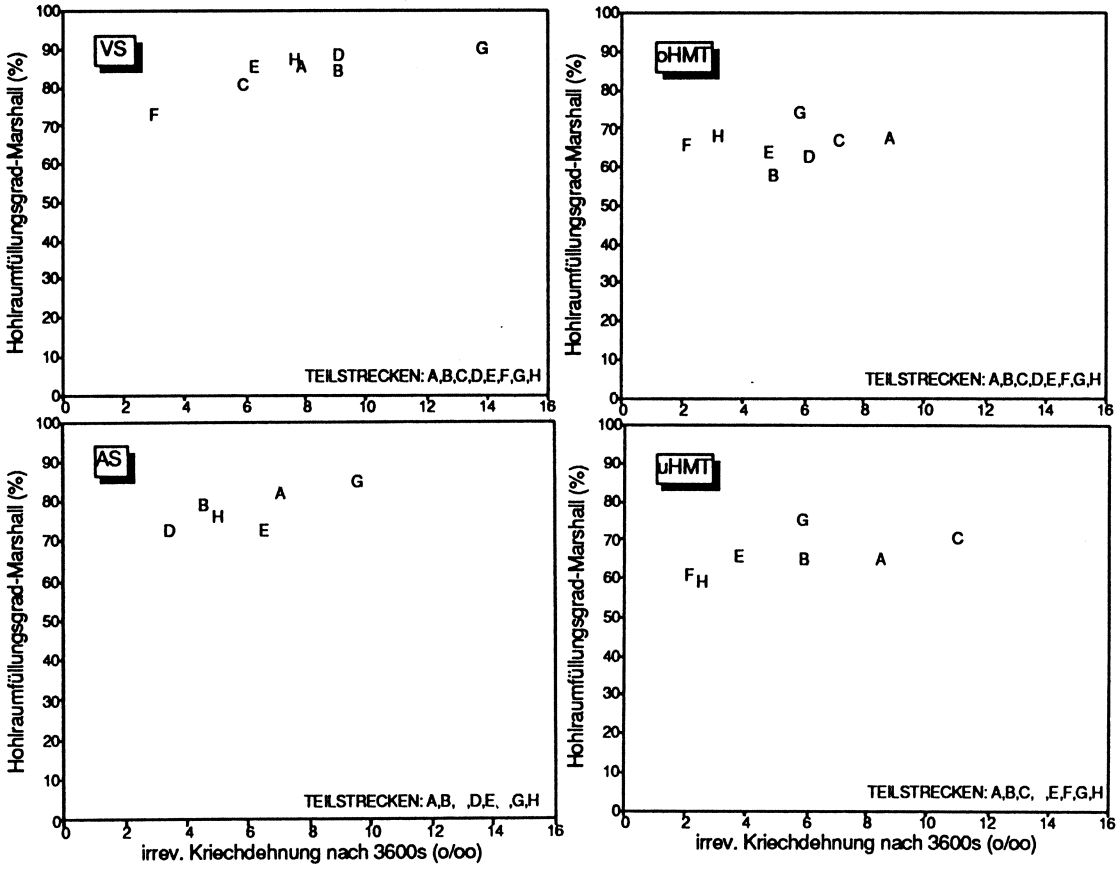


Abbildung 7.9: Hohlraumfüllungsgrad-Marshall mit Bindemittel in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}

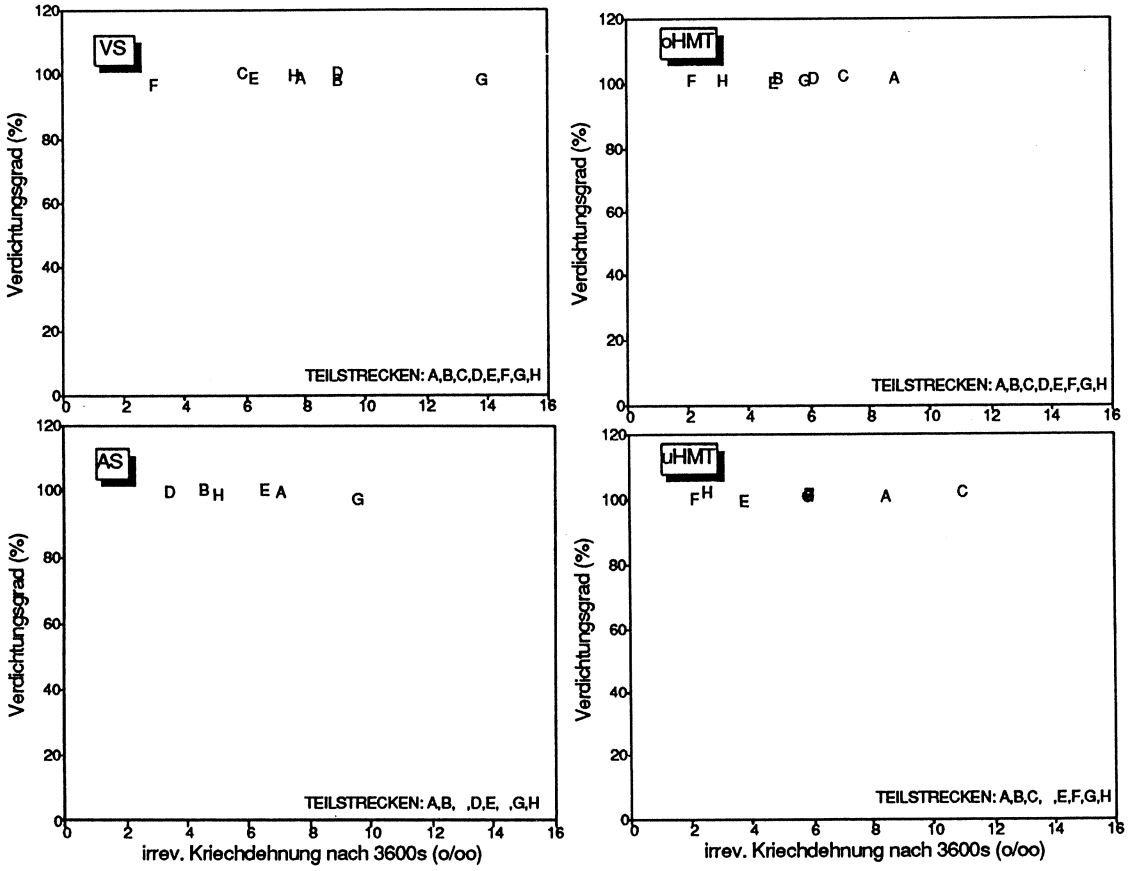


Abbildung 7.10: Verdichtungsgrad in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}

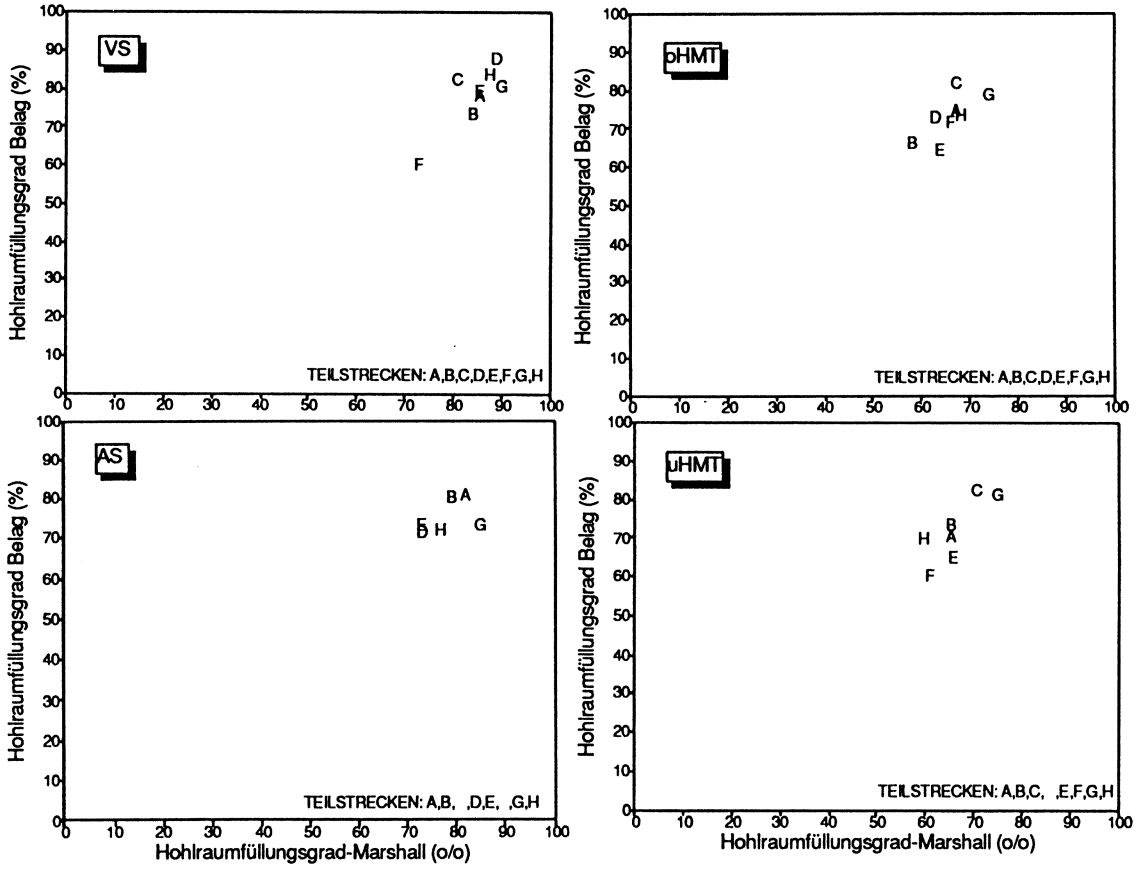


Abbildung 7.11: Hohlraumfüllungsgrad der Belagsschichten in Funktion vom Hohlraumfüllungsgrad-Marshall

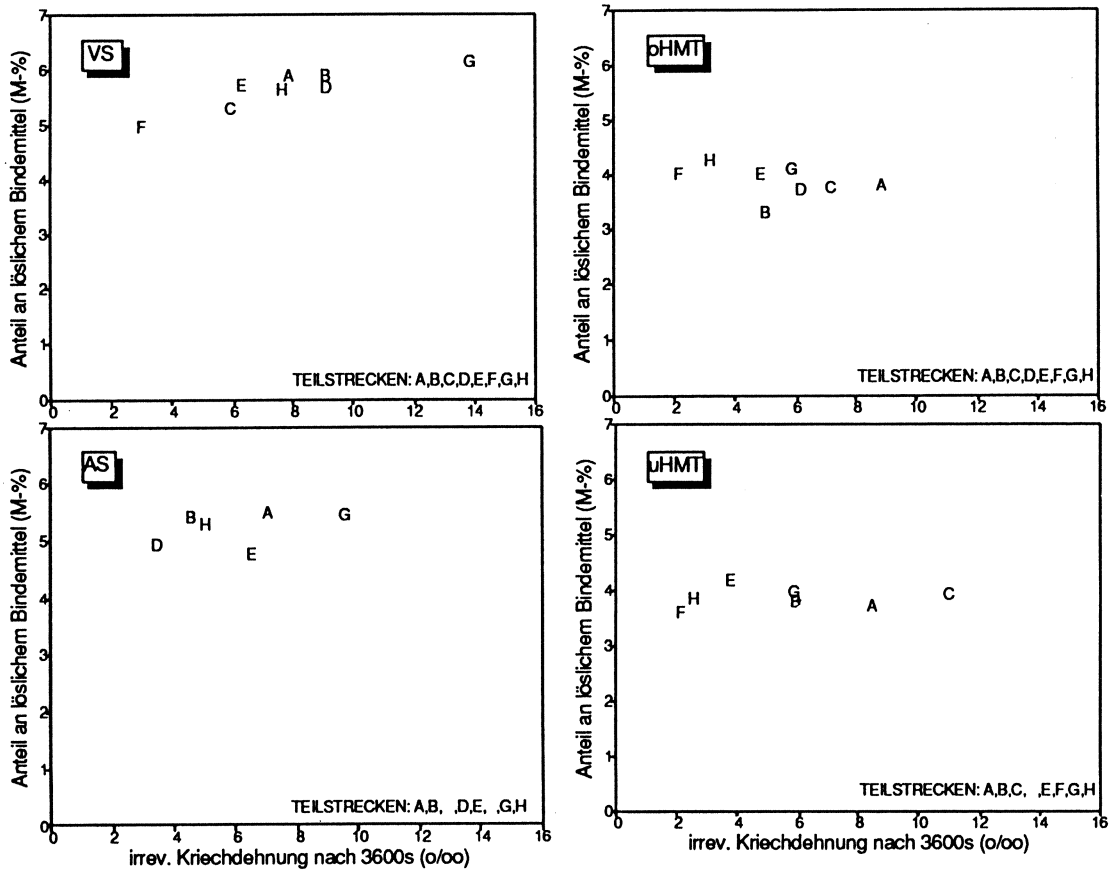


Abbildung 7.12: Anteil an löslichem Bindemittel in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}

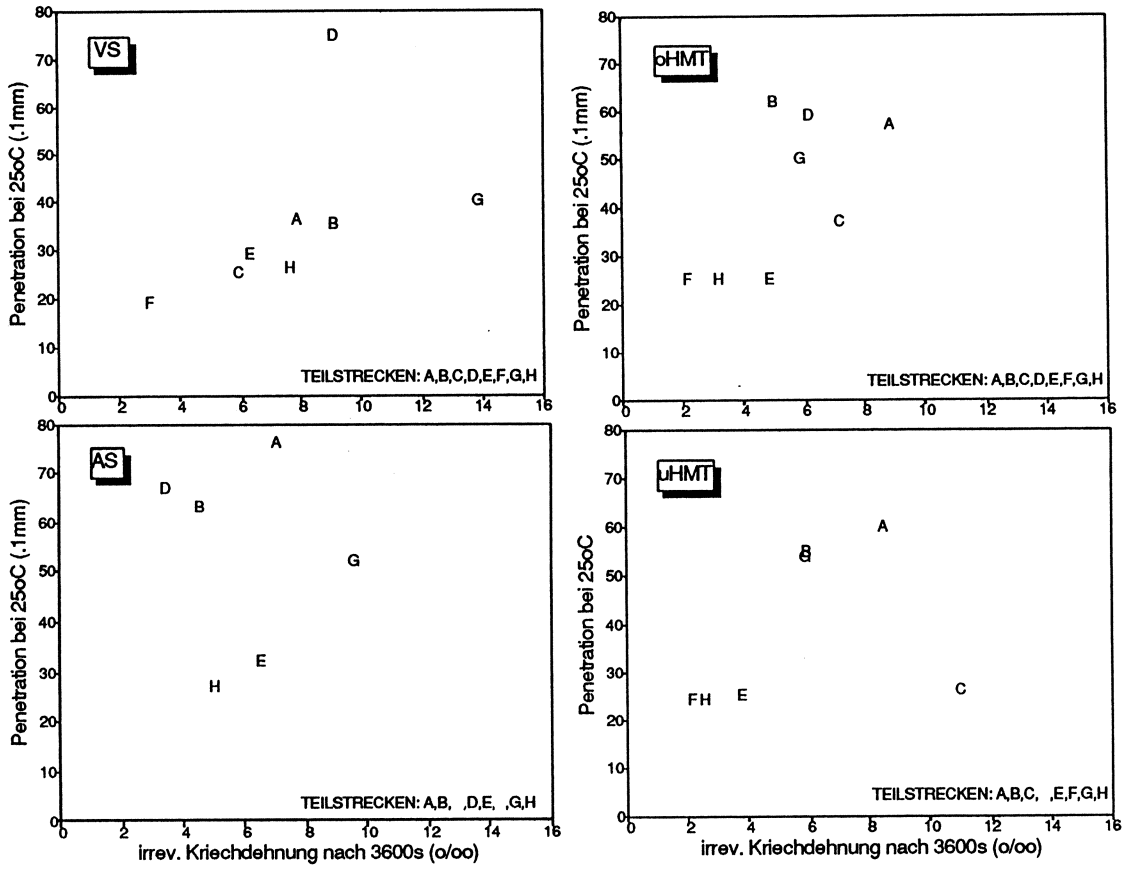


Abbildung 7.13: Penetration bei 25 °C in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}

