

BAM-BERICHT Nr. 46

DER BUNDESANSTALT FÜR
MATERIALPRÜFUNG (BAM)

BERLIN

**Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung
von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung**

**Results of Test Concerning Strength and Strain of
Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses**

von Dipl.-Ing. Gerald Schickert
und Dipl.-Ing. Helmut Winkler

MAI 1977

22 Seiten; 101 Seiten Anhang mit 161 Abbildungen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1
Telex 01-83 261 bamb d

Inhaltsverzeichnis

Contents

		Seite Page
	<u>Vorwort</u>	
	<u>Preface</u>	1
	<u>Danksagung</u>	
	<u>Acknowledgement</u>	3
1	<u>Einleitung und Aufgabenstellung</u>	
	<u>Introduction and scope of the investigations</u>	5
2	<u>Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführung</u>	
	<u>Testing equipments</u>	6
2.1	Dreiaxiale Prüfmaschine	6
2.2	Regel- und Meßeinrichtungen	7
2.3	Druckplatten	8
3	<u>Versuchsmaterial und Probekörper</u>	
	<u>Materials and specimens</u>	9
3.1	Mörtel- und Betonmischungen	9
3.2	Probekörper	9
3.2.1	Standardzylinder	9
3.2.2	Würfel	10
3.3	Probenvorbereitung	10
4	<u>Versuchsprogramm</u>	
	<u>Test schedule</u>	11
4.1	Zweiaxiale Versuche	11
4.2	Dreiaxiale Versuche	12
5	<u>Versuchsdurchführung</u>	
	<u>Experimental details</u>	13
6	<u>Versuchsergebnisse</u>	
	<u>Test results</u>	15
6.1	Druckfestigkeit der Standardzylinder	15
6.2	Einaxiale Würfel Festigkeit	15
6.3	Zweiaxiale Würfel Festigkeit	16
6.4	Spannungs-Dehnungslinien bei zweiaxialer Druckbeanspruchung	17
6.5	Dreiaxiale Würfel Festigkeit	18
6.6	Spannungs-Dehnungslinien bei dreiaxialer Druckbeanspruchung	20
7	<u>Schlußfolgerung</u>	
	<u>Conclusion</u>	22
	<u>Anhang: Bilder und Tabellen mit Versuchsergebnissen</u>	
	<u>Appendix: Pictures and tables with results of test</u>	23
2	Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführung	24
3	Versuchsmaterial und Probekörper	26
4	Versuchsprogramm	32
6	Versuchsergebnisse	33
6.1	Druckfestigkeit der Standardzylinder	34
6.3	Zweiaxiale Würfel Festigkeit	35
6.4	Spannungs-Dehnungslinien bei zweiaxialer Druckbeanspruchung	44
6.5	Dreiaxiale Würfel Festigkeit	85
6.6	Spannungs-Dehnungslinien bei dreiaxialer Druckbeanspruchung	97

Vorwort

Der vorliegende Bericht enthält Versuchsergebnisse der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) aus mehraxialen Festigkeitsuntersuchungen mit Betonwürfeln. Die Veröffentlichung dieser Daten ist Teil einer internationalen Zusammenarbeit zur Erforschung der mehraxialen Betonfestigkeit. Ziel der gemeinsamen Untersuchungen war vor allem eine Wertung unterschiedlicher Prüfmethoden. Durch zwei- und dreiaxiale Vergleichsversuche sollten Versuchsdaten ermittelt werden, die erkennen lassen, ob und ggf. welchen Einfluß die gewählten Prüfmethoden auf das Bruch- und Verformungsverhalten von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung haben. Die Versuchsergebnisse sollten außerdem Grundlage für weiterführende Auswertungen sowie für Überlegungen im Zusammenhang mit der Überprüfung von Festigkeitstheorien sein. Mit diesen Erkenntnissen könnten dann auch aus der Literatur bekannte Untersuchungen zusammengefaßt und für die Praxis nutzbar gemacht werden.

Die Koordination der Vergleichsversuche lag in den Händen von Herrn Prof. K. Gerstle, University of Colorado / USA. Aufgefordert zur Teilnahme an den Untersuchungen waren solche Institute, die einerseits über eine mehrachsige Prüfmaschine verfügten und andererseits bereits Erfahrung mit mehraxialen Festigkeitsprüfungen hatten. Außerdem sollten in die Untersuchungen möglichst alle Prüfmethoden einbezogen werden, die allgemein für mehraxiale Betonversuche verwendet wurden.

An den internationalen Vergleichsversuchen haben sich daraufhin die folgenden 7 Forschungsinstitute beteiligt:

- Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin/Deutschland
(G. Schickert, H. Winkler)
- Ente Nazionale per l'Energia Elettrica (ENEL), Milano/Italia
(P. Bertacchi, P. Rossi, R. Bellotti)
- Imperial College of Science and Industry (ICL), London/England
(J. B. Newman, M. Kotsovos)
- Institut für Massivbau, Technische Universität München (TUM),
München/Deutschland
(H. Aschl, D. Linse)
- New Mexico State University (NMSU), Las Cruces, New Mexico/USA
(R. Zimmermann, L. Traina)
- University of California at Davis (UCD), California/USA
(M. Taylor)
- University of Colorado (CU), Boulder, Colorado/USA
(K. Gerstle, H.-Y. Ko, R. Atkinson)

Preface

With the present report testing results of the Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) are given of multiaxial investigations on the strength and deformation of concrete cubes. The publication of these data belongs to an international cooperative study in concrete testing. It has been the special aim of these joint investigations to compare and to evaluate various testing methods. The results of biaxial and of triaxial tests should show whether and, if necessary, to which extent the testing methods chosen by the participants may influence the findings of multiaxial strength and stress-strain behaviour of concrete. Furthermore the data are thought to set up a basis for further evaluations as well as for establishing or controlling a common failure criterion. By such findings it could be possible to integrate all results of investigations known from the literature and to utilize them in civil engineering.

Prof. K. Gerstle, University of Colorado/U.S.A. has coordinated the cooperative studies. Invited to participate have been such research institutes which on the one hand were equipped with a multiaxial testing machine and on the other hand had already experience in multiaxial testing. Moreover all testing methods should be incorporated in these investigations which generally were used to perform multiaxial concrete tests.

As a result the following 7 research institutes participated in the cooperative studies:

Zwischen diesen Instituten wurde ein Versuchsprogrammvereinbart, das ein-, zwei- und dreiaxiale Druckprüfungen mit Probekörpern aus Beton und Mörtel beinhaltete. Die Probekörper wurden sämtlich in Boulder/USA hergestellt, um so den Einfluß unterschiedlicher Versuchsmaterialien auf die Untersuchungsergebnisse auszuschließen.

Die hier vorgelegte Arbeit enthält den Beitrag der BAM zu diesen Vergleichsversuchen. Versuchsplan, Versuchsdurchführung, Berichterstattung usf. entsprechen den getroffenen Vereinbarungen. Sobald auch die Untersuchungsergebnisse der anderen Forschungsstellen vollständig vorliegen, wird eine Wertung dieser Daten möglich sein. Wie ein erster Vergleich der Versuchsdaten zeigt, hält sich die Abweichung der Festigkeitsergebnisse in der Regel in vertretbaren Grenzen. Die in diesem Bericht zusammengestellten Versuchsergebnisse liegen meist in der Mitte des Streubereiches der international ermittelten Versuchswerte. Besonders gute Übereinstimmungen haben sich mit den von der TU München ermittelten Festigkeitsergebnissen ergeben. Es wird daher erwartet, daß auch die vergleichende Auswertung aller übrigen international vereinbarten Versuche die praktische Verwendbarkeit der in diesem Bericht zusammengestellten Versuchsergebnisse bestätigen wird. Über die Ergebnisse dieser abschließenden Auswertung werden die TU München und die BAM zu gegebener Zeit gemeinsam berichten.

These institutions agreed upon a testing program which consisted of uni-, bi- and triaxial tests with mortar and concrete specimens. All specimens were casted in Boulder/U.S.A. in order to isolate the effect of different materials.

The report in hand represents the contribution of the BAM to the cooperative study. The testing program, the details of performing the tests, the layout of the graphs etc. correspond to the agreements made. As soon as the findings of all other participants, are available too, the test results will be compared and evaluated. A first comparison of such data shows that as a rule the deviation in strength results seems to be within defendable bounds. The findings put together in this report usually are placed in the middle of the scatter of the results found by the other participants. In particular a good conformity could be stated with the strength results found by the TU München. Therefore it is expected that the evaluation of all trials of the cooperative study will certify the test results compiled in the present report. The TU München and the BAM jointly will report on the findings of this final evaluation in the near future.

Danksagung

Die Koordination der internationalen Vergleichsversuche zur mehraxialen Betonfestigkeit lag in den Händen von Herrn Prof. K. Gerstle, Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder/Colorado/USA. Prof. Gerstle hatte mit seinem Institut auch die zentrale Herstellung aller Probekörper übernommen und nach Abschluß der Versuche alle Beteiligten im Oktober 1976 zu einer Diskussion der Untersuchungsergebnisse nach Boulder eingeladen. Das Gelingen dieser internationalen Vergleichsversuche, der ersten ihrer Art, ist in besonderem Maße sein Verdienst. Für sein unermüdliches Wirken gebühren Herrn Prof. Gerstle Dank und Anerkennung.

Die Teilnahme der BAM an dieser internationalen Aufgabe wurde dankenswerterweise durch Forschungsmittel des Bundesministers für Forschung und Technologie ermöglicht (Forschungsvorhaben RK 1/I-1975, SBB 1a). Die Betreuung des Vorhabens hatte der Deutsche Ausschuß für Stahlbeton übernommen.

Mit der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Untersuchungen waren viele Mitarbeiter des Laboratoriums BAM 2.12 "Festigkeitsuntersuchungen an mineralischen Baustoffen" beschäftigt. Besonders zu erwähnen ist auch die Mithilfe der Rechenstelle der BAM (elektronische Datenverarbeitung). Die Verfasser danken auch an dieser Stelle allen Beteiligten, insbesondere ihren Mitarbeitern Ing. grad. J. Danßmann, H.-J. Krupke und E. Marx.

Acknowledgement

Prof. K. Gerstle, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder/Colorado/U.S.A. has coordinated the international cooperative program in multiaxial concrete testing. Under his direction the specimens for all participants have been cast and cured in the laboratories of Colorado University and it was he who in October 1976 invited the participants for a first discussion of the test results in Boulder. The success of this international study - the first of this kind in the field of multiaxial concrete testing - is in a high degree due to him. We are indebted to Prof. Gerstle for his untiring work.

The participation of the BAM in this international task was supported by a grant from the Ministry for Research and Technology of the Federal Republic of Germany (Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Forschungsvorhaben RK 1/I-1975, SBB 1a) and sponsored by Deutscher Ausschuß für Stahlbeton.

Several members of the laboratory BAM 2.12 "Strength Investigations" in the field of "Mineral Building Materials" have been engaged in the preparation, performing and evaluation of the investigations. Worthy to note is also the assistance of the Computer Center of the BAM (Electronic Data Processing). The authors wish to thank all persons involved in the present studies. Especially they are indebted to their co-workers Ing. grad. J. Danßmann, H.-J. Krupke and E. Marx.

Bezeichnungen

β_0	(Beta Null): Einaxiale Druckfestigkeit, Bezugsfestigkeit für mehraxiale Festigkeitsergebnisse
σ	Normalspannung
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungen
σ_0	Oktaedernormalspannung
τ_0	Oktaederschubspannung
σ'_0	Kennzeichnender Wert einer vorgeählten Spannungsebene
f'_c	Bezugsfestigkeit für hydrostatische Beanspruchungen
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	Dehnungen in Richtung der Hauptspannungen
ϵ_{vol}	Volumendehnung
\bar{x}	Mittelwert
s	Standardabweichung
tp	Wert der t-Verteilung in Abhängigkeit von der Aussagewahrscheinlichkeit P

Notations

β_0	(Beta zero): Uniaxial compressive strength; reference strength for multiaxial strength results
σ	Normal stress
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Principal stresses
σ_0	Octahedral normal stress
τ_0	Octahedral deviatoric stress
σ'_0	Characterizing value of a preset stress plane
f'_c	Reference strength for stress levels
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	Strains in direction of principal stresses
ϵ_{vol}	Volumetric strain
\bar{x}	Mean value
s	Standard deviation
tp	Value of the distribution of t in terms of the probability P

Vorzeichenvereinbarungen

In der vorliegenden Arbeit sind Druckspannungen und zugehörige Dehnungen mit positivem Vorzeichen versehen. Außerdem gilt

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$$

Sign convention

The sign convention used throughout this report is that compressive stresses and strains are positive. Moreover is valid

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$$

Umrechnungsfaktoren

Länge:	1 mm $\hat{=}$ 0,03937 in.
Masse:	1 kg $\hat{=}$ 2,2046 lb
Kraft:	1 N $\hat{=}$ 0,225 lbf
Spannung:	1 N/mm ² = 1 MPa
	1 MPa = 1 MN/m ²
	1 N/mm ² $\hat{=}$ 145 lbf/in ²

Converting factors

Length:	1 in. $\hat{=}$ 25.40 mm
Mass:	1 lb $\hat{=}$ 0.4536 kg
Force:	1 lbf $\hat{=}$ 4.448 N
Stress:	1 ksi = 1000 psi
	1 psi = 1 lbf/in ²
	1 ksi $\hat{=}$ 6.89476 N/mm ²

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Zur Ermittlung des mehraxialen Bruch- und Verformungsverhaltens von Zementbeton wurden bereits an vielen Instituten Untersuchungen durchgeführt. Man erkannte frühzeitig, daß hierbei die Prüfkraft zwangungsfrei in die Probekörper eingeleitet werden müssen. Bei Zwängung durch Reibung infolge behinderter Querdehnung in den Berührungsflächen Probekörper/Druckplatten würden anderenfalls zusätzliche, in ihrer Größe und Richtung unbekannte Kräfte den Betonprobekörper beanspruchen. Die Versuchsergebnisse wären dann verfälscht und hingen in nicht vertretbarem Ausmaß von den jeweiligen Versuchsbedingungen ab.

In dem Bemühen, eine möglichst zwangungsfreie Krafteinleitung zu verwirklichen, werden heute eine ganze Reihe von Systemen verwendet, die sich in ihrem Aufbau grundsätzlich unterscheiden. Die Wirkung dieser Methoden ist daher sicher unterschiedlich. Dies gilt sowohl für das Ausmaß der Reibungsminderung in der Berührungsfläche Probekörper/Druckplatte als auch für die Übertragung der Prüfkraft in der Art einer gleichmäßigen Spannungs- oder Dehnungsverteilung. Ein Vergleich von aus der Literatur bekannten Untersuchungsergebnissen wird durch derart unterschiedliche Prüfmethode erschwert, zumal oft auch die Versuchsmaterialien wesentlich verschieden sind.

Vergleichsversuche sollten nun zeigen, inwieweit es mittlerweile gelungen ist, mehraxiale Betonprüfungen derart durchzuführen, daß die Methode der Versuchsdurchführung keinen nennenswerten Einfluß auf die Versuchsergebnisse hat. Beteiligt an den Vergleichsversuchen waren die eingangs genannten 7 Institute aus 4 Ländern. Um den Materialeinfluß auszuschließen, wurden alle Probekörper in Boulder/USA hergestellt. Jedes Forschungsinstitut prüfte mit seiner eigenen erprobten Versuchsmethode. Die Krafteinleitung erfolgte hierbei über starre Druckplatten mit zwischengelegten Gleitfolien (Milano/Bergamo, London, Las Cruces, Davis), mit Stahlbürsten (München, Davis), mit schlaffen Druckplatten (Berlin) und mit hydraulischen Druckkissen (Boulder). Daneben wurden auch schlanke Betonzylinder mehraxial mit seitlichem Flüssigkeitsdruck über Membranen und unabhängig eingeleiteten axialen Kräften geprüft (Milano/Bergamo, London).

Die internationalen Vergleichsversuche gliederten sich in zwei Teile. Im ersten Teil waren die Versuche durchzuführen und auszuwerten. Anschließend sollten dann im zweiten Teil die Ergebnisse gegenübergestellt und Schlußfolgerungen gezogen werden.

Die vorliegende Arbeit behandelt den ersten

1 Introduction and scope of the investigations

In the past many researchers have already performed investigations on the response in strength and strain of plain concrete under multiaxial stress states. It has been an early experience that by this the loads should be applied to the specimens without any restraint. Otherwise in case of friction due to a lateral restraint within the contact zone specimen/platen additional forces with unknown amounts and directions would stress the concrete specimen. Thus the results of test would be altered and would depend to a high extent on the present test conditions.

Several efforts have been made to perform an unrestraint load application. Today, load application systems are used which differ from one another in the fundamental principles of design. Therefore the effect of these methods is expected to be quite different. This is true both for the extent of diminution of the frictional forces in the contact zone specimen/platen and for the performance either of a uniform strain-or a uniform stress-distribution. Moreover a comparison of test results found in the literature gets complicated due to the variation of the materials tested.

It has been the main aim of the cooperative studies to reveal whether and in which cases of these investigations it really has been possible to perform reliable multiaxial concrete tests. In this connection the system of load application used should not influence the test results to an extent worth mentioning.

In the joint program 7 research laboratories from 4 countries collaborated as quoted in the preface. In order to eliminate the influence of various testing materials all specimens have been cast in Boulder/U. S. A. . Each laboratory, however, used its own testing method and its own load application system. In this fashion the cooperative investigations included load application by rough/rigid steel platens with interlayered lubricated foils (Milano/Bergamo, London, Las Cruces, Davis), with steel brushes (München, Davis), with flexible platens (Berlin) and with hydraulic cushions (Boulder). Furthermore slender concrete cylinders have been tested multiaxially by a lateral fluid pressure together with independently applied axial forces (Milano/Bergamo, London).

The joint studies were subdivided into 2 parts. In the first part the tests had to be performed and evaluated. Subsequently in the second part the test results should be compared by the participants and conclusions should be formulated.

The present work deals with the first part of

Teil der Aufgabenstellung. Dargelegt werden die Versuchsergebnisse der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) in einer Form, wie sie für den in Aussicht genommenen Vergleich (zweiter Teil der Aufgabenstellung) benötigt werden. Der Bericht enthält ferner in kurzer Form eine Beschreibung der Versuchseinrichtungen sowie alle notwendigen Angaben zur Versuchsdurchführung. Eine Wertung und Überprüfung der Daten bezüglich Plausibilität sowie eine Gegenüberstellung mit theoretischen Überlegungen und anderen aus der Literatur bekannten Untersuchungsergebnissen bleibt einem weiteren Bericht vorbehalten.

2 Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführung

2.1 Dreiaxiale Prüfmaschine

Bild 2.1-1 zeigt eine Systemskizze und Bild 2.1-2 eine Ansicht der dreiaxigen Prüfmaschine der BAM. Im Prinzip besteht diese Prüfmaschine aus drei unabhängigen Prüfgeräten. Die Achsen 1 und 2 sind in Form von Vierständergeräten ausgebildet und horizontal aufgehängt. Die 3. Achse besteht aus einem Rahmen, der derart vertikal aufgehängt ist, daß er die 1. und 2. Achse diagonal kreuzt. Ein Widerlager der Achse 1 ist fest mit dem Boden verbunden. Durch die Aufhängung an Drahtseilen kann sich das andere Ende der Achse 1 ebenso wie beide Enden der Achse 2 frei in horizontaler Richtung bewegen. Auf diese Weise besteht z. B. für Achse 2 die Möglichkeit, irgendwelchen (im allgemeinen kleinen) Lageveränderungen des Beton-Probekörpers (Würfels) zu folgen, die dieser infolge einer Beanspruchung in Richtung der Achse 1 erleidet. Das gleiche gilt für Achse 3: Der Rahmen kann ebenfalls horizontalen, darüber hinaus aber auch vertikalen Bewegungen folgen. Der Mechanismus arbeitet wie ein Flaschenzug; in der Systemskizze 2.1-1 ist dies angedeutet.

Der Prüfraum - dies ist der Raum für den Probekörper und die Vorrichtung zur Kräfteinleitung (Druckplatten) innerhalb der Prüfmaschine - ist derart ausgelegt, daß verschiedene Kräfteinleitungssysteme (starre Druckplatten mit und ohne zwischengelegten Gleitpaketen, Stahlbürsten, schlaife Druckplatten) verwendet werden können. Die Probekörper sind in der Regel würfelförmig die Kantenlänge beträgt im allgemeinen 100 mm. Die Hydraulikzylinder können ebenfalls ausgetauscht werden. Für jede Achse ist ein eigenes Hydraulikaggregat zur Druckölversorgung vorhanden. Alle 3 Achsen sind für Druckkräfte bis zu 2 MN ausgelegt. Bezogen auf den 100 mm-Würfel sind damit Druckspannungen bis zu 200 N/mm^2 übertragbar. In den nachfolgenden Übersichten sind die wichtigsten Angaben über die dreiaxige

this project. Specified are the results of test found by the Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) - Federal Institut for Materials Testing - in such a manner which facilitates the planned comparison of the findings (second part of the project). In addition the report comprises a brief description of the testing devices and informs about details of the testing method. An evaluation and checking of the data whether they are plausible or not and finally a comparison of the results with theoretical aspects of the interdependences and a comparison with other published investigations, all these items remain for a additional report.

2 Testing equipments

2.1 Triaxial testing machine

Figure 2.1-1 shows a diagrammatic sketch and Figure 2.1-2 a close-up of the triaxial testing machine of the BAM. In principle the machine consists of 2 independent machine racks. Axis 1 and axis 2 both are constructed in the shape of frames with 4 screws. Both rack panels are suspended horizontally. The 3rd axis consists of a frame which is vertically suspended and crosses the 1st and 2nd axis diagonally. One end of axis 1 is mounted on the ground. The other end of axis 1 and both ends of axis 2 can freely move in any horizontal direction due to cable-wires which support these racks. Thus, for instance, axis 2 can follow any (in general small) dislocation the concrete specimen (cube) suffers when loaded in direction of axis 1. The same is true for axis 3: this frame can move horizontally, too, and furthermore vertically. The mechanism works like a pulley as indicated in the diagrammatic sketch (Fig. 2.1-1).

The testing space - that is the space within the testing machine where the specimen and the loading devices are placed - is constructed in such a way that different loading devices (rough steel platens with and without lubricated interlayers, brush platens, flexible platens) can be used. The specimens should be cube-shaped with, in general, an edge length of 100 mm. The hydraulic jacks, too, can be exchanged. A separate hydraulic power supply exists for each of the 3 axes. All the 3 axes allow a maximum compressive load of 2 MN. This results for the 100 mm cube in compressive stresses up to 200 N/mm^2 .

Prüfmaschine zusammengestellt. Außerdem ist angegeben, wie die Maschine zur Durchführung der hier interessierenden internationalen Vergleichsversuche ausgerüstet wurde.

Dreiaxige Prüfmaschine

Beschreibung	<p>3 unabhängige Maschinengestelle, davon Achse 2 in Längs- und einer Querrichtung, Achse 3 in Längs- und den zwei Querrichtungen beweglich. Querhauptabstand der Achsen 1 und 2 veränderbar.</p> <p>Je Achsrichtung 1 Hydraulikzylinder (austauschbar, nicht typgebunden) sowie je 1 Hydraulikaggregat mit elektrohydraulischer Regeleinrichtung.</p> <p>Krafteinleitungssysteme austauschbar; Größe und Form der Druckflächen beliebig (maximale Kantenlänge 200 mm, vorzugsweise quadratische Druckflächen 100 mm x 100 mm).</p>
--------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

The following extracts describe the most important details of the triaxial testing machine. Furthermore the special layout of the machine for the cooperative investigations in question is summarized.

Triaxial testing machine

Description	<p>3 independent machine - racks, movable in axis 2 for the longitudinal and one lateral direction, in axis 3 for both the longitudinal and either of the lateral directions. Variable distance of the cross-bars for axle 1 and axle 2.</p> <p>1 hydraulic jack (exchangeable, any type can be used) for each axis. Each axle equipped with a separate oil-pressure supply and a separate electro-hydraulic control circuit.</p> <p>Load application systems exchangeable; any size of the quadrangular or rectangular bearing-surface areas (maximum edge length 200 mm, mostly square areas 100 mm x 100 mm).</p>
-------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Maximale Prüfkräfte (Kapazität der Prüfmaschine)

-	Achse 1	Achse 2	Achse 3
Druck	2 000 kN	2 000 kN	2 000 kN
Zug	400 kN	400 kN	400 kN

Maximum loads

(testing machine is capable to apply the specified forces)

-	Axis 1	Axis 2	Axis 3
Compression	2 000 kN	2 000 kN	2 000 kN
Tension	400 kN	400 kN	400 kN

Maximale Druckkräfte *) bei den internationalen Vergleichsversuchen

-	Achse 1	Achse 2	Achse 3
Starre Druckplatten	2 000 kN	1 000 kN	750 kN
Schlaaffe Druckplatten (Stempel-system)	1 500 kN	1 000 kN	600 kN

*) Im Vergleich zu Achse 1 wurden in den Achsen 2 und 3 kleinere Hydraulikzylinder und außerdem in Achse 3 konstruktiv etwas anders gestaltete schlaaffe Druckplatten verwendet.

Layout of the testing machine for the cooperative investigations (maximum compressive forces⁺)

-	Axis 1	Axis 2	Axis 3
Rough Steel Platens	2 000 kN	1 000 kN	750 kN
Flexible Platens	1 500 kN	1 000 kN	600 kN

+) Compared to axis 1 for axis 2 and axis 3 smaller hydraulic jacks and moreover for axis 3 somewhat altered flexible platens have been used.

2.2 Regel- und Meßeinrichtungen

Die dreiaxige Prüfmaschine der BAM ist mit elektronischen Einrichtungen zur Regelung der Prüfkräfte ausgerüstet (Bild 2. 2-1). Die Untersuchung der Probekörper kann sowohl kraft- als auch verformungsgeregelt durchgeführt werden. Die Beanspruchung kann aber auch nach einem

2.2 Controlling and measuring devices

The triaxial testing machine of the BAM is equipped with electronic devices for controlling the loads (Fig. 2. 2-1). Testing of the specimens can be carried out both strength- and strain-controlled. The function for stressing can also be performed by an externally given

extern vorgegebenen Verlauf erfolgen. Damit und durch elektrische Kopplung der drei elektronischen Regler ist es möglich, automatisch jeden beliebigen Spannungspfad bis zum Versagen des Probekörpers zu verfolgen.

Sämtliche Meßdaten werden digital mit einer Vielstellenmeßanlage auf Lochstreifen erfaßt. Parallel dazu ist eine analoge Registrierung auf Linienschreibern möglich. Weitere Angaben zur Art der Meßwertaufnehmer usf. enthält die nachfolgende Zusammenstellung.

Regel- und Meßeinrichtungen

Regeln	<p>Jede der 3 Krafrichtungen unabhängig von den anderen regelbar.</p> <p>Wahlweise Regelung nach den Führungsgrößen Kraft, Öldruck, Verformung/Weg oder Dehnung,</p> <p>Durch elektrische Kopplung der 3 elektronischen Regeleinrichtungen beliebige Abhängigkeiten vorgebar (z. B. konstante Spannungsverhältnisse in den Achsrichtungen, Verfolgen von Spannungspfaden, Beanspruchungen im Wechsel usf.).</p>
Messen	<p>Vielstellen-Meßanlage zur automatischen Abfrage (kontinuierlich oder in Intervallen) von z. Z. bis zu 150 Meßstellen, registrieren der Meßwerte auf Lochstreifen oder Drucker, zusätzlich Ausgabe von bis zu 12 Meßstellen auf Linienschreibern.</p> <p>Anschlußmöglichkeiten für verschiedene Meßwertaufnehmer: Dehnungsmeßstreifen (DMS) in Viertel-, Halb- und Vollbrückenschaltung induktive Wegaufnehmer mit DC- (Gleichstrom)-Ausgang, Widerstandsthermometer, andere DC-Spannungsquellen.</p>

2.3 Druckplatten

Dem vereinbarten Versuchsprogramm entsprechend erfolgte die Krafteinleitung sowohl mit starren Druckplatten als auch mit dem Stempelsystem der BAM, das als "schlaffe Druckplatte" bezeichnet wird (Bild 2.3-1). Im Hinblick auf die dreiaxialen Formänderungen der Probekörper beträgt die Größe der Druckplatten 96,0 mm x 96,0 mm. Das Bild 2.3-2 zeigt den Aufbau einer schlaffen Druckplatte für 100 mm-Würfel. Die einzelnen Stempel stehen auf einem Elastomerkissen. Zwei Federrahmen halten die Stempel zusammen. Zwischen den Stempeln sind Abstandsscheiben aus Elastomermaterial angeordnet.

Vorangegangene Versuche haben gezeigt, daß

course of curve. With this electronic coupling of the 3 electronic controlling devices it is possible to follow automatically any stress path up to failure of the specimen.

All results of measurement are recorded on punched tapes by a multiple channel digital measuring apparatus. Parallel to it an analogical recording by means of a multiple curve drawing recorder is possible. Further details regarding transducers etc. are put together in the following list.

Controlling and measuring devices

Controlling	<p>It is possible to control each of the 3 load-axis separately.</p> <p>Optional controlling of the test according to the reference input as load, oil pressure, deformation/dislocation or strain.</p> <p>Desired relationship of any controlled variable can be performed by electric coupling of the 3 electronic devices (for instance constant stress ratios, loading by following special stress paths, cyclic loading, other loading histories).</p>
Measuring	<p>Multiple channel measuring apparatus for fetching data from up to 150 measuring points (continuously or within intervals), recording of the results on punched tapes or printer, additional output on a curvedrawing recorder (for up to 12 measuring points).</p> <p>Terminals for different kinds of transducers: strain gauges 1/4, 1/2 or 1/1 bridge circuits, inductive transducers with DC-output, resistance thermometer, other outputs with DC-voltage.</p>

2.3 Platens for loading

According to the testing program agreed upon, load application took place with rough steel platens (also called rigid platens) as well as with the piston system of the BAM called flexible platens (Fig. 2.3-1). Considering the expected triaxial deformations of the specimens the end-faces of the platens measure 96.0 mm x 96.0 mm.

Figure 2.3-2 shows the layout of a flexible platen for 100 mm cubes. The pistons are supported by an elastomere cushion. Two spring bars hold the pistons together. Between the pistons elastomere distance pieces are placed.

Previous trial runs have shown that with such a loading device a nearly uniform stress distri-

mit einer derartigen Vorrichtung zur Kraft-einleitung eine nahezu gleichmäßige Spannungs-verteilung in der Berührungsfläche zwischen Probekörper und Druckplatte erreicht werden kann.

3 Versuchsmaterial und Probekörper

3.1 Mörtel- und Betonmischungen

Alle für die internationalen Vergleichsversuche benötigten Probekörper wurden in den Laboratorien der Universität von Colorado in Formen der beteiligten Institute hergestellt. Die BAM hatte hierzu ihre Tripelformen (Bild 3.1-1) nach Boulder gesandt, die sich bereits hinsichtlich Maßhaltigkeit und weitgehend isotropen Verhaltens der darin hergestellten 100 mm-Würfel bewährt hatten.

Die Rezepturen für die Mörtel- und Betonmischungen sind in Bild 3.1-2 zusammengestellt. Es wurde ein handelsüblicher Portlandzement Typ I verwendet, der nach den deutschen Richtlinien etwa einem Portlandzement PZ 350 entspricht. Die Zuschläge kamen aus den Rocky Mountains.

3.2 Probekörper

Für die von der BAM durchzuführenden Versuche wurden insgesamt 204 Würfel hergestellt, und zwar 48 Würfel aus 4 Mörtelmischungen (bezeichnet M-1 bis M-4), 48 Würfel aus 4 Betonmischungen (bezeichnet C-1 bis C-4) und nochmals 108 Würfel aus 9 Betonmischungen (bezeichnet T-1 bis T-9). Zusätzlich zu diesen 100 mm-Probewürfeln wurden aus jeder Mischung Kontrollzylinder mit 3" Durchmesser und 6" Höhe (rd. 7,5 cm x 15 cm) hergestellt, die zum Vergleich sowohl der verschiedenen Mischungen untereinander als auch der Prüfbedingungen in den beteiligten Forschungslaboratorien dienen sollten.

Alle Probekörper wurden nach einem Tag entformt und lagerten dann eine Woche bei 100 % Feuchtigkeit. Anschließend wurden die Würfel in Plastiktüten verpackt und zusammen mit jeweils 3 Kontrollzylindern aus jeder Mischung verschifft. In den Laboratorien der BAM blieben sowohl die Zylinder als auch die Würfel in ihren Plastiktüten. Sie lagerten in dieser Form in Regalen in einem Klimaraum bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit.

3.2.1 Standardzylinder

Die Standardzylinder blieben bis zum Prüftermin in den Plastiktüten. Sie wurden dann auf der Einfüllseite entsprechend der Richtlinie ASTM C 617 mit einer Schwefelmasse (Gemisch aus Schwefel und feinem Quarzsand) abgeglichen und am selben Tag - nach ungefähr

bution at the contact zone specimen/platen can be performed.

3 Materials and specimens

3.1 Mortar and concrete mixes

For the cooperative investigations all specimens were cast in laboratories of the University of Colorado. The participants' moulds were used. The BAM had sent to Boulder their triple-moulds (Fig. 3.1-1) which had already proved well in respect to casting 100 mm cubes, true to size and almost isotropic in mechanical behaviour.

The quantities for the mortar and concrete mixes are recorded in Fig. 3.1-2. The cement used was an ordinary Portland cement type I, which approximately is equivalent to the German Portland cement type PZ 350 F. The aggregates came from the Rocky Mountains.

3.2 Specimens

For the trials the BAM had to perform, a total of 204 cubes were cast, namely 48 cubes from 4 mortar batches (specified by M-1 up to M-4), 48 cubes from 4 concrete batches (specified by C-1 up to C-4) and again 108 cubes from 9 concrete batches (specified by T-1 up to T-9). In addition to these 100 mm test cubes from each batch control cylinders 3" x 6" were cast to be used to compare both the different batches mutually and the test conditions in the participants' laboratories.

All specimens were stripped after one day, cured for one week in 100 percent humidity and then sealed in plastic bags. Finally the cubes were shipped together with 3 control cylinders from each batch. In the laboratories of the BAM all cylinders and cubes as well were kept in their plastic bags and stored in racks in an air-conditioned room (20 °C, 65% relative humidity).

3.2.1 Standard cylinders

The cylinders remained in their bags until testing time. Then they were capped at their rough ends with a sulfur compound according to ASTM C 617 and at the same day - after about 4 hours - tested by loading in a conventional testing machine up to failure. The age of test

4 Stunden - in einer konventionellen Prüfmaschine auf Druckfestigkeit geprüft. Die Prüfung aller Standardzylinder und der dazugehörigen Würfel (vgl. Bilder 3.2-3 bis 3.2-6) erfolgte stets zum gleichen Termin. Das Prüfalter betrug im allgemeinen bei den zweiaxialen Untersuchungen etwa 110 Tage und rund 200 Tage bei den dreiaxialen Versuchen.

Die Standardzylinder wurden mit und ohne Plastiktüten unmittelbar nach der Ankunft aus den USA und abermals nach der Lagerung im Klimaraum gewogen. Die Bilder 3.2-1 und 3.2-2 enthalten die Angaben der Masse der etwa 7,5 cm x 15 cm großen Kontrollzylinder einschließlich der Plastiktüten vor dem Verschiffen bzw. vor dem Abgleichen. Der maximale Verlust an Masse betrug 3,9 %. Der kleinste Wert lag bei 1,0 %.

3.2.2 Würfel

Für den hier vorliegenden Beitrag zu den internationalen Vergleichsuntersuchungen wurden die Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm verwendet. Für die zweiaxialen Versuche sind diese in Bild 3.2-3 (Mörtel) und in Bild 3.2-4 (Beton) zusammengestellt. Die Bilder 3.2-5/6 enthalten die entsprechenden Angaben der für die dreiaxialen Versuche vorgesehenen Würfel. Aufgeführt sind jeweils die allgemeinen Bezeichnungen der Serien und Probekörper sowie eine spezielle Bezeichnung der BAM. Letztere setzt sich aus der Angabe des Prüfdatums (Jahr, Monat, Tag) und einer fortlaufenden Nummer für die Versuche pro Tag zusammen. Außerdem wurden alle diejenigen Würfel, die mit schlaffen Druckplatten geprüft werden sollten, mit "a" sowie jene für Prüfungen mit starren Druckplatten mit "b" gekennzeichnet. Nur im dreiaxialen Prüfprogramm sind Würfel enthalten, die mit "a(b)" bezeichnet sind. Dies sind Probekörper, welche zunächst für Prüfungen mit starren Druckplatten vorgesehen waren, dann aber für Versuche mit der schlaffen Druckplatte verwendet wurden.

Schließlich sind in den Bildern noch das Herstell- und das Prüfdatum sowie das Prüfalter der Probekörper angegeben. Bei den zweiaxialen Versuchen waren die Probekörper rd. 100 ... 120 Tage alt, bei den dreiaxialen Prüfungen rd. 150 ... 250 Tage, in einigen Fällen bis zu 300 Tage alt.

3.3 Probenvorbereitung

Wie bereits im Abschnitt 3.2.1 erwähnt wurde, mußten die Standardzylinder an einem Ende mit einer Schwefelmasse abgeglichen werden.

Ebenso war es notwendig, überstehendes Material an den Einfüllseiten der Würfel abzusägen und sodann diese Druckflächen zu schleifen. Diese Arbeiten wurden 14 Tage vor den

variiert, weil alle Standardzylinder synchronously zu den entsprechenden Würfeln (siehe Figuren 3.2-3 bis 3.2-6) getestet wurden. Allgemein betrug das Alter zum Testzeitpunkt etwa 110 Tage für die zweiaxialen Versuche und etwa 200 Tage für die dreiaxialen Versuche.

Alle Standardzylinder wurden unmittelbar nach der Ankunft und dann wieder nach der Lagerung im klimatisierten Raum, jeweils mit und ohne Plastiktüten. Die Figuren 3.2-1 und 3.2-2 zeigen die Massen einschließlich Plastiktüten vor dem Verschiffen und vor dem Abgleichen, jeweils. Die Änderung der Masse betrug ein Maximum von 3,9 %. Der kleinste Wert lag bei 1,0 %.

3.2.2 Cubes

Die Würfeln für die kooperativen Untersuchungen hatten eine Kantenlänge von 100 mm. Die für die zweiaxialen Versuche sind in Fig. 3.2-3 (Mörtel) und Fig. 3.2-4 (Beton) dargestellt, während Fig. 3.2-5 die äquivalenten Daten für die dreiaxialen Versuche (Beton) zeigt. Eingetragen sind die allgemeinen Bezeichnungen der Serien und Probekörper zusammen mit den speziellen BAM-Bezeichnungen. Letztere zeigen das Testdatum (Jahr, Monat, Tag) und eine fortlaufende Nummer für die Versuche pro Tag. Alle Würfeln, die mit flexiblen Platten getestet werden sollten, wurden mit "a" markiert, und diejenigen für Versuche mit rauhen Stahlplatten mit "b". Nur im dreiaxialen Testprogramm sind einige Würfeln mit "a(b)" markiert. Diese sind Probekörper, die zunächst für Versuche mit rauhen Stahlplatten vorgesehen waren, dann aber für Versuche mit flexiblen Platten verwendet wurden.

Weiterhin zeigen die Figuren das Gieß- und Testdatum und schließlich das Alter der Probekörper zum Testzeitpunkt. Für die zweiaxialen Versuche waren die Probekörper etwa 100 ... 120 Tage alt, für die dreiaxialen Versuche etwa 150 ... 250 Tage, in einigen Fällen bis zu fast 300 Tagen.

3.3 Specimen preparation

Wie bereits in Abschnitt 3.2.1 erwähnt wurde, mußten die Standardzylinder an einem Ende mit einer Schwefelmasse abgeglichen werden.

Ebenso war es notwendig, überstehendes Material an den Einfüllseiten der Würfeln abzusägen und sodann diese Druckflächen zu schleifen. Diese Arbeiten wurden 14 Tage vor den

zwei axialen Prüfungen und rd. 4 Wochen vor den drei axialen Prüfungen durchgeführt. Außerdem wurden in die Oberflächen von rd. der Hälfte der für die drei axialen Versuche vorgesehenen Würfel 10 mm tiefe und 7 mm breite Nuten eingefräst (Bild 3.3-2). Dies geschah mit Hilfe eines 7 mm dicken Diamantsägeblattes. Es ergaben sich 6 Nuten auf den 6 Oberflächen eines Würfels, wobei alle Nuten in Richtung der zugehörigen Achsrichtungen lagen und sich nicht kreuzten. Nach dem Trocknen der Würfel in Raumluft (etwa 3 Tage) wurden in diese Nuten Dehnungsmeßstreifen eingeklebt. Danach wurden die Nuten mit einem speziellen schnell erhärtenden und nicht schwindenden Zementmörtel geschlossen.

Die für die zwei axialen Versuche vorgesehenen Probekörper lagerten nach dem Sägen und Schleifen der Einfüllseiten wiederum - nunmehr ohne ihre Plastiktüten - in Regalen in dem bereits erwähnten Klimaraum. Eine Woche vor dem Prüftermin kamen sie dann in ein Laboratorium mit Raumluft (rd. 20°C, keine besonderen Anforderungen an die relative Luftfeuchtigkeit) und wurden auf jeder der später beim Versuch freibleibenden Oberflächen mit je zwei kreuzweise angebrachten Dehnungsmeßstreifen versehen (Bild 3.3-1).

Die für die drei axialen Prüfungen vorgesehenen Würfel lagerten ebenfalls nach der angegebenen Probenvorbereitung (Dehnungsmeßstreifen eingeklebt in nachträglich wieder verfüllte Nuten) im Klimaraum. 3 bis 5 Tage vor dem Prüftermin kamen die Probekörper dann in das Prüflaboratorium.

4 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm beinhaltete zwei- und drei axiale Untersuchungen. Für die zwei axialen Versuche standen sowohl Mörtel- als auch Betonprobekörper zur Verfügung, während die drei axialen Versuche nur mit Betonwürfel erfolgen sollten. Bei jeder der 17 Versuchsserien waren jeweils 6 Probekörper zu prüfen, und zwar sowohl mit schlaffen als auch mit starren Druckplatten. Nach Abschluß aller zwei axialen Versuche folgten die drei axialen Prüfungen. Hinzu kamen in beiden Teilen der Untersuchungen ein axiale Versuche mit Kontrollzylindern.

4.1 Zwei axiale Versuche

Bei den zwei axialen Versuchen erfolgte der Kraftanstieg gleichförmig mit 4 konstanten Spannungsverhältnissen: $\sigma_2/\sigma_1 = 0/3, 1/3, 2/3$ und $3/3$. Die Prüftermine waren derart eingerichtet, daß z. B. ein möglicher herstellungsbedingter Einfluß sich höchstens zufällig, aber nicht systematisch auswirken konnte. Dies geschah, indem die 6 Probekörper einer Mischung nacheinander für die 4 vorgesehenen Spannungsverhältnisse

thermore about half the number of the cubes for the triaxial tests were provided with 10 mm deep and 7 mm wide grooves (Fig. 3.3-2). The 6 grooves on the 6 surfaces of a cube (no crossing grooves, all grooves in direction of the corresponding axis) were sawn by means of a 7 mm thick diamond saw blade. After drying in room air (about 3 days) strain gauges were glued to the bottom of these grooves. Then the grooves were closed with a special, quickly hardening cement mortar without shrinkage.

After sawing and grinding of the upper endfaces the biaxial specimens again were stored - now without their plastic bags - in racks in the air-conditioned room. Then one week before testing they were brought into a room with laboratory air (about 20°C, no specified relative humidity) and supplied with 2 cross-wise arranged strain gauges on each of the bare cube surfaces (Fig. 3.3-1).

The cubes for triaxial testing also were stored again after the mentioned preparations (strain gauges in grooves) in the air-conditioned room. Three to five days before testing the specimens were brought into the laboratory.

4 Test schedule

The test program consisted of biaxial and triaxial investigations. For the biaxial trials mortar as well as concrete cubes were used whereas for the triaxial tests only concrete cubes had been provided. For each of the 17 test series a six-fold replication was planned, both with flexible and with rough steel platens. Firstly all biaxial trials were performed. Then the triaxial tests followed. In either part of the investigations the trials were accompanied by uniaxial tests of control cylinders.

4.1 Biaxial tests

Biaxial loading was applied monotonically with 4 constant stress ratios: $\sigma_2/\sigma_1 = 0/3, 1/3, 2/3$ and $3/3$. The test schedule was arranged in such a way as to randomize any influence possibly due to batch origin etc. Thus the 6 specimens of a batch were used successively for always one test with the 4 stress ratios starting again with the 5th cube for the second trial of the first stress ratio and so on (see for instance

verwendet wurden und sodann wiederum mit dem 5. Würfel beim zweiten Versuch für das erste Spannungsverhältnis fortgefahren wurde usf. (vgl. z. B. Bild 6.3-2). Alle zweiaxialen Versuche fanden genau an den festgelegten Prüfterminen statt, die zuvor mit den anderen beteiligten Instituten vereinbart worden waren.

4.2 Dreiaxiale Versuche

Für die dreiaxialen Versuche sind in Bild 4.2-1 und in Bild 4.2-2 das ursprünglich vorgesehene und das dann schließlich verwirklichte Versuchsprogramm gegenübergestellt. Die hieraus ersichtlichen Veränderungen waren notwendig, um die Versuche auf jene Fälle mehraxialer Druckbeanspruchung zu konzentrieren, bei denen das Versagen des Probekörpers tatsächlich unter dreiaxialer und nicht etwa zweiaxialer Druckbeanspruchung eintritt. In diesem Zusammenhang ist als Prüfkraft "Null" bzw. als "Nullspannung" eine "Grundkraft" (Klemmkraft zum Fixieren des Probekörpers in der Prüfmaschine) festgelegt worden, die 25 kN betragen hat. Dies entspricht einer "Grundspannung" von $2,5 \text{ N/mm}^2$, die während des Versuchsablaufs in keiner der drei Richtungen unterschritten werden durfte, damit der Versuch als dreiaxial gewertet werden konnte.

In Gegensatz zu den zweiaxialen Untersuchungen wurden Versuche mit konstanten Spannungsverhältnissen nur in einigen wenigen Fällen für Vergleichszwecke durchgeführt. Um die Grenzfläche der Tragfähigkeit des Betons im dreidimensionalen Spannungsraum zu ermitteln, erschien es vielmehr vorteilhaft, nacheinander ausgewählte Spannungsebenen im Bereich von 75 bis 150 % der einaxialen Druckfestigkeit zu untersuchen. Hierzu wurden unter Aufrechterhaltung des hydrostatischen Spannungszustandes die Druckspannungen in den drei Achsen bis zum Erreichen der ausgewählten Spannungsebene gleichmäßig vergrößert und sodann derart geregelt, daß die Summe der drei aufgebrachten Spannungen stets konstant blieb. Hierdurch folgte die Beanspruchung drei Spannungspfade bis zum Versagen des Probekörpers. Einzelheiten der Spannungspfade sind in Bild 4.2-3 skizziert.

Um Vergleiche zu ermöglichen, werden im allgemeinen alle mehraxialen Festigkeitsangaben auf den Wert der einaxialen Festigkeit des betreffenden Materials bezogen. In diesem Zusammenhang erscheint es von einiger Wichtigkeit, darauf hinzuweisen, daß diese einaxiale Bezugfestigkeit mit demselben Krafteinleitungssystem ermittelt werden sollte, das auch für die mehraxialen Versuche verwendet wird (Wert β_0 , vgl. Abschnitt 6.2). Es liegt nahe, bei der Planung mehraxialer Versuche ebenfalls von diesem Wert β_0 auszugehen. Demgegenüber wurde jedoch für die Durchführung der hier vorliegenden internationalen Vergleichsuntersu-

Fig. 6.3-2). All biaxial tests followed exactly the scheduled test dates agreed upon with the other participants of the cooperative study.

4.2 Triaxial tests

For the triaxial tests the initial testing program and the finally performed program are compared with each other in Figures 4.2-1 and 4.2-2. The alteration was necessary in order to concentrate the trials to those cases where failure only in triaxial and not in biaxial stress states would possibly occur, always under consideration of application of only compressive loads. In this connection as a "zero" load or stress, respectively, in direction of an axis a base load (clamping load to fix the specimen between the platens) of 25 kN was defined, which corresponds to 2.5 N/mm^2 . Thus a triaxial stress state was characterized by a compressive stress of at least 2.5 N/mm^2 in each of the three directions.

Contrary to the biaxial investigations tests with constant stress ratios were only performed in some cases for comparative reasons. To find out the failure locus within the three-dimensional stress field it rather seemed to be more effective to investigate specified stress planes ranging from 75 to 150 percent of the uniaxial strength. This was done by increasing the stresses in the 3 axis hydrostatically up to the specified stress plane and then by controlling loading in such a way that the sum of the applied stresses remained constant. By this, loading followed 3 stress paths up to failure of the specimens. Details of the stress paths are outlined in Figure 4.2-3.

For comparative reasons usually all multiaxial strength data are referred to the value of uniaxial strength of that material investigated. In this connection it seems to be of some importance to point out that this uniaxial reference strength should be determined by using the same loading system as for the multiaxial tests (value of β_0 , see section 6.2). It is obvious to plan multiaxial tests, too, on the basis of this value β_0 . For the cooperative investigations under consideration, however, as reference stress f_c' uniformly a value of about 5 ksi has been recommended to all participants. As a result for the tests of the BAM for the sample of the stress planes to be investigated, a reference stress level of $f_c' = 34.0 \text{ N/mm}^2$ has been chosen.

As Figures 4.2-1 and 4.2-2 show for the triaxial tests instead of the firstly planned 3 hydrostatic stress levels now 4 levels of 0.75, 1.00, 1.25 and $1.50 \cdot f_c'$ were assumed. But in spite of these higher stresses in several cases only flexible

chungen allen Beteiligten eine Bezugsspannung f'_c von einheitlich rd. 5,0 ksi empfohlen. Dementsprechend wurde für die von der BAM durchzuführenden Versuche zur Auswahl der zu untersuchenden Spannungsebene eine Bezugsspannung von $f'_c = 34,0 \text{ N/mm}^2$ festgelegt.

Wie aus den Bildern 4.2-1 und 4.2-2 ersichtlich ist, berücksichtigten die dreiaxialen Versuche an Stelle der zunächst geplanten drei Spannungsebenen nunmehr vier Ebenen mit 0,75, 1,00, ... 1,50 $\cdot f'_c$. Aber trotz dieser höheren Spannungen führten die dreiaxialen Druckbeanspruchungen in einigen Fällen nur bei schlaffen Druckplatten zum Versagen des Probekörpers. Die hierdurch freigewordenen Würfel, die ursprünglich für Versuche mit starren Druckplatten (gekennzeichnet mit (b)) vorgesehen waren, konnten nunmehr für zusätzliche Versuche mit schlaffen Druckplatten verwendet werden (gekennzeichnet durch a(b) in den Bildern 3.2-5 und 3.2-6). Auf diese Weise ergab sich die Möglichkeit einer Erweiterung des ursprünglichen Programms, indem zusätzliche Versuche mit konstanten Spannungsverhältnissen (Spannungspfad 4 in Bild 4.2-3) durchgeführt werden konnten. Damit bestand dann die Möglichkeit, die dreiaxialen Festigkeitswerte für Beton zu vergleichen, bei denen der Beanspruchungsverlauf zum einen Spannungspfaden unter Einschluß einer hydrostatischen Druckbeanspruchung folgte und zum anderen mit konstanten Spannungsverhältnissen zum Bruch des Probekörpers führte.

