

# **Zum Verformungsverhalten von Asphaltbeton unter Druck**

*Abhandlung*

zur Erlangung des Titels eines  
*Doktors der Technischen Wissenschaften*  
der  
*Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich*

vorgelegt von

*Siegfried Huschek*

Dipl.- Ing. TH München  
geboren am 13. August 1940  
Deutschland

angenommen auf Antrag von

*Prof. H. Grob, Referent*  
*Prof. Dr. A. Rösli, Korreferent*

## KURZFASSUNG

Die vorliegende Arbeit ist ein Beitrag zum besseren Verständnis des Verformungsverhaltens von Asphaltbeton unter Druck. Um die Vielfalt der in der Praxis gebräuchlichen Mischungen zu berücksichtigen, erstreckt sich die Untersuchung auf 17 verschiedene Mischungen, die sich hinsichtlich der maximalen Korngrösse, der Korngrössenverteilung, des Bindemittelgehaltes und zum Teil auch hinsichtlich des Verdichtungsgrades unterscheiden. Damit ist der gesamte, in der Praxis vorkommende, Bereich für Verschleiss- Ausgleichs- und Tragschichten abgedeckt. Da die Verdichtungsart einen erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Asphalttschichten hat, wurde ausschliesslich mit Bohrkernen aus eingewalzten Schichten experimentiert. Alle HMT 40s-Prüfkörper wurden aus einer Versuchsstrecke und alle TA 6- und TA 16-Prüfkörper wurden aus Platten gezogen, die mittels Handwalze verdichtet worden waren.

Asphaltbeton wird als ein Dreiphasensystem betrachtet, bestehend aus einem räumlichen Mineralskelett, der viskosen Mörtelmatrix und den luftgefüllten Hohlräumen. Infolge triaxialer Druckbeanspruchung werden in diesem recht heterogenen Gemisch die folgenden Verformungswiderstände mobilisiert:

- Initialwiderstand
- viskoser Widerstand
- innere Reibung.

Unter dieser Annahme kann das Stoffgesetz für das Verformungsverhalten von Asphaltbeton aus der MOHR-COULOMB'SCHEN Fliessbedingung (Mineralskelett) und dem Stoffgesetz für idealviskoses Verformungsverhalten nach NEWTON (Mörtelmatrix) abgeleitet werden. Die Gleichgewichtsbedingung zwischen der Schubspannung  $\tau(q)$  und der Summe der Verformungswiderstände  $\tau_{vw}$  in einer um  $\alpha$  geneigten Scherfläche gilt sowohl für den Kriech- als auch für den Relaxationsvorgang.

Es wird davon ausgegangen, dass beim Kriechen zu Belastungsbeginn nur viskoser Widerstand und möglicherweise Initialwiderstand wirken können, da zunächst alle Mineralteilchen von einer Bindemittelhülle umgeben sind. Mit zunehmender Verformung erfolgt jedoch eine Umlagerung der Spannungen von der viskosen Mörtelmatrix auf das Mineralskelett, wodurch zunehmend Reibungswiderstand mobilisiert wird. Dieser Vorgang wird als "Konsolidierung" bezeichnet. Für die mathematische Behandlung wird vereinfachend ein linearer Zusammenhang zwischen der inneren Reibung  $tg\phi$  und der Dehnung  $\epsilon$  angenommen. Die gleiche Hypothese kann auch für die Zunahme des Initialwiderstandes gemacht werden. Somit sind zur Kennzeichnung der Verformungseigenschaften drei bzw. vier Kenngrössen erforderlich:

- $\eta_m$  effektive Viskosität der bituminösen Mörtelmatrix
- $\tau_{i0}$  Initialwiderstand zu Beginn der Belastung (in der Regel gilt für nicht vorbelastete Prüfkörper  $\tau_{i0} = 0$ )
- $c_i = \tau_i / \epsilon_1$  Proportionalitätsfaktor betreffend den Initialwiderstand
- $c_\phi = \tau_\phi / \epsilon_1$  Proportionalitätsfaktor betreffend den Widerstand infolge innerer Reibung.