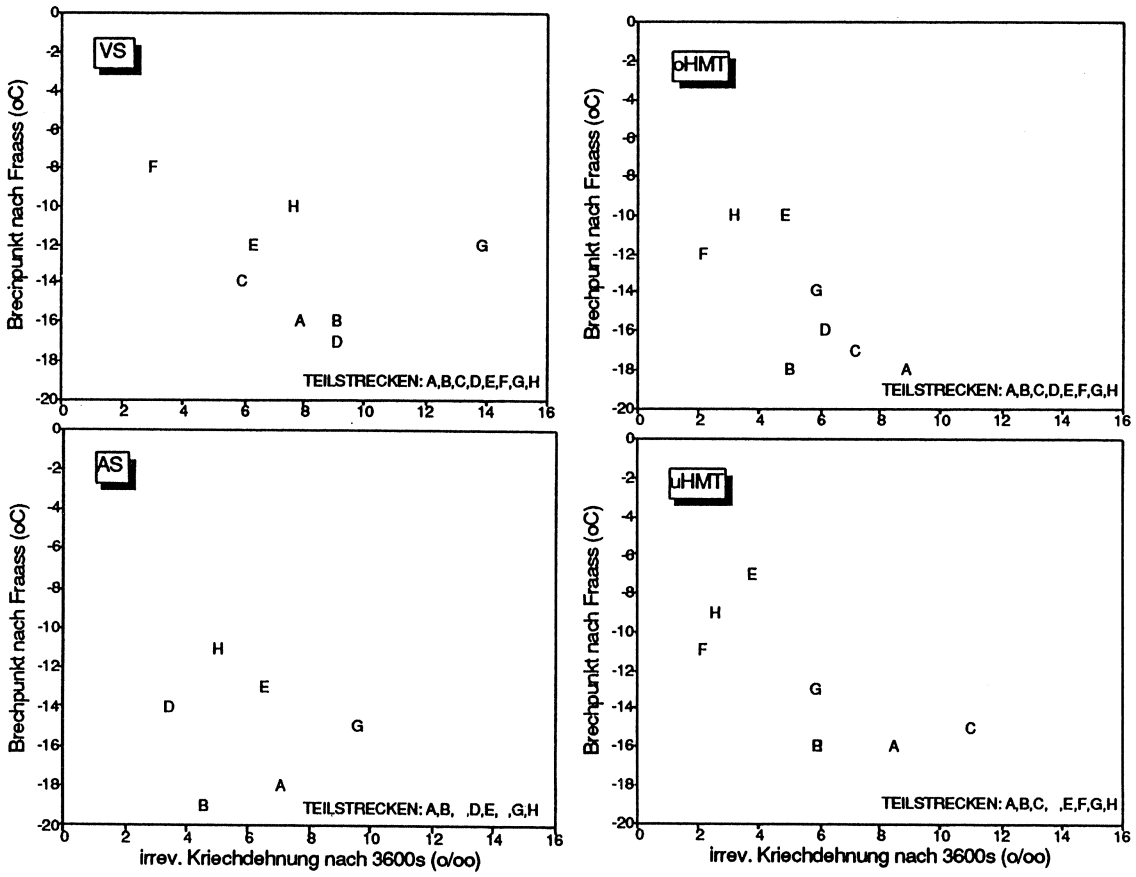


Abbildung 7.14: Brechpunkt nach Fraass in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}

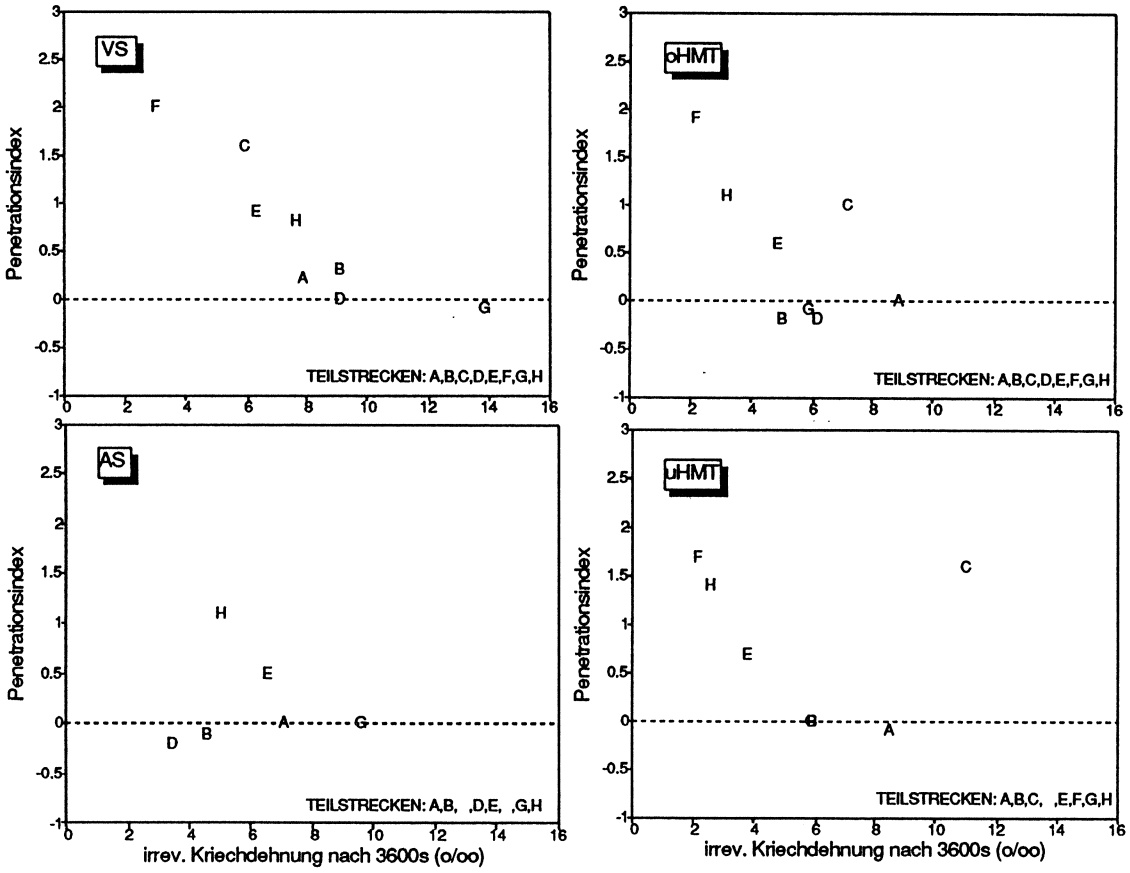


Abbildung 7.15: Penetrationsindex in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}

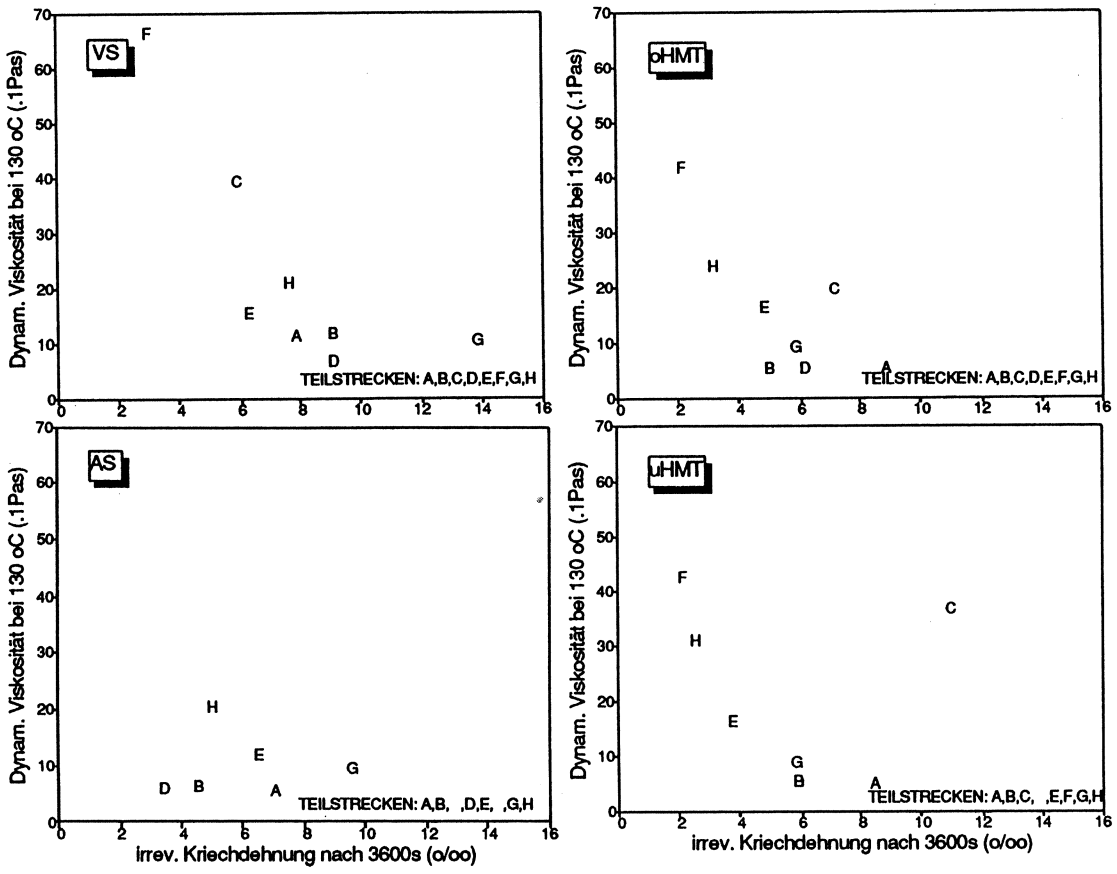


Abbildung 7.16: Dynamische Viskosität bei 130 °C in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}

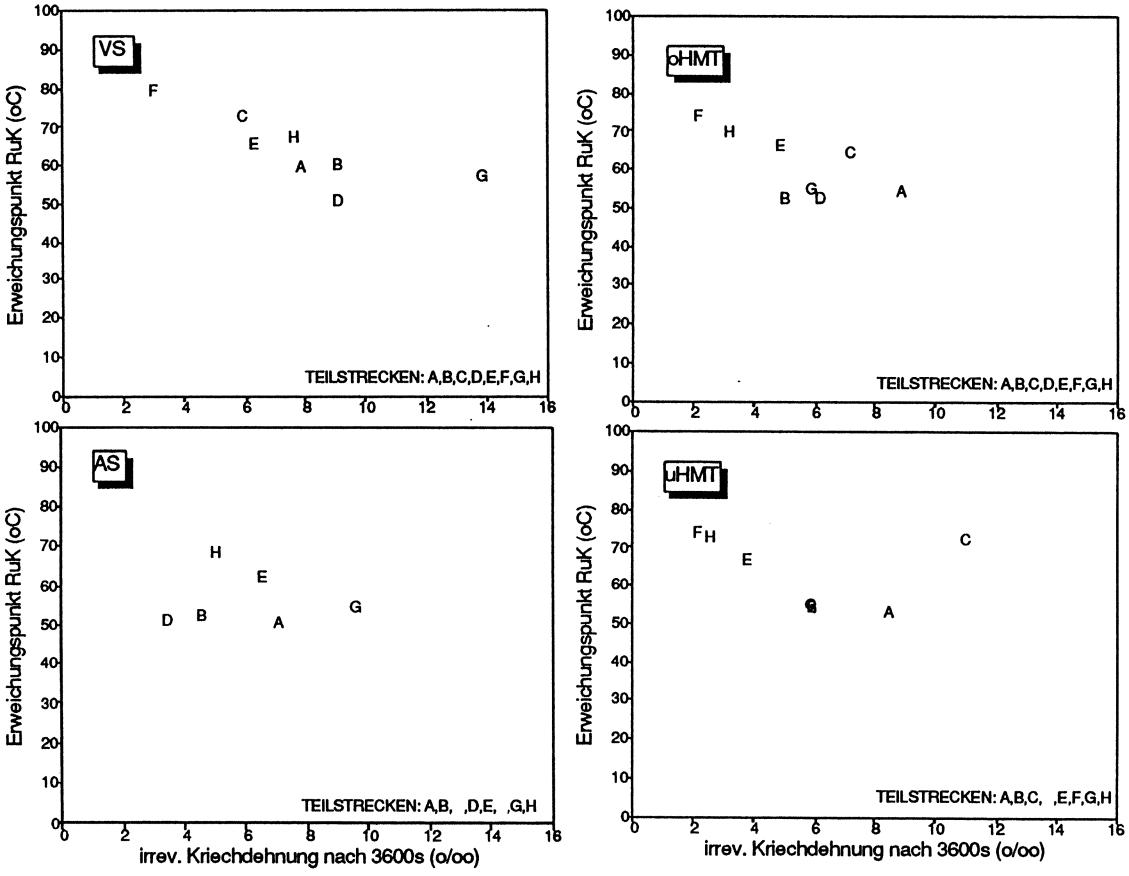


Abbildung 7.17: Erweichungspunkt Ring und Kugel in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}

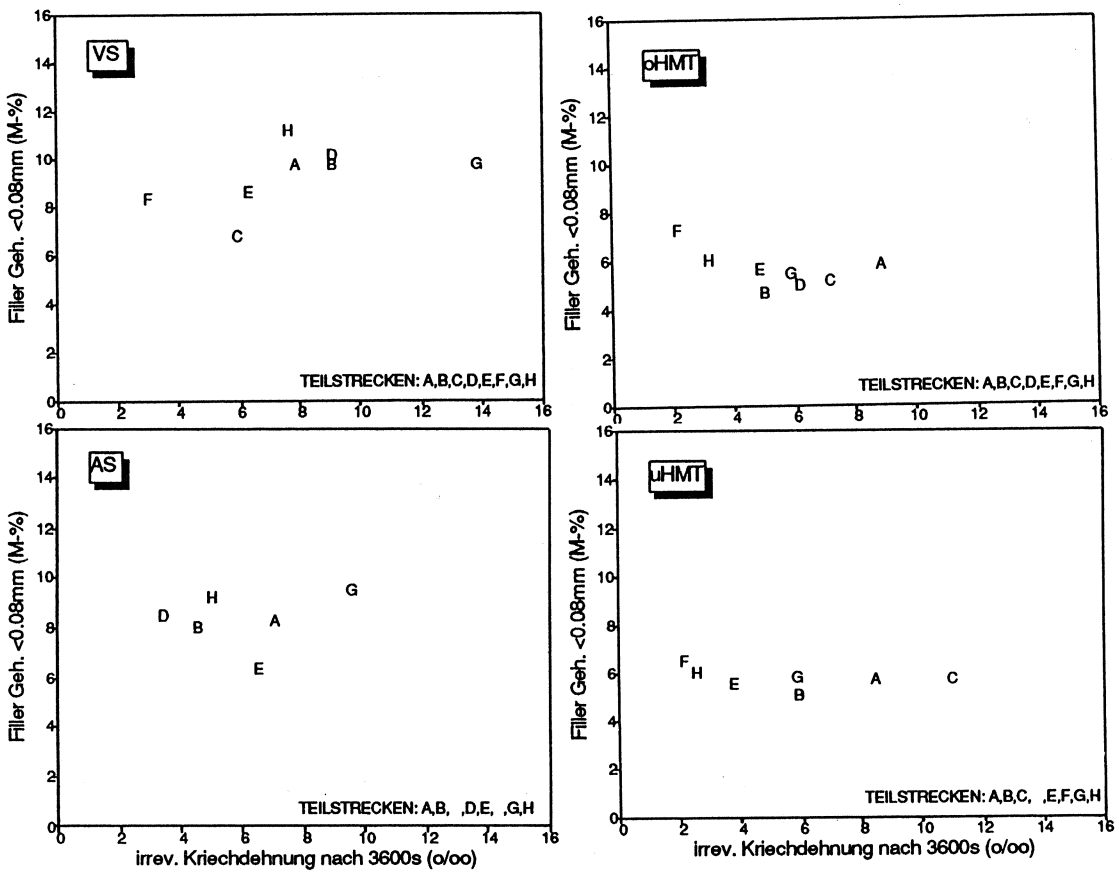


Abbildung 7.18: Fillergehalt < 0.08 mm in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}

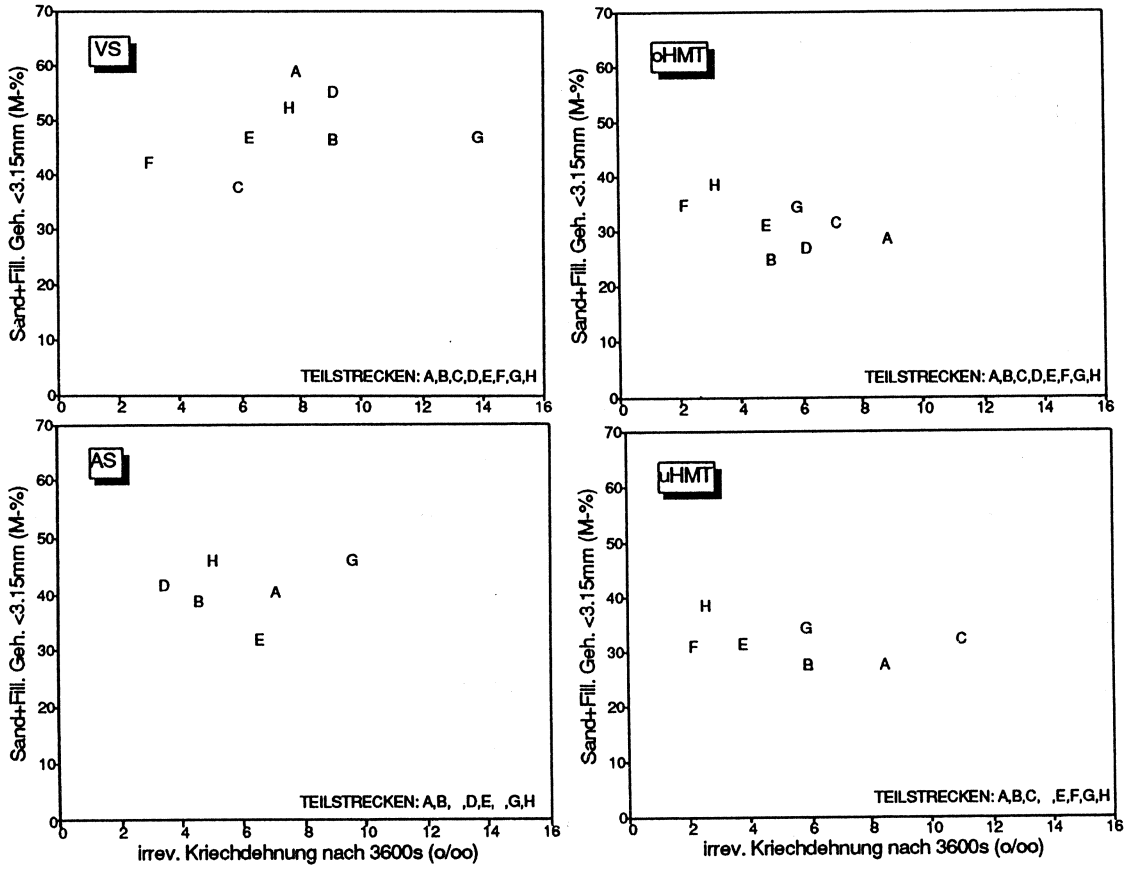


Abbildung 7.19: Sand- und Fillergehalt < 3.15 mm in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}