5 Versuchsdurchführung

In der vorliegenden Arbeit sind die Druck-Normalspannungen in den drei Hauptrichtungen durch

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$$

gekennzeichnet. Die Beanspruchungsgeschwindigkeit betrug bei den zweiaxialen Versuchen $0,03 \text{ N/mm}^2$ in der Sekunde bzw. $0,075 \text{ N/mm}^2$ in der Sekunde bei den dreiaxialen Prüfungen. In beiden Fällen dauerte damit ein Versuch rd. 15 ... 25 Minuten. Der Kraftanstieg erfolgte ohne Zwischenstop bis zum Bruch der Probekörper. Lediglich beim Übergang vom hydrostatischen zum deviatorischen Teil der Spannungspfade ergab sich beim Umschalten eine kurze Unterbrechung im Beanspruchungsverlauf. Während des Versuchsablaufs wurden in bestimmten Intervallen die Formänderungen (Abfrage der Dehnungsmeßstreifen, induktiven Wegaufnehmer) und zweifach die auf den Probekörper wirkenden Prüfkraften (Abfrage der mit Dehnungsmeßstreifen bestückten Kraftmeßzellen und außerdem der - ebenfalls mit Dehnungsmeßstreifen versehenen - Öldruckaufnehmer) in den drei Hauptrichtungen elektronisch abgefragt und auf Lochstreifen gestanzt. Die

and not rough steel platens led to failure under a triaxial compressive stress state. Therefore the residual cubes, initially provided for tests with rough steel platens (marked (b)), were used for additional tests with flexible platens (marked a(b) in Figure 3.2-5). By this way in extension of the initial program it was possible to perform additional tests with constant stress ratios (stress path 4 in Fig. 4.2-3). This gave the chance to compare triaxial concrete strength tested with stress paths starting from hydrostatic stress levels on one hand and with constant stress ratios on the other.

5 Experimental details

In the work described in the present report the compressive stresses in the three principal direction were characterized by

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$$

The rate of loading amounted to 0.03 N/mm^2 per second in the case of biaxial tests and to 0.075 N/mm^2 for triaxial tests, respectively. In both cases this implied a duration of testing of about 15 ... 25 minutes. There was no stop in loading up to failure. Following the stress paths and changing from hydrostatic to deviatoric stress states there was a short stop, though, during the shift operation. During loading at certain intervals the deformations (strain gauges, inductive transducers) and twice the actual loads (load cells with strain gauges and also oil pressure transducers with strain gauges) in the three principal directions were measured electronically and registered on punched tapes. Later on these tapes were analysed by an electronic computer (ALGOL-language). Furthermore the (up to 12) most important data of loading and of specimen deformation were plotted on a curve drawing recorder (x-t-recorder) so that simultaneously with the testing the data obtained could

Auswertung dieser Lochstreifen erfolgte später auf einer elektronischen Rechenanlage (Programmierung in ALGOL). Darüber hinaus konnten die wichtigsten (bis zu 12) Meßwerte des Kraftanstiegs und der Formänderungen des Probekörpers auf einem Linienschreiber aufgezeichnet werden, so daß bereits während des Versuchsablaufs die Prüfergebnisse kontrolliert und das Versagen des Probekörpers erkannt werden konnten.

Bei den zwei axialen Versuchen wurden die Formänderungen der Würfel sowohl mit Dehnungsmeßstreifen als auch mit induktiven Wegaufnehmern gemessen. Die Dehnungsmeßstreifen waren 80 mm lang (Meßlänge 60 mm). Sie wurden kreuzweise auf die beiden beim Versuch freibleibenden Würfeloberflächen geklebt, so daß je 2 Dehnungsmeßstreifen für jede der beiden zwei axialen Kraftrichtungen zur Verfügung stand. Die Formänderung des Würfels in der dritten, unbeanspruchten Kraftrichtung wurde mit 2 induktiven Wegaufnehmern ermittelt. Aus einer Reihe von Gründen wäre die ausschließliche Verwendung von Dehnungsmeßstreifen vorzuziehen gewesen. Aber bei Versuchen mit zwei axialer Druckbeanspruchung sind auf den Probekörpern keine weiteren freien Oberflächen vorhanden, auf denen die Dehnungsmeßstreifen in Richtung der dritten Kraftachse hätten geklebt werden können (Bild 3.3-1).

Bei den drei axialen Versuchen wurde zunächst davon ausgegangen, die Formänderungen des Würfels durch eine Reihe von induktiven Wegaufnehmern zu ermitteln, die an den einzelnen Stempeln der schlaffen Druckplatte bzw. bei den starren Druckplatten zwischen diesen Platten angebracht werden sollten. In vielen Vorversuchen, bei denen mehrere Arten der Anbringung der Wegaufnehmer getestet wurden, zeigten die Messungen jedoch keine voll befriedigenden Ergebnisse. Dies führte schließlich dazu, wiederum Dehnungsmeßstreifen zu verwenden und diese in rd. 10 mm tiefe (bezogen auf die Würfeloberfläche, vgl. Abschnitt 3.3 und Bild 3.3-2) Nuten zu kleben. Einaxiale Versuche hatten zuvor gezeigt, daß bei diesem Vorgehen keine signifikanten Unterschiede zwischen der Druckfestigkeit derart vorbereiteter und unbearbeiteter Würfel auftraten. Inwieweit dies ebenfalls für drei axiale Versuche zutrifft, ist aus einem Vergleich der entsprechenden Versuchsergebnisse der Würfel mit und ohne Dehnungsmeßstreifen (Nuten) ersichtlich. Tatsächlich konnten geringfügige, für eine erste Analyse aber durchaus vernachlässigbare Abweichungen festgestellt werden (vgl. z. B. Bild 6.5-4).

Bei allen zwei- und drei axialen Versuchen wurden die Würfel mit ihrer Herstellrichtung in Richtung von σ_1 geprüft (auf diese Weise wurde

be controlled and failure could be distinguished.

As for the biaxial tests the deformations of the cubes were measured by strain gauges and by inductive displacement transducers as well. Two cross-wise arranged 80 mm strain gauges (measuring length 60 mm) were glued on each of the 2 bare cube surfaces, that is 1 gauge couple for each direction of biaxial loading. The deformation of the cube in direction of the third unloaded axis was measured by a couple of inductive displacement transducers. For several reasons it seemed preferable to use only strain gauges. But in biaxial testing there was no more bare surface where the strain gauges in direction of the third axis could have been glued on (Fig. 3.3-1).

As for the triaxial tests the first idea was to measure the deformations of the cubes by a number of inductive displacement transducers which were fixed to the pistons of the flexible platens or at the steel platens, respectively. Unfortunately quite a lot of preliminary test series with different methods of placing and attaching the transducers showed no results which could fully satisfy. Therefore we finally decided to use again strain gauges and to put them into grooves of about 10 mm depth (measured from the cube surfaces, see section 3.3 and Fig. 3.3-2). Uniaxial tests showed that there were no significant deviations between the compressive strength of such prepared and of unprepared cubes. In how far this also was true for the triaxial tests can be examined by comparison of the corresponding test results of cubes with and without strain gauges (grooves). Indeed, there was a noticeable, nevertheless for a first analysis neglectable, because only small - but known - deviation (see, for instance, Fig. 6.5-4).

In all biaxial and triaxial operations the cubes were tested with σ_1 following the manufacturing direction (thus the grinded cube surface was stressed by the biggest load).

The uniaxial strength of the standard cylinders was determined by means of a conventional

die geschliffene Einfüllseite durch die jeweils größte Kraft beansprucht).

Die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit der Standardzylinder erfolgte in einer konventionellen Prüfmaschine. Die Beanspruchungsgeschwindigkeit betrug hierbei 1 N/mm^2 in der Sekunde (eine Prüfung dauerte damit im allgemeinen 6 Minuten bis zum Erreichen der Bruchkraft).

Die zwei- und dreiaxialen Würfelprüfungen wurden auf der dreiachsigen Prüfmaschine der BAM durchgeführt. Als Krafteinleitung dienten hierbei sowohl schlaife als auch starre Druckplatten.

6 Versuchsergebnisse

Dem Ziel der vorliegenden Arbeit entsprechend werden nachfolgend die verschiedenen Versuchsergebnisse ausführlich wiedergegeben, aber nur kurz erläutert. Eine Wertung soll zusammen mit dem in Aussicht genommenen Vergleich aller Prüfungsergebnisse der anderen an den internationalen Versuchen beteiligten Forschungsinstitute erfolgen.

Die BAM hat alle Meßergebnisse und alle sich hieraus für die Festigkeit und Formänderungen ergebenden Versuchsergebnisse auf Magnetband gespeichert. Bild 6.0-1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der abgespeicherten Ergebnis-Tabellen. Die Daten können damit jeder Zeit vollständig oder teilweise in Form von Listen oder aber Diagrammen (über Plotter oder Graphomaten) ausgegeben werden.

6.1 Druckfestigkeit der Standardzylinder

Für die zweiaxialen Versuchsserien sind die einaxialen Druckfestigkeiten der Kontrollzylinder in Bild 6.1-1 und für die dreiaxialen Versuche in Bild 6.1-2 wiedergegeben. Sämtliche Zylinder wurden zu der gleichen Zeit wie die zugehörigen Würfel geprüft. Das Prüfalter ist daher aus den Bildern 3.2-3 und 3.2-5 ersichtlich.

6.2 Einaxiale Würfel Festigkeit

Die einaxiale Druckfestigkeit der Würfel stellt die Bezugsfestigkeit für die mehraxialen Versuche dar. Dem Versuchsprogramm zufolge waren einaxiale Versuche nur in Verbindung mit den zweiaxialen Versuchsserien vorgesehen. Da jedoch die Probekörper für die dreiaxialen Versuche die gleiche Mischungszusammensetzung wie die zweiaxial zu prüfenden Betonwürfel hatten und außerdem die zugehörigen Standardzylinder ähnliche Festigkeitsergebnisse zeigten (Bilder 6.1-1/2), konnten, in erster Annäherung, sowohl für die zweiaxialen als auch für die dreiaxialen Versuche die gleichen Bezugsfestigkeitswerte gelten. Aufgrund

testing machine. The rate of loading was 1 N/mm^2 per second (in general it took about 6 minutes to reach the breaking load).

The biaxial and triaxial testings of the cubes were performed with the triaxial testing machine of the BAM. Load application took place with flexible and with rough steel platens as well.

6 Test results

According to the aim of the present work the following sections contain detailed test results but only short explanations. A valuation of the data will succeed together with the planned comparison of all test results of the other institutes participating in the international cooperative study.

The BAM has registered on magnetic tapes all measuring results as well as all computed data of strength and strains. The layout of these tables is shown in Fig. 6.0-1 in a simplified manner. In this way it is possible to output the test results at any time completely or in parts on lists or graphs (the latter by means of a plotter or a drawing device called 'Graphomat').

6.1 Strength of standard cylinders

The uniaxial compressive strength results of the control cylinders are entered in Fig. 6.1-1 for the biaxial test series and in Fig. 6.1-2 for the triaxial ones. All cylinders have been tested synchronously to the corresponding cubes. The age at test can therefore be seen from Figures 3.2-3 and 3.2-5.

6.2 Uniaxial cube strength

The uniaxial cube strength is the reference strength for the multiaxial tests. Following the testing program there were only uniaxial tests in connection with the biaxial series of tests. The specimens of the triaxial tests, however, had the same mix proportions as the biaxial concrete cubes. The corresponding standard cylinders showed similar strength results (Figures 6.1-2/2), too. Therefore, for a first approach, both for biaxial and for triaxial tests the same reference values were valid. In terms of six

der Ergebnisse von 6 Probekörpern in jeder Serie betragen damit die Werte der Bezugsfestigkeit β_0 :

Krafteinleitung	β_0 [N/mm ²]	
	Mörtel	Beton
Schlaffe Druckplatten	29,1	30,6
Starre Druckplatten	33,8	38,0

Die Einzelergebnisse der Festigkeiten sind aus den Zeilen für das Spannungsverhältnis $\sigma_2/\sigma_1 = 0$ der Bilder 6.3-2 bis 6.3-5 ersichtlich. Wie die dort angegebenen Mittelwerte - die voranstehend wiedergegeben sind - zeigen, beträgt der mit schlaffen Druckplatten ermittelte Festigkeitswert bei Beton 80% der mit starren Druckplatten ermittelten einaxialen Druckfestigkeit. Für Mörtel reduziert sich der mit schlaffen Druckplatten erzielte Wert auf 86%. Diese Ergebnisse entsprechen vollständig denjenigen anderer Untersuchungen. Sie zeigten die gleichen Werte wie die Festigkeitsergebnisse von prismatischen Probekörpern, wenn diese mit Würfelfestigkeiten verglichen werden. Dies weist daraufhin, daß es tatsächlich mit schlaffen Druckplatten möglich ist, eine Krafteinleitung zu verwirklichen, bei der nahezu keine seitliche Zwängung auf den Probekörper einwirkt.

6.3 Zweiachiale Würfelfestigkeit

Bild 6.3-1 zeigt die Anzahl und die mittleren Festigkeitsergebnisse der zweiachialen Versuche. Die Mittelwerte wurden hierbei aus je 6 Versuchen für jede Versuchsbedingung und jedes der drei Spannungsverhältnisse ermittelt. Die Einzelergebnisse der Bruchspannungen aller 96 Würfel sind in den Bildern 6.3-2 bis 6.3-5 zusammengestellt. Zusätzlich sind die Ergebnisse in den Bildern 6.3-6 und 6.3-7 in Form von Diagrammen (Grenzlinie der zweiachialen Festigkeit in der Ebene $\sigma_1 - \sigma_2$) für Mörtel- bzw. für Betonprobekörper dargestellt. Der Verlauf der zugehörigen Oktaederspannungen σ_0 und τ_0 ist aus den Bildern 6.3-8 und 6.3-9 ersichtlich. Die Abhängigkeit dieser Größen von den drei Hauptspannungen ergibt sich aus den folgenden Gleichungen (im zweiachialen Fall $\sigma_3 = 0$):

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

$$\tau_0 = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1}$$

replications for each series the values of the reference strength β_0 amounted to

Load Application	β_0 [N/mm ²]	
	Mortar	Concrete
Flexible Platens	29.1	30.6
Rough Steel Platens	33.8	38.0

The individual strength values are listed in Figures 6.3-2 up to 6.3-5 in the rows for the stress ratio $\sigma_2/\sigma_1 = 0$. As the mean values show, the uniaxial strength of concrete, tested with flexible platens, equals 80% of that value found with rough steel platens. For mortar the strength ratio results in a value of 86%. These findings correspond best to other investigations. They are equivalent to the strength results of prisms compared with those of cubes. By this it is indicated that with flexible platens it is possible to achieve a load application with nearly no lateral restraint to the specimens.

6.3 Biaxial cube strength

Figure 6.3-1 shows the number and the mean strength results of the biaxial trials. The mean values are obtained from six replications of each test condition at three stress ratios.

The individual ultimate stresses of all 96 cubes are listed in Figures 6.3-2 up to 6.3-5. In addition to this Fig. 6.3-6 and Fig. 6.3-7 show the corresponding diagrams with biaxial strength envelopes in $\sigma_1 - \sigma_2$ space for mortar and for concrete specimens, respectively. The octahedral stresses σ_0 and τ_0 are entered in Fig. 6.3-8 and 6.3-9. They can be expressed in terms of the 3 principal stresses by the following equations (biaxial $\sigma_3 = 0$):

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

$$\tau_0 = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1}$$

Einen Eindruck von der Streuung der zweiachialen Festigkeitsergebnisse geben die Bilder 6.3-10 bis 6.3-13 und schließlich - in tabellarischer Form - Bild 6.3-14. Die Darstellungen zeigen sowohl den 99 %-Vertrauensbereich aller Mittelwerte:

$$\bar{x} \pm \frac{t}{\sqrt{N}} \cdot s$$

N=6 $t_{99} = 4,032$
s = Standardabweichung

als auch die Streuung der Meßwerte. In diesem Fall wurde als Streubereich der durch alle maximalen und minimalen Meßwerte eingegrenzte Bereich gezeichnet. Als Maß für die Streuung ist außerdem in Bild 6.3-14 der Variationskoeffizient angegeben.

Alle diese Darstellungen - insbesondere die Bilder 6.3-6 und 6.3-7 - zeigen den wesentlichen Einfluß der Krafteinleitungssysteme auf die Versuchsergebnisse. Die Festigkeitswerte, die mit starren Druckplatten ermittelt worden sind, liegen viel höher als jene, welche sich bei Krafteinleitung über schlaife Druckplatten ergeben haben. Dies weist auf eine erhebliche Querdehnungsbehinderung in der Berührungsfläche zwischen starren Druckplatten und Probekörper hin. Starre Druckplatten sind daher für mehraxiale Versuche nicht geeignet und können höchstens in einigen Fällen für Vergleichsversuche verwendet werden.

6.4 Spannungs-Dehnungslinien bei zweiachialer Druckbeanspruchung

93 Diagramme (Bilder 6.4-1a bis 6.4-16f) zeigen die einzelnen Spannungs-Dehnungslinien für Mörtel und Beton bei zweiachialer Druckbeanspruchung, ermittelt bei Krafteinleitung über schlaife Druckplatten bzw. über starre Druckplatten. Die Festigkeit des betreffenden Probekörpers (Bruchspannung in Richtung der Achse 1, wobei $\sigma_1 \geq \sigma_2$) ist jeweils durch eine gestrichelte Linie gekennzeichnet. Bei 3 der insgesamt 96 Versuche war das Spannungs-Dehnungsverhalten nicht auswertbar.

Die folgende Übersichtstabelle soll das Auffinden einer bestimmten Gruppe von Kurven erleichtern:

Versuchsbedingungen	Spannungsverhältnis σ_2 / σ_1	Bild-Nummern ⁺⁾	
		Mörtel	Beton
Schlaife Druckplatten	0/3	6.4-1	6.4-9
	1/3	6.4-2	6.4-10
	2/3	6.4-3	6.4-11
	3/3	6.4-4	6.4-12
Starre Druckplatten	0/3	6.4-5	6.4-13
	1/3	6.4-6	6.4-14
	2/3	6.4-7	6.4-15
	3/3	6.4-8	6.4-16

⁺⁾ Innerhalb jeder Versuchsserie wurden die Einzeldiagramme mit a, b ... f bezeichnet.

An impression of the variation of the biaxial strength results give Figures 6.3-10 up to 6.3-13 and Figure 6.3-14, respectively, latter in form of a table. The graphs show the 99 percent confidence interval

$$\bar{x} \pm \frac{t}{\sqrt{N}} \cdot s$$

N=6 $t_{99} = 4,032$
s = standard deviation

for all mean values as well as the scatter of the measured values. In this case the scatter is defined as the outer boundary of all test results (maximum and minimum values). In addition the scatter given by the coefficient of variation is entered in Fig. 6.3-14.

All these plottings - especially Figures 6.3-6 and 6.3-7 - show the serious influence of the load application systems on the test results. Strength values determined by load application with rough steel platens are much higher than those which were ascertained with flexible platens. This indicates a remarkable amount of restraint in the contact zone between the rough steel platens and the specimen. Therefore multiaxial tests with rough steel platens are only sometimes of interest for comparative reasons but of no practical use.

6.4 Stress-strain behaviour in biaxial compression

93 graphs (Figures 6.4-1a up to 6.4-16f) show the individual stress-strain curves of mortar and concrete cubes under biaxial compression tested with flexible platens and with rough steel platens, respectively. In each case the strength of the specimen (ultimate stress in axis 1 with $\sigma_1 \geq \sigma_2$) is indicated by a dashed line. For 3 out of 96 tests the stress-strain relationship was not plottable.

The following synoptic table may facilitate the location of a special group of curves:

Test Conditions	Stress Ratio σ_2 / σ_1	Number of Figure ⁺⁾	
		Mortar	Concrete
Flexible Platens	0/3	6.4-1	6.4-9
	1/3	6.4-2	6.4-10
	2/3	6.4-3	6.4-11
	3/3	6.4-4	6.4-12
Rough Steel Platens	0/3	6.4-5	6.4-13
	1/3	6.4-6	6.4-14
	2/3	6.4-7	6.4-15
	3/3	6.4-8	6.4-16

⁺⁾ Within each test series the individual graphs are marked by a, b ... f

Zur Darstellung einer mittleren Spannungs-Dehnungslinie sind aus den Einzelversuchen die Mittelwerte der Dehnungen errechnet worden. Die Anzahl der Versuche ist aus Bild 6.3-1 ersichtlich (im allgemeinen 6 Versuche je Serie). Insgesamt beruhen die ermittelten Spannungs-Dehnungsbeziehungen auf 46 Versuchen mit starren Druckplatten und 47 Prüfungen mit schlaffen Druckplatten. Die Bilder 6.4-17 bis 6.4-24 geben einen allgemeinen Überblick über den Einfluß der Versuchsparameter. Sie zeigen gemittelte Spannungs-Dehnungslinien für alle 16 Kombinationen im Versuchsmaterial (Mörtel und Beton), in der Art der Krafteinleitung (schlaffe und starre Druckplatten) und für verschiedene Spannungsverhältnisse σ_2/σ_1 .

Wie bereits erwähnt, wurden für die Dehnungsmessungen in Richtung der Achse 1 und Achse 2 Dehnungsmeßstreifen in Form eines Kreuzes auf die beiden freien Würfeloberflächen geklebt. Demgegenüber wurden in Richtung der Achse 3 induktive Wegaufnehmer benutzt. Fast immer rissen die meisten der vier Dehnungsmeßstreifen eines Würfels vor dem Erreichen der Bruchspannung. In anderen Fällen waren die Versuchsergebnisse oberhalb eines bestimmten zwei axialen Spannungszustandes nicht auswertbar (z. B. wenn Rißbildungen fehlerhafte Meßwerte verursachten). Dies ist dann mit einem Stern am Ende einer Kurve gekennzeichnet. Die gemittelten Spannungs-Dehnungslinien (Bilder 6.4-17 bis 6.4-24) sind schließlich noch einmal gezeichnet zusammen mit dem durch die maximalen und minimalen Meßwerte gekennzeichneten Streubereich aller gemessenen Dehnungswerte (Bilder 6.4-25 bis 6.4-40) und außerdem durch Grenzlinien eines Bereiches, der durch:

$$\bar{x} \pm 1,645 \cdot s \quad s = \text{Standardabweichung}$$

gekennzeichnet ist (Bilder 6.4-41 bis 6.4-56). Dieser zuletzt genannte Bereich (90 %-Bereich der Normalverteilung) vermittelt einen Eindruck von der Streuung der Dehnungsmeßwerte bei jeweils 6 Versuchsergebnissen. Außerdem entspricht dieser Bereich in diesem Fall einem Vertrauensbereich der Mittelwerte mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 99 %.

6.5 Dreiaxiale Würfelfestigkeit

Dem Versuchsprogramm entsprechend wurden nur Betonwürfel, nicht aber Würfel aus Zementmörtel geprüft. Und ebenfalls im Unterschied zu den zwei axialen Versuchen folgte in der Regel diesmal der Kraftanstieg zunächst einem hydrostatischen Spannungsverlauf, um dann innerhalb einer vorgewählten Spannungsebene zu Spannungs kombinationen überzugehen, die einem der drei ausgewählten Spannungspfade entsprechen.

For plotting the mean stress-strain relationships, average strains have been calculated. The number of tests is given in Figure 6.3-1 (generally sixfold replication). In total the computed stress-strain relations are based on 46 tests with rough steel platens and on 47 trials with flexible platens. The Figures 6.4-17 up to 6.4-24 allow a general view of the influence of the test variables. They show mean stress-strain curves for all 16 combinations of the material (mortar and concrete), of the way of load application (flexible and rough steel platens) and of the variant stress proportions σ_2/σ_1 .

As already mentioned for strain measurements in axis 1 and axis 2 strain gauges were glued in shape of a cross on both free surfaces of the cubes. In direction of axis 3 inductive transducers were used. Nearly always, most of the 4 strain gauges of a cube were destroyed before the ultimate stress was reached. In some cases the test results were not plottable beyond a certain stage of biaxial stress (for instance fissures caused incorrect measurements). This is marked with a star at the end of a curve.

Finally the mean stress-strain curves (Figures 6.4-17 up to 6.4-24) are plotted once more, this time together with the outer boundary (maximum and minimum value) of all measured strain values (Figures 6.4-25 up to 6.4-40) and together with the lines showing the interval defined by

$$x \pm 1,645 \cdot s \quad s = \text{standard deviation}$$

(Figures 6.4-41 up to 6.4-56). This interval (90 % interval of the normal distribution) gives an impression of the scatter of the strain values in view of sixfold replication. Moreover it corresponds to a confidence interval of the mean values of 99 %.

6.5 Triaxial cube strength

According to the test program only concrete and no mortar cubes were tested. And contrary to the biaxial trials, too, this time as a rule loading was performed by first subjecting the cube to a specified hydrostatic stress and then to stress combinations which followed one of three stress paths within a preset stress plane.

Einzelheiten der verschiedenen Spannungspfade wurden bereits mit Bild 4.2-3 erläutert. Das Bild 6.5-1 soll einen Eindruck von dem dreidimensionalen Spannungsraum mit den hydrostatischen und deviatorischen Spannungskomponenten vermitteln. Die drei Achsen des Spannungsraumes wurden mit σ_I , σ_{II} und σ_{III} gekennzeichnet, um so den Unterschied (Maßstabsänderung im Spannungsraum im Vergleich zum physikalischen Raum) zu den Hauptspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 zu verdeutlichen. In Bild 6.5-2 sind die drei untersuchten Spannungspfade skizziert.

Anzahl und mittlere Festigkeitswerte der dreiaxialen Versuche sind in Bild 6.5-3 zusammengestellt. Die Einzelwerte der Bruchspannungen bei dreiaxialer Druckbeanspruchung der Würfel sind aus den Bildern 6.5-4 bis 6.5-9 ersichtlich. Außerdem gibt Bild 6.5-10 einen Überblick über die dreiaxiale Druckfestigkeit des Betons unter Berücksichtigung der drei vorgegebenen Spannungspfade. Hierbei zeigt sich, daß einige der ursprünglich vorgesehenen Versuche (vgl. Bild 4.2-1) nicht durchgeführt werden konnten, weil die Prüfungen innerhalb der niedrigen Spannungsebenen von $0,5 f'_c$ bis $1,0 f'_c$ nicht zu dreiaxialen, sondern vielmehr zu zweiaxialen Druckspannungszuständen geführt hätten.

In den Bildern 6.5-4 bis 6.5-9 ist außerdem angegeben, ob die Würfel mit Dehnungsmeßstreifen versehen waren (und daher mit einem besonderen Zementmörtel gefüllte Nuten hatten). Es scheint hier ein kleiner Unterschied zwischen der dreiaxialen Druckfestigkeit der Würfel mit und ohne Dehnungsmeßstreifen (Nuten) vorzuliegen. Trotzdem wurden zunächst die vorliegenden Mittelwerte aus allen vorhandenen 6 (manchmal nur 5) Einzelwerten errechnet. Mit späteren Berechnungen soll dann überprüft werden, ob die gefundenen Festigkeitsunterschiede in mathematisch-statistischer Sicht signifikant sind oder nicht (wahrscheinlich nicht).

Eingangs wurde bereits erwähnt, daß zusätzliche Versuche mit konstanten Spannungsverhältnissen durchgeführt werden konnten. Diesbezügliche Versuchsergebnisse enthalten die Bilder 6.5-8 (schlaffe Druckplatten) und 6.5-9 (starre Druckplatten). Die verschiedenen Spannungsverhältnisse wurden unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse mit den Spannungspfaden Nr. 1, 2 und 3 ausgewählt. Auf diese Weise war ein unmittelbarer Vergleich der Versuchsdaten möglich. Er beschränkte sich jedoch auf diejenigen Probekörper, die ursprünglich nicht mit Dehnungsmeßstreifen versehen waren (d.h. die keine Nuten aufwiesen). Bei allen Vergleichsversuchen erfolgte die Krafteinleitung über schlafe Druckplatten. Die gemittelten Versuchsergebnisse sind in

A specification of the variant stress paths has already been given in Fig. 4.2-3. Fig. 6.5-1 gives an impression of the three-dimensional stress space with the hydrostatic and deviatoric stress components. The 3 axis of stress space are marked σ_I , σ_{II} and σ_{III} to show the difference (deviation in scale for stress space compared with physical space) to the data of σ_1 , σ_2 and σ_3 (principal normal stresses). The 3 investigated stress paths are sketched in Fig. 6.5-2.

The number and the mean strength results of the triaxial tests are shown in Fig. 6.5-3. In addition the individual ultimate stresses of all cubes tested triaxially are listed in Figures 6.5-4 up to 6.5-9. Moreover Fig. 6.5-10 gives a general view of concrete strength under triaxial compression, broken down for each of the 3 given stress paths. This reveals that some of the initial scheduled trials (see Fig. 4.2-1) could not be performed. The reason for this is that within the lower stress planes of $0.5 f'_c$ up to $1.0 f'_c$ loading would have resulted at failure in biaxial and not in triaxial compressive stress states.

In the Figures 6.5-4 up to 6.5-9 it is indicated if the cubes were supplied with strain gauges (and therefore had grooves filled with a special cement mortar). There seems to be a remarkable but small deviation between the triaxial strength of cubes with and without strain gauges (grooves). Nevertheless the present mean values were calculated from all of the 6 (sometimes only 5) individual values. Later calculations may prove whether the difference in strength is in a statistical sense significant or not (probably not).

As already mentioned it had been possible to perform additional tests with constant stress ratios. These test results are entered in Fig. 6.5-8 (flexible platens) and in Fig. 6.5-9 (rough steel platens). The variant stress ratios were chosen in reference to the test results in those trials with stress paths No. 1, 2 and 3. In this way a immediate comparison of the data was possible. This comparison, however, only was done with specimens which were predominantly not supplied with strain gauges (i.e. which had no grooves). For this comparison load application was performed with flexible platens. The mean values were entered in Fig. 6.5-11. There could be noticed a slightly higher value of ultimate stress for tests with constant stress ratios than for tests with corresponding stress paths.

Bild 6.5-11 zusammengestellt. Es konnten geringfügig höhere Werte der Bruchspannungen bei Versuchen mit konstanten Spannungsverhältnissen im Vergleich zu Versuchen mit entsprechenden Spannungspfaden festgestellt werden.

Die Bilder 6.5-12 bis 6.5-16 zeigen die zusammengefaßten Festigkeitsergebnisse nochmals in der Form von Oktaederspannungen. Die Diagramme stellen die ermittelten dreiaxialen Festigkeitswerte dar in Abhängigkeit von der hydrostatischen Beanspruchung (Oktaeder-Normalspannung) und der Oktaeder-Schubspannung beim Bruch des Probekörpers. Außerdem sind die Oktaederspannungen für die verwendeten Krafteinleitungssysteme (Bild 6.5-15) und für verschiedene Spannungspfade (Bild 6.5-16 dargestellt).

Schließlich zeigt Bild 6.5-17 noch in tabellarischer Form die Streuung der dreiaxialen Festigkeitswerte - ähnlich wie Bild 6.3-14 bei den zweiaxialen Versuchen. Erläuterungen zu dem hier aufgeführten Vertrauensbereich der Mittelwerte und zu dem Streubereich der Einzelwerte wurden bereits im Abschnitt 6.3 gegeben.

6.6 Spannungs-Dehnungslinien bei dreiaxialer Druckbeanspruchung

Die Darstellung der dreiaxialen Spannungs-Dehnungsbeziehungen entspricht vollkommen der Darlegung der zweiaxialen Versuchsergebnisse in Abschnitt 6.4. Die Anzahl der Versuche ist aus Bild 6.5-3 ersichtlich. Danach wurden in der Regel von den 6 Würfeln einer Serie 3 Probekörper mit Dehnungsmeßstreifen versehen, und zwar in der Art, wie sie in Bild 3.3-1 skizziert ist. Dies gilt sowohl für Versuche mit schlaffen als auch mit starren Druckplatten. Außer mit Dehnungsmeßstreifen wurden die Formänderungen auch mit einer Reihe von induktiven Wegaufnehmern ermittelt. Die in diesem Bericht zusammengestellten Diagramme geben bei Prüfungen mit schlaffen Druckplatten die Werte der Dehnungsmeßstreifen wieder, wo hingegen bei Prüfungen mit starren Druckplatten zumeist die Meßwerte der induktiven Wegaufnehmer - die zwischen den Druckplatten angeordnet waren - aufgetragen sind. Die Messungen mit induktiven Wegaufnehmern sind, wie in Abschnitt 5 bereits erwähnt, nicht immer zuverlässig.

Die insgesamt 48 Darstellungen der Bilder 6.6-1a bis 6.6-16c zeigen die einzelnen Spannungs-Dehnungslinien der Betonprobekörper bei dreiaxialer Verlauf der Druckspannungen entlang der in Bild 4.2-3 angegebenen Spannungspfade. Die horizontale, gestrichelte Linie zeigt die in Achse 1 erreichte Bruchspannung an, wobei $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ gilt. Das Spannungs-

Interms of octahedral stresses the summarized strength results are shown in Figures 6.5-12 up to 6.5-16. The graphs show the triaxial strength data found in terms of the hydrostatic stress level (octahedral normal stress) and the octahedral shear stress at failure, the octahedral stresses for the investigated load applications (Fig. 6.5-15) and for variant stress paths (Fig. 6.5-16).

Finally Fig. 6.5-17 shows the variation of the triaxial strength results in the same manner as Fig. 6.3-14 does for the biaxial trials. Both the confidence interval of the mean values and the scatter of the individual values are already specified in section 6.3.

6.6 Stress-strain behaviour in triaxial compression

The plotting of the triaxial stress-strain relationships follows exactly the layout of the biaxial ones given in section 6.4. The number of tests is given in Fig. 6.5-3. It shows that as a rule out of 6 cubes of a series 3 specimens have been prepared for strain measurements in the way shown in the sketch 3.3-1. This has been true for tests with load application by flexible and rough steel platens as well. Besides of strain gauges for displacement measurements also several inductive transducers have been used. The graphs plotted in this report are based on test values measured by strain gauges in the case of trials with flexible platens whereas in the case of rough steel platens mostly the test results of the inductive transducers (placed between the platens) are plotted, though, as already mentioned in section 5, these test results of inductive transducers sometimes are not reliable.

The in total 48 Figures 6.6-1a upto 6.6-16c show the individual triaxial stress-strain curves for the concrete specimens tested by following the stress paths as outlined in Fig. 4.2-3. The horizontal dashed line indicates the ultimate stress reached in axis 1 with $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$. The stress-strain behaviour of those cubes tested for comparative reasons by proportionally increased loads (stress path 4) is shown in the last Figures of this group (Figures 6.6-13 up to 6.6-16c). Regarding the triaxial stress state at the fail-

Dehnungsverhalten derjenigen Würfel, die aus Vergleichsgründen mit proportional ansteigendem Kraftanstieg (Spannungspfad 4) geprüft wurden, ist aus den abschließenden Bildern dieser Gruppe (Bild 6.6-13 bis 6.6-16c) ersichtlich. Bezogen auf den dreiaxialen Spannungszustand zum Zeitpunkt des Versagens entspricht Bild 6.6-13 den Bildern 6.6-5a ... c, Bild 6.6-14 den Bildern 6.6-7a ... c, Bild 6.6-15 den Bildern 6.6-8a, b und schließlich sind die Bilder 6.6-16a ... c vergleichbar mit den Bildern 6.6-10a ... f.

Zum Auffinden einer besonderen Gruppe von Kurven dient die folgende Übersichtstabelle:

Versuchsbedingungen	Hydrostatische Spannung [N/mm ²]	Bild-Nummern ⁺⁾			
		Spannungspfad ⁺⁺⁾			
		1	2	3	4
Schlaffe Druckplatten	25,5	6.6-1	—	—	—
	34,0	6.6-2	—	—	—
	42,5	6.6-3	6.6-5	6.6-7	6.6-13/14
	51,0	6.6-4	6.6-6	6.6-8	6.6-15
Starre Druckplatten	25,5	6.6-9	—	—	—
	34,0	6.6-10	—	—	6.6-16
	42,5	6.6-11	—	—	—
	51,0	6.6-12	—	—	—

⁺⁾ Innerhalb jeder Versuchsserie wurden die Einzeldiagramme mit a, b ... f bezeichnet.

⁺⁺⁾ Vgl. Bild 4.2-3.

Mittlere Spannungs-Dehnungslinien bei dreiaxialer Druckbeanspruchung sind für die Versuche mit schlaffen Druckplatten in den Bildern 6.6-17 bis 6.6-24 gezeichnet und für die Versuche mit starren Druckplatten in den Bildern 6.6-25 bis 6.6-28. Ebenso wie die Diagramme des Spannungs - Dehnungsverhaltens bei zweiaxialer Druckbeanspruchung (Abschnitt 6.4) zeigen weitere Darstellungen diese mittleren Kurven zusammen mit Grenzlinien des Streubereiches der Meßwerte, und zwar sowohl ausgehend von den maximalen und minimalen Meßwerten (Bilder 6.6-29 bis 6.6-40) sowie eines 90 %-Intervalls der Normalverteilung (Bilder 6.6-41 bis 6.6-52). Der zuletzt angeführte Bereich kann außerdem als Vertrauensbereich der mittleren Dehnungswerte angesehen werden. In diesem Falle entspricht das 90 %-Intervall der Einzelwerte (Normalverteilung) einem Vertrauensbereich der Mittelwerte mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von nahezu 90 %, wenn die Anzahl der Versuche auf N = 3 beschränkt bleibt. Bei 4 Versuchen liegt dementsprechend dem Vertrauensbereich eine Aussagewahrscheinlichkeit von rd. 95 %, bei N = 5 von rd. 98 % und schließlich bei 6 Versuchen von 99 % zugrunde.

ure point, Fig. 6.6-13 is comparable to Figures 6.6-5a...c, Fig. 6.6-14 to Figures 6.6-7a...c, Fig. 6.6-15 to Figures 6.6-8a, b and finally Figures 6.6-16a...c are comparable to Figures 6.6-10a...f.

Information to find a special group of curves gives the following synoptic table:

Test Conditions	Hydrostatic Stress Level N/mm ²	Number of Figure ⁺⁾			
		Stress Path ⁺⁺⁾			
		1	2	3	4
Flexible Platens	25,5	6.6-1	—	—	—
	34,0	6.6-2	—	—	—
	42,5	6.6-3	6.6-5	6.6-7	6.6-13/14
	51,0	6.6-4	6.6-6	6.6-8	6.6-15
Rough Steel Platens	25,5	6.6-9	—	—	—
	34,0	6.6-10	—	—	6.6-16
	42,5	6.6-11	—	—	—
	51,0	6.6-12	—	—	—

⁺⁾ Within each test series the individual graphs are marked by a, b ... f

⁺⁺⁾ See Figure 4.2-3

Mean triaxial stress-strain curves are plotted in Figures 6.6-17 up to 6.6-24 for tests with flexible platens and in Figures 6.6-25 up to 6.6-28 for tests with rough steel platens, respectively. Like the graphs with stress-strain behaviour in biaxial compression (section 6.4) further Figures show these mean curves together with lines which limit the scatter of the measured values both in terms of the maximum and minimum values (Figures 6.6-29 up to 6.6-40) and in terms of the 90 % interval of the normal distribution (Figures 6.6-41 up to 6.6-52). The latter interval, too, can be interpreted as confidence interval of the mean strain values. In this case the 90 % interval of the individual values (normal distribution) corresponds to a confidence interval of the mean values of nearly 90 % if the number of tests has been N = 3. Accordingly N = 4 results in a confidence interval of about 95 %, N = 5 of about 98 % and N = 6 of 99 %.

7 Schlußfolgerungen

Abschließende Folgerungen aus den hier wiedergegebenen Versuchsergebnissen sollen dem in Aussicht genommenen Vergleich sämtlicher Versuchsdaten aus allen beteiligten Forschungsinstituten vorbehalten bleiben. Dies kann geschehen, sobald von allen Instituten die ausgewerteten Versuchsdaten vorliegen. Ohne vorzugreifen, können bisher vielleicht die folgenden allgemeinen Feststellungen getroffen werden:

- (1) Bei mehraxialer Druckbeanspruchung versagt das Material durch Zugdehnung in Richtung der kleinsten Hauptspannung.
- (2) Die Art der Krafteinleitung in den Probekörper kann das Versuchsergebnis entscheidend beeinflussen. Bei starren Druckplatten tritt eine erhebliche Querdehnungsbehinderung in der Berührungsfläche zwischen Druckplatte und Probekörper auf. Sie sind daher für dreiaxiale Versuche ungeeignet. Starre Druckplatten können für dreiaxiale Untersuchungen allenfalls in besonders gelagerten Fällen für Vergleichszwecke verwendet werden.
- (3) Bei dreiaxialer mechanischer Beanspruchung von Probekörpern ist es recht schwierig, eine Meßmethode zu finden, die nicht bereits von ihrer Anlage her die ermittelten Dehnungsmeßwerte in ihrer Größe zumindest geringfügig mitbestimmt. Dies sollte besonders für den Fall kleiner Dehnungsmeßwerte berücksichtigt werden.
- (4) Bei dreiaxialen Untersuchungen - und hier besonders bei Druckbeanspruchungen, die erheblich von einem zweiaxialen Spannungszustand abweichen - ist die Brucherkennung schwieriger als bei zweiaxialen Druckprüfungen.
- (5) Die Aussagekraft der vorliegenden zweiaxialen Versuche scheint höher zu sein als die der dreiaxialen. Dies ist allerdings nicht durch eine vielleicht unterschiedliche große Sorgfalt bei der Versuchsdurchführung begründet. Vielmehr hätte das ursprüngliche Versuchsprogramm mehr auf dreiaxiale Versuche mit höheren Druckbeanspruchungen ausgerichtet werden müssen. Andererseits sind aber gerade für die Baupraxis dreiaxiale Spannungszustände mit nicht allzu hoher Beanspruchung von Bedeutung. In Anbetracht der Lage der Grenzfläche der Tragfähigkeit des Betons im Spannungsraum muß hierbei jedoch beachtet werden, daß weniger hohe Beanspruchungen nicht mehr bei dreiaxialen Druckspannungen, sondern nur noch bei kombinierten Druck-Zugspannungen zum Versagen des Probekörpers führen würden. Und gerade dies hätte wesentlich aufwendigere Versuchstechniken erfordert.

7 Conclusions

Although final conclusions must remain for the planned comparison of the measurements taking place as soon as all results of the international cooperative study are available, the following general observations may be made:

- (1) At multiaxial compressive tests, failure occurs by extension in the direction of the minimum principal stress.
- (2) The load application technique may influence the test results considerably. Rough (rigid) steel platens show a remarkable amount of restraint in the contact zone to the specimen. They therefore are unfit for triaxial investigations. Only for comparative reasons in very special cases they may be used perhaps.
- (3) As for the determination of deformations of specimens which are subjected to triaxial loading it is rather difficult to perform strain measurements which - at least to a small extent - are not influenced by the measuring technique. This should be taken into account especially in cases of small strain values.
- (4) At triaxial compressive stress states - and especially at those stress states which differ considerably from a biaxial stressing - it is more difficult to determine failure than in cases of biaxial compression.
- (5) The usefulness of the present biaxial tests is higher than that of the triaxial ones. The main reason for this is not a possibly different quality of the performance of the tests. It is rather due to the initial testing program which should have scheduled more triaxial tests at higher stress levels. On the other hand in practice of civil engineering just lower triaxial stress states are of great importance. But in respect to the failure mode of concrete it must be recognized that lower stress levels would lead instead of triaxial compressive loading to combined compressive/tensile stress states. And it is this that would have called for more sophisticated load application techniques.

