

Lehrstuhl und Prüfamnt
für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik
der Technischen Universität München

Schriftenreihe

Heft 24

Beitrag
zum zeit- und temperaturabhängigen
Materialverhalten von Asphaltbeton
für Kerndichtungen in Schüttdämmen
unter besonderer Berücksichtigung
des ebenen Verzerrungszustandes

von

André Schulze

München 1996

Herausgegeben von Univ. -Prof. Dr.-Ing. R. Floss
Ordinarius für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik



Lehrstuhl und Prüfamnt
für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik
der Technischen Universität München

**Beitrag zum zeit- und temperaturabhängigen Materialverhalten
von Asphaltbeton für Kerndichtungen in Schüttdämmen unter
besonderer Berücksichtigung des ebenen
Verzerrungszustandes**

André Schulze

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Valentin

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Floss
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Th. Strobl

Die Dissertation wurde am 24.04.1996 bei der Technische Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 12.07.1996 angenommen.

Herstellung: Hieronymus Buchreproduktions GmbH, München

Vorwort

Inhalt der vorliegenden Dissertation ist die Beschreibung des zeit- und temperaturabhängigen Materialverhaltens von Asphaltbeton für Kerndichtungen in Schüttdämmen. Auf der Grundlage eigener Laborversuche mit Hilfe eines neuartigen für diesen Zweck konstruierten Biaxialgerätes wurde ein Stoffmodell abgeleitet, das in der Lage ist, das Spannungs-Verzerrungsverhalten für den untersuchten ebenen Verzerrungszustand unter Berücksichtigung eines etwaigen Dilatanzverhaltens zu beschreiben.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Floss danke ich für seine umfassende Unterstützung und Förderung der Arbeit, für die Übernahme des Hauptreferates und für die Veröffentlichung in dieser Schriftenreihe.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Th. Strobl danke ich sehr für die Übernahme des Korreferates und für seine vielfältigen Anregungen und Diskussionsbeiträge.

Besonderer Dank gilt auch der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), die durch ihre langjährige finanzielle Unterstützung meiner wissenschaftlichen Tätigkeit auf diesem Forschungsgebiet am Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik einen wichtigen Grundstein für diese Arbeit gelegt hat.

Bei allen Mitarbeitern und Kollegen des Lehrstuhls und Prüfamtes, die durch ihre Unterstützung bei den Versuchen, ihre Ratschläge und anregenden Diskussionen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, bedanke ich mich herzlich. In diesem Zusammenhang möchte ich vor allem Herrn Dipl.-Ing. P. von Soos und Herrn Dr.-Ing. H. Ostermayer nennen, die mit ihren wertvollen Hinweisen und Denkanstößen die Forschungsarbeiten begleitet haben. Desweiteren bedanke ich mich bei den Mitarbeitern der Institutswerkstatt, die maßgeblich an der Fertigung der neuartigen, an die Präzision hohe Anforderungen stellende Versuchsgeräte beteiligt gewesen waren.

München, September 1996

André Schulze



Meinen Eltern



Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG	1
2	CHARAKTERISTISCHE BELASTUNGSPFADE	5
2.1	<i>Der Spannungszustand</i>	5
2.2	<i>Der Verzerrungszustand</i>	10
2.3	<i>Ableitung charakteristischer Belastungspfade aus Messungen an bestehenden Dämmen</i>	13
3	BISHER VERÖFFENTLICHTE LABORVERSUCHE AN ASPHALTBETONPROBEN FÜR DEN WASSERBAU	24
3.1	<i>Wasserdichtigkeit</i>	24
3.2	<i>Triaxialversuche</i>	24
3.3	<i>Biaxialversuche</i>	28
3.4	<i>Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Laborversuchen an Asphaltbeton für straßenbauliche Zwecke</i>	30
4	STOFFVERHALTEN VON BÖDEN IM HINBLICK AUF DIE ANALOGIE DER SYSTEME BODEN/WASSER UND MINERAL/BITUMEN	32
4.1	<i>Anisotropie</i>	32
4.2	<i>Volumenverhalten</i>	33
4.3	<i>Elastizitätstheorie</i>	34
4.4	<i>Nichtlineares Stoffgesetz von Naylor für den elastischen Verformungsbereich</i>	36

5	BESCHREIBUNG DER BIAxIALVERSUCHE	37
5.1	<i>Gewählte Versuchs- und Meßeinrichtungen</i>	37
5.2	<i>Probekörperherstellung</i>	42
5.3	<i>Versuchsprogramm</i>	42
5.3.1	Mischgutzusammensetzung	42
5.3.2	Temperatur	43
5.3.3	Belastungspfade	44
6	AUSWERTUNG DER LABORVERSUCHE	48
6.1	<i>Die mittlere Hauptspannung σ_2</i>	48
6.2	<i>Beschreibung des zeitabhängigen Verzerrungsverhaltens</i>	51
6.3	<i>Temperatureinfluß auf das Zeitverhalten der Verzerrungen</i>	58
6.4	<i>Untersuchungen zum Kompressionsmodul</i>	64
6.4.1	Ableitung eines analytischen Stoffmodells	64
6.4.2	Auswertung der Versuche	70
6.5	<i>Untersuchungen zum Schubmodul</i>	73
6.6	<i>Dilatanzverhalten unter Schubbeanspruchung</i>	76
7	VORGESCHLAGENES STOFFMODELL FÜR ASPHALTBETON VON KERNDICHTUNGEN	80
7.1	<i>Vereinfachtes Modell ohne Berücksichtigung des Dilatanzverhaltens</i>	80
7.2	<i>Erweitertes Modell, das das Dilatanzverhalten berücksichtigt</i>	84

8 ANWENDUNG DES VORGESCHLAGENEN STOFFMODELLS	88
8.1 <i>Bestimmung der Stoffparameter aus den Biaxialversuchen</i>	88
8.2 <i>Anwendungsbeispiel</i>	93
8.3 <i>Simulation charakteristischer Spannungspfade (ebener Verzerrungszustand)</i>	96
8.3.1 Sonderfall $\sigma_1 = \sigma_3$	96
8.3.2 Einfluß des Spannungspfad	97
8.3.3 Simulation des Dilatanzverhaltens	99
8.4 <i>Die Übertragung der Ergebnisse auf Triaxialversuche</i>	100
8.5 <i>Die Eignung des vorgeschlagenen Stoffmodells</i>	102
9 ZUSAMMENFASSUNG	103
ANHANG	107
<i>Bilddokumentation zum Biaxialgerät</i>	
LITERATURVERZEICHNIS	111
VERZEICHNIS DER VERWENDETEN FORMELZEICHEN	119



1 Einführung

Die erste bituminöse Kerndichtung kam im Jahre 1949 beim Bau des 51 m hohen Schüttdammes Vale do Gaio in Portugal zur Ausführung. Mit dem Bau der Vorsperre Große Dhünn 1965 konnte sich die Asphaltbetonkerndichtung als Dichtungsart durchsetzen. Seitdem wurden annähernd 40 Talsperren, in der Mehrzahl im europäischen Raum gelegen, mit dichten Asphaltbetonkernen errichtet. Den bisherigen Höhepunkt der Entwicklung stellt derzeit die 149 m hohe und 1981 fertiggestellte Talsperre Finstertal in Tirol dar.

Die bituminöse Kerndichtung bietet sich immer dann besonders an, wenn natürliche Dichtungsmaterialien der gewünschten Qualität nicht in kurzer Entfernung von der Sperrenstelle vorhanden sind oder die klimatischen Gegebenheiten den Einbau von natürlichem Dichtungsmaterial erschweren. Wirtschaftlichkeit, die durch speziell entwickelte Einbaugeräte mit hohen Einbauleistungen erreicht wird, und die guten Erfahrungen hinsichtlich Dichtigkeit und Verformungswilligkeit des Dichtungskerns waren Voraussetzungen für die schnellen Fortschritte in dieser Bauweise. Diese Entwicklung hat aber auch zur Folge, daß immer höhere Anforderungen an Kenntnissen über das Materialverhalten des Asphaltbetons gestellt werden müssen.

Die von einer bituminösen Kerndichtung zunächst geforderte Eigenschaft ist ihre Dichtigkeit, die unter allen Umständen gewährleistet sein muß. Weiterhin ist anzustreben, daß sie das innere Gleichgewicht eines Schüttdammes nicht nachteilig beeinflusst und daß insbesondere keine negativen Auswirkungen auf dessen Standsicherheit entstehen. Hierzu ist ein hinreichender Verformungswiderstand des Asphaltbetons erforderlich. Durch Veränderung der Mischgutzusammensetzung läßt sich der Verformungswiderstand entsprechend variieren. Eine optimierte Mischgutzusammensetzung stellt einen Kompromiß zwischen der Gewährleistung einer Mindeststeifigkeit einerseits und einer Verformbarkeit ohne Rissebildung andererseits dar.

Während der Bauphase wird der Asphaltbetonkern mit zunehmender Schütthöhe ansteigenden Vertikal- und Horizontalspannungen ausgesetzt. Infolge der sich nicht vermeidbaren Steifigkeitsunterschiede zwischen Kern und

angrenzendem Stützkörper ergeben sich im Asphaltbeton Schubbeanspruchungen, die sich in der Regel durch Vertikalstauchungen und Horizontaldehnungen auszeichnen. Während der Einstauphase treten im wasserseitigen Stützkörper Sättigungssetzungen auf, die infolge der ausgeprägten Verzahnung zwischen Kern und angrenzendem Stützkörpermaterial im Asphaltbeton eine Schubverformung erzeugen. Darüber hinaus bewirkt der horizontale Wasserdruck, der sich während des Einstaus aufbaut, eine Horizontalverschiebung des Kerns zur Luftseite. Aus diesem Kernverhalten resultieren ebenfalls entsprechende Schubverformungen im Asphaltbeton.

Alle drei zuvor genannten Schubbeanspruchungen überlagern sich, so daß die Verzerrungs- und Spannungszustände im Kern nicht nur über die Höhe sondern auch über die Kernbreite unterschiedlich sind. Sowohl das mittlere Spannungsniveau als auch die Schubbeanspruchung beeinflussen das Stoffverhalten wesentlich. Wenn Aussagen zum Tragverhalten und zur Wirksamkeit des Asphaltbetonkerns abzuleiten sind, ist es aus den genannten Gründen nicht zielführend, die Dichtung vereinfachend als zweidimensionale Membran anzusehen. Im Rahmen der Analyse des Tragverhaltens im Damm kommt auch dem zeitabhängigen Materialverhalten eine Bedeutung zu, da auch hierdurch entsprechende Spannungsumlagerungen innerhalb des Damms bewirkt werden.

Von Forschungsanstalten des Bundes, von Universitäten und von der Industrie wurden eine Vielzahl von Laborversuchen zur Erfassung von Festigkeit, Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen, Durchlässigkeit und Langzeitverhalten vorgenommen, wodurch eine Abschätzung des Verhaltens bei niedrigen bis mittleren Beanspruchungen möglich ist. Problematisch stellt sich bisher die Übertragung der Ergebnisse von Laborversuchen auf die Eigenschaften bituminöser Kerndichtungen in situ dar. So wurden zum Beispiel am Staudamm Finstertal Querdehnungen gemessen, die aufgrund der vor Baubeginn durchgeführten Laborversuche und Eignungsprüfungen nicht vorherzusagen waren.

Bei der Auswertung und Gegenüberstellung der veröffentlichten Laboruntersuchungen ist zu beachten, daß hinsichtlich des Materials *Asphaltbeton* eine Unterscheidung zwischen wasserbaulicher und straßenbaulicher Anwendung vorgenommen werden muß. Trotz der Vielzahl der Veröffentlichungen über Laborversuche aus dem Bereich des Straßenbaus ist unbestreitbar, daß nur ein bescheidener Teil hiervon sinnvoll auf die im Zusammenhang mit einer Asphaltbetonkerndichtung auftretenden Fragestellungen Anwendung finden

kann. So weichen Mischrezepturen und insbesondere die Versuchsrandbedingungen und Zielsetzungen der Versuche erheblich von denen einer Kerndichtung ab. Aus dem Bereich des Asphaltwasserbaus ist bisher nur eine begrenzte Zahl von veröffentlichten Laboruntersuchungen bekannt, die Aufschluß über das Spannungs-Verzerrungsverhalten unter den durch eine Innendichtung vorgegebenen Randbedingungen geben. Die Gründe hierfür liegen in dem enormen Zeitaufwand solcher Versuche, die Zeiten von zum Teil mehreren Monaten pro Versuch erfordern, und in der aufwendigen Gerätetechnik für die Fälle, in denen wirklichkeitsnahe Versuchsbedingungen geschaffen werden.

Bei einer Vielzahl von Staudammprojekten mit einer Asphaltbetonkerndichtung zeigen sich zum Teil erhebliche Differenzen zwischen Finite-Element-Berechnungen und Meßergebnissen im Damm. Dies gilt insbesondere für die Spannungs- und Verzerrungszustände im Asphaltbetonkern. Die Gründe hierfür liegen in erster Linie in der Anwendung ungeeigneter Stoffgesetze bzw. Stoffparameter für den Asphaltbeton, so daß zu Anfang des Forschungsprojektes ein Bedarf an weitergehenden Laborversuchen bestanden hat.

Um den durch den Damm vorgegebenen Randbedingungen möglichst nahe zu kommen, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes Biaxialversuche durchgeführt, die im Gegensatz zu den konventionellen Triaxialversuchen einen ebenen Verzerrungszustand (mit $\epsilon_2 = 0$), wie er in einem Damm vorherrscht, ermöglichen. Geiseler, Haug, Steffen und Strobl (1992a, 1992b) weisen in diesem Zusammenhang ausdrücklich darauf hin, daß die Ergebnisse aus Triaxialversuchen - insbesondere hinsichtlich des Volumenverhaltens - bis heute nur unzureichend auf die Verhältnisse im Damm übertragbar sind und zu Fehleinschätzungen bezüglich des Asphaltbetonkernverhaltens führen können.

Die in den Biaxialversuchen gefahrenen Belastungspfade wurden aus charakteristischen Spannungs- und Verzerrungspfaden, die sich aus der Analyse von Dammmessungen ergeben haben, abgeleitet. Auf die quantitative Erfassung der Reibungseinflüsse zwischen Probekörper und anliegenden Lastplatten und in der Versuchsapparatur wurde bei der Konzeption der neuartigen Biaxialgeräte großer Wert gelegt.

Die Laborversuche waren als Langzeitversuche konzipiert. Die Untersuchung dynamischer Vorgänge war nicht Inhalt der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit.

Auf der Grundlage der hierbei erhaltenen Versuchsergebnisse sollte das Spannungs-Verzerrungsverhalten für unterschiedliche Mischrezepturen mit Hilfe eines geeigneten nichtlinearen Modells beschrieben werden. Auf eine eindeutige und zweckmäßige Bestimmbarkeit der entsprechenden Stoffparameter wurde ebenso geachtet wie auf die Anwendbarkeit des Stoffmodells im Rahmen numerischer Berechnungen. Ziel war die Beschreibung des zeitabhängigen Stoffverhaltens mit Hilfe eines geeigneten Funktionsansatzes unter Berücksichtigung der vorgegebenen Rahmenbedingungen. Im gewissen Maße sollten die gewählten Modelle Extrapolationen der Verzerrungen und bessere Vorhersagemöglichkeiten für das Kernverhalten erlauben. Die Einflüsse von Bindemittelgehalt, Versuchstemperatur, Luftporengehalt und Spannungsweg auf die Stoffparameter sollten untersucht und gegebenenfalls quantifiziert werden.

2 Charakteristische Belastungspfade

2.1 Der Spannungszustand

Bei gegebenem kartesischen Koordinatensystem läßt sich der Spannungszustand in einem Punkt eines beliebig belasteten Körpers durch die Komponenten σ_{ij} des sogenannten Spannungstensors eindeutig beschreiben. Der Spannungstensor ist symmetrisch ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$) und besitzt somit im allgemeinen dreidimensionalen Fall sechs verschiedene Komponenten. Der Spannungstensor enthält dabei die drei Spannungsvektoren s_i . Diese setzen sich jeweils aus den drei Spannungskomponenten σ_{ij} zusammen, die in der Schnittebene senkrecht zur Koordinatenachse x_i wirken.

In Matrixschreibweise stellen sich die einzelnen Komponenten wie folgt dar:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_2 & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_3 \end{pmatrix}$$

$$s_i = (\sigma_{i1}; \sigma_{i2}; \sigma_{i3})$$

Der Übergang auf ein anderes rechtwinkeliges Koordinatensystem läßt sich mittels der sogenannten Transformationsmatrix a_{ij} darstellen. Diese wird auch als die Matrix des Richtungskosinus bezeichnet. Die Elemente a_{ij} entsprechen jeweils dem Kosinus des Winkels α_{ij} zwischen der alten Koordinatenachse x_i und der neuen Koordinatenachse \bar{x}_j .

$$a_{ij} = \cos \alpha_{ij}$$

$$a_{ij} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

Die definierte Transformationsmatrix besitzt folgende Eigenschaften:

$$|a_{ij}| = \text{Det}(a_{ij}) = \begin{cases} +1 & \text{bei Beibehaltung} \\ -1 & \text{bei Änderung} \end{cases} \left. \vphantom{\begin{matrix} +1 \\ -1 \end{matrix}} \right\} \begin{array}{l} \text{der Orientierung des} \\ \text{Koordinatensystems} \end{array}$$

$$\sum_{i=1}^3 (a_{ij})^2 = 1 \quad \text{und} \quad \sum_{i=1}^3 (a_{ji})^2 = 1 \quad \text{für } j = 1, 2, 3$$

$$\sum_{i=1}^3 a_{ij} a_{ik} = 0 \quad \text{und} \quad \sum_{i=1}^3 a_{ji} a_{ki} \quad \text{mit } j \neq k$$

In der Tensorrechnung wird im Hinblick auf eine vereinfachte und verkürzte Darstellung im allgemeinen die Summationskonvention angewendet. Hierbei wird vereinbart, daß über einen Index zu summieren ist, wenn dieser wiederholt auftritt. Im folgenden hierzu zwei erläuternde Beispiele:

$$a_{ij} b_{ij} = a_{11} b_{11} + a_{12} b_{12} + \dots + a_{21} b_{21} + a_{22} b_{22} + \dots$$

$$a_{ii} = a_{11} + a_{22} + a_{33} + \dots$$

Unter Zuhilfenahme der Summationskonvention läßt sich eine Transformation des Spannungstensors σ_{ij} in ein neues Koordinatensystem durch das folgende Transformationsgesetz angeben:

$$\bar{\sigma}_{hk} = a_{ih} \cdot a_{jk} \cdot \sigma_{ij}$$

Aus der sogenannten charakteristischen Gleichung des Spannungstensors

$$\text{Det}(\sigma_{ij} - \lambda \cdot \delta_{ij}) = \begin{vmatrix} \sigma_{11} - \lambda & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} - \lambda & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

lassen sich die Hauptspannungen $\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$ ableiten. δ_{ij} steht dabei für das in der Tensorrechnung gebräuchliche Kronecker-Symbol:

lassen sich die Hauptspannungen σ_I , σ_{II} , σ_{III} ableiten. δ_{ij} steht dabei für das in der Tensorrechnung gebräuchliche Kronecker-Symbol:

$$\delta_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Die oben aufgeführte charakteristische Bedingung führt auf die kubische Gleichung

$$\lambda^3 - I_1 \cdot \lambda^2 + I_2 \cdot \lambda - I_3 = 0$$

mit

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3 - \tau_{12}^2 - \tau_{13}^2 - \tau_{23}^2$$

$$I_3 = \text{Det}(\sigma_{ij}) = \sigma_1\sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\tau_{23}^2 - \sigma_2\tau_{13}^2 - \sigma_3\tau_{12}^2 + 2\tau_{12}\tau_{13}\tau_{23}$$

I_1 , I_2 , I_3 heißen die Spannungsinvarianten. Sie sind ebenso wie die Wurzeln λ_i der obigen kubischen Gleichung invariant, d. h. ihr Wert bleibt bei Koordinatentransformationen unverändert. Die drei Wurzeln λ_i der charakteristischen Gleichung entsprechen den drei Hauptspannungen und bilden die drei Komponenten des Hauptspannungsvektors σ_i :

$$\sigma_i = (\lambda_{1i}; \lambda_{2i}; \lambda_{3i}) = (\sigma_i; \sigma_{II}; \sigma_{III})$$

Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung des Spannungszustandes besteht in der Angabe der sogenannten Oktaederspannungen. Hierzu denkt man sich ein Volumenelement in Form eines Oktaeders, dessen Seitenflächen alle denselben Abstand zum Koordinatenursprung des Hauptspannungsraumes haben (s. Abb. 2.1). Die Spannungen, die jeweils senkrecht auf die durch den Oktaeder aufgespannten Flächen wirken heißen Oktaedernormalspannungen σ_{oct} . Die in den Flächen wirkenden Schubspannungen werden als Oktaederschubspannungen τ_{oct} bezeichnet.

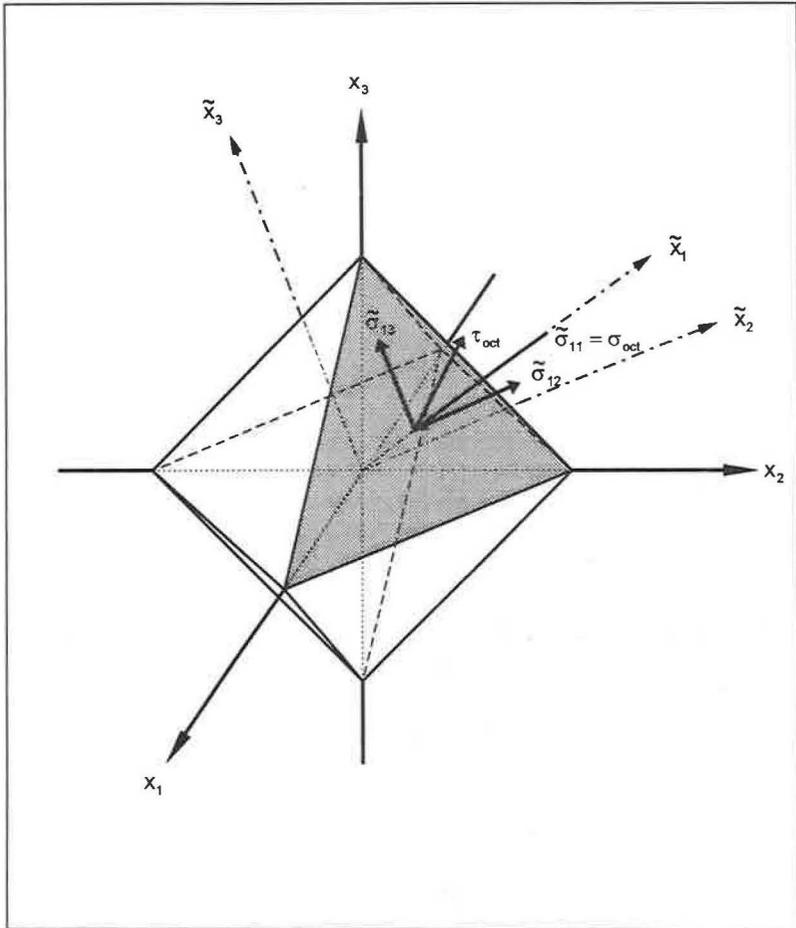


Abb. 2.1: Darstellung zu den Oktaederspannungen

Die Bestimmung der Oktaederspannungen erfolgt mittels einer Koordinatentransformation, bei der die neue transformierte Koordinatenachse \tilde{x}_1 die Richtung der Raumdiagonalen ($x_1=x_2=x_3$) annimmt und somit senkrecht auf der im

ersten Oktant gelegenen Oktaederfläche steht. Hieraus ergibt sich für die gesuchten Oktaederspannungen:

$$\sigma_{\text{oct}} = \tilde{\sigma}_{11}$$

$$\tau_{\text{oct}} = \sqrt{\tilde{\sigma}_{12}^2 + \tilde{\sigma}_{13}^2}$$

Die drei folgenden Richtungsvektoren für die neuen Koordinatenachsen \tilde{x}_i erfüllen die oben genannte Bedingung:

$$v_1 = (1 ; 1 ; 1)$$

$$v_2 = (-1 ; 1 ; 0)$$

$$v_3 = (-1 ; -1 ; 2)$$

Mit Hilfe des Skalarproduktes läßt sich die Transformationsmatrix in folgender Form angeben:

$$a_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{2}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}$$

Im Hauptspannungsraum mit

$$\sigma_{\bar{i}} = \begin{pmatrix} \sigma_I & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{II} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{III} \end{pmatrix}$$

ergibt die gewählte Koordinatentransformation:

$$\tilde{\sigma}_{11} = a_{11}^2 \sigma_I + a_{21}^2 \sigma_{II} + a_{31}^2 \sigma_{III}$$

$$\tilde{\sigma}_{12} = a_{11} a_{12} \sigma_I + a_{21} a_{22} \sigma_{II} + a_{31} a_{32} \sigma_{III}$$

$$\tilde{\sigma}_{13} = a_{11} a_{13} \sigma_I + a_{21} a_{23} \sigma_{II} + a_{31} a_{33} \sigma_{III}$$

Hieraus folgt:

$$\sigma_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III})$$

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_I - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2}$$

Für den allgemeinen Spannungszustand lauten die Oktaederspannungen folgendermaßen:

$$\sigma_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3} \cdot I_1$$

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + 6\tau_{12}^2 + 6\tau_{13}^2 + 6\tau_{23}^2}$$

Die Oktaederspannungen werden bei der Erarbeitung geeigneter Stoffmodelle die Grundlage zur Beschreibung der Spannungszustände und -wege bilden. Die Oktaederspannungen stellen invariante Größen dar, d.h. sie sind unabhängig vom gewählten Koordinatensystem.

2.2 Der Verzerrungszustand

Abbildung 2.2 zeigt für den zweidimensionalen Fall die Komponenten der Formänderung eines Elementes. Die reine Translationsverschiebung gegenüber dem Ausgangszustand ist hierbei nicht dargestellt, da sie keine Verzerrungen hervorruft.

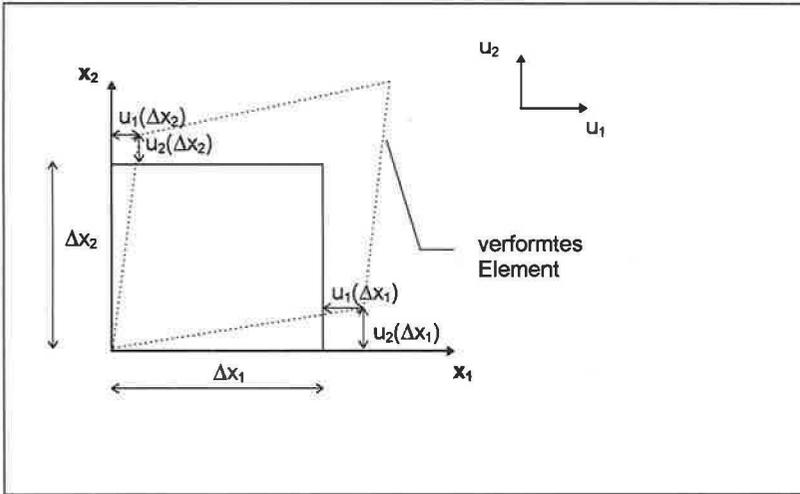


Abb. 2.2: Darstellung des Verzerrungszustandes in der Ebene

Analog zum Spannungszustand lässt sich der Verzerrungszustand ebenfalls durch die Komponenten ε_{ij} des Verzerrungstensors beschreiben:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{u_i(\Delta x_j)}{\Delta x_j} + \frac{u_j(\Delta x_i)}{\Delta x_i} \right)$$

Die hierbei verwendeten Bezeichnungen lassen sich aus der Abb. 2.2 entnehmen und sinngemäß auch auf den allgemeinen dreidimensionalen Fall übertragen. Für $i=j$ in obiger Gleichung werden die Dehnungen (Stauchungen) beschrieben:

$$\varepsilon_i = \frac{u_i(\Delta x_i)}{\Delta x_i}$$

und für $i \neq j$ die Gleitungen γ_{ij} :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{ij}$$

Der Verzerrungstensor lautet entsprechend:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & \frac{1}{2}\gamma_{12} & \frac{1}{2}\gamma_{13} \\ \frac{1}{2}\gamma_{21} & \varepsilon_2 & \frac{1}{2}\gamma_{23} \\ \frac{1}{2}\gamma_{31} & \frac{1}{2}\gamma_{32} & \varepsilon_3 \end{pmatrix}$$

Alle für den Spannungszustand abgeleiteten Formeln und Begriffe gelten sinngemäß auch für den Verzerrungszustand. Die Invarianten werden in den folgenden Formeln mit J_i bezeichnet.

$$\varepsilon_{hk} = a_{ih} a_{jk} \varepsilon_{ij}$$

$$\lambda^3 - J_1 \lambda^2 + J_2 \lambda - J_3 = 0$$

$$J_1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

$$J_2 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_1 \varepsilon_3 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 - \frac{1}{4} \cdot (\gamma_{12}^2 + \gamma_{13}^2 + \gamma_{23}^2)$$

$$J_3 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 - \frac{1}{4} \cdot (\varepsilon_1 \gamma_{23}^2 + \varepsilon_2 \gamma_{13}^2 + \varepsilon_3 \gamma_{12}^2) + \frac{1}{4} \cdot \gamma_{12} \gamma_{13} \gamma_{23}$$

Analog zu den Oktaederspannungen lassen sich die entsprechenden Oktaederverzerrungen durch die beschriebene Koordinatentransformation ableiten:

$$\varepsilon_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) = \frac{1}{3} \cdot (\varepsilon_I + \varepsilon_{II} + \varepsilon_{III})$$

$$\gamma_{\text{oct}} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + 6\gamma_{12}^2 + 6\gamma_{13}^2 + 6\gamma_{23}^2}$$

$$\gamma_{\text{oct}} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})^2 + (\varepsilon_I - \varepsilon_{III})^2 + (\varepsilon_{II} - \varepsilon_{III})^2}$$

Die Oktaederverzerrungen werden in den folgenden Untersuchungen und Versuchsauswertungen die Grundlage zur Beschreibung der Verzerrungszustände

und -wege darstellen, da sie invariant gegenüber Drehungen des gewählten Koordinatensystems und geometrisch anschaulich sind.

2.3 Ableitung charakteristischer Belastungspfade aus Messungen an bestehenden Dämmen

Um die Aussagefähigkeit von Laboruntersuchungen und ihre Übertragbarkeit auf die zu untersuchende Fragestellung zu prüfen, müssen die realen Verhältnisse bekannt sein, auf die die Ergebnisse der Laboruntersuchungen anzuwenden sind. Da die Ableitung von Spannungs-Verzerrungsbeziehungen, die in der Lage sind, jeglichen Einfluß relevanter Parameter (Temperatur, Bindemittelgehalt, Belastungszustand und -pfad u.a.) quantitativ allgemeingültig zu bestimmen, in der Regel unmöglich und unwirtschaftlich ist, ist es erforderlich, die für die zu untersuchende Problemstellung charakteristischen Randbedingungen zu definieren. Ein wesentliches Kriterium stellt in diesem Zusammenhang der Belastungspfad, der auf das Material einwirkt, dar. Daß nicht nur der Spannungszustand sondern auch der zu diesem Spannungspunkt zurückgelegte Pfad einen wesentlichen Einfluß auf das Materialverhalten hat, trifft - wie später gezeigt werden kann - in besonderem Maße auch auf den Asphaltbeton zu. Aus diesem Grund werden im folgenden mit Hilfe von Meßergebnissen an bestehenden Dämmen, die eine Asphaltbetonkerndichtung besitzen und mit entsprechenden Meßeinrichtungen ausgestattet sind, charakteristische Belastungspfade für das Dichtungsmaterial abgeleitet. Sie bilden im Anschluß daran die Grundlage sowohl für die Bewertung von bereits durchgeführten als auch für die Konzeption ergänzender und weiterführender Laboruntersuchungen an Asphaltbetonproben für Kerndichtungen.

Die nachstehende Tabelle 2.1 beinhaltet eine aktuelle Übersicht von Dämmen, die mit einer Asphaltbetonkerndichtung ausgeführt worden sind und mit Meßeinrichtungen ausgestattet sind, die direkte Rückschlüsse auf das Spannungs- und Verzerrungsverhalten des Kernmaterials erlauben.