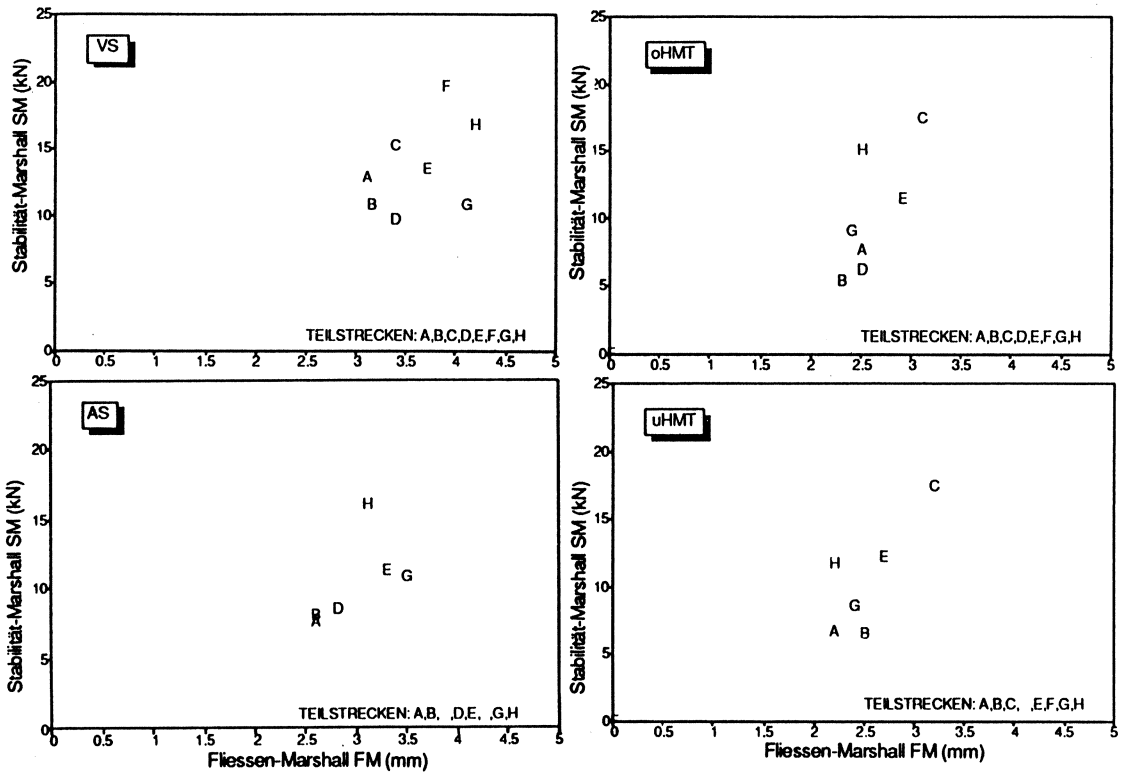


Abbildung 7.20: Stabilität-Marshall SM in Funktion von Fliessen-Marshall FM

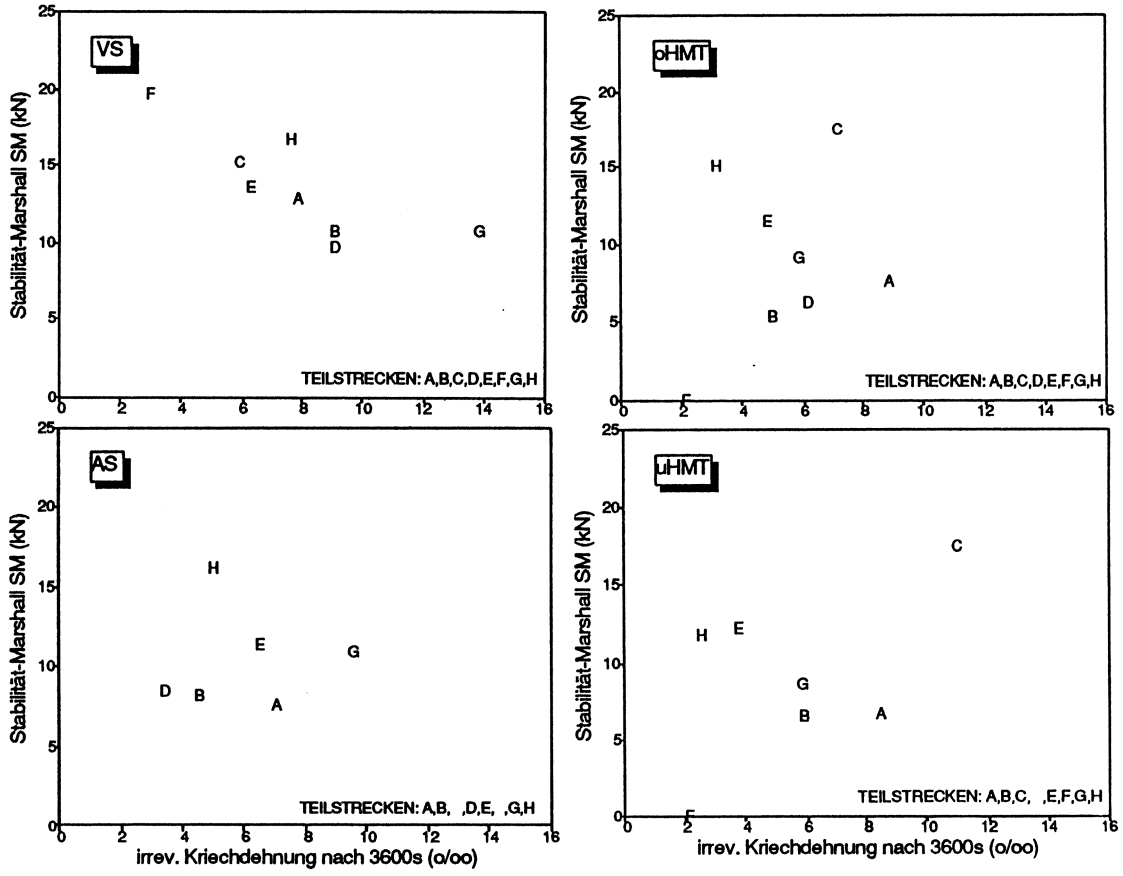


Abbildung 7.21: Stabilität-Marshall SM in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}

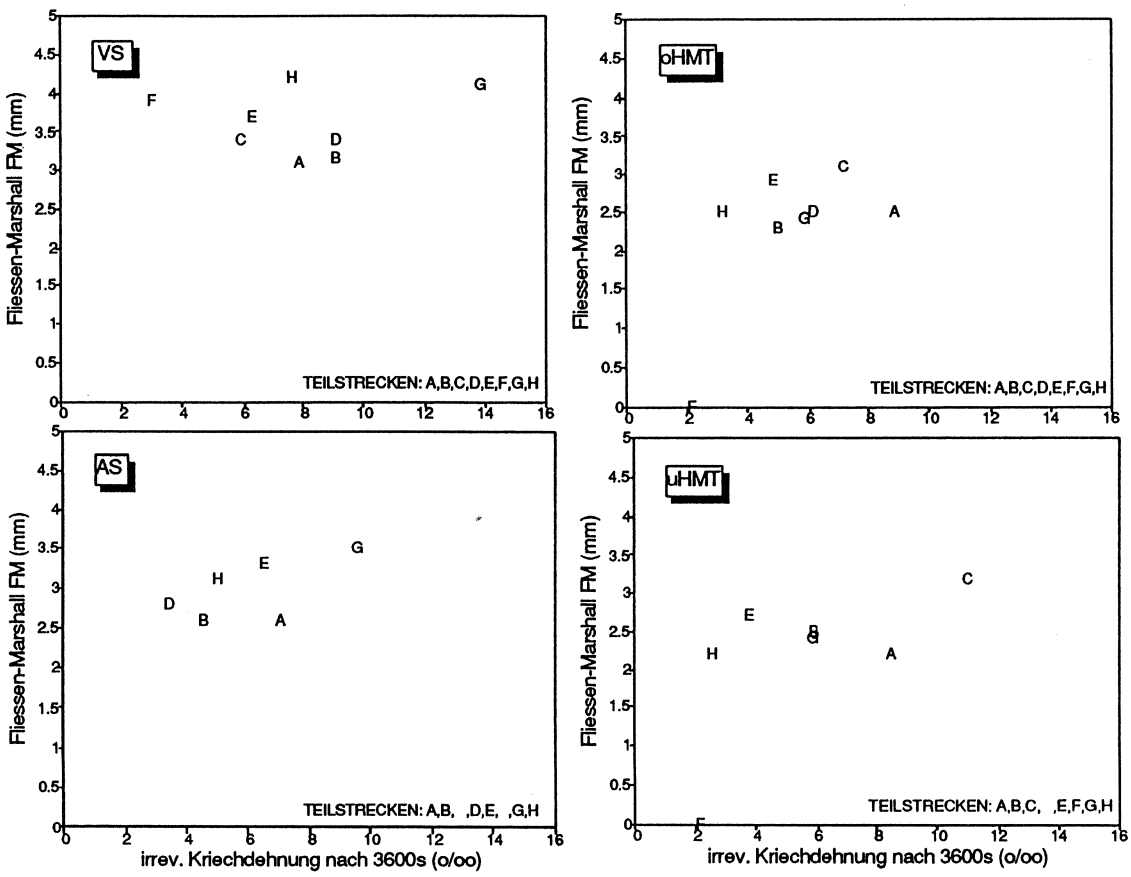


Abbildung 7.22: Fliessen-Marshall FM in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}

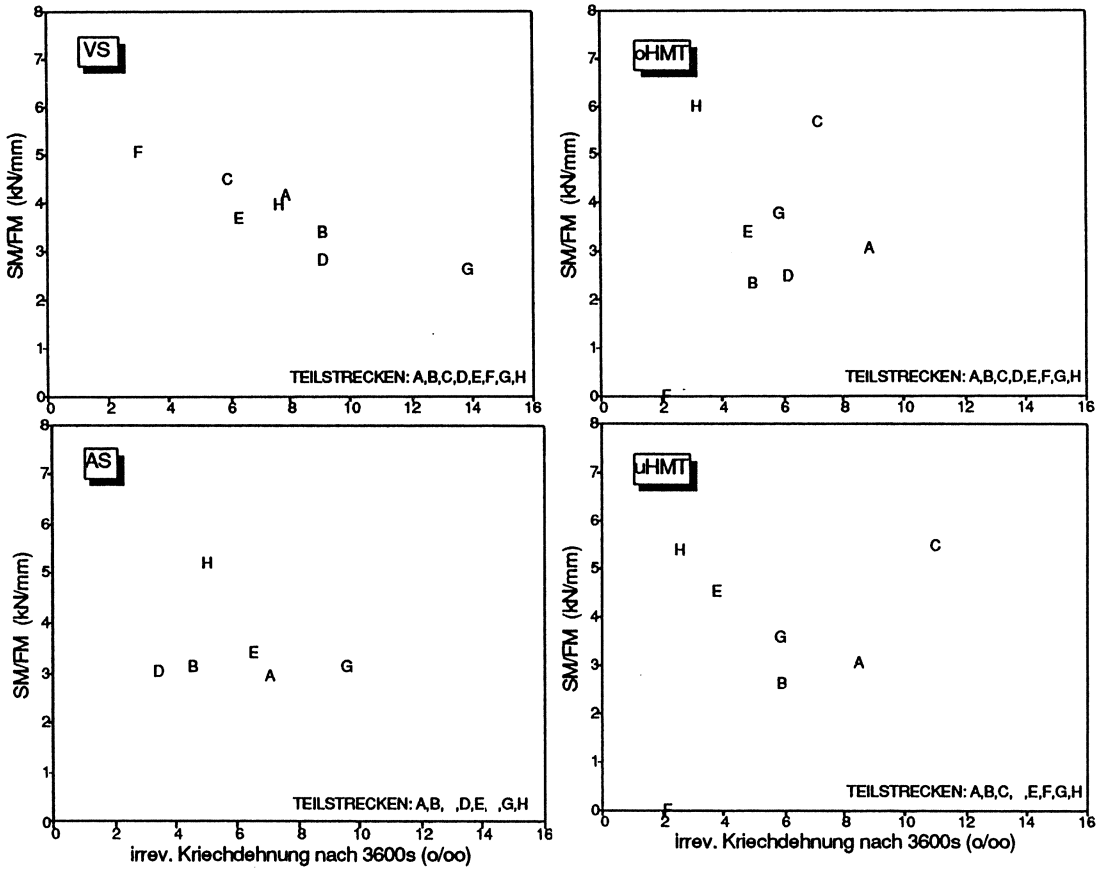


Abbildung 7.23: Verhältnis SM/FM (Marshall) in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}

8. URSACHEN DER BLEIBENDEN DEFORMATIONEN IN DEN BITUMINOESEN BELAEGEN

Die zum Teil beträchtlichen bleibenden Verformungen und damit die Spurrinnen in den untersuchten bituminösen Belägen sind im wesentlichen auf bleibende Deformationen in verschiedenen Belagsschichten zurückzuführen. An dieser Stelle ist nochmals mit allem Nachdruck zu betonen, dass sämtliche untersuchten Autobahnteilstrecken A bis H stark bis extrem stark beansprucht sind.

An der Unterseite der Beläge, in der Planie der Fundationsschichten aus Kiessand, waren in keinem Belagsausschnitt bleibende Deformationen infolge Verkehrsbeanspruchung festzustellen. Untergrund, Unterbau oder Fundationsschicht bildeten in keiner der untersuchten Autobahnteilstrecken auch nur geringfügig nachweisbare Ursache für bleibende Deformationen. Dies gilt auch für andere beobachtete bleibende Schäden, wie Rissbildungen.

Die Rissbildungen in den Verschleissschichten der Autobahnteilstrecken C und F sind auf mehrere Ursachen zurückzuführen. Ein Hauptgrund liegt in den Bindemitteleigenschaften. Die harten und verhältnismässig sparsam dosierten Bindemittel weisen Penetrationsindices von +1.6 und +2 auf. Diese Werte sind für solche Belagsschichten als unzulässig hoch zu bezeichnen. Während das Bindemittel der relativ dichten Verschleissschicht von C in situ wegen des kleinen Hohlraumgehaltes von 2.7 Vol-% wohl kaum merklich alterte, fand bei F durch den unzulässig hohen Hohlraumgehalt von 7.3 Vol-% begünstigt mit grosser Wahrscheinlichkeit in situ eine gewisse Alterung des Bindemittels statt.

Aufgrund der Ergebnisse dieser Forschungsarbeit liegen die *Hauptursachen für bleibende Deformationen innerhalb bituminöser Beläge* in der ungenügenden Standfestigkeit einzelner oder mehrerer Schichten, vor allem von Verschleiss-, Ausgleichs- und oberen Heissmischtragschichten, vereinzelt auch von unteren Heissmischtragschichten. Es wurde festgestellt, dass die Anfälligkeit gegenüber bleibenden Deformationen und die damit verbundenen ungenügenden mechanischen Festigkeitseigenschaften durch verschiedene belagsspezifische Ursachen hervorgerufen werden, von denen in der Regel gleichzeitig mehrere wirksam sein müssen. Solche Ursachen sind insbesondere:

- zu grosse Anzahl an Schichten im bituminösen Belag und damit verbunden oftmals zu kleine Grösstkörner in den verschiedenen Schichten,
- zu kleines Grösstkorn in den Mineralstoffkomponenten der Ausgleichsschicht als oberste Tragschicht,
- zu geringe Anteile an gebrochenen Mineralstoffkörnern in Tragschichten (keine s-Schichten),
- nicht optimale Korngrössenverteilung der Mineralstoffe,
- zu kleine Hohlraumgehalte,
- zu hohe Hohlraumfüllungsgrade mit Bindemittel (insbesondere in Ausgleichs- und Tragschichten) sowie zu grosse Anteile an löslichem Bindemittel,
- zu weiche Bindemittel

In den Anfängen des schweizerischen Nationalstrassenbaus - bis etwa Mitte der 70er Jahre - wurde allzu oft ein zwei- oder mehrphasiger Belagseinbau gewählt. Um die zeitweise meist mehrere Jahre befahrene Ausgleichs- bzw. obere Heissmischtragschicht genügend verschleissfest auszubilden, wurden Massnahmen angeordnet, die das Verhalten des fertigen Belages inklusive Verschleiss- und Ausgleichsschicht bezüglich bleibender Deformationen sehr ungünstig beeinflussten. Deshalb muss stets das Verhalten des fertigen Belagssystems für die Konzeption der Beläge (auch in kompositioneller Hinsicht) wegleitend sein.

9. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die vorliegende Forschungsarbeit enthält zusammenfassend die Resultate aller bituminösen Belagsschichten der acht ausgewählten Autobahnteilstrecken, die im vorgesehenen Umfang untersucht wurden. Die Anteile der bleibenden Deformationen bis zum Zeitpunkt der Entnahme der untersuchten Belagsausschnitte 1978/79 sowie die Eigenschaften der bituminösen Belagsschichten sind bestimmt. Anhaltspunkte über deren mechanische Eigenschaften liefern die Ergebnisse der Marshall- und der Kriechprüfungen. Der verhältnismässig kleine Abrieb der Verschleissschichten bis zum Entnahmezeitpunkt betrug nicht mehr als 2 mm und konnte daher für die Betrachtung der bleibenden Deformationen vernachlässigt werden.