**Anhang: Bilder und Tabellen
mit Versuchsergebnissen**

**Appendix: Pictures and Tables
with results of test**

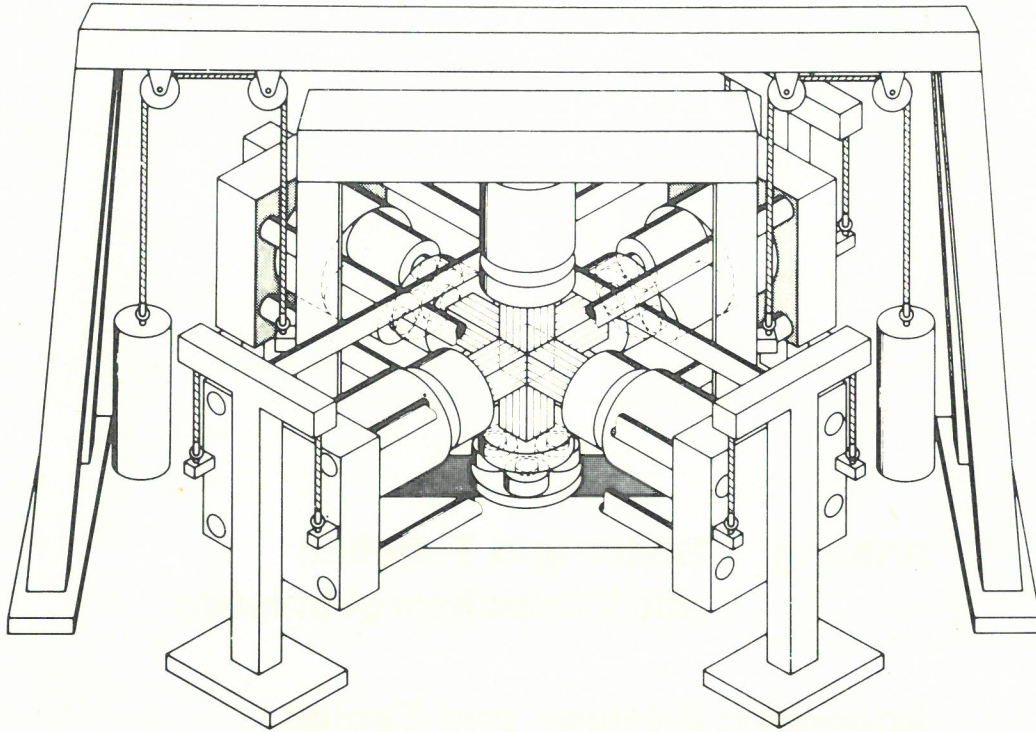


Bild
 Figure 2.1-1
 Dreiachsige Prüfmaschine, Systemskizze
 Triaxial testing machine, diagrammatic sketch

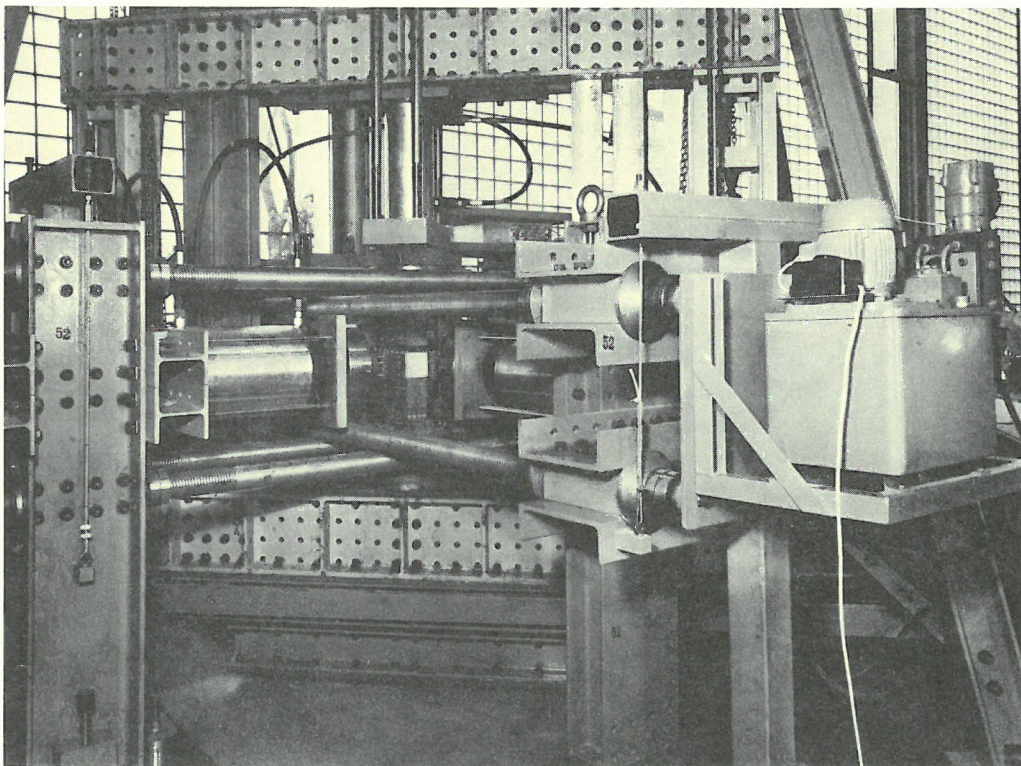


Bild
 Figure 2.1-2
 Dreiachsige Prüfmaschine, Ansicht mit Blick in den Prüfraum
 Triaxial testing machine, close-up with view of the testing space

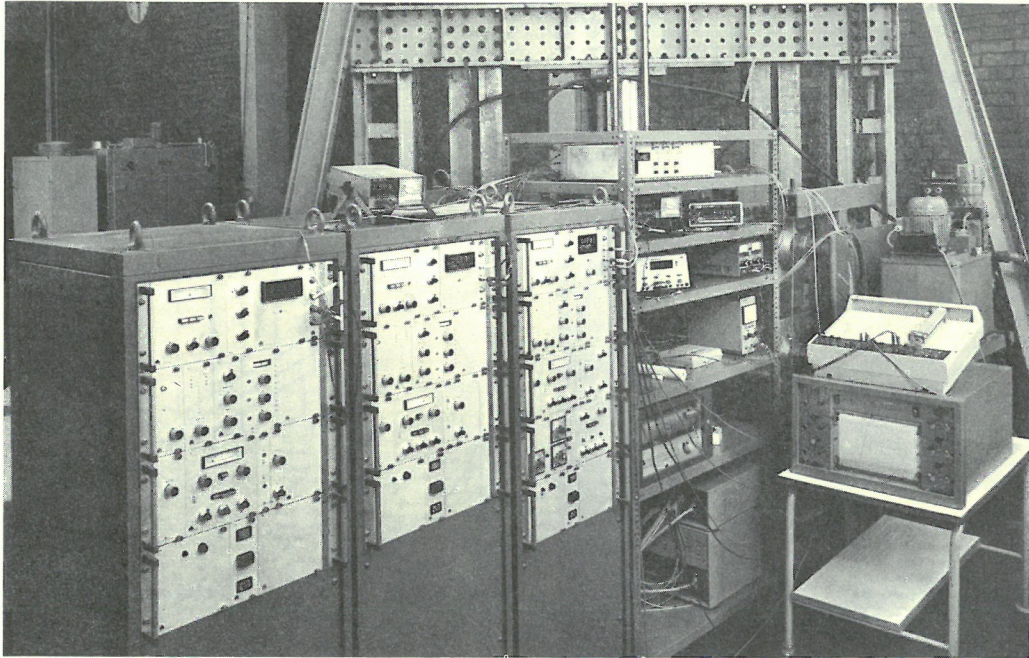


Bild
 Figure 2.2-1
 Elektronische Regeleinrichtung für dreiachsige Prüfmaschine
 Electronic controlling devices for triaxial testing machine

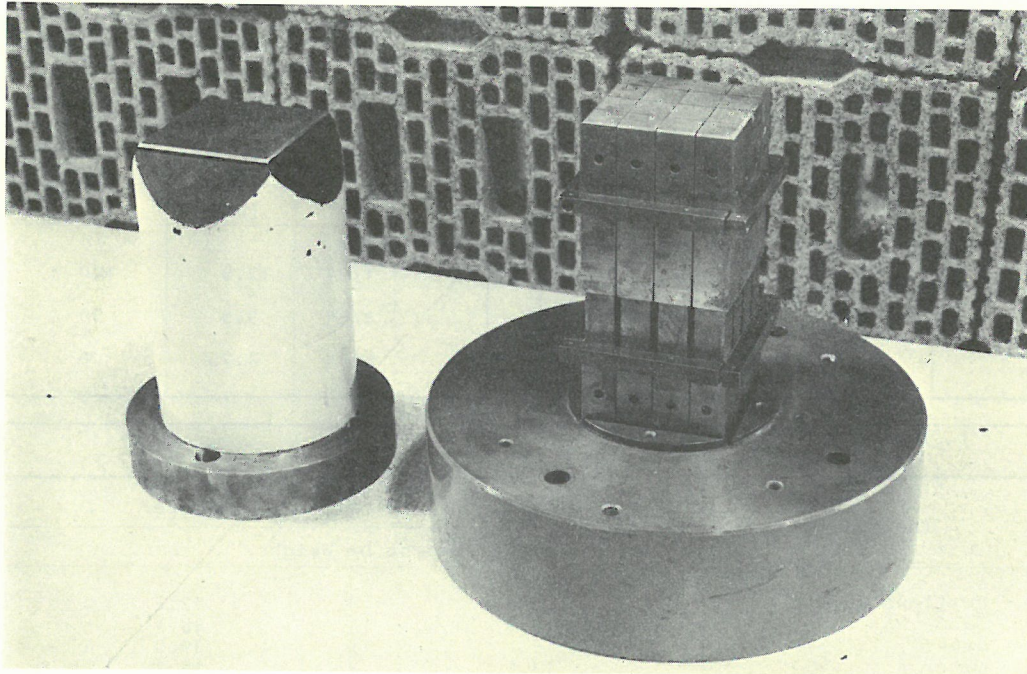


Bild
 Figure 2.3-1
 Druckplatten für dreiachiale Festigkeitsuntersuchungen
 links: starre Druckplatte; rechts: schlaaffe Druckplatte (Stempelsystem)
 Platen for triaxial strength investigations
 left: rough steel platen; right: flexible platen



Bild
Figure 3.1-1
Tripel-Würfelformen der BAM
Tripel-mould of the BAM

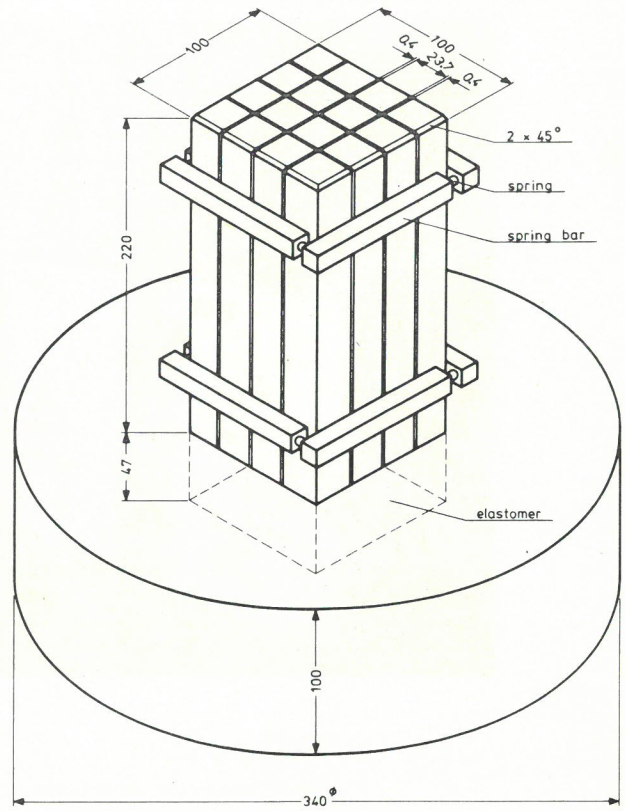


Bild
Figure 2.3-2
Aufbau einer schlaffen Druckplatte
Layout of flexible platens

Fine Aggregate			
	Sieve	Size of Opening	Percentage Passing (by weight)
	No.	[mm]	%
Sand	4	4.75	100
	8	2.36	86.5
	16	1.18	65
	30	0.60	42
	50	0.30	21
	100	0.15	6.5

Coarse Aggregate			
	Sieve	Size of Opening	Percentage Passing (by weight)
	-	[mm]	%
Gravel	1/2"	12.5	100
	3/8"	9.5	50
	No.4	4.75	0

Mix Proportions		
Ingredients	Mortar	Concrete
	Percent by Weight	
Portland cement I	16.4	12.2
Sand	70.0	38.5
Gravel	-	39.0
Water	13.6	10.3
Total	100.0	100.0
Cement/Water Ratio	1.2	1.2
Water/Cement Ratio	0.83	0.84
Cement/Sand Ratio	0.234	0.317

Bild
Figure 3.1-2
Sieblinien der Zuschläge sowie Zusammensetzung der Mörtel- und Betonmischungen
Aggregate grading and proportions for mortar and concrete mixes

Series	Specimen No.	Mass [g]		Change of Mass	
		prior to shipping (with plastic bags)	prior to capping (with plastic bags)	[g]	%
M-1	1		1456		
	2		1452		
	3		1445		
	mean value		1451		
M-2	1		1414		
	2		1427		
	3		1454		
	mean value				
M-3	1		1421		
	2		1414		
	3		1424		
	mean value		1420		
M-4	1		1449		
	2		1427		
	3		1425		
	mean value		1434		
C-1	1	1563	1514	49	3.1
	2	1616	1575	41	2.5
	3	1568	1530	38	2.4
	mean value	1582	1540	43	2.7
C-2	1	1610	1574	36	2.2
	2	1609	1572	37	2.3
	3	1585	1542	43	2.7
	mean value	1601	1563	39	2.4
C-3	1	1600	1558	42	2.6
	2	1590	1549	41	2.6
	3	1587	1547	40	2.5
	mean value	1592	1551	41	2.6
C-4	1	1582	1539	43	2.7
	2	1602	1562	40	2.5
	3	1585	1540	45	2.8
	mean value	1590	1547	43	2.7

Bild
Figure 3.2-1

Änderung der Masse der Kontrollzylinder für die zweiaxialen Versuche
Change of mass of the 3" x 6" control cylinders for the biaxial test program

Series	Specimen No.	Mass [g]		Change of Mass	
		prior to shipping (with plastic bags)	prior to capping (with plastic bags)	[g]	%
T-1	1	1592	1556	36	2.3
	2	1592	1552	40	2.5
	3	1590	1528	62	3.9
	4		1549		
	5		1538		
mean value			1545		
T-2	1	1594	1555	39	2.5
	2	1602	1575	27	1.7
	3	1583	1541	42	2.7
mean value		1593	1557	36	2.3
T-3	1	1587	1540	47	3.0
	2	1597	1569	28	1.8
	3	1596	1570	26	1.6
mean value		1593	1560	34	2.1
T-4	1	1605	1573	32	2.0
	2	1620	1588	32	2.0
	3	1626	1592	34	2.1
mean value		1617	1584	33	2.0
T-5	1	1629	1613	16	1.0
	2	1600	1581	19	1.2
	3	1595	1577	18	1.1
mean value		1608	1590	18	1.1
T-6	1	1616	1589	27	1.7
	2	1602	1579	23	1.4
	3	1616	1598	18	1.1
mean value		1611	1589	23	1.4
T-7	1	1643	1624	19	1.2
	2	1611	1590	21	1.3
	3	1618	1597	21	1.3
mean value		1624	1604	20	1.2
T-8	1	1646	1623	23	1.4
	2	1590	1565	25	1.6
	3	1597	1581	16	1.0
mean value		1611	1590	21	1.3
T-9	1	1605	1587	18	1.1
	2	1571	1555	16	1.0
	3	1584	1566	18	1.1
mean value		1587	1569	17	1.1

Bild
Figure 3.2-2

Änderung der Masse der Kontrollzylinder für die dreiaxialen Versuche
Change of mass of the 3" x 6" control cylinders for the triaxial test program

Material		Mortar				10 cm Cubes				
Designations		BAM		Test Type	Casting		Test Date		Age	
in general	in general				Week	Date	in 1975		at Test	
Series	Specimen	Test Conditions		σ_2/σ_1	in 1974		Test Conditions			
		a	b				a	b	a	b
M - 1	1	750227.001	750305.001	0/3	48	28 Nov 74	27 Febr	5 March	91	97
	2	750228.001	750306.001	1/3			28 Febr	6 March	92	98
	3	750303.001	750305.003	2/3			3 March	5 March	95	97
	4	750303.002	750305.004	3/3			3 March	5 March	95	97
	5	750227.002	750305.002	0/3			27 Febr	5 March	91	97
	6	750228.002	750306.002	1/3			28 Febr	6 March	92	98
M - 2	1	750314.001	750310.001	2/3	48	28 Nov 74	14 March	10 March	106	102
	2	750317.001	750310.003	3/3			17 March	10 March	109	102
	3	750317.003	750311.001	0/3			17 March	11 March	109	103
	4	750318.001	750311.002	1/3			18 March	11 March	110	103
	5	750314.002	750310.002	2/3			14 March	10 March	106	102
	6	750317.002	750310.004	3/3			17 March	10 March	109	102
M - 3	1	750324.001	750401.001	0/3	50	12 Dec 74	24 March	1 April	102	110
	2	750324.003	750404.001	1/3			24 March	4 April	102	113
	3	750325.001	750404.003	2/3			25 March	4 April	103	113
	4	750325.002	750404.004	3/3			25 March	4 April	103	113
	5	750324.002	750401.002	0/3			24 March	1 April	102	110
	6	750324.004	750404.002	1/3			24 March	4 April	102	113
M - 4	1	750417.001	750414.002	2/3	50	12 Dec 74	17 April	14 April	126	123
	2	750415.004	750411.007	3/3			15 April	11 April	124	120
	3	750418.002	750411.008	0/3			18 April	11 April	127	120
	4	750418.003	750411.005	1/3			18 April	11 April	127	120
	5	750417.002	750411.006	2/3			17 April	11 April	126	120
	6	750415.005	750414.001	3/3			15 April	14 April	124	123

test condition for loading: a flexible platens $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0$ compressive stress
b rough steel platens

Bild
Figure 3.2-3
Mörtelwürfel für zweiachiale Versuche
Mortar cubes for biaxial tests

Material		Concrete				10 cm Cubes				
Designations		BAM		Test Type	Casting		Test Date		Age	
in general	in general				Week	Date	in 1975		at Test	
Series	Specimen	Test Conditions		σ_2/σ_1	in 1975		Test Conditions			
		a	b				a	b	a	b
C - 1	1	750422.001	750428.001	0/3	3	16 Jan 75	22 April	28 April	96	102
	2	750424.001	750428.003	1/3			24 April	28 April	98	102
	3	750424.002	750429.002	2/3			24 April	29 April	98	103
	4	750424.003	750429.003	3/3			24 April	29 April	98	103
	5	750422.002	750428.002	0/3			22 April	28 April	96	102
	6	750422.003	750429.001	1/3			22 April	29 April	96	103
C - 2	1	750515.001	750505.001	2/3	4	21 Jan 75	15 May	5 May	114	104
	2	750515.003	750505.003	3/3			15 May	5 May	114	104
	3	750516.003	750505.006	0/3			16 May	5 May	115	104
	4	750516.002	750505.005	1/3			16 May	5 May	116	104
	5	750515.002	750505.002	2/3			15 May	5 May	114	104
	6	750516.001	750505.004	3/3			16 May	5 May	116	104
C - 3	1	750521.001	750528.001	0/3	5	31 Jan 75	21 May	28 May	110	117
	2	750522.002	750529.001	1/3			22 May	29 May	111	118
	3	750522.001	750529.003	2/3			22 May	29 May	111	118
	4	750521.003	750529.004	3/3			21 May	29 May	110	118
	5	750521.002	750528.002	0/3			21 May	28 May	110	117
	6	750523.001	750529.002	1/3			23 May	29 May	112	118
C - 4	1	750606.001	750603.001	2/3	6	6 Febr 75	6 June	3 June	120	117
	2	750606.003	750603.003	3/3			6 June	3 June	120	117
	3	750609.002	750603.006	0/3			9 June	3 June	123	117
	4	750609.001	750603.005	1/3			9 June	3 June	123	117
	5	750606.002	750603.002	2/3			6 June	3 June	120	117
	6	750606.004	750603.004	3/3			6 June	3 June	120	117

test conditions for loading: a flexible platens $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0$ compressive stress
b rough steel platens

Bild
Figure 3.2-4
Betonwürfel für zweiachiale Versuche
Concrete cubes for biaxial tests

Material: Concrete 10 cm Cubes											
Designations				Test Type		Casting		Test Date in 1975		Age at Test -days-	
in general		BAM		Stress Path	Constant Stress Ratio	Week	Date	Test Conditions			
Series	Specimen	Test Conditions						a	a(b), b	a	a(b), b
		a	a(b), b	a	a(b), b			a	a(b), b	a	a(b), b
T-1	1	750930.002	750909.008	X	X			30 Sep	9 Sep	229	208
	2	751002.003	750910.004	X	X			2 Oct	10 Sep	231	209
	3	751008.001	750915.001	X	X			8 Oct	15 Sep	237	214
	4	750925.002	750904.001	X	X			25 Sep	4 Sep	224	203
	5	751021.001	750915.002	X	X			21 Oct	15 Sep	250	214
	6	751021.006	751204.006	X		X		21 Oct	4 Dec	250	294
T-2	1	750926.003	750909.004	X	X			26 Sep	9 Sep	217	200
	2	751209.005	751203.003	X		X	X	9 Dec	3 Dec	291	285
	3	751009.003	751209.001	X		X	X	9 Oct	9 Dec	230	291
	4	751001.003	750909.009	X	X			1 Oct	9 Sep	222	200
	5	751006.001	750910.005	X	X			6 Oct	10 Sep	227	201
	6	751008.002	751210.001	X		X		8 Oct	10 Dec	229	292
T-3	1	750925.003	750908.001	X	X			25 Sep	8 Sep	210	193
	2	751021.002	750915.003	X	X			21 Oct	15 Sep	236	200
	3	751022.001	751205.001	X		X		22 Oct	5 Dec	237	281
	4	750930.001	750909.005	X	X			30 Sep	9 Sep	215	194
	5	751030.001	751203.004	X		X		30 Oct	3 Dec	245	279
	6	751015.001	751209.003	X		X		15 Oct	9 Dec	230	285
T-4	1	751002.001	750910.001	X	X			2 Oct	10 Sep	200	178
	2	751128.001	750911.001	X	X			28 Nov	11 Sep	257	179
	3	751008.003	751210.002	X		X		8 Oct	10 Dec	206	269
	4	750926.001	750909.001	X	X			26 Sep	9 Sep	194	177
	5	751021.003	750915.004	X	X			21 Oct	15 Sep	219	183
	6	751022.002	751205.002	X		X		22 Oct	5 Dec	220	264
T-5	1	751001.001	750909.006	X	X			1 Oct	9 Sep	181	159
	2	751208.001	751203.005	X		X	X	8 Dec	3 Dec	249	244
	3	751016.001	751209.004	X		X		16 Oct	9 Dec	196	250
	4	751002.002	750910.002	X	X			2 Oct	10 Sep	182	160
	5	751128.002	750911.002	X	X			28 Nov	11 Sep	239	161
	6	751009.001	751208.002	X		X		9 Oct	8 Dec	189	249
T-6	1	750926.002	750909.002	X	X			26 Sep	9 Sep	169	152
	2	751021.004	750915.005	X	X			21 Oct	15 Sep	194	158
	3	751022.003	751217.002	X		X		22 Oct	17 Dec	195	251
	4	751001.002	750909.007	X	X			1 Oct	9 Sep	174	152
	5	751021.005	751202.001	X		X		21 Oct	2 Dec	194	236
	6	751009.002	751218.001	X		X		9 Oct	18 Dec	182	252
T-7	1	750922.001	750910.003	X	X			22 Sep	10 Sep	158	146
	2	750923.001	750911.003	X	X			23 Sep	11 Sep	159	147
	3	750923.002	751208.003	X		X		23 Sep	8 Dec	159	235
	4	750923.003	750909.003	X	X			23 Sep	9 Sep	159	145
	5	750923.004	750915.006	X	X			23 Sep	15 Sep	159	151
	6	750925.001	751217.003	X		X		25 Sep	17 Dec	161	244
T-8	1	751016.002	751216.001	X	X			16 Oct	16 Dec	175	236
	2	751016.003	751202.002	X		X		16 Oct	2 Dec	175	222
	3	751016.004	751218.002	X		X		16 Oct	18 Dec	175	239
	4	751016.005	751216.004	X	X			16 Oct	16 Dec	175	236
	5	751201.001	751216.005	X	X			1 Dec	16 Dec	221	236
	6	751017.001	751208.004	X		X		17 Oct	8 Dec	176	228
T-9	1	751103.001	751216.003	X	X			3 Nov	16 Dec	183	226
	2	751205.003	751210.003	X		X	X	5 Dec	10 Dec	215	220
	3	751103.002	751217.004	X		X		3 Nov	17 Dec	183	227
	4	751031.002	751216.002	X	X			31 Oct	16 Dec	180	226
	5	751031.001	751203.001	X		X		31 Oct	3 Dec	180	213
	6	751127.001	751218.003	X		X		27 Nov	18 Dec	207	228

test conditions for loading: a flexible platens
a(b) flexible platens, specimens firstly provided for tests with rough steel platens
b rough steel platens

Bild
Figure 3.2-5/6
Betonwürfel für dreiaxiale Versuche
Concrete cubes for triaxial tests

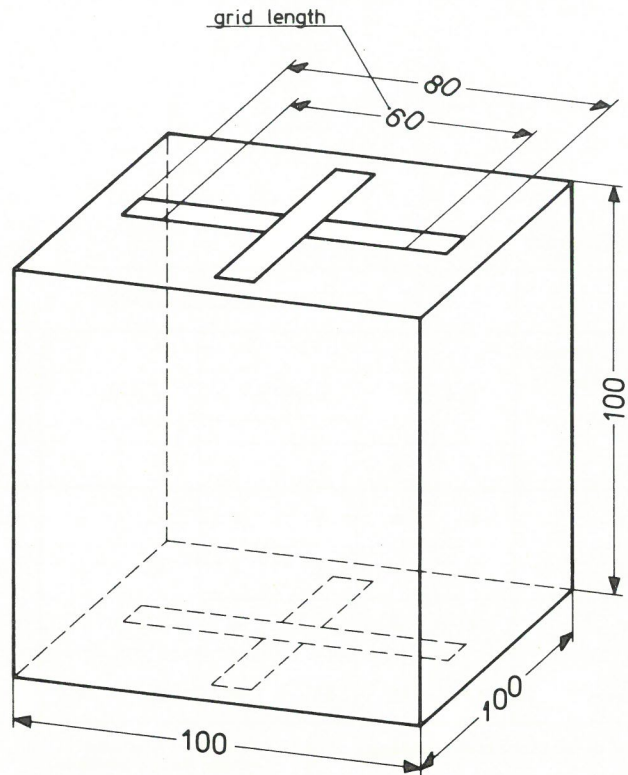


Bild
 Figure 3.3-1
 Anordnung der Dehnungsmeßstreifen bei zwei axialen
 Versuchen
 Cube with strain gauges for biaxial tests

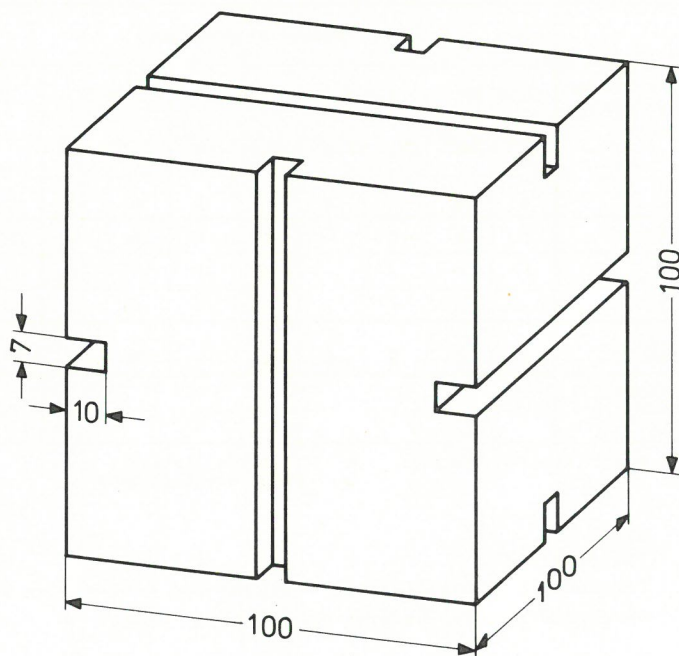


Bild
 Figure 3.3-2
 Nuten auf den Würfeloberflächen zur Aufnahme von
 Dehnungsmeßstreifen bei dreiaxialen Versuchen
 Grooves on cube surfaces assigned for strain
 gauges

Testing Program (planned)

		Number of Specimens							
Hydr. Stress $G_1 = G_2 = G_3$	Stress Path No.	0.5 fc'		0.75 fc'		1.0 fc'		Total	
		a	b	a	b	a	b	a	b
	1	6	6	6	6	6	6	18	18
	2	6	6	6	6	6	6	18	18
	3	6	6	6	6	6	6	18	18
	Total Number	18	18	18	18	18	18	54	54

test conditions for loading: a flexible platens
b rough steel platens

Bild
Figure 4.2-1

Ursprüngliches Versuchsprogramm für dreiaxiale Versuche
Planned testing program for triaxial tests

Testing Program (performed)

		Number of Specimens									
Hydr. Stress $G_1 = G_2 = G_3$	Stress Path No.	0.75 fc'		1.0 fc'		1.25 fc'		1.5 fc'		Total	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
	1	6	6	6	6	6	6	6	6	24	24
	2	-	-	3	-	6	1	6	5	15	6
	3	-	-	-	-	6	-	6	-	12	-
	Total Number	6	6	9	6	18	7	18	11	51	30
Constant Stress Ratio	a	21								72	36
	b	6									

test conditions for loading: a flexible platens
b rough steel platens

Bild
Figure 4.2-2

Tatsächlich durchgeführtes Programm der dreiaxialen Versuche
Performed testing program for triaxial tests

Stress path 1	Stress path 2	Stress path 3	Stress path 4
if $\sigma_1 > \sigma_0'$ then $\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3 = 0$			-
$\Delta \sigma_1 > 0$ $\Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3$ $= -\frac{1}{2} \Delta \sigma_1$	$\Delta \sigma_1 > 0$ $\Delta \sigma_2 = 0$ $\Delta \sigma_3 = -\Delta \sigma_1$	$\Delta \sigma_1 = \Delta \sigma_2 > 0$ $\Delta \sigma_3 = -2 \Delta \sigma_1$ $= -2 \Delta \sigma_2$	$\Delta \sigma_1 > \Delta \sigma_2 > \Delta \sigma_3$ $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \text{const}$ $\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \text{const}$

$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ compressive stress

σ_0' = preset hydrostatic stress level ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$)

Bild
Figure 4.2-3

Beanspruchungsverlauf nach Spannungspfaden bei dreiaxialen Versuchen
Stress paths for triaxial loading

Designation of Trial.....		Test Conditions.....										Load Path.....				
-	Stress State	Principal Stresses				Strains								Octahedral Stresses		
						Strain Gauges				Inductive Transducers						
		σ_1	σ_2	σ_3	$\Sigma \sigma$	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_{vol}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_{vol}	σ_o	τ_o	
Measured Values	Basic Load															
	during loading up to 50 readings of each measured variable					left	right	in front	at the back	above	below					
Interpolated Values	Ultimate Load															
	Load Steps of 20 kN															
	Load Steps of 5% of Ultimate Load															

Bild
Figure 6.0-1

Vereinfachtes Schema zur Form, in der die Versuchsergebnisse auf Magnetband gespeichert sind
Simplified list to show the way the results of test are registered on magnetic tapes

Series	Specimen No.	Dimensions [mm]		Mass ^{+) [g]}	Density [g/cm ³] ⁺⁺⁾	Total Load at Fracture [kN]	Ultimate Stress [N/mm ²] ⁺⁺⁾	
		Diameter	Height ^{+) [mm]}				Single	Mean
M - 1	1	75	155	1447	2.11	180	40.7	40.7
	2	75	155	1443	2.11	181	41.0	
	3	75	155	1436	2.10	179	40.5	
M - 2	1	76	150	1406	2.07	145	32.0	34.8
	2	76	152	1419	2.06	159	35.0	
	3	76	154	1445	2.07	169	37.3	
M - 3	1	75	153	1413	2.09	166	37.6	37.8
	2	75	154	1406	2.07	165	37.3	
	3	75	154	1415	2.08	170	38.5	
M - 4	1	76	153	1440	2.07	165	36.4	35.1
	2	76	152	1419	2.06	157	34.6	
	3	76	151	1416	2.07	156	34.4	
C - 1	1	76	152	1506	2.18	149	32.8	32.7
	2	76	155	1568	2.23	148	32.6	
	3	76	153	1522	2.19	118	(26.0)	
C - 2	1	75	155	1566	2.29	155	35.1	33.4
	2	76	155	1563	2.22	150	33.1	
	3	75	153	1534	2.27	142	32.1	
C - 3	1	76	155	1549	2.20	164	36.2	35.5
	2	76	154	1541	2.21	169	37.3	
	3	76	154	1539	2.20	150	33.1	
C - 4	1	76	152	1530	2.22	164	36.2	36.0
	2	76	153	1553	2.24	164	36.2	
	3	76	153	1531	2.21	161	35.5	

^{+) immediately prior to capping with a sulfur compound}

^{++) age at test: tested synchronously to the corresponding cubes}

Bild
Figure 6.1-1

Druckfestigkeit der Standardzylinder der zwei axialen Versuchsserie
Compressive strength of standard cylinders, biaxial series of test

Series	Specimen No.	Dimensions mm		Mass ^{+) [g]}	Density [g/cm ³] ⁺⁺⁾	Total Load at Fracture [kN]	Ultimate Stress [N/mm ²] ⁺⁺⁾	
		Diameter	Height				Single	Mean
T-1	1	76	153	1547	2.23	160	35.3	33.4
	2	76	154	1544	2.21	148	32.6	
	3	76	152	1519	2.20	148	32.6	
	4	76	153	1541	2.22	151	33.3	
	5	75	154	1529	2.25	146	33.0	
T-2	1	76	154	1540	2.20	159	35.0	34.7
	2	76	154	1553	2.22	155	34.2	
	3	76	153	1527	2.20	159	35.0	
T-3	1	76	154	1529	2.19	144	31.7	32.1
	2	76	153	1551	2.23	150	33.1	
	3	76	153	1554	2.24	152	33.5	
T-4	1	76	155	1562	2.22	151	33.3	34.5
	2	76	154	1574	2.25	157	34.6	
	3	76	153	1577	2.27	161	35.5	
T-5	1	76	154	1585	2.27	146	32.2	32.9
	2	76	154	1557	2.23	151	33.3	
	3	76	153	1551	2.23	151	33.3	
T-6	1	76	155	1567	2.23	148	32.6	33.3
	2	76	153	1562	2.25	149	32.8	
	3	76	154	1579	2.26	156	34.4	
T-7	1	76	154	1601	2.29	166	36.6	37.7
	2	76	154	1567	2.24	173	38.1	
	3	76	153	1576	2.27	174	38.4	
T-8	1	76	153	1586	2.29	174	38.4	37.7
	2	76	153	1530	2.20	178	39.2	
	3	75	154	1537	2.26	159	36.0	
T-9	1	76	152	1545	2.24	170	37.5	38.5
	2	75	151	1516	2.27	170	38.5	
	3	75	151	1524	2.28	174	39.4	

^{+) immediately before capping with a sulfur compound}

^{++) age at test: tested synchronously to the corresponding cubes}

Bild
Figure 6.1-2

Druckfestigkeit der Standardzylinder der drei axialen Versuchsserie
Compressive strength of standard cylinders, triaxial series of test

Load Application Device	Material	$\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	Test Results			
			Number		Mean Strength	Stand. Dev.
			Stress	Strain	[N/mm ²]	
Flexible Platens	Mortar	0/3	6	6	29.1	1.61
		1/3	6	6	37.5	0.91
		2/3	6	6	37.6	2.07
		3/3	6	6	34.2	1.28
	Concrete	0/3	6	5	30.6	1.47
		1/3	6	6	43.1	2.65
		2/3	6	6	42.6	4.34
		3/3	6	6	37.1	3.70
Rough Steel Platens	Mortar	0/3	6	5	33.8	1.70
		1/3	6	5	44.3	2.77
		2/3	6	6	47.9	3.80
		3/3	6	6	47.5	1.59
	Concrete	0/3	6	6	38.0	1.27
		1/3	6	6	57.1	2.08
		2/3	6	6	66.2	1.63
		3/3	6	6	63.5	2.19

Bild
Figure 6.3-1
Mittlere zweiachiale Druckfestigkeitsergebnisse
Mean strength results of biaxial compressive tests

Material		Mortar	10 cm Cubes	
Test Conditions		Flexible Platens		
Designations		Ultimate Stress [N/mm ²]		$\sigma_1 : \sigma_2$
Series	Specimen	σ_1	σ_2	
M - 1a	1	30.3		1 : 0
M - 1a	5	31.7		
M - 2a	3	28.6	0	
M - 3a	1	28.4		
M - 3a	5	27.2		
M - 4a	3	28.4		
mean		29.1	0	
standard deviation		1.61	0	—
M - 1a	2	36.6	12.6	1 : 0.34
M - 1a	6	36.9	13.0	1 : 0.35
M - 2a	4	38.9	13.2	1 : 0.34
M - 3a	2	37.6	12.7	1 : 0.34
M - 3a	6	36.8	12.4	1 : 0.34
M - 4a	4	38.2	13.0	1 : 0.34
mean		37.5	12.8	1 : 0.34
standard deviation		0.91	0.30	—
M - 1a	3	40.4	26.9	1 : 0.67
M - 2a	1	37.1	24.6	1 : 0.66
M - 2a	5	37.1	24.7	1 : 0.67
M - 3a	3	34.8	23.1	1 : 0.66
M - 4a	1	36.5	25.0	1 : 0.68
M - 4a	5	39.6	27.5	1 : 0.69
mean		37.6	25.3	1 : 0.67
standard deviation		2.07	1.62	—
M - 1a	4	35.8	36.1	1 : 1.01
M - 2a	2	34.3	34.5	1 : 1.01
M - 2a	6	33.8	34.0	1 : 1.01
M - 3a	4	35.3	35.3	1 : 1.00
M - 4a	2	33.7	33.4	1 : 0.99
M - 4a	6	32.2	32.5	1 : 1.01
mean		34.2	34.3	1 : 1.00
standard deviation		1.28	1.30	—

$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0$ compressive stress
loading: constant stress rate

Bild
Figure 6.3-2

Zweiachiale Druckfestigkeit von Mörtelwürfeln bei Prüfung mit schlaffen Druckplatten
Biaxial strength of mortar cubes tested with flexible platens

Material		Concrete		10 cm Cubes	
Test Conditions		Flexible Platens			
Designations		Ultimate Stress [N/mm ²]		$\sigma_1 : \sigma_2$	
Series	Specimen	σ_1	σ_2		
C - 1a	1	32.7		1 : 0	
C - 1a	5	29.1			
C - 2a	3	30.0	0		
C - 3a	1	32.2			
C - 3a	5	30.0			
C - 4a	3	29.7			
mean		30.6	0	1 : 0	
standard deviation		1.47	0	—	
C - 1a	2	44.5	14.9	1 : 0.33	
C - 1a	6	45.3	15.3	1 : 0.34	
C - 2a	4	41.3	13.8	1 : 0.33	
C - 3a	2	44.0	14.1	1 : 0.32	
C - 3a	6	45.1	14.5	1 : 0.32	
C - 4a	4	38.6	12.3	1 : 0.32	
mean		43.1	14.2	1 : 0.33	
standard deviation		2.65	1.05	—	
C - 1a	3	48.5	32.6	1 : 0.67	
C - 2a	1	46.5	31.1	1 : 0.67	
C - 2a	5	39.7	26.5	1 : 0.67	
C - 3a	3	38.0	25.2	1 : 0.66	
C - 4a	1	43.9	27.9	1 : 0.64	
C - 4a	5	39.0	26.0	1 : 0.67	
mean		42.6	28.2	1 : 0.66	
standard deviation		4.34	2.99	—	
C - 1a	4	43.3	43.3	1 : 1.00	
C - 2a	2	39.0	38.5	1 : 0.99	
C - 2a	6	36.1	36.1	1 : 1.00	
C - 3a	4	36.6	36.6	1 : 1.00	
C - 4a	2	35.6	35.6	1 : 1.00	
C - 4a	6	32.3	32.3	1 : 1.00	
mean		37.1	37.1	1 : 1.00	
standard deviation		3.70	3.66	—	

$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0$ compressive stress
loading: constant stress rate

Bild
Figure 6.3-3

Zweiachiale Druckfestigkeit von Betonwürfeln bei Prüfung mit schlaffen Druckplatten
Biaxial strength of concrete cubes tested with flexible platens

Material		Mortar	10 cm Cubes	
Test Conditions		Rough Steel Platens		
Designations		Ultimate Stress [N/mm ²]		$\sigma_1 : \sigma_2$
Series	Specimen	σ_1	σ_2	
M - 1b	1	34.8		1 : 0
M - 1b	5	33.9		
M - 2b	3	33.2	0	
M - 3b	1	36.5		
M - 3b	5	32.6		
M - 4b	3	31.7		
mean		33.8	0	1 : 0
standard deviation		1.70	0	—
M - 1b	2	45.8	15.7	1 : 0.34
M - 1b	6	45.6	15.5	1 : 0.34
M - 2b	4	41.6	14.2	1 : 0.34
M - 3b	2	41.5	14.1	1 : 0.34
M - 3b	6	48.5	16.3	1 : 0.34
M - 4b	4	43.0	14.4	1 : 0.33
mean		44.3	15.0	1 : 0.34
standard deviation		2.77	0.92	—
M - 1b	3	50.8	33.8	1 : 0.67
M - 2b	1	45.0	29.8	1 : 0.66
M - 2b	5	43.3	28.9	1 : 0.67
M - 3b	3	50.0	34.1	1 : 0.68
M - 4b	1	52.8	34.8	1 : 0.66
M - 4b	5	45.5	30.0	1 : 0.66
mean		47.9	31.9	1 : 0.67
standard deviation		3.80	2.60	—
M - 1b	4	49.0	49.0	1 : 1.00
M - 2b	2	45.6	45.6	1 : 1.00
M - 2b	6	47.0	47.0	1 : 1.00
M - 3b	4	46.0	46.4	1 : 1.01
M - 4b	2	48.0	47.8	1 : 1.00
M - 4b	6	49.5	49.0	1 : 0.99
mean		47.5	47.5	1 : 1.00
standard deviation		1.59	1.39	—

$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0$ compressive stress
loading: constant stress rate

Bild
Figure 6.3-4

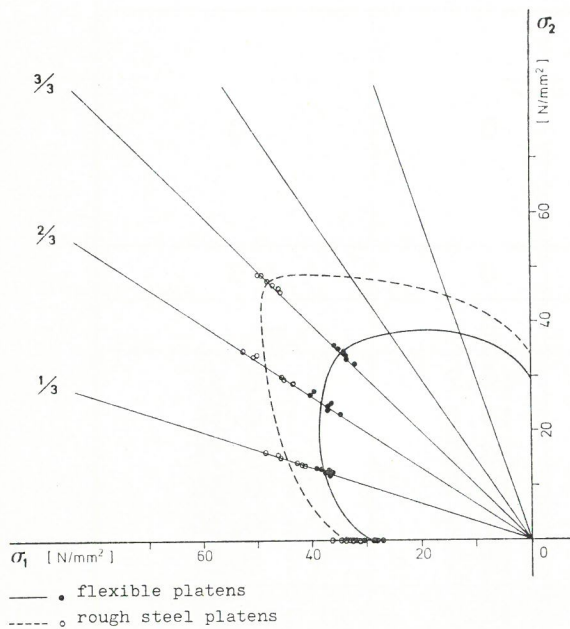
Zweiachiale Druckfestigkeit von Mörtelwürfeln bei Prüfung mit starren Druckplatten
Biaxial strength of mortar cubes tested with rough steel platens

Material		Concrete	10 cm Cubes	
Test Conditions		Rough Steel Platens		
Designations		Ultimate Stress [N/mm ²]		$G_1 : G_2$
Series	Specimen	G_1	G_2	
C - 1b	1	37.2		1 : 0
C - 1b	5	38.8		
C - 2b	3	38.1	0	
C - 3b	1	38.5		
C - 3b	5	36.0		
C - 4b	3	39.6		
mean		38.0	0	
standard deviation		1.27	0	—
C - 1b	2	54.4	18.2	1 : 0.33
C - 1b	6	56.6	19.0	1 : 0.34
C - 2b	4	59.9	20.2	1 : 0.34
C - 3b	2	55.2	16.4	1 : 0.30
C - 3b	6	58.1	17.7	1 : 0.30
C - 4b	4	58.4	18.1	1 : 0.31
mean		57.1	18.3	1 : 0.32
standard deviation		2.08	1.27	—
C - 1b	3	66.7	44.8	1 : 0.67
C - 2b	1	68.6	46.0	1 : 0.67
C - 2b	5	67.2	45.4	1 : 0.68
C - 3b	3	65.0	42.0	1 : 0.65
C - 4b	1	66.0	42.9	1 : 0.65
C - 4b	5	64.0	43.0	1 : 0.67
mean		66.2	44.0	1 : 0.67
standard deviation		1.63	1.60	—
C - 1b	4	62.0	62.0	1 : 1.00
C - 2b	2	60.4	60.6	1 : 1.00
C - 2b	6	65.2	65.2	1 : 1.00
C - 3b	4	66.0	66.0	1 : 1.00
C - 4b	2	65.0	65.0	1 : 1.00
C - 4b	6	62.6	62.6	1 : 1.00
mean		63.5	63.6	1 : 1.00
standard deviation		2.19	2.14	—

$G_1 \geq G_2 \geq 0$ compressive stress
loading: constant stress rate

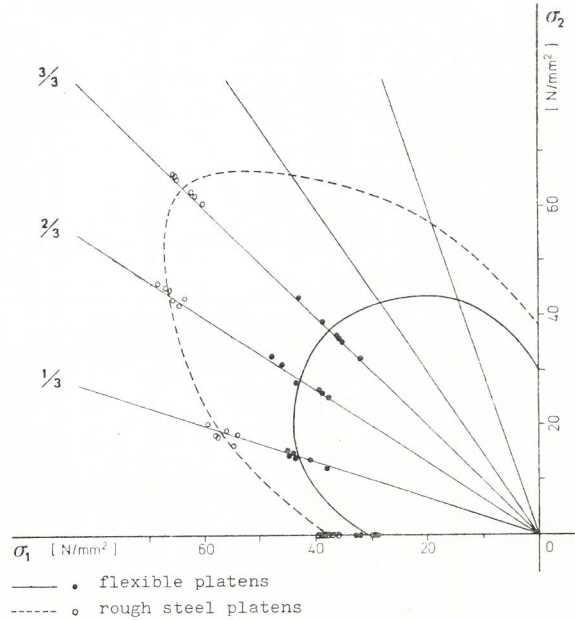
Bild
Figure 6.3-5

Zweiaxiale Druckfestigkeit von Betonwürfeln bei Prüfung mit starren Druckplatten
Biaxial strength of concrete cubes tested with rough steel platens



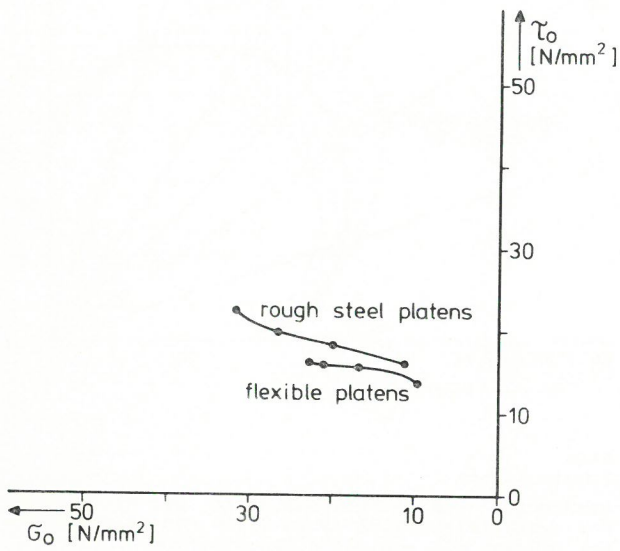
mean uniaxial cylinder strength: 37.1 N/mm^2
 mean uniaxial cube strength (flexible platens): 29.1 N/mm^2
 uniaxial strength ratio
 flexible platens : rough steel platens = 0.86

Bild
 Figure 6.3-6
 Grenzlinien der Druckfestigkeit von Mörtelwürfeln
 in der Spannungsebene σ_1 - σ_2
 Strength envelopes for mortar cubes in σ_1 - σ_2 space



mean uniaxial cylinder strength: 34.5 N/mm^2
 mean uniaxial cube strength (flexible platens): 30.6 N/mm^2
 uniaxial strength ratio
 flexible platens : rough steel platens = 0.81

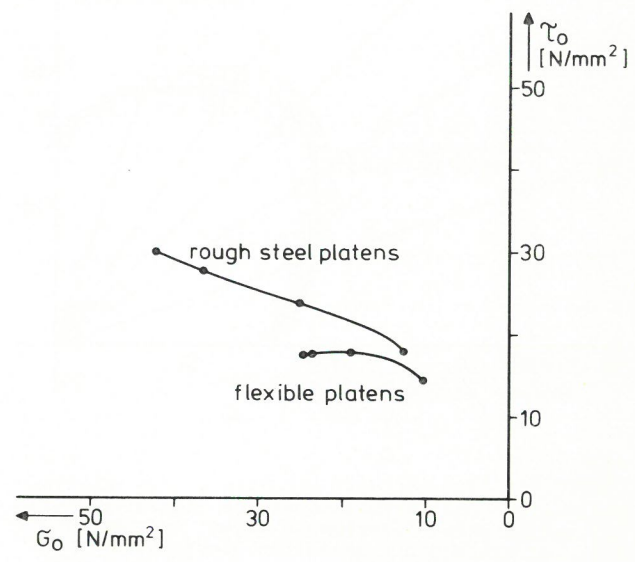
Bild
 Figure 6.3-7
 Grenzlinien der Druckfestigkeit von Betonwürfeln
 in der Spannungsebene σ_1 - σ_2
 Strength envelopes for concrete cubes in
 σ_1 - σ_2 space



$$\sigma_o = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{3} \quad \tau_o = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2}$$

Number of Specimens	Test Type σ_2/σ_1	Octahedral Stresses [N/mm ²]	
		σ_o	τ_o
Flexible Platens			
6	0/3	9.7	13.7
6	1/3	16.8	15.6
6	2/3	21.0	15.7
6	3/3	22.8	16.1
Rough Steel Platens			
6	0/3	11.3	15.9
6	1/3	19.8	18.4
6	2/3	26.6	19.9
6	3/3	31.7	22.4

Bild
Figure 6.3-8
Zweiachsale Druckfestigkeit von Mörtelwürfeln in Oktaederdarstellung
Biaxial strength of mortar cubes in terms of octahedral stresses



$$\sigma_o = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{3} \quad \tau_o = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2}$$

Number of Specimens	Test Type σ_2/σ_1	Octahedral Stresses [N/mm ²]	
		σ_o	τ_o
Flexible Platens			
6	0/3	10.2	14.4
6	1/3	19.1	17.9
6	2/3	23.6	17.7
6	3/3	24.7	17.5
Rough Steel Platens			
6	0/3	12.7	17.9
6	1/3	25.1	23.8
6	2/3	36.7	27.5
6	3/3	42.4	30.0

Bild
Figure 6.3-9
Zweiachsale Druckfestigkeit von Betonwürfeln in Oktaederdarstellung
Biaxial strength of concrete cubes in terms of octahedral stresses

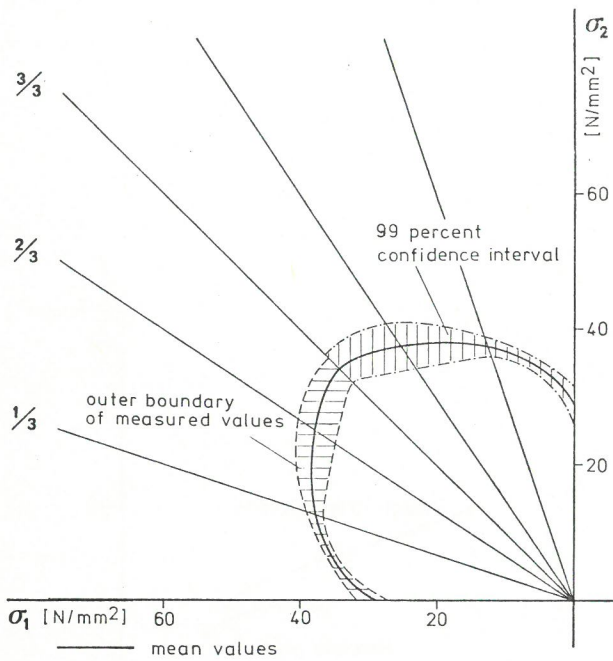


Bild
Figure 6.3-10

Spannweite und Vertrauensbereich der Mittelwerte der zweiaxialen Druckfestigkeiten von Mörtelwürfeln bei Prüfung mit schlaffen Druckplatten

Variation of biaxial strength results of mortar cubes, tested with flexible platens

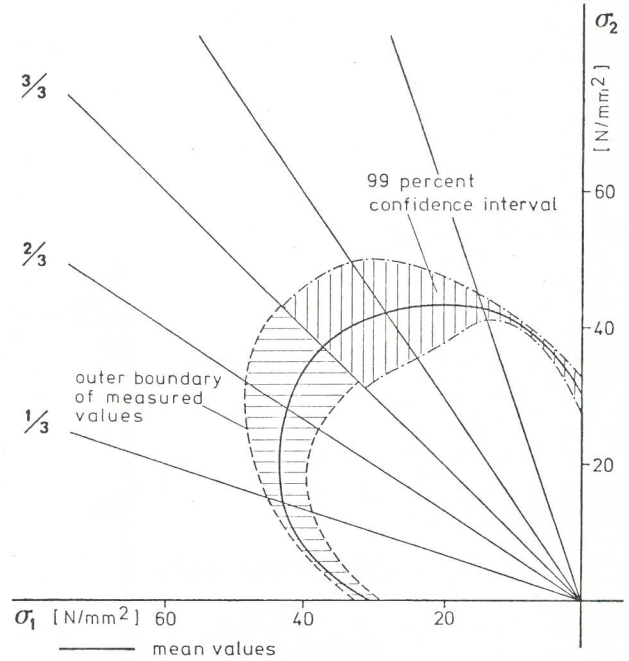


Bild
Figure 6.3-11

Spannweite und Vertrauensbereich der Mittelwerte der zweiaxialen Druckfestigkeiten von Betonwürfeln bei Prüfung mit schlaffen Druckplatten

Variation of biaxial strength results of concrete cubes, tested with flexible platens

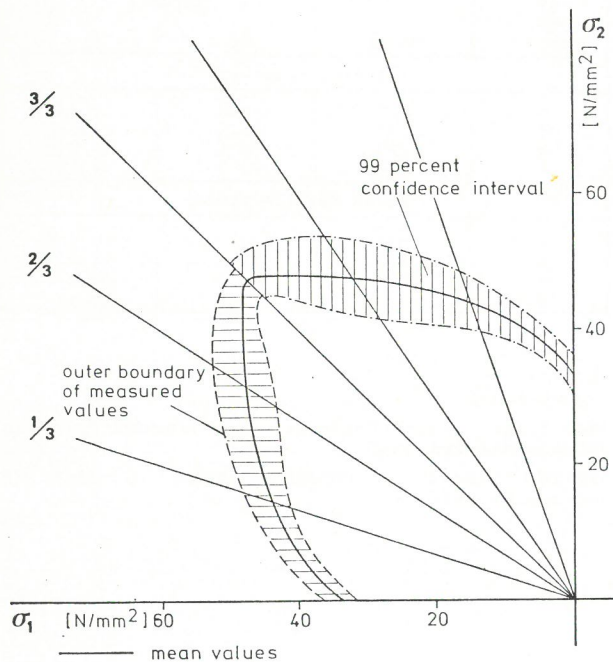


Bild
Figure 6.3-12

Spannweite und Vertrauensbereich der Mittelwerte der zweiaxialen Druckfestigkeiten von Mörtelwürfeln bei Prüfung mit starren Druckplatten

Variation of biaxial strength results of mortar cubes, tested with rough steel platens

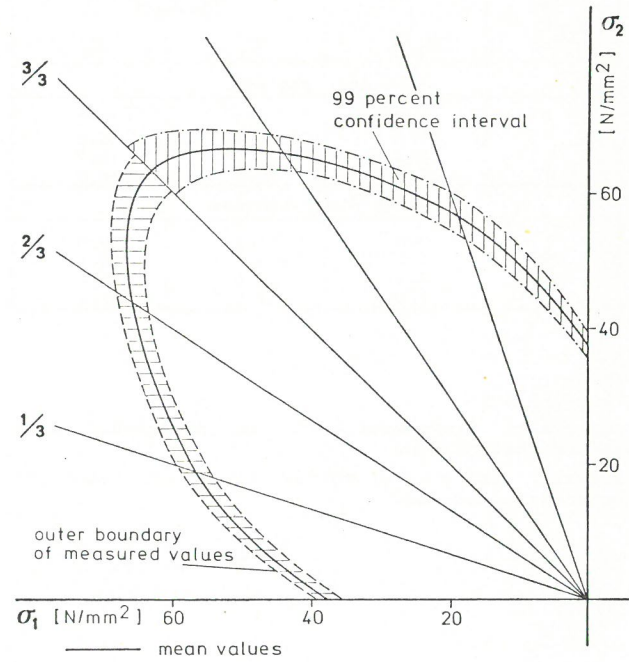


Bild
Figure 6.3-13

Spannweite und Vertrauensbereich der Mittelwerte der zweiaxialen Druckfestigkeiten von Betonwürfeln bei Prüfung mit starren Druckplatten

Variation of biaxial strength results of concrete cubes, tested with rough steel platens