Die Gleichgewichtsbedingung zwischen der äusseren Beanspruchung ( $\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3$ ) und den mobilisierten Widerständen liefert eine Differentialgleichung für die Dehnungsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$ . Die Lösung führt auf eine e-Funktion und entspricht der Verformungsgleichung für das KELVIN-Modell. Sie ermöglicht aber nicht nur die Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Verformung sondern darüberhinaus auch Aussagen über den momentanen Anteil der drei Widerstandskomponenten.

Um das Verformungsverhalten der Prüfkörper unter triaxialem Druck experimentell untersuchen zu können, wurde eine Triaxialzelle entwickelt. Damit wurden Versuche unter den folgenden Belastungsbedingungen durchgeführt:

- Statischer Druck (einaxial, triaxial und isotrop). Es wurden die Kriechkurven unter Belastung und die Rückformung nach Entlastung aufgezeichnet. Durch Messung der axialen und radialen Dehnung konnte die Volumenänderung beobachtet werden. Für den Fall des isotropen Drucks konnte der Kompressionsmodul bestimmt werden.
- Weggesteuerter Druck mit konstanter axialer Verformungsgeschwindigkeit mit und ohne Seitendruck. Nach axialen Dehnungen von 0,5 %, 1,0 % und 2,0 % wurden jeweils Pausen eingelegt, während denen der Prüfkörper relaxieren konnte bis der viskose Anteil am Verformungswiderstand vollständig abgebaut war. Dieser Versuch wurde bei mindestens zwei verschiedenen Seitendrücken  $\sigma_r$  durchgeführt, so dass daraus alle drei Komponenten des Verformungswiderstandes eindeutig bestimmt werden konnten.
- Einaxiale, sinusförmige Belastung im Druckbereich (mit und ohne Seitendruck). Aus den dynamischen Versuchen wurde der "komplexe Modul"  $|E^*|$  und die irreversible Dehnung  $\epsilon_{irr}$  ermittelt. Die Ergebnisse dienten in erster Linie dem Vergleich mit denjenigen aus den statischen Versuchen. So konnte gezeigt werden, dass der Widerstand von Asphaltbeton gegenüber bleibenden Verformungen auch durch statische Versuche mit ausreichender Sicherheit angesprochen und bewertet wird. Aufgrund der guten Vergleichsmöglichkeiten der Versuchsergebnisse darf davon ausgegangen werden, dass die aus statischen Versuchen gewonnenen Erkenntnisse über den Verformungsmechanismus sinngemäss auf die dynamische Beanspruchung übertragen werden dürfen.

Durch diese Versuche wurden die Modellvorstellungen und das Stoffgesetz qualitativ bestätigt. Die quantitative Bestätigung wurde durch die begrenzte Anzahl an Prüfkörpern (pro Mischung ca. 20 Stück) und durch die Streuung der Versuchsergebnisse beeinträchtigt. Für mehrere Mischungen wurden durch Variation der Versuchsbedingungen die massgebenden Kenngrössen ( $C_i$ ,  $c_\phi$ ,  $\eta_m$ ,  $\tau_{i0}$ ) ermittelt. Aus dem Vergleich der Spreizungsbereiche für  $|E^*|$  und für  $\epsilon_{irr}$  geht hervor, dass Variationen in der Zusammensetzung von Asphaltbeton auf die irreversiblen Verformungen einen wesentlich grösseren Einfluss haben als auf die viskoelastischen Verformungseigenschaften.

Für den Praktiker dürften die folgenden Ergebnisse interessant sein:

Die zahlreichen Versuche (ca. 320) ermöglichen eine relative Quantifizierung der wichtigsten vier Einflüsse auf den Verformungswiderstand von Asphaltbeton, nämlich Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt, Verdichtungsgrad und Erweichungspunkt des Bindemittels. Um die Bedeutung der Einflüsse abschätzen und vergleichen zu können wurde ein Nomogramm zur Ermittlung einer "relativen Einflussziffer" aufgestellt. Der hohe Verformungswiderstand relativ magerer Mischungen mit grossem Maximalkorn ist deutlich erkennbar. Vom Gesichtspunkt des Verformungswiderstandes aus gesehen soll deshalb angestrebt werden, eine bituminöse Strassenbefestigung von geeigneter Dicke, aus möglichst wenig Schichten und mit Mischungen mit möglichst grossem Maximalkorn aufzubauen. Dieses Prinzip bewirkt zudem eine Verminderung des Bedarfs an bituminösem Bindemittel und dürfte bei weiterhin steigenden Bindemittelpreisen auch von wirtschaftlicher Bedeutung sein.