Ursachen für die festgestellten bleibenden Deformationen oder für aufgetretene Rissbildungen wurden eruiert und sind in Kapitel 8 zusammenfassend hervorgehoben.

Um sowohl bleibende Deformationen als auch Rissbildungen und übermässigen Abrieb zu vermeiden sind zahlreiche Einflussgrössen optimal aufeinander abzustimmen. *Massnahmen zur Vermeidung* unzulässiger bleibender Deformationen bzw. zum Erzielen standfester bituminöser Beläge sind in Abschnitt 9.2 aufgelistet. Hinweise zur *Vermeidung von Rissbildungen* vermittelt Abschnitt 9.3.

Wichtige Ergebnisse und Erkenntnisse aus vorliegenden Untersuchungen konnten bereits in die Praxis einfliessen. Die *Auswirkungen auf die Praxis* der Resultate dieser Forschungsarbeit sind in Abschnitt 9.4 zusammengefasst.

Eine *Beurteilung von Laborprüfungen* sowie einen Ausblick zum *weiteren Vorgehen* enthält Abschnitt 9.5 und 9.6.

9.1 Beanspruchung

Die acht ausgewählten Autobahnteilstrecken sind stark bis extrem stark beansprucht. Dies gilt nicht nur für schweizerische sondern auch für internationale Masstäbe, betragen doch heute die täglichen äquivalenten Verkehrslasten TF zwischen 2500 und 5500 für die einzelnen Normalfahrstreifen (TF: tägliche äquivalente Verkehrslast gemäss Schweizer Norm SN 640'320). Diese heutigen Werte zeigen, dass die Verkehrsentwicklung viel stürmischer verlaufen ist, als es sich selbst mutige Prognostiker in den Anfängen des schweizerischen Nationalstrassenbaus vorzustellen wagten.

Aus dieser tatsächlichen Verkehrsentwicklung ergibt sich als logische Konsequenz folgendes:

> Als *Kriterium für die Belagsdimensionierung* ist grundsätzlich die gesamte äquivalente Verkehrslast W für die geplante Gebrauchsdauer, in der Schweiz üblicherweise 20 Jahre, anzunehmen (W = 0.5 x ESAL, wobei ESAL: Cumulative both directional expected 8.16 t "*E*quivalent *S*ingle *A*xle *L*oads" during the analysis period, gemäss AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1986). Um dieses W realistisch abschätzen zu können, ist die aktuelle tägliche äquivalente Verkehrslast TF sowie deren vergangene Entwicklung zu kennen und darauf aufbauend unter Berücksichtigung sämtlicher relevanter Planungsfaktoren eine entsprechend wahrscheinliche Prognose zu treffen.

Als *Kriterium für die Belagsbeurteilung* eines bestimmten Strassenabschnitts ist, ausgehend von den täglichen äquivalenten Verkehrslasten TF, stets die gesamte äquivalente Verkehrslast W zu betrachten. Im vorliegenden Fall sind für den Vergleich der effektiven Verkehrsbeanspruchungen der untersuchten Autobahnteilstrecken bis zum Zeitpunkt der Belagsentnahmen bzw. bis zum Jahr 1990 die über die verschiedenen Gebrauchsdauern aufsummierten täglichen äquivalenten Verkehrslasten TF massgebend. Daraus resultieren die bis zu den jeweiligen Zeitpunkten (Belagsentnahme 1978/79 bzw. Abschluss der Einzelberichte EMPA Nr. 40 500/1...3 im Jahre 1990) massgebenden stark unterschiedlichen äquivalenten Verkehrslasten W.

Eine langfristig genügende Belagsdimensionierung ist unerlässlich und hat, soweit vertret- und begründbar, auf der sicheren Seite zu erfolgen. Deshalb sind bei sehr stark befahrenen Strecken Belagsdicken insgesamt von etwa 240 mm durchaus angebracht. Diese Belagsdicke genügt selbst den Dimensionierungsvorschriften gemäss Schweizer Norm SN 640'324 (1988).

9.2 Massnahmen zur Erzielung standfester bituminöser Beläge

Bei starker bis extrem starker Beanspruchung von bituminösen Belägen sind diese standfest auszubilden. Massnahmen zur Vermeidung unzulässiger bleibender Deformationen in bituminösen Belägen sind:

- Ganzheitliche Betrachtungsweise der Belagsschichten im Belagssystem zur strukturell, technologisch und kompositionell optimal an die Nutzung angepassten Konzipierung der Beläge.
- Verzicht auf eine Ausgleichsschicht.
- Durchwegs Verwendung gebrochener Mineralstoffe (s-Schichten).
- Einsatz von Mischgutsorten mit grossem Grösstkorn, insbesondere in den Heissmischtragschichten.
- Verwenden geeigneter Mineralstoffe.
- Entsprechende Wahl der Mischgutzusammensetzungen (Bindemittelanteile und Korngrössenverteilungen), um eng begrenzte Hohlraumgehalte und Hohlraumfüllungsgrade der Marshall-Prüfkörper und der einzelnen Belagsschichten einzuhalten.
- Verwendung harter Bindemittel.

9.3 Vermeidung von Rissbildungen

Keine Spurrinnen, jedoch eine grundsätzlich andere Art bleibender Schädigung, nämlich Rissbildungen in Belägen bzw. einzelnen Belagsschichten, sind in unterschiedlichem Aussmass in den Verschleissschichten der Strecken der Autobahnteilstrecken C und F aufgetreten. Durch eine ganzheitliche Betrachtungsweise der Belagsschichten im Belagssystem und ein ausgewogenes Optimieren der Eigenschaften der einzelnen Belagsschichten lassen sich solche Rissbildungen und gleichzeitig auch Spurrinnenbildungen vermeiden.

Die untersuchten Autobahnteilstrecken zeigen, dass die Schichten möglichst kleine Hohlraumgehalte und die Bindemittel Penetrationsindices von höchstens +1 aufweisen dürfen.

9.4 Auswirkungen der Untersuchung auf die Praxis

Ergebnisse und wichtige Erkenntnisse dieser Forschungsarbeit standen bei der Bearbeitung verschiedener Schweizer Normen rechtzeitig zur Verfügung und konnten durch direkte Mitarbeit in den entsprechenden technischen Kommissionen umgehend berücksichtigt werden. Besonders gilt dies für die seit 1989 gültige Schweizer Norm SN 640'431a "Asphaltbetonbeläge; Konzeption, Anforderungen, Ausführung".

In die Schweizer Norm SN 640'431a fanden Eingang:

Ganzheitliche Betrachtungsweise der Belagsschichten im Belagssystem. Die strukturelle Konzeption der Beläge hat mit aller Sorgfalt zu erfolgen und umfasst das Aufteilen der Beläge in Deck- und Tragschichten sowie das Minimalisieren der Anzahl Belagsschichten.

Ausgleichsschichten werden nicht mehr ausgeführt. Direkt unter der Deckschicht ist eine entsprechend der Beanspruchung geeignete Tragschicht anzuordnen.

Für stark bis sehr stark beanspruchte bituminöse Beläge sind vorgeschrieben:

- s-Schichten
- praktisch ausschliesslich gebrochene Mineralstoffe
- Sorten mit grossem Grösstkorn, besonders in den oberen Tragschichten
- harte Bindemittel, besonders in den Tragschichten
- entsprechende Wahl der Mischgutzusammensetzungen (Anteil an löslichem Bindemittel, Korngrössenverteilung)
- eng begrenzte Hohlraumgehalte und Hohlraumfüllungsgrade mit Bindemittel der Marshall-Prüfkörper und der einzelnen Belagsschichten einhalten.

Die kompositionellen Belange bei der Konzipierung von Belägen dürfen nie isoliert betrachtet werden. Vielmehr sind bei der Auswahl der Mineralstoffe und beim Festlegen der Korngrössenverteilung sowie des Bindemittelanteils stets die strukturellen, technologischen und ausführungstechnischen Aspekte gleichzeitig mitzuberücksichtigen.

Für die Wahl der Belagseigenschaften ist immer die örtliche Beanspruchung massgebend. Unter Beachtung dieses Grundsatzes sind aufgrund der Eignungsnachweise und allfällig notwendiger Eignungsprüfungen die Mischgutsollwerte für ein bestimmtes Bauvorhaben festzusetzen (eigensicherer Prozess im Sinne der Qualitätssicherung).

Aufgrund momentaner Bauzustände dürfen weder ausführungstechnisch unzulässige Massnahmen (wie unzulässiges Erhöhen des Bindemittelanteils, Wahl eines unzulässig weichen Bindemittels) noch andere unzulässige Massnahmen angeordnet werden, die sich bei einer ganzheitlichen Betrachtungsweise der Belagsschichten im fertigen Belagssystem nachteilig auswirken.

Der Vollständigkeit halber sei ausserdem darauf hingewiesen, dass in der oben erwähnten Schweizer Norm ausschliesslich Bindemittel auf Bitumenbasis vorgeschrieben sind und keine teerhaltigen Bindemittel verwendet werden dürfen.

9.5 Beurteilung der mechanischen Eigenschaften mit normierten Untersuchungen und neuen Laborprüfungen

Die Eignung eines bituminösen Mischgutes als Deck- oder Tragschichtmaterial für höchste Beanspruchungen lässt sich mit den bisher in den Schweizer Normen enthaltenen Prüfungen nur partiell feststellen. Diese sind zur Charakterisierung der Beläge erforderlich, liefern jedoch hinsichtlich Praxisverhalten der Beläge gegenüber bleibender Deformation nur teilweise aussagekräftige Beurteilungskriterien.

Im Gegensatz zur Marshall-Prüfung ergibt die physikalisch besser fundierte Kriechprüfung an Bohrkernen deutlich stärker differenzierte Aussagen. Die Kriechprüfung an Bohrkernen liefert ausserdem zu den normierten Prüfungen oft ergänzende Aussagen, die jeweils dem Praxisverhalten eher entsprechen. Insbesondere ist festzustellen, dass schlechtes, nicht durch Abrieb verursachtes Deformationsverhalten in der Praxis jeweils mit ungünstigem Kriechverhalten von Bohrkernen im Labor zusammenfällt.

Allerdings ist zu beachten, dass auch die Kriechprüfung zur Beurteilung des Praxisverhaltens von Belägen allein nicht ausreicht. In weiteren Forschungsarbeiten sind daher zusätzliche Prüfmethoden und Prüfverfahren zu entwickeln, welche physikalische Kennwerte liefern und Aussagen über das Verhalten der Schichten und des Belagssystems liefern und es ermöglichen, die mechanischen Eigenschaften realistischer zu beurteilen.

9.6 Weiteres Vorgehen

Die Untersuchungen gemäss vorgesehenem Arbeitsprogramm samt wichtigen Erkenntnissen und Folgerungen liegen vor. Ergänzende Aussagen aufgrund weiterer Arbeiten, welche die mechanischen Eigenschaften von bituminösen Baustoffen vertiefter erfassen und das Verformungsverhalten, aber auch das heute besonders aktuell gewordene Rissverhalten unter verschiedenen praxisrelevanten Verkehrs- und Klimabeanspruchungen zusätzlich charakterisieren, sind nötig.

Wegen der bereits erwähnten Ueberlagerung verschiedenster Einflussgrössen ist es unumgänglich, neben physikalisch besser abgestützten materialtechnischen Kenndaten und Modellgrössen auch eine experimentell abgestützte gesamtheitliche Betrachtung der Belagsproblematik durch Untersuchung des Verhaltens im System anzustreben. Dies umso mehr, als durch die Vielzahl heutiger bzw. bereits absehbarer künftiger Belagskonzepte die Gefahr besteht, dass der Ingenieur in der Praxis einer gewissen steigenden Verunsicherung ausgesetzt ist.

Die Schliessung der entsprechenden fachlichen Erkenntniskette bedingt ein paralleles wissenschaftlich koordiniertes Vorgehen, welches nicht nur die Erarbeitung heute noch weitgehend fehlender physikalisch begründeter Kennwerte im Labor, sondern auch

gleichzeitig die ingenieurwissenschaftliche Untersuchung von Belagsschichten und von Belagssystemen sowohl unter definierten Laborbedingungen als auch unter genau überwachten und erfassten Praxisbedingungen, inklusive Einbau, einschliesst. Diesem Anliegen, welches namentlich auch die Entwicklung und den Einsatz neuer zerstörungsfreier Prüfmethoden erfordert, muss künftig hohe Priorität eingeräumt werden.

Dübendorf, 8. Juli 1992

EMPA Dübendorf

Strassenbau/Abdichtungen

Der Abteilungsvorsteher:

Dr. M. Partl

SCHLUSSWORT

Die Forschungsarbeit 25/78 "Untersuchung stark beanspruchter bituminöser Autobahnbeläge" wurde 1978 von H. W. Fritz, dipl. Ing. ETH, damaligem Abteilungsvorsteher der Abteilung Strassenbau/Abdichtungen der EMPA Dübendorf initiiert, auf Antrag des Referenten H. Gnehm und des damaligen Präsidenten der Belagskommission der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Herrn J. Eckert, durch die Strassenbauforschungskommission des EDI (heute EVED) genehmigt. Seitens der EMPA wurde das Projekt in weiten Teilen betreut durch Herrn M. Seeberger, dipl. Ing. ETH; der Schlussbericht wurde durch den Unterzeichneten verfasst.

Dank

Den verschiedenen kantonalen Tiefbauämtern, welche die Entnahme der Belagsausschnitte ermöglichten und nicht zuletzt auch dem Bundesamt für Strassenbau (ASB) sowie der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS) sei an dieser Stelle für ihre Unterstützung besonders gedankt. Dank gebührt aber auch allen Mitarbeitern der Abteilung Strassenbau/Abdichtungen und der EMPA, die bei der Durchführung der Untersuchung und Auswertung mit grossem Einsatz behilflich waren.

ANHANG

Verwendete wichtige Abkürzungen und Bezeichnungen

a	materialspezifischer Parameter in Gleichung (4.1)
aRS	ausserhalb Radspurbereich
AS	Ausgleichsschicht
e_{ir}	Kriechvergleichsgrösse in Gleichung (4.5)
ε_{ir}	irreversibler Anteil der Kriechdehnungen
ε_{kr}	Kriechdehnung (Gesamtdehnung)
ε_{re}	reversibler Anteil der Kriechdehnungen
FM	Fliessen-Marshall
HM	Hohlraumgehalt-Marshall
K_{ir}	Kriechbeanspruchungswert in Gleichung (4.8)
M-%	Einheit: Masse-%
oHMT	obere Heissmischtragschicht
PI	Penetrationsindex
q	materialspezifischer Parameter in Gleichung (4.1)
r	Korrelationskoeffizient
RD	Rohdichte
RS	Radspurbereich
RuK	Ring und Kugel
SM	Stabilität-Marshall
SN	Schweizer Norm
σ	Spannung
t	Zeit
t'	Zeitparameter ("innere Uhr" des Materials)
t_I	mittlere massgebende Impulszeit einer Ueberfahrt
TF	tägliche äquivalente Verkehrslast eines einzelnen Betriebsjahres ("*T*raffic *F*actor") gemäss Schweizer Norm SN 640'320, (1971)
uHMT	untere Heissmischtragschicht
V-%	Einheit: Volumen-%
VS	Verschleissschicht
VSS	Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute
W	gesamte äquivalente Verkehrslast. W = 0.5 x ESAL, wobei ESAL: Cumulative both directional expected 8.16 t "*E*quivalent *S*ingle *A*xle *L*oads" during the analysis period, gemäss AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, (1986)

EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, CH-8600 Dübendorf

Ermittelte Kriechdehnungen der Kriechversuche bei 40 °C

VS		AUSSERHALB RADSPUR (aRS)								INNERHALB RADSPUR (RS)			
		A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	G	H
		Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel
Schichtdicke h	(mm)	28.00	37.00	47.00	23.00	36.00	50.00	30.00	37.00	28.00	37.00	30.00	37.00
Prüfkörperhöhe H	(mm)	76.89	71.73	70.88	67.02	74.38	75.20	78.90	74.23	82.62	73.35	73.10	74.50
Belagsausschnitt Nr.		1/2/3	1/2/3	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3	1/2/3	1	1
Rohdichte	(t/m3)	2.32	2.32	2.40	2.40	2.37	2.31	2.35	2.41	2.35	2.33	2.37	2.41
BELASTUNG (s)	(log s)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)
16	1.20	5.49	5.88	3.70	7.49	5.10	2.58	9.65	4.88	5.00	5.15	10.12	5.19
64	1.81	6.67	7.31	4.70	8.35	5.97	3.00	11.34	6.16	6.08	6.32	12.04	6.60
256	2.41	7.68	8.52	5.72	9.09	6.74	3.40	12.79	7.30	7.01	7.37	13.49	7.73
1200	3.08	8.75	9.74	6.77	10.01	7.54	3.80	14.25	8.36	8.05	8.42	14.89	8.63
3600	3.56	9.52	10.58	7.42	10.79	8.10	4.08	15.32	9.00	8.81	9.12	15.97	9.13
ENTLASTG. (s)	(log s)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)
16	1.20	0.91	0.88	0.57	1.02	0.83	0.51	0.97	0.69	0.89	0.87	1.02	0.69
64	1.81	1.16	1.10	0.78	1.27	1.10	0.69	1.19	0.93	1.14	1.11	1.23	0.93
256	2.41	1.36	1.27	1.04	1.50	1.39	0.87	1.32	1.17	1.32	1.29	1.34	1.15
1200	3.08	1.55	1.41	1.31	1.66	1.65	1.05	1.42	1.34	1.47	1.44	1.43	1.34
3600	3.56	1.70 ‖	1.52 ‖	1.53 ‖	1.78 ‖	1.86 ‖	1.20 ‖	1.49 ‖	1.47 ‖	1.59 ‖	1.56 ‖	1.50 ‖	1.49 ‖
BE-ENT (s)	(log s)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)
16	1.20	4.58	5.00	3.13	6.47	4.27	2.07	8.68	4.19	4.10	4.28	9.10	4.50
64	1.81	5.51	6.20	3.92	7.08	4.88	2.31	10.16	5.23	4.94	5.21	10.81	5.67
256	2.41	6.32	7.25	4.68	7.59	5.35	2.53	11.47	6.13	5.69	6.08	12.15	6.58
1200	3.08	7.20	8.33	5.46	8.35	5.89	2.75	12.83	7.02	6.58	6.98	13.46	7.29
3600	3.56	7.82 ‖	9.06 ‖	5.89 ‖	9.01 ‖	6.24 ‖	2.88 ‖	13.83 ‖	7.53 ‖	7.22 ‖	7.56 ‖	14.47 ‖	7.64 ‖