Load Application	Material	$\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	Biaxial Cube Strength *) [N/mm ²]						Coeff. of Var. %
			Mean	Stand. Dev.	Min. Value	Max. Value	99% Confidence Interval		
Flexible Platens	Mortar	0/3	29.1	1.61	27.2	31.7	26.4	31.8	5.5
		1/3	37.5	0.91	36.6	38.9	36.0	39.0	2.4
		2/3	37.6	2.07	34.8	40.4	34.2	41.0	5.5
	3/3	34.2	1.28	32.2	35.8	32.1	36.3	3.1	
	Concrete	0/3	30.6	1.47	29.1	32.7	28.2	33.0	4.8
		1/3	43.1	2.65	38.6	45.3	38.7	47.5	6.1
2/3		42.6	4.34	38.0	48.5	35.5	49.7	10.2	
3/3		37.1	3.70	32.3	43.3	31.0	43.2	10.0	
Rough Steel Platens	Mortar	0/3	33.8	1.70	31.7	36.5	31.0	36.6	5.0
		1/3	44.3	2.77	41.5	48.5	39.7	48.9	6.3
		2/3	47.9	3.80	43.3	52.8	41.6	54.2	7.9
		3/3	47.5	1.59	45.6	49.5	44.9	50.1	3.3
	Concrete	0/3	38.0	1.27	36.0	39.6	35.9	40.1	3.3
		1/3	57.1	2.08	54.4	59.9	53.7	60.5	3.6
		2/3	66.2	1.63	64.0	68.6	63.5	68.9	2.5
		3/3	63.5	2.19	60.4	66.0	59.9	67.1	3.4

*) for all data
six fold replication (N=6)

Bild
Figure 6.3-14
Streuung der zwei axialen Festigkeitswerte
Scatter of biaxial strength results

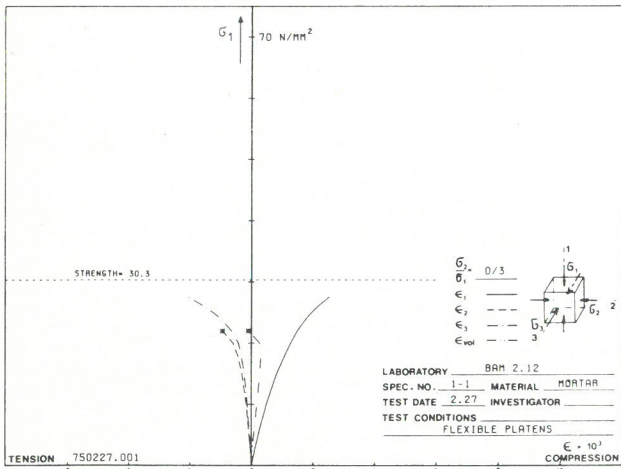


Bild
Figure 6.4-1a

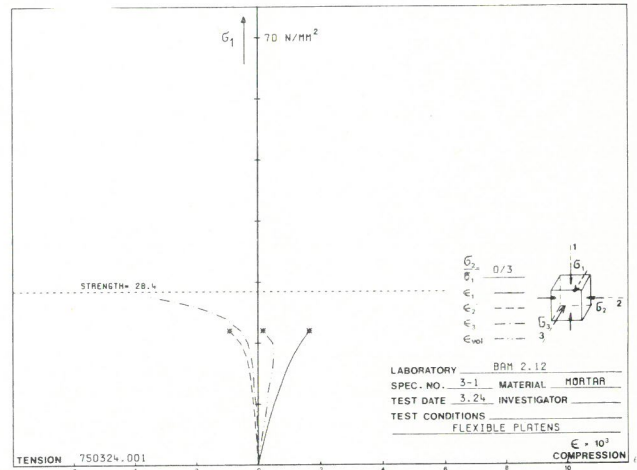


Bild
Figure 6.4-1d

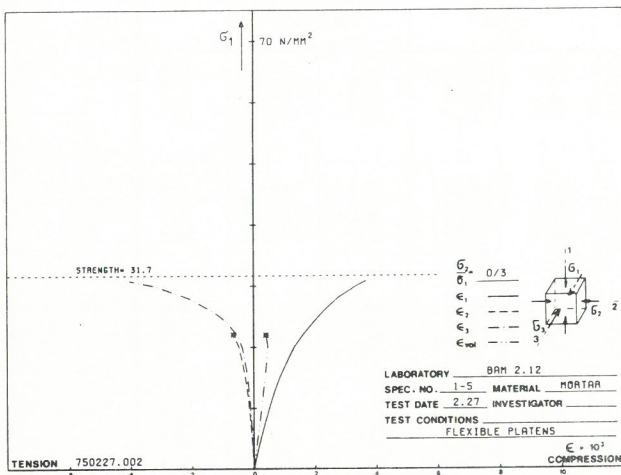


Bild
Figure 6.4-1b

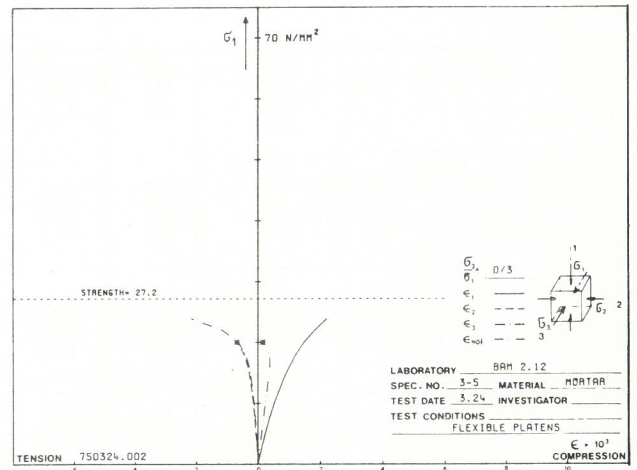


Bild
Figure 6.4-1e

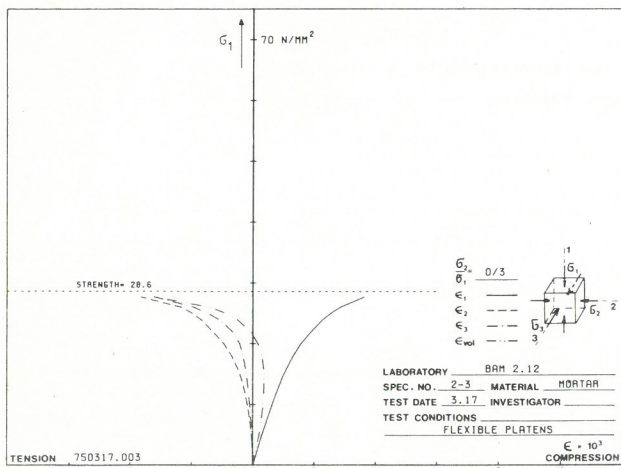


Bild
Figure 6.4-1c

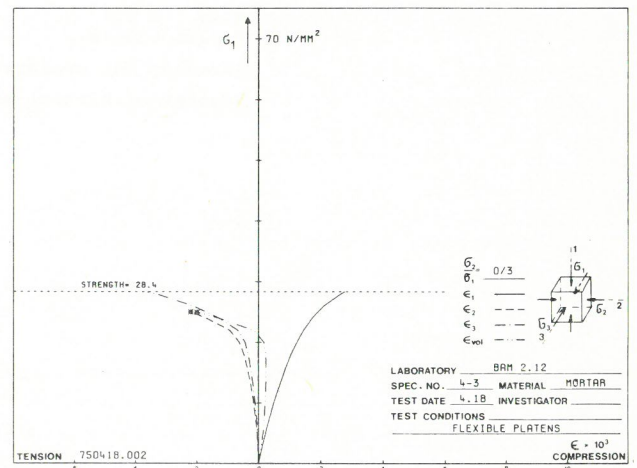


Bild
Figure 6.4-1f

$$G_2/G_1 = 0/3$$

Bilder
Figures 6.4-1a...f

Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten
Stress-strain behaviour of mortar, tested biaxially with flexible platens

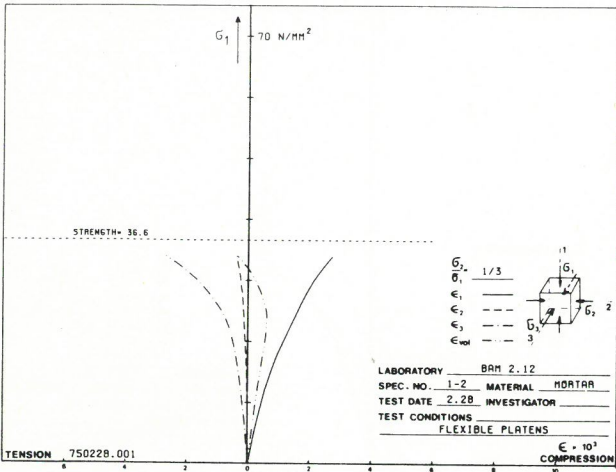


Bild
Figure 6.4-2a

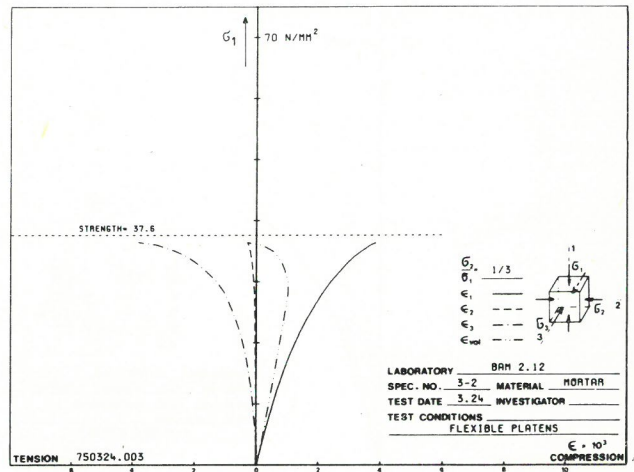


Bild
Figure 6.4-2d

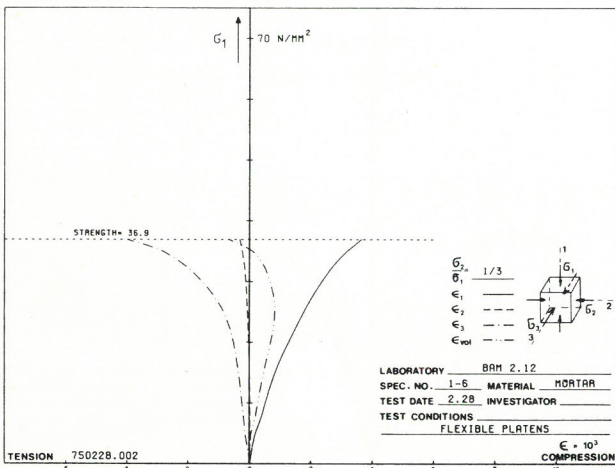


Bild
Figure 6.4-2b

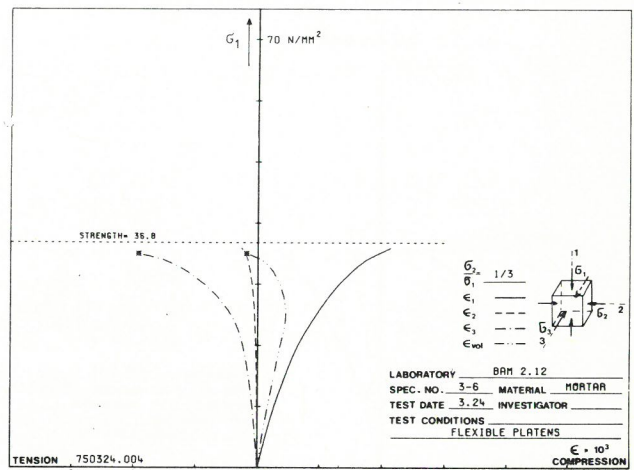


Bild
Figure 6.4-2e

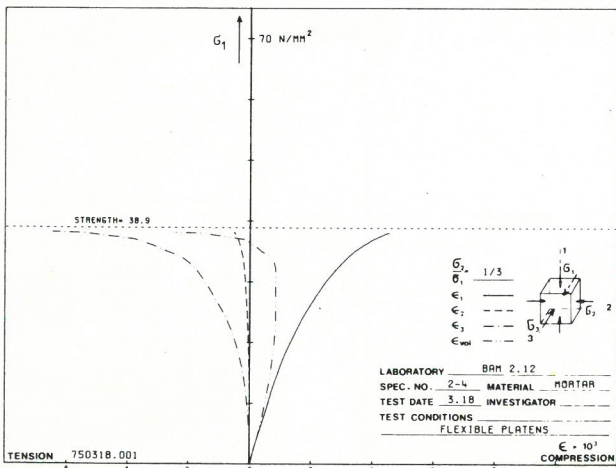


Bild
Figure 6.4-2c

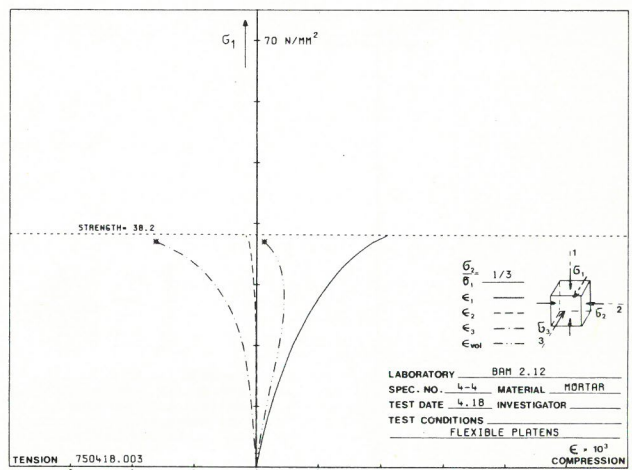


Bild
Figure 6.4-2f

$$G_2/G_1 = 1/3$$

Bilder
Figures 6.4-2a...f

Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachsialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten
 Stress-strain behaviour of mortar, tested biaxially with flexible platens

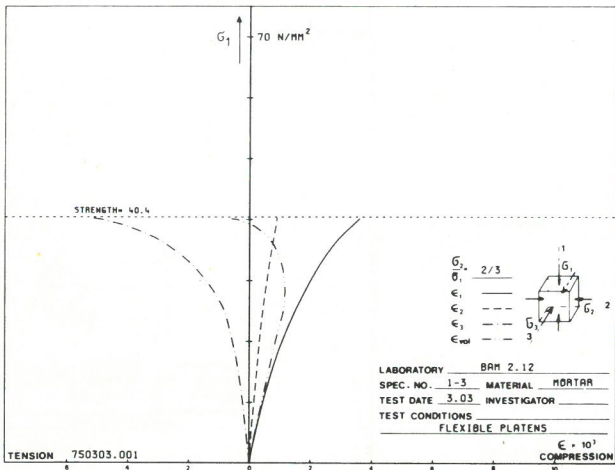


Bild
Figure 6.4-3a

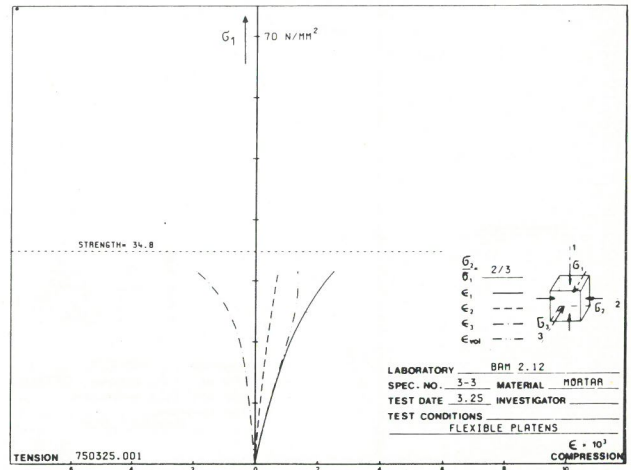


Bild
Figure 6.4-3d

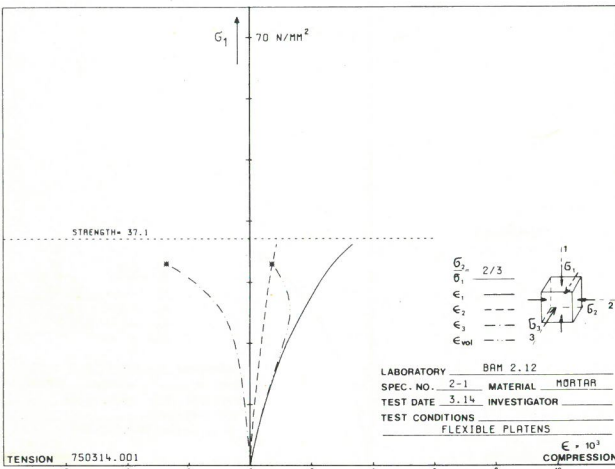


Bild
Figure 6.4-3b

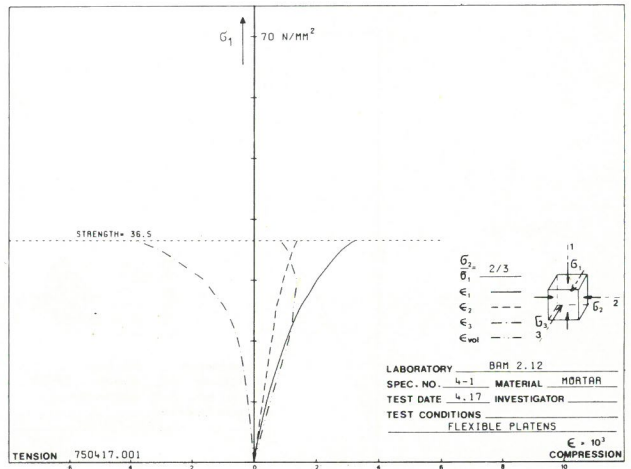


Bild
Figure 6.4-3e

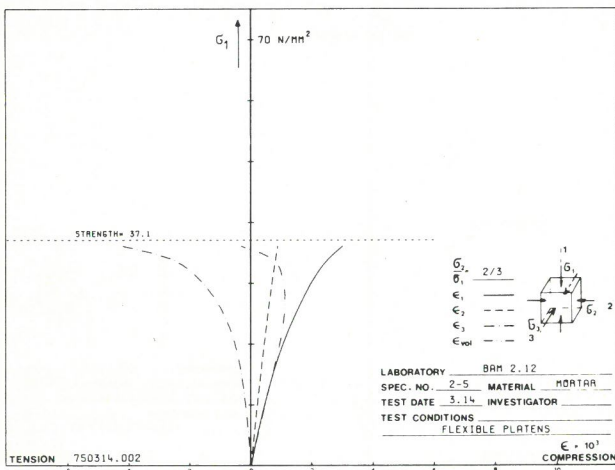


Bild
Figure 6.4-3c

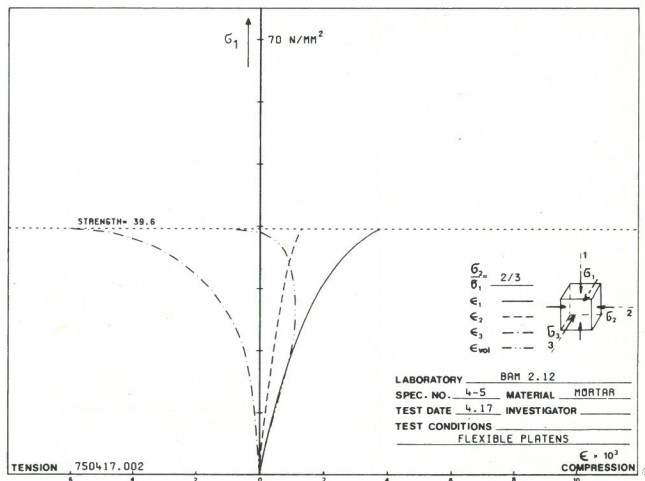


Bild
Figure 6.4-3f

$$G_2/G_1 = 2/3$$

Bilder
Figures 6.4-3a...f

Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachsialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten
Stress-strain behaviour of mortar, tested biaxially with flexible platens

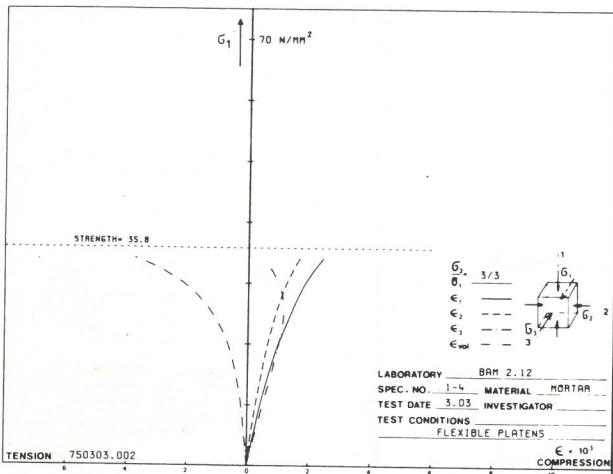


Bild
Figure 6.4-4a

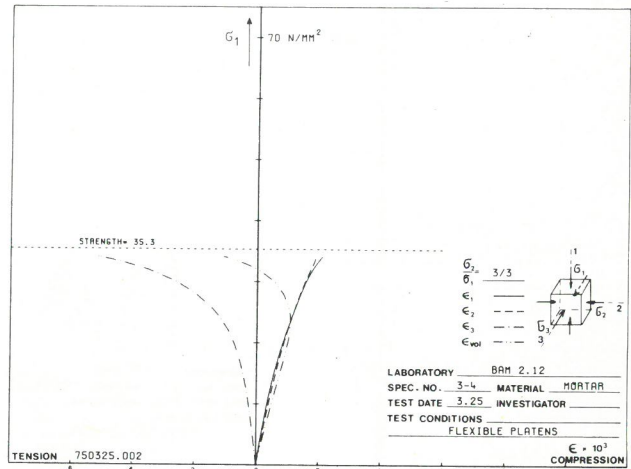


Bild
Figure 6.4-4d

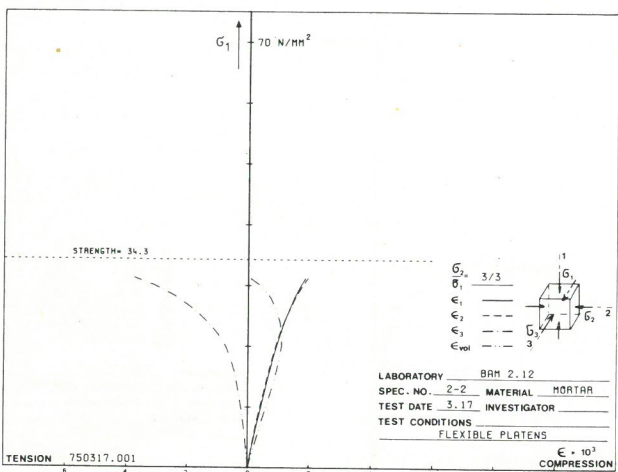


Bild
Figure 6.4-4b

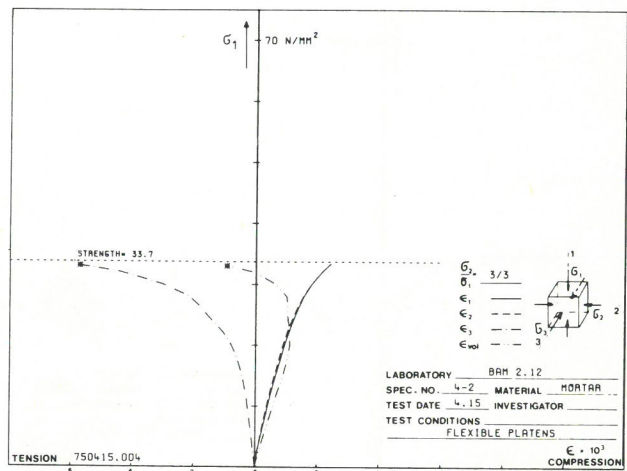


Bild
Figure 6.4-4e

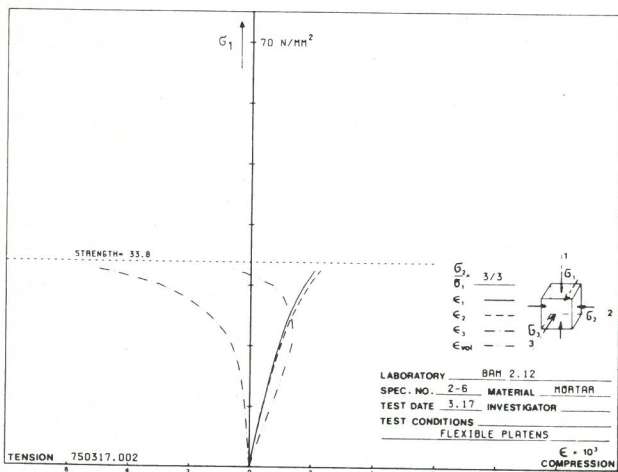


Bild
Figure 6.4-4c

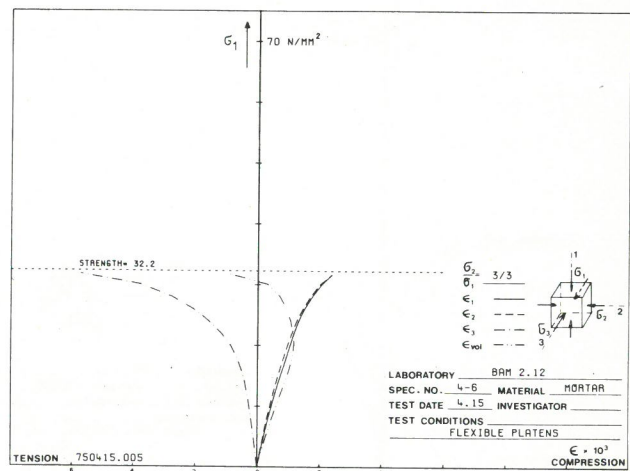


Bild
Figure 6.4-4f

$$G_2/G_1 = 3/3$$

Bilder
Figures 6.4-4a...f

Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachsigler Prüfung mit schlaffen Druckplatten
 Stress-strain behaviour of mortar, tested biaxially with flexible platens

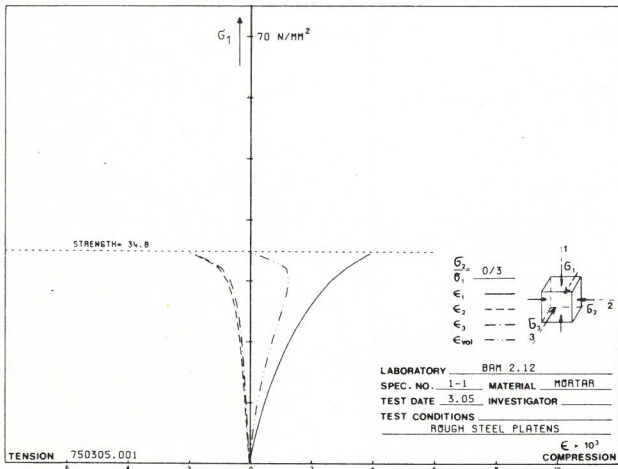


Bild
Figure 6.4-5a

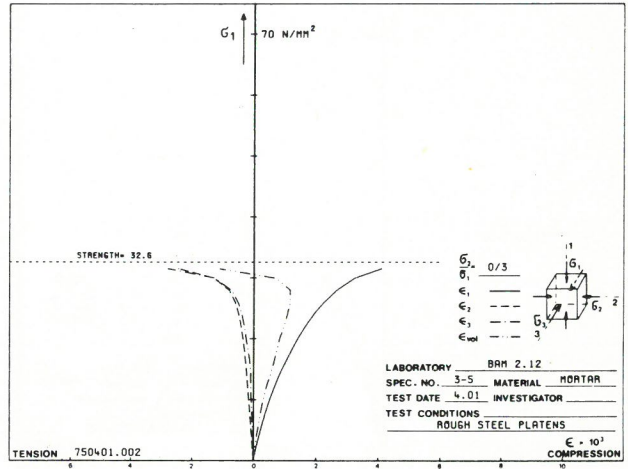


Bild
Figure 6.4-5d

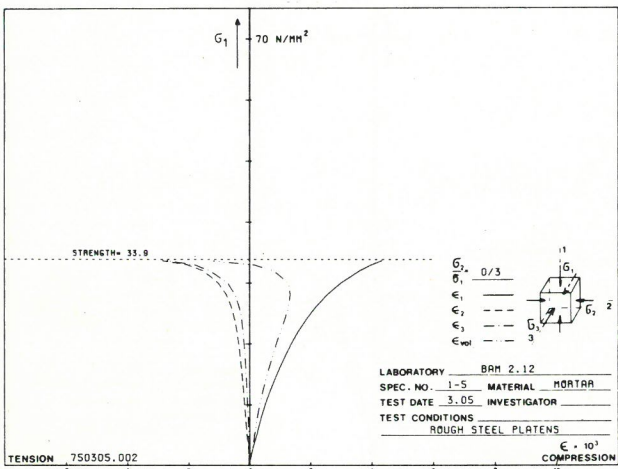


Bild
Figure 6.4-5b

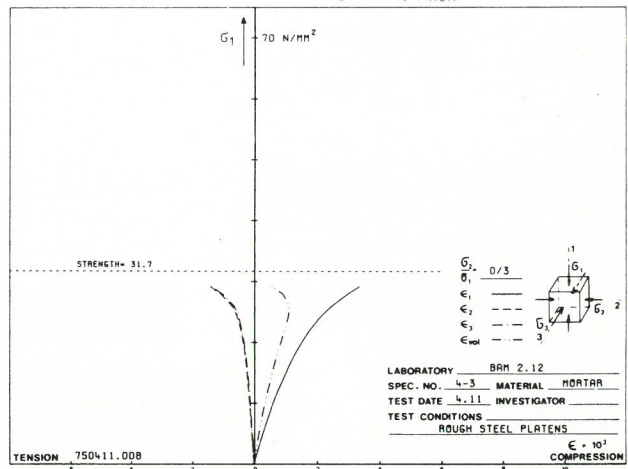


Bild
Figure 6.4-5e

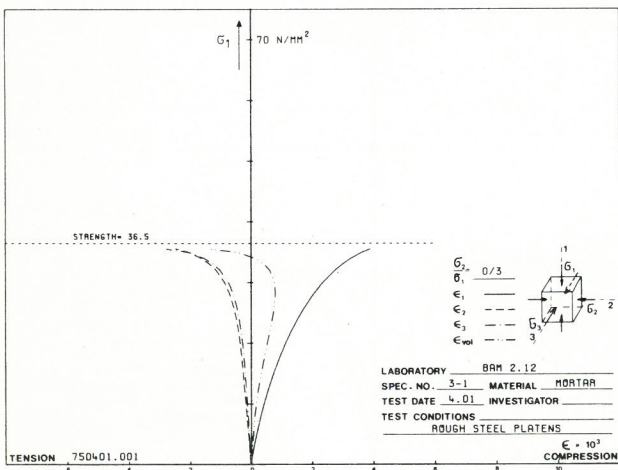


Bild
Figure 6.4-5c

$$\frac{G_2}{G_1} = 0/3$$

Bilder
Figures 6.4-5a...e

Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachialer Prüfung mit starren Druckplatten
 Stress-strain behaviour of mortar, tested biaxially with rough steel platens

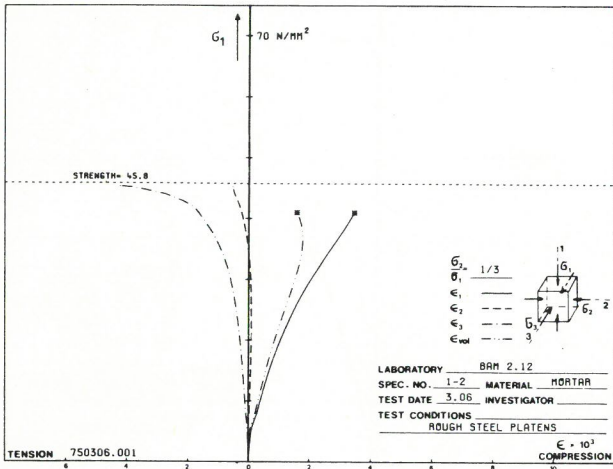


Bild
Figure 6.4-6a

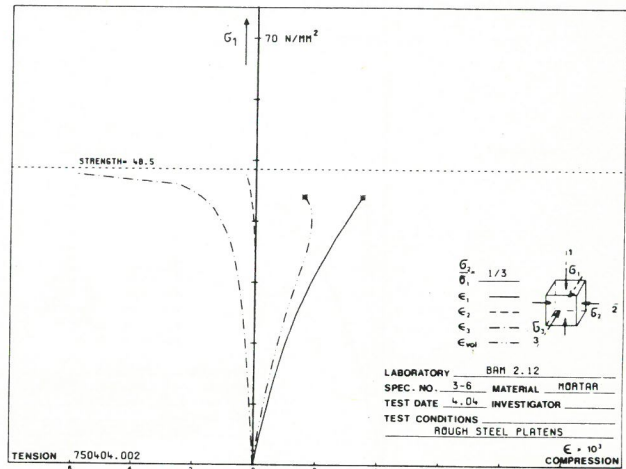


Bild
Figure 6.4-6d

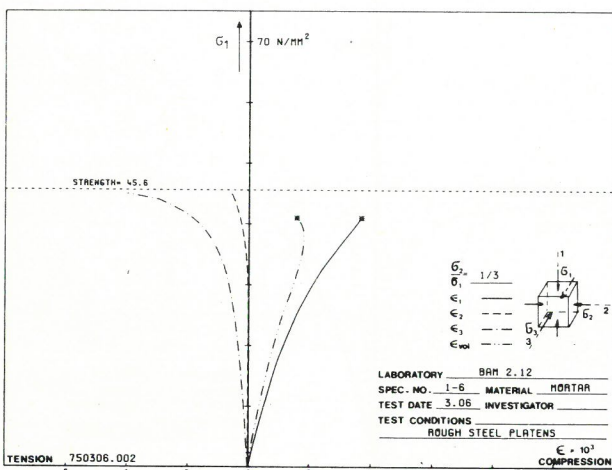


Bild
Figure 6.4-6b

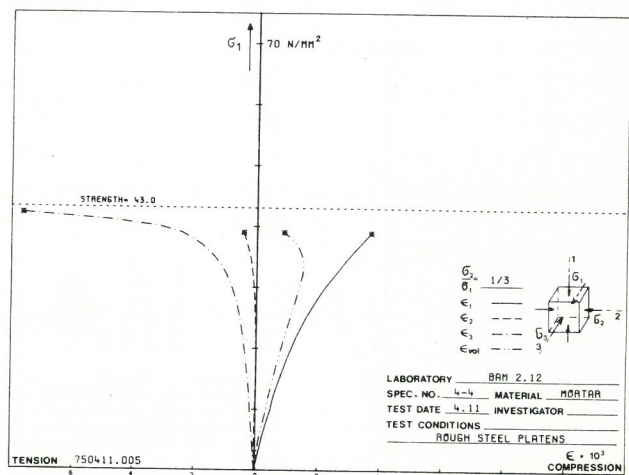


Bild
Figure 6.4-6e

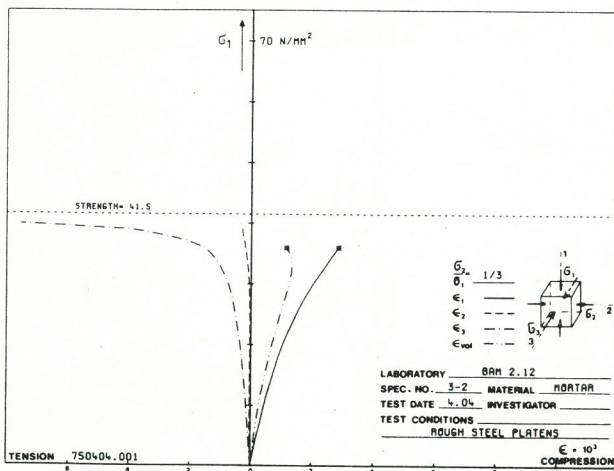


Bild
Figure 6.4-6c

$$G_2/G_1 = 1/3$$

Bilder
Figures 6.4-6a...e

Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachialer Prüfung mit starren Druckplatten
Stress-strain behaviour of mortar, tested biaxially with rough steel platens

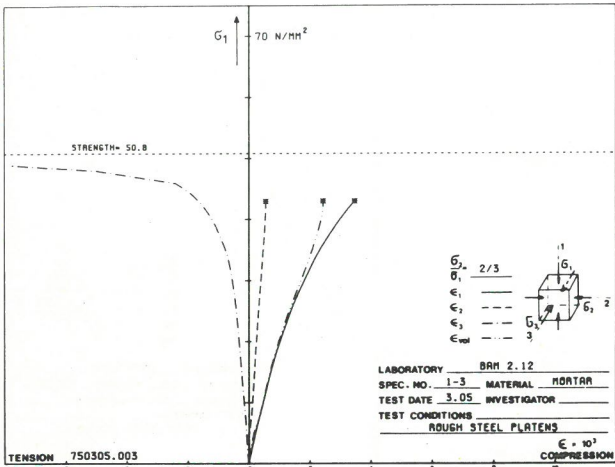


Bild
Figure 6.4-7a

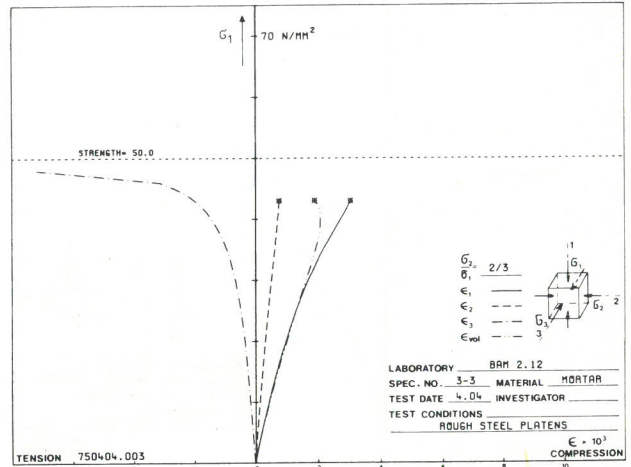


Bild
Figure 6.4-7d

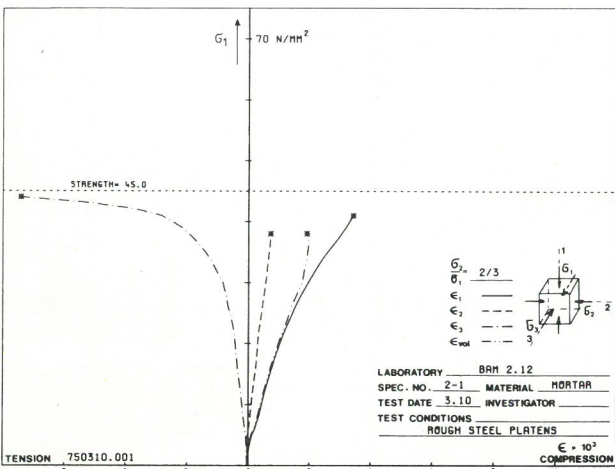


Bild
Figure 6.4-7b

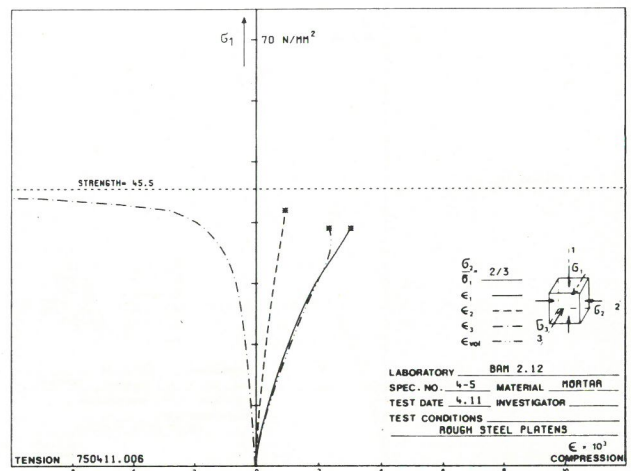


Bild
Figure 6.4-7e

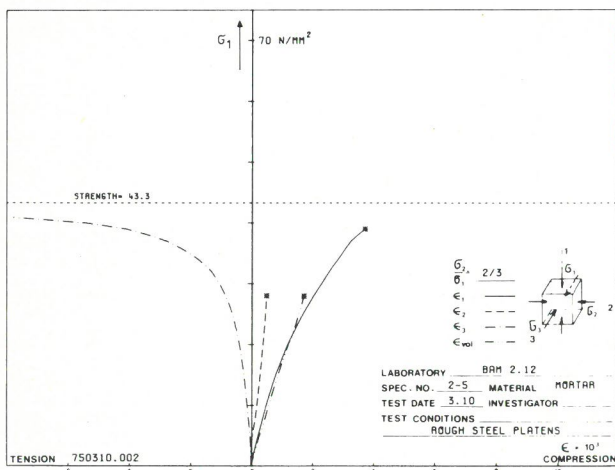


Bild
Figure 6.4-7c

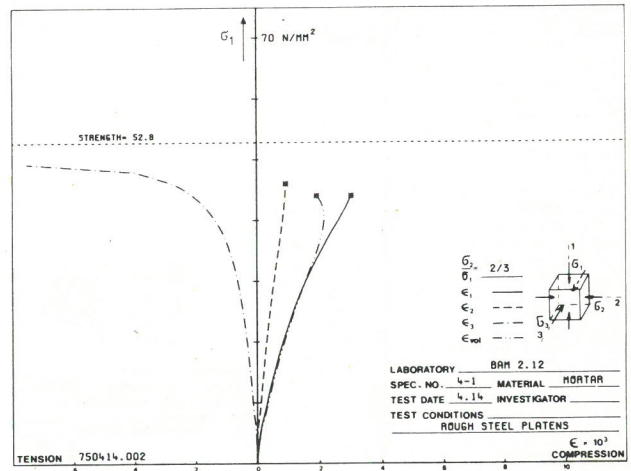


Bild
Figure 6.4-7f

$$\frac{G_2}{G_1} = \frac{2}{3}$$

Bilder
Figures 6.4-7a...f

Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachsialer Prüfung mit starren Druckplatten
 Stress-strain behaviour of mortar, tested biaxially with rough steel platens

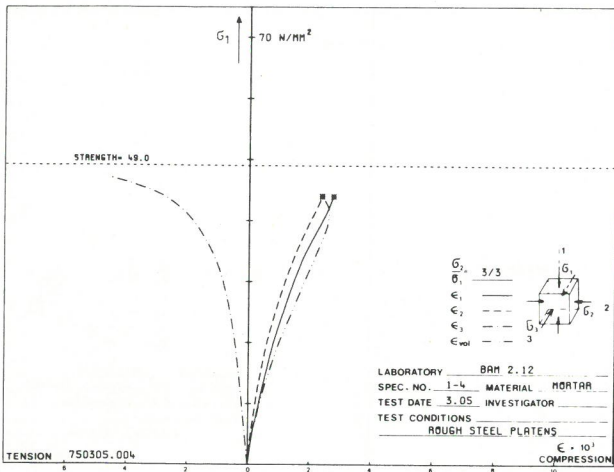


Bild
Figure 6.4-8a

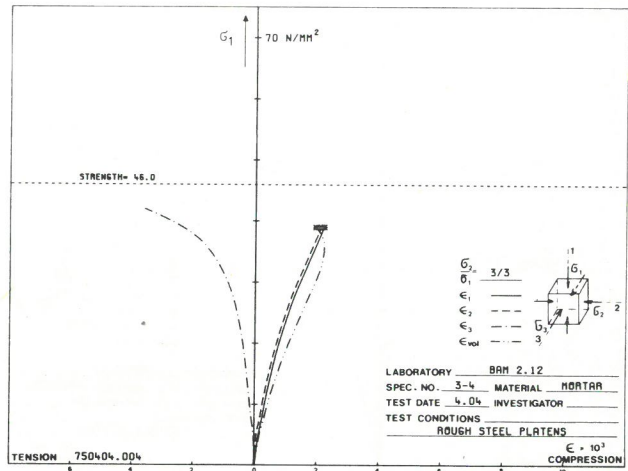


Bild
Figure 6.4-8d

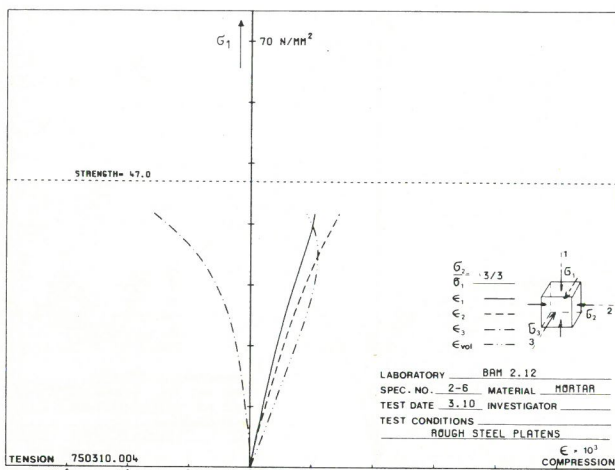


Bild
Figure 6.4-8b

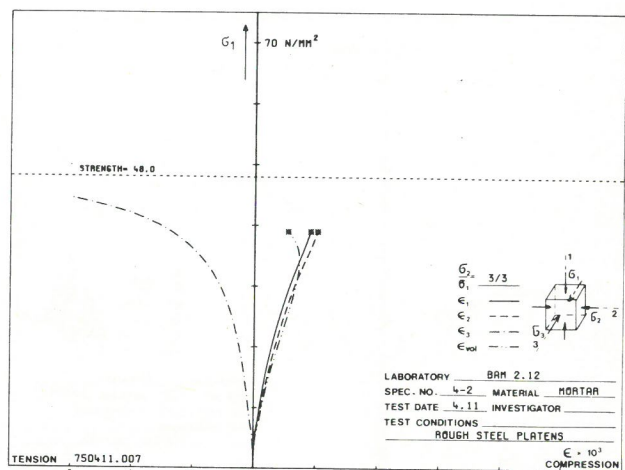


Bild
Figure 6.4-8e

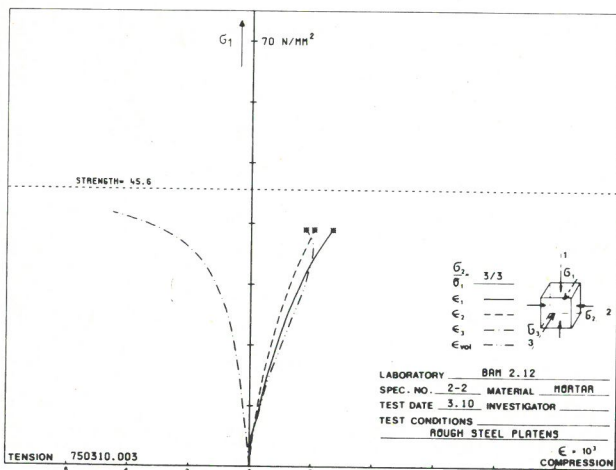


Bild
Figure 6.4-8c

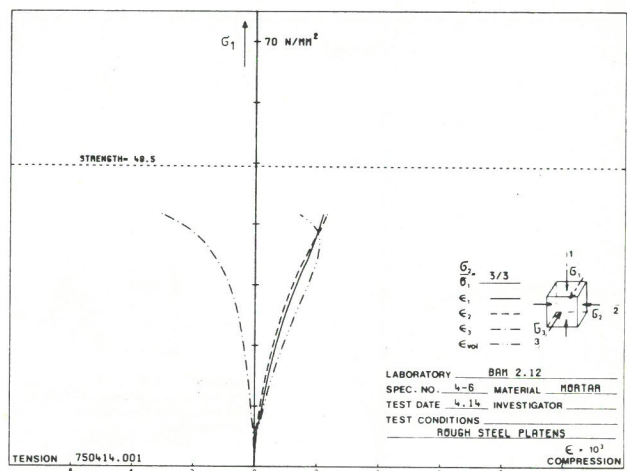


Bild
Figure 6.4-8f

$$\frac{G_2}{G_1} = 3/3$$

Bilder
Figures 6.4-8a...f

Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachialer Prüfung mit starren Druckplatten
 Stress-strain behaviour of mortar, tested biaxially with rough steel platens

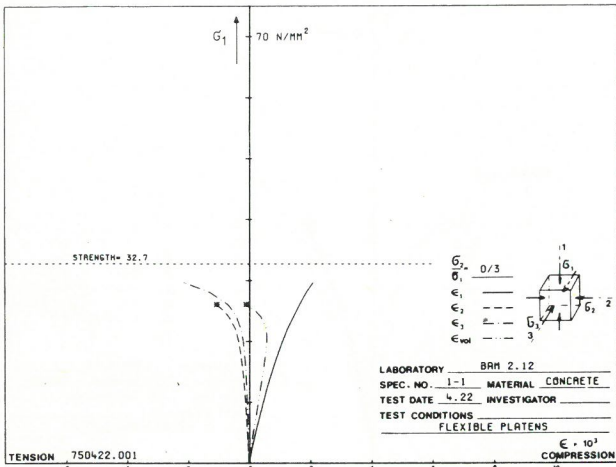


Bild
Figure 6.4-9a

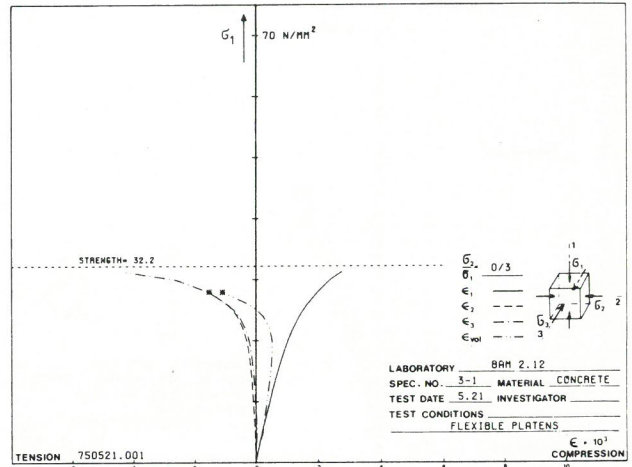


Bild
Figure 6.4-9d

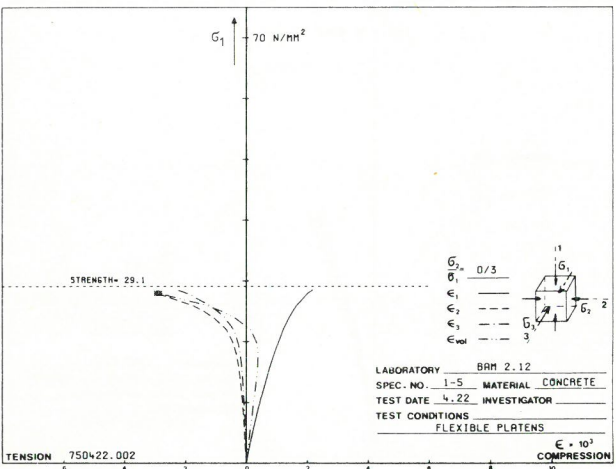


Bild
Figure 6.4-9b

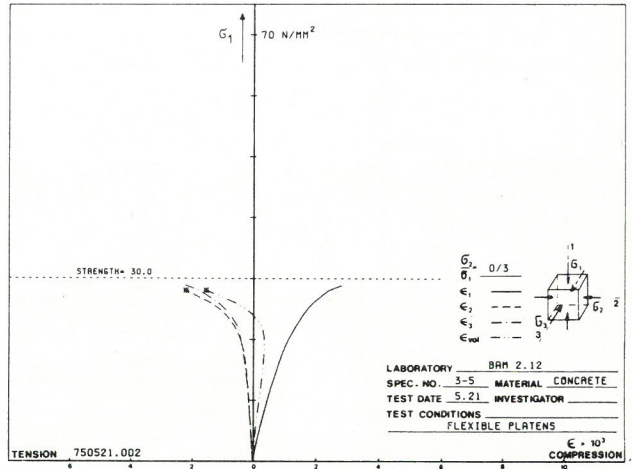


Bild
Figure 6.4-9e

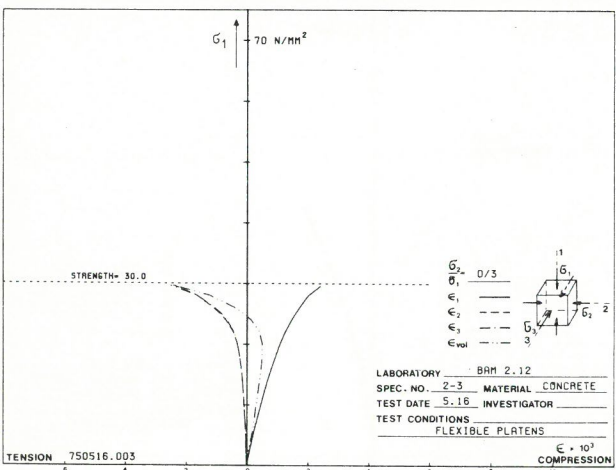


Bild
Figure 6.4-9c

$$G_2/G_1 = 0/3$$

Bilder
Figures 6.4-9a...e

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachsialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten
 Stress-strain behaviour of concrete, tested biaxially with flexible platens