Baujahr	Damm	Bauherr	Dammhöhe	Spezielle Meßeinrichtungen für den Kern
1962	Dhünn-Vorsperre	Wupperverband	35 m	Im vertikalen Kontrollschacht sind direkte Dickenmeßeinrichtungen in drei Horizonten installiert.
1978/80	Finstertal-Damm	Tiroler Wasserkraft AG	149 m	In drei Meßhorizonten sind jeweils durchdringungsfreie Meßsonden installiert, die auf eine Differenzmessung magnetischer Feldstärken beruhen.
1979/80	Große Dhünn-Talsperre	Zweckverband Wasserversorgung Kleine Kinzig	70 m	Im vertikalen Kontrollschacht sind direkte Dickenmeßeinrichtungen in drei Horizonten installiert.
1981/82	Kleine Kinzig	Zweckverband Wasserversorgung Kleine Kinzig	70 m	In drei Dammschnitten installierte Kraftmeßdosen in der Kernaufstandsfläche zum in Dammlängsrichtung verlaufenden Kontrollgang
1987/88	Rottach-Talsperre	Freistaat Bayern	38 m	Im vertikalen Kontrollschacht sind direkte Dickenmeßeinrichtungen in drei Horizonten installiert.

Tab. 2.1: Übersicht von Dämmen, die mit speziellen Meßeinrichtungen für die Asphaltbetonkerndichtung ausgestattet sind

Aus der Zusammenstellung wird deutlich, daß die zur Zeit installierten Meßeinrichtungen, die direkte Rückschlüsse auf das Spannungs-Verzerrungsverhalten von Asphaltbetonkerndichtung erlauben, nur in begrenzter Zahl zur Verfügung stehen. Desweiteren ist zu beachten, daß die oben aufgeführten Meßeinrichtungen nur eine punktuelle Erfassung der entsprechenden Meßgrößen ermöglichen. Aus der Tatsache, daß bei den genannten fünf Dämmen in nur insgesamt 15 Punkten Meßergebnisse bezüglich Spannungs- und Verzerrungs-

zustand im Asphaltbetonkern vorliegen, lassen sich folgende Schlußfolgerungen ableiten:

- Fundierte und detaillierte Spannungs-Verzerrungsbeziehungen lassen sich aus den vorliegenden Meßergebnissen nicht bzw. nur in einem äußerst begrenztem Maße ermitteln.
- Charakteristische Belastungspfade für das Material des Asphaltbetons können nur in angenäherter Form angegeben werden.
- Materialparameter für geeignete Stoffmodelle, die die Grundlage für numerische dammstatische Berechnungen bilden, können derzeit für das Kern-dichtungsmaterial im wesentlichen nur aus Laborversuchen abgeleitet werden.
- Die Randbedingungen für entsprechende Laborversuche am Asphaltbeton sollten weitestgehend wirklichkeitsnah gestaltet werden. Hierzu leisten die oben genannten Meßergebnisse einen wertvollen Beitrag.

Am Beispiel der 60 m hohen Talsperre Große Dhünn, die eine Asphaltbetonkerndichtung besitzt, können mit Hilfe der am Kern installierten Dickenmeßeinrichtungen für die entsprechenden Meßhorizonte die Verzerrungswege für Bau-, Ruhe- und Betriebsphase ermittelt werden. Der gegliederte Dammquerschnitt ist in Abb. 2.3 dargestellt. Kennzeichnende Merkmale sind die Asphaltbetonkerndichtung, die im oberen Dammdrittel geneigt ist, und die Untergliederung der Stützkörper in eine Innenzone mit feinkörnigerem Material bis zum maximalen Korndurchmesser von 300 mm und einer Außenzone mit 600 mm maximaler Korngröße. Die 2 m (Wasserseite) bzw. 3 m (Luftseite) breiten Übergangszonen zur Dichtung bestehen aus gebrochener Grauwacke ohne Zwischenkorn, so daß eine kontrollierte Sickerwasserableitung sichergestellt ist. Der Dammuntergrund besteht aus tonigen bis sandigen, deutlich geschichteten Schluffen und fein- bis mittelkörnigen Sandsteinen. Messungen im Kontrollgang haben die vorhergesagte Setzungsempfindlichkeit des Dammauflagers bestätigt.

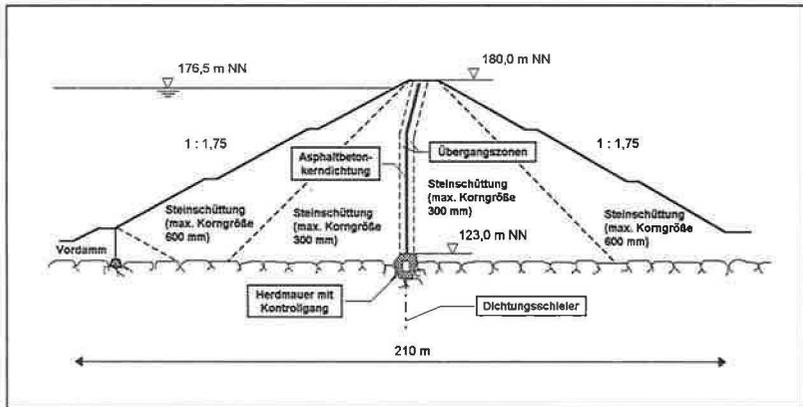


Abb. 2.3: Querschnitt des Staudamms Große Dhünn

Der 60 cm dicke Asphaltbetonkern sitzt auf dem im Fels eingebundenen Kontrollgang auf und ist im oberen Drittel des Damms mit einer Neigung von 4:1 zur Luftseite geneigt.

Der Damm besitzt einen Kontrollgang, von dem Setzungen und Horizontalverschiebungen in fünf Meßhorizonten erfaßt werden können. Darüber hinaus ist es möglich, auf direktem Wege Dickenänderungsmessungen der Kerndichtung durchzuführen.

In der nachstehenden Abb. 2.4 ist der im Damm integrierte Schwebeschacht mit seinen Meßeinrichtungen dargestellt. Der Schacht besteht aus doppelkernig ausgebildeten Stahlbetonringen. Dieser Aufbau gewährleistet, daß jeder Ring ungehindert den Setzungen in der Dammschüttung folgen kann.

Eine Besonderheit stellt die direkte Messung der Kerndickenänderung mittels Doppelextensometer, das in einem Beobachtungsrohr zwischen Schwebeschacht und Asphaltbetonkern geführt ist (s. Abb. 2.4). Die Messung der Dickenänderung erfolgt hierbei als Differenzmessung zwischen einem in die Mitte des Asphaltbetonkerns eingebrachten „Kugelstab“ und einer an der luftseitigen Kernoberfläche fixierten Meßplatte. Das Meßsystem erfaßt somit die Dickenänderung der luftseitigen Kernhälfte. Bei der Auswertung der Meßergebnisse wird

davon ausgegangen, daß die Dickenänderung beider Kernhälften gleich groß ist.

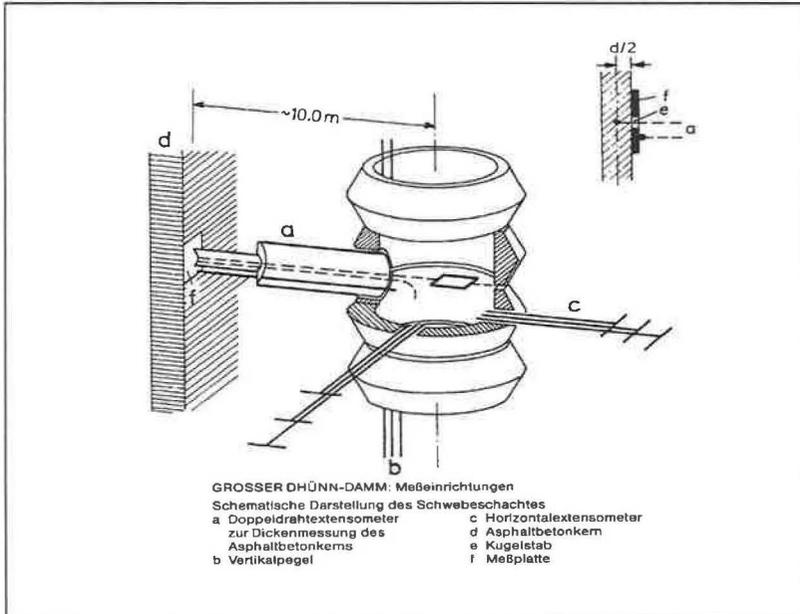


Abb. 2.4: Meßeinrichtungen am Schwebeschacht [aus Breth, Arslan (1989)]

Im folgenden erfolgt zunächst eine Auswertung der Vertikalstauchungen und Horizontalverzerrungen im Asphaltbetonkern über die Dammhöhe.

Zur Extrapolation wird folgender über den Steifemodul E_s formulierter Ansatz gewählt:

$$E_s = \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} = E_0 + c_E \cdot \sigma_1$$

$$\bar{\sigma}_1 = \left(\frac{E_0}{c_E} + \bar{\sigma}_{1a} \right) \cdot e^{c_E \bar{\varepsilon}_1} - \frac{E_0}{c_E}$$

$\bar{\varepsilon}_1, \bar{\sigma}_1$: Meßwerte

Die gesuchte Anfangsverzerrung ε_{1a} folgt aus einer nichtlinearen Regression bezüglich der Parameter $E_0, c_E, \bar{\sigma}_{1a}$ (Abb. 2.5).

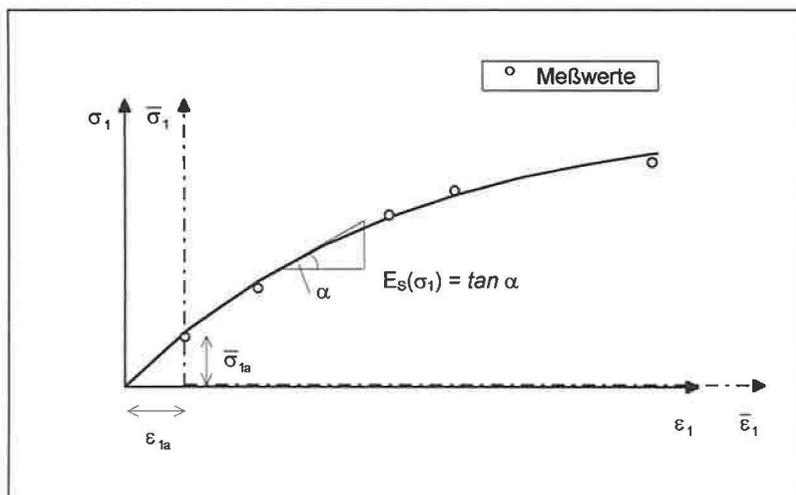


Abb. 2.5: Extrapolation der Anfangsverzerrungen mittels Regressionsanalyse

Abb. 2.6 zeigt die ermittelten Vertikalstauchungen für die Zeitpunkte Bauende, Ende der Ruhephase und Ende der Einstauphase. Die Meßmarken der Verformungsmessungen für den Kern wurden jeweils zu einem Zeitpunkt eingemessen, zu dem die Schütthöhe bereits mehrere Meter über dem Meßhorizont betragen haben. Diese nicht gemessenen Anfangssetzungen werden durch Extrapolation abgeschätzt und in den nachfolgenden Auswertungen berücksichtigt.

Extrapolation abgeschätzt und in den nachfolgenden Auswertungen berücksichtigt.

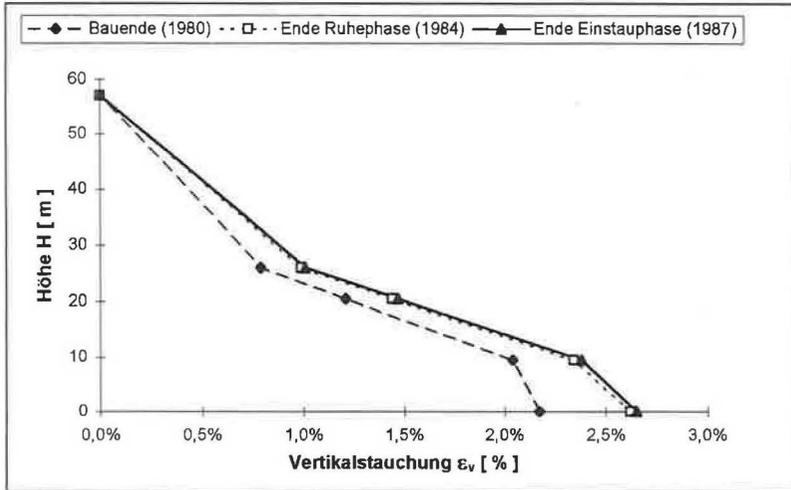


Abb. 2.6: Vertikalstauchungen des Asphaltbetonkerns

Die größten Vertikalstauchungen traten erwartungsgemäß im unteren Dammbereich auf. Sie betragen am Ende der Bauphase 2,2 %. Die Werte für die Stauchungen nehmen zur Dammkrone kontinuierlich ab. Während der rd. 4 Jahre dauernden Ruhephase erhöhten sich die Vertikalstauchungen um rd. 15 % bezogen auf die Verzerrungswerte am Ende der Bauphase und betragen nach dieser Zeit in der Nähe der Kernaufstandsfläche 2,53 %. Infolge des Ersteinbaus traten nur geringfügige zusätzliche Vertikalstauchungen auf.

In Abb. 2.7 sind für die drei oben genannten Zeitpunkte die Horizontalverzerrungen in der Asphaltbetonkerndichtung über die Dammhöhe graphisch aufgetragen. Für den ϵ_H -Verlauf ergibt sich ein recht uneinheitliches Bild. Während sich im unteren Bereich der Kerndichtung nach Bauende Dehnungen von rd. 1 % einstellen, zeigte der Kern auf mittlerem Dammniveau nur geringe Ten-

denzen zur Kernverbreiterung. Im oberen Drittelpunkt des Dammes traten dann wieder im verstärkten Maße Dehnungen auf, die jedoch aufgrund von Meßproblemen hinsichtlich der Bestimmung der anfänglichen Kernbreite (Nullmessung) nicht mehr genau quantifiziert werden können und deshalb in der nachstehenden Abbildung nicht dargestellt sind.

Während der Einstauphase wurden in allen Meßpunkten nur verhältnismäßig geringe Kerndickenänderungen registriert. Diese traten hauptsächlich im unteren Dammbereich als Stauchungen auf.

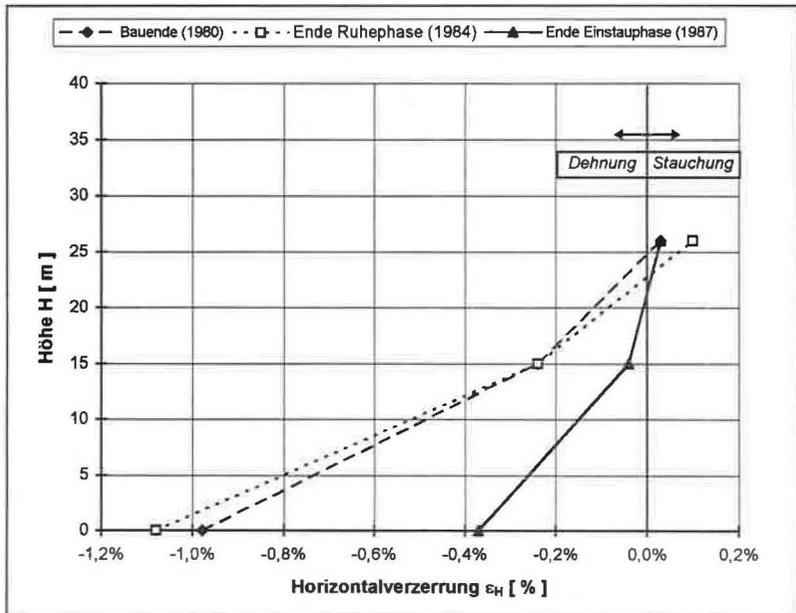


Abb. 2.7: Horizontalverzerrungen in der Asphaltbetonkerndichtung

Als charakteristische Größen für den Verzerrungszustand werden die Oktaederverzerrungen ϵ_{oct} und γ_{oct} herangezogen. In den Abbildungen 2.8 a bis 2.8 c

ist die Auswertung der Verzerrungswege graphisch für drei verschiedene Kernhöhen dargestellt. Da nur die Verzerrungen in horizontaler und vertikaler Richtung, nicht aber der Gleitwinkel γ bekannt sind, müssen für die Einstauphase Werte für die unbekannte Drehung Φ der Hauptverzerrungsachsen abgeschätzt werden. Für Φ werden im folgenden die Extremwerte 0° und 30° untersucht, wobei angenommen wird, daß der Drehwinkel Φ mit der Einstauhöhe linear zunimmt. Für alle Kernhöhen ergibt sich während der Bauphase ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen ϵ_{oct} und γ_{oct} . Im weiteren Verlauf ist während der Einstauphase infolge Schubbeanspruchung ein Ansteigen von γ_{oct} zu beobachten.

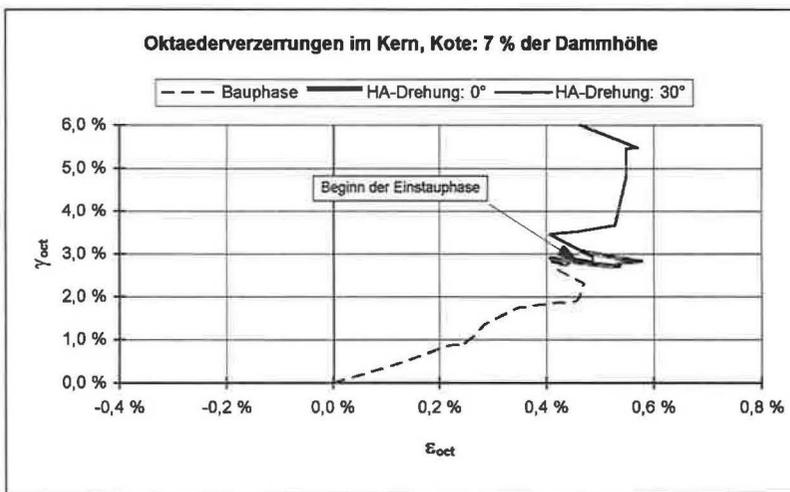


Abb. 2.8 a: Ermittelte Verzerrungspfade im Asphaltbetonkern, Große Dhünn

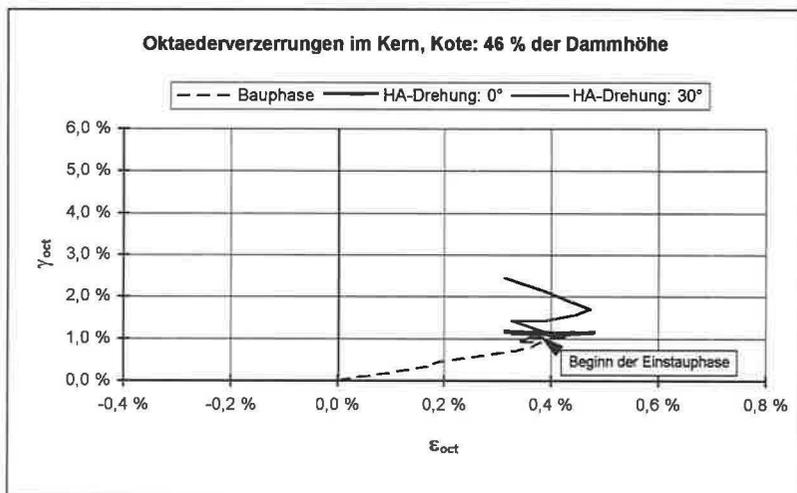
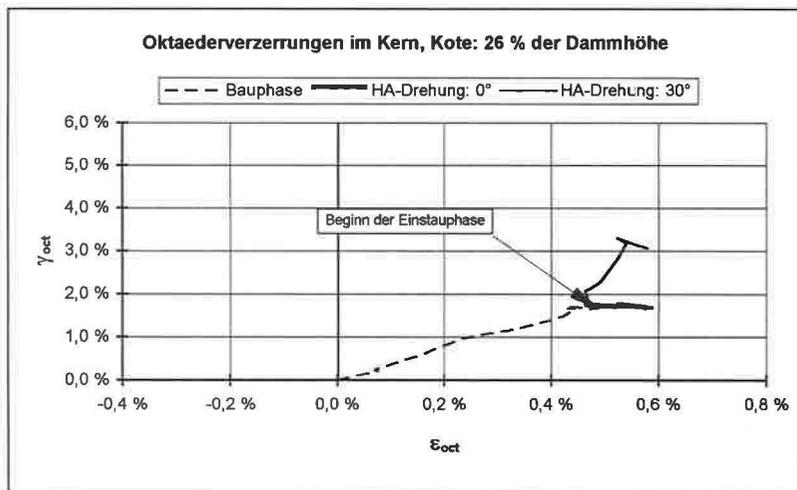


Abb. 2.8 b, c: Ermittelte Verzerrungspfade im Asphaltbetonkern, Große Dhünn

In Übereinstimmung mit weiteren Untersuchungen kann der in Abb. 2.9 schematisch dargestellte Verzerrungspfad als eine vereinfachende, dennoch wirklichkeitsnahe Annahme zur Belastung des Asphaltbetonkerns angesehen werden. Aufgrund der Auswertung von Spannungsmessungen in der Kernaufstandsfläche kann ein solcher bilinearer Zusammenhang in erster Näherung auch für die entsprechenden Oktaederspannungen σ_{oct} und τ_{oct} als realistisch angenommen werden. Es ist zu berücksichtigen, daß in der Bauphase die Hauptspannungsrichtungen im wesentlichen erhalten bleiben, daß sie sich aber in der Einstauphase verdrehen.

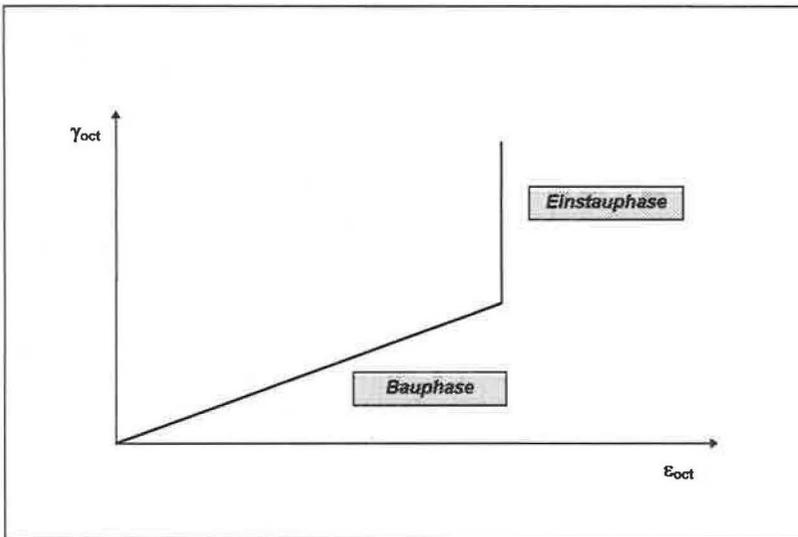


Abb. 2.9: Idealisierte Darstellung charakteristischer Verzerrungspfade

Die aus den Messungen an bestehenden Dämmen ermittelten Spannungs- und Verzerrungspfade bilden die Grundlage für die Konzeption der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten weiterführenden Laboruntersuchungen an Asphaltbetonproben.

3 Bisher veröffentlichte Laborversuche an Asphaltbetonproben für den Wasserbau

3.1 Wasserdichtigkeit

Bikar (1977), Haas (1983) und Hoffmann und Balzereit (1985) stellen in ihren veröffentlichten Laboruntersuchungen fest, daß Asphaltbeton mit einem berechneten Luftporengehalt von maximal 3,0 Vol.-% wasserdicht bei Wasserdrücken bis zu 25 bar sei. Dieser Wert wird auch in den „Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau - EAAW 83“ (Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., 1983) als Kriterium für die Wasserdichtigkeit angegeben.

Der Anfangsluftporengehalt liegt nach dem Einbau bei sachgemäßer Verdichtung im Mittel zwischen 1 und 2 Vol.-%. Hieraus wird deutlich, daß dem Volumverhalten des Asphaltbetons in Bezug auf die Wasserdurchlässigkeit einer Asphaltbetonkerndichtung entscheidende Bedeutung zukommt. Dilatanzverhalten infolge Schubbeanspruchung, wie es bei mittel bis dicht gelagerten Sanden und Kiesen beobachtet werden kann (vgl. hierzu auch Abschnitt 4.3), konnte in Triaxialversuchen mit kleinen Seitendrücken ($\sigma_2, \sigma_3 \leq 0,1 \text{ MN/m}^2$ bei $\sigma_1 = \text{const.} = 1,5 \text{ MN/m}^2$) auch beim Asphaltbeton festgestellt werden (Haas 1983).

3.2 Triaxialversuche

Im Rahmen der Auswertung von Belastungsversuchen im Labor hat sich gezeigt, daß hinsichtlich des Materials Asphaltbeton eine Unterscheidung zwischen wasserbaulicher und straßenbaulicher Anwendung vorgenommen werden muß. Aus dem Bereich des Asphaltwasserbaus steht bis zum jetzigen Zeitpunkt nur eine begrenzte Zahl von veröffentlichten Laboruntersuchungen zur Verfügung, die Aufschluß über das Spannungs-Verzerrungsverhalten unter den durch eine Innendichtung vorgegebenen Laborrandbedingungen ergeben

können. In diesem Zusammenhang sind die Untersuchungen von Nijboer (1951), Haas (1959), Breth und Schwab (1973), Rienöföli (1973), Balzereit und Sudbrack (1974), Bikar (1977), Breth und Schwab (1979), Kasahara et al. (1982), Haas (1983) und Schwab (1984a, b) zu nennen.

Bei der Auswertung der oben genannten Laborversuche wurden die Randbedingungen, die verwendeten Mischrezepturen und insbesondere die gefahrenen Spannungs- und Verzerrungswege ermittelt und verglichen. Da Studien eindeutig belegen, daß Spannungs-, Verzerrungswege und -geschwindigkeiten wesentlichen Einfluß auf das Materialverhalten haben, können nur bei wirklichkeitsnahen Belastungspfaden die im Labor ermittelten Gesetzmäßigkeiten auf die Verhältnisse in einer Asphaltbetoninnendichtung übertragen werden.

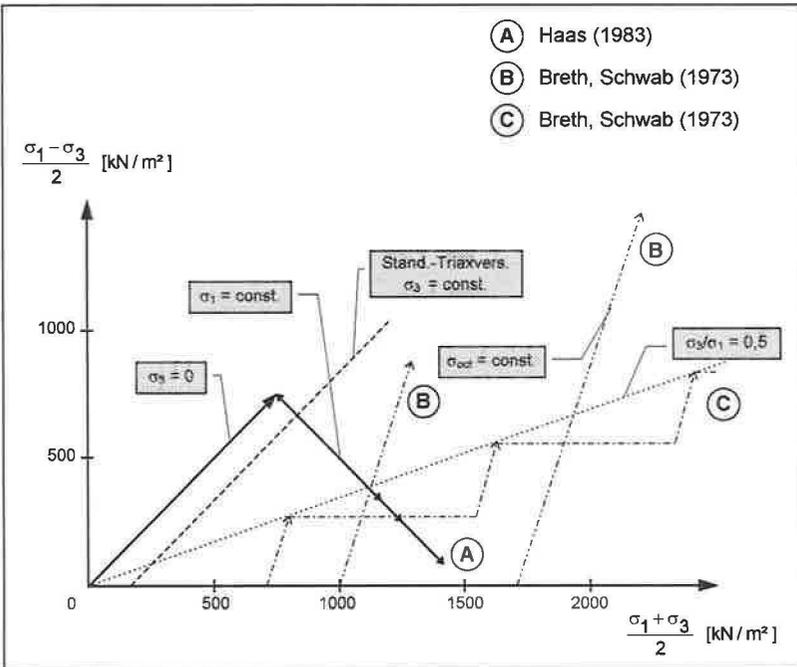


Abb. 3.1: Ausgewählte Spannungspfade aus Laborversuchen

Als Beleg für den großen Einfluß des Belastungspfades auf das Materialverhalten berichtet Haas (1983) von Triaxialversuchen, in denen zylindrische Asphaltbetonprobekörper einer axialen Belastung von 1 MN/m^2 ausgesetzt wurden. Ohne radiale Stützung verformten sie sich mehr oder weniger schnell zum Bruch. Wenn jedoch der Probekörper sich zunächst vorübergehend unter gleichzeitig wirkenden Radialspannungen verformen konnte, erreichte die Probe auf diesem Weg eine ausreichende Tragfähigkeit gegenüber der genannten Axiallast.

Abbildung 3.1 stellt exemplarisch die bisher gefahrenen Spannungspfade, wie sie aus den oben genannten Veröffentlichungen zu entnehmen sind, gegenüber.

Um verwertbare, auf eine Asphaltbetoninnendichtung übertragbare Ergebnisse zu erhalten, müssen für die vorgegebenen Randbedingungen Gleichgewichtszustände abgewartet werden, da nur die zeitunabhängigen Verformungsanteile für die vorliegende Fragestellung von Interesse sind. Die daraus resultierenden langen Versuchszeiten lassen nur eine beschränkte Variation der Einflußparameter zu.

Nijboer (1954) verweist auf die Analogie der Systeme Boden/Wasser und Mineral/Bitumen und leitet aus Triaxialversuchen an zylindrischen Probekörpern die Materialparameter φ (innere Reibung), τ_0 (Anfangsscherwiderstand) und η_m (Viskosität) ab. Im Zusammenhang mit Oberflächendichtungen gibt er für verschiedene Mischungen mit unterschiedlichen Volumenanteilen an „eckigem Korn“ und Füller/Bitumen-Verhältnissen Anhaltswerte für die genannten Parameter an. Für die innere Reibung werden je nach verwendeten Mineralgemischen Werte zwischen 24° und 30° angegeben. Im Falle eines Überschusses an Bitumen („fette“ Mischungen) sinkt dieser Wert bis auf 10° bis 15° . Für einen Asphaltbeton werden für die Viskosität η_m je nach Temperatur (10°C bis 40°C) Werte zwischen $6 \cdot 10^{10}$ und $20 \cdot 10^{10}$ Poise angegeben. Der Anfangswiderstand τ_0 setzt sich nach Nijboer wie folgt zusammen:

$\tau_e = \tau_{hh} + \tau_r \cdot \tau_b$		Einflußgrößen (C_v : Raumkonz. des eckigen Kornes im Gemisch)	Werte der untersuchten Bitumen-Mineral- gemische
τ_{hh}	„Hakwiderstand“	C_v	0 ... 0,04 MN/m ²
τ_b	„Bit. Anfangswiderst.“	Temp., Bit.-Penetration, Füller/Bitumen-Verh.	0,003 ... 0,05 MN/m ²
τ_r	Faktor f. Erhöhung v. τ_b	C_v	1,0 ... 2,0

Tab. 3.1: Anfangswiderstand nach Nijboer (1953)

Haas (1959, 1977, 1983) führte zahlreiche Triaxialversuche an zylindrischen Probekörpern durch. Bei der Versuchseinrichtung handelte es sich um ein geschlossenes Druckzellensystem. Die durch einen Kolben aufgebrachte Vertikalspannung σ_1 wurde während des ganzen Versuchs konstant gehalten. Die Radialdehnung ε_3 wurde stufenweise erhöht, wobei nach jeder Verzerrungsstufe ein Gleichgewichtszustand mit annähernd $\dot{\varepsilon}_1 \approx 0$ abgewartet wurde. Die Radialspannung σ_3 konnte mittels des sich aufbauenden Wasserdruckes gemessen werden. Vergleicht man die bei dieser Versuchsdurchführung gefahrenen Spannungspfade mit denen, die in einer Asphaltbetonkerndichtung auftreten, lassen sich prinzipielle Unterschiede feststellen (Abb. 2.9 und 3.1). Für das Materialverhalten des Asphaltbetons weist Haas aber ausdrücklich auf den bedeutenden Einfluß des jeweiligen Spannungs-Verzerrungspfad hin.

Mit 149 m Höhe ist die Talsperre Finstertal der höchste mit einer Asphaltbetonkerndichtung ausgestattete Steinschüttdamm der Welt. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der umfangreichen Voruntersuchungen eine Reihe von Triaxialversuchen am Asphaltbeton durchgeführt (Rienöbl 1973 und 1980, Schober 1973). Wie bei den Triaxialversuchen, die von Haas durchgeführt worden sind, wurden für die Versuchsdurchführung Querdehnungen ε_3 vorgegeben und die Vertikalspannungen σ_1 schrittweise erhöht. Die dabei gemessenen Hauptspannungsverhältnisse σ_3/σ_1 sollten Aufschluß darüber geben, welche Horizontalspannungen zur Stützung der Kerndichtung bei angenommener Querdehnung notwendig seien. Auch hier entsprechen die Belastungspfade nicht den Randbedingungen, wie sie für eine Kerndichtung vorliegen. Schwierigkeiten in der Auswertung der Ergebnisse ergaben sich durch zum Teil er-

hebliche Ausbauchungen der zylindrischen Prüfkörper in Probenmitte (Rienözl 1973).