AS		A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	G	H
		Mittel	Mittel		Mittel	Mittel		Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel
Schichtdicke h	(mm)	39.00	44.00	-	41.00	47.00	-	43.00	31.00	39.00	44.00	43.00	31.00
Prüfkörperhöhe H	(mm)	71.89	66.42	-	68.77	73.45	-	77.64	77.20	85.49	64.88	82.60	63.43
Belagsausschnitt Nr.		1/2/3	1/2/3	-	1/2/3/4	1/2/3/4	-	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3	1/2/3	1	1
Rohdichte	(t/m3)	2.38	2.36	-	2.36	2.39	-	2.36	2.37	2.38	2.39	2.41	2.31
BELASTUNG (s)	(log s)	(o/oo)	(o/oo)	-	(o/oo)	(o/oo)	-	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)
16	1.20	4.79	3.70	-	3.65	5.01	-	6.89	3.87	5.42	4.19	5.10	4.57
64	1.81	5.68	4.21	-	3.95	5.76	-	8.11	4.61	6.28	4.77	6.01	5.82
256	2.41	6.51	4.67	-	4.22	6.47	-	9.13	5.24	7.04	5.29	6.65	6.50
1200	3.08	7.50	5.22	-	4.49	7.27	-	10.19	5.81	7.93	5.89	7.36	7.07
3600	3.56	8.27	5.59	-	4.67	7.89	-	10.95	6.15	8.64	6.25	7.78	7.42
ENTLASTG. (s)	(log s)	(o/oo)	(o/oo)	-	(o/oo)	(o/oo)	-	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)
16	1.20	0.85	0.72	-	0.79	0.81	-	0.85	0.59	0.79	0.75	0.83	0.73
64	1.81	1.01	0.87	-	0.93	1.01	-	1.05	0.79	0.92	0.92	1.01	0.97
256	2.41	1.12	0.96	-	1.06	1.20	-	1.19	0.95	1.00	1.02	1.10	1.18
1200	3.08	1.21	1.03	-	1.17	1.34	-	1.29	1.08	1.07	1.13	1.19	1.32
3600	3.56	1.23 ‖	1.09 ‖	-	1.26 ‖	1.45 ‖	-	1.36 ‖	1.18 ‖	1.13 ‖	1.21 ‖	1.26 ‖	1.43 ‖
BE-ENT (s)	(log s)	(o/oo)	(o/oo)	-	(o/oo)	(o/oo)	-	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)
16	1.20	3.95	2.98	-	2.86	4.20	-	6.04	3.28	4.63	3.44	4.27	3.84
64	1.81	4.67	3.33	-	3.02	4.75	-	7.06	3.83	5.36	3.85	5.00	4.85
256	2.41	5.40	3.71	-	3.16	5.27	-	7.94	4.29	6.04	4.27	5.55	5.32
1200	3.08	6.29	4.19	-	3.32	5.93	-	8.90	4.73	6.86	4.76	6.17	5.75
3600	3.56	7.04 ‖	4.50 ‖	-	3.41 ‖	6.44 ‖	-	9.59 ‖	4.97 ‖	7.51 ‖	5.04 ‖	6.52 ‖	5.99 ‖

‖logarithmisch extrapolierte Entlastungskurve

Kriechdehnungen bei 40 °C infolge einer einachsigen Druckbeanspruchung von $\sigma = 0.1$ N/mm^2, ermittelt an Bohrkernen ausserhalb und innerhalb der Radspuren der einzelnen Autobahnteilstrecken, Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS)

EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, CH-8600 Dübendorf

oHMT		AUSSERHALB RADSPUR (aRS)								INNERHALB RADSPUR (RS)			
		A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	G	H
		Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel
Schichtdicke h	(mm)	44.00	44.00	99.00	107.00	51.00	95.00	77.00	53.00	44.00	44.00	77.00	53.00
Prüfkörperhöhe H	(mm)	122.90	125.03	185.02	118.45	128.59	169.96	146.69	130.17	109.67	126.40	129.51	129.75
Belagsausschnitt Nr.		1/2/3	1/2/3	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3	1/2/3	1/2/3/4	1/2/3/4
Rohdichte	(t/m3)	2.43	2.40	2.48	2.46	2.41	2.42	2.46	2.41	2.44	2.43	2.46	2.41
BELASTUNG (s)	(log s)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)
16	1.20	5.68	4.11	3.30	4.29	3.75	1.59	4.23	2.71	3.61	3.67	4.42	2.89
64	1.81	6.51	4.54	4.50	4.97	4.32	1.89	5.02	3.19	4.15	3.91	5.28	3.41
256	2.41	7.37	4.96	5.84	5.67	4.89	2.22	5.68	3.55	4.66	4.17	6.00	3.81
1200	3.08	8.65	5.56	7.28	6.54	5.58	2.61	6.37	3.91	5.33	4.50	6.71	4.21
3600	3.56	10.09	6.07	8.15	7.31	6.16	2.90	6.89	4.15	5.93	4.76	7.22	4.46
ENTLASTG. (s)	(log s)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)
16	1.20	0.77	0.64	0.98	0.74	0.70	0.37	0.65	0.45	0.68	0.56	0.67	0.46
64	1.81	0.93	0.77	1.21	0.91	0.91	0.48	0.81	0.61	0.82	0.67	0.83	0.63
256	2.41	1.07	0.90	0.90	1.04	1.06	0.60	0.93	0.77	0.95	0.79	0.95	0.78
1200	3.08	1.18	1.03	1.11	1.13	1.22	0.74	1.02	0.93	1.03	0.91	1.03	0.94
3600	3.56	1.26	1.13	1.05	1.19	1.34	0.85	1.07	1.02	1.04	1.01	1.07	1.04
BE-ENT (s)	(log s)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)
16	1.20	4.91	3.47	2.32	3.55	3.05	1.22	3.58	2.26	2.94	3.12	3.75	2.43
64	1.81	5.58	3.76	3.29	4.07	3.41	1.42	4.21	2.57	3.33	3.24	4.45	2.78
256	2.41	6.30	4.07	4.94	4.64	3.83	1.62	4.75	2.78	3.71	3.38	5.05	3.04
1200	3.08	7.47	4.53	6.17	5.41	4.37	1.87	5.35	2.99	4.31	3.58	5.68	3.27
3600	3.56	8.83	4.94	7.10	6.12	4.82	2.05	5.82	3.13	4.89	3.74	6.15	3.43

uHMT		A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	G	H
		Mittel	Mittel	Mittel		Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel
Schichtdicke h	(mm)	59.00	56.00	90.00	-	61.00	100.00	91.00	81.00	59.00	56.00	91.00	81.00
Prüfkörperhöhe H	(mm)	124.36	131.41	159.32	-	116.28	180.14	146.69	136.56	128.42	131.06	129.51	136.85
Belagsausschnitt Nr.		1/2/3	1/2/3	1/2/3/4	-	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3	1/2/3	1/2/3/4	1/2/3/4
Rohdichte	(t/m3)	2.43	2.43	2.47	-	2.40	2.39	2.46	2.42	2.44	2.44	2.46	2.43
BELASTUNG (s)	(log s)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)
16	1.20	5.95	4.72	3.33	-	3.38	1.60	4.23	2.01	5.07	3.36	4.42	2.04
64	1.81	6.82	5.23	5.07	-	3.79	1.91	5.02	2.36	5.70	3.68	5.28	2.33
256	2.41	7.67	5.72	7.62	-	4.17	2.24	5.68	2.65	6.31	3.99	6.00	2.59
1200	3.08	8.74	6.36	10.70	-	4.62	2.64	6.37	2.98	7.14	4.37	6.71	2.87
3600	3.56	9.76	6.98	12.52	-	4.98	2.95	6.89	3.22	8.03	4.68	7.22	3.08
ENTLASTG. (s)	(log s)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)
16	1.20	0.91	0.70	0.47	-	0.73	0.38	0.65	0.37	0.80	0.62	0.67	0.39
64	1.81	1.07	0.83	0.65	-	0.91	0.50	0.81	0.50	0.95	0.75	0.83	0.51
256	2.41	1.20	0.93	0.89	-	1.05	0.63	0.93	0.60	1.07	0.87	0.95	0.62
1200	3.08	1.32	1.03	1.22	-	1.18	0.76	1.02	0.69	1.16	0.98	1.03	0.72
3600	3.56	1.38	1.10	1.54	-	1.27	0.87	1.07	0.74	1.37	1.05	1.07	0.79
BE-ENT (s)	(log s)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)
16	1.20	5.04	4.02	2.86	-	2.65	1.22	3.58	1.64	4.26	2.75	3.75	1.65
64	1.81	5.74	4.40	4.42	-	2.88	1.41	4.21	1.87	4.75	2.93	4.45	1.82
256	2.41	6.47	4.79	6.74	-	3.11	1.61	4.75	2.06	5.24	3.12	5.05	1.97
1200	3.08	7.43	5.33	9.47	-	3.44	1.88	5.35	2.29	5.98	3.39	5.68	2.15
3600	3.56	8.38	5.88	10.98	-	3.71	2.08	5.82	2.47	6.67	3.63	6.15	2.29

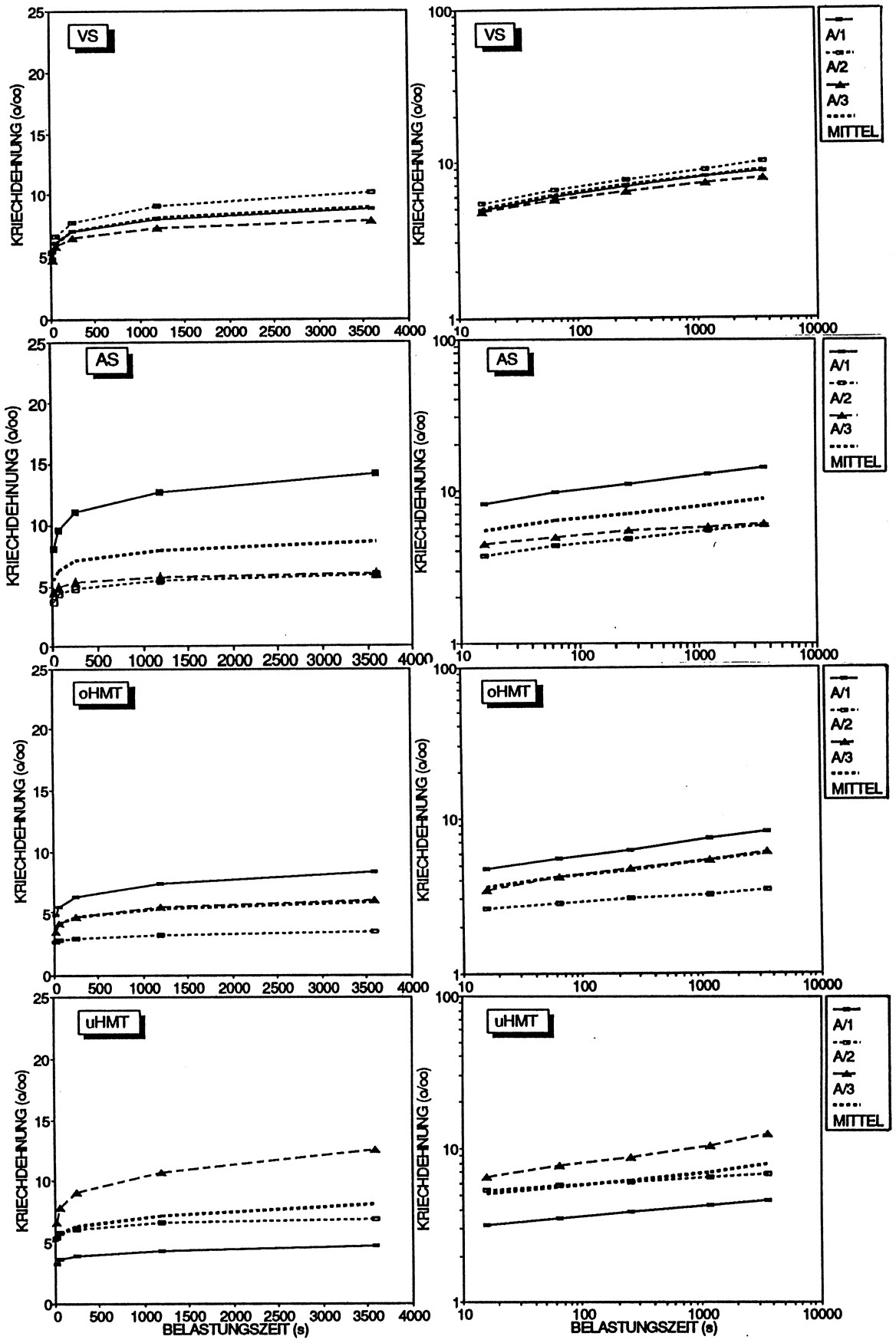
‖logarithmisch extrapolierte Entlastungskurve

Kriechdehnungen bei 40 °C infolge einer einachsigen Druckbeanspruchung von $\sigma = 0.1$ N/mm^2, ermittelt an Bohrkernen ausserhalb und innerhalb der Radspuren der einzelnen Autobahnteilstrecken, obere Heissmischragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT)

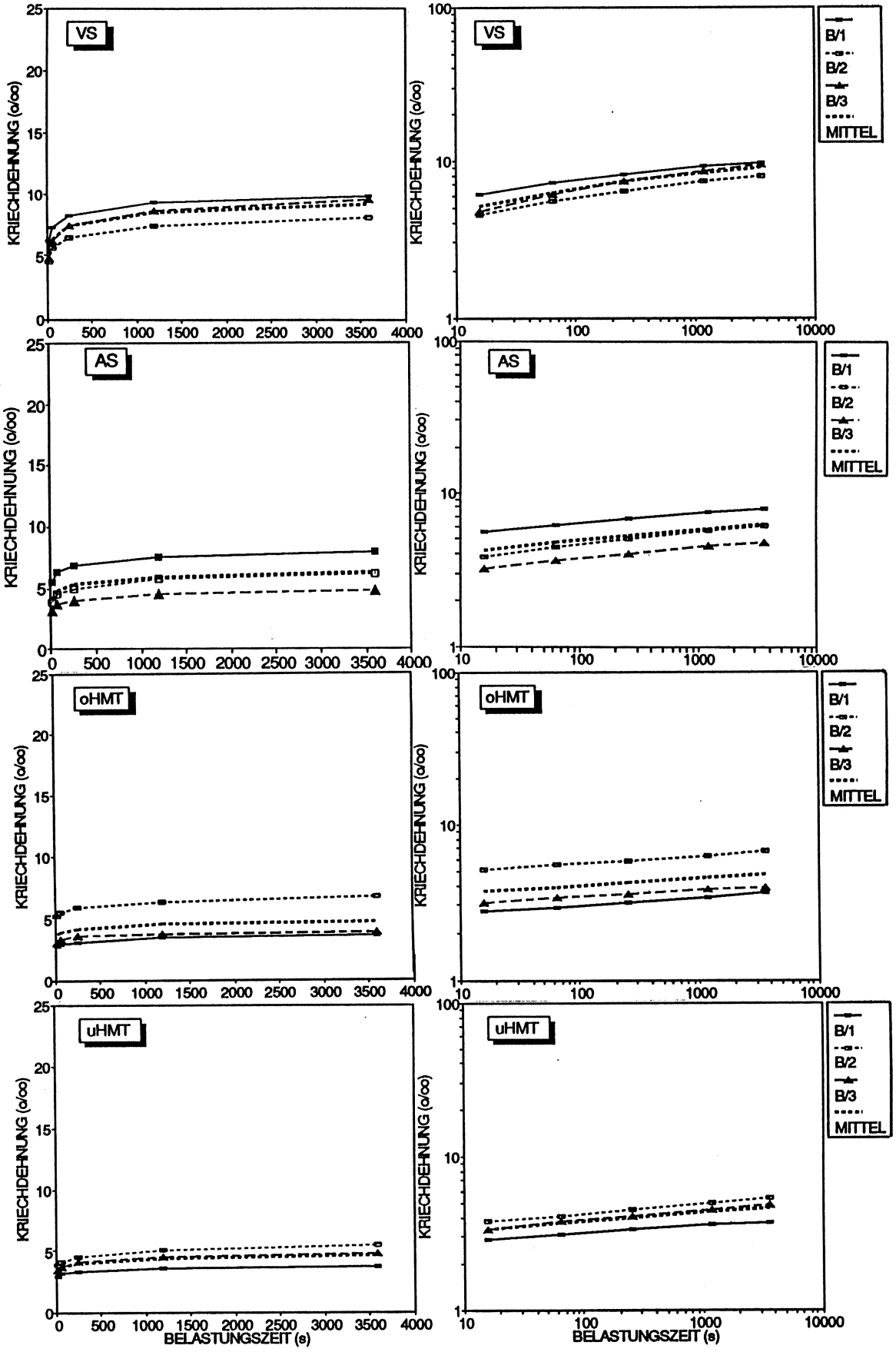
GESAMTBELAG	AUSSERHALB RADSPUR (aRS)								INNERHALB RADSPUR (RS)			
	A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	G	H
	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel
Schichtdicke h (mm)	170.00	181.00	236.00	171.00	195.00	245.00	241.00	202.00	170.00	181.00	241.00	202.00
Prüfkörperhöhe H (mm)	164.97	160.10	220.70	158.28	185.88	225.83	226.53	184.98	161.30	168.20	217.50	184.08
Belagsausschnitt Nr.	1/2/3	1/2/3	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3/4	1/2/3	1/2/3	1/2/3/4	1/2/3/4
Rohdichte (t/m3)	2.40	2.40	2.46	2.43	2.40	2.41	2.43	2.41	2.42	2.41	2.42	2.42
BELASTUNG (s) (log s)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)
16 1.20	5.02	3.53	3.47	2.88	3.05	1.43	4.62	2.46	5.18	3.53	4.34	2.49
64 1.81	6.05	4.15	5.18	3.36	3.72	1.84	5.52	2.99	6.14	4.09	5.20	3.00
256 2.41	7.25	4.81	7.38	3.91	4.45	2.32	6.35	3.47	7.18	4.70	6.00	3.46
1200 3.08	9.04	5.71	9.89	4.71	5.46	2.94	7.30	3.99	8.95	5.53	6.97	3.95
3600 3.56	10.00	6.54	11.41	5.51	6.45	3.40	8.08	4.37	10.46	6.32	7.83	4.30
ENTLASTG. (s) (log s)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)
16 1.20	0.81	0.81	0.49	0.69	0.76	0.34	0.84	0.51	0.68	0.77	0.89	0.50
64 1.81	0.97	0.97	0.70	0.82	0.96	0.45	1.05	0.68	0.81	0.94	1.12	0.67
256 2.41	1.07	1.10	0.97	0.91	1.14	0.58	1.21	0.85	0.91	1.07	1.29	0.83
1200 3.08	1.16	1.20	1.30	0.98	1.27	0.74	1.31	1.00	0.99	1.17	1.39	0.97
3600 3.56	1.23	1.25	1.60	1.04	1.37	0.87	1.34	1.06	1.04	1.21	1.42	1.02
BE-ENT (s) (log s)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)	(o/oo)
16 1.20	4.21	2.72	2.98	2.20	2.29	1.10	3.79	1.95	4.50	2.76	3.45	1.99
64 1.81	5.09	3.17	4.48	2.54	2.76	1.39	4.48	2.31	5.33	3.15	4.08	2.33
256 2.41	6.18	3.71	6.41	3.00	3.31	1.74	5.15	2.62	6.27	3.62	4.71	2.63
1200 3.08	7.88	4.51	8.59	3.73	4.20	2.20	6.00	2.99	7.96	4.37	5.58	2.98
3600 3.56	8.77	5.29	9.80	4.47	5.08	2.53	6.74	3.31	9.42	5.11	6.41	3.28