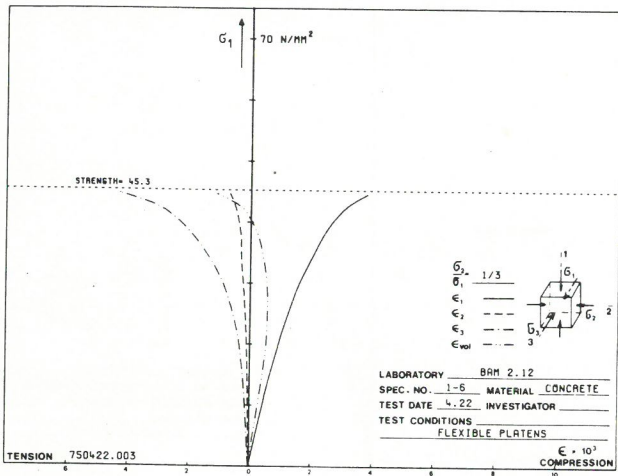


Bild
figure 6.4-10a

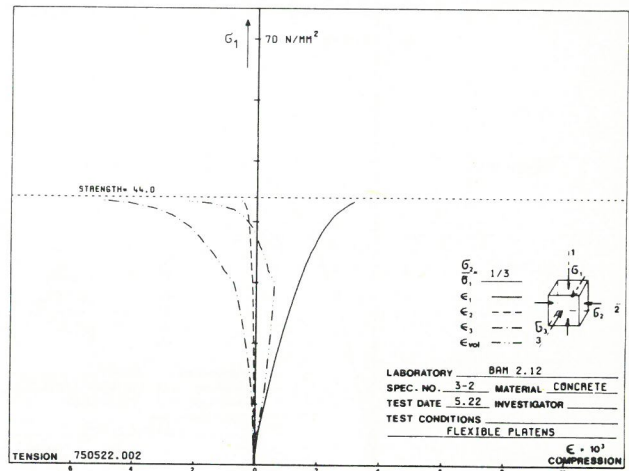


Bild
Figure 6.4-10d

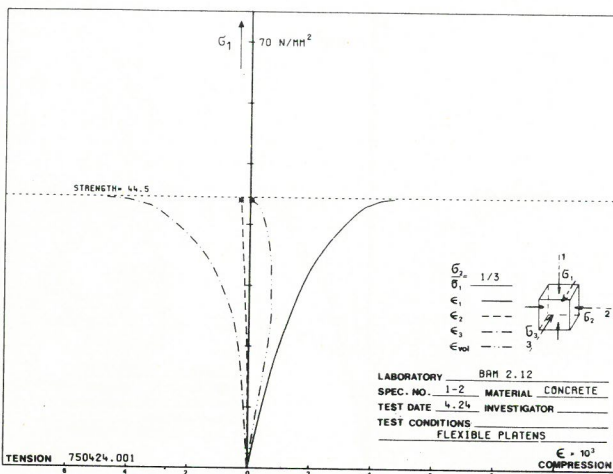


Bild
Figure 6.4-10b

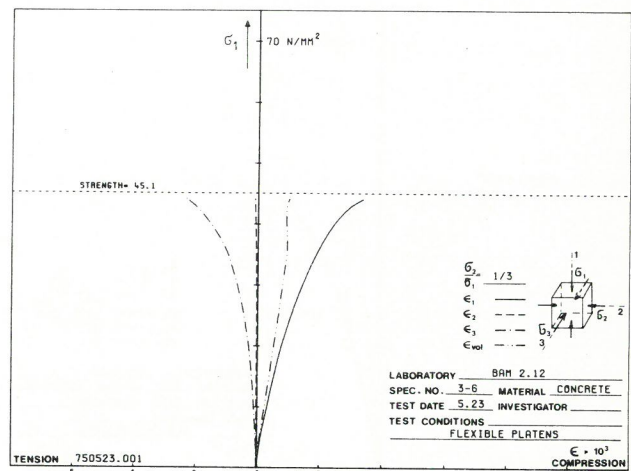


Bild
Figure 6.4-10e

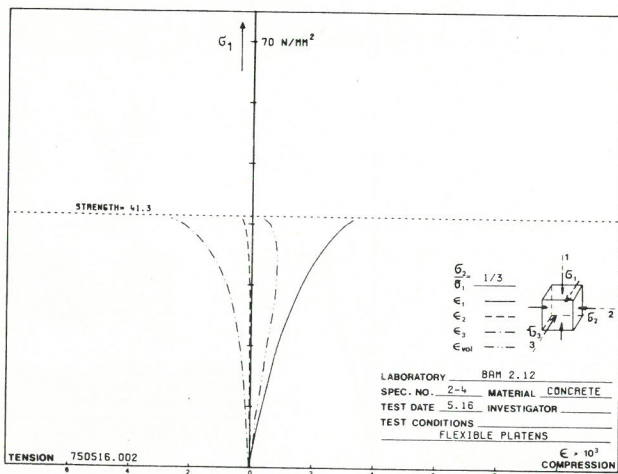


Bild
Figure 6.4-10c

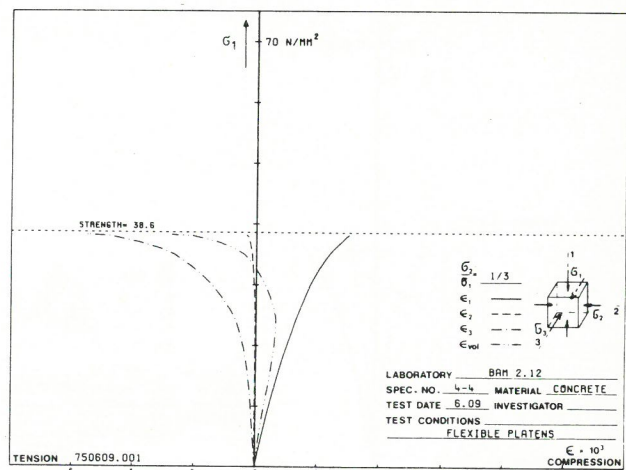


Bild
Figure 6.4-10f

$$\sigma_2/\sigma_1 = 1/3$$

Bilder
Figures 6.4-10a...f

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten
Stress-strain behaviour of concrete, tested biaxially with flexible platens

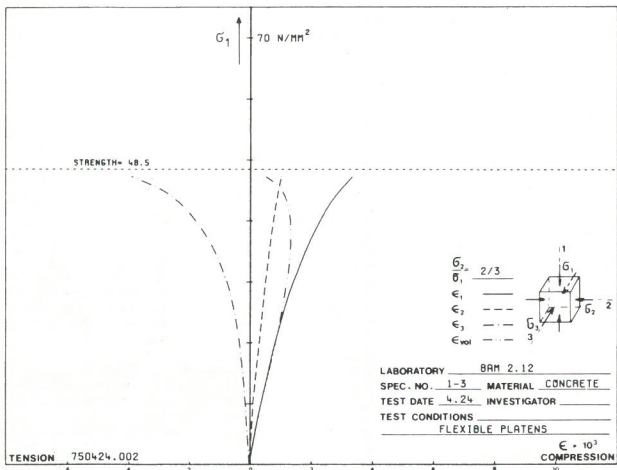


Bild
Figure 6.4-11a

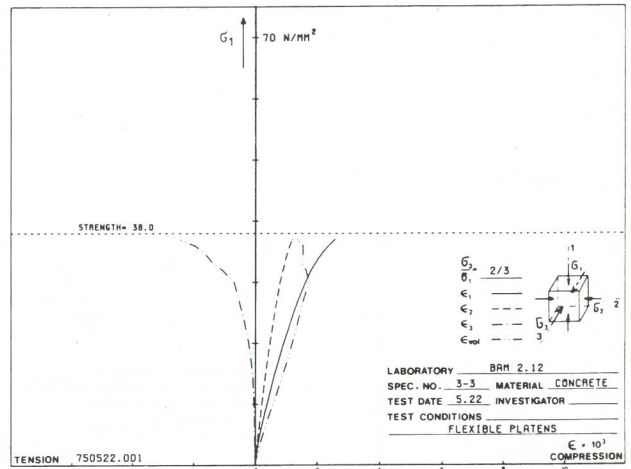


Bild
Figure 6.4-11d

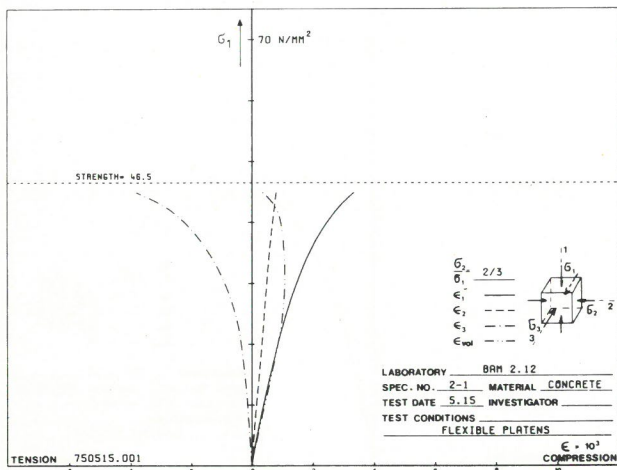


Bild
Figure 6.4-11b

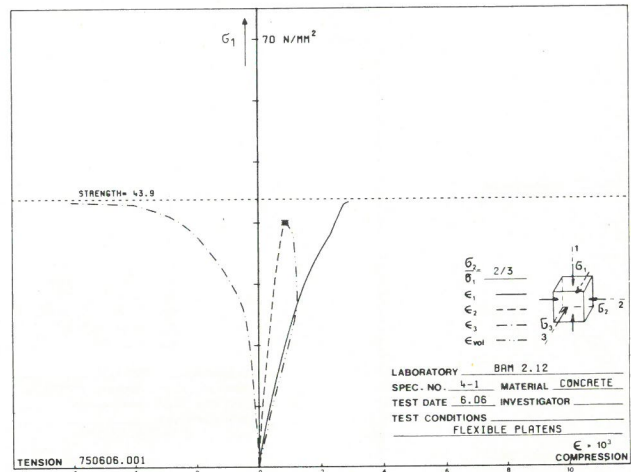


Bild
Figure 6.4-11e

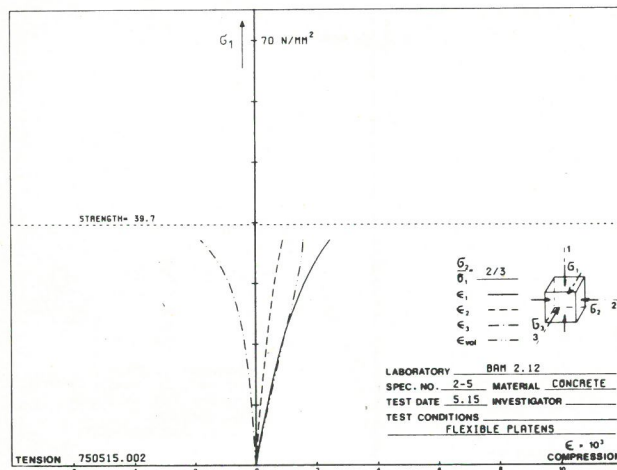


Bild
Figure 6.4-11c

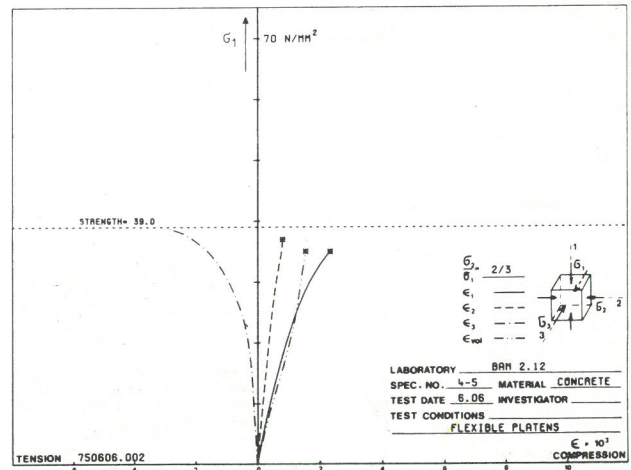


Bild
Figure 6.4-11f

$$G_2/G_1 = 2/3$$

Bilder
Figures 6.4-11a...f

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten
Stress-strain behaviour of concrete, tested biaxially with flexible platens

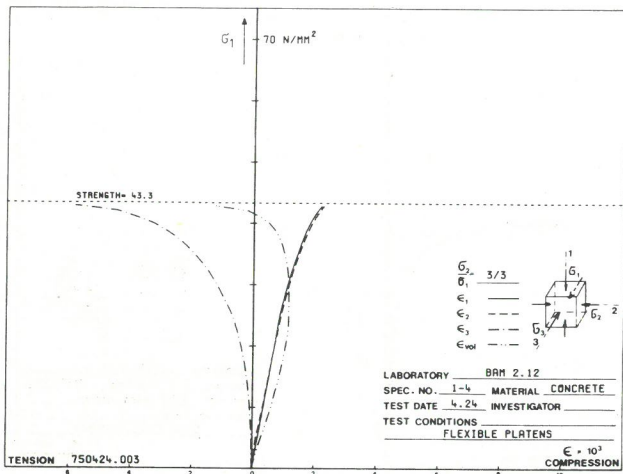


Bild
Figure 6.4-12a

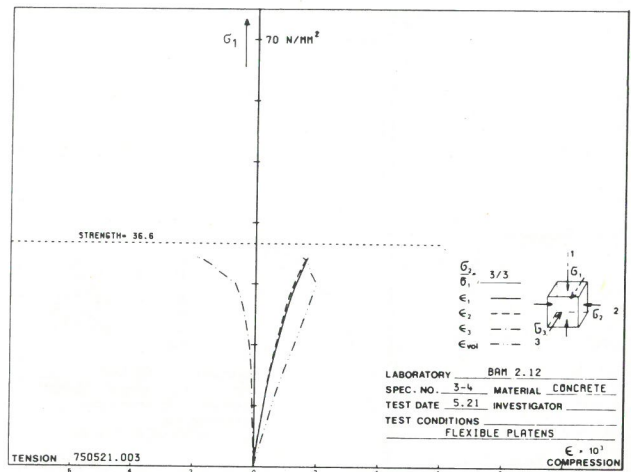


Bild
Figure 6.4-12d

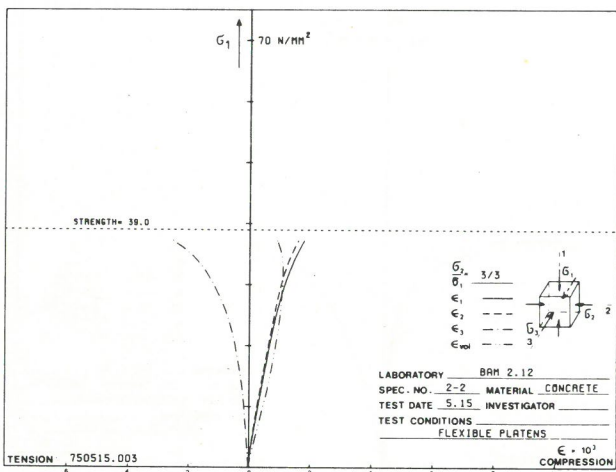


Bild
Figure 6.4-12b

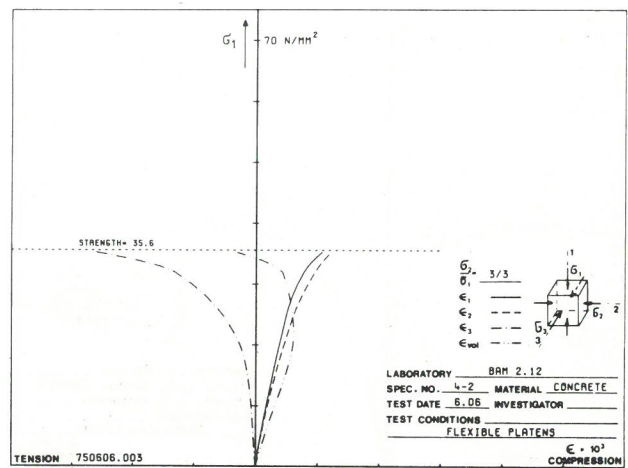


Bild
Figure 6.4-12e

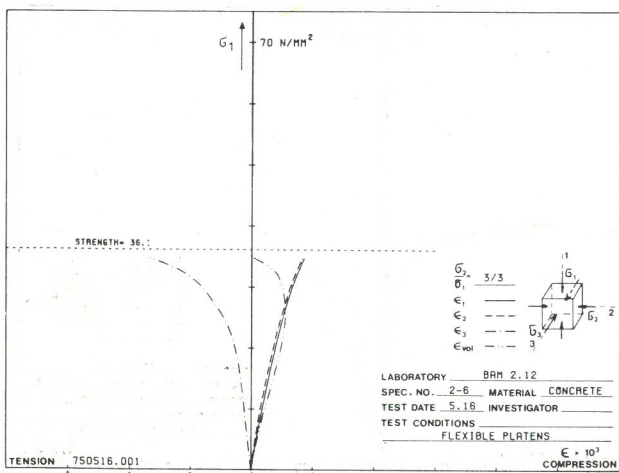


Bild
Figure 6.4-12c

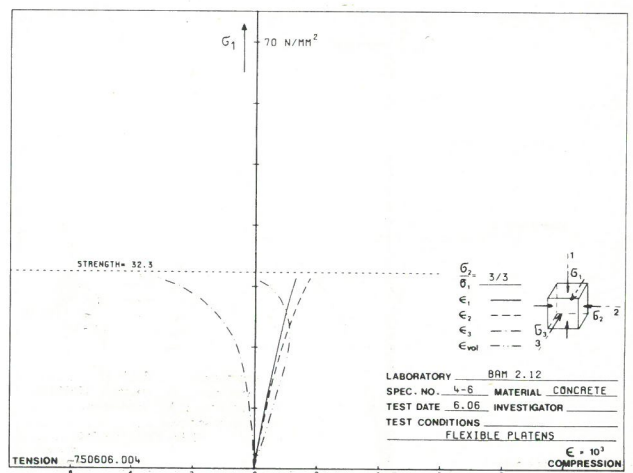


Bild
Figure 6.4-12f

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{3}{3}$$

Bilder
Figures 6.4-12a...f

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachsialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten
Stress-strain behaviour of concrete, tested biaxially with flexible platens

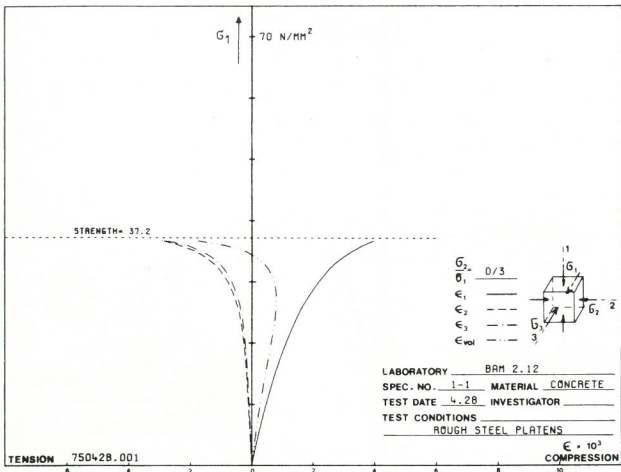


Bild
Figure 6.4-13a

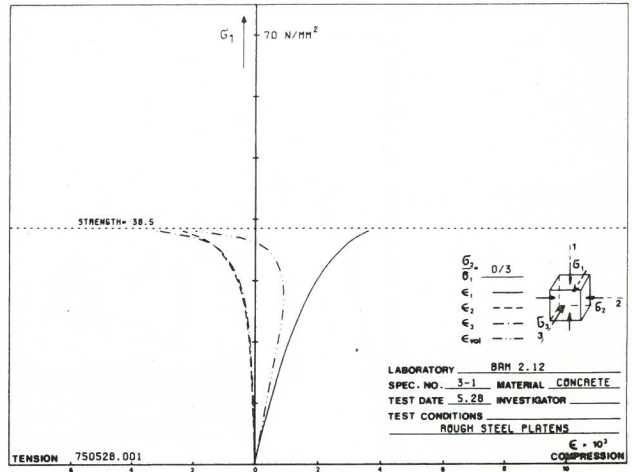


Bild
Figure 6.4-13d

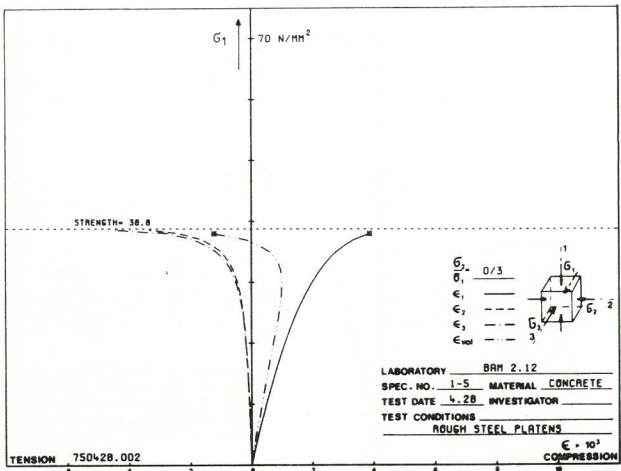


Bild
Figure 6.4-13b

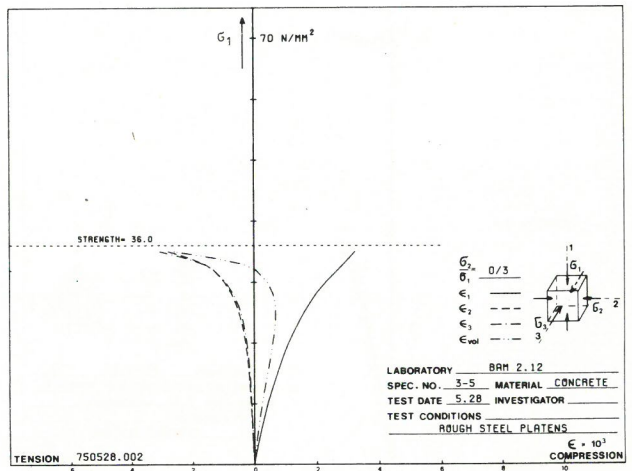


Bild
Figure 6.4-13e

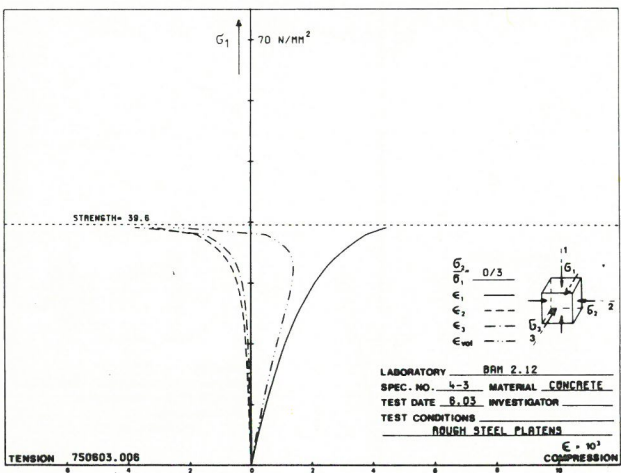


Bild
Figure 6.4-13c

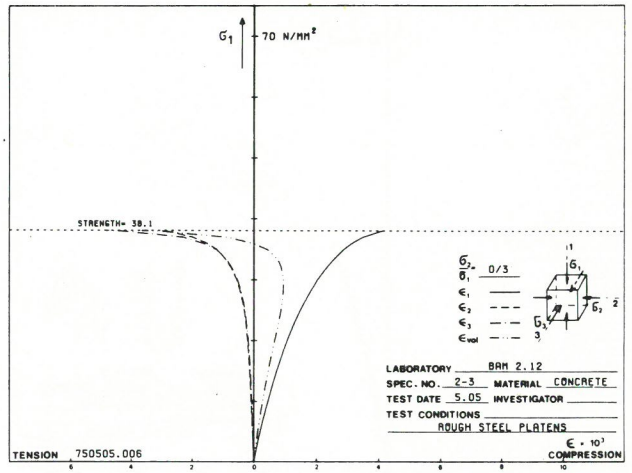


Bild
Figure 6.4-13f

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0/3$$

Bilder
Figures 6.4-13a...f

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachialer Prüfung mit starren Druckplatten
Stress-strain behaviour of concrete, tested biaxially with rough steel platens

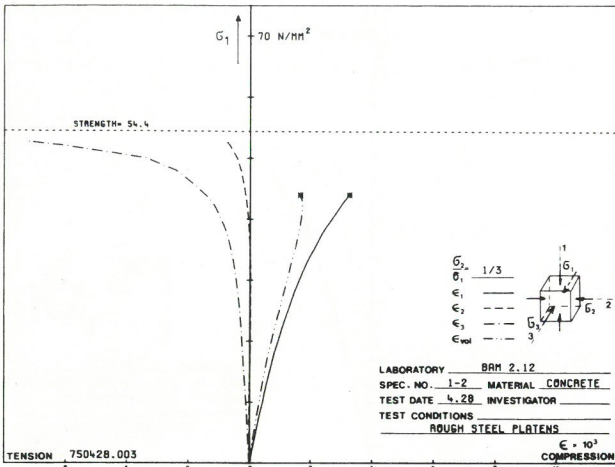


Bild
Figure 6.4-14a

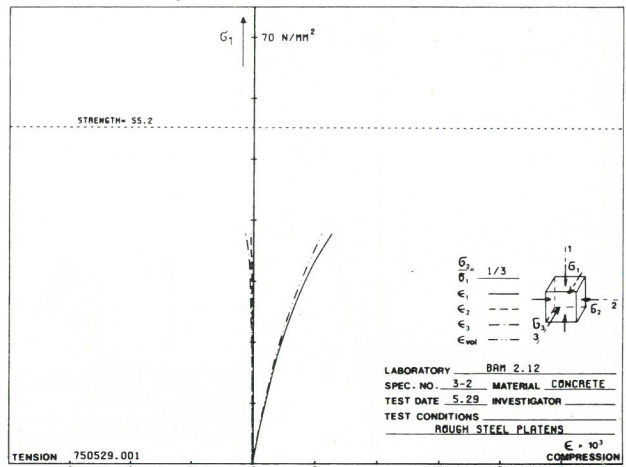


Bild
Figure 6.4-14d

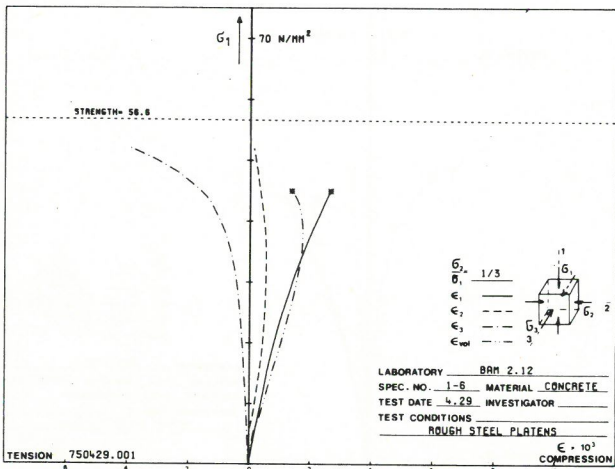


Bild
Figure 6.4-14b

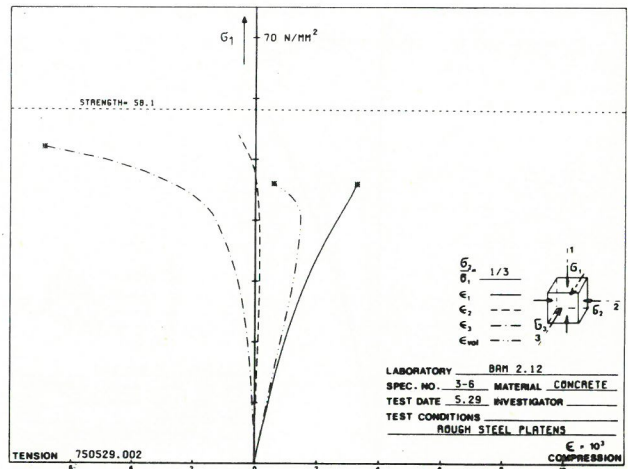


Bild
Figure 6.4-14e

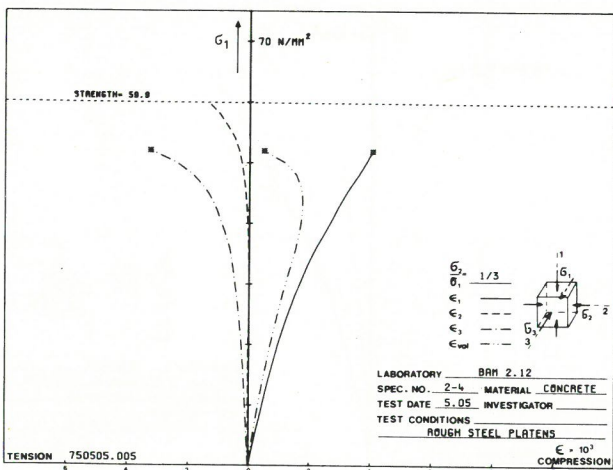


Bild
Figure 6.4-14c

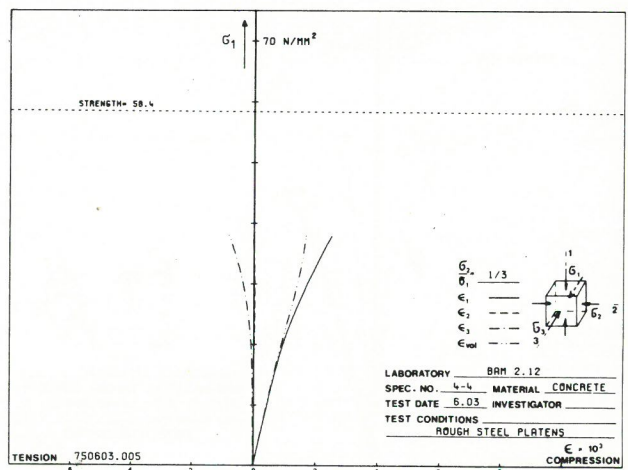


Bild
Figure 6.4-14f

$$G_2/G_1 = 1/3$$

Bilder
Figures 6.4-14a...f

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachialer Prüfung mit starren Druckplatten
Stress-strain behaviour of concrete, tested biaxially with rough steel platens

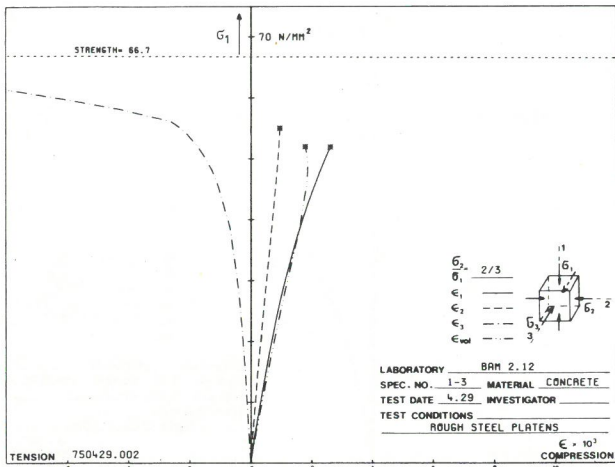


Bild
Figure 6.4-15a

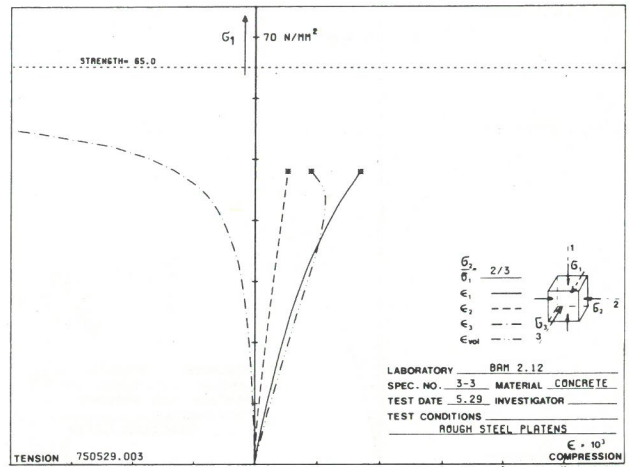


Bild
Figure 6.4-15d

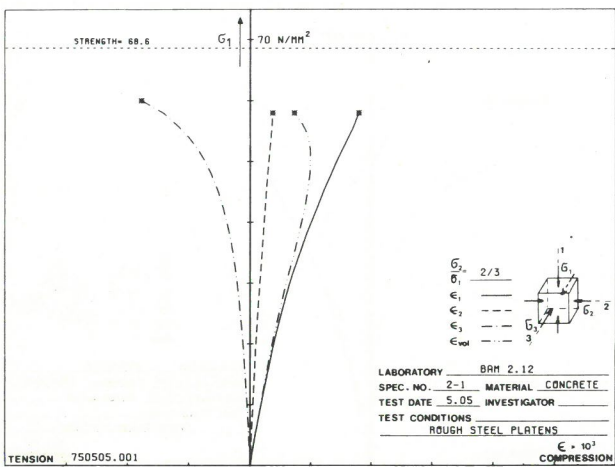


Bild
Figure 6.4-15b

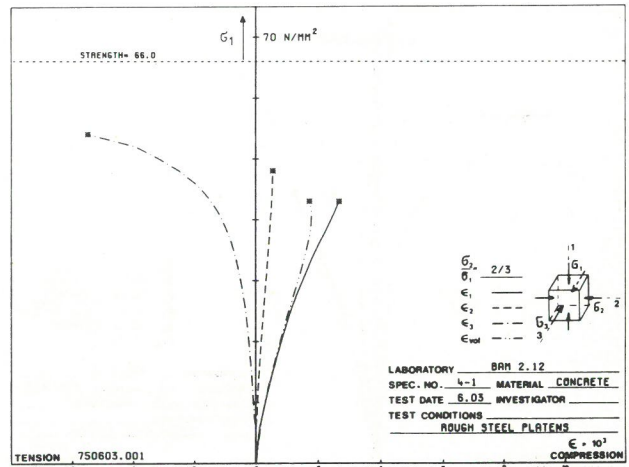


Bild
Figure 6.4-15e

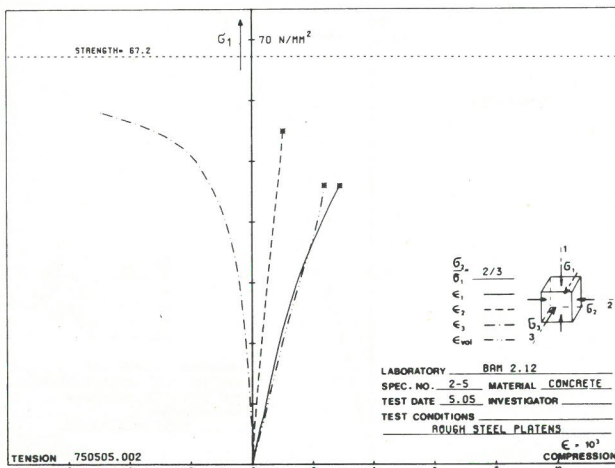


Bild
Figure 6.4-15c

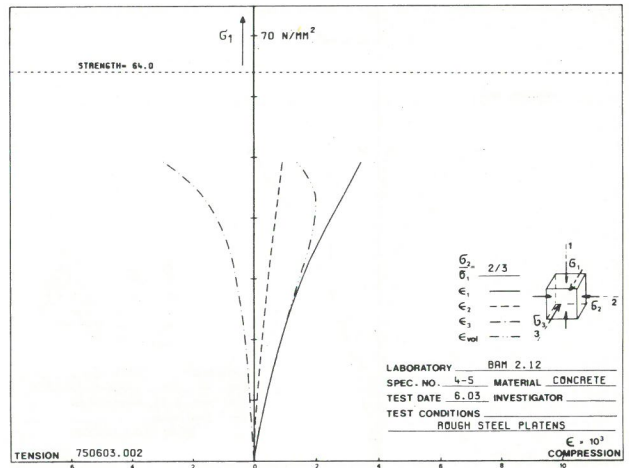


Bild
Figure 6.4-15f

$$G_2/G_1 = 2/3$$

Bilder
Figures 6.4-15a...f

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiaxialer Prüfung mit starren Druckplatten
 Stress-strain behaviour of concrete, tested biaxially with rough steel platens

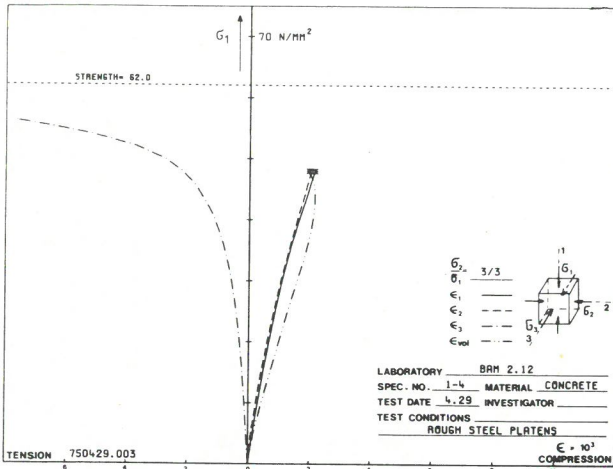


Bild
Figure 6.4-16a

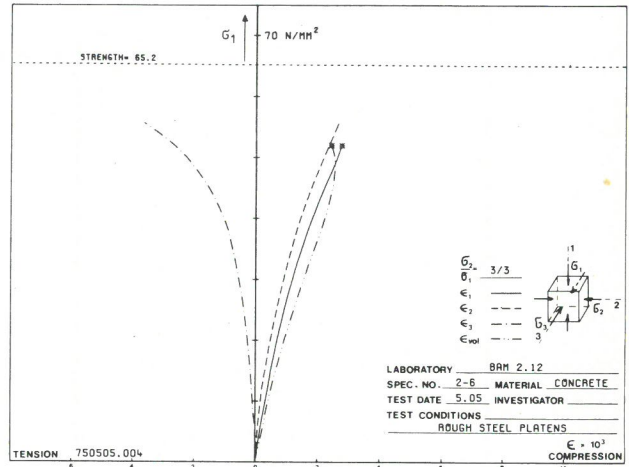


Bild
Figure 6.4-16d

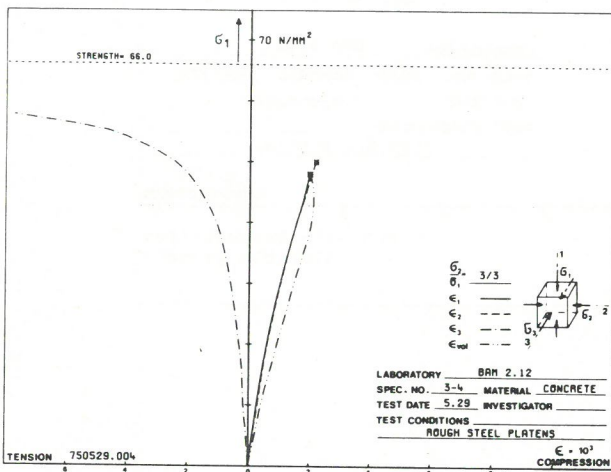


Bild
Figure 6.4-16b

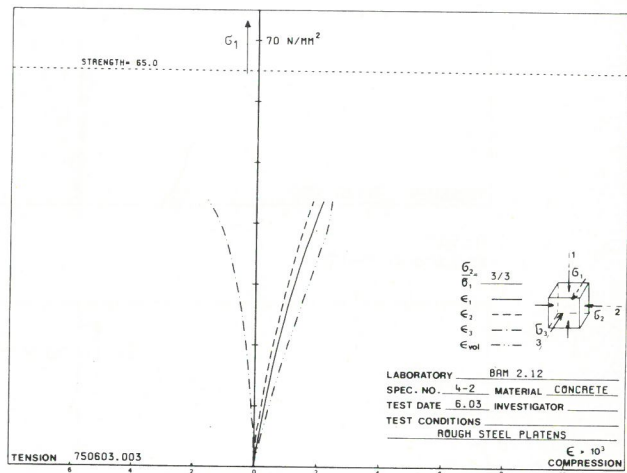


Bild
Figure 6.4-16e

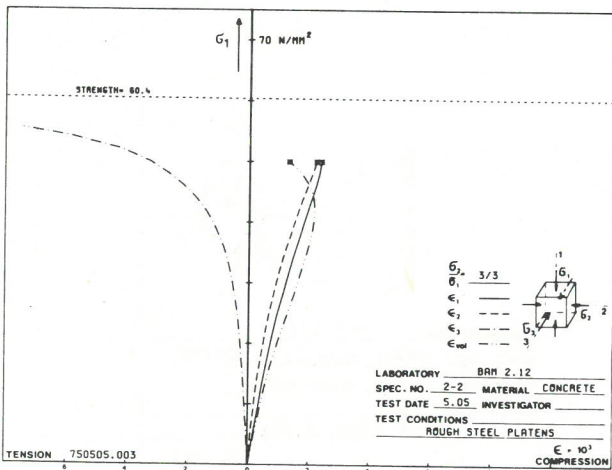


Bild
Figure 6.4-16c

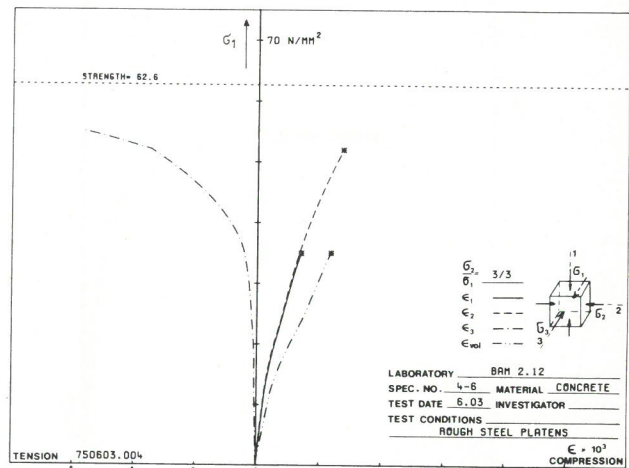


Bild
Figure 6.4-16f

$$\frac{G_2}{G_1} = \frac{3}{3}$$

Bilder
Figures 6.4-16a...f

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachialer Prüfung mit starren Druckplatten
 Stress-strain behaviour of concrete, tested biaxially with rough steel platens

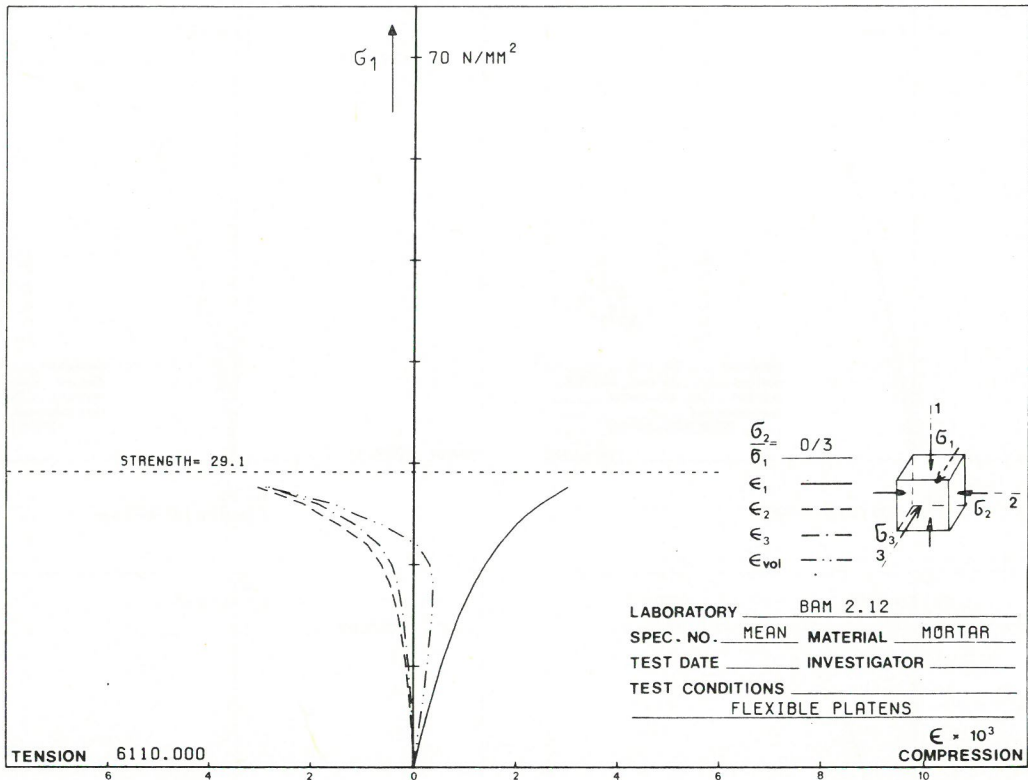


Bild
Figure 6.4-17a

schlaffe Druckplatten
flexible platens

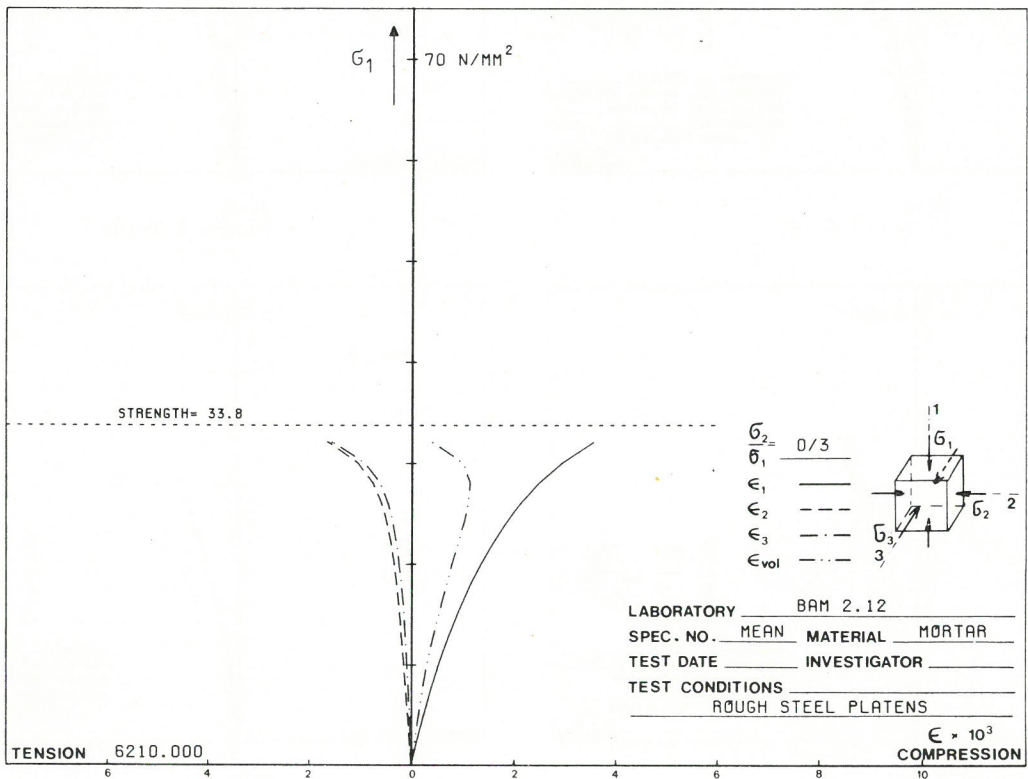


Bild
Figure 6.4-17b

starre Druckplatten
rough steel platens

Bilder
Figures 6.4-17a/b

Mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachsialer Prüfung; $G_2/G_1 = 0/3$
 Mean stress-strain behaviour of mortar, biaxially tested with $G_2/G_1 = 0/3$