Breth und Schwab (1973) wählten in ihren Triaxialversuchen einen Spannungsweg, der stufenförmig einem linearen Belastungspfad mit $\sigma_3/\sigma_1 = 0,5$ angenähert wurde. Ein solcher Spannungsweg kommt den Verhältnissen im Kern während der Dammschüttung ziemlich nahe. Hierbei wurde eine nahezu lineare Beziehung zwischen der Oktaederverzerrung γ_{oct} und der Vertikalspannung σ_1 festgestellt.

In weiteren, diesmal aber verformungsgesteuerten Triaxialversuchen ($\dot{\epsilon}_1 = 0,06 \text{ \%}/h$) leiteten Breth und Schwab (1979) Steifigkeiten des Asphaltbetons in Abhängigkeit von der Mischrezeptur, von dem konstant gehaltenen Seitendruck σ_3 und von der Axialdehnung ϵ_1 ab. Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des Materialverhaltens wurde allerdings nicht angegeben.

3.3 Biaxialversuche

Die bisher einzigen veröffentlichten Biaxialversuche an Asphaltbetonproben aus dem Wasserbaubereich wurden von Haas (1977, 1983) durchgeführt. Von den Ergebnissen dieser Versuche berichten auch Geiseler, Haug, Steffen und Strobl (1992a, 1992b). Hierbei handelte es sich um kraftgesteuerte Versuche an kubischen Asphaltbetonprobekörpern mit einer Kantenlänge von jeweils 150 mm. Für jede Belastungsstufe wurde ein „Gleichgewichtszustand“, der mit einer Grenzverzerrungsgeschwindigkeit von $\dot{\epsilon} < 0,01 \text{ mm}/d$ definiert wurde, abgewartet. Der Seitendruck σ_3 wurde mit voreinstellbaren Druckfedern erzeugt und erhöhte sich im Laufe des Versuchs mit zunehmendem σ_1 geringfügig. Zwei Arten der Versuchsdurchführung wurden gewählt.

Im ersten Fall wurde die größte Hauptspannung σ_1 mittels mechanischer Belastungseinrichtung mit Gewichten stufenweise erhöht. Die zweite Spannung σ_2 wurde durch die entsprechende Einstellung der Druckfedern in etwa vorgegeben. Die Spannung σ_2 stieg während des Versuchs geringfügig an, da sie von

der sich einstellenden Verzerrung ε_3 und der Federkonstante beeinflusst wird. Mit jedem Belastungsschritt erhöht sich das Hauptspannungsverhältnis σ_1/σ_3 .

Bei der zweiten Art der Versuchsdurchführung wurde die Spannung σ_1 ebenfalls mittels mechanischer Belastungseinrichtung aufgebracht und abgewartet bis sich eine vorgegebene Stauchung ε_1 eingestellt hat. Im sich anschließenden Relaxationsvorgang war eine Verringerung sowohl der mittleren als auch der größten Hauptspannung zu beobachten. Die Spannung σ_3 wurde mit Hilfe der Druckfedern auf niedrigem Spannungsniveau (ca. $0,01 \text{ MN/m}^2$ bis $0,02 \text{ MN/m}^2$) während des gesamten Versuchs annähernd konstant gehalten. Die Versuchstemperatur betrug einheitlich für alle Versuche $10 \text{ }^\circ\text{C}$, die Dauer für einen vollständigen Versuch mit mehreren Belastungsschritten betrug in der Regel 7 bis 8 Wochen.

Kritisch zu den Versuchen ist anzumerken, daß aufgrund der unzureichenden Probekörperumschließung teilweise größere Wulstbildungen an den Kanten der Probekörper beobachtet wurden. Da die Erzeugung der Seitendrucke σ_3 mit Hilfe steifer Druckfedern erfolgte, konnte σ_3 nur annähernd konstant gehalten werden. Bei der zweiten Art der Versuchsdurchführung mit vorgegebenem ε_1 , wurde direkter Einfluß auf die Verzerrungsgeschwindigkeit im Probekörper genommen. Kleine Verzerrungsgeschwindigkeiten ermöglichten im Asphaltbeton den Aufbau größerer innerer Reibung und somit kleinere σ_3/σ_1 -Verhältnisse. Die Vorgabe $\varepsilon_2 = 0$ bei den durchgeführten Biaxialversuchen von Haas entspricht zwar dem ebenen Verzerrungszustand, wie er bei Dämmen mit nicht allzu steilen Talflanken (Verhältnis $\leq 1:3$) wirklichkeitsnah angenommen werden kann (vgl. hierzu Lefebvre et al. 1973); die Spannungs- und Verzerrungspfade unterschieden sich jedoch auch hier wesentlich von den real auftretenden, da die kleinste Hauptspannung σ_3 während des gesamten Versuchs in etwa konstant gehalten wurde. Auch die im Versuch auftretenden Relaxationsvorgänge entsprechen nicht den Verhältnissen im Damm. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, daß Reibungseinflüsse, die bei dieser Versuchseinrichtung meßtechnisch nicht erfaßt werden konnten, die Versuchsergebnisse verfälscht haben und zu geringe σ_3 -Werte vorgetäuscht haben.

3.4 Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Laborversuchen an Asphaltbeton für straßenbauliche Zwecke

Im Rahmen des Forschungsvorhabens stand im Vorfeld zur Prüfung, inwieweit Erkenntnisse über das Spannungs- und Verzerrungsverhalten und abgeleitete Stoffparameter aus Laborversuchen aus dem Bereich des Straßenbaus übertragen werden können. Es hat sich gezeigt, daß trotz großer Vielzahl der Veröffentlichungen nur ein geringfügiger Teil sinnvoll auf die im Zusammenhang mit einer Asphaltbetoninnendichtung auftretenden Fragestellungen Anwendung finden kann. Folgende Gründe lassen sich in diesem Zusammenhang in verkürzter Darstellung aufführen:

- Die aus den Anforderungen des Straßenbaus abgeleiteten Versuchsbedingungen repräsentieren nur allzu selten auch die Randbedingungen einer Kerndichtung. Dieses betrifft im wesentlichen die Versuchstemperaturen und -zeiten und die Belastungspfade.
- Die verwendeten Mischrezepturen weichen in der Regel erheblich von denen einer Kerndichtung ab. Insbesondere trifft dieses für den Bindemittel- und Hohlraumgehalt zu.
- Die Probekörper werden im allgemeinen kurzfristigen, oft dynamischen Belastungsformen (Impulsbelastungen, periodische Belastungen) unterworfen.
- Meistens werden relativ große Verzerrungsgeschwindigkeiten aufgebracht, ohne daß Gleichgewichtszustände abgewartet werden.
- Veröffentlichte Biaxialversuche, die den Randbedingungen einer Innenkerndichtung auch nur annähernd gerecht werden, sind dem Verfasser nicht bekannt.

Aus den genannten Gründen können die bisher veröffentlichten Ergebnisse aus dem Bereich des Straßenbaus im Rahmen der Bestimmung zutreffender Stoffparameterwerte nicht herangezogen werden. Demgegenüber können jedoch die im Straßenbaubereich gebräuchlichen Stoffmodelle in modifizierter Weise übernommen werden. Hierbei handelt es sich in der Mehrzahl um rheologische Modelle mehr oder weniger komplexer Struktur, die allerdings sehr häufig auf eine einaxiale Betrachtungsweise beschränkt sind. Diese Modelle setzen sich aus Federn, Dämpfern, Reib- und Widerhakenelementen zusammen.

4 Stoffverhalten von Böden im Hinblick auf die Analogie der Systeme Boden/Wasser und Mineral/Bitumen

In der Literatur finden sich mehrfach Hinweise auf die Analogie der Systeme Boden/Wasser und Mineral/Bitumen. Aus diesem Grund werden vor diesem Hintergrund im folgenden in kurzer Form einige Stoffgesetze aus der Bodenmechanik dargestellt. Insbesondere werden im Rahmen der in den nachfolgenden Abschnitten vorgenommenen Versuchsauswertungen der durchgeführten Biaxialversuche auf die nichtlinearen Stoffgesetze für die elastischen Verformungsanteile Bezug genommen.

4.1 Anisotropie

Die meisten in der Praxis zur Anwendung kommenden Stoffmodelle setzen eine Isotropie im Spannungs-Verzerrungsverhalten voraus. Die Gründe hierfür liegen in den - im Fall der Berücksichtigung einer Anisotropie - zusätzlich auftretende Parameter, die labormäßig, wenn überhaupt, nur mit großem Aufwand, verbunden mit beträchtlichen Ungenauigkeiten, bestimmbar sind und die außerdem einen wesentlichen erhöhten Rechenaufwand zur Folge haben. Man unterscheidet zwischen einer Anfangsanisotropie („inherent anisotropy“) und einer spannungsinduzierten Anisotropie. Beide Formen treten im allgemeinen kombiniert auf. Ob die Vernachlässigung einer möglichen Anisotropie in Anbetracht der Unsicherheiten bei der Parameterbestimmung in Kauf genommen werden kann, ist vom Einzelfall abhängig und kann nur durch Laboruntersuchungen und Vergleichsrechnungen entschieden werden. Daß die Annahme einer Isotropie oftmals nur eine grobe Vereinfachung darstellt, verdeutlicht die Erfahrung, daß sogar bei im Labor hergestellten Versuchskörpern sich ein anisotropes Verhalten zeigt. Generell läßt sich feststellen, daß die Anisotropie mit zunehmender Lagerungsdichte abnimmt.

4.2 Volumenverhalten

Unter isotroper Erstbelastung tritt im Triaxialversuch eine Volumenverminderung auf, die sich aus einem meist geringen plastischen und einem größtenteils elastischen Verformungsanteil zusammensetzt. Bei großem Deviatorspannungsanteil hingegen kann je nach Boden und Lagerungsdichte Dilatanz auftreten. Reynolds (1885), der den Begriff „Dilatanz“ für dieses Stoffverhalten eingeführt hat, erklärt diese Eigenschaft körniger Massen mit Hilfe eines Gedankenmodells, das das Verhalten einer dichtgelagerten Kugelpackung unter Schubbeanspruchung beschreibt. Im Zuge einer aufgezwungenen Gestaltänderung müssen demnach die Kugeln erst in eine weniger dichte Packlage übergehen. Abbildung 4.1 zeigt eine typische Versuchskurve, die sich aus einem Triaxialversuch an Sand unter Deviatorbelastung ableitet.

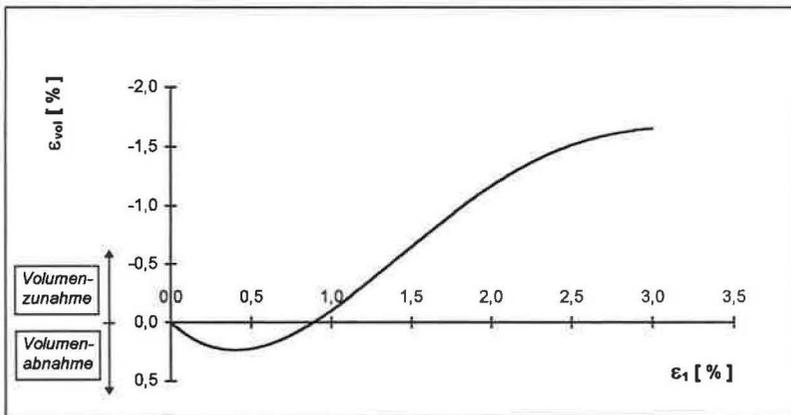


Abb. 4.1: Volumenverhalten von Sand unter Deviatorbelastung beim Triaxialversuch

Auf das Dilatanzverhalten von Asphaltbeton wird im Rahmen der Versuchsauswertung näher eingegangen.

4.3 Elastizitätstheorie

Elastisches Verhalten zeichnet sich dadurch aus, daß eine eindeutige Zuordnung zwischen Spannungs- und Verformungsniveau besteht:

$$\varepsilon_{ij} = d_{ijkl} \sigma_{kl}$$

d_{ijkl} ist hierbei eine Funktion der Spannung.

Das Stoffverhalten ist geschwindigkeits- und spannungswegunabhängig. Kann ein elastisches Potential U (U ist eine Funktion der Spannung) angegeben werden, mit dem sich nach folgender Gleichung die Spannungs-Verzerrungsbeziehung beschreiben läßt,

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial U}{\partial \sigma_{ij}}$$

spricht man von einem hyperelastischen Stoffverhalten. Wenn U eine quadratische Funktion der Spannungskomponenten σ_{ij} darstellt, wird eine lineare Elastizität beschrieben.

Im folgenden werden die Grundlagen der linearen Elastizitätstheorie unter Annahme isotropen Stoffverhaltens zusammenfassend dargestellt, wobei auch auf die zuvor abgeleiteten Oktaederspannungen und -verzerrungen Bezug genommen wird. Der Spannungstensor kann in einen deviatorischen und in einen hydrostatischen (sphärischen) Spannungsanteil aufgeteilt werden:

$$\sigma_{ij} = \underbrace{\left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \cdot \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij} \right)}_{\text{deviatorischer Spannungstensor}} + \underbrace{\frac{1}{3} \cdot \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij}}_{\text{sphärischer Spannungstensor}}$$

Für den Verzerrungstensor gilt analog:

$$\varepsilon_{ij} = \left(\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_{kk} \cdot \delta_{ij} \right) + \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_{kk} \cdot \delta_{ij}$$

In der linearen Elastizitätstheorie wird der sphärische Spannungstensor mit dem sphärischen Verzerrungstensor mittels des Kompressionsmodul K linear in Beziehung gesetzt. Als zweiten Stoffparameter wird der Schubmodul G eingeführt, der den linearen Zusammenhang zwischen deviatorischen Spannungs- und Verzerrungstensor definiert. Es gilt:

$$\begin{aligned} \frac{1}{3} \cdot \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij} &= 3 \cdot K \cdot \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_{kk} \cdot \delta_{ij} \\ \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \cdot \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij} \right) &= 2 \cdot G \cdot \left(\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_{kk} \cdot \delta_{ij} \right) \end{aligned}$$

Aus diesen beiden Gleichungen läßt sich nun für jeden Spannungszustand der zugeordnete Verzerrungszustand eindeutig ableiten:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \cdot \sigma_{ij} - \frac{3K - 2G}{18KG} \cdot \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij}$$

Werden die - insbesondere in der Bodenmechanik häufig benutzten - Stoffparameter ν (Querdehnzahl) und E (Elastizitätsmodul) verwendet, so lautet das entsprechende Stoffgesetz:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + \nu}{E} \cdot \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \cdot \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij}$$

Bei Anwendung der zuvor definierten Stoffparameter K und G im Zusammenhang mit den Oktaederspannung und -verzerrungen ergeben sich folgende Beziehungen:

$$\varepsilon_{\text{oct}} = \frac{1}{3K} \cdot \sigma_{\text{oct}}$$

$$\gamma_{\text{oct}} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + 6\varepsilon_{12}^2 + 6\varepsilon_{13}^2 + 6\varepsilon_{23}^2}$$

$$\gamma_{\text{oct}} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2G}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{2G}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{2G}\right)^2 + 6\left(\frac{\sigma_{12}}{2G}\right)^2 + 6\left(\frac{\sigma_{13}}{2G}\right)^2 + 6\left(\frac{\sigma_{23}}{2G}\right)^2}$$

$$\gamma_{\text{oct}} = \frac{1}{G} \cdot \tau_{\text{oct}}$$

4.4 Nichtlineares Stoffgesetz von Naylor für den elastischen Verformungsbereich

Für ein nichtlineares Stoffgesetz schlägt Naylor (1975) zwei Modelle vor, nämlich ein E- ν -Modell, wobei die Querdehnzahl als konstant angenommen wird, und ein K-G-Modell mit veränderlichem Schub- und Kompressionsmodul:

$$E = E_o + \alpha_E \cdot \sigma_{\text{oct}} + \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot \beta_E \cdot \tau_{\text{oct}} \quad (\beta_E \leq 0)$$

$$\nu = \text{const}$$

und

$$G = G_o + \alpha_G \cdot \sigma_{\text{oct}} + \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot \beta_G \cdot \tau_{\text{oct}} \quad (\beta_G \leq 0)$$

$$K = K_o + \alpha_K \cdot \sigma_{\text{oct}}$$

β_E und β_G sind hierbei negativ. Für bestimmte Spannungszustände wird der E- bzw. G-Modul zu Null und es wird die Fließbedingung erreicht.

Auf das Modell von Naylor wird im Rahmen der Versuchsauswertung zur Beschreibung des Materialverhaltens des Korngerüstes im Asphaltbeton Bezug genommen.

5 Beschreibung der Biaxialversuche

5.1 Gewählte Versuchs- und Meßeinrichtungen

Bei Dämmen mit nicht allzu steilen Talflanken (Neigung $\leq 1:3$) kann, wie bereits erwähnt, von einem ebenen Verzerrungszustand ausgegangen werden. Da die Versuchsbedingungen den Randbedingungen einer Innenkerndichtung möglichst nahe kommen sollen, wurden für die weiterführenden Laborversuche Biaxialversuche durchgeführt. Hierzu wurden völlig neuartige Geräte entwickelt. Aufgrund der langen Versuchszeiten war es unabdingbar, mehrere baugleiche Versuchsgeräte parallel einzusetzen. Eingesetzt wurden hierzu drei im folgenden näher beschriebene Biaxialgeräte.

Aufbauend auf den Erkenntnissen über charakteristische, wirklichkeitsnahe Belastungspfade wurde ein Biaxialgerät konzipiert, das eine voneinander unabhängige, kontrollierte Lastaufbringung in zwei Achsrichtungen gestattet. In der dritten Achsrichtung des kubischen Probekörpers wird die Querdehnung vollständig behindert. Der Versuchsablauf erfolgt kraftgesteuert mittels pneumatischer Lastaufbringung.

Abb. 5.1 zeigt schematisch die Funktionsweise dieses Biaxialgerätes. Dargestellt ist ein gedachter Schnitt, der parallel zu den unbeweglichen am Probekörper anliegenden Platten geführt ist. Beim Probekörper [a] handelt es sich um einen Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm. In Richtung der kürzeren Gehäusesseite wird über eine in Kraftlängsrichtung geführte starre Längsplatte [b] die Spannung σ_1 auf den Probekörper aufgebracht. Der sich an der linken Seite der Lastplatte anschließende Kragarm [c] ist mit einer Linearführung [d] verbunden, die sich im Inneren des zweiten langgestreckten Druckstempels [e] befindet. Dieser Stempel, der die Spannung σ_3 erzeugt, besitzt einen Hohlraum für die Führung und auf der Seite des eingeführten Kragarmes einen Längsschnitt. Das Widerlager [f], das die Kräfte in Richtung von σ_1 aufnimmt, ist ebenfalls beweglich gelagert und zwar so, daß es die Verschiebungen des Druckstempels in Richtung von σ_3 mitvollzieht.

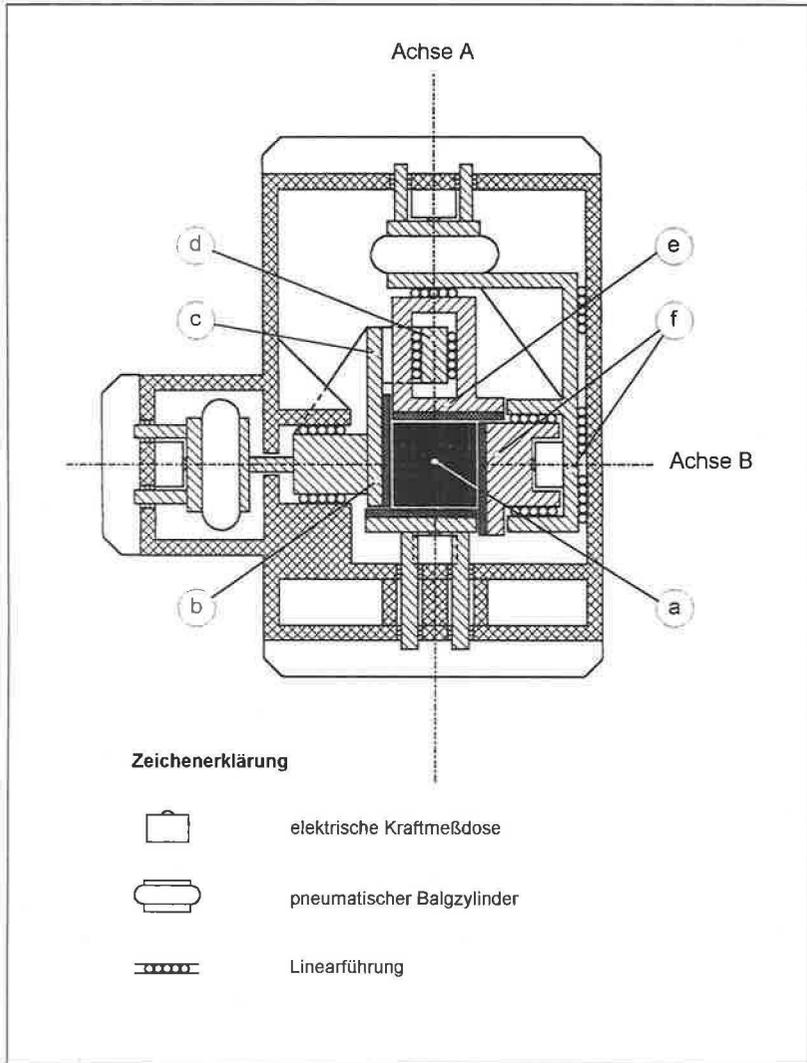


Abb. 5.1: Darstellung der Funktionsweise des neu entwickelten Biaxialgerätes

Durch die angeordneten Linearführungen, die die Druckstempel miteinander verbinden, bleibt die Probe zu jedem Zeitpunkt des Versuchs trotz stattfindender Längsstauchung und Querdehnung allseitig umschlossen. Es wird somit ein Ausquetschen der Probe an den Kanten verhindert.

Als Linearführungen werden äußerst reibungsarme Winkelflachkäfigführungen verwendet (Reibungszahl $\mu = 0,1$ bis $0,4$ %). Die Reibung zwischen Lastplatte und Asphaltbetonprobekörper wird durch die Verwendung von dünner Teflonfolie und geeigneter Schmiermittel stark herabgesetzt.

Die Größen σ_1 , σ_2 , σ_3 werden mittels elektrischer Kraftaufnehmer, ε_1 und ε_3 mit Hilfe mechanischer Wegmeßuhren bestimmt.

Der Reibungseinfluß zwischen Lastplatte und Asphaltbetonoberfläche der Probewürfel ist in den bisher veröffentlichten Versuchen nicht erfaßt worden. Aufgrund von Vorversuchen hat sich gezeigt, daß trotz Verwendung reibungsmindernder Folien und Schmiermitteln von einem erheblichen Einfluß ausgegangen werden muß, da beim Biaxialversuch gleichzeitig in sechs Kontaktflächen Relativverschiebungen zwischen Lastplatte und Probekörperoberfläche auftreten. Die daraus resultierenden Reibungskräfte addieren sich und ergeben die entsprechenden Meßfehler für die Spannungen σ_1 und σ_3 . Je nach Verzerungsrichtung geht der Meßfehler mit positivem oder negativem Vorzeichen in die Messung ein. In Vorversuchen mit einer Presse hat sich herausgestellt, daß die Reibungszahl μ im Wert sehr stark schwankt und vor allem lastabhängig ist. Zur Erfassung der Reibungseinflüsse sind aus den genannten Gründen je Biaxialgerät zwei zusätzliche Kraftaufnehmer in den Lastaufbringungsrichtungen installiert. In den beiden Wirkungsrichtungen von σ_1 und σ_3 kann somit zu jedem Zeitpunkt des Versuches die Kraft sowohl an der Stelle der Kraftaufbringung (pneumatischem Balgzylinder) als auch an der gegenüberliegenden Lastplatte gemessen werden. Aus den Differenzen der gemessenen Kräfte lassen sich die auftretenden Reibungskräfte quantifizieren.

Die Abbildung 5.2 zeigt das Biaxialgerät während der Montage. Gut sichtbar sind die zahlreichen Linearführungen, die in dieser Konstruktion Anwendung gefunden haben.

Der äußerst steife Gehäuserahmen wird durch 30 mm dicke Stahlteile gebildet und ist in stark biegebeanspruchten Bereichen zusätzlich ausgesteift. In der Mitte des Gerätes sind die Führungsnuten für die herausnehmbaren Lastplatten erkennbar. In der nächsten Abbildung 5.3 sind zwei Aufnahmen des weitestgehend montierten Biaxialgerätes vor seiner Inbetriebnahme ohne und mit Gehäuseplatte zu sehen.

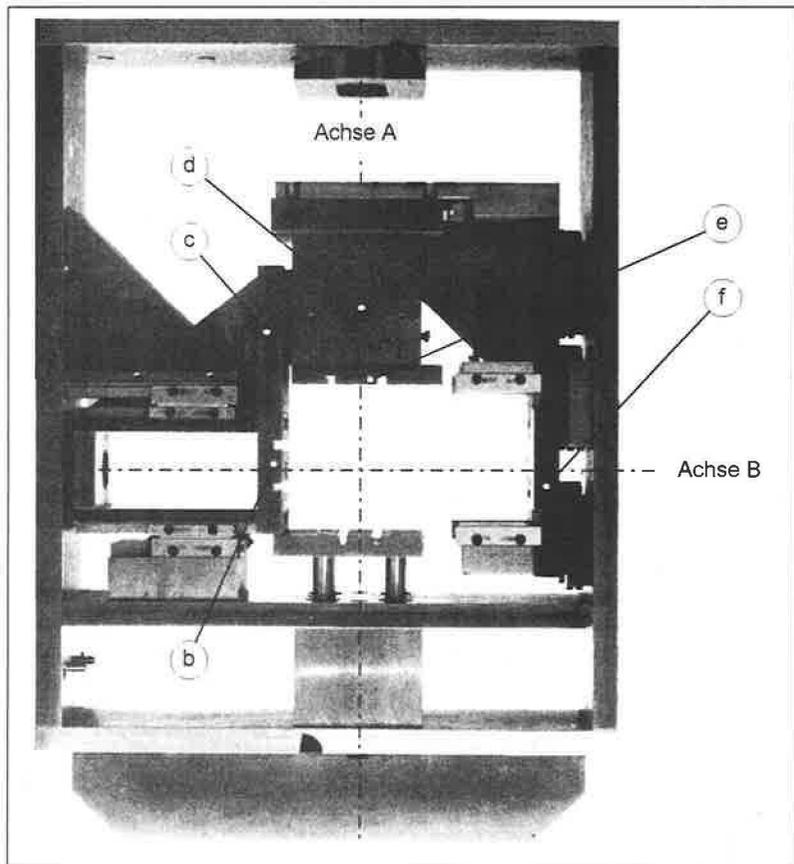


Abb. 5.2: Biaxialgerät während der Montage

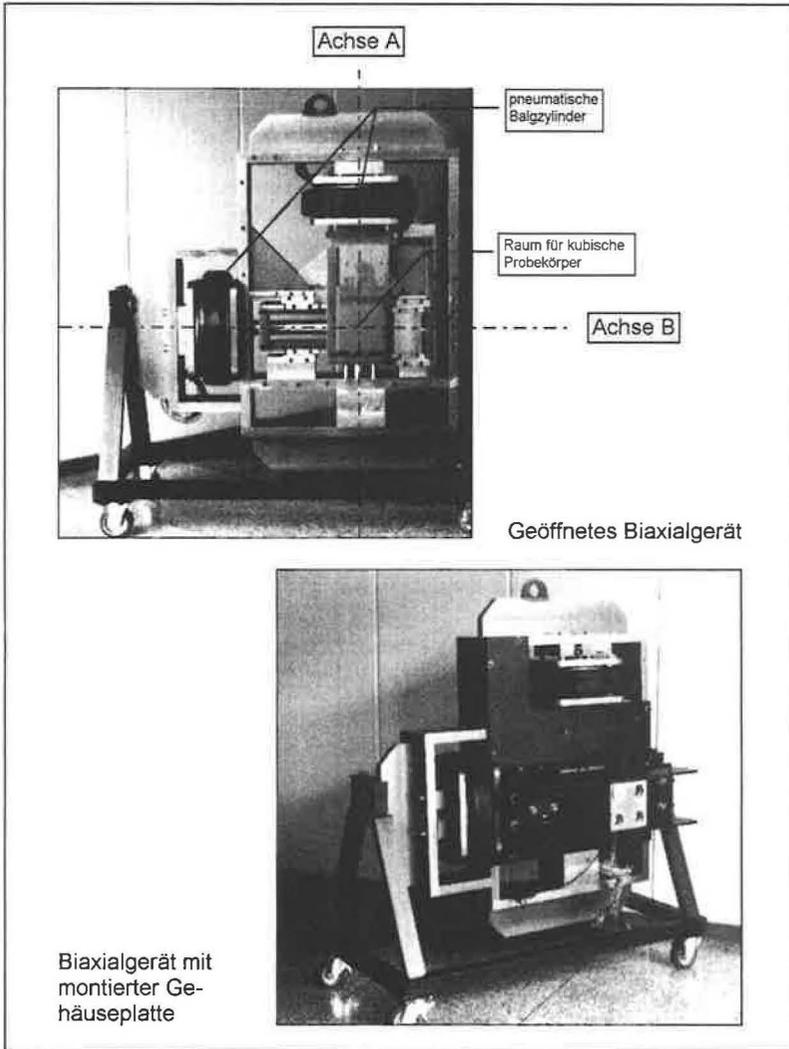


Abb. 5.3: Biaxialgerät vor der Inbetriebnahme

5.2 Probekörperherstellung

Die Mischgutzusammensetzungen für die Probekörper sind so gewählt, daß sie denen in der Praxis angewendeten entsprechen. Aufgrund der Zusammenarbeit mit den entsprechenden Baufirmen und deren Laboratorien konnte hierbei auf deren langjährigen Erfahrungen in der Ausführung von Asphaltbetonkern-dichtungen zurückgegriffen werden. Die Probekörper wurden deshalb an diesen Stellen unter Beachtung der vorgegebenen Bindemittel-, Füller- und Luft-porengehalte hergestellt.

Zur Herstellung der Asphaltbetonwürfel, die jeweils eine Kantenlänge von ca. 150 mm besitzen, wurde für jeden Würfel getrennt das Bitumen und die Mine-ralstoffe mit der vorgegebenen Kornverteilung exakt gewogen und bei 160 °C bis 200 °C gemischt. Eine gemeinsame Mischgutaufbereitung für mehrere Pro-bewürfel wurde vermieden, da andernfalls die Gefahr bestand, daß Entmi-schungserscheinungen und Inhomogenitäten auftreten und die so hergestellten Probekörper in ihrer Zusammensetzung stark schwanken. In diesem Fall mußte mit großen Versuchsstreuungen gerechnet werden, die Aussagekraft der Ver-suchsergebnisse wäre nur beschränkt.

5.3 Versuchsprogramm

5.3.1 Mischgutzusammensetzung

Die Aufbereitung des Mischgutes für die Probekörperherstellung erfolgte in Anlehnung an den für Kerndichtungen nach heutigem Erkenntnisstand verwen-deten Asphaltbeton. Für alle Probekörper wurde für das Zuschlagsmaterial einheitlich eine Körnung 0/16 mm und die Bindemittelsorte B 65 verwendet. Der Füllergehalt betrug ca. 14 Gew.-% bezogen auf das Zuschlagsmaterial. Der Anfangsluftporengehalt lag im Mittel bei ca. 2,0 Vol.-%, in allen Fällen jedoch unter 3,0 Vol.-%. Hinsichtlich der Mischgutzusammensetzung wurde im Rah-men des durchgeführten Versuchsprogrammes der Bindemittelgehalt variiert:

Mischgutzusammensetzung	Nr.	1	2	3
Bindemittelgehalt	Gew.-%	4,9	5,5	6,6

Tab. 5.1: Gewählte Bindemittelgehalte der verwendeten Probekörper

Jeder Probekörper wurde einzeln in für diesen Zweck gefertigte Probekörperformen hergestellt. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Homogenität der Proben erfolgte die Verdichtung jeweils lagenweise.