‖logarithmisch extrapolierte Entlastungskurve

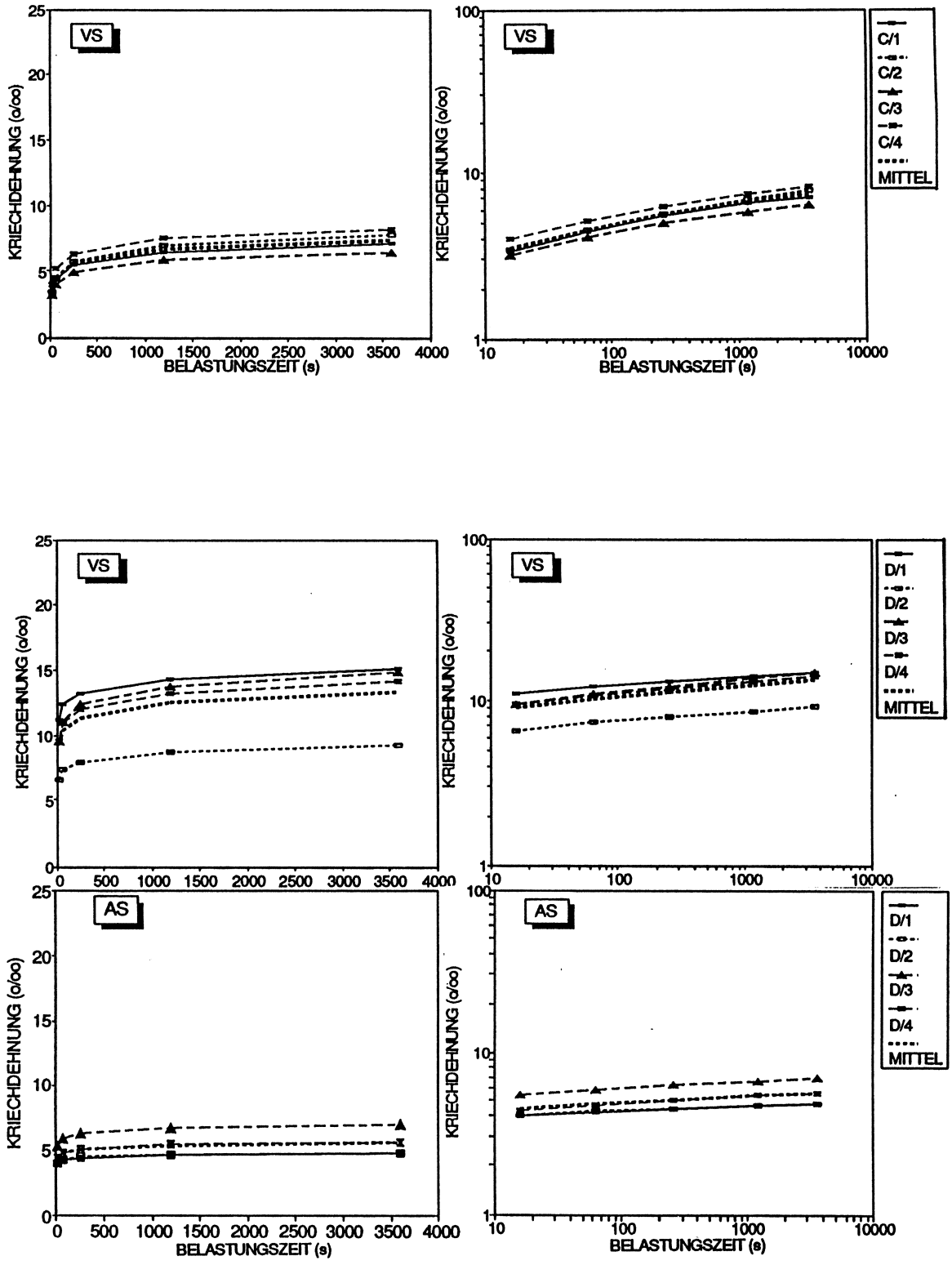
Kriechdehnungen bei 40 °C infolge einer einachsigen Druckbeanspruchung von $\sigma = 0.1$ N/mm^2, ermittelt an Bohrkernen ausserhalb und innerhalb der Radspuren der einzelnen Autobahnteilstrecken, Gesamtbelag



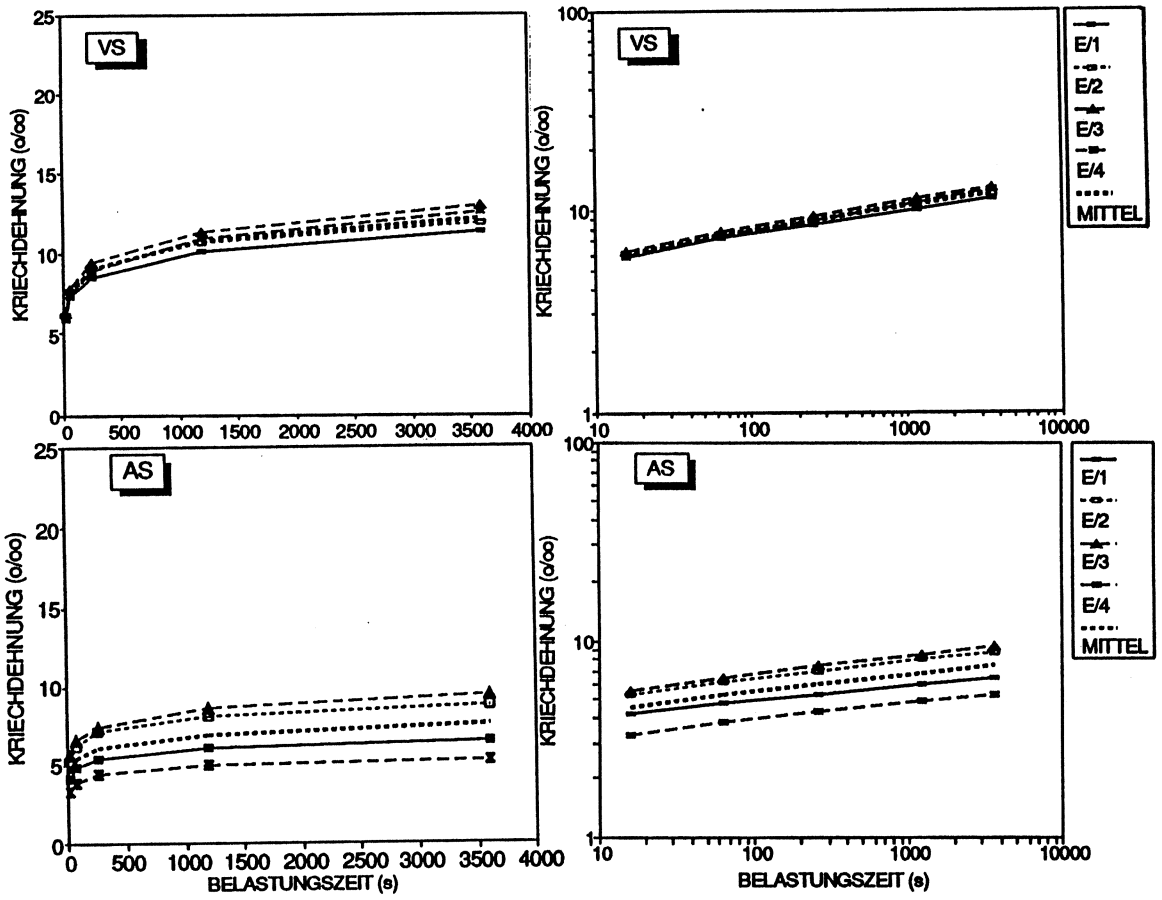
Kriechdehnungen ε_{kr} (°/oo) bei 40 °C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2, ermittelt an Bohrkernen *innerhalb der Radspuren von Autobahnteilstrecke A*; Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT); links linear, rechts doppeltlogarithmisch dargestellt



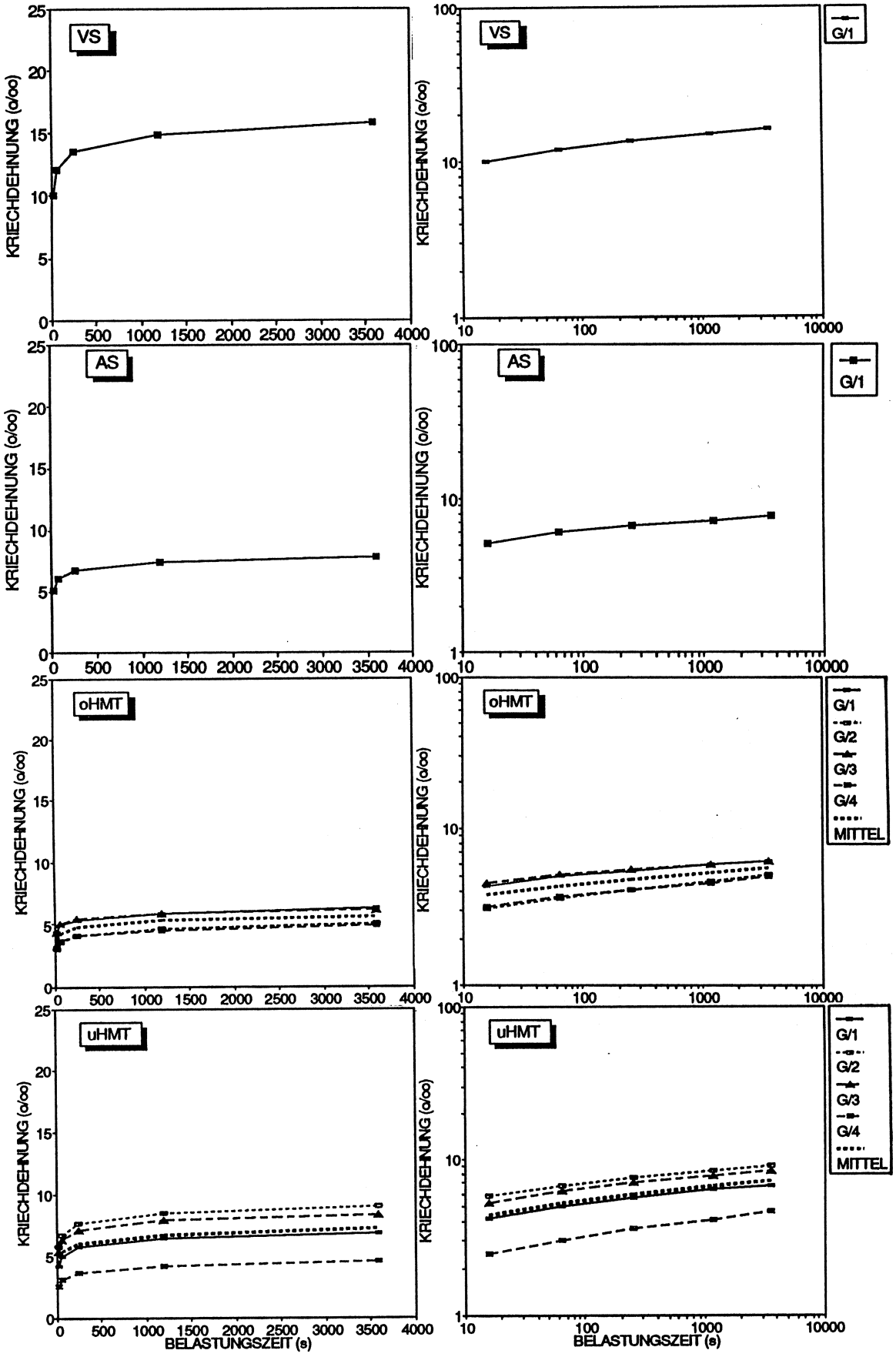
Kriechdehnungen ε_{kr} (°/oo) bei 40 °C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2, ermittelt an Bohrkernen *innerhalb der Radspuren von Autobahnteilstrecke B*; Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT); links linear, rechts doppeltlogarithmisch dargestellt



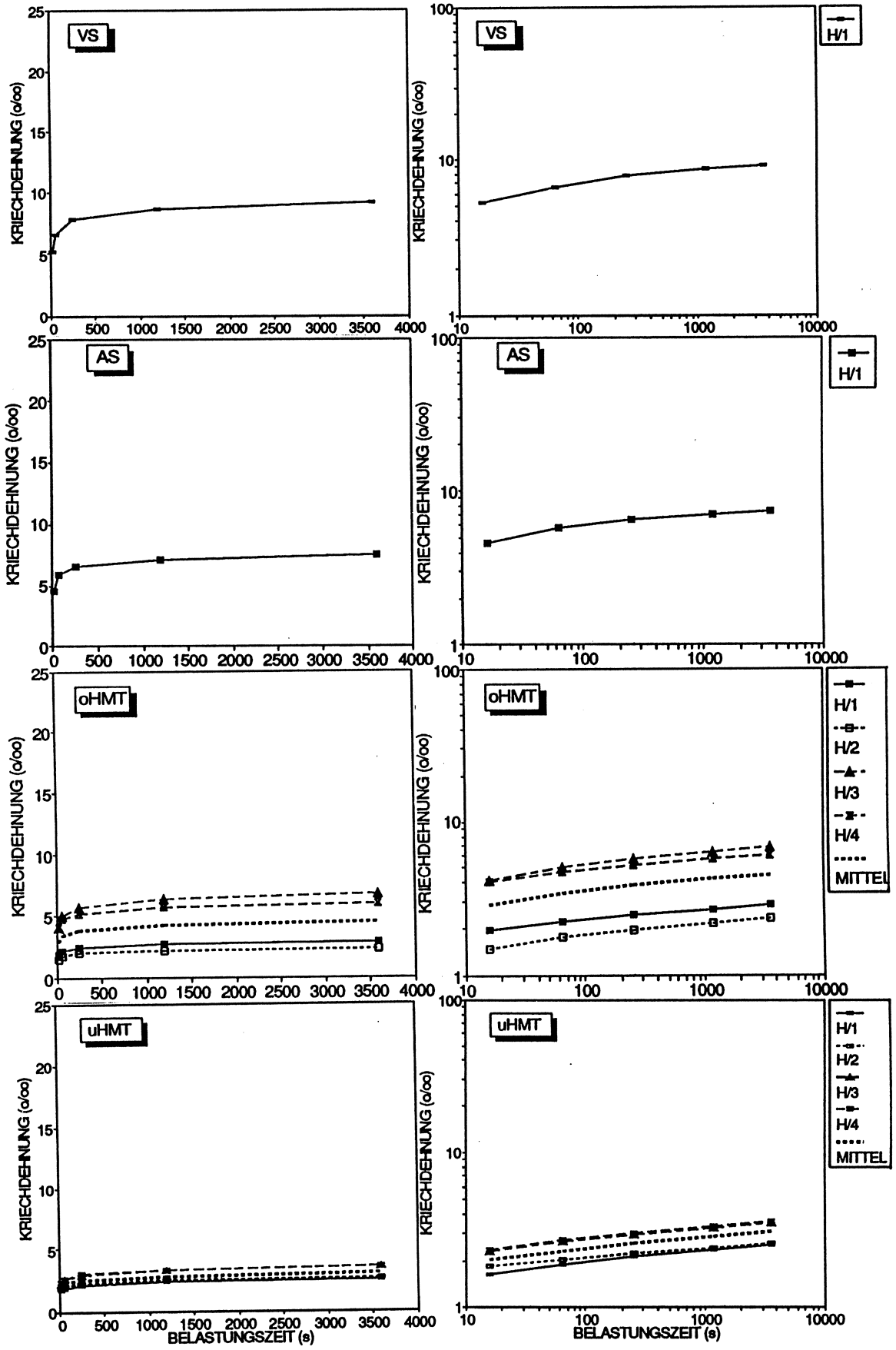
Kriechdehnungen ε_{kr} (‰) bei 40 °C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2, ermittelt an Bohrkernen *innerhalb der Radspuren von Autobahnteilstrecke C und D*; Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT); links linear, rechts doppeltlogarithmisch dargestellt