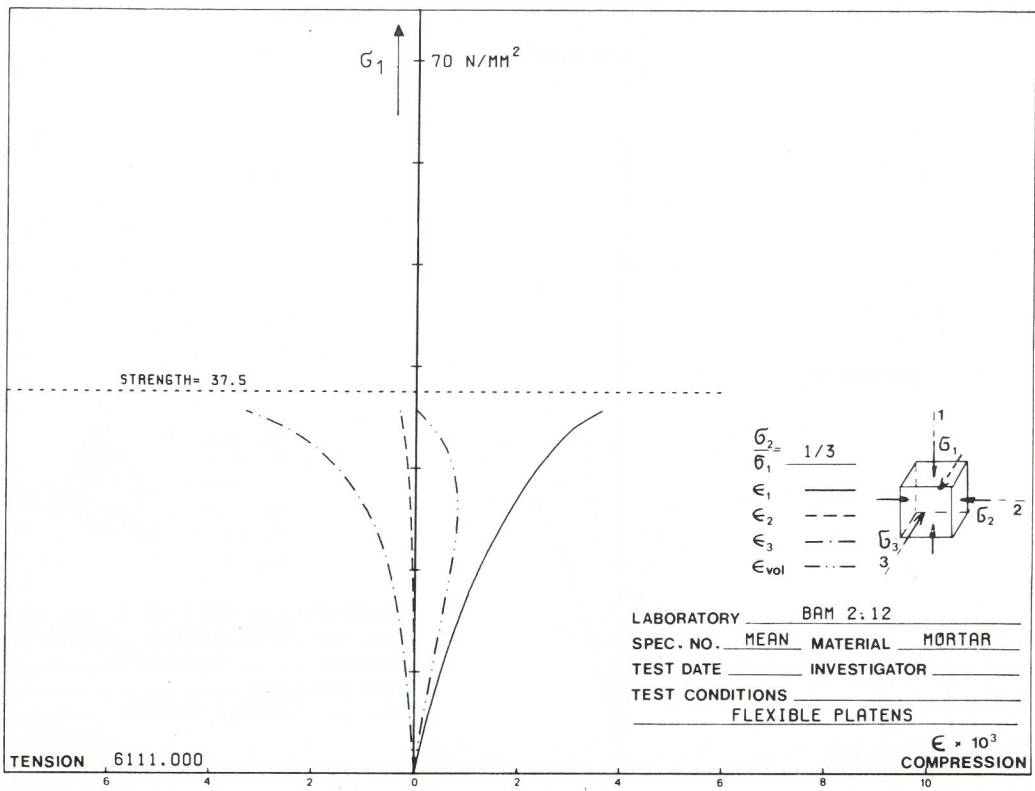


Bild
Figure 6.4-18a

schlafe Druckplatten
flexible platens

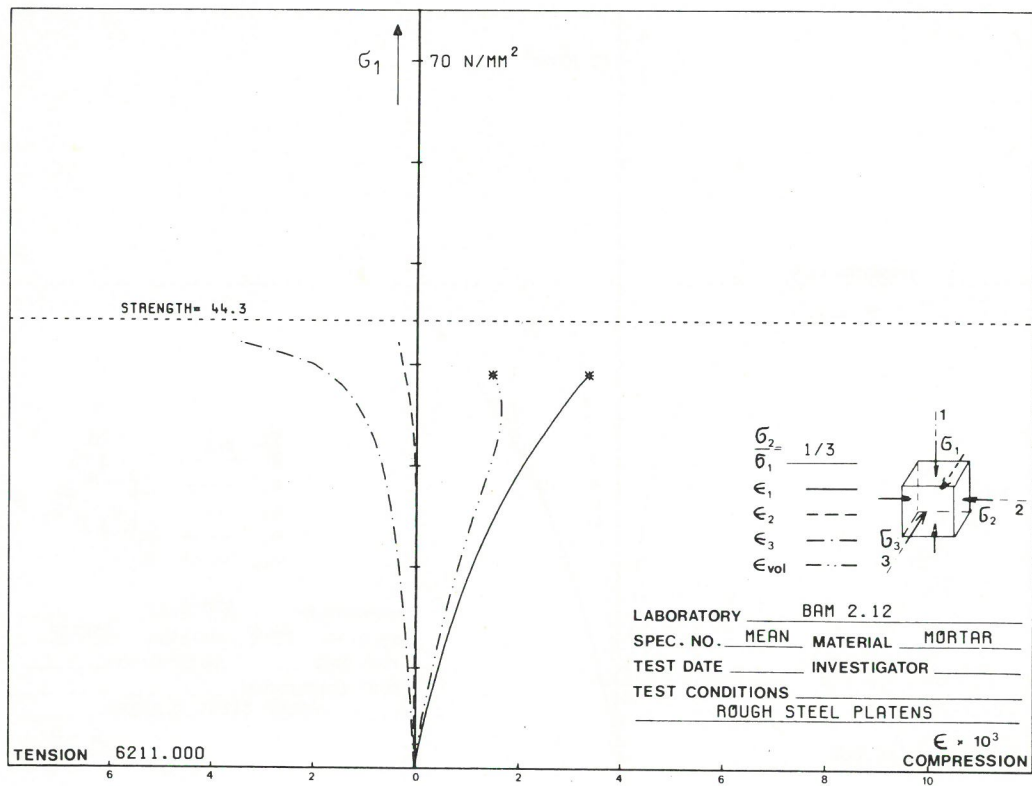


Bild
Figure 6.4-18b

starre Druckplatten
rough steel platens

Bilder
Figures 6.4-18a/b

Mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachialer Prüfung; $\sigma_2/\sigma_1 = 1/3$
 Mean stress-strain behaviour of mortar, biaxially tested with $\sigma_2/\sigma_1 = 1/3$

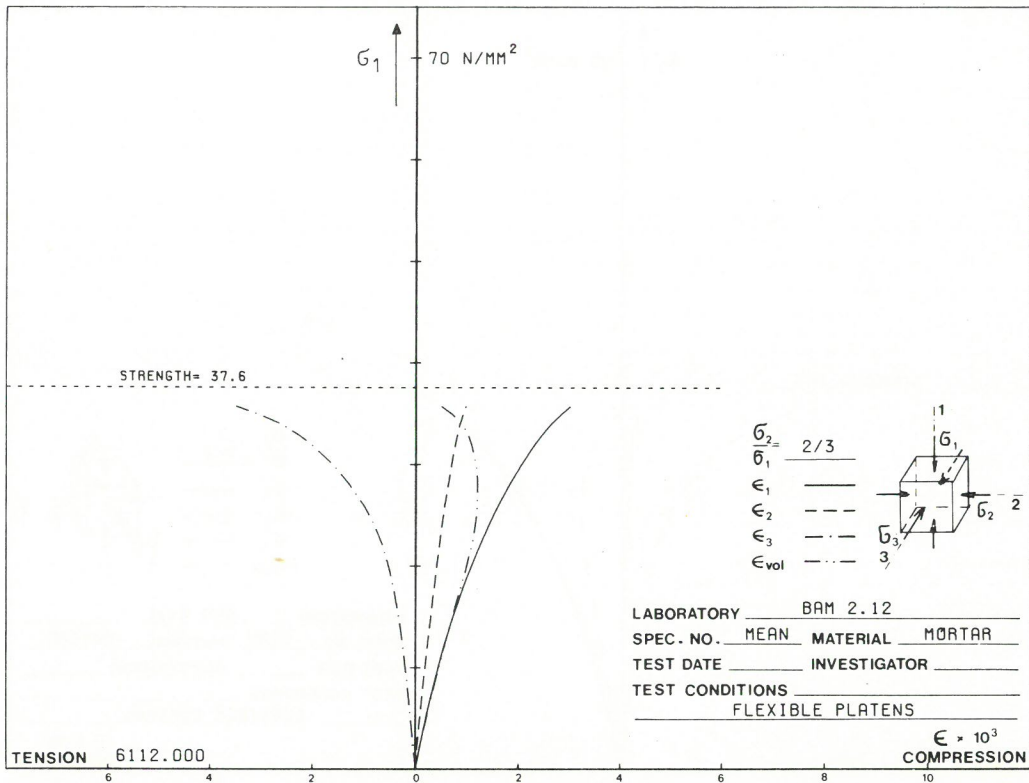


Bild
Figure 6.4-19a

schlechte Druckplatten
flexible platens

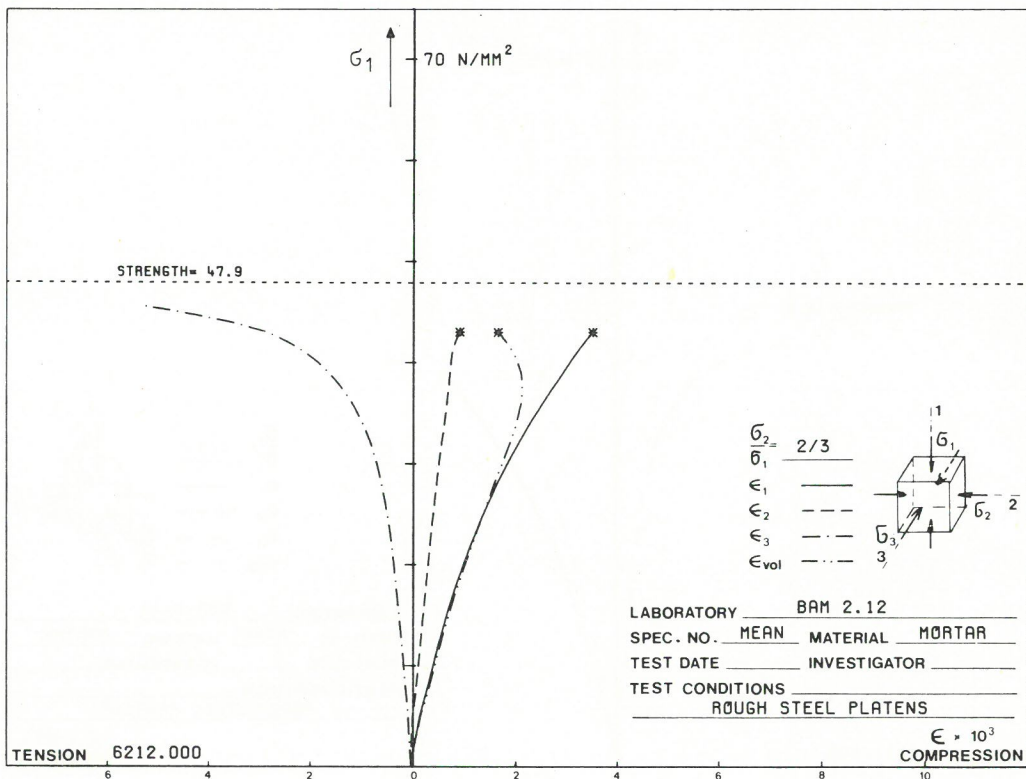


Bild
Figure 6.4-19b

starre Druckplatten
rough steel platens

Bilder
Figure 6.4-19a/b

Mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachsialer Prüfung; $\sigma_2/\sigma_1 = 2/3$
 Mean stress-strain behaviour of mortar, biaxially tested with $\sigma_2/\sigma_1 = 2/3$

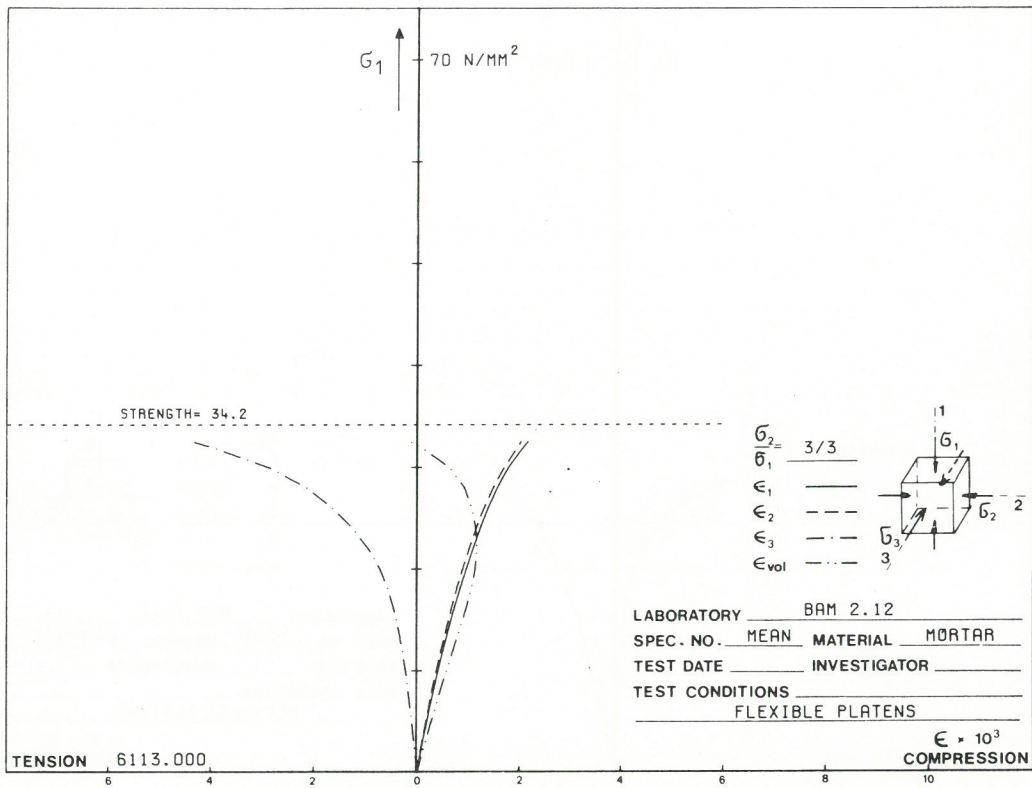


Bild
Figure 6.4-20a

schlaffe Druckplatten
flexible platens

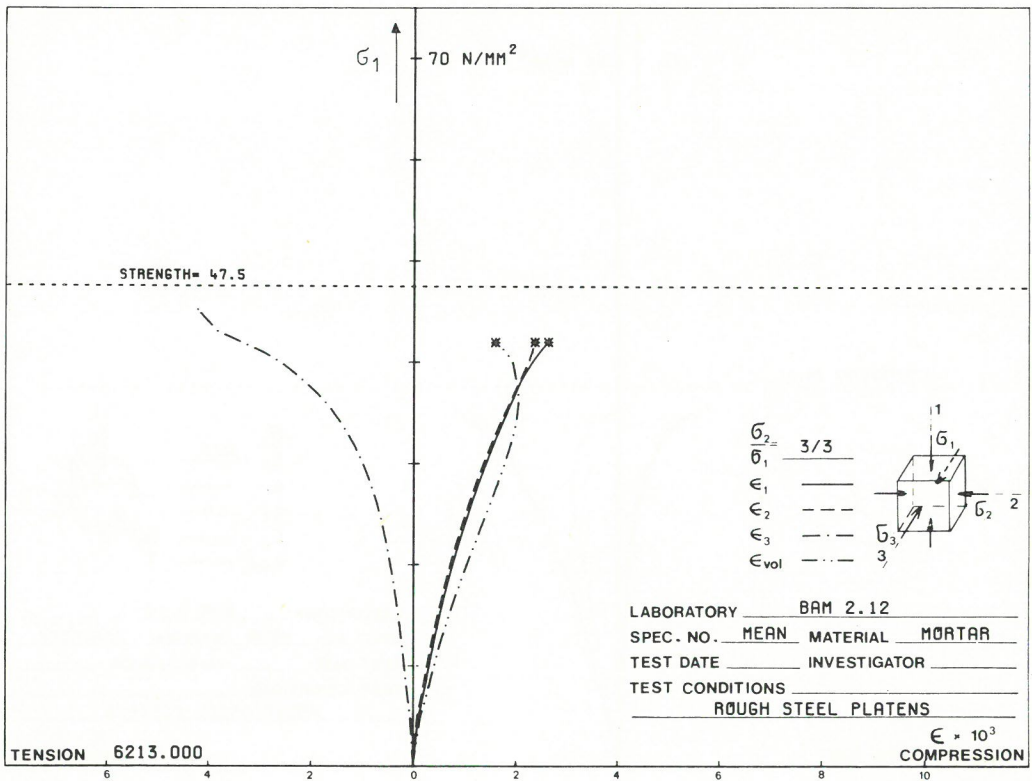


Bild
Figure 6.4-20b

starre Druckplatten
rough steel platens

Bilder
Figure 6.4-20a/b

Mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachsialer Prüfung; $\sigma_2/\sigma_1 = 3/3$
 Mean stress-strain behaviour of mortar, biaxially tested with $\sigma_2/\sigma_1 = 3/3$

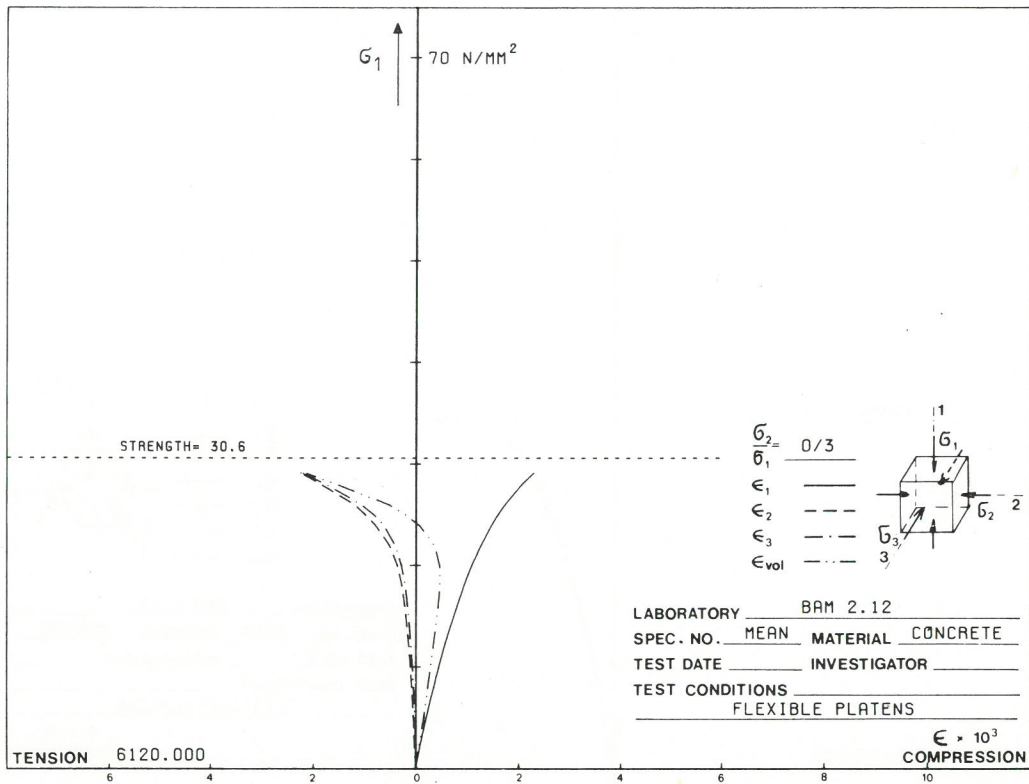


Bild
Figure 6.4-21a

schlechte Druckplatten
flexible platens

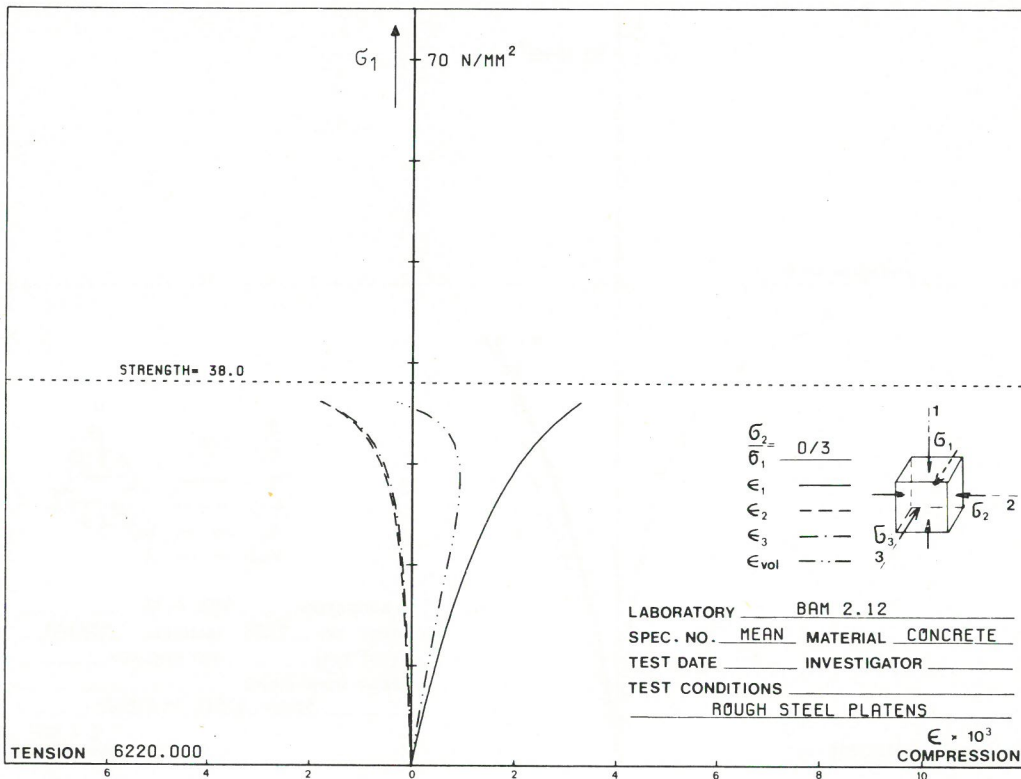


Bild
Figure 6.4-21b

starre Druckplatten
rough steel platens

Bilder
Figure 6.4-21a/b

Mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachsialer Prüfung; $\sigma_2/\sigma_1 = 0/3$
Mean stress-strain behaviour of concrete, biaxially tested with $\sigma_2/\sigma_1 = 0/3$

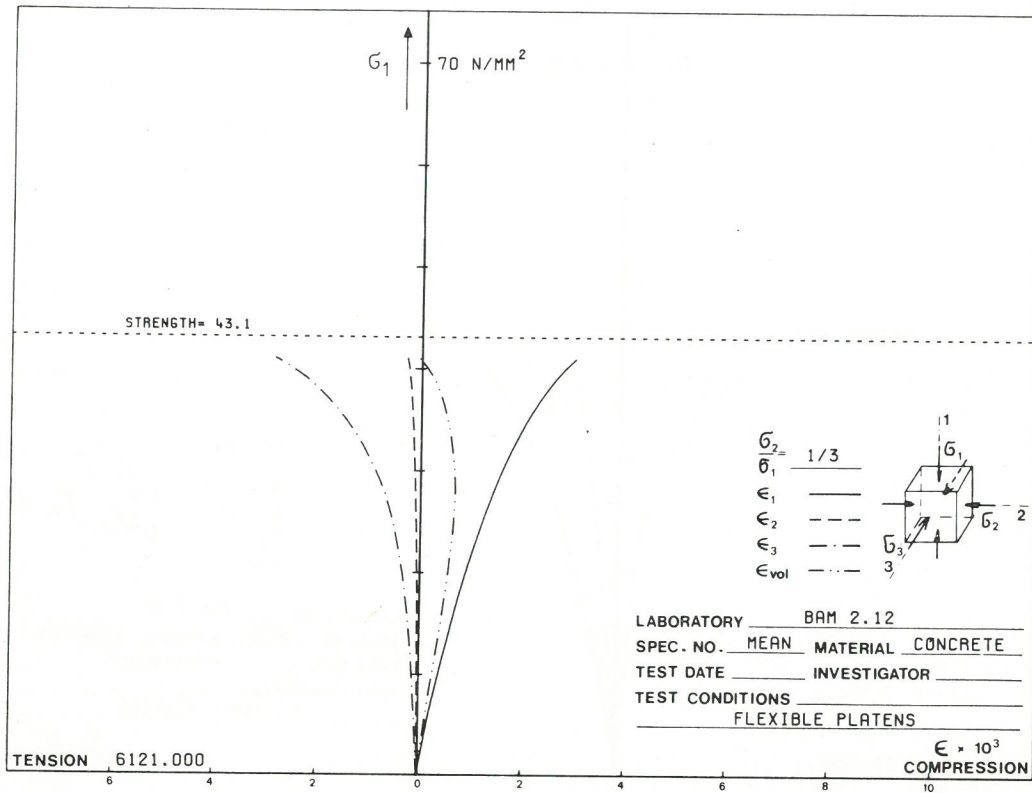


Bild
Figure 6.4-22a

schlechte Druckplatten
flexible platens

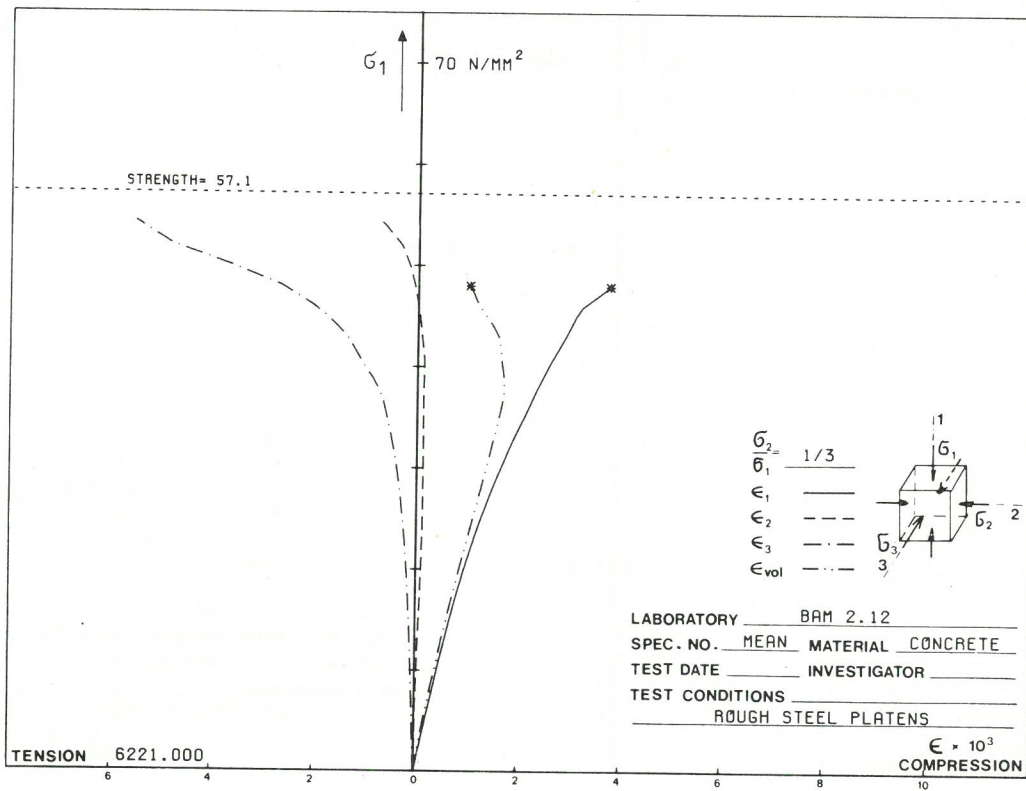


Bild
Figure 6.4-22b

starre Druckplatten
rough steel platens

Bilder
Figure 6.4-22a/b

Mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachsialer Prüfung; $\sigma_2/\sigma_1 = 1/3$
 Mean stress-strain behaviour of concrete, biaxially tested with $\sigma_2/\sigma_1 = 1/3$

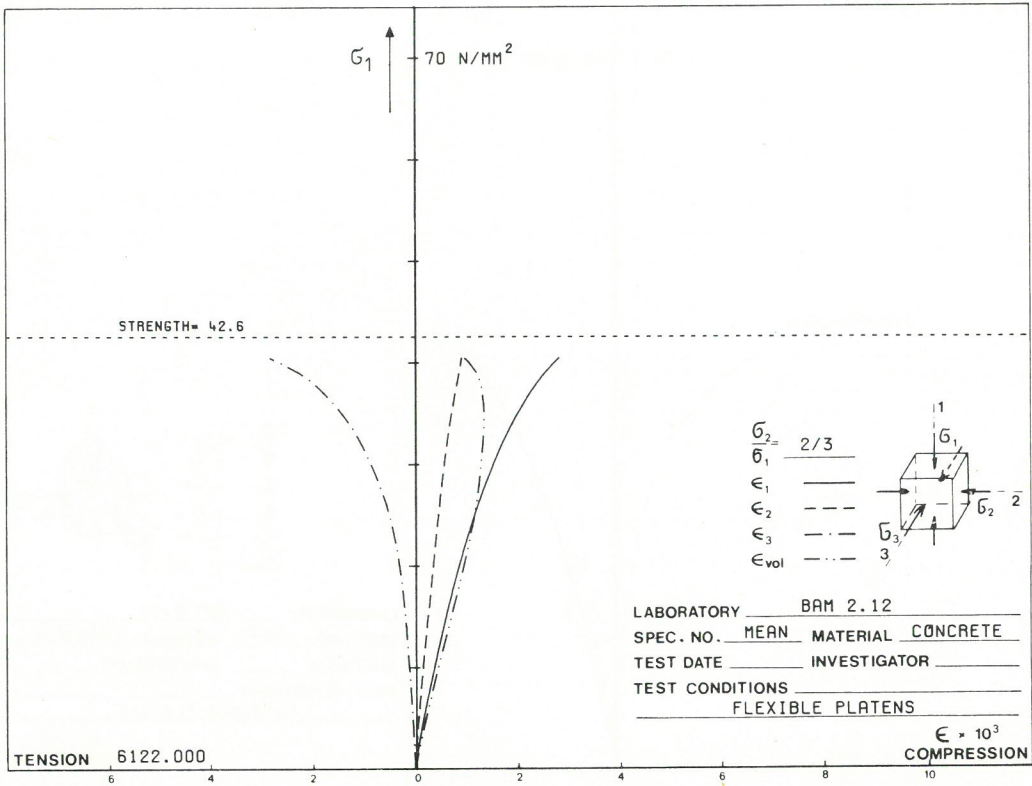


Bild
Figure 6.4-23a

schlaffe Druckplatten
flexible platens

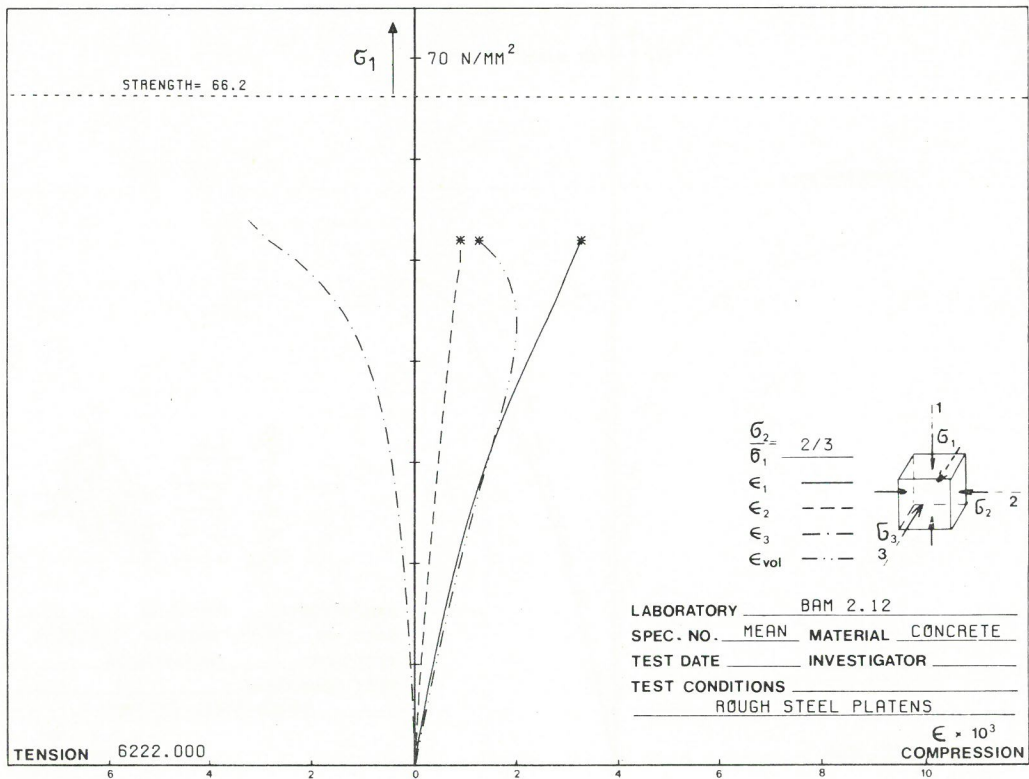


Bild
Figure 6.4-23b

starre Druckplatten
rough steel platens

Bilder
Figure 6.4-23a/b

Mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachsialer Prüfung; $G'_2/G'_1 = 2/3$
 Mean stress-strain behaviour of concrete, biaxially tested with $G'_2/G'_1 = 2/3$

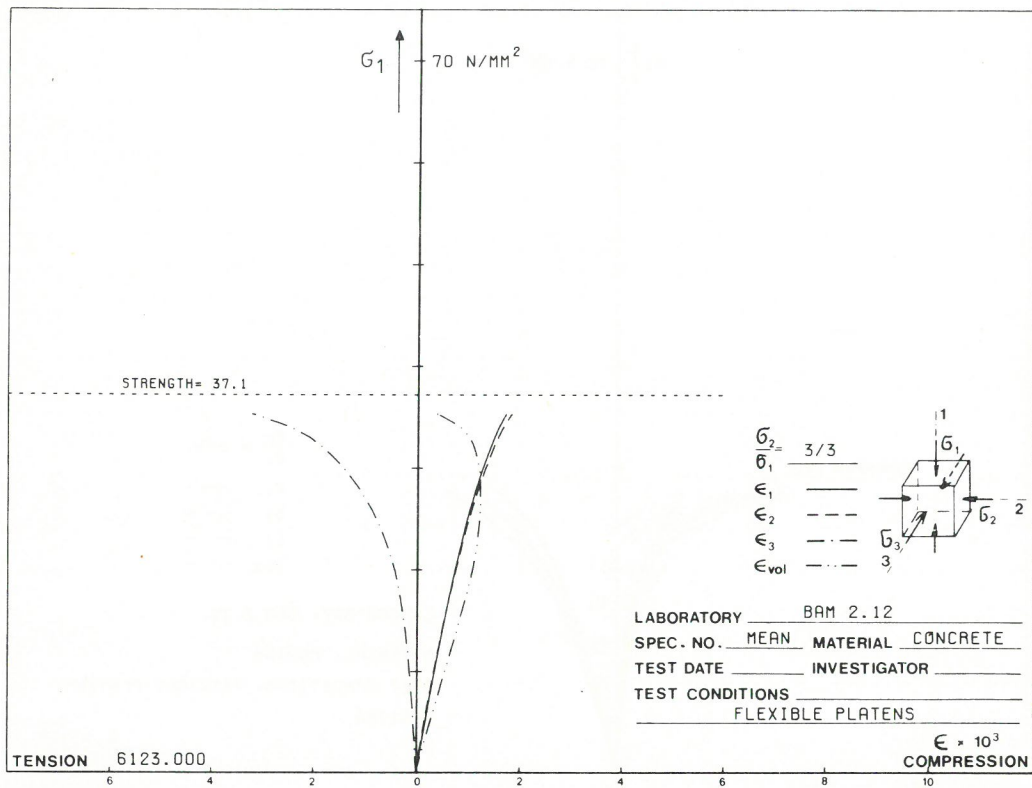


Bild
Figure 6.4-24a

schleife Druckplatten
flexible platens

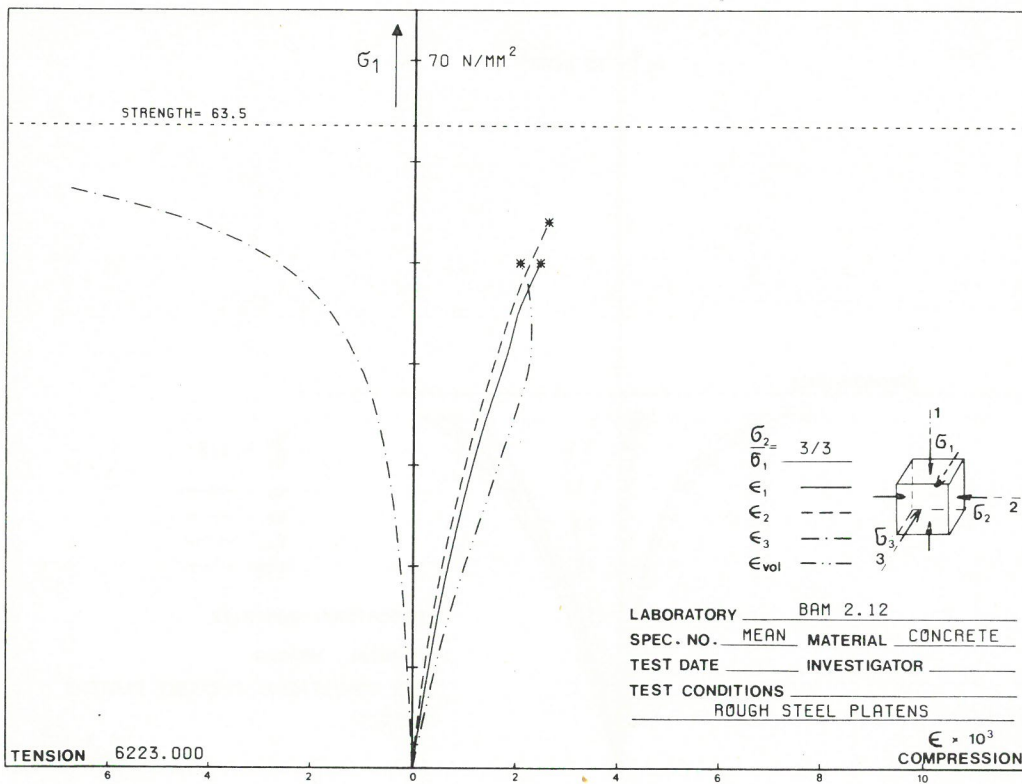


Bild
Figure 6.4-24b

starre Druckplatten
rough steel platens

Bilder
Figure 6.4-24a/b

Mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachsialer Prüfung; $G_2/G_1 = 3/3$
 Mean stress-strain behaviour of concrete, biaxially tested with $G_2/G_1 = 3/3$

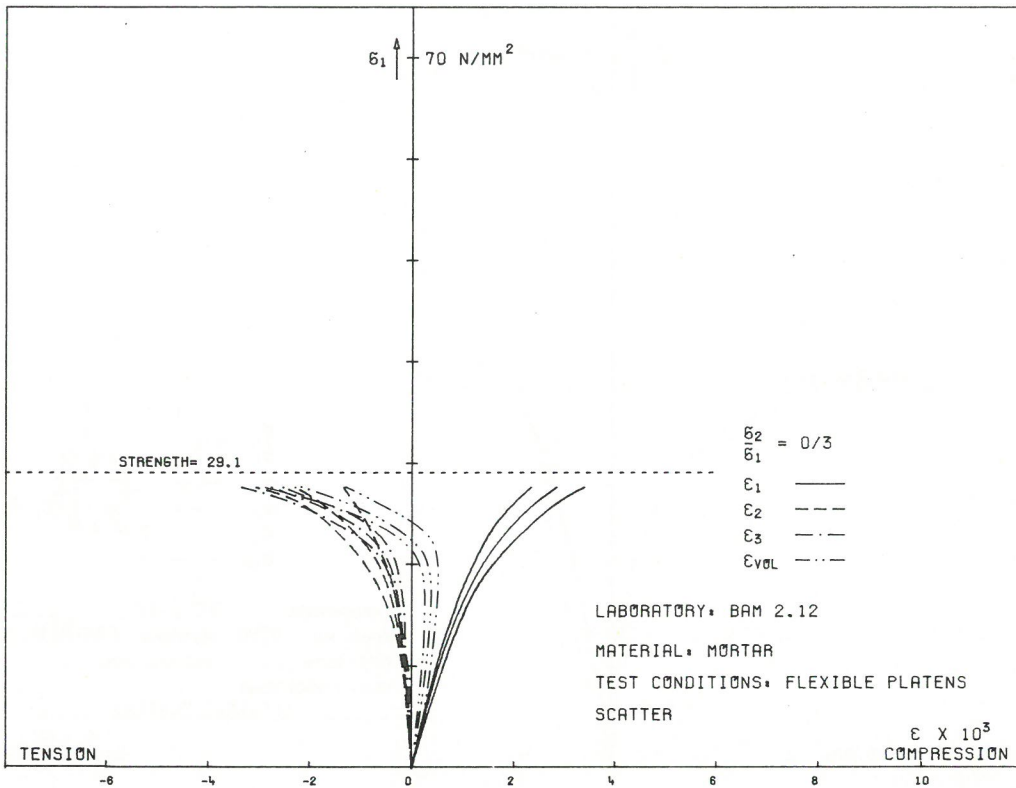


Bild
Figure 6.4-25

$$\sigma_2/\sigma_1 = 0/3$$

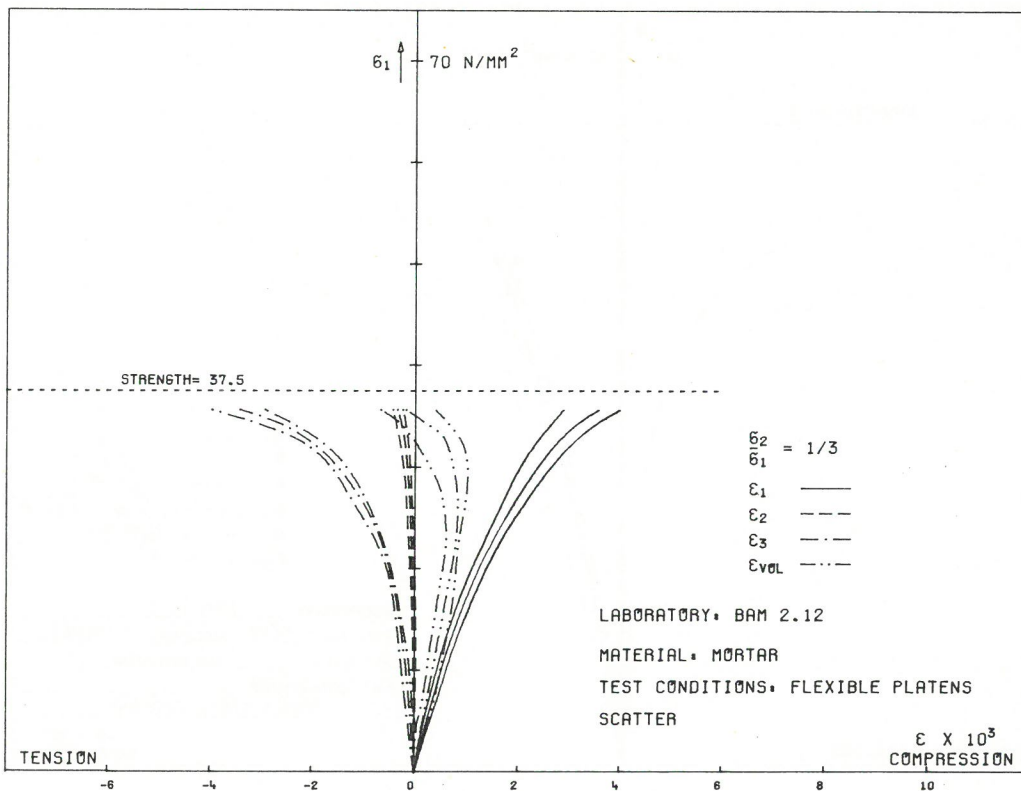


Bild
Figure 6.4-26

$$\sigma_2/\sigma_1 = 1/3$$

Bilder
Figures 6.4-25/26

Spannweite der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachsialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten (Spannweite: Grenzlinien der maximalen und minimalen Einzelwerte)

Scatter of mean stress-strain curves of mortar, tested biaxially with flexible platens

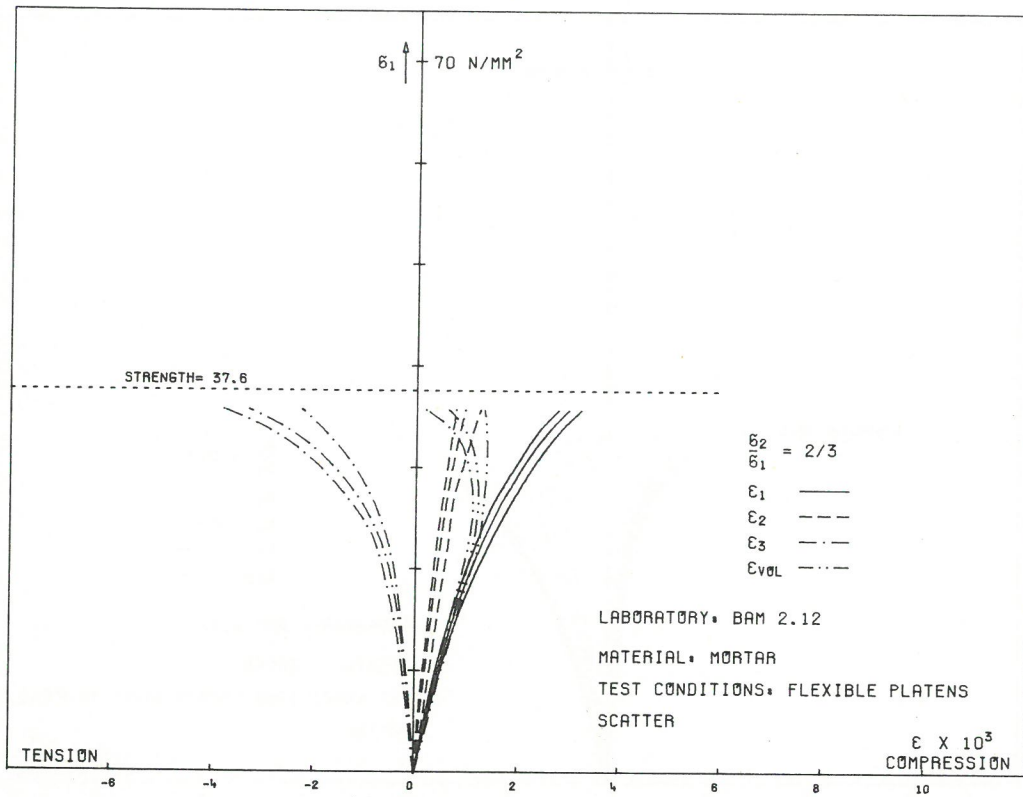


Bild
Figure 6.4-27

$$\sigma_2/\sigma_1 = 2/3$$

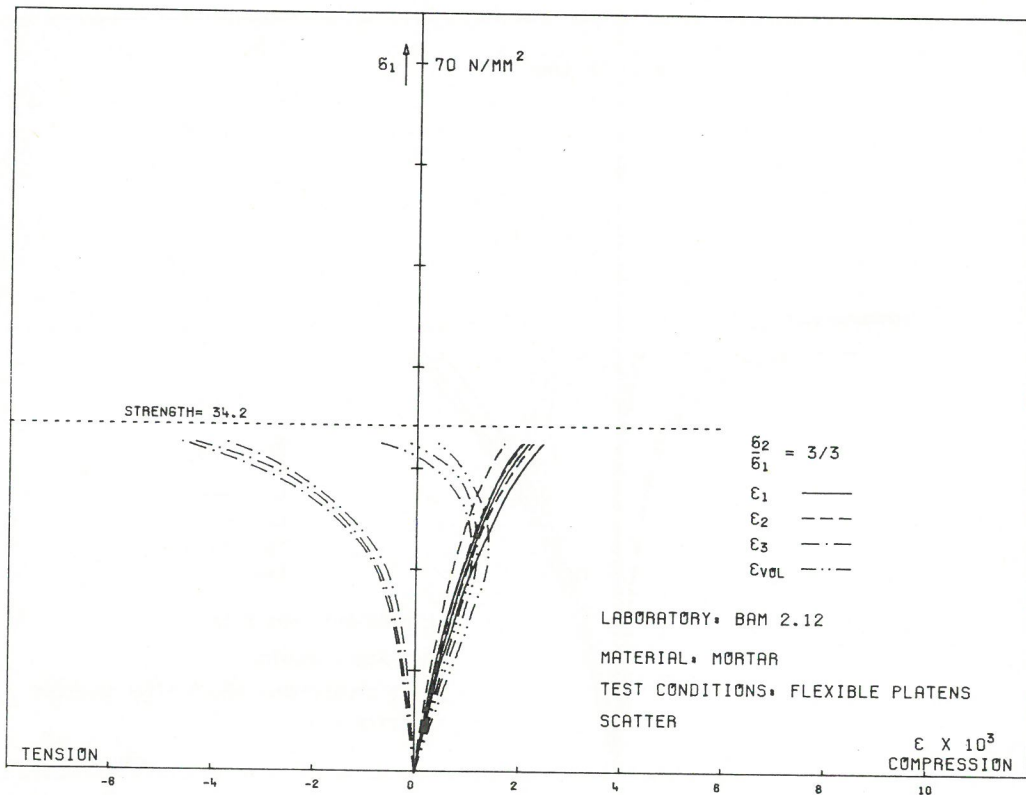


Bild
Figure 6.4-28

$$\sigma_2/\sigma_1 = 3/3$$

Bilder
Figures 6.4-27/28

Spannweite der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten (Spannweite: Grenzlinien der maximalen und minimalen Einzelwerte)

Scatter of mean stress-strain curves of mortar, tested biaxially with flexible platens

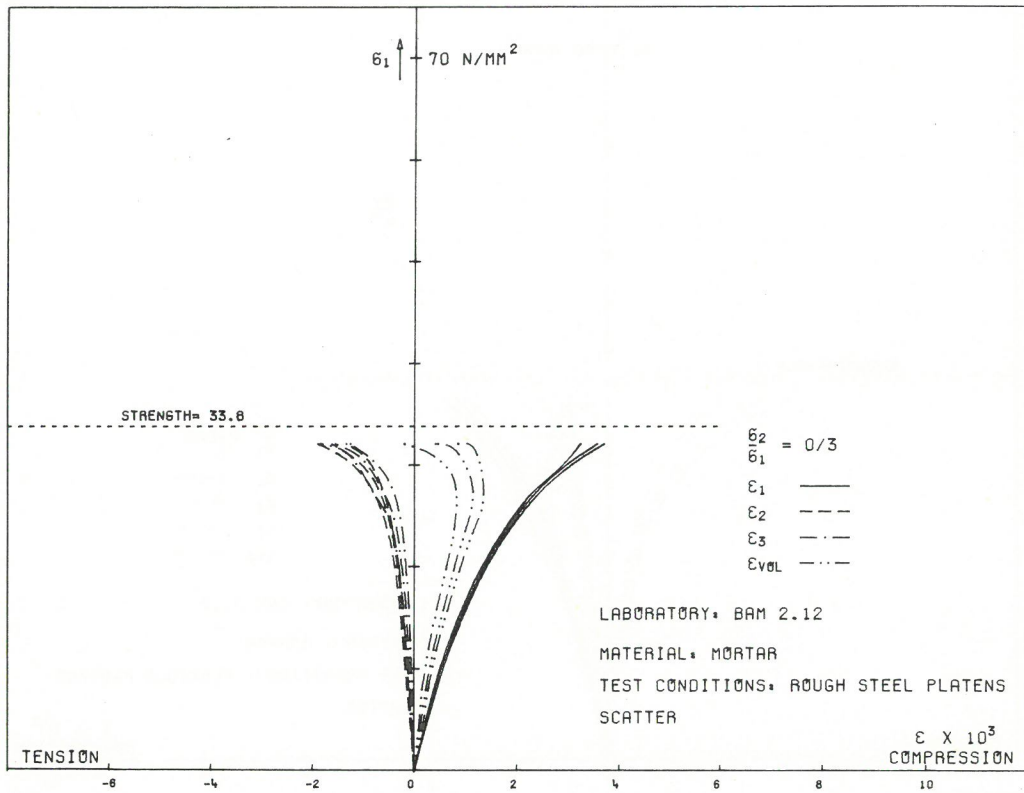


Bild
Figure 6.4-29

$\sigma_2/\sigma_1 = 0/3$

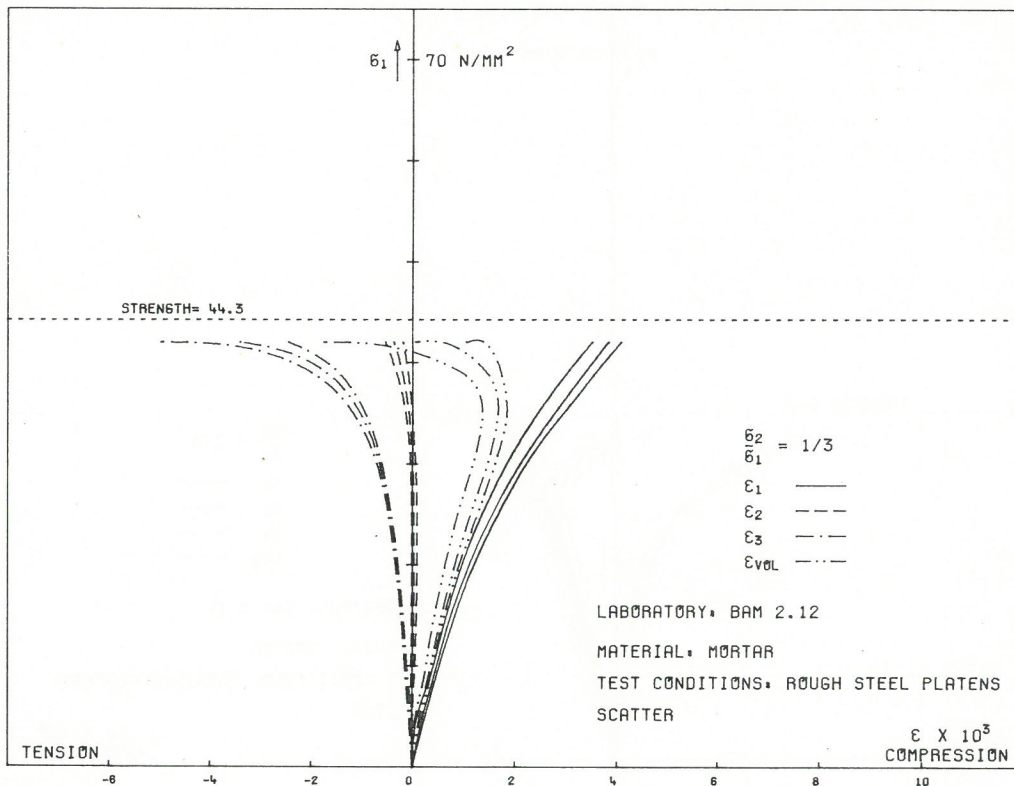


Bild
Figure 6.4-30

$\sigma_2/\sigma_1 = 1/3$

Bilder
Figures 6.4-29/30

Spannweite der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachialer Prüfung mit starren Druckplatten (Spannweite: Grenzlinien der maximalen und minimalen Einzelwerte)