## R E S U M E

Le présent travail de recherche est une contribution à une meilleure compréhension du comportement de déformation du béton bitumineux sous compression. Pour tenir compte de la diversité des mélanges utilisés en pratique, l'investigation comprend 17 mélanges différents dont le diamètre du grain maximum, la granulométrie, la teneur en liant et partiellement aussi le degré de compactage varient. Le domaine de variation des couches d'usure, des couches de liaison et des couches de support est ainsi couvert. La méthode de compactage ayant une influence considérable sur les propriétés mécaniques, tous les essais furent exécutés avec des carottes tirées de couches compactées par rouleau. Toutes les carottes de HMT 40s ont été tirées d'une section d'essai et toutes les carottes de TA 6 et TA 16 ont été tirées de plaques compactées avec un rouleau à main.

Le béton bitumineux est considéré comme un système à trois phases qui consiste en un squelette spacial formé par des agrégats, d'une matrice de mortier bitumineux et de vides remplis d'air. Ce mélange très hétérogène mobilise sous compression triaxiale les résistances de déformation suivantes:

- résistance initiale
- résistance visqueuse
- frottements internes.

Basée sur cette hypothèse, la loi de déformation d'un béton bitumineux est dérivée de la condition de rupture selon MOHR-COULOMB (squelette minéral) et de la loi de déformation visqueuse selon NEWTON (matrice du mortier bitumineux). La condition d'équilibre entre la contrainte de cisaillement  $\tau(q)$  et la somme des résistances de déformation  $\tau_{VW}$  dans une interface de glissement inclinée de  $\alpha$  est valable pour le cas de fluage sous charge statique ainsi que dans le cas de la relaxation.

Puisque tous les agrégats sont enrobés par le liant on part du principe que le béton bitumineux développe au début d'une déformation uniquement une résistance visqueuse et éventuellement aussi une résistance initiale. Avec une déformation croissante, on assiste à une redistribution des contraintes de la matrice visqueuse sur le squelette minéral, ce qui entraîne un accroissement des frottements internes. Ce phénomène est appelé "consolidation". Pour simplifier le traitement mathématique, on admet une relation linéaire entre le frottement interne  $tg\phi$  et la déformation relative  $\epsilon$ . La même hypothèse est admise concernant la croissance de la résistance initiale. Trois valeurs, respectivement quatre, sont ainsi nécessaires pour caractériser la propriété de déformation d'un béton bitumineux:

$\eta_m$	viscosité effective de la matrice de mortier bitumineux
$\tau_{i0}$	résistance initiale au début du chargement (pour des éprouvettes non préchargées on peut normalement admettre $\tau_{i0} = 0$ )
$c_i = \tau_i/\epsilon_1$	coefficient de proportionalité concernant la résistance initiale
$c_\phi = \tau_\phi/\epsilon_1$	coefficient de proportionalité concernant la résistance de frottement interne.

La condition d'équilibre entre les contraintes de compression externes ( $\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3$ ) et les résistances internes mobilisées, fournit une équation différentielle pour la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$ . La solution conduit à une fonction-e qui correspond à l'équation de déformation pour le modèle de KELVIN. Elle permet non seulement de calculer la courbe de déformation en fonction du temps mais en plus elle donne aussi des informations concernant la répartition momentanée des trois composantes de résistance.