5.3.2 Temperatur

Die Temperatur hat wesentlichen Einfluß insbesondere auf das zeitabhängige Stoffverhalten des Asphaltbetons. Zur Quantifizierung des Temperatureinflusses und zur Untersuchung, ob eine Verkürzung der bisher erforderlichen langen Versuchszeiten durch eine Erhöhung der Versuchstemperatur möglich ist, wurden drei unterschiedliche Versuchstemperaturen gewählt:

	Nr.	1	2	3
Versuchstemperatur	° C	10	20	30

Tab. 5.2: Gewählte Versuchstemperaturen

Die Versuche wurden in einem Klimaraum, der annähernd konstante Versuchstemperaturen (max. Abweichung: $\pm 0,5$ °C) gewährleistet, durchgeführt.

5.3.3 Belastungspfade

In den Biaxialversuchen, die einen ebenen Verzerrungszustand ($\epsilon_2 = 0$) erzeugen, wurden in mehreren Belastungsstufen wirklichkeitsnahe, aus Dammessungen abgeleitete Belastungspfade erzeugt. Die Richtung der Hauptspannungsachsen blieb - abgesehen von Reibungseinflüssen zwischen Lastplatten und Probekörperflächen - unverändert. Die Versuchseinrichtung gestattet eine voneinander unabhängige, kontrollierte Lastaufbringung in zwei Achsrichtungen. Es wurden Spannungen von maximal $\sigma = 2,0 \text{ MN/m}^2$ aufgebracht. Die in Abbildung 5.4 dargestellten Spannungspfade wurden im Rahmen des Versuchsprogrammes untersucht.

Bei jedem Belastungsschritt wurden die vorgegebenen Spannungen σ_1 und σ_3 konstant gehalten und die Entwicklung der Verzerrungen aufgezeichnet. Die Zeitdauer zwischen den Belastungsdauern wurde ebenfalls variiert und lag zwischen 1 und 50 Tagen. Bei den meisten Versuchen wurde bis zum Aufbringen eines Belastungsschrittes eine Verzerrungsgeschwindigkeit von ca. $\dot{\epsilon} \leq 0,1\%/d$ abgewartet. Die Dauer eines vollständigen Versuches mit den dargestellten Belastungsschritten betrug in der Regel zwischen 5 und 12 Wochen.

Die Belastungspfade des Typs (1) dienten im wesentlichen zur Bestimmung der Kompressionsmoduln in Abhängigkeit der Versuchsparameter Temperatur und Bindemittelgehalt.

Die Belastungspfade des Typs (2) mit vorgegebenem Spannungsverhältnis n_{spv} sind in ihrem Verlauf stufenförmig gewählt worden, um wechselweise Belastungsschritte mit annähernd ausschließlich deviatorischen Spannungszuwächsen und Belastungsschritte mit annähernd ausschließlich hydrostatischen Spannungszuwächsen zu erzeugen. Auf diese Art und Weise können die jeweils diesen beiden Arten der Zustandsänderung zuzuordnenden Stoffparameter genauer aus den Versuchen bestimmt werden.

Untersuchter Belastungspfad		$n_{\text{SpV}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$	$\frac{1}{n_{\text{SpV}}}$	$\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$
	Nr.	-	-	-
Typ 1	1.1	0	∞	1
Typ 2	2.1	$0, \overline{3}$	3	2
	2.2	0,5	2	3
	2.3	0,6	$1, \overline{6}$	4
	2.4	$0, \overline{6}$	1,5	5

Tab. 5.3: Untersuchte Belastungspfade

Aus den vorgegebenen Belastungspfaden des Typs (2) resultieren der in der folgenden Abbildung 5.5 beispielhaft dargestellte Spannungspfad im $\sigma_{\text{oct}}-\tau_{\text{oct}}$ -Diagramm. Erkennbar hierbei ist der zeitlich verzögerte Aufbau der mittleren Hauptspannung σ_2 nach Erhöhung des mittleren Spannungsniveaus $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$, was sich in einem Ansteigen von σ_{oct} bei gleichzeitiger Abnahme von τ_{oct} zeigt.

Für alle Belastungspfade des Typs (2) ergaben sich der in der Abbildung dargestellte stufenförmige Verlauf mit einem annähernd konstanten $\sigma_{\text{oct}}/\tau_{\text{oct}}$ -Verhältnis nach jeweils zwei Belastungsschritten.

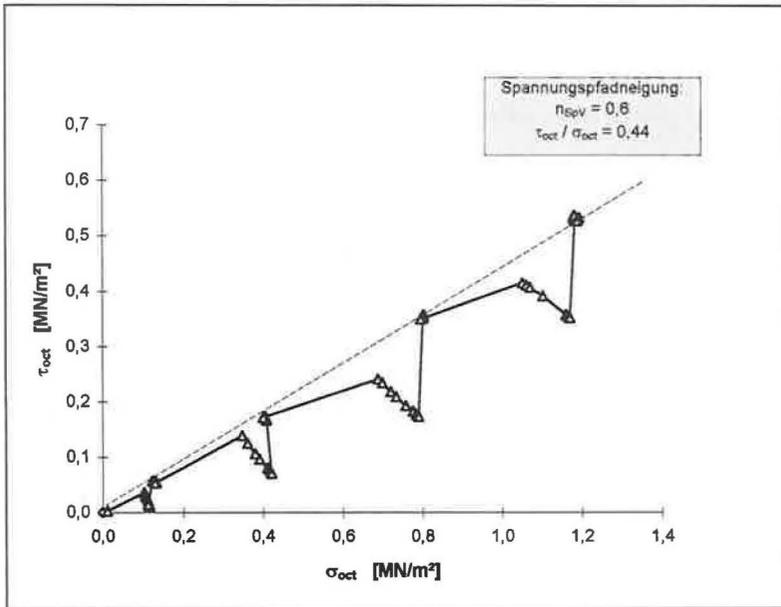


Abb. 5.5: Charakteristischer Belastungspfad (hier: Versuch Nr. 4), wie er sich aus den Versuchen des Typs (2) ergibt

6 Auswertung der Laborversuche

6.1 Die mittlere Hauptspannung σ_2

Die Konstruktion der drei Biaxialgeräte ermöglicht die Messung der mittleren Hauptspannung σ_2 , die sich infolge des erzwungenen ebenen Verzerrungszustandes ($\varepsilon_2 = 0$) einstellt. Übertragen auf die Verhältnisse im Damm entspricht diese Hauptachsenrichtung der Dammlängsrichtung. Im Versuch kann aufgrund der vorgegebenen Versuchsrandbedingung ($\varepsilon_2 = 0$) auf die Größe der Spannung σ_2 kein unmittelbarer Einfluß genommen werden; σ_2 stellt somit eine für das jeweilige Kräftegleichgewicht erforderliche Reaktion auf die aufgebrachten Spannungen σ_1 und σ_3 dar. Nach Aufbringen einer neuen Laststufe durch Vorgabe der Spannungsgrößen σ_1 und σ_3 stellt sich in der Regel innerhalb der ersten 24 Stunden ein über die Zeit konstantes äußeres Spannungsgleichgewicht ein. Für diese Spannungszustände werden im folgenden die Verhältnisse der mittleren Hauptspannung σ_2 zu den aufgebrachten Hauptspannungen σ_1 und σ_3 in Abhängigkeit von Spannungspfad, Temperatur und Bindemittelgehalt untersucht und ausgewertet. Zur Beschreibung der Spannungszustände werden folgende Verhältnisfaktoren α und α_{oct} definiert:

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 + \sigma_3)} \quad \text{und:} \quad \alpha_{\text{oct}} = \frac{\sigma_2}{\sigma_{\text{oct}}}$$

Hieraus ergibt sich:

$$\alpha = \frac{2\alpha_{\text{oct}}}{3 - \alpha_{\text{oct}}} \quad \text{und:} \quad \alpha_{\text{oct}} = \frac{3\alpha}{2 + \alpha}$$

In den nachfolgenden Abbildungen 6.1. bis 6.3 sind die Abhängigkeiten des Verhältniswertes α_{oct} jeweils von der Temperatur, dem Bindemittelgehalt und der Oktaederspannung σ_{oct} dargestellt. Hierbei zeigt sich für die Parameter Temperatur und Bindemittelgehalt, daß deren Einfluß auf α_{oct} nicht signifiant ist. Das bedeutet, daß die mittlere Hauptspannung σ_2 nahezu unabhängig von den beiden genannten Einflußgrößen ist.

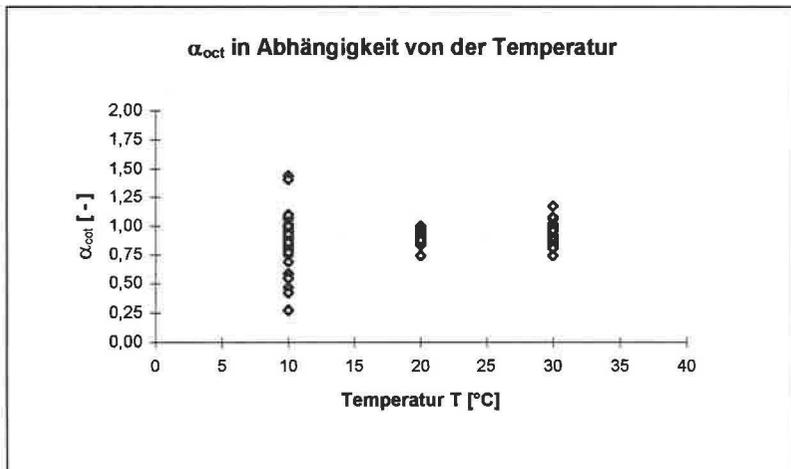


Abb. 6.1: Temperatureinfluß auf den Verhältniswert α_{oct}

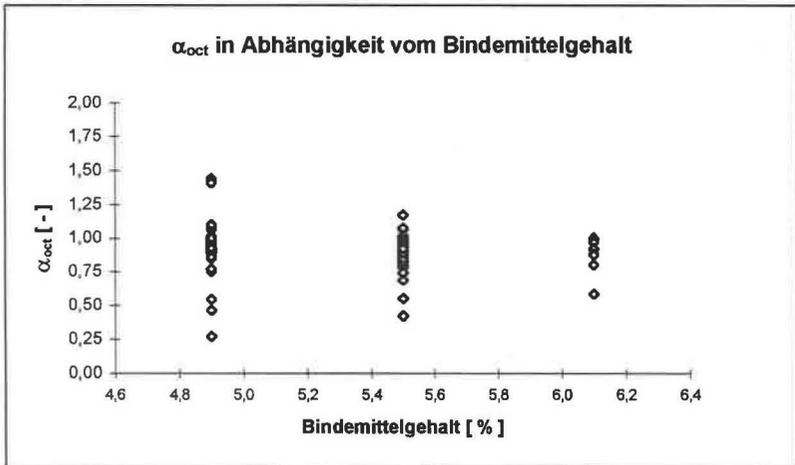


Abb. 6.2: Einfluß des Bindemittelgehaltes auf den Verhältniswert α_{oct}

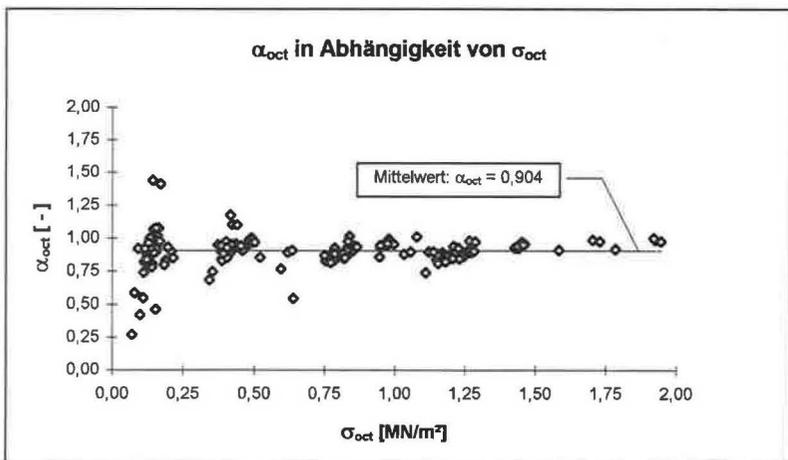


Abb. 6.3: Einfluß der Oktaederspannung σ_{oct} auf α_{oct}

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß sich für geringe Oktaederspannungen geringe α_{oct} -Werte ergeben. Mit steigendem Spannungsniveau liegen die α_{oct} -Werte um den Wert von rd. 0,9. Die zu beobachtende größere Streubreite der α_{oct} -Werte für niedrige Oktaederspannungen läßt sich auf Reibungseinflüsse zwischen Lastplatten und Probekörper und im Biaxialgerät selber zurückführen. Je kleiner die aufgebrachten Lasten sind um so größer ist der prozentuale Anteil der Reibungskräfte. Diese können jedoch je nach Probekörpereinbau und Versuchsdurchführung sehr unterschiedlich sein.

Unter Berücksichtigung aller durchgeführten Versuche ergeben sich folgende mittlere Verhältniswerte für die Hauptspannung σ_2 :

$$\text{im Mittel: } \alpha = \frac{\sigma_2}{\frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 + \sigma_3)} = 0,863$$

$$\text{im Mittel: } \alpha_{\text{oct}} = \frac{\sigma_2}{\sigma_{\text{oct}}} = 0,904.$$

6.2 Beschreibung des zeitabhängigen Verzerrungsverhaltens

Die spannungsgesteuerte Lastaufbringung erfolgte in der Mehrzahl der Biaxialversuche gemäß dem unter Abschnitt 5.3.3 beschriebenen stufenförmigen Spannungspfadtyp Nr. 2. Nach Aufbringung einer neuen Laststufe wurde der zeitliche Verlauf der gemessenen Verzerrungen ε_1 und ε_3 aufgezeichnet. Dabei hat sich gezeigt, daß die Verzerrungen selbst nach 60 Tagen nach Lasterhöhung bei gleichzeitiger Konstanthaltung der äußeren Spannungen mit der Zeit zwar kontinuierlich abnehmen, jedoch nicht vollkommen zum Stillstand kommen. Bei keinem der Versuche wurden Verzerrungszustände mit $\dot{\varepsilon}_{\text{oct}} = \partial \varepsilon_{\text{oct}} / \partial t = 0$ bzw. $\dot{\gamma}_{\text{oct}} = \partial \gamma_{\text{oct}} / \partial t = 0$ erreicht. Nahezu alle zeitlichen Verläufe der Oktaeder-

verzerrungen γ_{oct} und ε_{oct} haben die Form, wie sie beispielhaft in der nachfolgenden Abbildung 6.4 im einfach logarithmischen Maßstab dargestellt ist.

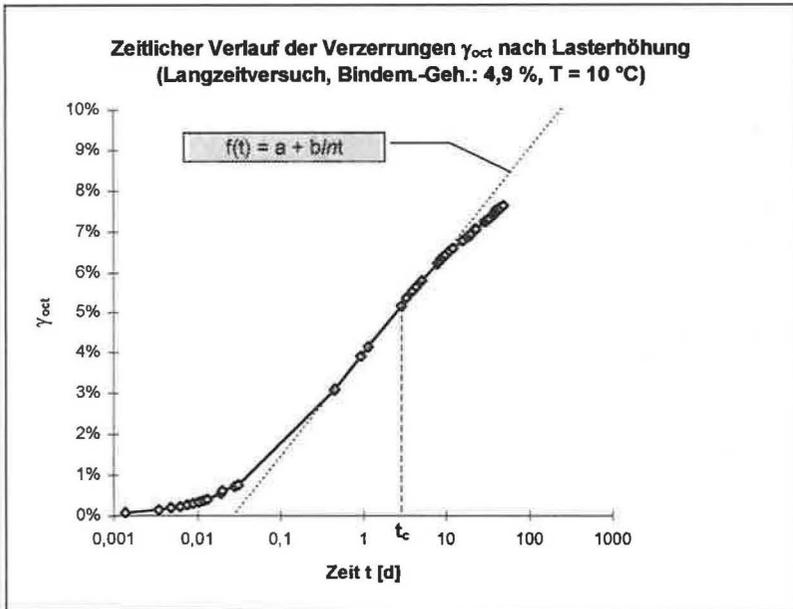


Abb. 6.4: Zeitl. Verlauf der Oktaederverzerrungen aus einem Langzeitversuch

Charakteristisch für die ermittelten zeitlichen Verläufe ist, daß sich die Versuchskurve zunächst asymptotisch einer Funktion der Form $f_c(t) = a + b \ln(t)$ annähert. Im weiteren Versuchsablauf flacht die Kurve weiter ab und unterschreitet beim charakteristischen Zeitpunkt t_c die im halblogarithmischen Maßstab als Gerade erscheinende Funktion $f_c(t)$. Der Zeitpunkt t_c ist demnach im halblogarithmischen Maßstab der Wendepunkt der Versuchskurve. Die oben beschriebene Funktion wird im folgenden als für die jeweilige Laststufe eines Versuchs charakteristische Funktion $f_c(t)$ bezeichnet.

Die Versuchsauswertungen haben gezeigt, daß für den Zeitabschnitt bis t_c die Zeitkurven für die Oktaederverzerrungen in der Regel sehr gut mit folgender Funktion $f_{R1}(t)$ für die Regressionsanalyse angenähert werden können:

$$f_{R1}(t) = a_1 \cdot t^{b_1}$$

Bei Anwendung dieses Funktionsansatzes liegt das entsprechende Bestimmtheitsmaß der Regression in der Regel bei $r^2 > 0,9$.

Die Bestimmung und vor allem Überprüfung eines geeigneten Funktionsansatzes für die Regression der Versuchskurve für $t > t_c$ ist äußerst schwierig, da hierzu extrem lange Versuchszeiten erforderlich wären. Bei einer Versuchstemperatur von $T = 10\text{ °C}$ wären hierzu Versuchszeiten von jeweils über 100 Tagen für jede einzelne Laststufe erforderlich.

Bei der Auswertung der Versuche hat sich gezeigt, daß der zuvor definierte charakteristische Zeitpunkt t_c im wesentlichen von der Versuchstemperatur abhängig ist. Die folgende Tabelle 6.1 gibt die Streubreite der ermittelten Zeitpunkte t_c in Abhängigkeit der Temperatur T an:

T	t_c
[°C]	[d]
10	0,5 . . . 5
20	0,05 . . . 0,5
30	0,005 . . . 0,05

Tab. 6.1: Ermittelte charakteristische Zeitpunkte t_c in Abh. von der Temperatur

Zur Verdeutlichung der zuvor beschriebenen Charakteristika der ermittelten Versuchskurven für die Oktaederverzerrungen sind in den folgenden Abbildungen 6.5 und 6.6 die Ergebnisse der Versuchsauswertung für alle Laststufen eines Versuchs dargestellt. Die beiden Abbildungen unterscheiden sich nur in der Skalierung der Achse für die Oktaederverzerrung γ_{oct} : in Abbildung 6.5 ist diese linear, in Abbildung 6.6 dagegen ebenso wie die Zeitachse im logarithmischen Maßstab aufgetragen. In der letztgenannten Darstellungsform erscheinen die zuvor vorgeschlagenen Funktionen $f_{R1}(t)$ für die Regression der Versuchskurven bis zum Zeitpunkt t_c als Geraden. Anhand der Abbildung 6.6 läßt sich anschaulich zeigen, daß der vorgeschlagene Regressionsansatz in der Anfangsphase nach Lastaufbringung gute Ergebnisse liefert.

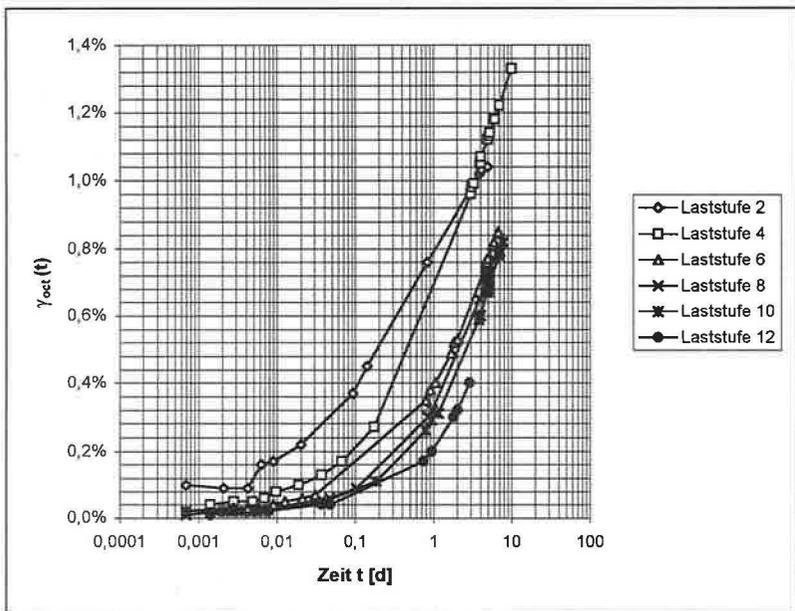


Abb. 6.5: Zeitl. Verlauf von $\gamma_{\text{oct}}(t)$ für alle Laststufen mit Schubbeanspruchung im einfach-log. Maßstab (Versuch 4: Bindem.-Geh. 5,5 %, $T = 10^\circ\text{C}$)

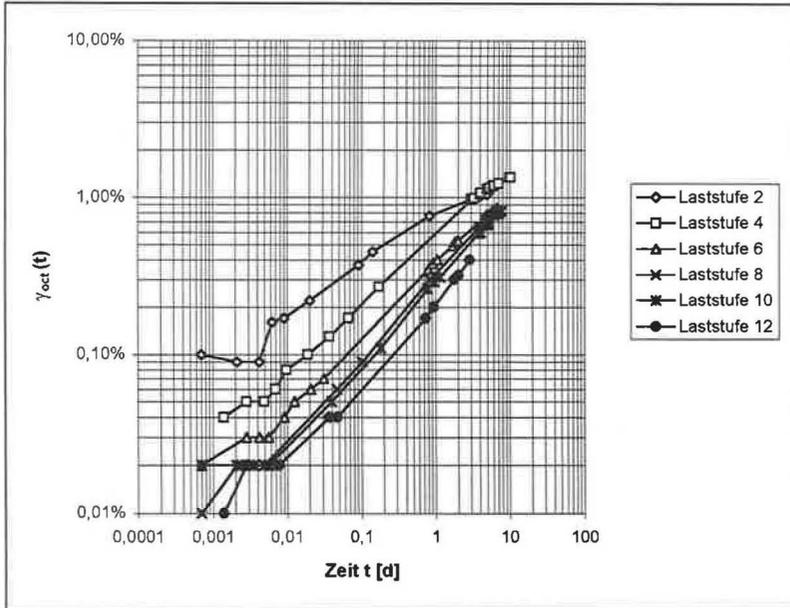


Abb. 6.6: Zeitl. Verlauf von $\gamma_{oct}(t)$ für alle Laststufen mit Schubbeanspruchung im doppelt-log. Maßstab (Versuch 4: Bindem.-Geh. 5,5 %, $T = 10^\circ\text{C}$)

Ermittelt man aus den Versuchsergebnissen die Verzerrungsgeschwindigkeiten $\dot{\gamma}_{oct}$, die sich nach Aufbringen einer neuen Laststufe ergeben, und stellt deren zeitlichen Entwicklung im doppelt-logarithmischen Maßstab dar, zeigt sich erwartungsgemäß, daß die Verzerrungsgeschwindigkeiten mit zunehmender Versuchsdauer abnehmen. Für den zuvor erwähnten Langzeitversuch, dessen zeitlicher Verlauf der Oktaederverzerrungen γ_{oct} in Abbildung 6.4 dargestellt ist, ist aus nachfolgender Abbildung 6.7 der zeitliche Verlauf der Verzerrungsgeschwindigkeit $\dot{\gamma}_{oct}$ ersichtlich. Die Abnahme der Verzerrungsgeschwindigkeit ist demnach zu Versuchsbeginn geringer als gegen Ende des Versuchs.

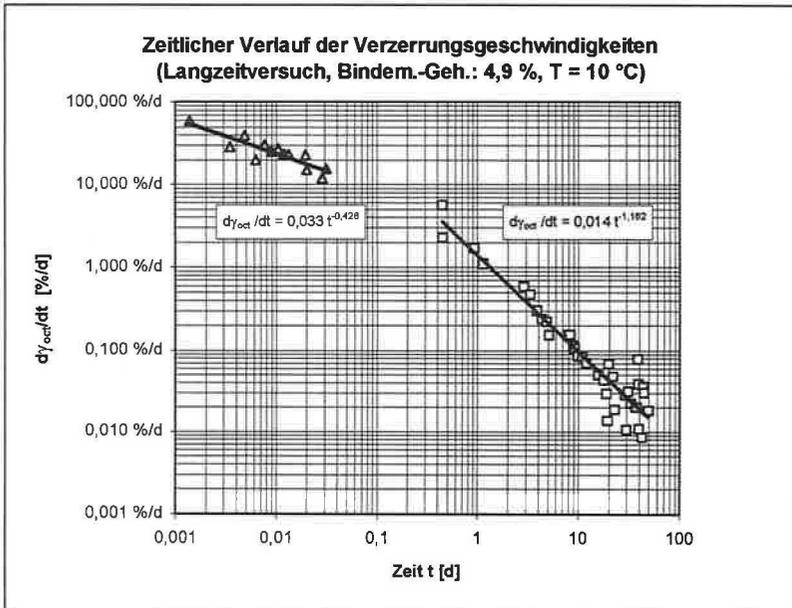


Abb. 6.7: Zeitlicher Verlauf der Verzerrungsgeschwindigkeit

Der zuvor vorgeschlagene Regressionsansatz $f_{R1}(t) = a_1 \cdot t^{b_1}$ für den ersten Zeitabschnitt findet auch in dieser Darstellung seine Bestätigung, da die Ableitung nach der Zeit

$$\frac{df_{R1}(t)}{dt} = a_1 \cdot b_1 \cdot t^{b_1-1}$$

ebenfalls eine Potenzfunktion ergibt, die im doppelt-logarithmischen Maßstab als Gerade erscheint. In Abbildung 6.7 ist die entsprechende Regression dargestellt.

Bemerkenswert ist, daß für den zweiten Zeitabschnitt (hier in Abbildung 6.7: $t > 0,5$ d) der zeitliche Verlauf der Verzerrungsgeschwindigkeit auch durch eine

Potenzfunktion gut angenähert werden kann. Folgende Regressionsfunktionen für γ_{oct} und $\dot{\gamma}_{\text{oct}}$ lassen sich für $t > t_c$ angeben:

$$\gamma_{\text{oct}} = f_{R2}(t) = a_2 \cdot t^{b_2} + c_2,$$

$$\dot{\gamma}_{\text{oct}} = \frac{df_{R2}(t)}{dt} = a_2 \cdot b_2 \cdot t^{b_2-1},$$

wobei

$$a_2 > 0, \quad b_2 < 0, \quad c_2 > 0.$$

Als Grenzwert für $t \rightarrow \infty$ ergibt sich $\lim_{t \rightarrow \infty} \gamma_{\text{oct}} = c_2$.

Aus Langzeitversuchen, bei denen die Versuchsdauern je Laststufe mehrere Wochen betragen, läßt sich auf diese Weise der rechnerische Grenzwert c_2 bestimmen. Hierzu ermittelt man zunächst aus dem $\dot{\gamma}_{\text{oct}}$ - t -Diagramm die Parameter a_2 und b_2 . Danach kann über den Funktionsansatz $f_{R2}(t)$ der Parameter c_2 ermittelt werden. Bei kürzeren Versuchsdauern ist eine entsprechende Regressionsanalyse mit dem Ziel der Bestimmung des Grenzwertes c_2 in der Regel nicht möglich bzw. mit einem großen Fehler behaftet.

Für das in Abbildung 6.7 dargestellte Beispiel ergibt sich:

$$a_2 \cdot b_2 = 0,014; \quad a_2 = -0,0864; \quad b_2 = -0,162$$

aus Abb. 6.4: $\gamma_{\text{oct}}(t=3 \text{ d}) = 5,2\%; \quad c_2 = 12,4\%$

Der Grenzwert c_2 entspricht in diesem Beispiel dem Funktionswert der zuvor definierten charakteristischen Funktion $f_c(t)$ bei $t \approx 2000 \text{ d}$.

Potenzansätze, wie sie hier zur Beschreibung des zeitabhängigen Verzerrungsverhaltens angewendet werden, werden bereits seit längerer Zeit häufig als rheologische Gleichung für Materialien mit veränderlicher Zähigkeit, Elastizität usw. vorgeschlagen. Reiner (1968) weist ausdrücklich daraufhin, daß es eine unumstößliche empirische Tatsache sei, daß in vielen Laboratorien in der ganzen Welt bestätigt werden könne, daß die in doppelt-logarithmischen Maßstab aufgetragenen Versuchsergebnisse in vielen Fällen Geraden ergeben würden. Er gibt jedoch zu bedenken, daß der Potenzansatz nicht als echte

rheologische Gleichung, sondern nur als eine Interpolationsformel bzw. empirische Formel betrachtet werden könne.

6.3 Temperatureinfluß auf das Zeitverhalten der Verzerrungen

Bei den Versuchen, bei denen sowohl der Spannungspfad als auch der Bindemittelgehalt der Probekörper übereinstimmen, kann der Einfluß der Versuchstemperatur untersucht werden. Aus den nachfolgenden Abbildungen 6.8 und 6.9 ist der Temperatureinfluß auf das Zeitverhalten der Oktaederverzerrungen (hier: γ_{Oct}) für die aufgebrauchten Laststufen von zwei vergleichbaren Versuchsgruppen ersichtlich.

Aus den Abbildungen wird deutlich, daß mit zunehmender Versuchstemperatur die anfänglichen Verzerrungen größer werden. Mit wachsender Versuchsdauer werden diese Unterschiede jedoch immer geringer. Diese Beobachtung bestätigt, daß eine höhere Versuchstemperatur eine den Verzerrungsverlauf „beschleunigende“ Wirkung („Zeitraffer-Effekt“) ausübt. Bei den hier durchgeführten und ausgewerteten Versuchen ist festzustellen, daß bei Versuchen mit bis auf die Temperatur übereinstimmende Randbedingungen und Laststufen jeweils in der Größe vergleichbare Verzerrungen für große Werte für t auftreten.

In erster Näherung wird für zeitliche Verzerrungsverläufe von Versuchen mit bis auf die Temperatur übereinstimmenden Randbedingungen folgender Ansatz für den untersuchten Temperaturbereich zwischen 10 °C und 30 °C vorgeschlagen:

$$\gamma_{\text{Oct}, T=T_2}(t = t_0) = \gamma_{\text{Oct}, T=T_1}(t = t_0 \cdot 10^{\beta \cdot (T_2 - T_1)})$$

Entsprechend der Versuchsauswertungen ergeben sich nachstehende β -Werte:

$$\beta = 0,05 \dots 0,5$$

Beispiel:

Betrachtet werden zwei Versuche mit bis auf die Temperatur übereinstimmende Randbedingungen. Im ersten Versuch beträgt die Temperatur $T = 20\text{ °C}$. Nach einem Tag wird eine Oktaederverzerrung γ_{oct} von 1 % erreicht. Gemäß o.g. Ansatz ergibt sich für den zweiten Versuch mit $T = 10\text{ °C}$:

$$\gamma_{\text{oct}, T=20\text{°C}} (t=1\text{d}) = \gamma_{\text{oct}, T=10\text{°C}} (t=1\text{d} \cdot 10^{\beta(20\text{°C}-10\text{°C})}) = \gamma_{\text{oct}, T=10\text{°C}} (t=11\text{d} \dots 32\text{d})$$

für $\beta = 0,05 \dots 0,5$.

Es ist also zu erwarten, daß sich im 2. Versuch nach einer Zeit von 11 bis 32 Tagen die Oktaederverzerrung von $\gamma_{\text{oct}} = 1\%$ erreicht wird.

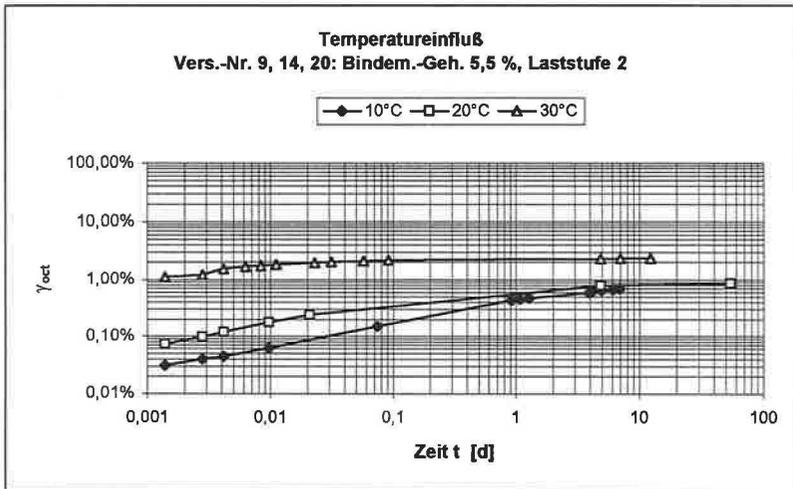


Abb. 6.8 a: Einfluß der Temp. auf die zeitl. Entwicklung der Oktaederverz.