Scatter of mean stress-strain curves of mortar, tested biaxially with rough steel platens

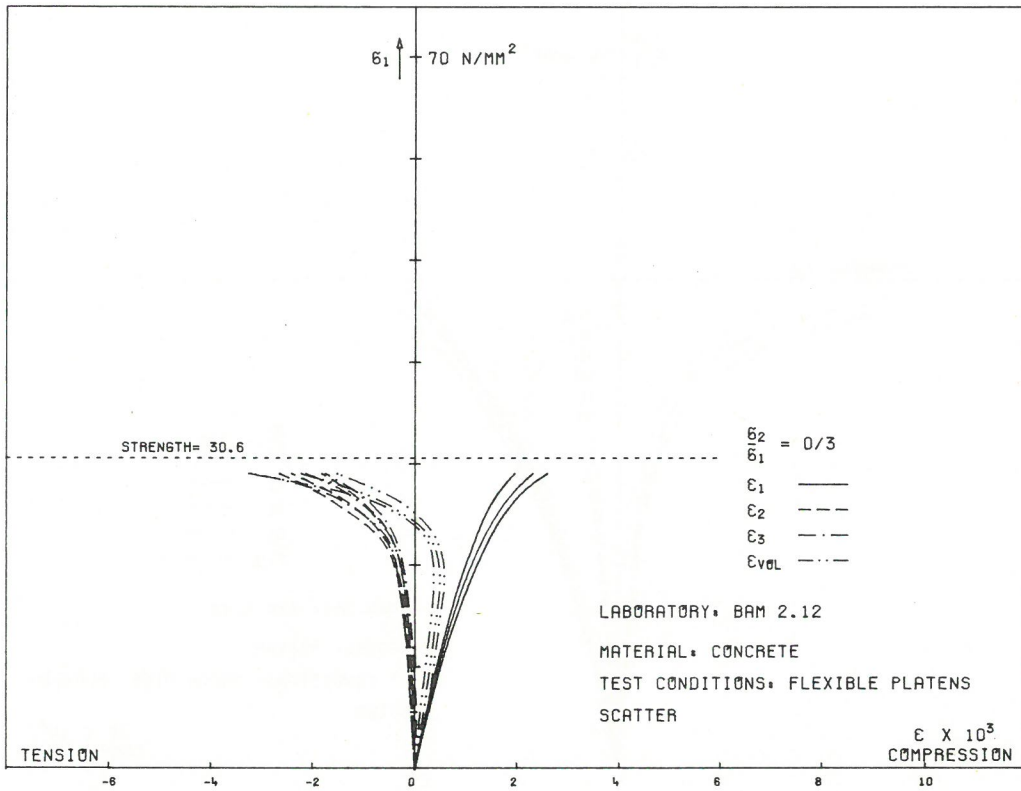


Bild
Figure 6.4-33

$\sigma_2/\sigma_1 = 0/3$

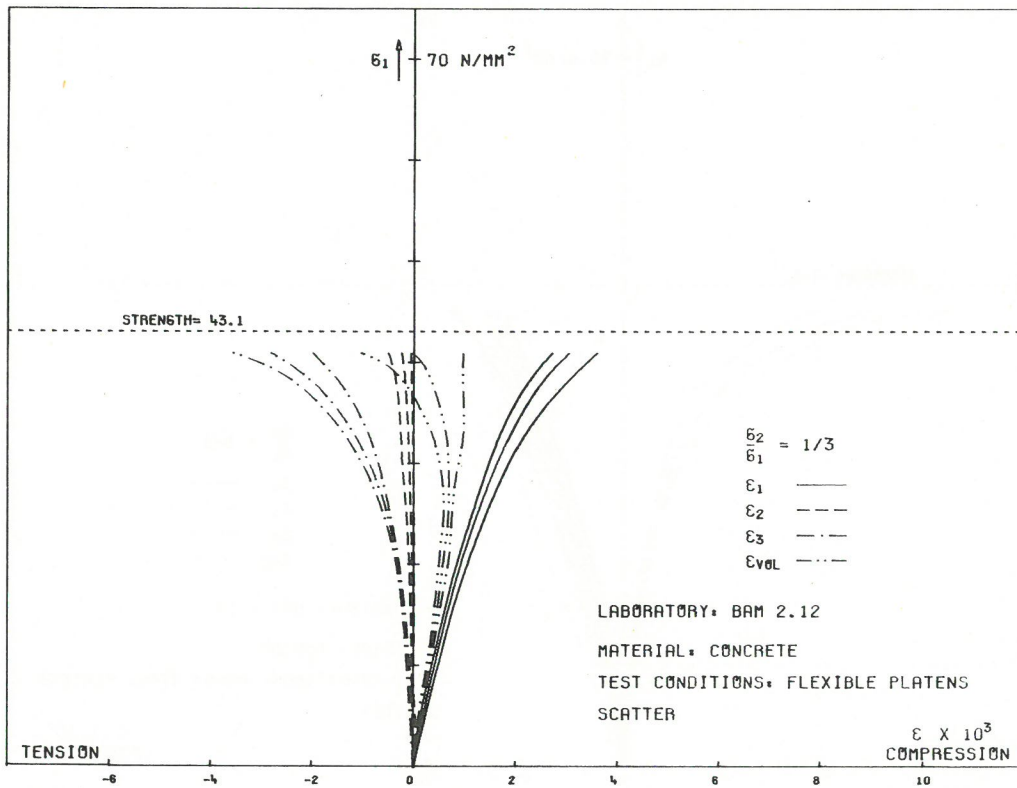


Bild
Figure 6.4-34

$\sigma_2/\sigma_1 = 1/3$

Bilder
Figures 6.4-33/34

Spannweite der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachsialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten (Spannweite: Grenzlinien der maximalen und minimalen Einzelwerte)
Scatter of mean stress-strain curves of concrete, tested biaxially with flexible platens

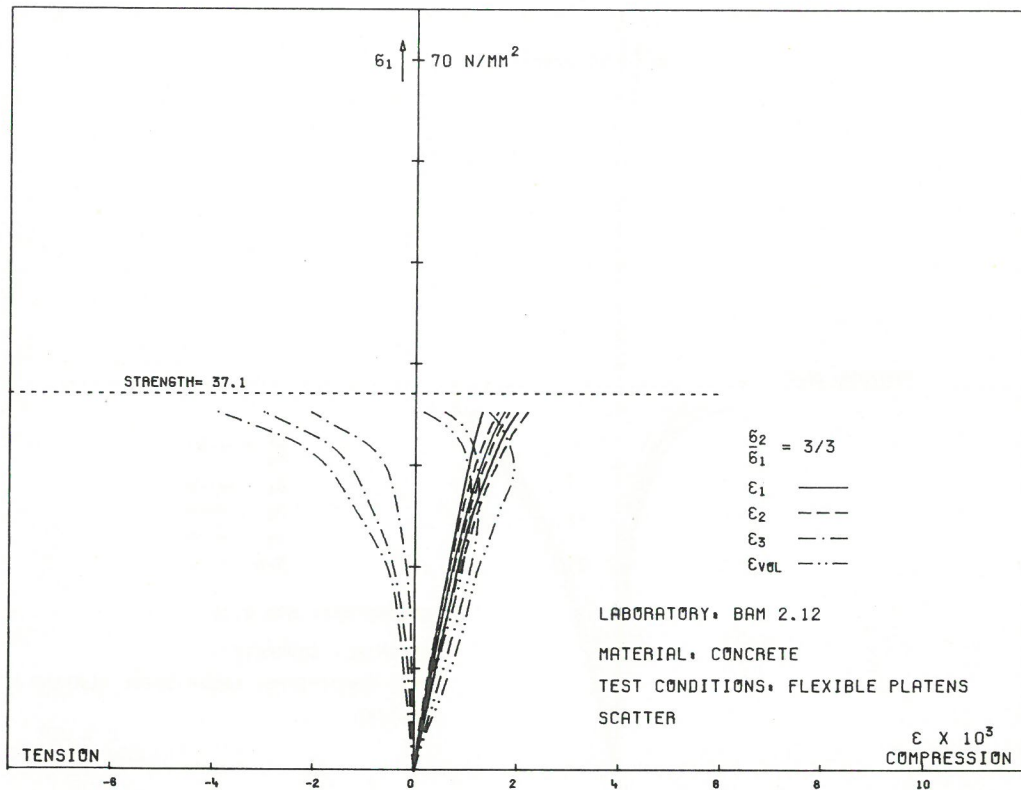


Bild
Figure 6.4-35

$\sigma_2/\sigma_1 = 2/3$

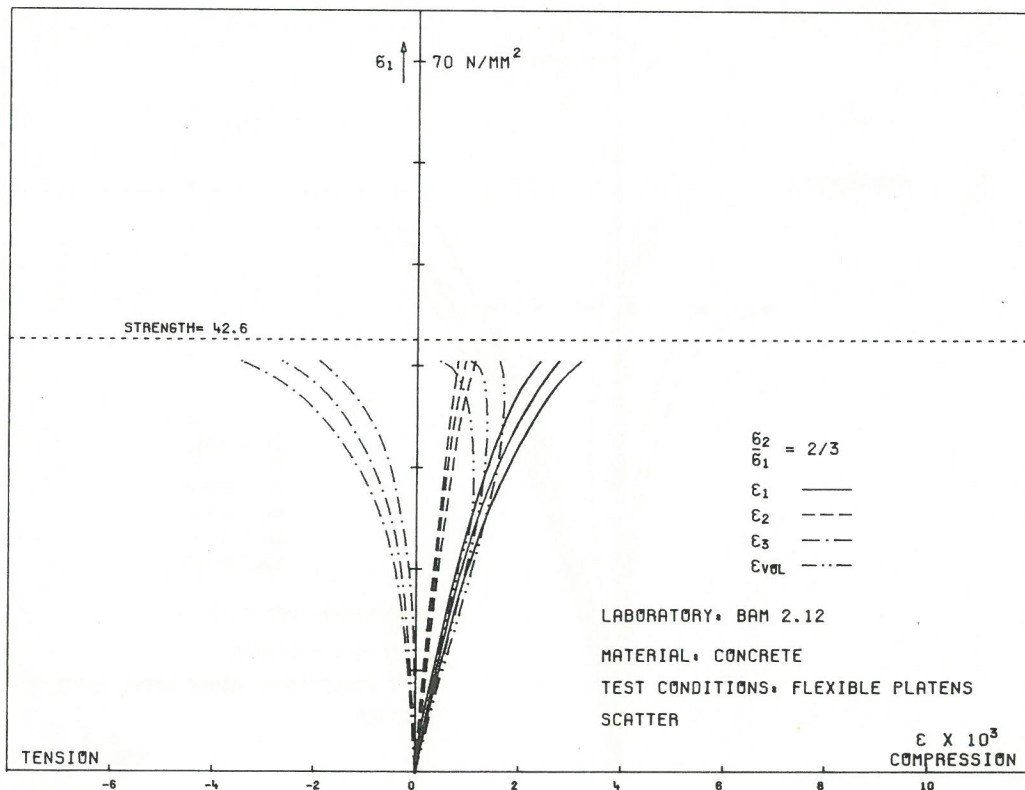


Bild
Figure 6.4-36

$\sigma_2/\sigma_1 = 3/3$

Bilder
Figures 6.4-35/36

Spannweite der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachsialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten (Spannweite: Grenzlinien der maximalen und minimalen Einzelwerte)

Scatter of mean stress-strain curves of concrete, tested biaxially with flexible platens

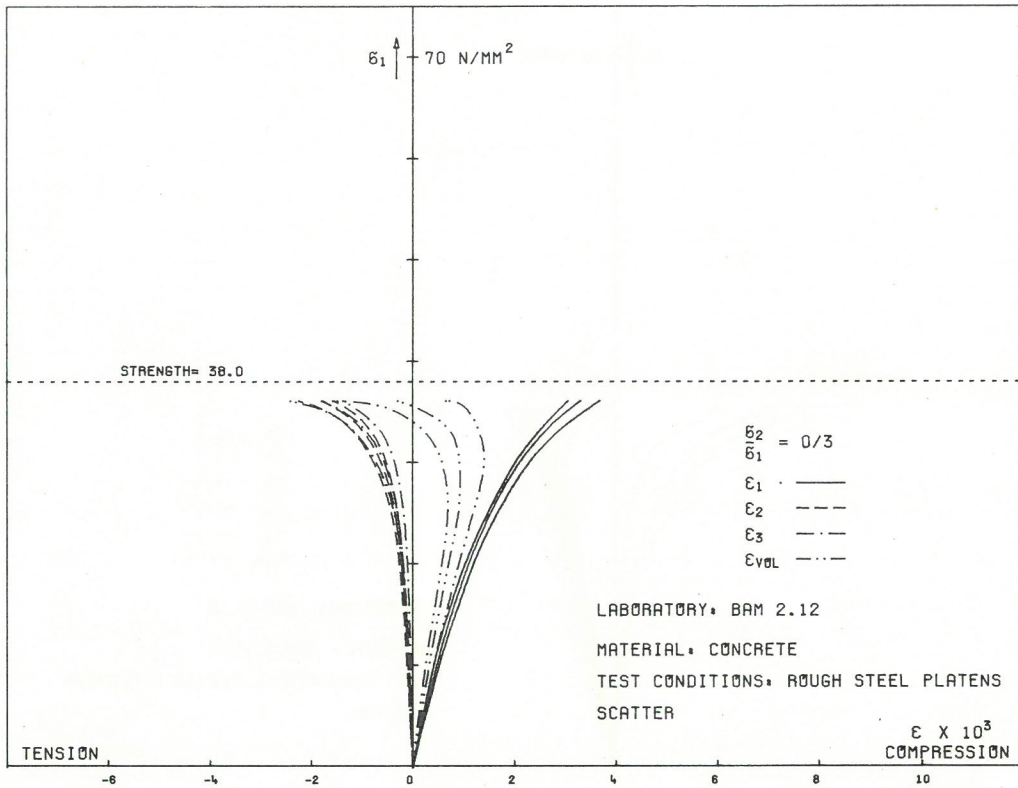


Bild
Figure 6.4-37

$\sigma_2/\sigma_1 = 0/3$

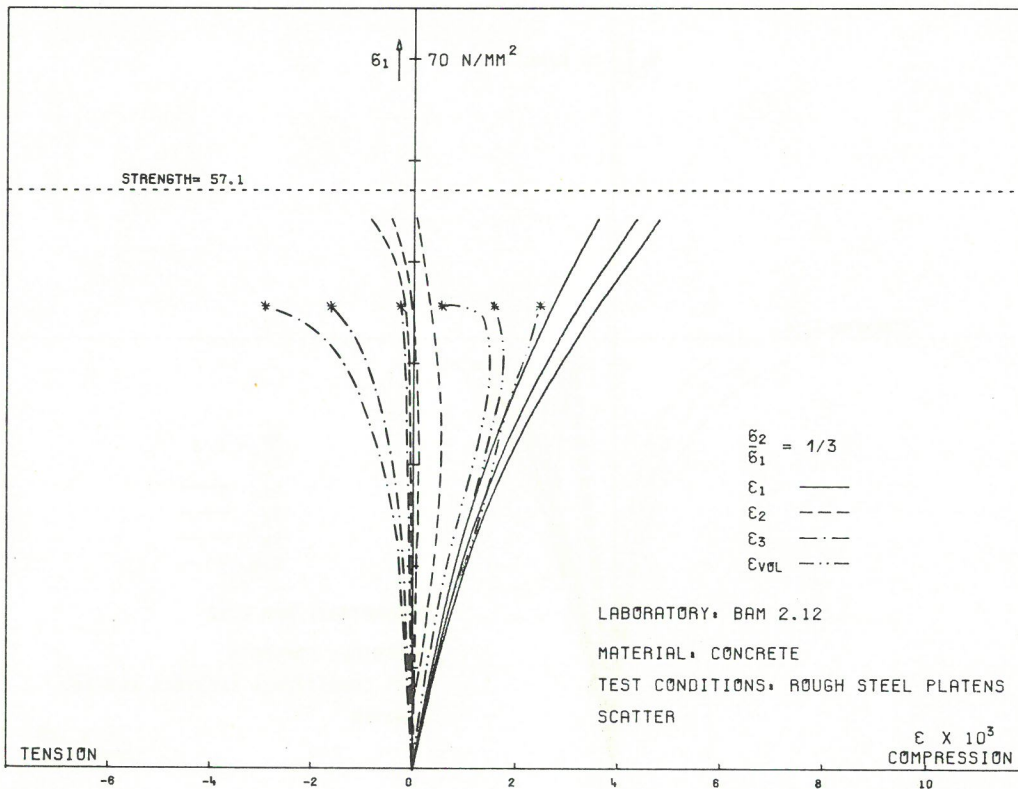


Bild
Figure 6.4-38

$\sigma_2/\sigma_1 = 1/3$

Bilder
Figures 6.4-37/38

Spannweite der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachialer Prüfung mit starren Druckplatten (Spannweite: Grenzlinien der maximalen und minimalen Einzelwerte)

Scatter of mean stress-strain curves of concrete, tested biaxially with rough steel platens

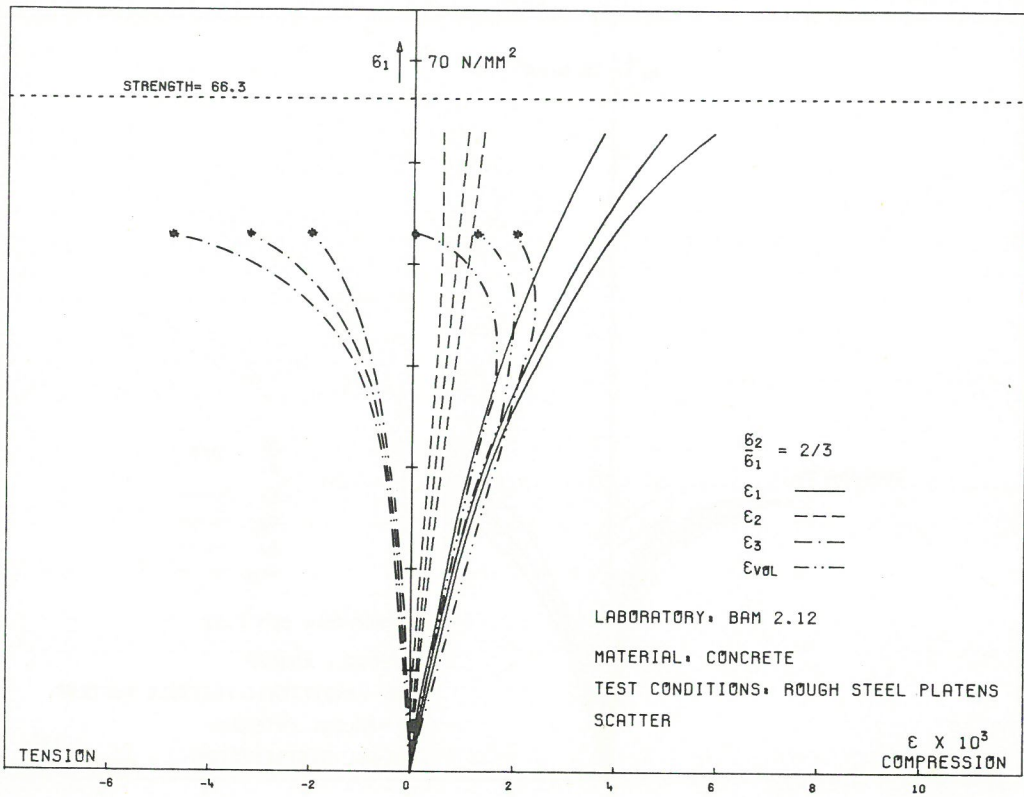


Bild
Figure 6.4-39

$\sigma_2/\sigma_1 = 2/3$

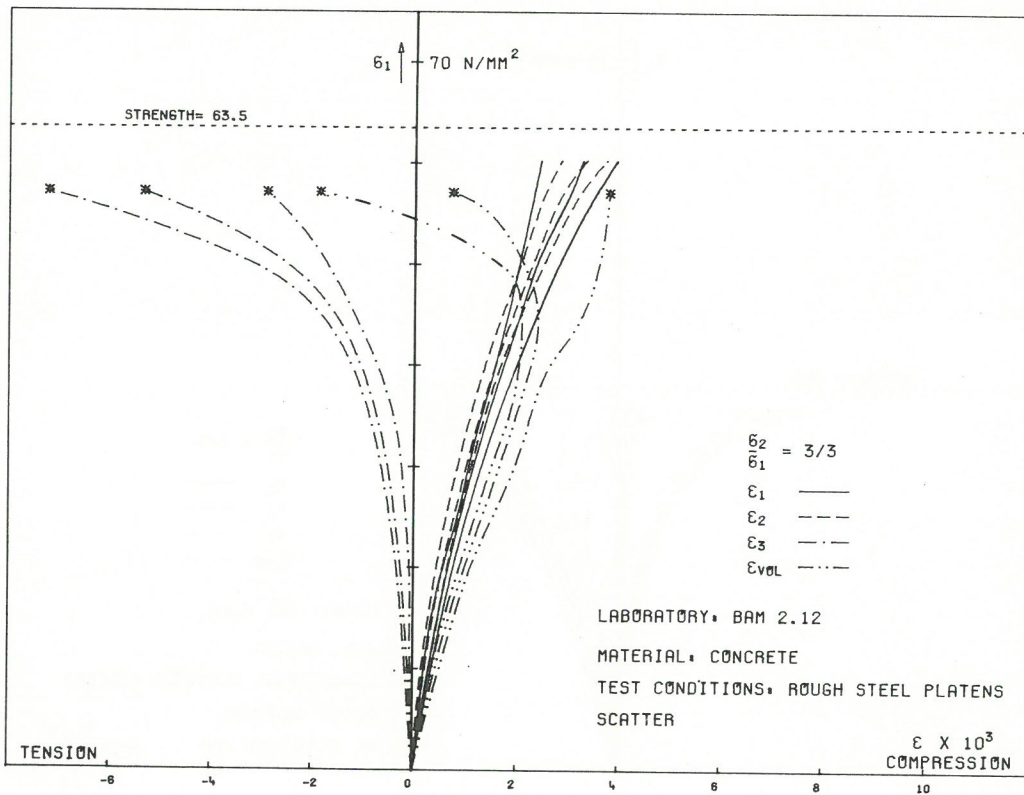


Bild
Figure 6.4-40

$\sigma_2/\sigma_1 = 3/3$

Bilder
Figures 6.4-39/40

Spannweite der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachialer Prüfung mit starren Druckplatten (Spannweite: Grenzlinien der maximalen und minimalen Einzelwerte)

Scatter of mean stress-strain curves of concrete, tested biaxially with rough steel platens

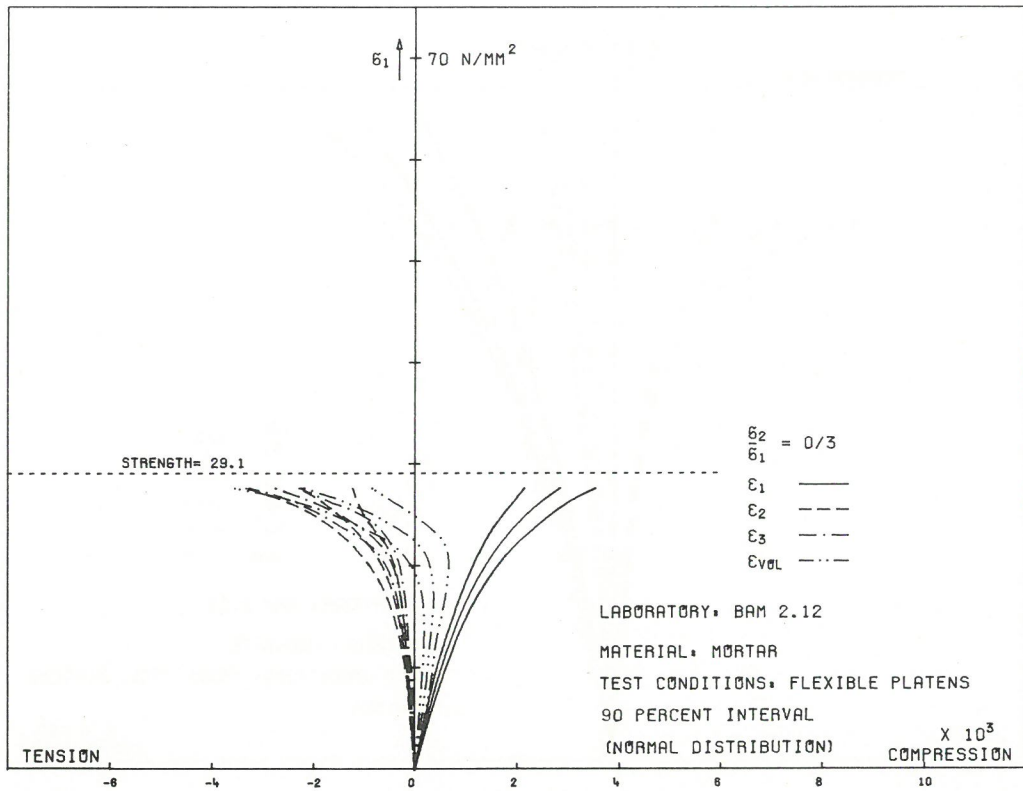


Bild
Figure 6.4-41

$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0/3$

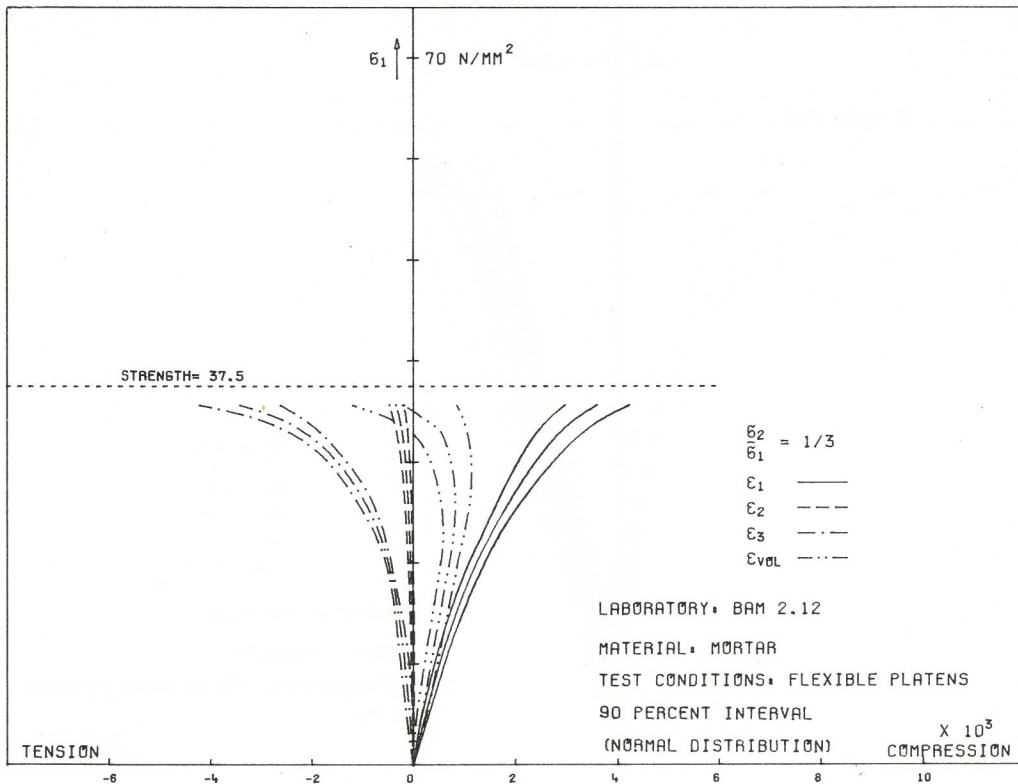


Bild
Figure 6.4-42

$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1/3$

Bilder
Figures 6.4-41/42

Streubereich der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachsialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten (Streubereich: 90% Intervall der Normalverteilung)

90% interval of normal distribution of the individual strain values of mortar together with corresponding mean stress-strain curves, tested biaxially with flexible platens

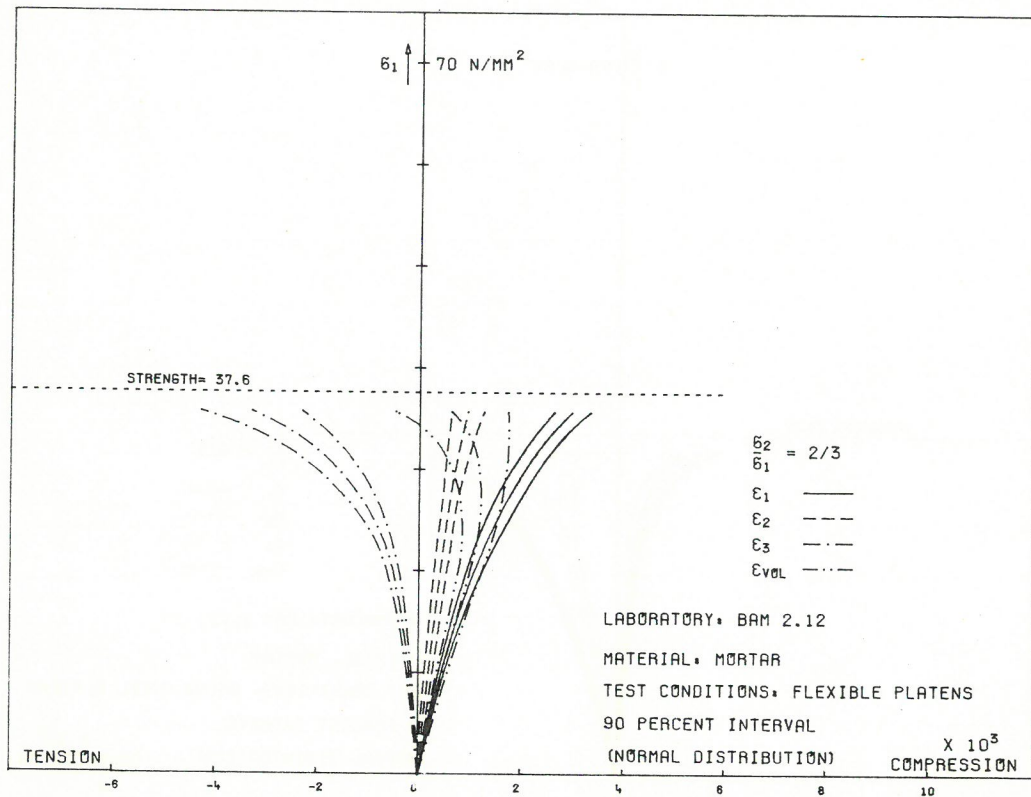


Bild
Figure 6.4-43

$$\sigma_2/\sigma_1 = 2/3$$

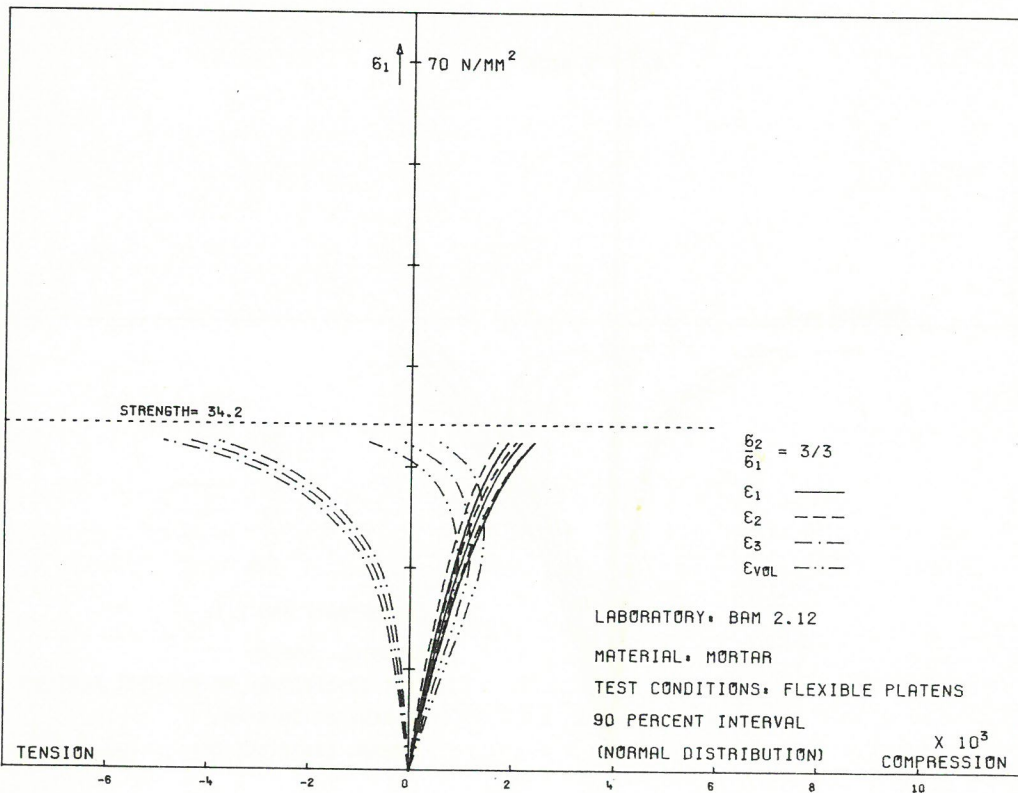


Bild
Figure 6.4-44

$$\sigma_2/\sigma_1 = 3/3$$

Bilder

Figures 6.4-43/44

Streubereich der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachsialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten (Streubereich: 90% Intervall der Normalverteilung)

90% interval of normal distribution of the individual strain values of mortar together with corresponding mean stress-strain curves, tested biaxially with flexible platens

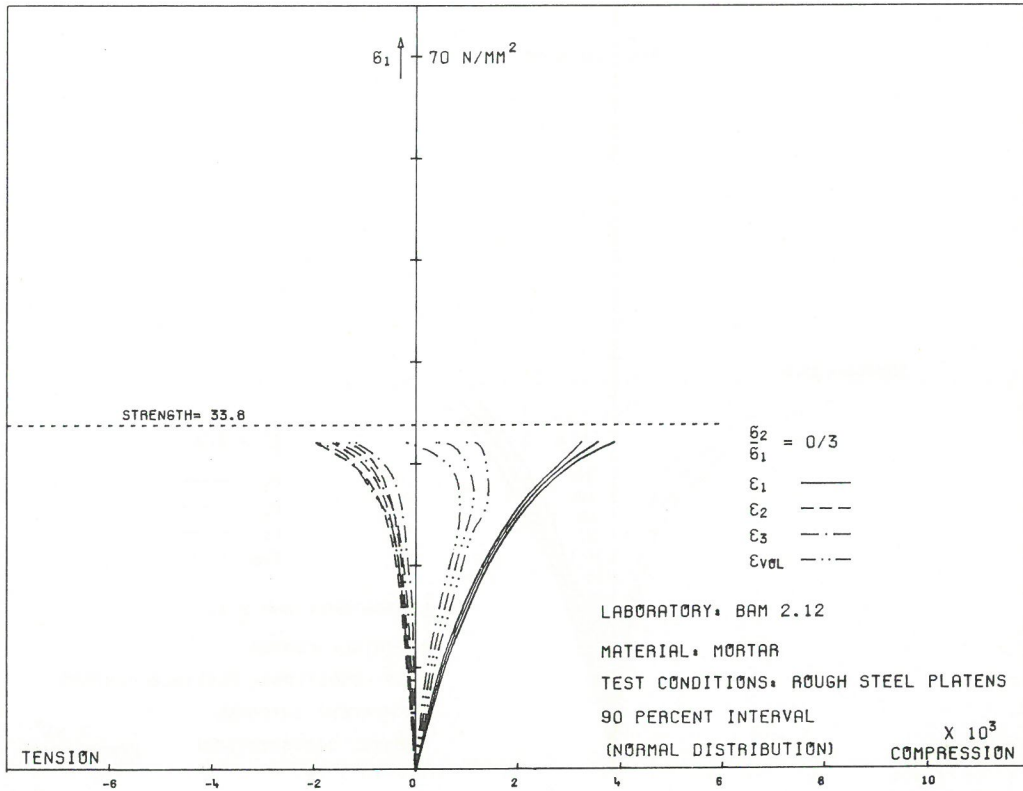


Bild
Figure 6.4-45

$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0/3$

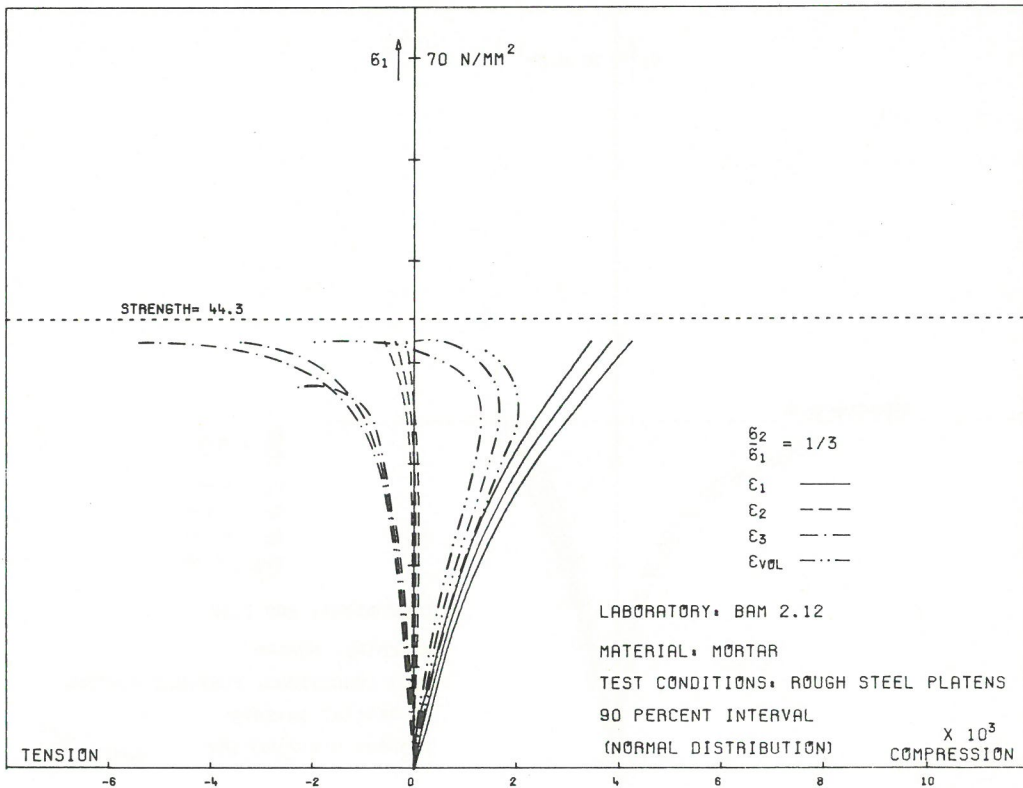


Bild
Figure 6.4-46

$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1/3$

Bilder
Figures 6.4-45/46

Streubereich der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachsialer Prüfung mit starren Druckplatten (Streubereich: 90% Intervall der Normalverteilung)

90% interval of normal distribution of the individual strain values of mortar together with corresponding mean stress-strain curves, tested biaxially with rough steel platens

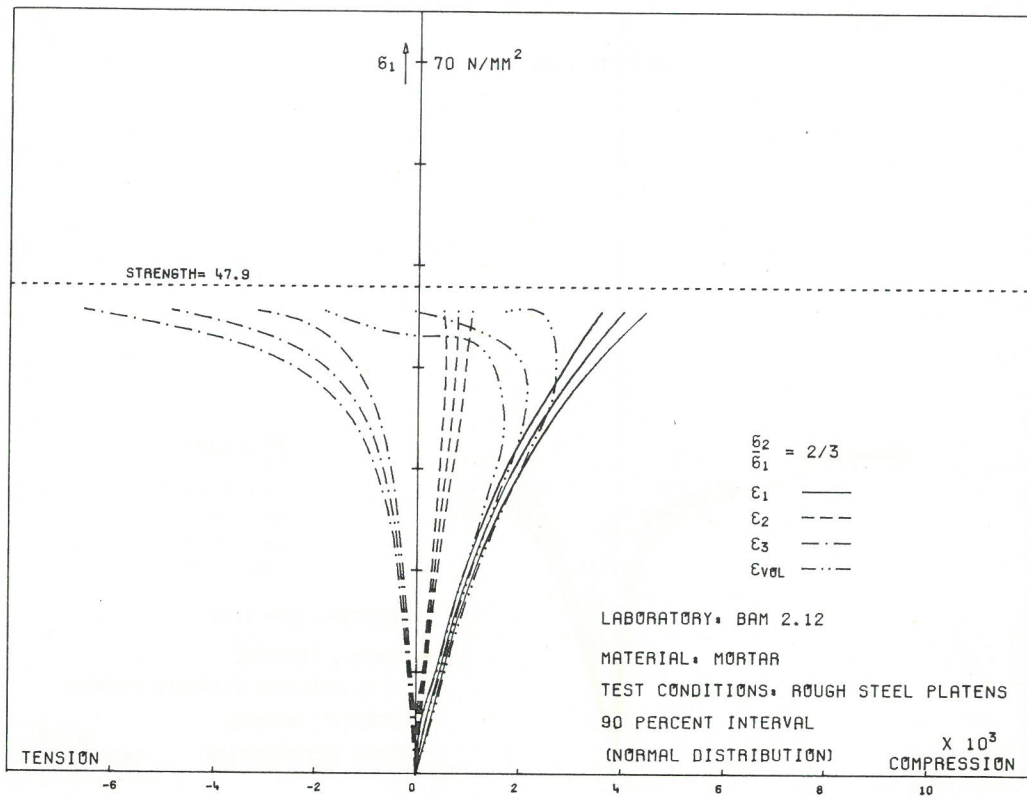


Bild
Figure 6.4-47

$$\sigma_2/\sigma_1 = 2/3$$

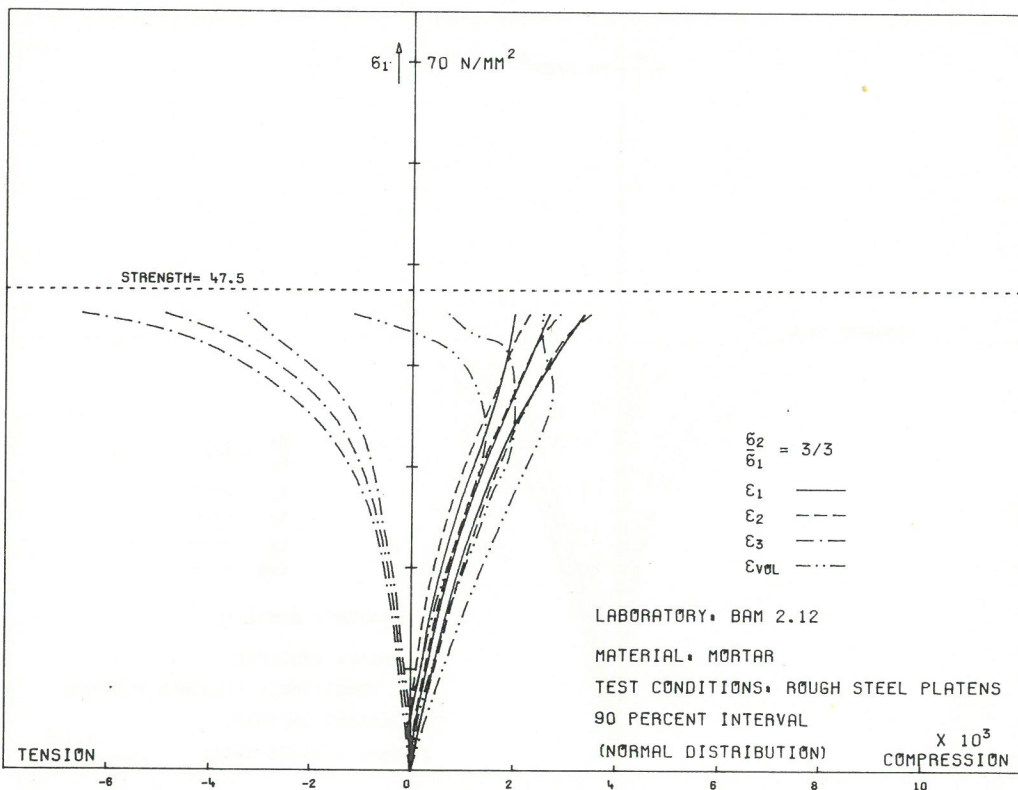


Bild
Figure 6.4-48

$$\sigma_2/\sigma_1 = 3/3$$

Bilder
Figures 6.4-47/48

Streubereich der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Mörtel bei zweiachialer Prüfung mit starren Druckplatten (Streubereich: 90% Intervall der Normalverteilung)

90% interval of normal distribution of the individual strain values of mortar together with corresponding mean stress-strain curves, tested biaxially with rough steel platens

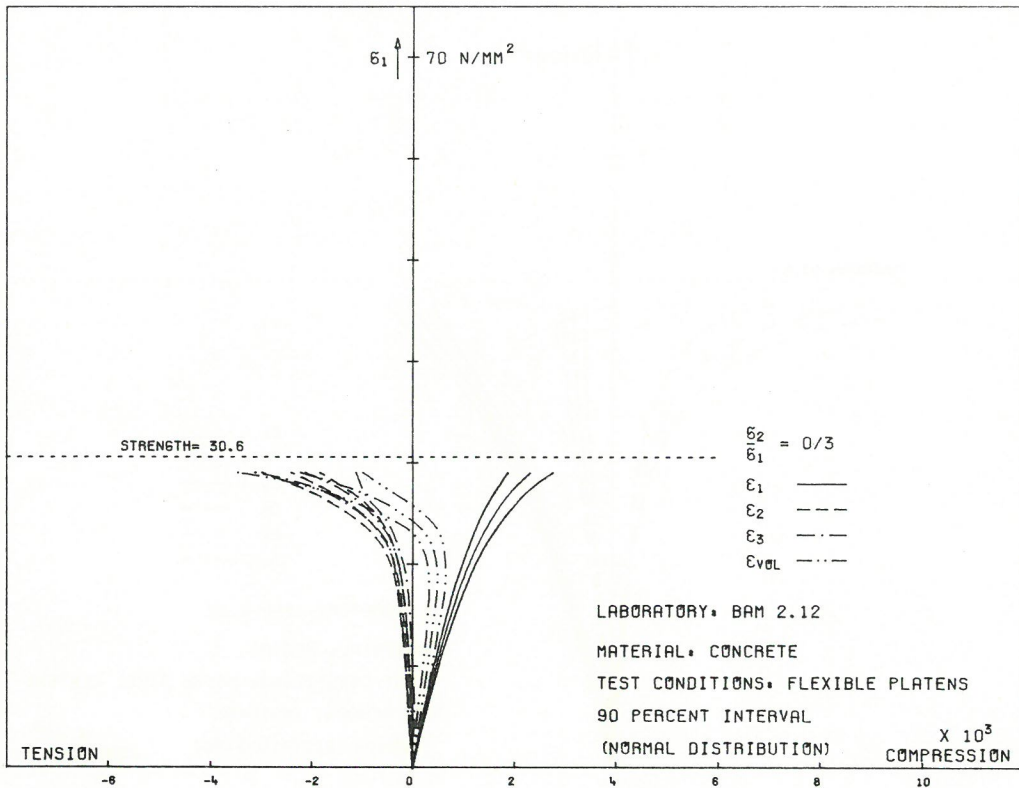


Bild
Figure 6.4-49

$$\sigma_2/\sigma_1 = 0/3$$

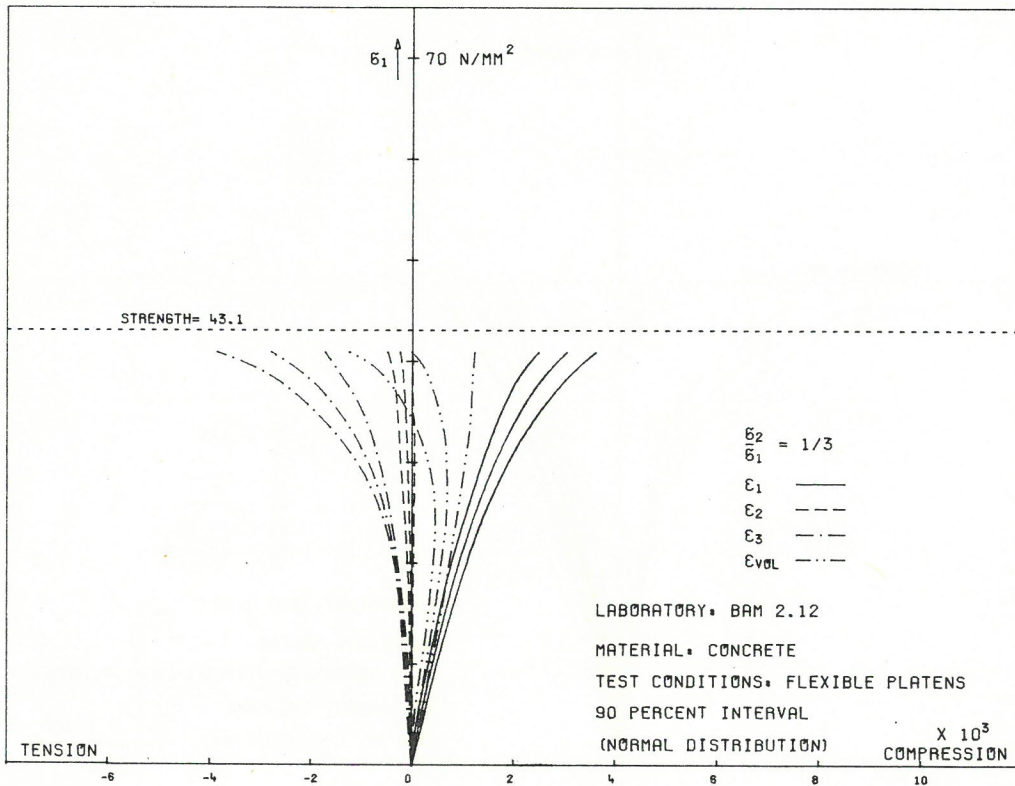


Bild
Figure 6.4-50

$$\sigma_2/\sigma_1 = 1/3$$

Bilder
Figures 6.4-49/50

Streubereich der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachsigler Prüfung mit schlaffen Druckplatten (Streubereich: 90% Intervall der Normalverteilung)