Kriechdehnungen ε_{kr} (°/oo) bei 40 °C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2, ermittelt an Bohrkernen *innerhalb der Radspuren von Autobahnteilstrecke E*; Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT); links linear, rechts doppeltlogarithmisch dargestellt

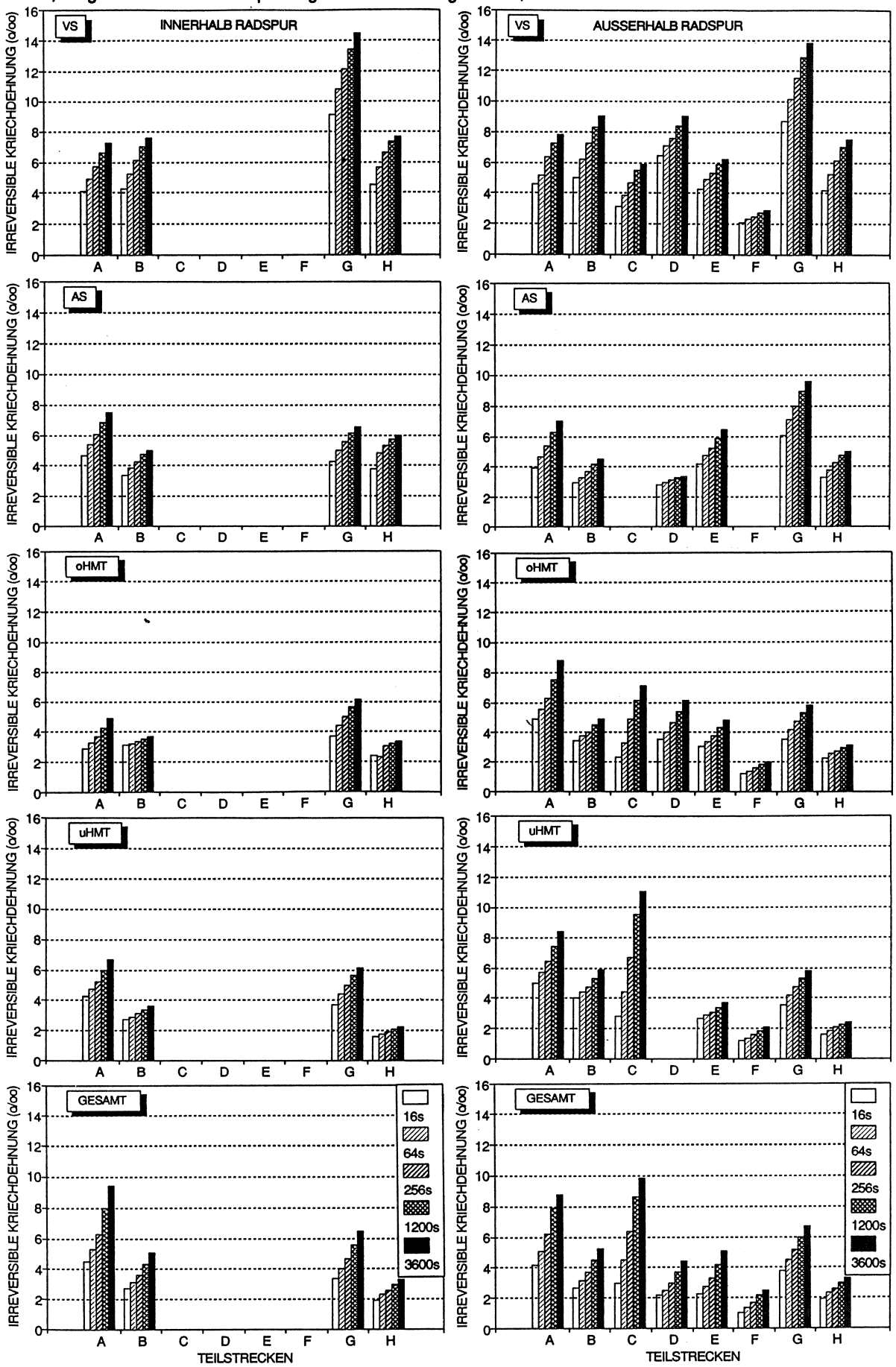


Kriechdehnungen ε_{kr} (‰) bei 40 °C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2, ermittelt an Bohrkernen *innerhalb der Radspuren von Autobahnteilstrecke G*; Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT); links linear, rechts doppeltlogarithmisch dargestellt



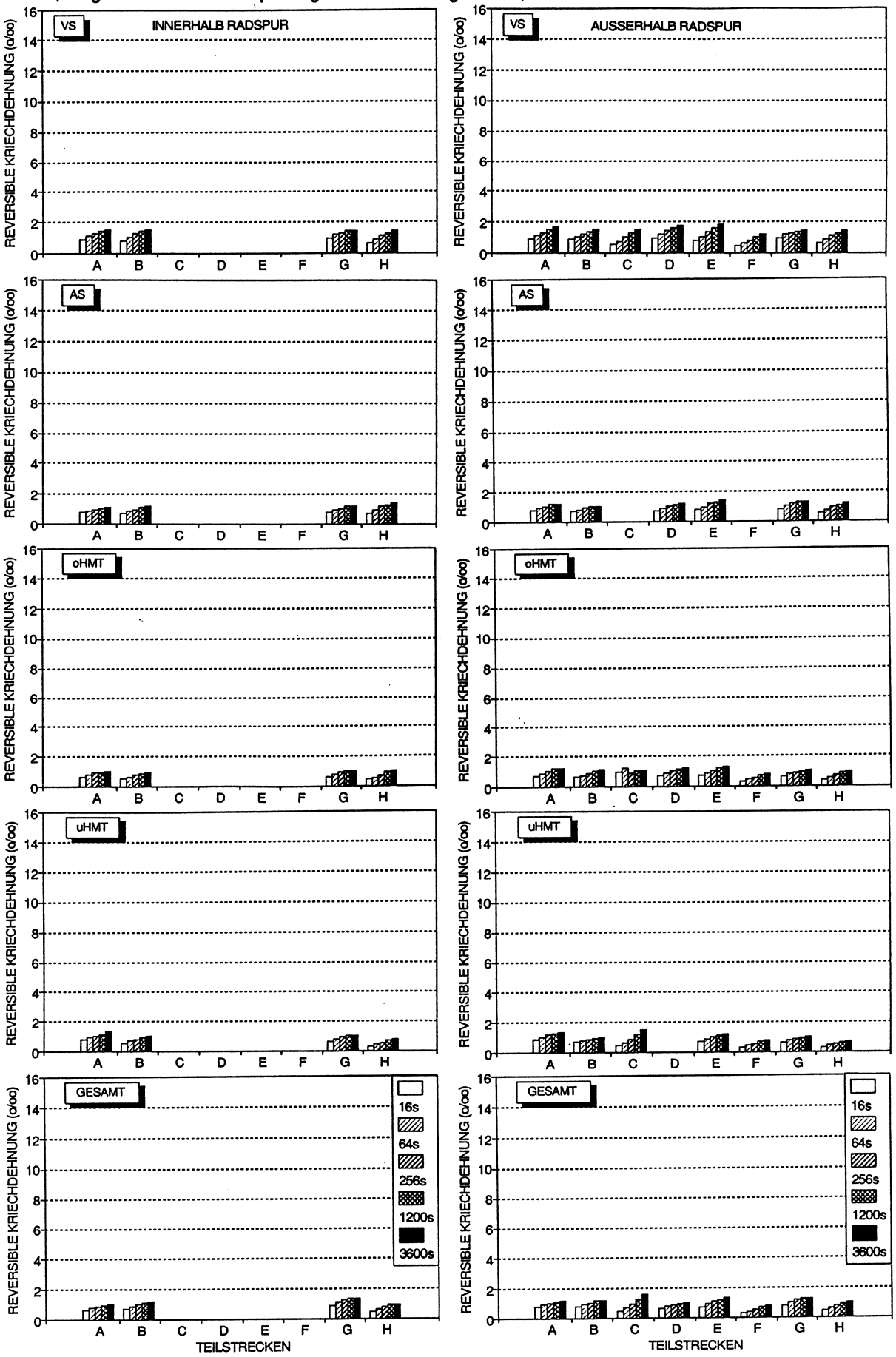
Kriechdehnungen ε_{kr} (°/oo) bei 40 °C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2, ermittelt an Bohrkernen *innerhalb der Radspuren von Autobahnteilstrecke H*; Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT); links linear, rechts doppeltlogarithmisch dargestellt

EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, CH-8600 Dübendorf



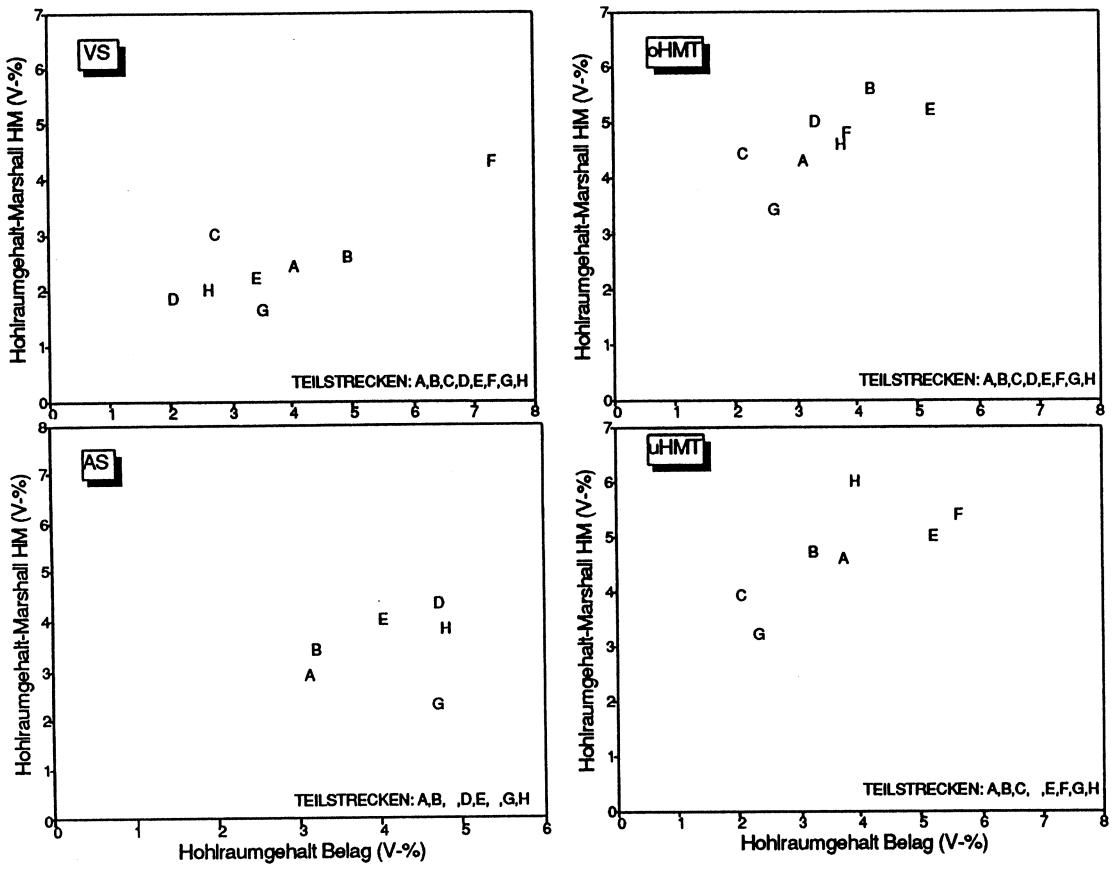
Irreversible Kriechdehnungen bei 40 °C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2, ermittelt an Bohrkernen innerhalb und ausserhalb der Radspuren der Autobahnteilstrecken, Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT), Gesamtbelag

EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, CH-8600 Dübendorf

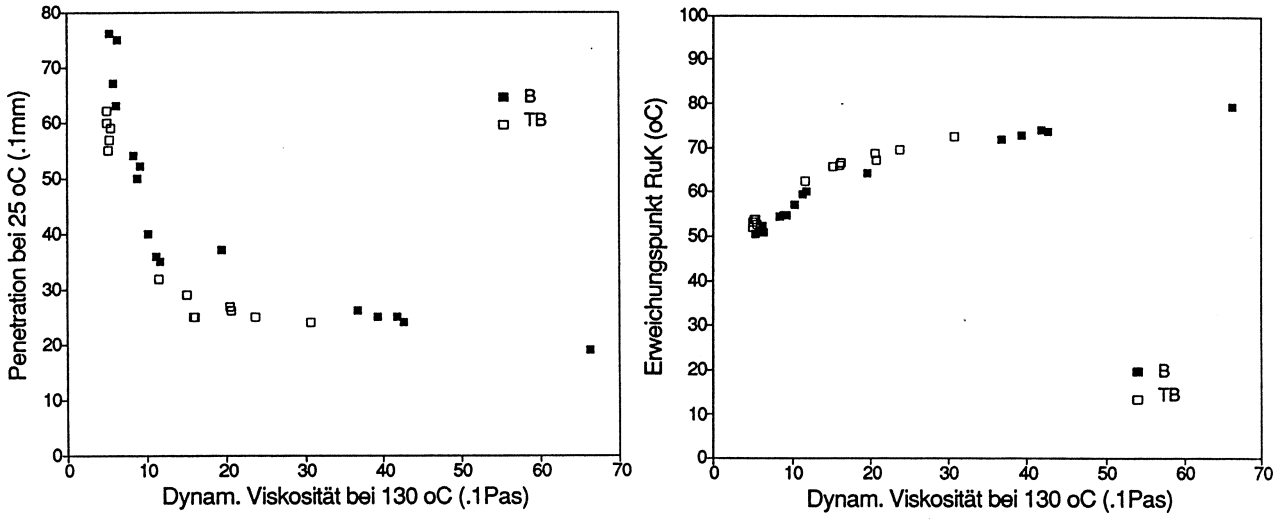


Reversible Kriechdehnungen bei 40 °C infolge einachsiger Druckbeanspruchung von σ=0.1 N/mm^2, ermittelt an Bohrkernen innerhalb und ausserhalb der Radspuren der Autobahnteilstrecken, Verschleissschicht (VS), Ausgleichsschicht (AS), obere Heissmischtragschicht (oHMT), untere Heissmischtragschicht (uHMT), Gesamtbelag