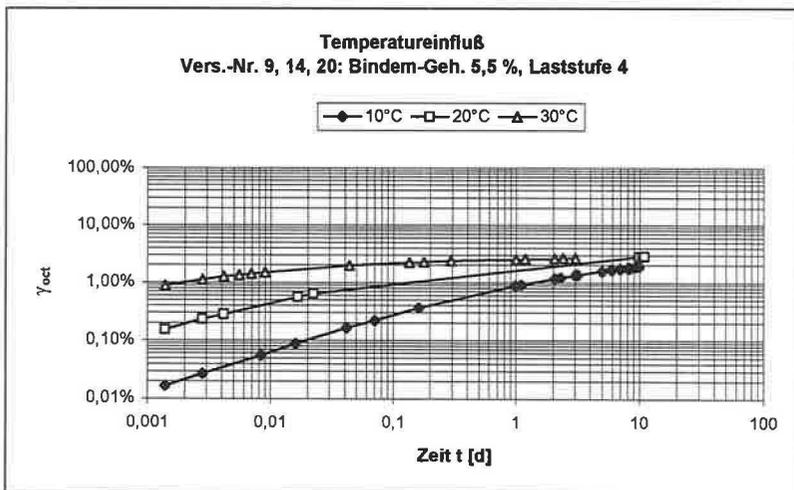


Abb. 6.8 b: Einfluß der Temp. auf die zeitl. Entwicklung der Oktaederverz.

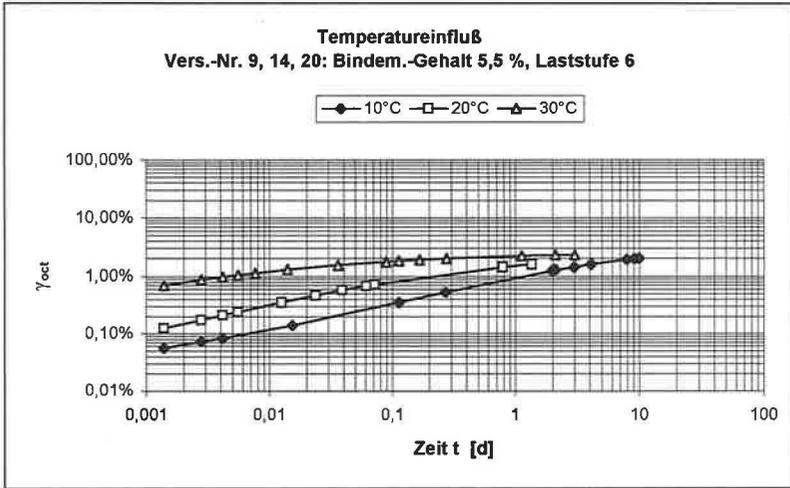


Abb.6.8 c: Einfluß der Temp. auf die zeitl. Entwicklung der Oktaederverz.

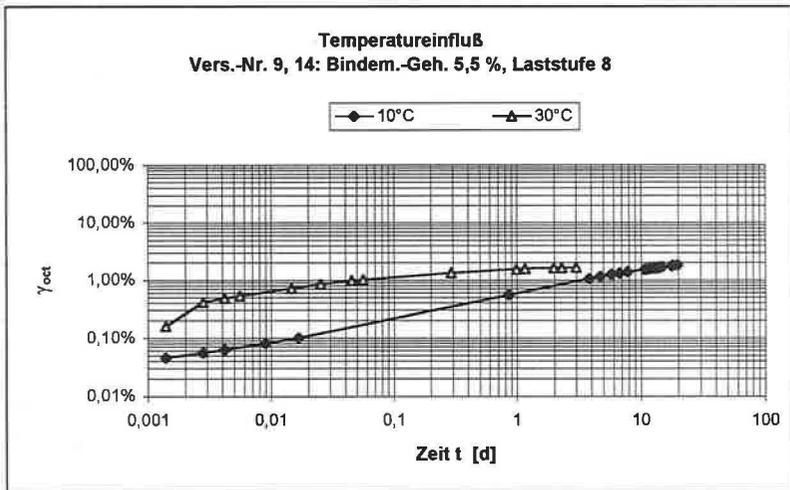


Abb.6.8 d: Einfluß der Temp. auf die zeitl. Entwicklung der Oktaederverz.

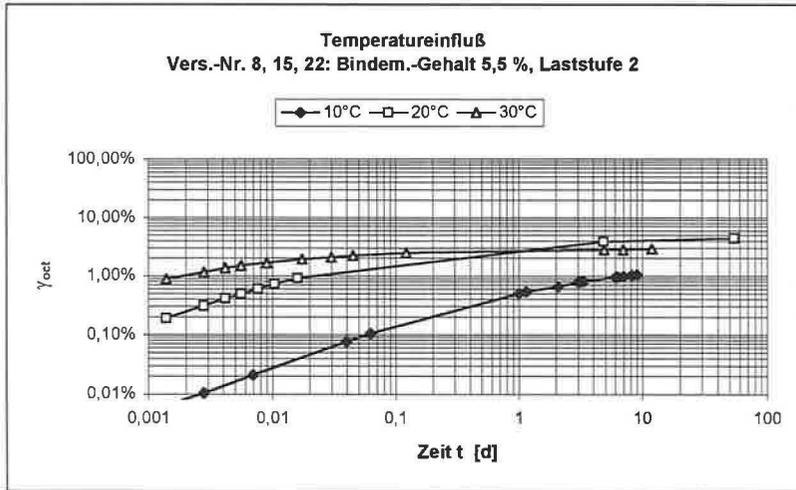


Abb. 6.9 a: Einfluß der Temp. auf die zeitl. Entwicklung der Oktaederverz.

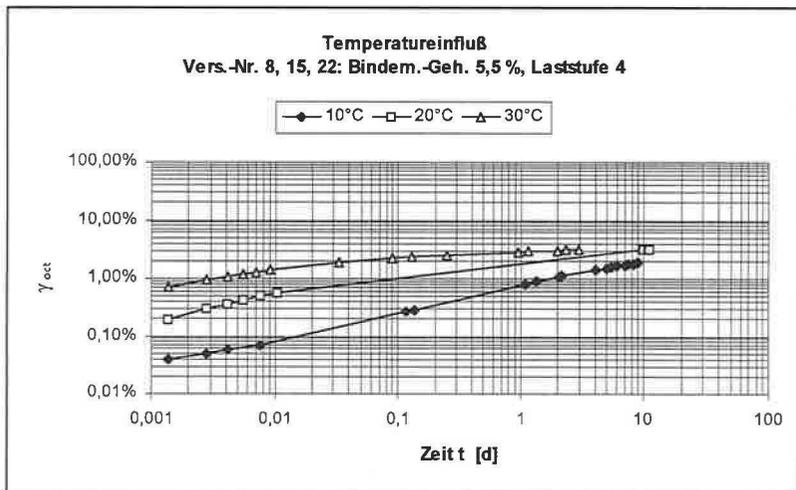


Abb. 6.9 b: Einfluß der Temp. auf die zeitl. Entwicklung der Oktaederverz.

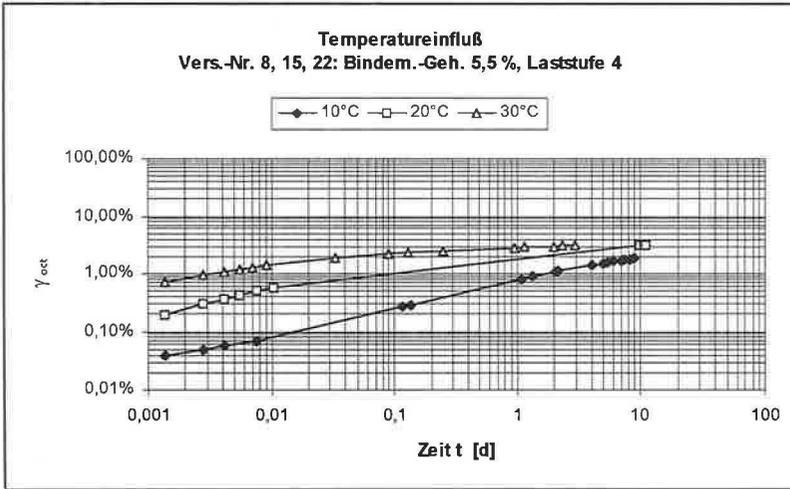


Abb. 6.9 c: Einfluß der Temp. auf die zeitl. Entwicklung der Oktaederverz.

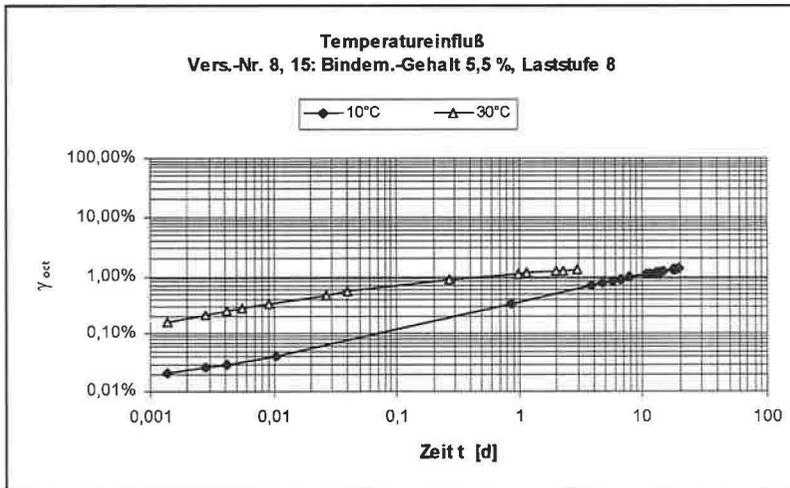


Abb. 6.9 d: Einfluß der Temp. auf die zeitl. Entwicklung der Oktaederverz.

6.4 Untersuchungen zum Kompressionsmodul

6.4.1 Ableitung eines analytischen Stoffmodells

Asphaltbeton besteht aus den drei Komponenten *Korngerüst*, *Bitumen* und den eingeschlossenen *Luftporen*. Alle drei Stoffe weisen sehr unterschiedliche Materialeigenschaften und prozentuale Volumenanteile in der Asphaltbetonmischung auf. Die entsprechenden Kennwerte können der Tabelle 6.2 entnommen werden.

	Mineralgerüst (o. Hohlräume)	Bitumen	Luftporen	Asphaltbeton
Dichte ρ [kg/m ³]	i.M. 2.775 (2.600 - 2.800)	i.M. 1.050 (1.000 - 1.100)	i.M. 1,3	i.M. 2.450 (2.400 - 2.500)
Vol.-%	i.M. 85 % (83,5 - 86,5 %)	i.M. 13,5 % (12,0 - 15,5 %)	i.M. 1,5 % (0,0 - 3,0 %)	100 %
Gew.-%	i.M. 94 % (93,4 - 95,1 %)	i.M. 6,0 % (4,9 - 6,6 %)	0,0 %	100 %

Anmerkungen: H_{Mbit} = der mit Luft und Bitumen ausgefüllte Hohlraum des Mineralgerüstes
Der Wert liegt zwischen 13,5 Vol.-% und 16,5 Vol.-%

H_{bit} = Lufthohlraumgehalt [Vol.-%]
Der Wert liegt i.d.R. zwischen 1 Vol.-% und 2 Vol.-%

B_g = Bindemittelgehalt [Gew.-%]
Der Wert liegt zwischen 4,9 Gew.-% und 6,6 Gew.-%

Tab. 6.2: Kennwerte (Mittelwerte und Streubereiche) für den untersuchten Asphaltbeton

Im folgenden wird für den Kompressionsmodul ein vereinfachendes analytisches Stoffmodell abgeleitet, um den Einfluß der verschiedenen Stoffparameter darzulegen und im Hinblick auf die nachfolgenden Versuchsauswertungen zu analysieren.

Die prozentualen Volumenanteile der drei Stoffe werden wie folgt bezeichnet:

Parameter, Volumenant.	Bezeichnung	relevante Wertebereiche
a_{Luft}	Luftporengehalt	0 % bis 3 %
a_{Korn}	Vol.-Anteil Korngerüst	83,5 % bis 86,5 %
$a_{\text{Bitt.}}$	Bindemittelgehalt	12 % bis 15,5 %

Tab. 6.3: Prozentuale Volumenanteile in den untersuchten Asphaltbetonmischungen

Zur Ableitung des Rechenmodells wird angenommen, daß die drei Komponenten des Asphaltbetons unter hydrostatischer Lastaufbringung ein voneinander unabhängiges Materialverhalten aufweisen. Übertragen auf die Rheologie entspricht das einem 3-Feder-Modell bestehend aus drei in Serie angeordneten nichtlineare Federn, die die einzelnen spannungsabhängigen Kompressionsmoduln repräsentieren.

Kompressionsverhalten der Luftporen:

Ausgehend von einem Anfangsvolumen V_0 und einem Anfangsumgebungsdruck p_0 ergibt sich für einen abgeschlossenen Raum nach Aufbringung eines zusätzlichen hydrostatischen Druckes σ_{oct} ein reduziertes Volumen V_1 gemäß folgender Gleichung (Anwendung des Gesetzes von Boyle-Mariotte):

$$V_0 \cdot p_0 = V_1 \cdot (p_0 + \sigma_{\text{oct}}).$$

Kompressionsverhalten des Korngerüstes

Gewählt wird hierfür der bereits unter Pkt. 4.4 beschriebene Ansatz nach Naylor (1975):

$$K_{\text{Kom}} = K_{0,\text{Kom}} + \alpha_K \cdot \sigma_{\text{oct}} .$$

Der Kompressionsmodul wird im folgenden als Tangentenmodul definiert:

$$3 \cdot K_{\text{Kom}} = \frac{d\sigma_{\text{oct}}}{d\varepsilon_{\text{oct}}} .$$

Resultierende Volumenänderung infolge einer Änderung der Oktaederverzerrung:

$$-dV = 3 \cdot \varepsilon_{\text{oct}} \cdot V .$$

Hieraus ergibt sich die folgende Differentialgleichung:

$$K_{\text{Kom}} = \frac{d\sigma_{\text{oct}}}{-dV} \cdot V = K_{0,\text{Kom}} + \alpha_K \cdot \sigma_{\text{oct}} .$$

$$\int \frac{1}{K_{0,\text{Kom}} + \alpha_K \cdot \sigma_{\text{oct}}} d\sigma_{\text{oct}} = - \int \frac{1}{V} dV + C_0 ; \frac{1}{\alpha_K} \cdot \ln(K_{0,\text{Kom}} + \alpha_K \cdot \sigma_{\text{oct}}) = -\ln V + C_0$$

Mit der Randbedingung:

$$V(\sigma_{\text{oct}}=0) = V_0$$

ergibt sich nach entsprechender Umformung das gesuchte reduzierte Volumen V_1 nach Aufbringen der hydrostatischen Spannung σ_{oct} :

$$V_1 = V_0 \cdot \left(\frac{K_{0,\text{Kom}}}{K_{0,\text{Kom}} + \alpha_K \cdot \sigma_{\text{oct}}} \right)^{\frac{1}{\alpha_K}} .$$

Kompressionsverhalten des Bitumens

Der Kompressionsmodul von Bitumen liegt im Vergleich zum Kompressionsmodul vom Korngerüst mindestens um ein bis zwei Zehnerpotenzen höher. Desweiteren beträgt der Volumenanteil des Bitumens zwischen 12 % bis 15,5 % am Gesamtvolumen, so daß im folgenden für das gewählte analytische Modell der Verformungsanteil durch das Bitumen in der Asphaltbetonmischung vernachlässigt wird:

$$V_1 = V_0.$$

Formulierung des analytischen Modells

Unter den oben genannten Randbedingungen ergibt sich unter Berücksichtigung der Volumenanteile der einzelnen Materialkomponenten das resultierende Volumen V_1 nach Aufbringen einer hydrostatischen Spannung σ_{oct} zu:

$$V_1(\sigma_{\text{oct}}) = a_{\text{Luft}} \cdot V_{1,\text{Luft}} + a_{\text{Korn}} \cdot V_{1,\text{Korn}} + a_{\text{Bit.}} \cdot V_{1,\text{Bit.}}$$

$$V_1(\sigma_{\text{oct}}) = \left[a_{\text{Luft}} \cdot \frac{p_0}{p_0 + \sigma_{\text{oct}}} + a_{\text{K}} \cdot \left(\frac{K_{0,\text{Korn}}}{K_{0,\text{Korn}} + \alpha_{\text{K}} \cdot \sigma_{\text{oct}}} \right)^{\frac{1}{\alpha_{\text{K}}}} + a_{\text{Bit.}} \right] \cdot V_0$$

Als Lösung für den spannungsabhängigen Kompressionsmodul ergibt sich daraus:

$$K_{\text{Asphaltb.}} = - \frac{V(\sigma_{\text{oct}})}{dV/d\sigma_{\text{oct}}} = \frac{a_{\text{Luft}} \cdot \frac{p_0}{p_0 + \sigma_{\text{oct}}} + a_{\text{Korn}} \cdot \left(\frac{K_{0,\text{Korn}}}{K_{0,\text{Korn}} + \alpha_{\text{K}} \cdot \sigma_{\text{oct}}} \right)^{\frac{1}{\alpha_{\text{K}}}} + a_{\text{Bit.}}}{a_{\text{Luft}} \cdot \frac{p_0}{(p_0 + \sigma_{\text{oct}})^2} + \frac{a_{\text{Korn}}}{K_{0,\text{Korn}}} \cdot \left(\frac{K_{0,\text{Korn}}}{K_{0,\text{Korn}} + \alpha_{\text{K}} \cdot \sigma_{\text{oct}}} \right)^{\frac{1}{\alpha_{\text{K}}+1}}}$$

Bei Annahme folgender Werte für die Stoffparameter p_0 , $K_{0,\text{Korn}}$ (Anfangskompressionsmodul des Korngerüstes), α_K und den Volumenanteilen:

p_0 ¹⁾	$K_{0,\text{Korn}}$	α_K	a_{Korn}	a_{Bit}	a_{Luft}
[MN/m ²]	[MN/m ²]	[-]	[%]	[%]	[%]
0,1	150	80	= 86,5 - a_{Luft}	13,5	variabel: 0 % bis 3 %

¹⁾ entspricht dem atmosphärischen Luftdruck von 1 bar

Tab. 6.3: Angenommene Werte für die Stoffparameter

ergeben sich bei Variation des prozentualen Volumenanteils der Luftporen folgende von der aufgetragenen Spannung σ_{oct} abhängigen Kompressionsmodulverläufe:

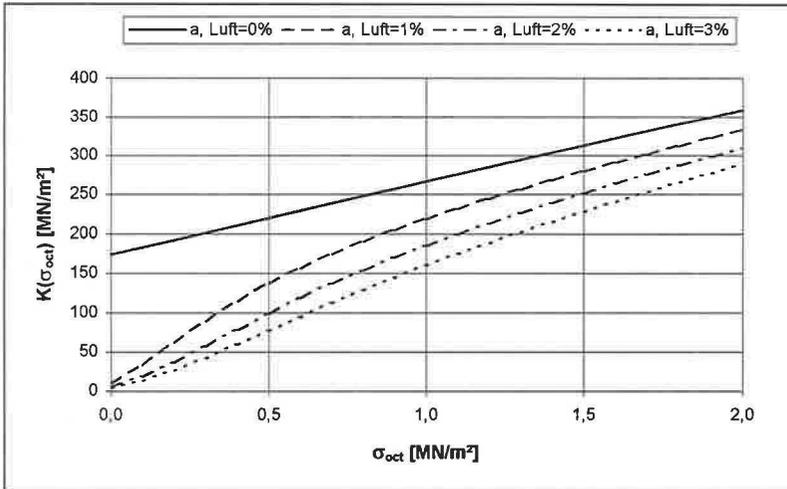


Abb. 6.10: Analytisches Modell - spannungsabhängiger Kompressionsmodul

Aus dieser Darstellung wird ersichtlich, welchen großen Einfluß der Anfangsluftporengehalt auf den spannungsabhängigen Kompressionsmodul hat. So verringert sich in diesem Beispiel bei einem Spannungsniveau von $\sigma_{oct} = 0,5 \text{ MN/m}^2$ der Kompressionsmodul um ca. 50 % infolge einer Erhöhung des Anfangsluftporengehalt von 1 % bis 3 %. Desweiteren ist für dieses Modell charakteristisch, daß sich bei niedrigen Spannungsniveaus - auch bei geringen Luftporengehalten von z.B. rd. 1 % - relativ kleine Kompressionsmodulin ergeben. Der Anfangskompressionsmodul $K_{0,Asphaltb.}$ errechnet sich zu:

$$K_{0,Asphaltb.} = \frac{p_0 \cdot K_{0,Kom}}{a_{Luft} \cdot K_{0,Kom} + a_{Kom} \cdot p_0} \approx \frac{p_0}{a_{Luft}}$$

Für $a_{Luft} = 1 \%$ bis 3% ergeben sich hieraus Werte für $K_{0,Asphaltb.}$ zwischen 3 MN/m^2 und 10 MN/m^2 .

6.4.2 Auswertung der Versuche

Wie bereits unter Punkt 6.2 beschrieben, nähern sich nach Aufbringen einer Laststufe die Versuchskurven für die Oktaederverzerrungen zunächst asymptotisch einer Funktion der Form $f_c(t) = a + b \cdot \ln(t)$. Im weiteren zeitlichen Verlauf flachen die Versuchskurven weiter ab und unterschreiten jeweils beim charakteristischen Zeitpunkt t_c die Funktion $f_c(t)$. Im Zuge der Versuchsauswertung lassen sich für jede Laststufe j aller Versuche i die Parameter a_{ij} und b_{ij} der beschriebenen Funktion $f_{c,ij}(t)$ bestimmen (vgl. auch Abb. 6.4). Wie bereits erwähnt, lassen sich die Versuchskurven - insbesondere bei Versuchstemperaturen um 10 °C - für Zeitpunkte $t \gg t_c$ aufgrund der hierfür erforderlichen sehr langen Versuchszeiten schlecht extrapolieren. Aus diesem Grund erfolgt die weitere Auswertung der Versuche auf der Grundlage der ermittelten Funktionen $f_{c,ij}(t)$. Die entsprechende prozentuale Abweichung zwischen Versuchskurve und der Funktion f_c

$$\frac{f_c(t) - \varepsilon_{\text{oct}}(t)}{\varepsilon_{\text{oct}}(t)}$$

für Zeitpunkte $t \geq t_c$ liegt bei $t = t_c$ definitionsgemäß bei 0 % und nimmt mit zunehmenden t kontinuierlich zu. Bei den ausgewerteten Langzeitversuchen (Versuchszeiten > 40 d für eine Laststufe) ergeben sich prozentuale Abweichungen bei $t = 40$ d von weniger als 10 %. Für $t = 365$ d liegt die geschätzte Abweichung unter 25 %. Da die Ergebnisse von Versuchen mit vergleichbaren Randbedingungen in der Regel eine größere Streuung als die genannten Werte aufweisen, erscheint die Anwendung des Funktionstyps $f_c(t)$ zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufes der Verzerrungen für $t \geq t_c$ als ausreichend genau.

Für jede Laststufe j wird der zeitliche Verlauf von $\varepsilon_{\text{oct},j}$ abschnittsweise durch die Funktion $f_{c,j}(t_j)$ beschrieben. Nach Vorgabe eines Betrachtungszeitraumes t_z läßt sich hieraus für jede Laststufe j eine zugeordnete Oktaederverzerrung $\varepsilon_{\text{oct},j}(t_z) = f_{c,j}(t_j=t_z)$ zuordnen. Über die Definition als Tangentenmodul erhält man auf diesem Wege einen von t_z und σ_{oct} abhängigen Kompressionsmodul $K(t_z, \sigma_{\text{oct}})$.

In der nachfolgenden Abbildung sind die entsprechenden K-Modul-Verläufe für drei unterschiedliche Versuche dargestellt. Die drei Versuche unterscheiden sich lediglich in der Spannungspfadneigung. Der Bindemittelgehalt beträgt jeweils 5,5 %, die Versuchstemperatur 10 °C. Für jeden Versuch sind die K-Modul-Verläufe jeweils für die Betrachtungszeiträume $t_z = 5$ Tage, 100 Tage und 1.000 Tage dargestellt. Die Kurven zeigen dabei in ihrem Verlauf sehr gute Übereinstimmung mit den zuvor unter Abschnitt 6.4.1 aus dem analytischen Modell abgeleiteten Kurvenverläufe (vgl. Abb. 6.10). Insbesondere ist der bei allen Versuchsauswertungen zu erkennende niedrige Anfangskompressionsmodul K_0 und der mit höher werdender Oktaederspannung σ_{oct} ansteigende K-Wert charakteristisch. Desweiteren ist in der nachstehenden Abbildung ein Einfluß der Spannungspfadneigung und somit der Größe der Oktaederschubspannung τ_{oct} zu erkennen. Eine große Spannungspfadneigung bzw. Oktaederschubspannung verringert den Kompressionsmodul.

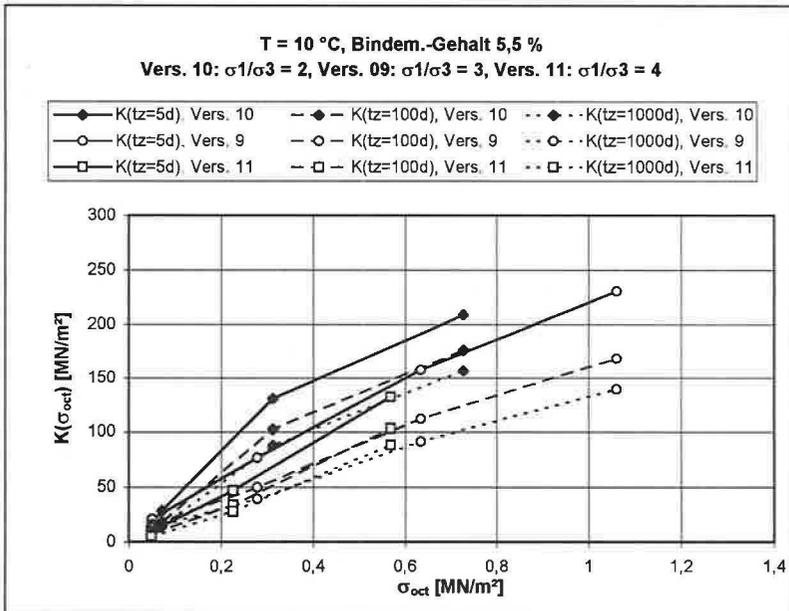


Abb. 6.11: Spannungsabhängiger Kompressionsmodul ($T = 10$ °C)

In der nächsten Abbildung 6.12 ist die entsprechende Auswertung für drei weitere Versuche dargestellt. Der Bindemittelgehalt beträgt auch hierbei jeweils 5,5 %. Die Versuchstemperatur lag bei diesen Versuchen jedoch bei 30 °C. Die drei Versuche unterscheiden sich voneinander wie zuvor hinsichtlich der Spannungspfadneigung. Auch hier ist der Einfluß der Oktaederschubspannung τ_{oct} auf den Kompressionsmodul in ähnlicher Weise - jedoch nicht so ausgeprägt wie zuvor - erkennbar.

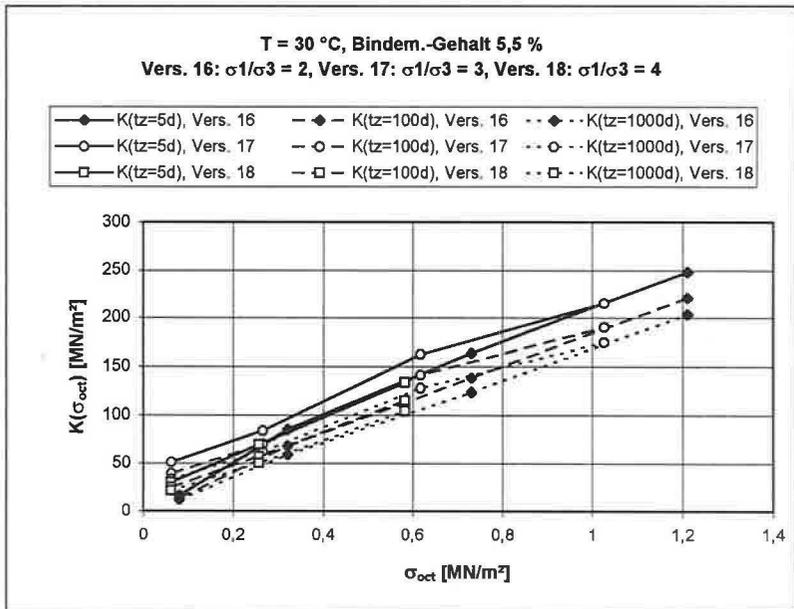


Abb. 6.12: Spannungsabhängiger Kompressionsmodul ($T = 30 \text{ °C}$)

Der Einfluß der Versuchstemperatur auf die Kompressionsmodulverläufe ist bei den durchgeführten Versuchen als nicht signifikant zu bewerten. Das gleiche gilt für den Bindemittelgehalt.

Hinsichtlich des Kompressionsmoduls kann zusammenfassend festgestellt werden, daß die Spannungsabhängigkeit sehr gut mit dem Funktionsansatz des analytischen Modells erklärt und in ihrem Verlauf beschrieben werden kann. Dadurch, daß selbst eine geringfügige Änderung des Anfangsluftporengehaltes bei sonst gleicher Asphaltbetonmischung den Kompressionsmodul sehr stark beeinflusst, sind die Versuchsstreuungen relativ groß. Aus diesem Grund ist eine Quantifizierung des Einflusses der Oktaederschubspannung τ_{oct} auf den K-Modul aus den Versuchsergebnissen nur eingeschränkt möglich. Der Einfluß des Bindemittelgehaltes und der Versuchstemperatur kann in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden.

6.5 Untersuchungen zum Schubmodul

Analog zum Kompressionsmodul wird der Schubmodul G ebenfalls im folgenden als Tangentenmodul definiert:

$$G = \frac{d\tau_{\text{oct}}}{d\gamma_{\text{oct}}}$$

Wie auch bei den Versuchsauswertungen zum Kompressionsmodul wird für jede Laststufe j der zeitliche Verlauf von $\gamma_{\text{oct},j}$ abschnittsweise durch die unter Abschnitt 6.2 beschriebene charakteristische Funktion $f_{c,j}(t_j)$ ersetzt. Nach Vorgabe eines Betrachtungszeitraumes t_z läßt sich somit für jede Laststufe j eine zugeordnete Oktaederverzerrung $\gamma_{\text{oct},j}(t_z) = f_{c,j}(t_j=t_z)$ zuordnen. Auf diesem Wege erhält man analog zum Kompressionsmodul einen von t_z und den Oktaederschubspannungen abhängigen Schubmodul $G(t_z, \sigma_{\text{oct}}, \tau_{\text{oct}})$.

Die Auswertung der Versuche hat gezeigt, daß für Betrachtungszeiträume $t_z > 10$ d die Einflüsse der Versuchstemperatur und des Bindemittelgehaltes auf den G -Modul nicht signifikant sind. Auch für die untersuchten Spannungspfadeneigungen $n_{\text{SPV}} = 0,3$ bis $0,7$ lassen sich ab einem gewissen Spannungsniveau keine signifikanten Einflüsse nachweisen.

In den folgenden Abbildungen 6.13a-c sind alle ermittelten Schubmodulwerte in Abhängigkeit der Oktaederspannung σ_{oct} jeweils für die 3 Betrachtungszeiträume $t_z = 5\text{d}$, 100d und 1.000d dargestellt. Die dargestellten Werte stammen aus Versuchen mit den unterschiedlichen Randbedingungen (Bindemittelgehalt, Temperatur, n_{spV}).