Une cellule triaxiale a été développée pour expérimenter le comportement de déformation des éprouvettes sous compression triaxiale. Des essais ont été exécutés avec les conditions de charge suivantes:

- Compression statique (uniaxiale, triaxiale, isotrope). La déformation de fluage sous charge ainsi que le déformation réversible après décharge a été enregistré. Le changement de volume est déterminé en mesurant les déformations axiales et radiales. En cas de compression isotrope le module de compression peut être calculé.
- Compression à vitesse de déformation axiale constante avec et sans compression latérale. Pour des déformations axiales de 0.5%, 1.0% et 2.0% l'avancement a été arrêté afin que l'éprouvette puisse relaxé jusqu'à la disparition complète de la résistance visqueuse. Afin de pouvoir déterminer les trois composantes de la résistance de déformation, l'essai a été exécuté avec au moins deux compressions latérales différentes.
- Contrainte de compression uniaxiale sinusoidale (avec ou sans compression latérale). Les essais dynamiques servent à déterminer le "module complexe"  $|E^*|$  et la déformation irréversible  $\epsilon_{irr}$ . Les résultats sont comparés avec ceux des essais statiques. On peut ainsi démontrer que la résistance du béton bitumineux à des déformations irréversibles peut être testée et évaluée par des essais statiques avec une précision suffisante. Sur la base de la bonne corrélation des résultats on peut admettre que les connaissances acquises sur le mécanisme de déformation par essai statique peuvent être transmises en général au cas de sollicitation dynamique.

Le modèle ainsi que la loi de déformation furent confirmés qualitativement par les essais mentionnés. La confirmation quantitative fut entravée par le nombre limité des éprouvettes (environ 20 pièces par type d'enrobé) et par la dispersion des résultats. Les valeurs caractéristiques ( $c_i$ ,  $c_\phi$ ,  $\eta_m$ ,  $\tau_{10}$ ) ont été déterminées pour quelques mélanges par variation des conditions d'essai. Il résulte de la comparaison entre le domaine de répartition des valeurs  $|E^*|$  et  $\epsilon_{irr}$  que des variations dans la composition d'un béton bitumineux ont beaucoup plus d'influence sur la déformation irréversible que sur ses propriétés viscoélastiques.

Les résultats suivants pourraient être intéressants pour le praticien:

Les résultats de nombreux essais (environ 320) permirent de quantifier relativement les quatre facteurs ayant la plus grande influence sur la résistance à la déformation des bétons bitumineux, c'est à dire la granulométrie, la teneur en liant, le degré de compactage et le point de ramollissement du liant. Un nomogramme est présenté afin de pouvoir comparer et évaluer les influences au moyen d'un "coefficient d'influence relative". Il en résulte que les mélanges relativement maigre en liant et avec un diamètre du grain maximum élevé ont une résistance à la déformation élevée. Du point de vue de la résistance à la déformation, il est avantageux de concevoir une structure d'une épaisseur donnée avec aussi peu de couches que possible et avec des enrobés au grain maximum aussi élevé que possible. Ce principe réduisant en plus le besoin en liant hydrocarboné il pourrait avoir une importance économique au cas où le prix du liant continuerait à augmenter.

A B S T R A C T

This presentation is a contribution to the better understanding of the deformation behaviour of asphalt concrete under pressure. To take into consideration the variety of the mixes used in practice, the investigation covers 17 different mixes which differ with regard to the maximum size of gravel, the grading curve, the bitumen content and also partly with regard to the degree of compaction. In this way the entire area of mixes used for wearing course, base course and road base is covered. Since the method of compaction has a considerable influence on the mechanical properties of asphalt layers, only cores from rolled layers were used in the experiments. All HMT 40s specimens were taken out of a test section, and all TA 6 and TA 16 specimens were taken from slabs which were compacted by means of a hand roller.

Asphalt concrete is regarded as a three phase system, consisting of a three dimensional particle skeleton, the viscous matrix of bituminous mortar and the air-filled voids. As a result of triaxial compression the following resistances to permanent deformation in this quite heterogenous mixture are mobilized:

- initial resistance
- viscous resistance
- internal friction.