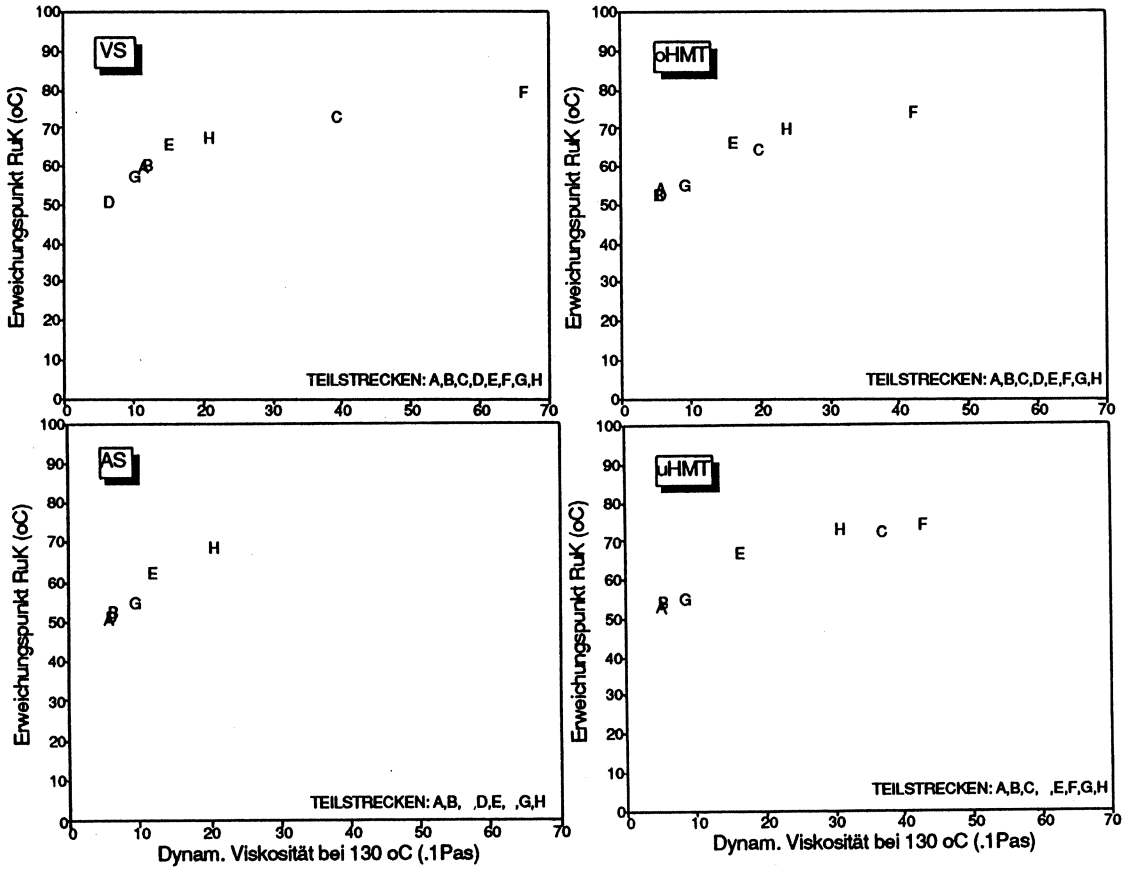
Vergleich materialtechnischer Daten



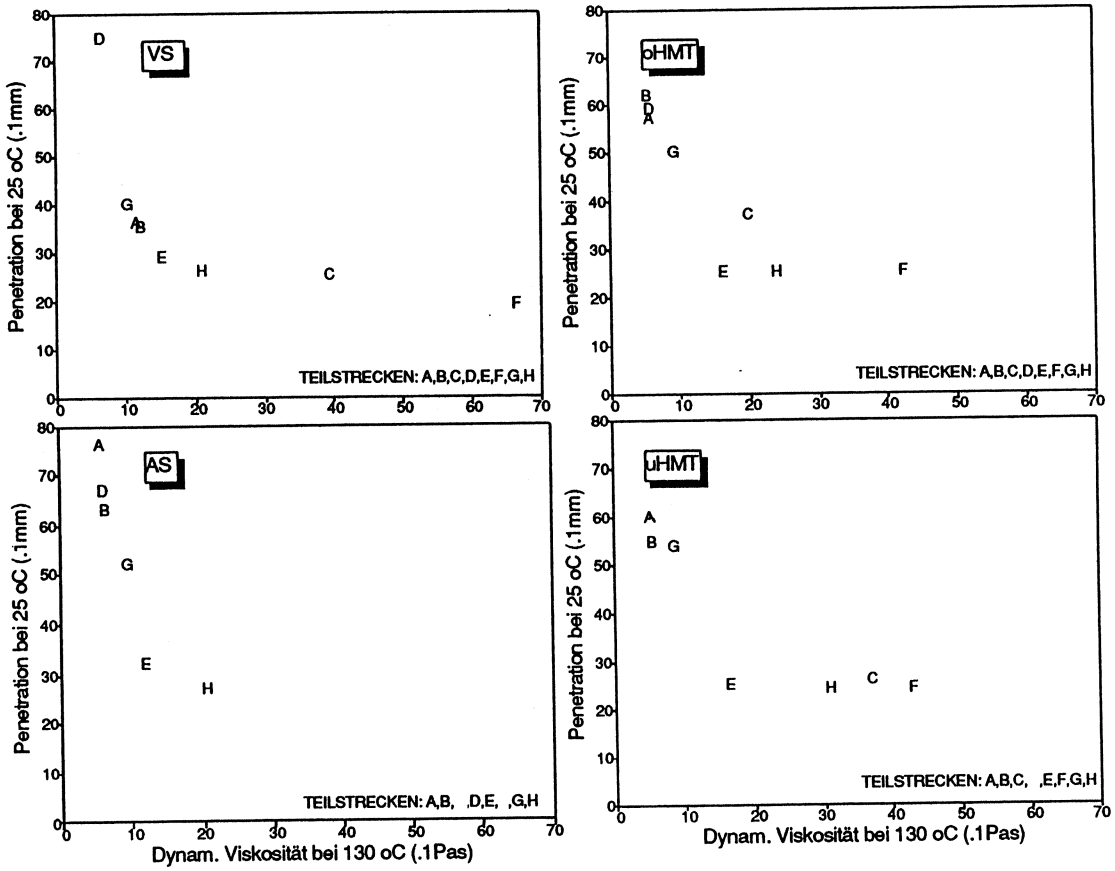
Hohlraumgehalt-Marshall in Funktion des Hohlraumgehaltes der Belagsschichten



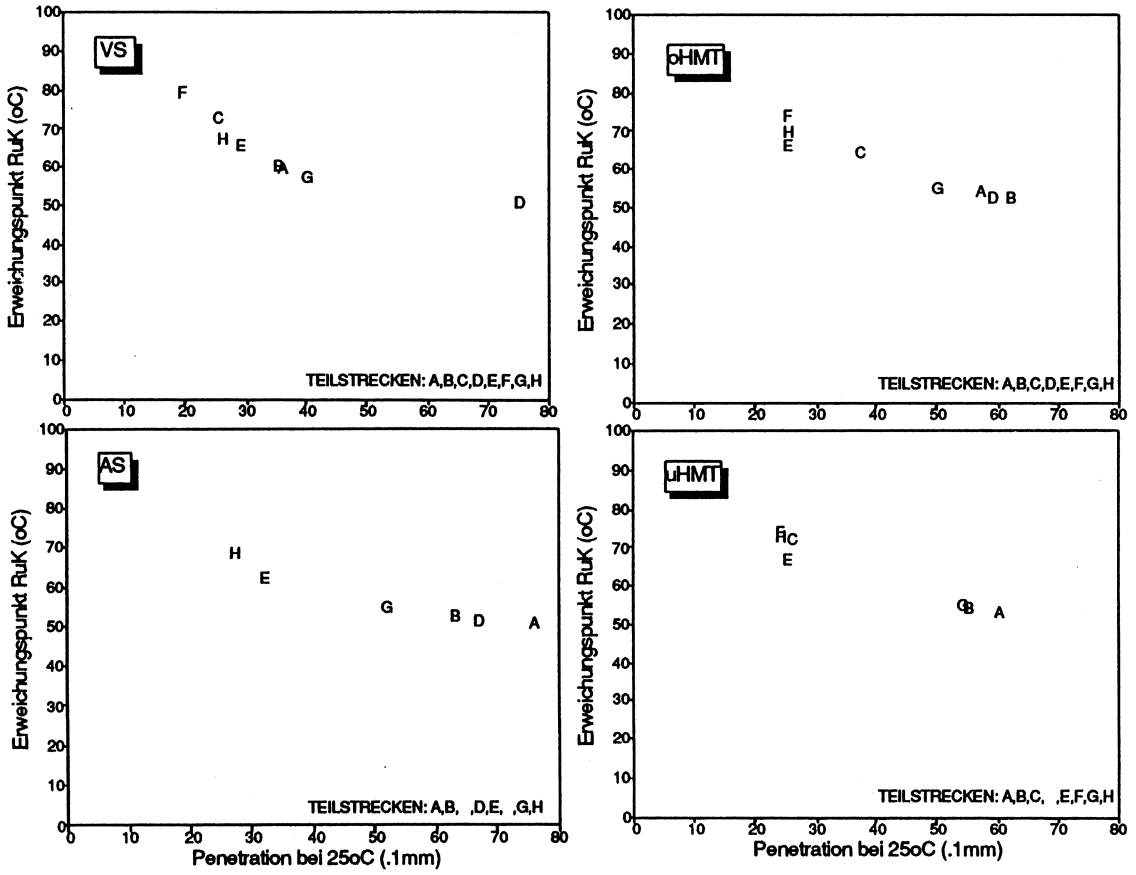
Gegenüberstellung der Bindemittel Bitumen und Teerbitumen anhand des Zusammenhangs zwischen Penetration bei 25 °C bzw. Erweichungspunkt Ring und Kugel und der dynamischen Viskosität bei 130 °C (alle Belagsschichten)



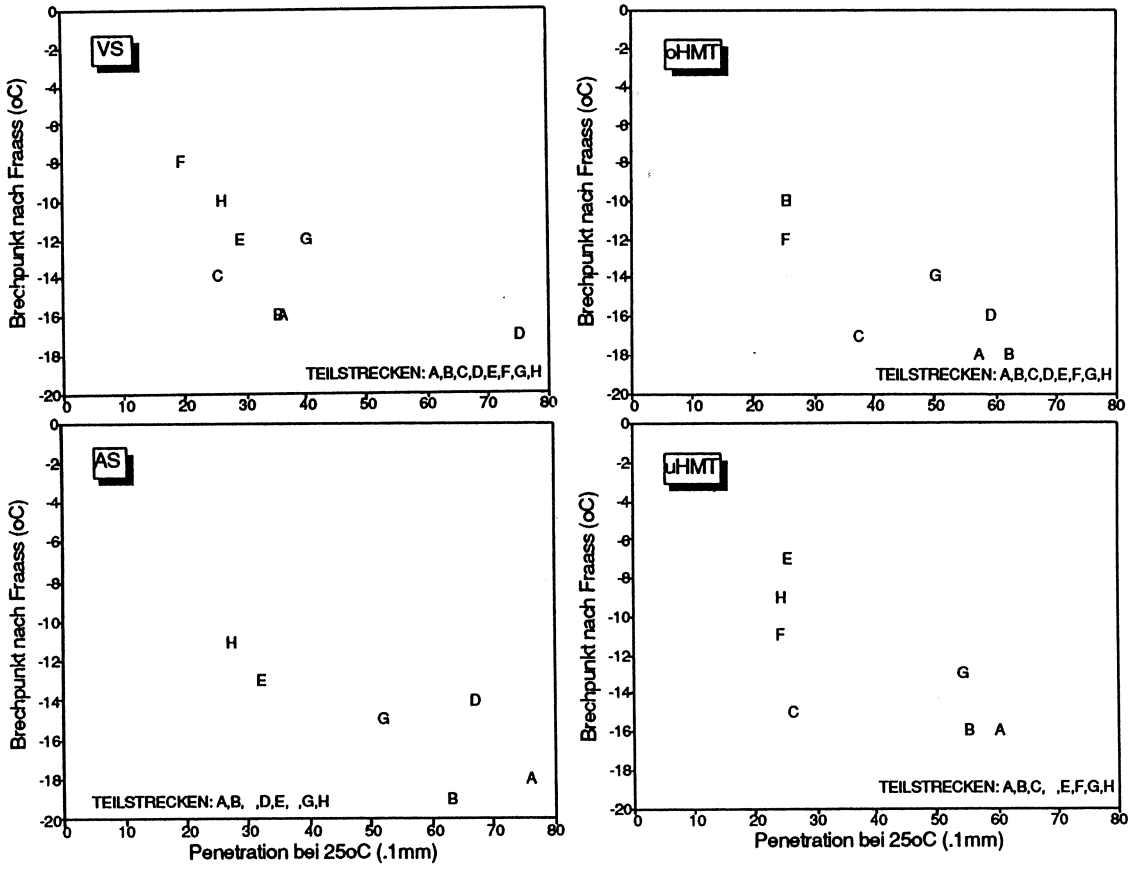
Erweichungspunkt Ring und Kugel in Funktion der dynamischen Viskosität bei 130 °C



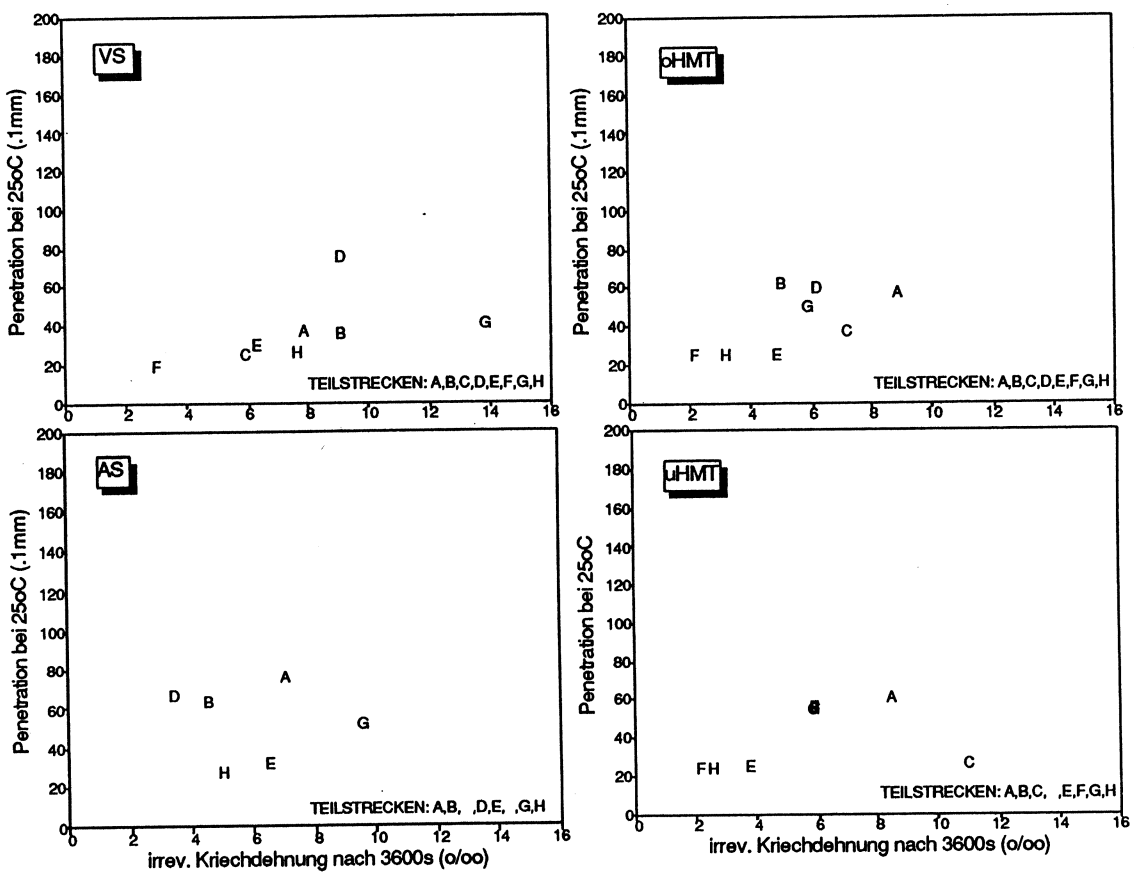
Penetration bei 25 °C in Funktion der dynamischen Viskosität bei 130 °C



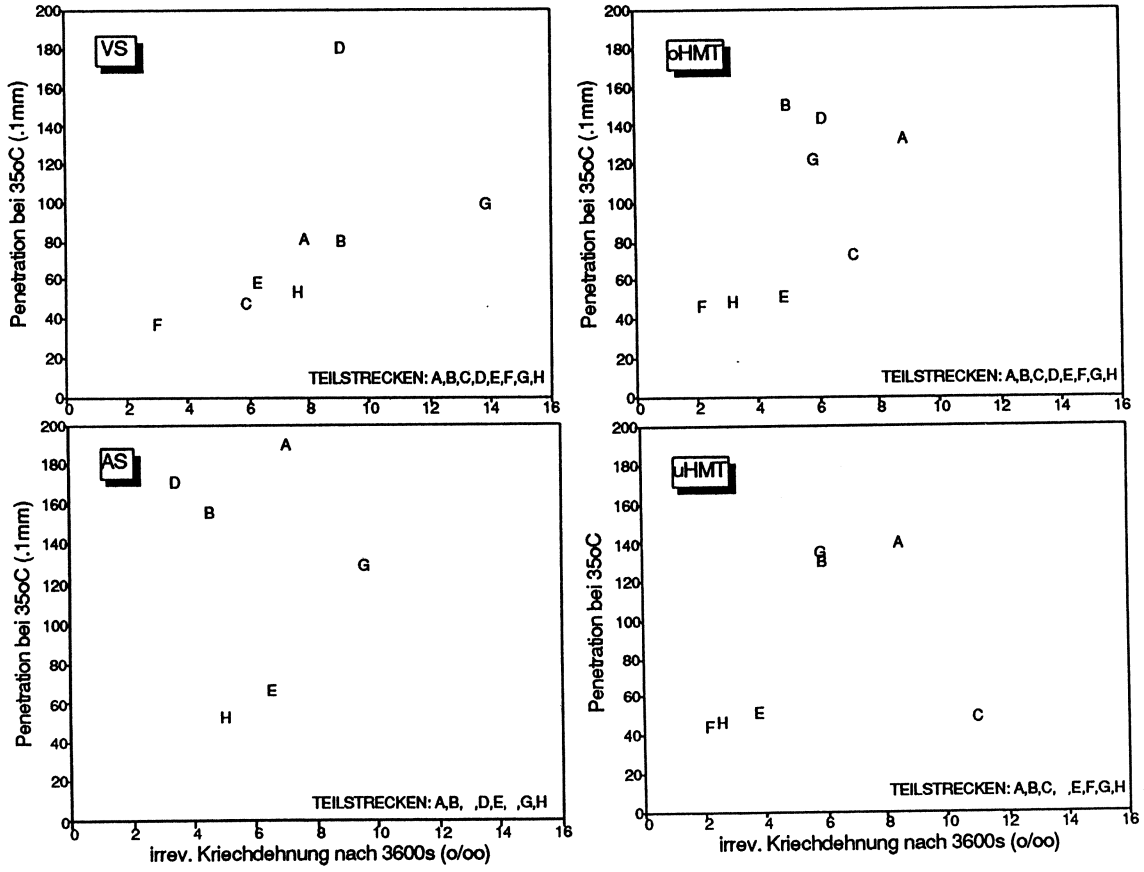
Erweichungspunkt Ring und Kugel in Funktion der Penetration bei 25 °C



Brechpunkt nach Fraass in Funktion der Penetration bei 25 °C



Penetration bei 25 °C in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir} (gleicher Massstab wie unten)



Penetration bei 35 °C in Funktion der Kriechvergleichsgrösse e_{ir}