In den Abbildungen sind auch die entsprechenden linearen Regressionsgeraden gemäß dem Ansatz

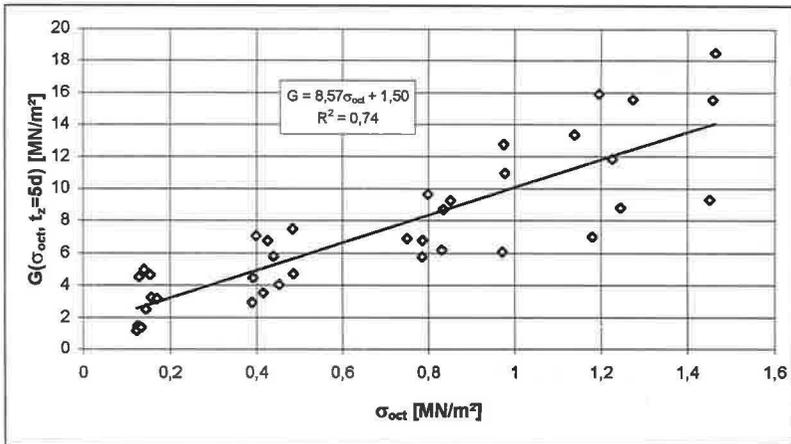
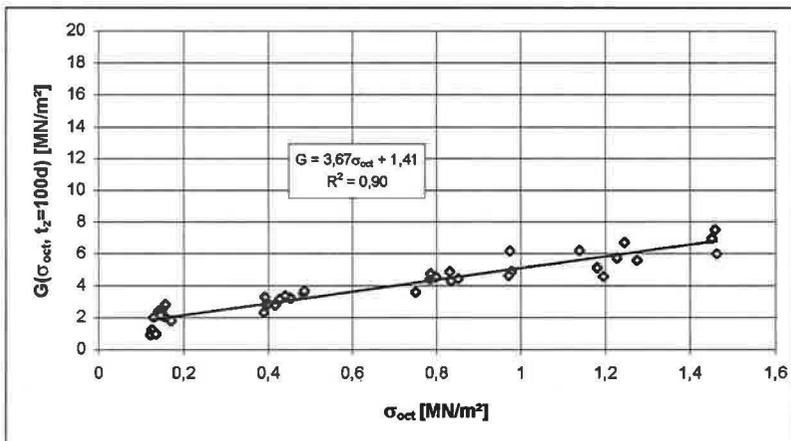
$$G(\sigma_{\text{oct}}, t_z) = G_0(t_z) + \alpha_G(t_z) \cdot \sigma_{\text{oct}}$$

eingetragen.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse hierzu zusammengefaßt:

t_z	G_0	α_G	r^2
[d]	[MN/m ²]	[-]	[-]
5	1,50	8,57	0,74
100	1,41	3,67	0,90
1000	1,20	2,67	0,83

Tab. 6.4: Ermittelte Stoffparameter für den spannungsabhängigen G-Modul

Abb. 6.13a: Spannungsabhängiger G-Modul ($t_z = 5$ d)Abb. 6.13b: Spannungsabhängiger G-Modul ($t_z = 100$ d)

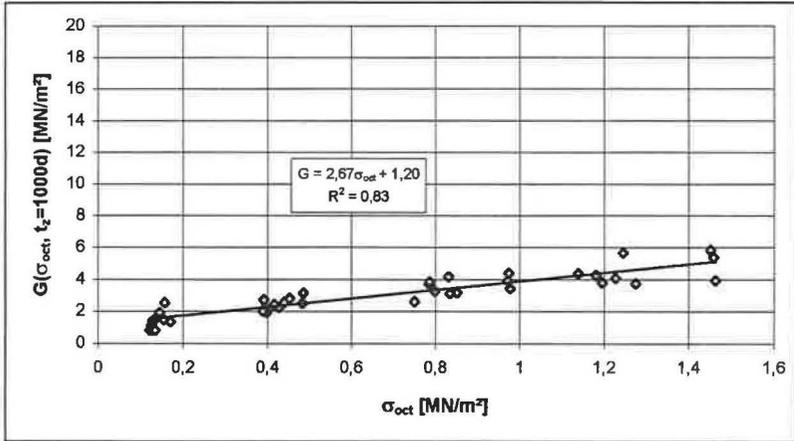


Abb. 6.13c: Spannungsabhängiger G-Modul ($t_z = 1000$ d)

6.6 Dilatanzverhalten unter Schubbeanspruchung

Wie bereits unter Abschnitt 4.2 erläutert, können Dilatanzerscheinungen insbesondere bei „körnigen Massen“ infolge einer deviatorischen Belastung auftreten.

Zur Untersuchung eines etwaigen Dilatanzverhaltens der untersuchten Asphaltbetonmischungen können die in den Versuchen gefahrenen Laststufen herangezogen werden, in denen bei nahezu konstanter Oktaederspannung σ_{oct} die Schubspannung τ_{oct} sich erhöht.

Die entsprechenden Versuchsauswertungen zeigen, daß nahezu bei allen Versuchsstufen ein von der Schubspannung abhängiges Volumenverhalten zu beobachten ist. Bei niedrigem Spannungsniveau bewirkt eine Deviatorbela-

stung bei gleichbleibendem σ_{oct} eine Volumenverminderung. Mit steigendem Spannungsniveau reduziert sich die Volumenverminderung stetig bis sie sich in eine Volumenzunahme umkehrt. Desweiteren ist festzuhalten, daß dieses Volumenverhalten generell bei allen untersuchten Asphaltbetonmischungen und Versuchstemperaturen auftreten kann. Die zeitliche Entwicklung der Oktaederverzerrung ε_{oct} erfolgt im wesentlichen proportional zu der gleichzeitig stattfindenden Schubverzerrung τ_{oct} .

Analog zu den Untersuchungen zum Schubmodul zeigt sich auch beim Volumenverhalten, daß ab entsprechenden Betrachtungszeiträumen t_z die Versuchsparameter Bindemittelgehalt und Temperatur einen relativ geringen Einfluß auf die erreichten Verzerrungszustände haben. Wie die statistische Auswertung ergibt, ist deren Einfluß geringer als die Versuchsstreuungen bei Versuchen mit gleichen Randbedingungen.

Analog zum Kompressionsmodul K wird im folgenden ein Dilatanzmodul K_τ definiert:

$$3 \cdot K_\tau = \frac{d\tau_{\text{oct}}}{d\varepsilon_{\text{oct}}}$$

Ebenso wie die zuvor definierten Moduln K und G ist der Dilatanzmodul als Tangentenmodul definiert. Wie bei den Auswertungen zu den vorherigen Moduln wird für jede Laststufe j der zeitliche Verlauf von $\varepsilon_{\text{oct},j}$ abschnittsweise durch die unter Abschnitt 6.2 beschriebene charakteristische Funktion $f_{c,j}(t_i)$ ersetzt. Nach Vorgabe eines Betrachtungszeitraumes t_z läßt sich somit für jede Laststufe j eine zugeordnete Oktaederverzerrung $\varepsilon_{\text{oct},j}(t_z)$ zuordnen. Man erhält so einen von t_z und dem Spannungsniveau abhängigen Dilatanzmodul. Da bei niedrigem Spannungsniveau eine Volumenverminderung bei hohem Spannungsniveau dagegen eine Volumenzunahme auftritt, ist K_τ vorzeichenbehaftet. Der besseren Darstellung wegen wird im folgenden der Kehrwert χ von K_τ untersucht:

$$\chi = \frac{1}{K_\tau}$$

Wie die Auswertungen zeigen, ist χ im wesentlichen von der Oktaederspannung σ_{oct} abhängig. In den nachfolgenden Abbildungen 6.14a und b sind die ermittelten χ - Werte in Abhängigkeit von $1/\sigma_{\text{oct}}$ jeweils für die beiden Betrachtungszeiträume $t_z = 5$ d und $t_z = 100$ d dargestellt.

Auffallend sind die relativ großen Versuchsstreuungen für niedrige Oktaederspannungen. Der Grund hierfür liegt allem Anschein nach - wie bei dem Kompressionsmodul K - im großen Einfluß des Anfangsluftporengehaltes auf das Volumenverhalten (vgl. Abschnitt 6.4).

In der Regel kann bei allen Asphaltbetonmischungen ab einer Oktaederspannung von rd. $0,25 \text{ MN/m}^2$ mit Volumenzunahme infolge Dilatanzbelastung gerechnet werden. Für hohe Oktaederspannungen ergeben sich für $t_z = 5$ d ein unterer Grenzwert für χ von ca. $0,25 \text{ m}^2/\text{MN}$ und für $t_z = 100$ d ein entsprechender Wert von ca. $0,45 \text{ m}^2/\text{MN}$.

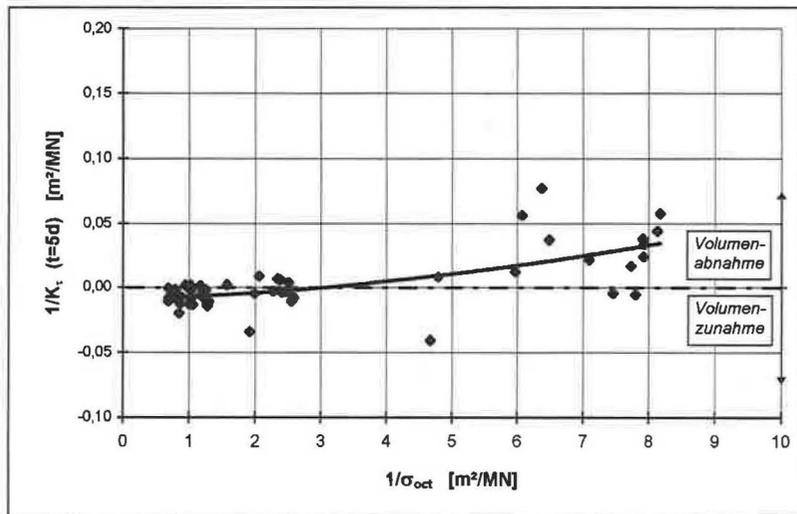


Abb. 6.14 a: Aus den Versuchen ermittelte spannungsabhängige Dilatanzmoduln (Betrachtungszeitraum $t_z = 5$ d)

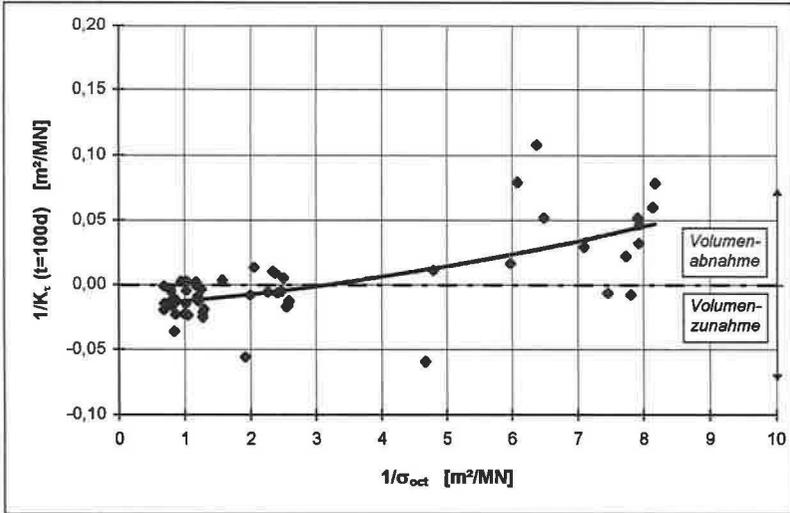


Abb. 6.14 b: Aus den Versuchen ermittelte spannungsabhängige Dilatanzmoduln (Betrachtungszeitraum $t_z = 100 \text{ d}$)

7 Vorgeschlagenes Stoffmodell für Asphaltbeton von Kerndichtungen

7.1 Vereinfachtes Modell ohne Berücksichtigung des Dilatanzverhaltens

Vereinbarungsgemäß werden der Schub- und der Kompressionsmodul wie folgt definiert:

$$G = \frac{\partial \tau_{\text{oct}}}{\partial \gamma_{\text{oct}}}$$

$$3K = \frac{\partial \sigma_{\text{oct}}}{\partial \varepsilon_{\text{oct}}}$$

Für den Schubmodul wird bereits o.g. linearer Ansatz gewählt: $G = G_0 + \alpha_G \cdot \sigma_{\text{oct}}$

Für den ebenen Verzerrungszustand gilt:

$$\varepsilon_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)$$

$$\gamma_{\text{oct}} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_3^2 - \varepsilon_1 \varepsilon_3}$$

$$\varepsilon_{1,3} = \frac{3\varepsilon_{\text{oct}} \pm \sqrt{\frac{3}{2} \gamma_{\text{oct}}^2 - 3\varepsilon_{\text{oct}}^2}}{2}$$

Zunächst wird nachstehender Sonderfall untersucht:

$$\sigma_1 = \sigma_3$$

$$\sigma_2 = \alpha \cdot \sigma_1$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_3$$

$$\varepsilon_2 = 0$$

Hieraus ergeben sich folgende Oktaederspannungen und -verzerrungen:

$$\sigma_{\text{oct}} = \frac{2+\alpha}{3} \cdot \sigma_1$$

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot (1-\alpha) \cdot \sigma_1$$

$$\tau_{\text{oct}} = \sqrt{2} \cdot \frac{1-\alpha}{2+\alpha} \cdot \sigma_{\text{oct}}$$

$$\varepsilon_{\text{oct}} = \frac{2}{3} \cdot \varepsilon_1$$

$$\gamma_{\text{oct}} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot \varepsilon_1$$

$$\gamma_{\text{oct}} = \sqrt{2} \cdot \varepsilon_{\text{oct}}$$

Der Verhältniswert α wird als eine von σ_{oct} abhängige Größe angenommen. Desweiteren wird eine Hilfsfunktion $h(\sigma_{\text{oct}})$, die wie folgt definiert wird, eingeführt:

$$h(\sigma_{\text{oct}}) = \frac{1-\alpha}{2+\alpha},$$

hieraus ergibt sich nach α aufgelöst:

$$\alpha = \frac{1-2h}{1+h}$$

Für den o.g. Sonderfall folgen unter Anwendung der Definitionen für den Kompressions- und den Schubmodul nachstehende Beziehungen:

$$\tau_{\text{oct}} = \sqrt{2} \cdot h \cdot \sigma_{\text{oct}}$$

$$\frac{d\tau_{\text{oct}}}{d\sigma_{\text{oct}}} = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{dh}{d\sigma_{\text{oct}}} \cdot \sigma_{\text{oct}} + h \right)$$

$$\frac{1}{G} \frac{d\gamma_{\text{oct}}}{d\tau_{\text{oct}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot d\varepsilon_{\text{oct}}}{\sqrt{2} \cdot d\sigma_{\text{oct}} \cdot \left(\frac{dh}{d\sigma_{\text{oct}}} \cdot \sigma_{\text{oct}} + h \right)}$$

$$\frac{1}{G} \cdot (h \cdot d\sigma_{\text{oct}} + \sigma_{\text{oct}} \cdot dh) = d\varepsilon_{\text{oct}}$$

$$\frac{1}{3K} \cdot d\sigma_{\text{oct}} = d\varepsilon_{\text{oct}}$$

Unter Anwendung der Hilfsfunktion $h(\sigma_{\text{oct}})$ ergibt sich somit:

$$\frac{G}{3K} = h + \sigma_{\text{oct}} \cdot \frac{dh}{d\sigma_{\text{oct}}}$$

Die allgemeine Lösung dieser Differentialgleichung lautet:

$$h = \frac{1}{\sigma_{\text{oct}}} \cdot \left(\int \frac{G}{3K} d\sigma_{\text{oct}} + C \right)$$

Für die Hilfsfunktion h wird auf der Grundlage der vorliegenden Versuchsergebnisse folgender Ansatz gewählt:

$$h = c + \frac{a}{1 + b \cdot \sigma_{\text{oct}}}$$

Es ist anzumerken, daß die Funktion h ist in diesem Zusammenhang nur auf den ebenen Verzerrungszustand anwendbar ist. Die Ableitung nach σ_{oct} lautet:

$$\frac{dh}{d\sigma_{\text{oct}}} = - \frac{a \cdot b}{(1 + b\sigma_{\text{oct}})^2}$$

Hieraus ergibt sich:

$$K = \frac{G}{3 \cdot (h + \sigma_{\text{oct}} \cdot \frac{dh}{d\sigma_{\text{oct}}})} = \frac{G}{3 \cdot \left(c + \frac{a}{(1 + b\sigma_{\text{oct}})^2} \right)}$$

Aus der Randbedingung $K(\sigma_{\text{oct}}=0) = K_0$ folgt:

$$K(\sigma_{\text{oct}} = 0) = K_0 = \frac{G_0}{3 \cdot (a + c)}$$

Die Grenzwertbetrachtung für $\sigma_{\text{oct}} \rightarrow \infty$ liefert folgenden Wert für die 1. Ableitung der Funktion $K(\sigma_{\text{oct}})$:

$$\lim_{\sigma_{\text{oct}} \rightarrow \infty} \frac{dK}{d\sigma_{\text{oct}}} = \frac{\alpha_G}{3c}$$

Es wird aufgrund der unter Pkt. 6.4.1 gemachten Ausführungen angenommen, daß dieser Grenzwert für $\sigma_{\text{oct}} \rightarrow \infty$ mit dem zuvor definierten Parameter α_K identisch ist:

$$\alpha_K = \lim_{\sigma_{\text{oct}} \rightarrow \infty} \frac{dK}{d\sigma_{\text{oct}}} = \frac{\alpha_G}{3c}$$

Aus den genannten Bedingungen folgt:

$$K = \frac{G_0 + \alpha_G \cdot \sigma_{\text{oct}}}{\frac{\alpha_G}{\alpha_K} + \left(\frac{G_0}{K_0} - \frac{\alpha_G}{\alpha_K} \right) \cdot \frac{1}{(1 + b \cdot \sigma_{\text{oct}})^2}}$$

und

$$h = \frac{\frac{\alpha_G}{\alpha_K} \cdot b \cdot \sigma_{\text{oct}} + \frac{G_0}{K_0}}{3 \cdot (1 + b \cdot \sigma_{\text{oct}})}$$

bzw.

$$\alpha_{\text{oct}} = 1 - 2h$$

Für den Sonderfall, daß die Moduln K und G konstant, d. h. spannungsunabhängig seien, gilt:

$$K = K_0$$

$$\alpha_K = 0$$

$$G = G_0$$

$$\alpha_G = 0$$

Hieraus folgt $b = 0$, da h unabhängig von σ_{oct} ist, und es gilt:

$$h = \frac{G_0}{3K_0}$$

$$\alpha = \frac{1 - 2h}{1 + h} = \frac{3K_0 - 2G_0}{3K_0 + G_0} = \frac{2 \cdot \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_3}$$

$$\sigma_1 + \sigma_3 = 2 \cdot \sigma_2 \cdot \frac{3K_0 + G_0}{3K_0 - 2G_0}$$

$$\varepsilon_{\text{oct}} = \frac{1}{3K_0} \cdot \sigma_{\text{oct}}$$

$$\sigma_2 = (3K_0 - 2G_0) \cdot \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{3}$$

Die sich hieraus ergebenden Beziehungen für den Sonderfall konstanten Moduln K und G entsprechen genau denen für rein elastisches Stoffverhalten mit spannungsunabhängigen Kompressions- und Schubmodul G_0 und K_0 .

7.2 Erweitertes Modell, das das Dilatanzverhalten berücksichtigt

Wie die Versuchsauswertungen ergeben haben, zeigt der Asphaltbeton bei den untersuchten Belastungspfaden ein von der Schubspannung abhängiges

Volumenverhalten. Analog zum Kompressionsmodul wurde deshalb im vorangegangenen Kapitel ein Dilatanzmodul K_v definiert.

Folgender empirischer Ansatz für den Kehrwert χ des Dilatanzmoduls wird vorgeschlagen:

$$\frac{1}{K_v} = \chi = f_{\chi,1} - f_{\chi,2} = c_1 \cdot e^{-\left(\frac{\sigma_{\text{oct}}}{k_1}\right)^n} - c_2 \cdot e^{-\left(\frac{\sigma_{\text{oct}}}{k_2}\right)^m} \quad \text{mit } n, m > 0$$

Die gewählte Funktion für χ setzt sich aus den zwei Teilfunktionen $f_{\chi,1}(\sigma_{\text{oct}})$ und $f_{\chi,2}(\sigma_{\text{oct}})$ zusammen. Es wird dabei von der Vorstellung ausgegangen, daß infolge einer Schubbelastung im Asphaltbeton sowohl eine Verdichtung (Volumenverkleinerung) als auch eine Dilatanz (Volumenvergrößerung) erfolgen kann. Beide entgegengesetzt wirkende Verformungsmechanismen geschehen durch Umlagerungen innerhalb des Korngerüsts. Die Funktion $f_{\chi,1}(\sigma_{\text{oct}})$ beschreibt bei diesem Ansatz die Verdichtung und die Funktion $f_{\chi,2}(\sigma_{\text{oct}})$ die Volumenvergrößerung infolge einer Schubbeanspruchung. Die Funktion χ wird aus der Differenz beider Funktionen gebildet und im folgenden als Dilatanzfunktion bezeichnet. Positive Werte für χ stehen für eine Volumenverringerng, negative Werte für eine Volumenvergrößerung

Die Ermittlung der Stoffparameter für χ erfolgt in der Regel auf graphischem Weg. Da die Parameter sehr stark vom Luftporengehalt abhängen und dieser erfahrungsgemäß einer gewissen Streuung unterliegt, sollten im Rahmen einer Spannungs-Verzerrungs-Analyse die Stoffparameter variiert werden.

Für den bereits zuvor untersuchten Sonderfall mit

$$\sigma_1 = \sigma_3, \quad \sigma_2 = \alpha \cdot \sigma_1, \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_3, \quad \varepsilon_2 = 0$$

ergeben sich analog zu den unter Punkt 6.1 beschriebenen Beziehungen folgende Zusammenhänge:

$$d\varepsilon_{\text{oct}} = \frac{1}{G} \cdot (h \cdot d\sigma_{\text{oct}} + \sigma_{\text{oct}} \cdot dh)$$

$$d\varepsilon_{\text{oct},\sigma} = \frac{1}{3K} \cdot d\sigma_{\text{oct}}$$

$$d\varepsilon_{\text{oct},\tau} = \frac{1}{3} \cdot \chi \cdot d\tau_{\text{oct}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \chi \cdot (h \cdot d\sigma_{\text{oct}} + \sigma_{\text{oct}} \cdot dh)$$

$$d\varepsilon_{\text{oct}} = d\varepsilon_{\text{oct},\sigma} + d\varepsilon_{\text{oct},\tau}$$

Hieraus folgt:

$$\frac{1}{K} = \left(\frac{3}{G} - \sqrt{2} \cdot \chi \right) \cdot \left(\frac{dh}{d\sigma_{\text{oct}}} \cdot \sigma_{\text{oct}} + h \right)$$

Aus der Randbedingung $K(\sigma_{\text{oct}}=0) = K_0$ folgt:

$$\frac{1}{K_0} = \left[\frac{3}{G_0} - \sqrt{2} \cdot (c_1 - c_2) \right] \cdot (a + c)$$

Aus der Grenzwertbetrachtung für $\sigma_{\text{oct}} \rightarrow \infty$ ergibt sich, daß der Kompressionsmodul eine Asymptote mit der Steigung

$$\lim_{\sigma_{\text{oct}} \rightarrow \infty} \frac{K(\sigma_{\text{oct}})}{\sigma_{\text{oct}}} = \frac{\alpha_G}{3c}$$

besitzt. Dieser Wert wird analog zu den vorherigen Ausführungen dem Parameter α_K gleichgesetzt:

$$\alpha_K = \frac{\alpha_G}{3c}$$

Aus diesen Randbedingungen folgt:

$$K = \frac{G}{\left(1 - \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot G \cdot \chi\right) \cdot \left[\frac{\alpha_G}{\alpha_K} + \frac{G_0}{K_0 \cdot \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot (c_1 - c_2) \cdot G_0\right]} \cdot \frac{\alpha_G}{\alpha_K} \cdot \frac{1}{(1 + b \cdot \sigma_{\text{oct}})^2} \right]}$$

$$G = G_0 + \alpha_G \cdot \sigma_{\text{oct}}$$

$$h = \frac{\alpha_G}{3 \cdot \alpha_K} + \frac{1}{1 + b \cdot \sigma_{\text{oct}}} \cdot \left[\frac{G_0}{K_0 \cdot \left[3 - \sqrt{2} \cdot (c_1 - c_2) \cdot G_0\right]} \cdot \frac{\alpha_G}{3 \cdot \alpha_K} \right]$$

Mittels der abgeleiteten Beziehungen lassen sich für vorgegebene Spannungspfade eindeutig die Verzerrungen (ε_{oct} , γ_{oct} , ε_1 und ε_3) auf numerischem Weg bestimmen.

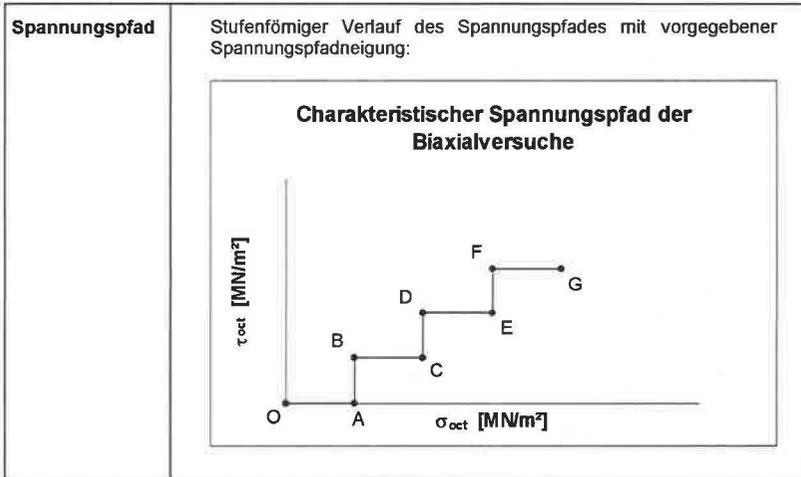
8 Anwendung des vorgeschlagenen Stoffmodells

8.1 Bestimmung der Stoffparameter aus den Biaxialversuchen

Auf der Grundlage der zuvor erarbeiteten Ergebnisse wird im folgenden die Vorgehensweise zur Bestimmung der Stoffparameter aus den Biaxialversuchen zusammenfassend dargestellt. In der Tabelle 8.1 findet sich hierzu eine entsprechende Darstellung zur geeigneten Wahl der Versuchsparameter und Randbedingungen.

Temperatur	<p>In der Regel sollten die Versuchstemperaturen den zu erwartenden Temperaturverhältnissen im Damm entsprechen. Im Zuge der Optimierung von Mischgutzusammensetzungen oder von Voruntersuchungen können zur Verkürzung der sonst sehr langen Versuchszeiten auch höhere Temperaturen gewählt werden. Sie üben bezüglich der Verzerrungsverläufe einen „Zeitraffer-Effekt“ aus. Näherungsweise wurde hierzu folgender Ansatz gewählt:</p> $\gamma_{\text{oct}, T=T_2, t=t_0} = \gamma_{\text{oct}, T} = T_1(t=t_0 \cdot 10^{\beta(T_2-T_1)}), \text{ wobei } \beta=0,05 \dots 0,5$
Mischgutzusammensetzung	<p>Die Versuche haben gezeigt, daß bei langen Versuchszeiten das Spannungs- und Verzerrungsverhalten im wesentlichen durch das Korngerüst geprägt ist. Der Bindemittelgehalt hat - zumindest im untersuchten Bereich zwischen 4,9 Gew.-% und 6,6 Gew.-% - auf das Langzeitverhalten nicht den entscheidenden Einfluß. Er beeinflusst jedoch das Anfangsverhalten nach Lastaufbringung.</p>
Versuchszeiten	<p>Die Versuchszeiten pro Laststufe sollten in jedem Fall größer als t_c (charakteristischer Zeitpunkt) sein. Als Anhaltswert hierfür kann folgende empirische Beziehung angegeben werden:</p> $t_c \approx (0,5 \dots 5,0) \cdot 10^{\frac{10-T}{10}}; \text{ wobei } t_c [\text{d}] \text{ und } T [^\circ\text{C}] = 10 \dots 30 \text{ } ^\circ\text{C}.$

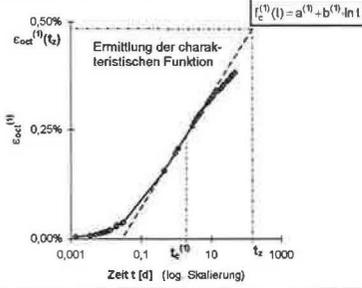
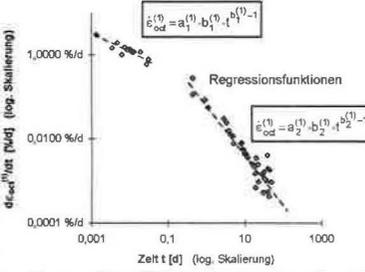
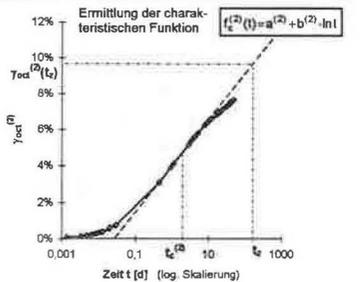
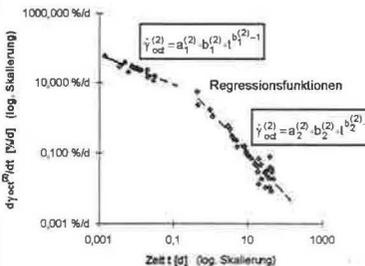
Tab. 8.1 a: Übersicht zu den Versuchsrandbedingungen



Tab. 8.1 b: Übersicht zu den Versuchsrandbedingungen

Die nachstehenden Ausführungen stellen die Grundlage zur Bestimmung der Stoffparameter aus den Versuchsauswertungen der durchgeführten Biaxialversuche dar. Die Tabelle 8.2 zeigt in tabellarischer Form die Durchführung der erforderlichen Versuchsanalysen. Die entsprechenden Regressionen und Extrapolationen sind jeweils für jede Laststufe eines Versuches durchzuführen. Darüber hinaus sind die Einflüsse der übrigen Versuchsrandbedingungen - wie Mischgutzusammensetzung, Spannungspfadneigung oder Temperatur - zu berücksichtigen.

Insbesondere ist der jeweils auf den Anwendungsfall ausgerichtete Betrachtungszeitraum t_z von grundlegender Bedeutung, da diesbezüglich für die zu ermittelnden Moduln eine sehr starke Abhängigkeit besteht. Eine Bestimmung der entsprechenden Grenzwerte für $\sigma_{oct} \rightarrow \infty$ ist nur durch sehr lange Versuchszeiten pro Laststufe erreichbar. Bei Versuchstemperaturen um $T = 10^\circ\text{C}$ sind hierzu Versuchszeiten von mindestens einer Woche pro Laststufe erforderlich.