Under this assumption the law for the deformation behaviour of asphalt concrete can be derived from the MOHR-COULOMB'S yield condition (mineral particle skeleton) and the deformation law for ideal viscous behaviour after NEWTON (bituminous mortar matrix). The equilibrium condition between the shear stress  $\tau(q)$  and the sum of the deformation resistance  $\tau_{\text{VW}}$  in an inclined shear plane applies to the creep as well as to the relaxation process.

Since at first all mineral particles are coated with bitumen, it is assumed that only viscous resistance and possibly initial resistance can act at the beginning of creep. With increasing deformation however a transposition of the stress from the viscous matrix to the mineral skeleton takes place developing increased friction. This process is called "consolidation". The mathematical consideration is simplified by the use of a linear relation between the internal friction  $tg\phi$  and the strain  $\epsilon$ . The same hypothesis can be made also for the increase of the initial resistance. Thus three, respectively four, values are necessary for the characterization of the deformation properties:



- $\eta_m$  effective viscosity of the bituminous motar matrix
- $\tau_{i0}$  initial resistance at the beginning of stress (for specimens not being pre-loaded  $\tau_{i0} = 0$ )
- $c_i = \tau_i/\epsilon_1$  coefficient concerning the initial resistance
- $c_\phi = \tau_\phi/\epsilon_1$  coefficient concerning the resistance due to internal friction.

The equilibrium condition between the outer stress ( $\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3$ ) and the developed resistances gives a differential equation for the strain velocity  $\dot{\epsilon}$ . The solution leads to an e-function and corresponds to the deformation equation of the KELVIN-model. It not only makes possible calculating the deformation in function from time, but also statements about the instantaneous portion of the three components of resistance.

In order to examine the deformation of specimens under triaxial compression experimentally, a triaxial cell was developed. Tests with this cell were made under the following stress conditions:

- Static compression (uniaxial, triaxial and isotrop). Creep deformation under compression and reversible deformation after discharge were measured. By measuring the axial and radial strain, change of volume can be determined. In case of isotropic pressure the compression modulus can be determined.
- Axial compression due to constant axial strain velocity (with and without additional lateral pressure). After axial strain of 0.5%, 1.0% and 2.0%, pauses were made, during which the specimen could relax until the viscous part of the deformation resistance disappeared completely. This test is carried out with at least two different lateral pressures  $\sigma_r$ , so that all three components of the deformation resistance can be determined.
- Uniaxial, sinusoidal compression (with and without lateral pressure). From this dynamic test the "complex modulus"  $|E^*|$  and the irreversible strain  $\epsilon_{irr}$  were determined. The results were compared with those of the static tests. In this way it is shown that the resistance of asphalt concrete against permanent deformation can be evaluated with sufficient accuracy through static tests. Based on the good correlation between the test results, it can be assumed, that the knowledge about the deformation mechanism from static tests can be transmitted accordingly to the case of dynamic loading.

Through these tests the proposed model and the corresponding deformation law were confirmed qualitatively. The quantitative confirmation was impaired by the limited number of specimens (about 20 cores per mixture) and by the scattering of the test results. Through variation of the test conditions the characteristic values ( $c_i$ ,  $c_\phi$ ,  $\eta_m$ ,  $\tau_{i0}$ ) were determined for several mixtures. Comparing the scattering of values  $|E^*|$  and  $\epsilon_{irr}$  for the same group of different mixtures, it becomes obvious, that variations in the composition of asphalt concrete have a much bigger influence on the irreversible deformation than on the viscoelastic deformation characteristics.

The following results might be interesting for practice:

The numerous tests (about 320) allow to quantify relatively the four most important influences on the resistance for permanent deformation namely grading curve, bitumen content, degree of compaction and softening point of the bitumen. A nomogram was established in order to estimate and compare the importance of the above mentioned influences with help of a "relative coefficient". The high resistance to permanent deformation of relatively lean mixtures with coarse grading becomes obvious. From the point of view of permanent deformation resistance, the attempt should be made to build up a given structure of asphalt pavement with as few layers as possible and with mixtures as coarse as possible. In addition, this principle reduces the need of bitumen and is therefore of economical importance in case of further increasing cost of bitumen.