<p>Laststufe (1): O → A mit: $\Delta\sigma_{oct} > 0$ $\Delta t_{oct} \approx 0$</p>	<p>Bei sehr langen Versuchszeiten ggf. Bestimmung des Grenzwertes $\lim_{t \rightarrow \infty} \epsilon_{oct}^{(1)}(t)$</p>
 <p>Ermittlung der charakteristischen Funktion</p> <p>$\epsilon_c^{(1)}(t) = a^{(1)} + b^{(1)} \cdot \ln t$</p>	 <p>Regressionsfunktionen</p> <p>$\epsilon_c^{(1)} = a_1^{(1)} + b_1^{(1)} \cdot \ln t$</p> <p>$\epsilon_c^{(1)} = a_2^{(1)} + b_2^{(1)} \cdot \ln t$</p>
<p>$\epsilon_{oct}^{(1)} = a^{(1)} + b^{(1)} \cdot \ln t_z$</p> <p>$K^{(1)}(\sigma_{oct}^{(1)}, t_z) = \frac{1}{3} \frac{\Delta\sigma_{oct}^{(1)}}{\Delta\epsilon_{oct}^{(1)}(t_z)}$</p>	<p>Regressionsanalyse liefert: $a_2^{(1)}, b_2^{(1)}$</p> <p>$c_2^{(1)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \epsilon_{oct}(t) = \epsilon_{oct}(t_c) - a_2^{(1)} \cdot t_c^{b_2^{(1)}}$</p> <p>$K^{(1)}(\sigma_{oct}^{(1)}, t_z \rightarrow \infty) = \frac{1}{3} \frac{\Delta\sigma_{oct}^{(1)}}{c_2^{(1)}}$</p>
<p>Laststufe (2): A → B mit: $\Delta\sigma_{oct} \approx 0$ $\Delta t_{oct} > 0$</p>	<p>Bei sehr langen Versuchszeiten ggf. Bestimmung des Grenzwertes $\lim_{t \rightarrow \infty} \gamma_{oct}^{(2)}(t)$</p>
 <p>Ermittlung der charakteristischen Funktion</p> <p>$t_c^{(2)}(t) = a^{(2)} + b^{(2)} \cdot \ln t$</p>	 <p>Regressionsfunktionen</p> <p>$\gamma_c^{(2)} = a_1^{(2)} + b_1^{(2)} \cdot \ln t$</p> <p>$\gamma_c^{(2)} = a_2^{(2)} + b_2^{(2)} \cdot \ln t$</p>
<p>$\gamma_{oct}^{(2)} = a^{(2)} + b^{(2)} \cdot \ln t_z$</p> <p>$G^{(2)}(\sigma_{oct}^{(2)}, t_z) = \frac{\Delta\tau_{oct}^{(2)}}{\Delta\gamma_{oct}^{(2)}(t_z)}$</p> <p>$K_t^{(2)}(\sigma_{oct}^{(2)}, t_z) = \frac{\Delta\tau_{oct}^{(2)}}{\Delta\sigma_{oct}^{(2)}(t_z)}$</p>	<p>$c_2^{(2)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \gamma_{oct}(t) = \gamma_{oct}(t_c) - a_2^{(2)} \cdot t_c^{b_2^{(2)}}$</p> <p>$G^{(2)}(\sigma_{oct}^{(2)}, t_z \rightarrow \infty) = \frac{\Delta\tau_{oct}^{(2)}}{c_2^{(2)}}$</p>
<p>Laststufe (3): B → C</p>	<p>analog zur Laststufe (1)</p>
<p>Laststufe (4): C → D</p>	<p>analog zur Laststufe (2)</p>
<p>Laststufe (...)</p>	<p>analog zu den vorherigen Laststufen</p>

Tab. 8.2: Tabellarische Darstellung zur Versuchsauswertung

Aus den zuvor beschriebenen Versuchsauswertungen resultieren also für jede Versuchsstufe die als Tangentenmoduln definierten jeweils vom Spannungszustand (σ_{oct} und τ_{oct}) und dem Betrachtungszeitraum t_z abhängigen Größen K , G und $\chi = 1/K_z$. Aus den so ermittelten „Datenblättern“ für die Moduln, die in der nachfolgenden Abbildung schematisch dargestellt sind, lassen sich mittels Regressionsanalyse die gesuchten Parameter für das vorgeschlagene Stoffmodell bestimmen.

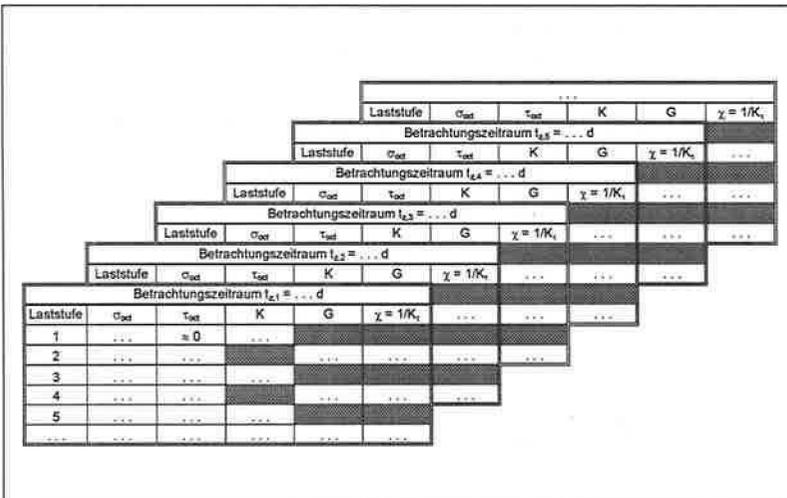
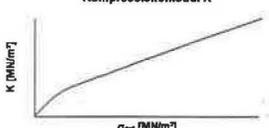
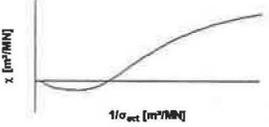


Abb. 8.1: Schematisierte Darstellung der „Datenblätter“ zu den Moduln

Die insgesamt 9 zu bestimmenden Stoffparameter sind in Tabelle 8.3 zusammengestellt. Desweiteren zeigt die nachfolgende Übersicht beispielhaft die Verläufe der von der Oktaederspannung σ_{oct} abhängigen Moduln G , K und χ einschließlich der aus den Versuchsergebnissen abgeleiteten Formeln.

Übersicht der zu bestimmenden Stoffparameter		
G_0	MN/m ²	Anfangsschubmodul
K_0	MN/m ²	Anfangskompressionsmodul
α_G	-	Schubmodulzunahme infolge Erhöhung von σ_{oct}
α_K	-	$\lim_{\sigma_{oct} \rightarrow \infty} \frac{dK}{d\sigma_{oct}}$, Kompressionsmodulzunahme infolge σ_{oct}
b	m ² /MN	Einflußparameter für K und χ mit: $b \geq 0$. Sonderfall: K und G spannungsunabhängig: $b = 0$.
c_1, c_2 k_1, k_2 m, n	m ² /MN MN/m ² -	Stoffparameter zur Beschreibung des Dilatanzverhaltens mit: c_1, c_2, k_1 und $k_2 \geq 0$. In erster Näherung: $n = m = 2$.
Formeln und Verläufe der Tangentenmodulin G, K und χ		
<p>spannungsabhängiger Schubmodul G</p> 	$G = G_0 + \alpha_G \cdot \sigma_{oct}$	
<p>spannungsabhängiger Kompressionsmodul K</p> 	$K = \frac{G_0 + \alpha_G \cdot \sigma_{oct}}{\left(1 - \frac{\sqrt{2}}{3} (G_0 + \alpha_G \cdot \sigma_{oct}) \chi\right) \frac{\alpha_G}{\alpha_K} + \left[\frac{G_0}{K_0 \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{3} (c_1 - c_2) G_0\right)} \frac{\alpha_G}{\alpha_K} \right] \frac{1}{(1 + b \sigma_{oct})^2}}$	
<p>spannungsabhängige Dilatanzfunktion χ</p> 	$\frac{1}{K_T} = \chi = f_{\chi,1} - f_{\chi,2} = c_1 \cdot e^{-\left(\frac{\sigma_{oct}}{k_1}\right)^n} - c_2 \cdot e^{-\left(\frac{\sigma_{oct}}{k_2}\right)^n}$	

Tab. 8.3: Zusammenfassende Darstellung zum Stoffmodell

8.2 Anwendungsbeispiel

Auf der Grundlage der Versuchsergebnisse werden für den gewählten Betrachtungszeitraum $t_z = 100$ d folgende Stoffparameter für den spannungsabhängigen Schubmodul $G(\sigma_{\text{act}})$ angenommen:

$$G_0 = 1,38 \quad [\text{MN/m}^2]$$

$$\alpha_G = 3,76 \quad [-]$$

In Anlehnung an die Versuchsauswertung, die in Abb. 6.11 dargestellt ist, werden für $t_z = 100$ d zunächst nachstehende Parameter gewählt:

$$\alpha_K = 150 \quad [-]$$

$$K_0 = 4,0 \quad [\text{MN/m}^2]$$

$$b = 10 \quad [\text{m}^2/\text{MN}]$$

Für die Dilatanzfunktion χ werden folgende Werte angesetzt:

$$c_1 = 0,3 \quad [\text{m}^2/\text{MN}] \qquad c_2 = 0,03 \quad [\text{m}^2/\text{MN}]$$

$$k_1 = 0,2 \quad [\text{MN/m}^2] \qquad k_2 = 2,0 \quad [\text{MN/m}^2]$$

$$n = 2 \quad [-] \qquad m = 2 \quad [-]$$

In den folgenden Abbildungen 8.2 bis 8.5 sind die funktionalen Zusammenhänge für die Moduln G und K , die Dilatanzfunktion χ und für die Spannungsverhältniswerte α und h dargestellt.

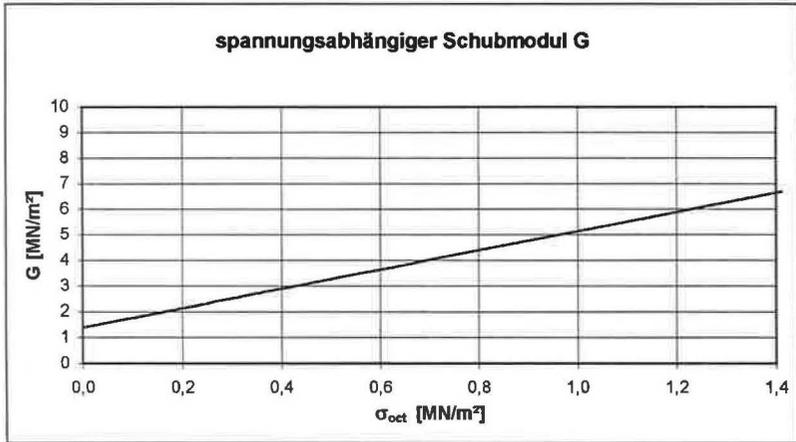


Abb. 8.2: Schubmodul $G(\sigma_{oct})$

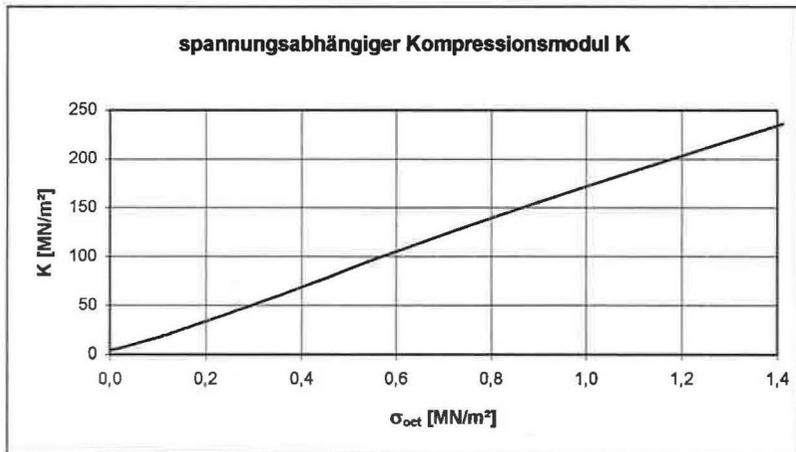


Abb. 8.3: Kompressionsmodul $K(\sigma_{oct})$

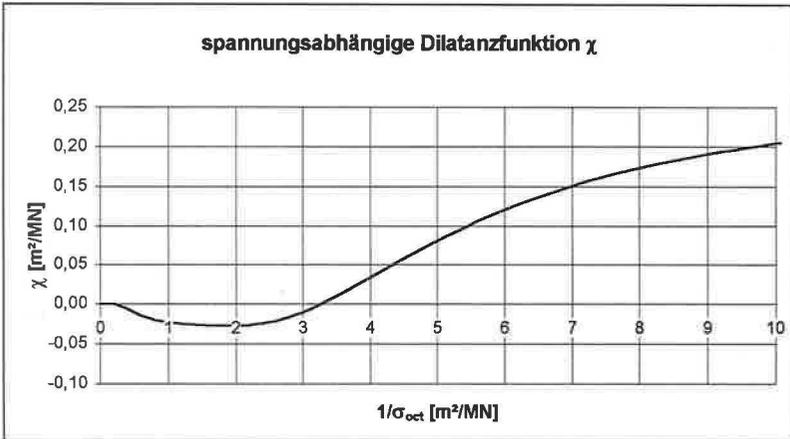


Abb. 8.4: Dilatanzfunktion $\chi(\sigma_{oct})$

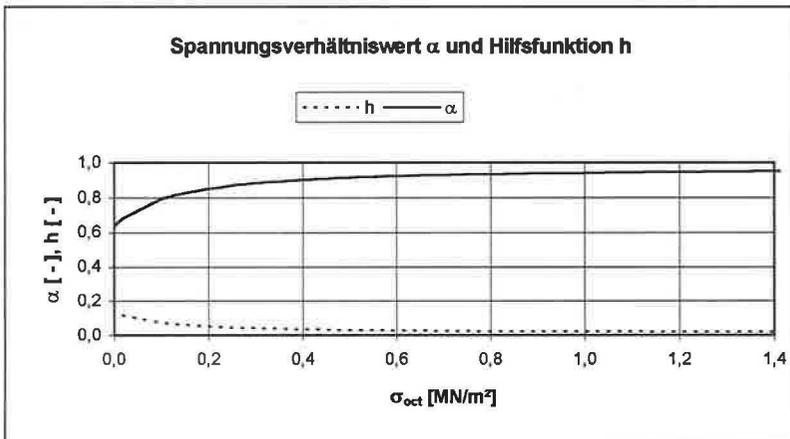


Abb. 8.5: Spannungsverhältniswert $\alpha(\sigma_{oct})$ und Hilfsfunktion $h(\sigma_{oct})$

8.3 Simulation charakteristischer Spannungspfade (ebener Verzerrungszustand)

8.3.1 Sonderfall $\sigma_1 = \sigma_3$

Für den Sonderfall des Spannungspfad mit $\sigma_1 = \sigma_3$ sind für die o.g. Stoffparameter die Ergebnisse der numerischen Berechnungen in der nachfolgenden Abbildung 8.6 graphisch dargestellt. Die unter Punkt 7.1 abgeleiteten Beziehungen zwischen den Oktaederspannungen und -verzerrungen für diesen Sonderfall bestätigen sich.

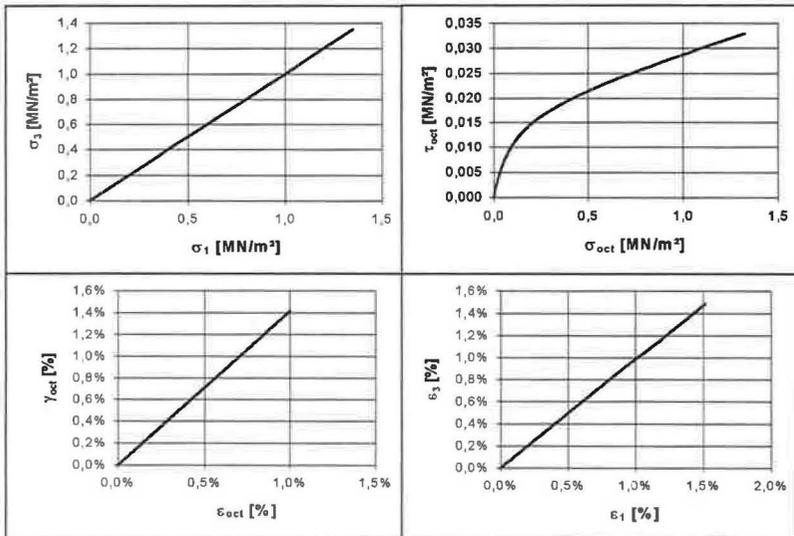


Abb. 8.6: Simulation für den Sonderfall $\sigma_1 = \sigma_3$

8.3.2 Einfluß des Spannungspades

Die nachfolgenden Abbildungen 8.7a bis 8.7c zeigen die Ergebnisse der numerischen Berechnungen für unterschiedliche Spannungspfade. Der Spannungszustand ist jedoch in allen Fällen der gleiche:

$$\sigma_{\text{oct,E}} = 0,63 \text{ MN/m}^2 ,$$

$$\tau_{\text{oct,E}} = 0,40 \text{ MN/m}^2 .$$

Es zeigt sich anhand dieses Beispiels, daß nicht nur der Spannungszustand sondern auch der Spannungspfad wesentlich die Entwicklung der Verzerrungen beeinflusst.

Im Fall A (Abb. 8.7a) wird auf dem Weg zum Spannungszustand zunächst eine annähernd hydrostatische Belastung (geringe Werte für τ_{oct}) aufgebracht. Erst nach Erreichen eines hohen Spannungsniveaus wird dann eine Schubbelastung erzeugt. Der Spannungspfad des Falls C (Abb. 8.7c) weist dagegen ein nahezu konstantes $\tau_{\text{oct}}/\sigma_{\text{oct}}$ - Verhältnis auf. Im Fall B (Abb. 8.7b) liegt der Spannungspfad zwischen den beiden genannten.

In der Tabelle 8.4 sind für die drei beschriebenen Fälle die Oktaedergrößen für die Belastungszustände zusammengestellt, um den Einfluß des Spannungspades zu verdeutlichen.

	$\sigma_{\text{oct,E}}$ [MN/m ²]	$\tau_{\text{oct,E}}$ [MN/m ²]	$\epsilon_{\text{oct,E}}$ [%]	$\gamma_{\text{oct,E}}$ [%]	$\epsilon_{1,E}$ [%]	$\epsilon_{3,E}$ [%]
Fall A	0,63	0,40	0,53	11,26	7,67	-0,61
Fall B	0,63	0,40	1,21	15,21	11,07	-7,44
Fall C	0,63	0,40	1,53	17,00	12,62	-8,03

Tab. 8.4: Gegenüberstellung der Ergebnisse für den Endzustand

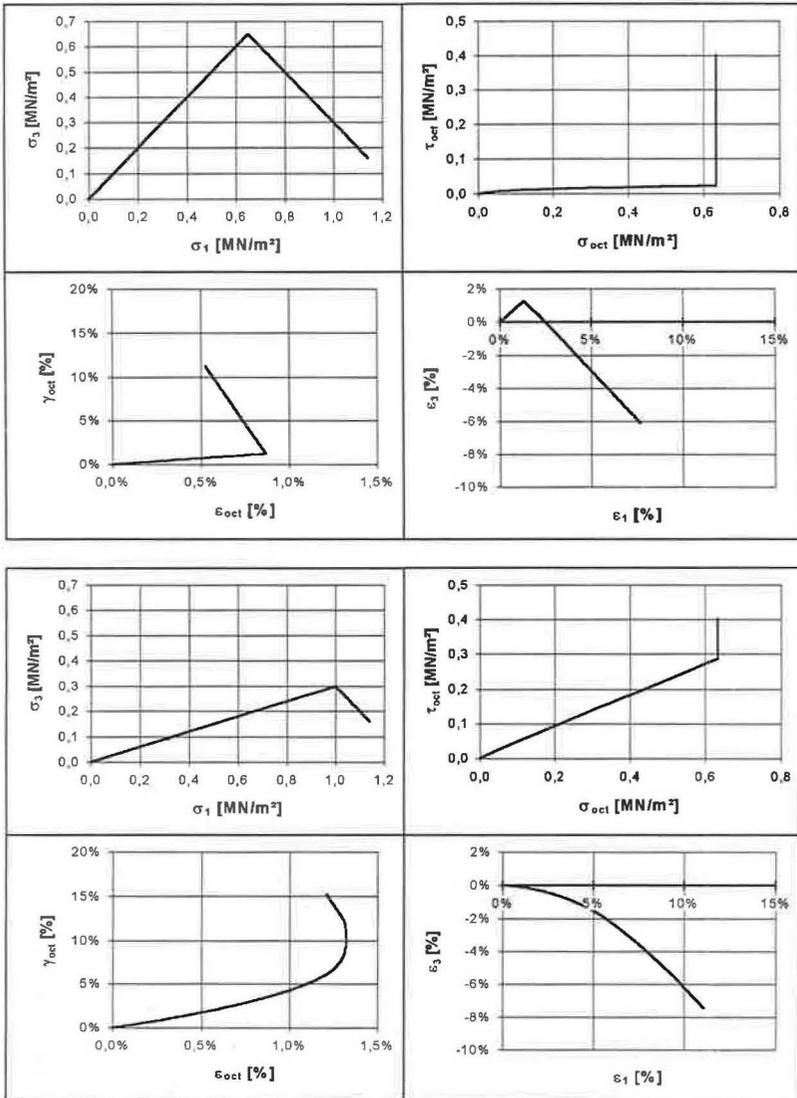


Abb. 8.7 a, b: Ergebnisse für den Fall A (oben) und für den Fall B (unten)

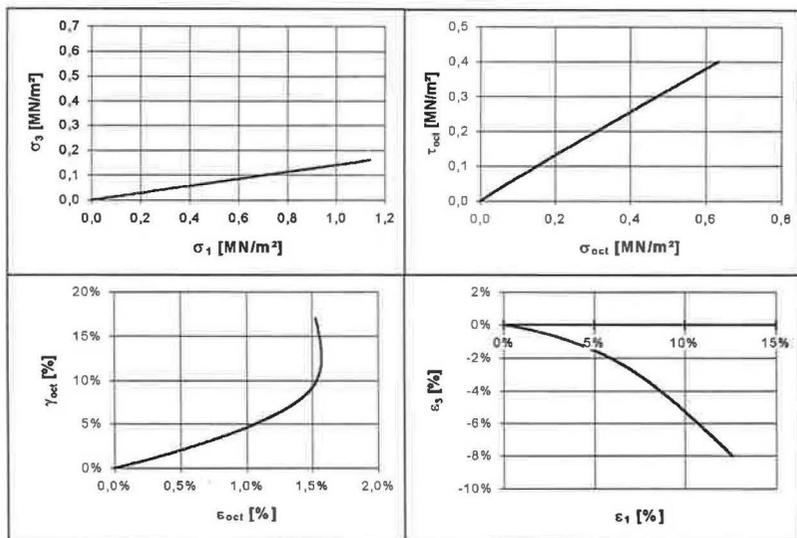


Abb. 8.7c: Ergebnisse für den Fall C

8.3.3 Simulation des Dilatanzverhaltens

Aus den vorangegangenen Beispielen wird auch deutlich, daß das vorgeschlagene Stoffmodell in der Lage ist, Dilatanzverhalten wirklichkeitsnah zu beschreiben. Nach anfänglicher Volumenreduzierung findet gegen Ende der Belastung eine vom Spannungspfad abhängige, mehr oder weniger ausgeprägte Volumenzunahme statt.

Die folgende Abb. 8.8 zeigt exemplarisch die Ergebnisse für den Fall eines ausgeprägteren Dilatanzverhaltens im Vergleich zu den vorangegangenen Fällen. Hierzu wurde der Stoffparameter c_2 für die Dilatanzfunktion χ von 0,03 m²/MN auf 0,1 m²/MN erhöht. Dieser Parameter ist ein Maß für die Dilatanzempfindlichkeit des Materials. Die übrigen Stoffparameter wurden unver-

ändert übernommen. Der Spannungspfad entspricht dem zuvor untersuchten Fall B (Abb. 8.7b).

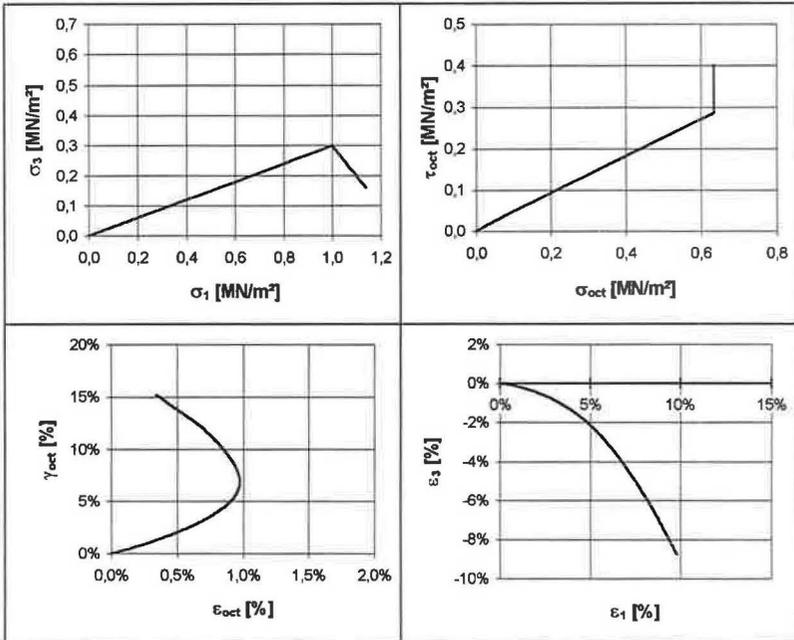


Abb. 8.8: Beispiel zur Simulation eines ausgeprägten Dilatanzverhaltens

8.4 Die Übertragung der Ergebnisse auf Triaxialversuche

Da Versuchsgeräte, die mit den hier verwendeten Biaxialgeräten vergleichbar sind, anderen Laboratorien in der Regel nicht zur Verfügung stehen, spielt die Frage, inwieweit die zuvor dargelegten Ergebnisse auf Triaxialversuche übertragbar sind, eine wichtige Rolle. Für den Triaxialversuch gelten nachfolgende Beziehungen für die Oktaedergrößen:

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= \sigma_3 & \varepsilon_2 &= \varepsilon_3 \\ \sigma_{\text{oct}} &= \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + 2\sigma_3) & \varepsilon_{\text{oct}} &= \frac{1}{3} \cdot (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_3) \\ \tau_{\text{oct}} &= \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) & \gamma_{\text{oct}} &= \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \\ \sigma_1 &= \sigma_{\text{oct}} + \sqrt{2} \cdot \tau_{\text{oct}} & \varepsilon_1 &= \varepsilon_{\text{oct}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \gamma_{\text{oct}} \\ \sigma_3 &= \sigma_{\text{oct}} - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \tau_{\text{oct}} & \varepsilon_3 &= \varepsilon_{\text{oct}} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \gamma_{\text{oct}} \end{aligned}$$

Das auf der Grundlage der Biaxialversuche abgeleitete Stoffmodell kann prinzipiell auch auf die Versuchsergebnisse von Triaxialversuche angewendet werden. Hierzu sollte der Spannungspfad im $\sigma_{\text{oct}} - \tau_{\text{oct}}$ -Diagramm - wie in Abbildung 8.1b dargestellt - einen stufenförmigen Verlauf aufweisen. Die daraus resultierenden Spannungsverläufe sind in der nachfolgenden Abbildung 8.9 in den entsprechenden $\sigma_1 - \sigma_3$ -Diagrammen dargestellt.

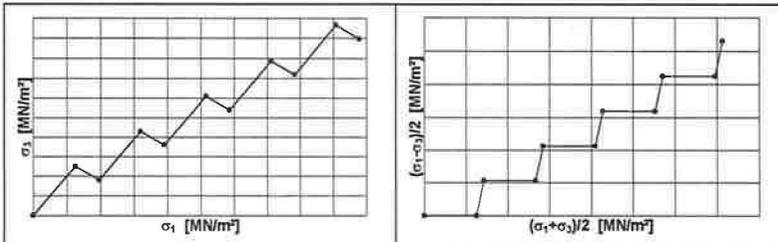


Abb. 8.9: Wahl der Spannungspfade für den Triaxialversuch

Die Versuchsauswertung erfolgt analog zu der unter Punkt 8.1 ausgeführten Vorgehensweise für Biaxialversuche. Bei Triaxialversuchen läßt sich jedoch die Hilfsfunktion $h(\sigma_{\text{oct}})$, die den funktionalen Zusammenhang für die mittlere Hauptspannung σ_2 im ebenen Verzerrungszustand beschreibt, nicht auf direktem Wege bestimmen. Der Parameter b der Funktion h kann dennoch indirekt über eine Regressionsanalyse bezüglich des spannungsabhängigen Verlaufes des Kompressionsmoduls K näherungsweise ermittelt werden. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich prinzipiell alle 9 Stoffparameter auch

aus Triaxialversuchen mit den dargestellten Spannungspfaden ableiten lassen. Aufgrund der unterschiedlichen Spannungs- und Verformungsrandbedingungen von Biaxial- und Triaxialversuch sind jedoch gewisse Abweichungen hinsichtlich der Parameterwerte nicht auszuschließen.

8.5 Die Eignung des vorgeschlagenen Stoffmodells

Die gezeigten Beispiele verdeutlichen, daß das vorgeschlagene Stoffmodell wirklichkeitsnahe Ergebnisse liefern kann. Die erforderlichen Stoffparameter lassen sich mit Ausnahme der Dilatanzfunktion χ aus den beschriebenen Biaxialversuchen gut und eindeutig ableiten. Die Parameter für die Dilatanzfunktion lassen sich aufgrund der Streuungen in den Versuchsergebnissen nicht exakt bestimmen. Die Grenzen für die entsprechenden Parameter lassen sich jedoch gut abschätzen. Sie sollten bei Spannungs-Verzerrungsanalysen in jedem Fall im Rahmen einer Sensibilitätsanalyse variiert werden.

Das Stoffmodell basiert auf den Versuchsergebnissen von Biaxialversuchen, deren Belastungspfade denen einer Asphaltbetonkerndichtung nahe kommen. Die Anwendbarkeit des Stoffmodells auf andere als die untersuchten Versuchsrandbedingungen müßte durch geeignete weiterführende Versuche überprüft werden. Insbesondere die Hilfsfunktion $h(\sigma_{\text{oct}})$ bezieht sich auf den untersuchten ebenen Verzerrungszustand. Desweiteren ist zu beachten, daß die Stoffparameter von dem jeweiligen gewählten Betrachtungszeitraum t_z abhängen.

Für die Ent- und Wiederbelastung kann näherungsweise linear-elastisches Verhalten angenommen werden. Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, daß die entsprechenden Entlastungsmoduln etwa den 10-fachen Wert im Vergleich zur Erstbelastung annehmen. Die Versuchsstreuungen hierzu waren relativ groß, so daß eine genaue Quantifizierung im Rahmen des durchgeführten Versuchsprogrammes nicht möglich war.

9 Zusammenfassung

Auf der Grundlage der Auswertungen von Meßergebnissen an bestehenden Dämmen mit Asphaltbetonkerndichtung wurden charakteristische Belastungspfade für den Asphaltbeton abgeleitet. Es wurde nachgewiesen, welchen großen Einfluß die Art des Belastungspfades auf das Verzerrungsverhalten hat. Vor diesem Hintergrund wurden die bisher veröffentlichten Versuche an Asphaltbetonproben aus dem Anwendungsbereich des Wasserbaus kritisch gegenübergestellt und bewertet. In diesem Zusammenhang hat sich gezeigt, daß trotz der großen Vielzahl der Veröffentlichungen aus dem Anwendungsbereich des Straßenbaus nur ein geringfügiger Teil der Laborversuche sinnvoll auf die im Zusammenhang mit einer Asphaltbetonkerndichtung auftretenden Fragestellungen Anwendung finden kann. Als Ergebnis dieser Voruntersuchungen ließ sich die Notwendigkeit weiterführender Laborversuche ableiten.

Bei Dämmen kann in der Regel von einem ebenen Verzerrungszustand ausgegangen werden. Da die Versuchsbedingungen den Randbedingungen einer Innendichtung möglichst nahe kommen sollten, wurden als weiterführende Laborversuche Biaxialversuche gewählt. Es wurde ein völlig neuartiges Biaxialgerät konzipiert. Das Gerät zeichnet sich durch sehr reibungsarm geführte Lastplatten aus, die die Asphaltbetonprobe zu jedem Zeitpunkt des Versuchs allseitig umschließen. Da je Lastaufbringungsrichtung zwei Kraftaufnehmer installiert sind, können die Reibungseinflüsse - insbesondere zwischen Lastplatten und Probekörper - quantitativ erfaßt werden. Aufgrund der langen Versuchszeiten wurden drei baugleiche Versuchsgeräte parallel eingesetzt.

Die Mischgutzusammensetzungen für die Probekörper entsprachen denen in der Praxis verwendeten. Das gewählte Versuchsprogramm umfaßte die Untersuchung folgender Einflußparameter auf das Spannungs-Verzerrungsverhalten:

- Mischgutzusammensetzung
- Temperatur
- Belastungspfade

Die Versuche wurden in einem Klimaraum durchgeführt, da die Temperatur sich wesentlich auf das Stoffverhalten auswirkt.

Im Rahmen der Versuchsauswertungen wurden zur Beschreibung der Spannungs- und Verzerrungszustände Oktaederspannungen bzw. -verzerrungen herangezogen.

Auf der Grundlage der Versuche ließen sich nachstehende Ergebnisse ableiten:

- Es konnte ein geeigneter Regressionsansatz für das zeitabhängige Verzerrungsverhalten nach Aufbringen einer neuen Laststufe gefunden werden. Eine zeitliche Extrapolation der Verzerrungen kann mit Hilfe dieser Funktion näherungsweise durchgeführt werden. Somit kann jedem „Betrachtungszeitraum“ eine bestimmte Verzerrung zugeordnet werden.
- Die Versuche bestätigten, daß eine höhere Versuchstemperatur eine auf den Verzerrungsverlauf „beschleunigende“ Wirkung ausübt. Der Einfluß wurde mittels eines empirischen Potenzansatzes quantifiziert.
- Aus den Versuchen wurden in Abhängigkeit der Parameter Bindemittelgehalt, Temperatur und Art des Belastungspfades die spannungsabhängigen Kompressionsmoduln bestimmt. Die Moduln wurden für unterschiedliche „Betrachtungszeiträume“ ermittelt. Desweiteren wurden ebenfalls für unterschiedliche „Betrachtungszeiträume“ die spannungsabhängigen Schubmoduln bestimmt.
- Das in den Versuchen zu beobachtende spannungsabhängige Dilatanzverhalten wurde ebenfalls ausgewertet und dargestellt. Dabei hat es sich gezeigt, daß eine Schubbeanspruchung je nach Spannungszustand sowohl eine Volumenzunahme als auch Volumenabnahme bewirken kann. Für die untersuchten Mischgutzusammensetzungen und Versuchsrandbedingungen kann die Dilatanzempfindlichkeit als gering bewertet werden.

Aufbauend auf diesen Versuchsergebnissen wurde ein Stoffmodell zur Beschreibung des Spannungs-Verzerrungsverhaltens des Asphaltbetons vorgeschlagen. Das Modell umfaßt die Bestimmung der Parameter für die Moduln K , G , für die Hilfsfunktion h und für die mit Vorzeichen behaftete Dilatanzfunktion χ . Die Moduln, die in Abhängigkeit der Oktaederspannung σ_{oct} formuliert sind, sind als Tangentenmoduln definiert und beziehen sich auf den jeweiligen „Betrachtungszeitraum“.

Abschließend wurde auf der Grundlage der Versuchsergebnisse exemplarisch das vorgeschlagene Stoffmodell angewendet und der Einfluß unterschiedlicher Spannungspfade auf das Verzerrungsverhalten untersucht. Es konnte gezeigt werden, daß das Modell eine wirklichkeitsnahe Beschreibung auch des Volumenverhaltens infolge Schubbeanspruchung gestattet. Desweiteren wurde die Übertragbarkeit des vorgeschlagenen Stoffmodells auf Triaxialversuche mit ihren Möglichkeiten und Grenzen dargestellt.

Anhang

Bilddokumentation zum Biaxialgerät

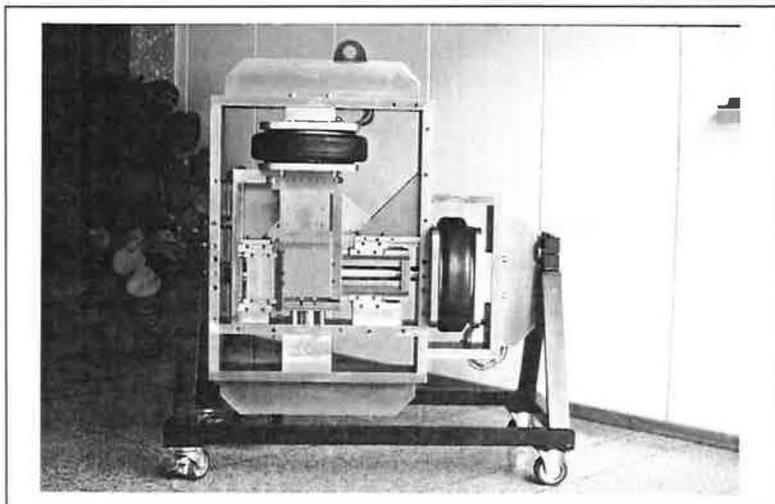


Bild 1: Offenes Biaxialgerät ohne Gehäuseplatte

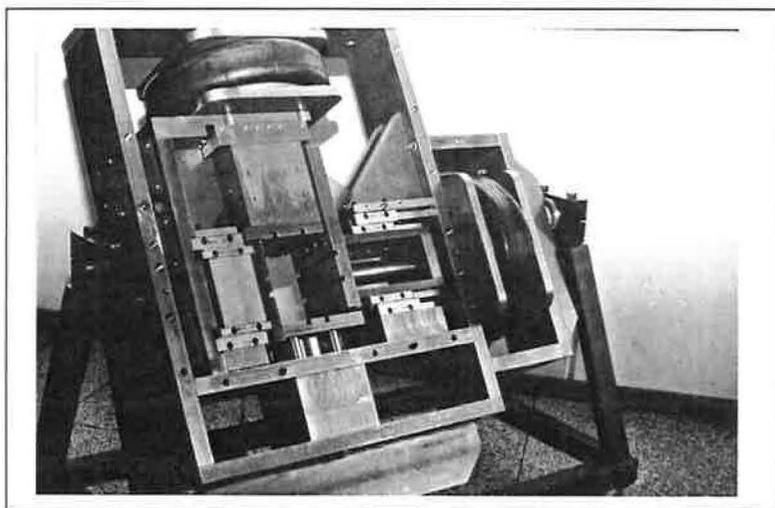


Bild 2: Geneigtes, offenes Biaxialgerät

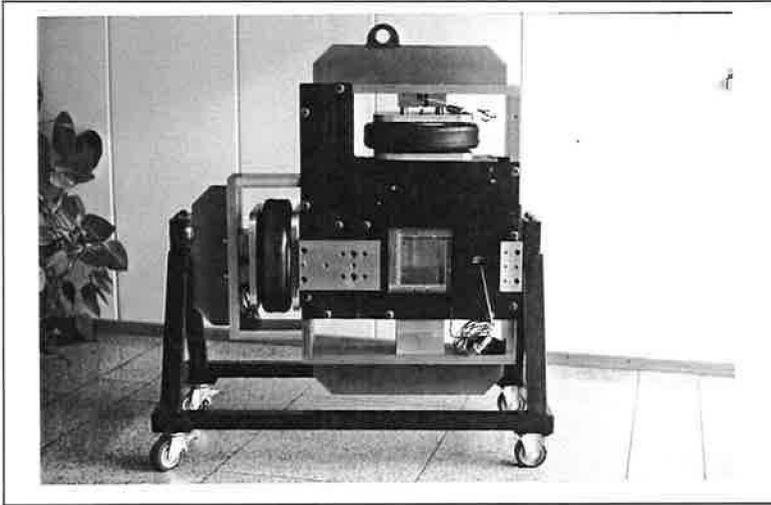


Bild 3: Biaxialgerät mit Gehäuseplatte

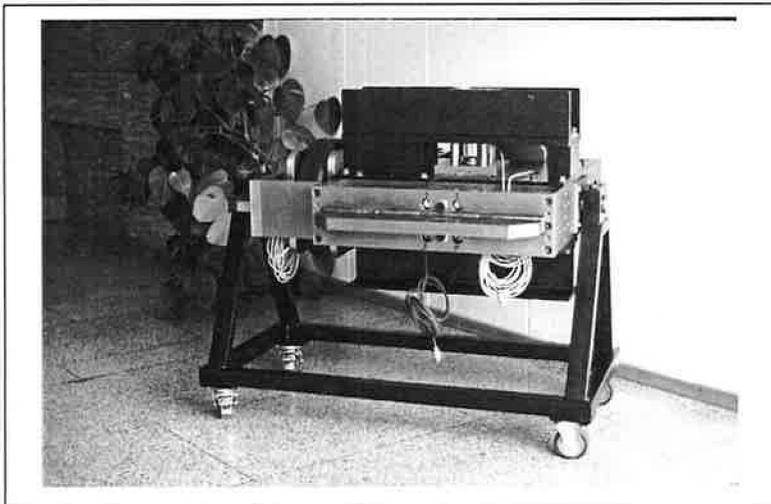


Bild 4: Verschlossenes Biaxialgerät einschließlich aufgesetzten U-Trägern

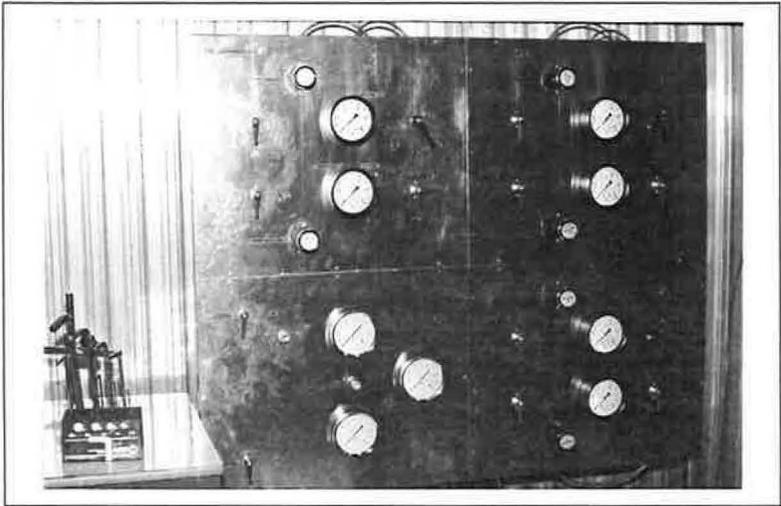


Bild 5: Pneumatische Steuereinheit

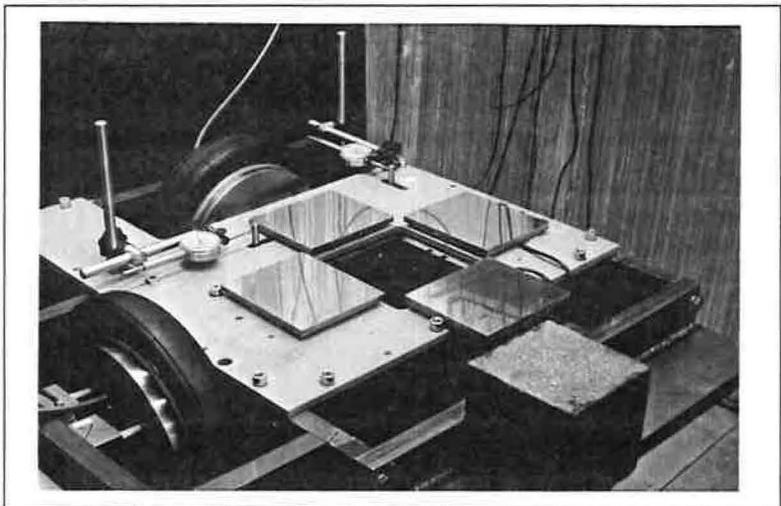


Bild 6: Probekörper vor dem Einbau, herausnehmbare Lastplatten

Literaturverzeichnis

- Angst, Ch. (1983): *Morphologische Beurteilung verdichteter bituminöser Mischungen*. Bitumen 1983, Heft 3, S. 117-126.
- Arand, W.; Dengiz, A. (1981): *Mechanisches Verhalten von Asphaltprobekörpern. Teil I - Literaturlauswertung*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn - Bad Godesberg, 1981, Heft 334.
- Arand, W. (1975): *Zur Theorie des Verformungsverhaltens von Asphalten*. b+a, 1975, S. 36-42.
- Balzereit, U. (1974): *Das TEERBAU-Verfahren zur Herstellung von Asphaltbeton-Kerndichtungen. Seine Entwicklung und Erprobung im Großversuch sowie Ergebnisse aus Laboratoriumsuntersuchungen*. TEERBAU-Veröffentlichungen, Essen, 1974, Heft 21, S. 66-72.
- Bikar, R. (1975): *Untersuchung der Wasserundurchlässigkeit bituminöser Massen im Straßen- und Wasserbau*. STRABAG-Schriftenreihe, 50 Jahre Zentrallaboratorium 1927/1977, 1977, S. 36-39.
- Breth, H.; Schwab, H. (1973): *Die Beanspruchung der Asphaltbetondichtung in hohen Dämmen während der Schüttung und bei Erdbeben*. Wasserwirtschaft, 1973, 63, Hefte 5 und 6, S. 194-197.
- Breth, H.; Schwab, H.H. (1979): *Zur Eignung des Asphaltbetons für die Innendichtung von Staudämmen*. Wasserwirtschaft, 1979, 69/11, S. 348-351.
- Buseck, H. (1980): *Ein Beitrag zur Bestimmung von Werkstoffkennwerten an bituminösen Straßenbaustoffen*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn- Bad Godesberg, 1980, Heft 288.
- Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. (1983): *Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau - EAAW 83*. DGEG, Essen, 1983, 4. Ausgabe.
- Dobson, G.R. (1977): *Über viskoelastische Eigenschaften von Asphalten*. Übersetzung von Zenke, G. Bitumen, 1977, Heft 2, S. 53-58.

- Duncan, J.M.; Chang, Ch.-Y. (1970): *Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Devison, 1970, SM5, S. 1629-1653.
- Duncan, J.M. (1980): *Hyperbolic Stress-Strain Relationships*. Proc. of the Workshop on Mimit Equilibrium, Plasticity and Generalized Stress-Strain in Geotechnical Engineering. McGill University, 1980, S. 443-460.
- Eisenstein, Z.; Law, S.T.C. (1979): *Influence of Anisotropy on Stresses and Displacements in Embankments*. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics. Aachen, 1979, Vol. 2, S. 709-715.
- Eustacchio, E. (1981): *Mechanische Eigenschaften von Asphalt*. Straßenforschung (Bundesministerium für Bauten und Technik), Wien, 1981, Heft 165.
- Geiseler, W. D.; Haug, W.; Steffen, H.; Strobl, Th. (1992a): *Bituminous Cores for Fill Dams. State of the Art*. Bulletin 84, ICOLD 1992.
- Geiseler, W. D.; Haug, W.; Steffen, H.; Strobl, Th. (1992b): *Kerndichtungen aus Asphaltbeton für Erd- und Steinschüttdämme*. Berichtsheft Nr. 72 der Versuchsanstalt Obernach und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der Technischen Universität München, München, 1992.
- Gerhard, H.; Hassel, E. (1985): *Versuchsverfahren zur labormäßigen Überprüfung des Verformungsverhaltens bituminösen Mischguts unter statischer Belastung (Diplomarbeit)*. Bitumen, 1985, Heft 3, S. 120-124.
- Guggisberg, R.; Partl, M. (1982): *Eine einfache Versuchseinrichtung zur Durchführung statischer Druck-Kriechversuche unter seitlicher Behinderung*. Bitumen, 1982, Heft 3, S. 117-120.
- Haas, H. (1983): *Zur Eignung und Optimierung von Asphaltbeton für Kerndichtungen in Staudämmen*. Sonderdruck aus der Zeitschrift Bitumen, 1983, Hefte 3 und 4.

- Haas, H. (1959): *Technische Eigenschaften von Asphaltbeton für Wasserbauzwecke*. Die Bautechnik, 1959, 36/Heft 9, S. 339-346.
- Haas, H. (1977): *Der Beitrag des Zentrallaboratoriums zur Entwicklung des Asphaltwasserbaus*. Schriftenreihe STRABAG BAU-AG, 50 Jahre Zentrallaboratorium 1927/1977, Köln, 1997, S. 29-35.
- Haug, W. (1981): *Verformungsverhalten bituminöser Kerndichtungen in Staudämmen*. STRABAG-Schriftenreihe, Köln, 1981, Heft 11, S. 15-23.
- Hills, J.F.; Heukelom, W. (1971): *Steifigkeitsmodul und Poissonzahl von Asphalt*. Bitumen, 1971, Heft 5, S. 139-144.
- Kondner, R.L.; Horner, J.M. (1965): *Triaxial Compression of a Cohesive Soil with Effective Octahedral Normal Stress Control*. Canadian Geotechnical Journal, 1965, S. 40-52.
- Huschek, S.; Staub, P. (1979): *Die Beurteilung des Verformungswiderstandes bituminöser Mischungen durch den Kriechversuch*. Institut für Straßen-, Eisenbahn- und Felsbau an der ETH Zürich, 1979, Mitteilung 42.
- Huschek, S. (1976): *Der Kriechversuch*. Straße und Verkehr, 1976, Nr. 4, S. 134-142.
- Huschek, S. (1983): *Zum Verformungsverhalten von Asphaltbeton unter Druck*. Technische Hochschule Zürich, 1983.
- Huschek, S. (1983): *Das Verformungsverhalten von Asphaltbeton unter triaxialem Druck*. Bitumen, 1983, Heft 4, S. 162-170.
- Hürtgen, H. (1981): *Zur Verwendung von Kriechversuchen für die Bestimmung der bleibenden Verformung von Asphalt*. Bitumen, 1981, Heft 2, S. 55-58.
- Hürtgen, H. (1982): *Zum viskoelastischen und viskoplastischen Verhalten von Asphalt*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn - Bad Godesberg, 1982, Heft 361.

- Hürtgen, H. (1979): *Über das viskoelastische Verhalten von Asphalt im Hinblick auf Modulbestimmungen*. Bitumen, 1979, Heft 3, S. 73-80.
- Jäger, W. (1981): *Mechanisches Verhalten von Asphaltprobekörpern. Teil II - Versuche*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn - Bad Godesberg, 1981, Heft 334.
- Kasahara, A.; Ishizaki, Y.; Sugawara, T. (1982): *Betrachtungen und Untersuchungen zum Entwurf des Asphaltbetonkern im Muri-Steinschütttdamm*. Übersetzung: Schönian, E., Bitumen, 1982, Heft 1, S. 17-21.
- Khazai-Moghadam, M.; Nievelt, G.; Putz, P., Zirkler, E. (1982): *Vergleichende Kapillarviskositätsmessungen an Bitumen*. Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung, Wien, 1982, Heft 184.
- Kondner, R.L.; Zelasko, J.S. (1963): *Void Ratio Effects on the Hyperbolic Stress-Strain Response of a Sand. Laboratory Shear Testing of Soils*. ASTM Special Technical Publication No. 361, 1963, S. 250-257.
- Kondner, R.L.; Zelasko, J.S. (1963): *A Hyperbolic Stress-Strain Formulation for Sands*. Proc. of the 2nd Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sao Paulo, 1963, Vol. I, S. 289-324.
- Kondner, R.L.; Horner, J.M. (1965): *Triaxial Compression of a Cohesive Soil with Effective Octahedral Normal Stress Control*. Canadian Geotechnical Journal, 1965, S. 40-52.
- Kraß, K. (1971): *Kriechuntersuchungen an zylindrischen Asphaltprobekörpern*. Institut für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, 1971, Heft 5.
- Kraß, K. (1971): *Formänderung von Asphaltprobekörpern unter statischer Beanspruchung*. Bitumen-Teere-Asphalte-Peche und verwandte Stoffe, Hamburg, 1971, Hefte 11/12, S. 467-522.
- Ladd, C.C.; Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F.; Poulos, H.G. (1977): *Stress-Deformation and Strength Characteristics*. Proc. of the 9th Int. Confe-

- rence on Soil Mechanics and Foundation Eng., Tokyo, 1977, Vol. 2, S. 421-494.
- Löffler, M.; Späth, M. (1986): *Zur Analyse von Kriechversuchen*. Bitumen, 1986, Heft 2, S. 56-65.
- Matsuoka, H.; Ishizaki, H. (1981): *Deformation and Strength of Anisotropic Soil*. Proc. of the 10th Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng., Stockholm, 1981, Vol. 1, S. 699-702.
- Mentlein, H. (1981): *Die Formulierung von Stoffgleichungen für das viskose Verhalten von Asphalt*. Bitumen, 1981, Heft 3, S. 90-94.
- Monismith, C.L. (1962): *Viscoelastic Behavior of Asphalt Concrete Pavements*. Int. Conf. on the Structural Design of Asphaltic Pavements, Ann Arbor, Michigan, USA, 1962, S. 476-498.
- Nair, K.; Smith, W.S., Chang, Ch.-Y. (1972): *Applicability of a linear viscoelastic characterization for asphalt concrete*. 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, 1972, Vol. I, S. 277-289.
- Naylor, D.J. (1975): *Numerical Models for Clay Core Dams*. Proc. of an Int. Symposium held at Swansea, U.K., 1975, S. 490-514.
- Neumann, H.J.: *Bitumen und seine Anwendung*. Kontakt & Studium, Expert Verlag, Grafenau, Band 63, S. 38-64.
- Nijboer, Ir.L.W. (1954): *Betrachtungen über die Eigenschaften von Bitumen-Mineralgemischen hinsichtlich ihrer Verwendung im Wasserbau*. Bitumen, 1954, S. 67-75.
- Partl, M.; Rösli, A. (1984): *Näherungsverfahren zur Berechnung der Verformungen von Asphalt unter wechselnder Zug/Druck-Kriechbeanspruchung*. Bitumen, 1984, Heft 1, S. 8-13.

- Partl, M.N. (1983): *Zum isothermen Kriechen eines bituminösen Mörtels unter mehrstufiger Belastung (Dissertation)*. ETH Zürich, 1983.
- Pfisterer, E.; Spielbauer, M. (1974): *Erkenntnisse aus Filtereindringversuchen in rheologischer und technischer Hinsicht für die Verwendung bituminöser Bindemittel im Wasserbau*. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericana in Karlsruhe, 1974, Heft 58.
- Pircher, W.; Schwab, H. (1988): *Design, Construction and Behaviour of the Asphaltic Concrete Core Wall of the Finstertal Dam*. 16th ICOLD, San Francisco, 1988, Q. 16 / R. 49, S. 1633-1656.
- Reiner, M. (1968): *Rheologie*. Carl Hanser Verlag, München, 1968.
- Rienöbl, K. (1980): *11. Talsperrenkongreß in Madrid 1973. Diskussionsbeitrag zur Frage 42*. I. Staudamm - Sammlung von Veröffentlichungen 1973-79, Mitteilungen des Institutes für Bodenmechanik, Felsmechanik und Grundbau, Universität Innsbruck, 1980, Heft 3, S. 29-33.
- Rienöbl, K. (1974): *Diskussionsbeitrag zur Frage 42. 11. Talsperrenkongreß in Madrid 1973 - Österreichische Beiträge*. Die Talsperren Österreichs, Wien, 1974, S. 137-141.
- Schad, H. (1979): *Nichtlineare Stoffgleichungen für Böden und ihre Verwendung bei der numerischen Analyse von Grundbauaufgaben*. Baugrundinstitut Stuttgart, 1979, Mitteilung 10.
- Schober, W. (1974): *Überlegungen und Untersuchungen für den Entwurf eines Steinschüttdammes mit einem 92 m hohen Dichtungskern aus bituminöser Mischung, 11. Talsperrenkongreß in Madrid 1973 - Österreichische Beiträge*. Die Talsperren Österreichs, Wien, 1974, S. 93-112.
- Schober, W. (1980): *Überlegungen und Untersuchungen für den Entwurf eines Steinschüttdammes mit einem 92 m hohen Dichtungskern aus bituminöser Mischung*. I. Staudamm - Sammlung von Veröffentlichungen 1973-79, Mitteilungen des Institutes für Bodenmechanik, Felsmechanik und Grundbau, Universität Innsbruck, 1980, Heft 3, S. 5-24.

- Schober, W. (1980): *11. Talsperrenkongreß in Madrid 1973. Diskussionsbeitrag zur Frage 42. I. Staudamm - Sammlung von Veröffentlichungen 1973-79, Mitteilungen des Institutes für Bodenmechanik, Felsmechanik und Grundbau, Universität Innsbruck, 1980, Heft 3, S. 24-28.*
- Seed, H.B.; Duncan, J.M.; Idriss, I.M. (1975): *Criteria and Methods for Static and Dynamic Analysis of Earth Dams. Proc. of an Int. Symposium. Criteria and Assumptions for Numerical Analysis of Dams, Swansea, U.K., 1975, S. 564-588.*
- Weiland, N. (1986): *Verformungsverhalten von Asphaltkörpern unter dynamischer Belastung. Institut für Straßenbau und Eisenbauwesen der Universität Karlsruhe (TH), 1986, Heft 32.*
- Zangl, L.W. (1979): *Behaviour of an Asphalt Concrete Core during Dam Construction and Reservoir Filling. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Aachen, 1979, Vol. 2, S. 733-746.*

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

a	-	Stoffparameter für den gewählten Funktionsansatz für die Hilfsfunktion h
a_1, b_1	-	Parameter für den Regressionsansatz $f_{R1}(t)$
a_{Bit}	Vol.-%	Volumenanteil Bindemittel
a_{Korn}	Vol.-%	Volumenanteil Korngerüst
a_{Luft}	Vol.-%	Luftporengehalt
b	m^2/MN	Stoffparameter für den gewählten Funktionsansatz für die Hilfsfunktion h
B_g	Gew.-%	Bindemittelgehalt
c	-	Stoffparameter für den gewählten Funktionsansatz für die Hilfsfunktion h
c_1, c_2	m^2/MN	Stoffparameter der Dilatanzfunktion χ
C_v	-	Raumkonzentration des eckigen Kornes im Gemisch (Modell nach Nijboer, 1953)
E	MN/m^2	Elastizitätsmodul
E_0	MN/m^2	Stoffparameter für E-v-Modell
$f_c(t)$ bzw. $f_{c,j}(t_j)$	-	Charakteristische Funktion zur Beschreibung des zeitabhängigen Verzerrungsverhaltens in Abhängigkeit des Betrachtungszeitraumes t_z
$f_{R1}(t)$	-	Regressionsansatz zur Beschreibung der ersten Phase des zeitabhängigen Verzerrungsverhaltens
$f_{\chi,1}, f_{\chi,2}$	m^2/MN	Teilfunktionen zur Beschreibung der Dilatanzfunktion χ

G_0	MN/m ²	Stoffparameter zur Formulierung eines spannungsabhängigen Schubmoduls G (Anfangsschubmodul)
$h(\sigma_{oct})$	-	Hilfsfunktion: $h = (1-\alpha)/(2+\alpha)$
H_{MBit}	Vol.-%	Der mit Luft und Bitumen ausgefüllte Hohlraum des Mineralgerüsts
H_{bit}	Vol.-%	Luftraumgehalt des Asphaltbetongemisches
K_0	MN/m ²	Stoffparameter zur Formulierung eines spannungsabhängigen Kompressionsmoduls K (Anfangskompressionsmodul)
k_1, k_2	MN/m ²	Stoffparameter der Dilatanzfunktion χ
K_{kom}	MN/m ²	Kompressionsmodul für das Korngerüst
$K_{0,Kom}$	MN/m ²	Anfangskompressionsmodul für das Korngerüst
K_r	MN/m ²	Dilatanzmodul
n_{SpV}	-	Spannungspfadneigung
m, n	-	Stoffparameter der Dilatanzfunktion χ
p_0	MN/m ²	atmosphärischer Luftdruck (1 bar)
r^2	-	Bestimmtheitsmaß der Regression
T	°C	Temperatur
t_c	d	Charakteristischer Zeitpunkt für das zeitabhängige Verzerrungsverhalten
t_z	d	Betrachtungszeitraum

U		Elastisches Potential
V	m^3	Volumen
x_1, x_2, x_3	-	Koordinatenachsen im betrachteten Spannungsraum
α	-	Verhältnissfaktor für die mittlere Hauptspannung σ_2 bezogen auf den Mittelwert der beiden anderen Hauptspannungen
α_E	m^2/MN	Stoffparameter für E-v-Modell
α_G	m^2/MN	Stoffparameter zur Formulierung eines spannungsabhängigen Schubmoduls G
α_K	m^2/MN	Stoffparameter zur Formulierung eines spannungsabhängigen Kompressionsmoduls K
α_{oct}	-	Verhältnissfaktor für die mittlere Hauptspannung σ_2 bezogen auf die Oktaederspannung σ_{oct}
β	-	Stoffparameter zur Erfassung des Temperatureinflusses auf den Verzerrungsverlauf
β_E	m^2/MN	Stoffparameter für E-v-Modell
β_G	m^2/MN	Stoffparameter zur Formulierung eines spannungsabhängigen Schubmoduls G
γ_{ij}	-	Gleitwinkel
γ_{oct}	-	Oktaederverzerrung
$\dot{\gamma}_{oct}$	1/d	Oktaederverzerrungsgeschwindigkeit
$\epsilon_I, \epsilon_{II}, \epsilon_{III}$	-	Verzerrungen im Hauptverzerrungsraum

$\dot{\varepsilon}$	1/d	Verzerrungsgeschwindigkeit
ε_{vol}	-	Volumenverzerrung
ε_{ij}	-	Komponenten des Verzerrungstensors
ε_{oct}	-	Oktaederverzerrung
$\dot{\varepsilon}_{oct}$	1/d	Oktaederverzerrungsgeschwindigkeit
η_m	Poise	Viskosität
χ	m ² /MN	Dilatanzfunktion, Kehrwert des Dilatanzmoduls K_c
μ	-	Reibungszahl
ν	-	Querdehnzahl
ρ	kg/m ³	Dichte
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	MN/m ²	Normalspannungen bezogen auf das gewählte Koordinatensystem
$\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$	MN/m ²	Hauptspannungen
σ_{oct}	MN/m ²	Oktaedernormalspannung
σ_{ij}	MN/m ²	Komponenten des Spannungstensors
τ_{oct}	MN/m ²	Oktaederschubspannung
$\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{13}$	MN/m ²	Schubspannungen bezogen auf das gewählte Koordinatensystem

τ_b	MN/m ²	„Bituminöser Anfangswiderstand“ (Modell nach Nijboer, 1953)
τ_e	MN/m ²	„Anfangsscherwiderstand“ (Modell nach Nijboer, 1953)
τ_{hh}	MN/m ²	„Hakwiderstand“ (Modell nach Nijboer, 1953)
τ_r	-	Stoffparameter (Modell nach Nijboer, 1953)
Φ	°	Winkel zwischen Hauptverzerrungsachse und Vertikale (hier: Hauptachsendiffehung infolge Einstau)
φ	°	Innere Reibung

Schriftenreihe

Lehrstuhl und Prüfstuhl für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik
der Technischen Universität München

Herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss
Ordinarius für Grundbau, Bodenmechanik
und Felsmechanik

Heft 1	Tragfähigkeit von Verpreßankern in nichtbindigem Boden	1982	(vergriffen)
Heft 2	Beiträge zur Anwendung der Stochastik und Zuverlässigkeitstheorie in der Bodenmechanik	1983	(vergriffen)
Heft 3	In-situ Versuche zur Ermittlung der Unterbausteifigkeit an zwei Pfeilern der Sinntalbrücke Schaippach	1984	(vergriffen)
Heft 4	Ein Beitrag zum Spannungs-Verformungsverhalten silikatgel-injizierter Sande	1985	(vergriffen)
Heft 5	Beiträge zum Tragverhalten axial zyklisch belasteter Pfähle	1985	
Heft 6	Forschungsbeiträge zum mechanischen Verhalten von Geotextilien	1986	(vergriffen)
Heft 7	Beschreibung der räumlichen Streuungen von Bodenkennwerten mit Hilfe der Zeitreihenanalyse	1986	(vergriffen)
Heft 8	Ein stochastisches Bodenmodell für geotechnische Aufgaben	1986	
Heft 9	Testing of bentonit suspensions	1987	
Heft 10	Beiträge zur Felsmechanik	1987	
Heft 11	Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden	1988	(vergriffen)
Heft 12	Bruchvorgänge infolge der Isareintiefung südlich Münchens und die kritischen Höhen der Talhänge	1988	
Heft 13	Quantifizierung von Setzungsdifferenzen mit Hilfe einer stochastischen Betrachtungsweise	1989	
Heft 14	Ein Beitrag zur Vorhersage von Verformungen und Spannungen des Baugrundes und des Ausbaues bei Hohlraumbauten	1989	
Heft 15	Beitrag zur Analyse des Tragverhaltens von einfach bewehrten Zweischichtensystemen	1989	
Heft 16	Beitrag zur statistischen Qualitätskontrolle im Erdbau	1990	
Heft 17	Vergleichsuntersuchungen über die Wirkung von vibrierend und oszillierend arbeitender Verdichtungswalze	1990	

Heft	18	Probabilistische Standsicherheitsanalyse für tetraedrische Felskeile	1993	
Heft	19	Untersuchungen zur Wirksamkeit einer Bewehrung im Zweischichtensystem	1993	
Heft	20	Zur Strategie der Gestaltung großer Kraftwerkskavernen	1994	(vergriffen)
Heft	21	Beiträge aus der Geotechnik (Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Floss)	1995	
Heft	22	Ein Verfahren zur Bestimmung der Durchlässigkeit mit Infiltrationsversuchen	1995	
Heft	23	Untersuchungen zur Materialdämpfung in der Bodendynamik	1996	
Heft	24	Beitrag zum zeit- und temperaturabhängigen Materialverhalten von Asphaltbeton für Kerndichtungen in Schüttdämmen unter besonderer Berücksichtigung des ebenen Verzerrungszustandes	1996	