90% interval of normal distribution of the individual strain values of concrete together with corresponding mean stress-strain curves, tested biaxially with flexible platens

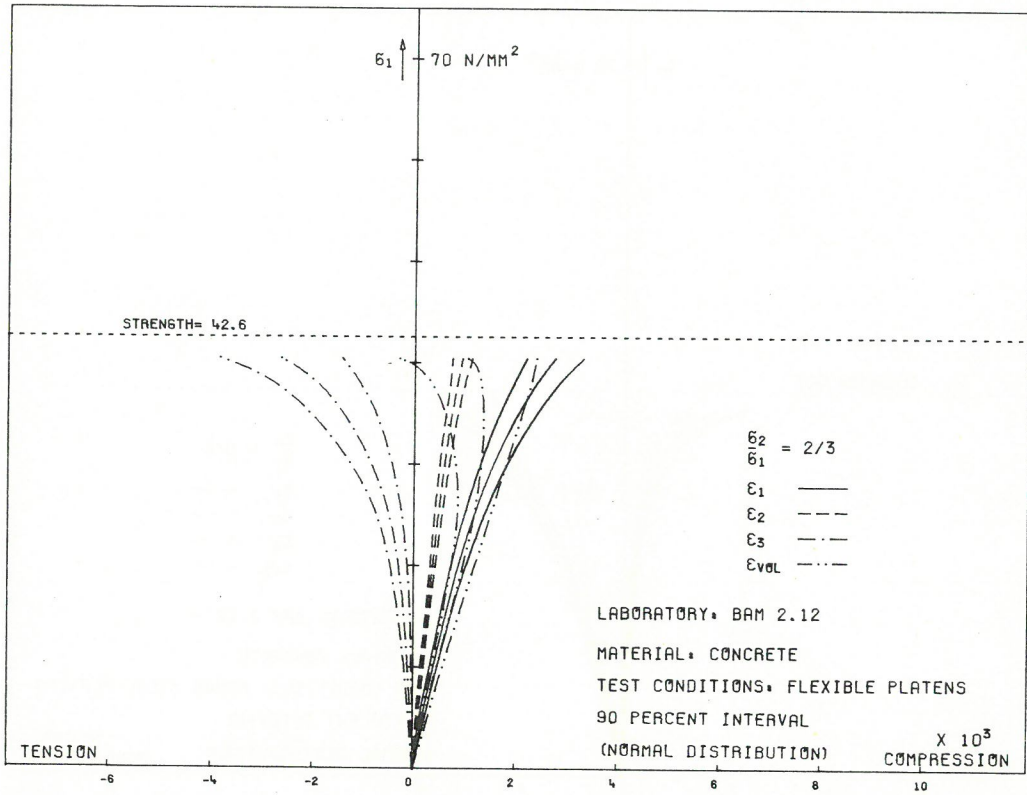


Bild
Figure 6.4-51

$$\sigma_2/\sigma_1 = 2/3$$

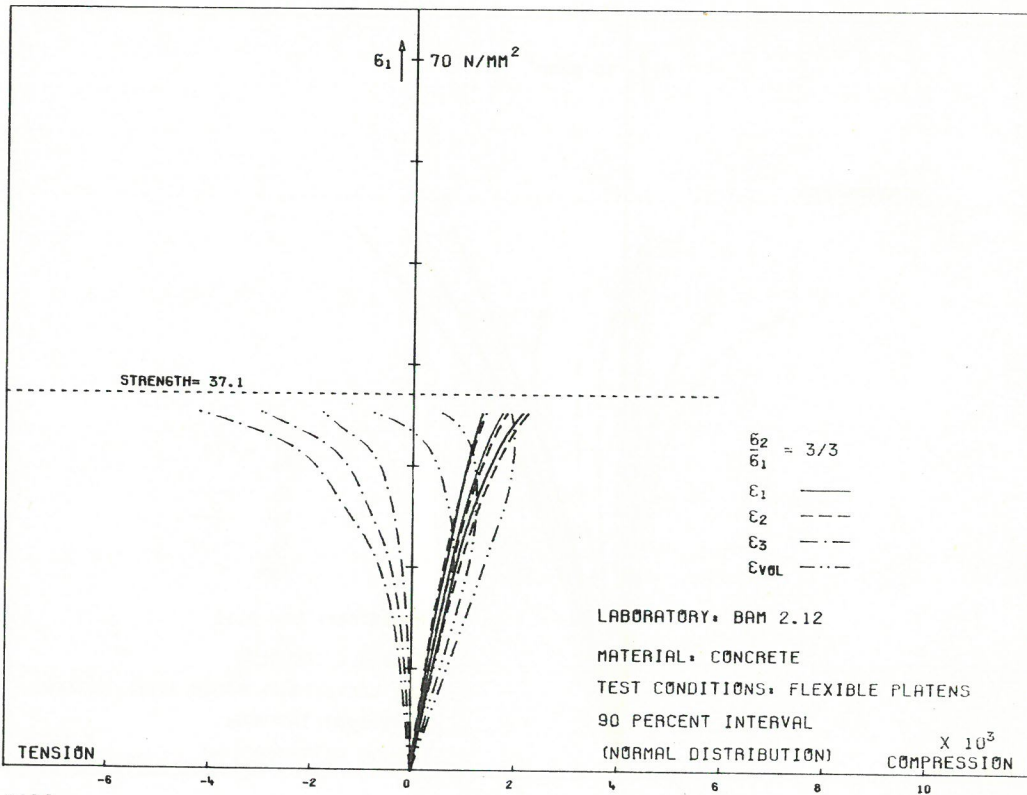


Bild
Figure 6.4-52

$$\sigma_2/\sigma_1 = 3/3$$

Bilder
Figures 6.4-51/52

Streubereich der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten (Streubereich: 90% Intervall der Normalverteilung)

90% interval of normal distribution of the individual strain values of concrete together with corresponding mean stress-strain curves, tested biaxially with flexible platens

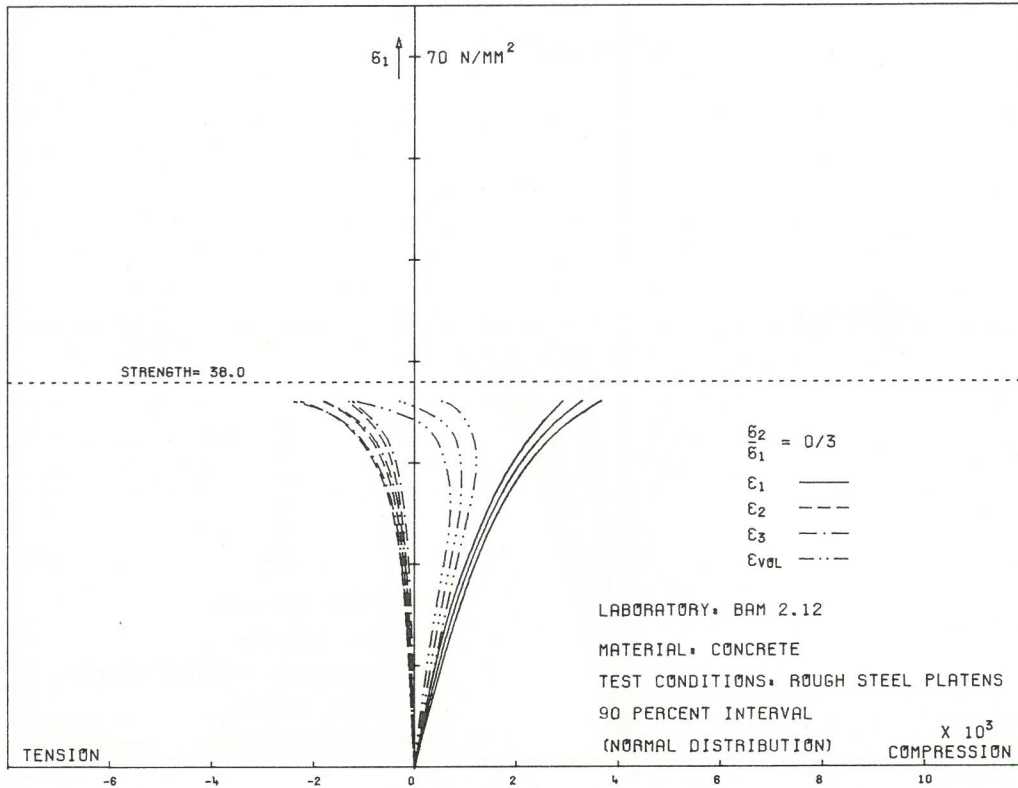


Bild
Figure 6.4-53

$$\sigma_2/\sigma_1 = 0/3$$

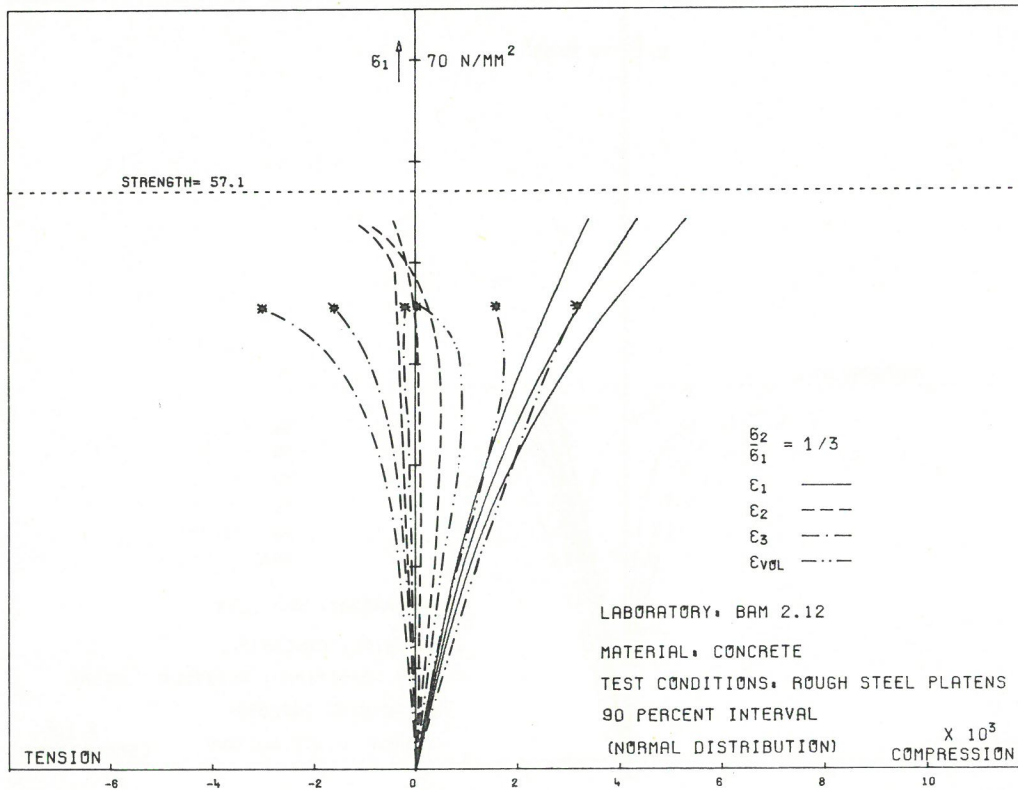


Bild
Figure 6.4-54

$$\sigma_2/\sigma_1 = 1/3$$

Bilder
Figures 6.4-53/54

Streubereich der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachialer Prüfung mit starren Druckplatten (Streubereich: 90% Intervall der Normalverteilung)

90% interval of normal distribution of the individual strain values of concrete together with corresponding mean stress-strain curves, tested biaxially with rough steel platens

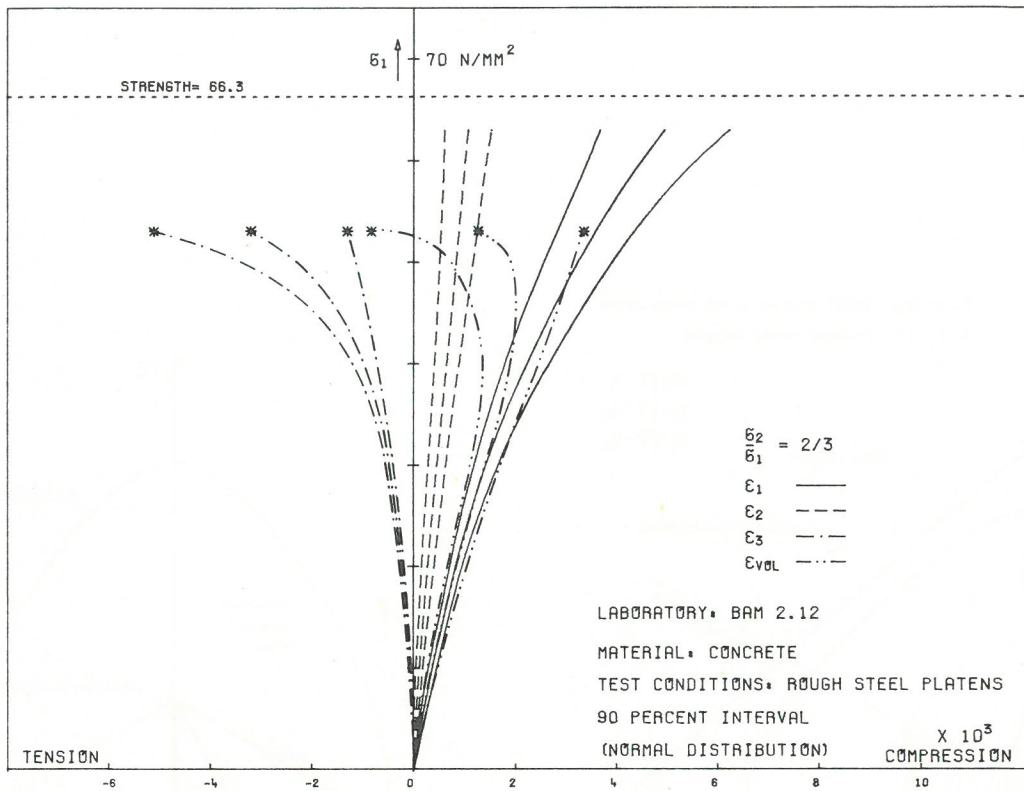


Bild
Figure 6.4-55

$G_2/G_1 = 2/3$

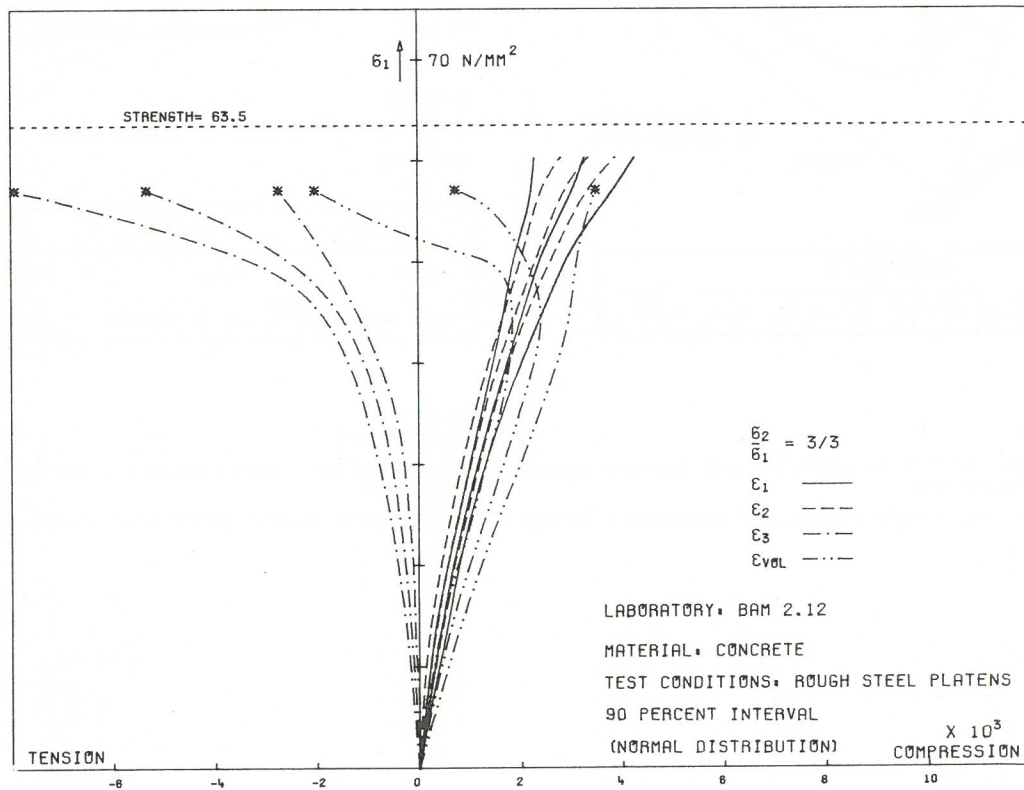


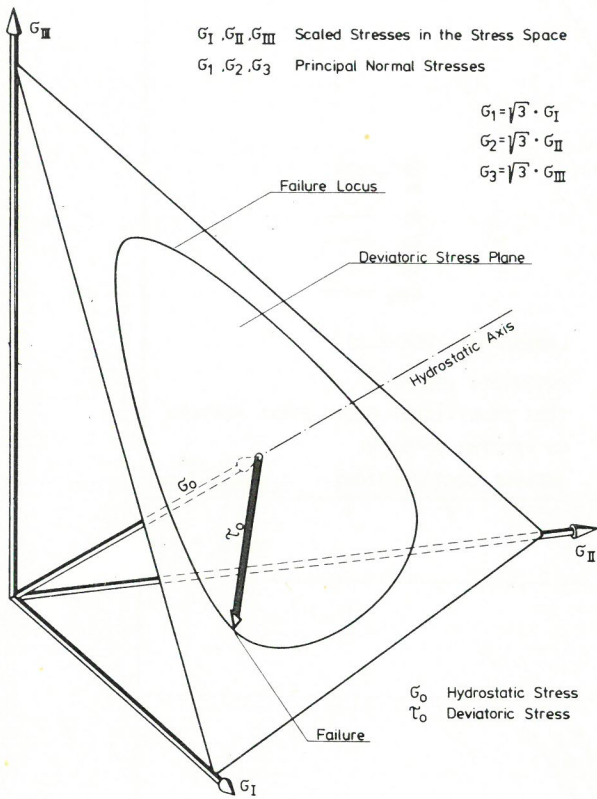
Bild
Figure 6.4-56

$G_2/G_1 = 3/3$

Bilder
Figures 6.4-55/56

Streubereich der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei zweiachsialer Prüfung mit starren Druckplatten (Streubereich: 90% Intervall der Normalverteilung)

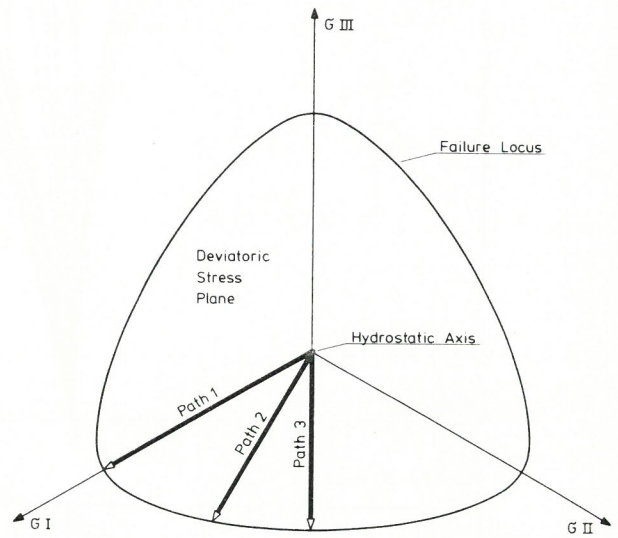
90% interval of normal distribution of the individual strain values of concrete together with corresponding mean stress-strain curves, tested biaxially with rough steel platens



$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

$$\tau_0 = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_3 \cdot \sigma_1}$$

Bild
 Figure 6.5-1
 Spannungsraum mit hydrostatischen und deviatorischen Spannungskomponenten
 Stress space with hydrostatic and deviatoric stress components



$\sigma_1 = \sqrt{3} \cdot \sigma_I$
 $\sigma_2 = \sqrt{3} \cdot \sigma_{II}$
 $\sigma_3 = \sqrt{3} \cdot \sigma_{III}$

$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ compressive stress

Stress Path 1	Stress Path 2	Stress Path 3
$\Delta \sigma_1 > 0$	$\Delta \sigma_1 > 0$	$\Delta \sigma_1 = \Delta \sigma_2 > 0$
$\Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3 = -1/2 \Delta \sigma_1$	$\Delta \sigma_2 = 0$ $\Delta \sigma_3 = -\Delta \sigma_1$	$\Delta \sigma_3 = -2 \Delta \sigma_1 = -2 \Delta \sigma_2$

Bild
 Figure 6.5-2
 Spannungspfade innerhalb einer deviatorischen Spannungsebene
 Stress paths within deviatoric stress plane

Material	Concrete			10 cm Cubes				
Load Application Device	Test Type			Test Results				
	Stress Level [N/mm ²]	Stress Path	Constant Stress Ratio	Number		Mean Strength	Stand. Dev.	
				Stress	Strain 1) 2)			σ_1 [N/mm ²]
Flexible Platens	25.5	1	-	5	3	62.1	2.26	
	34.0	1	-	6	3	78.9	4.60	
	42.5	1	-	6	2	93.5	5.51	
	51.0	1	-	5	2	108.3	4.76	
	42.5	2	-	6	3	80.3	2.49	
	51.0	2	-	6	3	93.7	0.83	
	42.5	3	-	4	3	61.3	1.00	
	51.0	3	-	5	2	73.5	0.48	
Rough Steel Platens	25.5	1	-	6	4 1	66.3	1.66	
	34.0	1	-	6	4 1	83.5	3.11	
	42.5	1	-	6	5 1	98.6	5.20	
	51.0	1	-	6	5 -	119.9	2.90	
Flexible Platens	-	-	1:0.10:0.10	4	-	65.0	5.46	
	-	-	1:0.20:0.20	3	-	113.4	8.40	
	-	-	1:0.53:0.07	4	1	85.8	11.04	
	-	-	1:0.99:0.05	6	1	64.7	5.38	
	-	-	1:1.00:0.08	4	1	80.0	8.08	
Rough Steel Platens	-	-	1:0.11:0.11	3	3	100.1	5.56	
	-	-	1:0.15:0.15	2	-	151.5	1.63	

1) measured with inductive transducer

2) measured with strain gauges

Bild
Figure 6.5-3

Mittlere dreiaxiale Druckfestigkeitsergebnisse

Mean strength results of triaxial compressive tests

Material	Concrete	10 cm Cubes
Test	Flexible Platens	
Conditions	Stress Path 1: $\Delta\bar{\sigma}_1 > 0$ $\Delta\bar{\sigma}_2 = \Delta\bar{\sigma}_3 = -1/2 \Delta\bar{\sigma}_1$	

Hydrostatic Stress $\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3$	Designations		Cube with Strain Gauges	Ultimate Stresses [N/mm ²]		
	Series	Specimen		$\bar{\sigma}_1$	$\bar{\sigma}_2$	$\bar{\sigma}_3$
0.75 fc' = 25.5 N/mm ²	T-1a	4	X	62.5	7.0	7.2
	T-3a	1	X	60.6	7.9	8.1
	T-4a	4	X	59.2	8.4	8.6
	T-6a	1		63.2	6.5	6.9
	T-7a	4			not plottable	
	T-9a	1		65.0	5.9	5.9
	mean			62.1	7.1	7.3
	standard deviation			2.26	1.02	1.05
1.0 fc' = 34.0 N/mm ²	T-2a	1	X	75.2	13.3	13.1
	T-3a	4	X	75.6	14.2	14.0
	T-5a	1	X	74.0	14.5	14.6
	T-6a	4		81.0	11.0	11.1
	T-8a	1		85.2	9.4	9.4
	T-9a	4		82.5	9.8	9.8
	mean			78.9	12.0	12.0
	standard deviation			4.6	2.25	2.21
1.25 fc' = 42.5 N/mm ²	T-1a	1	X	85.6	22.4	22.0
	T-2a	4	X	97.5	15.3	15.2
	T-4a	1	X	94.6	15.9	15.9
	T-5a	4		94.9	16.4	16.2
	T-7a	1		88.2	19.6	19.7
	T-8a	4		100.0	13.4	13.3
	mean			93.5	17.2	17.1
	standard deviation			5.51	3.26	3.20
1.5 fc' = 51.0 N/mm ²	T-1a	2	X	106.2	23.5	23.5
	T-2a	5	X	109.6	21.5	20.5
	T-4a	2	X		not plottable	
	T-5a	5		101.0	25.6	26.3
	T-7a	2		112.4	20.0	20.0
	T-8a	5		112.1	20.4	21.0
	mean			108.3	22.2	22.3
	standard deviation			4.76	2.34	2.63

$\bar{\sigma}_1 \geq \bar{\sigma}_2 \geq \bar{\sigma}_3 \geq 0$ compressive stressing of the specimen in the direction of the machine axis 1, 2 and 3 respectively

Bild
Figure 6.5-4

Dreiaxiale Druckfestigkeit von Betonwürfeln bei Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 1
Triaxial strength of concrete cubes tested with flexible platens; stress path 1

Material	Concrete	10 cm Cubes
Test	Flexible Platens	
Conditions	Stress Path 2: $\Delta\sigma_1 > 0$ $\Delta\sigma_2 = 0$ $\Delta\sigma_3 = -\Delta\sigma_1$	

Hydrostatic Stress $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$	Designations		Cube with Strain Gauges	Ultimate Stresses [N/mm ²]		
	Series	Specimen		σ_1	σ_2	σ_3
1.0 $f_{c'}$ = 34.0 N/mm ²	T-6a T-8a T-9a	5 2 5	X	not plottable biaxial biaxial		
1.25 $f_{c'}$ = 42.5 N/mm ²	T-1a	3	X	78.9	42.6	6.4
	T-2a	6	X	79.0	42.7	6.3
	T-4a	3	X	81.6	42.8	4.7
	T-5a	6		77.9	42.7	7.5
	T-7a	3		79.5	44.4	6.3
	T-8a	6		84.7	45.4	4.6
	mean			80.3	43.4	6.0
	standard deviation			2.49	1.18	1.12
1.5 $f_{c'}$ = 51.0 N/mm ²	T-2a	3	X	93.7	51.6	8.2
	T-3a	6	X	93.1	51.1	9.2
	T-5a	3	X	93.0	51.6	10.3
	T-6a	6		93.8	51.1	8.4
	T-8a	3		95.3	51.7	7.4
	T-9a	6		93.5	51.1	8.1
	mean			93.7	51.4	8.6
	standard deviation			0.83	0.29	1.01

$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ compressive stressing of the specimen in the direction of the machine axis 1, 2 and 3 respectively

Bild
Figure 6.5-5

Dreiaxiale Druckfestigkeit von Betonwürfeln bei Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 2
Triaxial strength of concrete cubes tested with flexible platens; stress path 2

Material	Concrete	10 cm Cubes
Test Conditions	Flexible Platens	
	Stress Path 3: $\Delta\tilde{\sigma}_1 = \Delta\tilde{\sigma}_2 > 0$ $\Delta\tilde{\sigma}_3 = -2\Delta\tilde{\sigma}_1 = -2\Delta\tilde{\sigma}_2$	

Hydrostatic Stress $\tilde{\sigma}_1 = \tilde{\sigma}_2 = \tilde{\sigma}_3$	Designations		Cube with Strain Gauges	Ultimate Stresses [N/mm ²]		
	Series	Specimen		$\tilde{\sigma}_1$	$\tilde{\sigma}_2$	$\tilde{\sigma}_3$
1.25 f_c' = 42.5 N/mm ²	T-1a	5	X	61.9	biaxial	3.8
	T-3a	2	X		61.6	
	T-4a	5	X		61.8	
	T-6a	2		61.7	61.8	3.1
	T-7a	5			not plottable	
	T-3a	5	X	59.8	60.1	5.8
	mean			61.3	61.3	4.1
	standard deviation			1.00	0.82	1.16
1.5 f_c' = 51.0 N/mm ²	T-1a	6	X	73.5	73.4	5.7
	T-3a	3	X	73.0	73.2	7.2
	T-4a	6	X	73.3	73.4	6.0
	T-6a	3		73.4	73.1	5.6
	T-7a	6			not plottable	
	T-9a	3		74.3	73.8	4.5
	mean			73.5	73.4	5.8
	standard deviation			0.48	0.27	0.97

$\tilde{\sigma}_1 \geq \tilde{\sigma}_2 \geq \tilde{\sigma}_3 \geq 0$ compressive stressing of the specimen in the direction of the machine axis 1, 2 and 3 respectively

Bild
Figure 6.5-6

Dreiaxiale Druckfestigkeit von Betonwürfeln bei Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 3
Triaxial strength of concrete cubes tested with flexible platens; stress path 3

Material	Concrete	10 cm Cubes
Test Conditions	Rough Steel Platens	
	Stress Path 1: $\Delta\bar{\sigma}_1 > 0, \Delta\bar{\sigma}_2 = \Delta\bar{\sigma}_3 = -1/2 \Delta\bar{\sigma}_1$	
	Stress Path 2: $\Delta\bar{\sigma}_1 > 0, \Delta\bar{\sigma}_2 = 0, \Delta\bar{\sigma}_3 = -\Delta\bar{\sigma}_1$	

Hydrostatic Stress $\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_3$	Stress Path	Designations		Cube with Strain Gauges	Ultimate Stresses [N/mm^2]		
		Series	Specimen		$\bar{\sigma}_1$	$\bar{\sigma}_2$	$\bar{\sigma}_3$
0.75 f_c' = 25.5 N/mm^2	1	T-1b	4		66.6	4.8	4.9
		T-3b	1		66.2	5.1	5.5
		T-4b	4		66.9	4.6	4.7
		T-6b	1		65.0	5.6	5.7
		T-7b	4		64.2	5.8	5.9
		T-9b	1	X	69.0	4.1	4.0
		mean			66.3	5.0	5.1
		standard deviation			1.66	0.64	0.72
1.0 f_c' = 34.0 N/mm^2	1	T-2b	1		84.6	8.6	8.7
		T-3b	4		86.2	7.9	7.9
		T-5b	1		78.0	11.8	11.8
		T-6b	4		82.9	9.7	9.6
		T-8b	1		82.9	9.3	9.7
		T-9b	4	X	86.5	7.6	8.1
		mean			83.5	9.2	9.3
		standard deviation			3.11	1.52	1.43
1.25 f_c' = 42.5 N/mm^2	1	T-1b	1		99.8	13.5	13.4
		T-2b	4		100.7	13.4	13.6
		T-4b	1		100.1	13.9	14.0
		T-5b	4		88.3	20.0	20.2
		T-7b	1		99.8	14.3	14.8
		T-8b	4	X	103.0	12.8	13.1
		mean			98.6	14.7	14.9
		standard deviation			5.20	2.67	2.69
1.5 f_c' = 51.0 N/mm^2	1	T-1b	2		121.1	16.7	16.1
		T-2b	5		120.7	16.2	16.1
		T-4b	2		122.6	15.0	15.3
		T-5b	5		114.3	19.0	19.2
		T-7b	2		119.7	16.3	16.4
		T-8b	5	X	121.0	16.0	16.1
		mean			119.9	16.5	16.5
		standard deviation			2.90	1.34	1.36
1.25 f_c' = 42.5 N/mm^2	2	T-1b	3		biaxial		
1.5 f_c' = 51.0 N/mm^2	2	T-1b	5		biaxial		
		T-3b	2		biaxial		
		T-4b	5		biaxial		
		T-6b	2		biaxial		
		T-7b	5		not plottable		

$\bar{\sigma}_1 \geq \bar{\sigma}_2 \geq \bar{\sigma}_3 \geq 0$ compressive stressing of the specimen in the direction of the machine axis 1, 2 and 3 respectively

Bild
Figure 6.5-7

Dreiaxiale Druckfestigkeit von Betonwürfeln bei Prüfung mit starren Druckplatten; Spannungspfad 1 und 2
Triaxial strength of concrete cubes tested with rough steel platens; stress path 1 and 2

Material	Concrete	10 cm Cubes
Test	Flexible Platens	
Conditions	Constant Stress Ratios	

Stress Ratio $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$	Designations		Cube with Strain Gauges	Ultimate Stresses [N/mm^2]		
	Series	Specimen		σ_1	σ_2	σ_3
1:0.10:0.10	T-5a	2		60.1	6.2	6.3
	T-5a(b)	6		60.0	6.0	6.0
	T-7a(b)	3		69.1	6.9	6.9
	T-8a(b)	6		70.8	7.1	7.1
	mean			65.0	6.6	6.6
	standard deviation			5.76	0.53	0.51
1:0.20:0.20	T-2a(b)	6		120.1	24.6	24.6
	T-4a(b)	3		116.2	23.8	23.6
	T-9a(b)	2		104.0	21.2	21.1
	mean			113.4	23.2	23.1
standard deviation			8.40	1.78	1.80	
1:0.53:0.07	T-2a	2		94.2	50.1	6.8
	T-2a(b)	3		87.2	46.6	6.5
	T-3a(b)	6		91.9	49.0	6.6
	T-5a(b)	3	X	69.8	37.3	5.0
mean			85.8	45.8	6.2	
standard deviation			11.04	5.82	0.83	
1:0.99:0.05	T-2a(b)	2	X	59.5	58.7	3.0
	T-3a(b)	5		65.5	65.1	3.2
	T-5a(b)	2		57.3	57.0	2.8
	T-6a(b)	5		67.6	66.1	3.3
T-8a(b)	2		66.6	65.5	3.0	
T-9a(b)	5		71.8	71.1	3.3	
mean			64.7	63.9	3.1	
standard deviation			5.38	5.20	0.20	
1: 1 : 0.08	T-9a	2	X	91.5	91.6	7.5
	T-1a(b)	6		73.7	73.6	6.1
	T-3a(b)	3		75.1	75.1	6.3
	T-4a(b)	6		79.8	79.8	6.5
mean			80.0	80.0	6.6	
standard deviation			8.08	8.16	0.62	

$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ compressive stressing of the specimen in the direction of the machine axis 1, 2 and 3 respectively

Bild
Figure 6.5-8

Dreiaxiale Druckfestigkeit von Betonwürfeln bei Prüfung mit schlaffen Druckplatten; konstante Spannungsverhältnisse

Triaxial strength of concrete cubes tested with flexible platens; constant stress ratios

Material	Concrete	10 cm Cubes
Test	Rough Steel Platens	
Conditions	Constant Stress Ratios	

Stress Ratio $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$	Designations		Cube with Strain Gauges	Ultimate Stresses [N/mm ²]		
	Series	Specimen		σ_1	σ_2	σ_3
1:0.11:0.11	T-6b	3		95.8	10.6	10.4
	T-7b	6		98.2	10.8	10.7
	T-9b	3		106.4	11.7	11.6
	mean			100.1	11.0	10.9
	standard deviation			5.56	0.59	0.62
1:0.15:0.15	T-6b	6		not plottable		
	T-8b	3		150.3	22.9	22.9
	T-9b	6		152.6	23.2	23.2
	mean			151.5	23.1	23.1
	standard deviation			1.63	0.21	0.21

$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ compressive stressing of the specimen in the direction of the machine axis 1,2 and 3 respectively

Bild
Figure 6.5-9

Dreiaxiale Druckfestigkeit von Betonwürfeln bei Prüfung mit starren Druckplatten; konstante Spannungsverhältnisse

Triaxial strength of concrete cubes tested with rough steel platens; constant stress ratios

Test Conditions		Number of Specimens and Mean Triaxial Strength [N/mm ²]							
Platens	Hydrostatic Stress $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ Stress Path No.	0.75 f_c'		1.0 f_c'		1.25 f_c'		1.5 f_c'	
		25.5 N/mm ²		34.0 N/mm ²		42.5 N/mm ²		51.0 N/mm ²	
		n	\overline{TB}_1	n	\overline{TB}_1	n	\overline{TB}_1	n	\overline{TB}_1
Flexible	1	5	62.1	6	78.9	6	93.5	5	108.3
	2	-	-	3	*)	6	80.3	6	93.7
	3	-	-	-	-	4	61.3	5	73.5
Rough	1	6	66.3	6	83.5	6	98.6	6	119.9
	2	-	-	-	-	1	*)	5	*)

*) test result biaxial or not plottable

\overline{TB}_1 triaxial compressive strength of the specimen
(ultimate stress in axis 1)

Bild
Figure 6.5-10

Betonfestigkeit bei dreiaxialer Druckbeanspruchung
Concrete strength under triaxial compression

Material	Concrete	10 cm Cubes
Test Conditions	Flexible Platens	

Hydrostatic Stress Designated	Stress Ratios $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$	Stress Course	Number of Specimens *)	Ultimate Stress [N/mm ²]		
				σ_1	σ_2	σ_3
0.75 fc' = 25.5 N/mm ²	1 : 0.1 : 0.1	path 1	2	64.1	6.2	6.4
		constant	4	65.0	6.6	6.6
1.25 fc' = 42.5 N/mm ²	1 : 0.53 : 0.07	path 2	3	80.7	44.2	6.1
		constant	3	91.1	48.6	6.6
	1 : 0.99 : 0.05	path 3	1	61.7	61.8	3.1
		constant	5	65.8	65.0	3.1
1.5 fc' = 51.0 N/mm ²	1 : 0.2 : 0.2	path 1	3	108.5	22.0	22.4
		constant	3	113.4	23.2	23.1
	1 : 1.0 : 0.08	path 3	2	73.8	73.4	5.0
		constant	3	82.1	82.2	6.8

*) Specimens without strain gauges only

Bild
Figure 6.5-11

Vergleich von Versuchsergebnissen zur dreiaxialen Betonfestigkeit: Beanspruchungsverlauf nach Spannungspfaden und mit konstanten Spannungsverhältnissen

Comparison of test results of triaxial concrete strength: trials with stress paths and with constant stress ratios

Test Conditions		Mean Values of Octahedral Stresses [N/mm ²] and Number of Specimens											
Platens	Hydrostatic Stress $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$	0.75 fc'			1.0 fc'			1.25 fc'			1.5 fc'		
		25.5 N/mm ²			34.0 N/mm ²			42.5 N/mm ²			51.0 N/mm ²		
Stress Course		n	σ_o	τ_o	n	σ_o	τ_o	n	σ_o	τ_o	n	σ_o	τ_o
Flexible	Path 1	5	25.5	25.9	6	34.3	31.5	6	42.6	36.0	5	50.9	40.6
	Constant Ratio 1 : 0.1 : 0.1	4	26.1	27.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Constant Ratio 1 : 0.2 : 0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	53.2	42.5
	Path 2	-	-	-	3	*)	*)	6	43.2	30.3	6	51.2	34.7
	Constant Ratio 1 : 0.53 : 0.07	-	-	-	-	-	-	4	45.9	32.5	-	-	-
	Path 3	-	-	-	-	-	-	4	42.2	27.0	5	50.9	31.9
	Constant Ratio 1 : 0.99 : 0.05	-	-	-	-	-	-	6	43.9	28.9	-	-	-
	Constant Ratio 1 : 1.0 : 0.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	55.5	34.6
Rough	Path 1	6	25.5	28.9	6	34.0	35.0	6	42.7	39.5	6	51.0	48.7
	Constant Ratio 1 : 0.11 : 0.11	-	-	-	3	40.7	42.0	-	-	-	-	-	-
	Constant Ratio 1 : 0.15 : 0.15	-	-	-	-	-	-	2	65.9	60.5	-	-	-
	Path 2	-	-	-	-	-	-	1	*)	*)	5	*)	*)

*) test result biaxial or not plottable

Bild

Figure 6.5-12

Dreiaxiale Druckfestigkeit von Betonwürfeln in Oktaederdarstellung

Triaxial strength of concrete cubes in terms of octahedral stresses

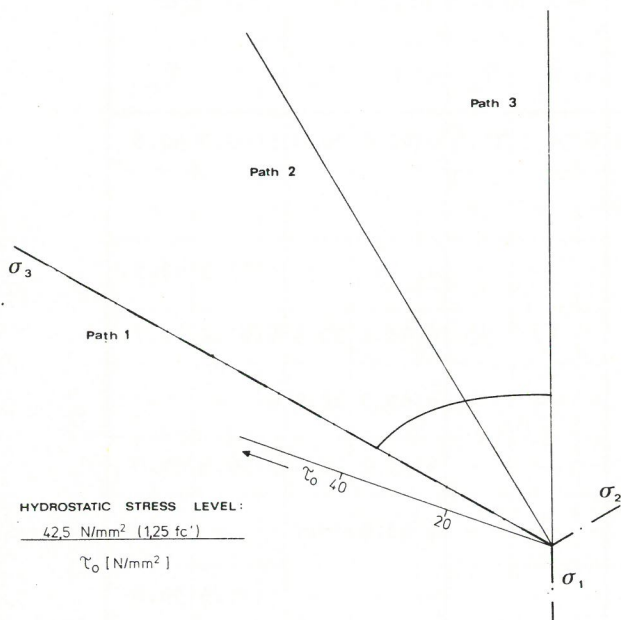


Bild
Figure 6.5-13

Grenzl原因en der Tragfähigkeit von Betonwürfeln bei Prüfung mit schlaffen Druckplatten und Beanspruchung in deviatorischer Spannungsebene zur hydrostatischen Druckbeanspruchung von 1,25 fc' (42,5 N/mm²)

Strength envelope for concrete cubes in deviatoric stress plane; flexible platens, hydrostatic stress level 1.25 fc' (42.5 N/mm²)

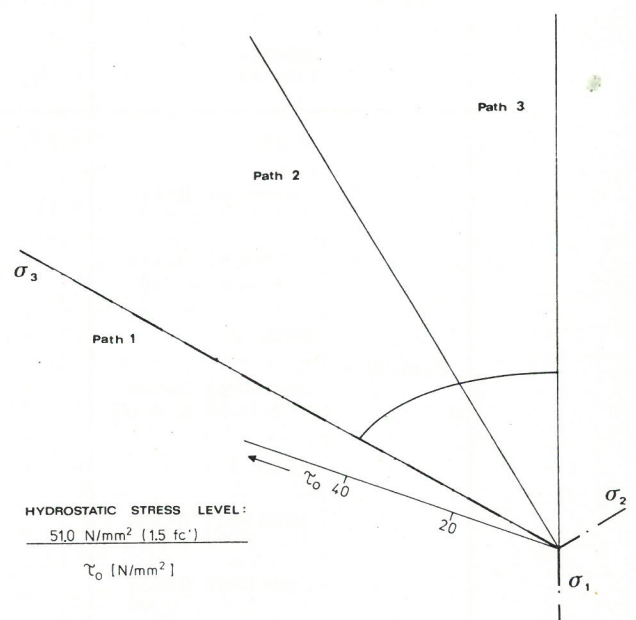
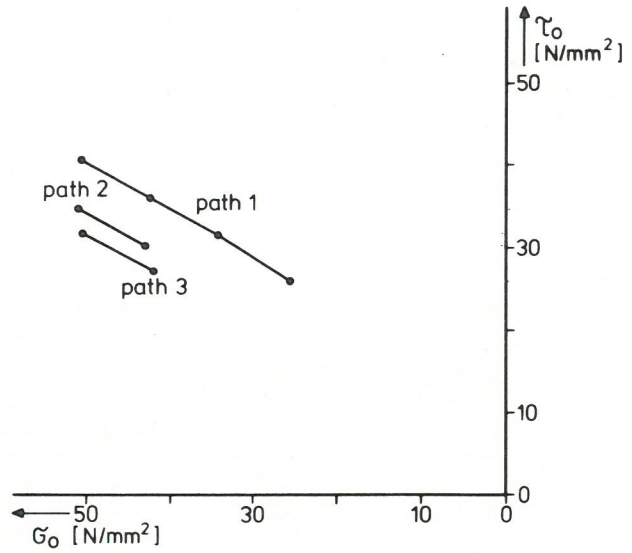
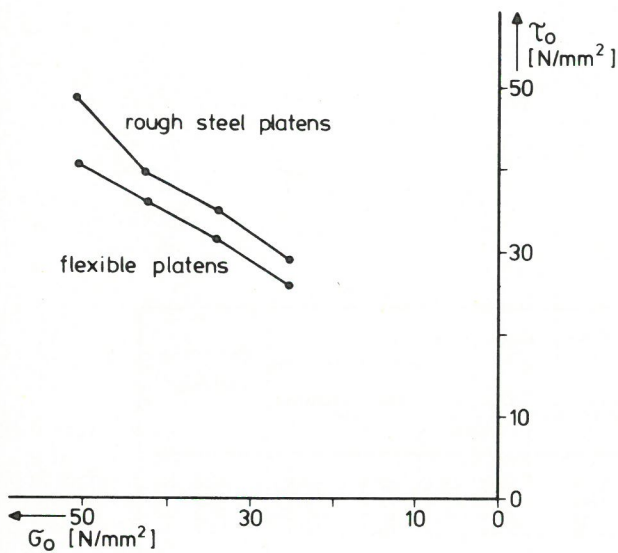


Bild
Figure 6.5-14

Grenzl原因en der Tragfähigkeit von Betonwürfeln bei Prüfung mit schlaffen Druckplatten und Beanspruchung in deviatorischer Spannungsebene zur hydrostatischen Druckbeanspruchung von 1,5 fc' (51,0 N/mm²)

Strength envelope for concrete cubes in deviatoric stress plane; flexible platens, hydrostatic stress level 1.5 fc' (51.0 N/mm²)



Stress Path 1:

Number of Specimens	Hydrostatic Stress Level		Octahedral Stresses [N/mm ²]	
	-	[N/mm ²]	σ_o	τ_o
Flexible Platens				
5	0.75 f_c'	25.5	25.5	25.9
6	1.00 f_c'	34.0	34.3	31.5
6	1.25 f_c'	42.5	42.6	36.0
5	1.50 f_c'	51.0	50.9	40.6
Rough Steel Platens				
6	0.75 f_c'	25.5	25.5	28.9
6	1.00 f_c'	34.0	34.0	35.0
6	1.25 f_c'	42.5	42.7	39.5
6	1.50 f_c'	51.0	51.0	48.7

Flexible Platens:

Number of Specimens	Hydrostatic Stress Level		Octahedral Stresses [N/mm ²]	
	-	[N/mm ²]	σ_o	τ_o
Stress Path No. 1				
5	0.75 f_c'	25.5	25.5	25.9
6	1.00 f_c'	34.0	34.3	31.5
6	1.25 f_c'	42.5	42.6	36.0
5	1.50 f_c'	51.0	50.9	40.6
Stress Path No. 2				
6	1.25 f_c'	42.5	43.2	30.3
6	1.50 f_c'	51.0	51.2	34.7
Stress Path No. 3				
4	1.25 f_c'	42.5	42.2	27.0
5	1.50 f_c'	51.0	50.9	31.9

Bild
Figure 6.5-15

Dreiaxiale Druckfestigkeit von Betonwürfeln in Oktaederdarstellung; Vergleich der Ergebnisse aus Prüfungen mit schlaffen und mit starren Druckplatten nach Spannungspfad 1

Triaxial strength of concrete cubes in terms of octahedral stresses; loading according stress path 1, comparison of test results found with flexible and with rough steel platens

Bild
Figure 6.5-16

Dreiaxiale Druckfestigkeit von Betonwürfeln in Oktaederdarstellung; Vergleich der Ergebnisse aus Prüfungen mit verschiedenen Spannungspfaden

Triaxial strength of concrete cubes in terms of octahedral stresses; comparison of test results under loading according to different stress paths

Load Application	Hydrostatic Stress $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$	Stress Path	Triaxial Cube Strength [N/mm ²]							Coefficient of Variation %
			Number of Specimens	$\bar{\sigma}_1$ Mean	Standard Deviation	Min. Value	Max. Value	99% Confidence Interval		
Flexible Platens	25.5 N/mm ²	1	5	62.1	2.26	59.2	65.0	57.4	66.8	3.6
	34.0 N/mm ²	1	6	78.9	4.60	74.0	85.2	71.3	86.5	5.8
	42.5 N/mm ²	1	6	93.5	5.51	85.6	100.0	84.4	102.6	5.9
	51.0 N/mm ²	1	5	108.3	4.76	101.0	112.4	98.5	118.1	4.4
	42.5 N/mm ²	2	6	80.3	2.49	77.9	84.7	76.2	84.4	3.1
	51.0 N/mm ²	2	6	93.7	0.83	93.0	95.3	92.3	95.1	0.9
Rough Steel Platens	42.5 N/mm ²	3	4	61.3	1.00	59.8	61.9	58.4	64.2	1.6
	51.0 N/mm ²	3	5	73.5	0.48	73.0	74.3	72.5	74.5	0.7
Rough Steel Platens	25.5 N/mm ²	1	6	66.3	1.66	64.2	69.6	63.6	69.0	2.5
	34.0 N/mm ²	1	6	83.5	3.11	78.0	86.5	78.4	88.6	3.7
	42.5 N/mm ²	1	6	98.6	5.20	88.3	103.0	90.0	107.2	5.3
	51.0 N/mm ²	1	6	119.9	2.90	114.3	122.6	115.1	124.7	2.4

Bild
Figure 6.5-17

Streuung der dreiaxialen Festigkeitswerte von Betonwürfeln
Scatter of triaxial strength results of concrete cubes

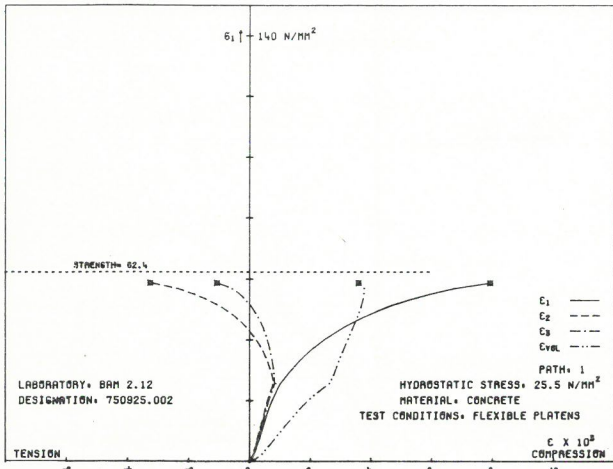


Bild
Figure 6.6-1a

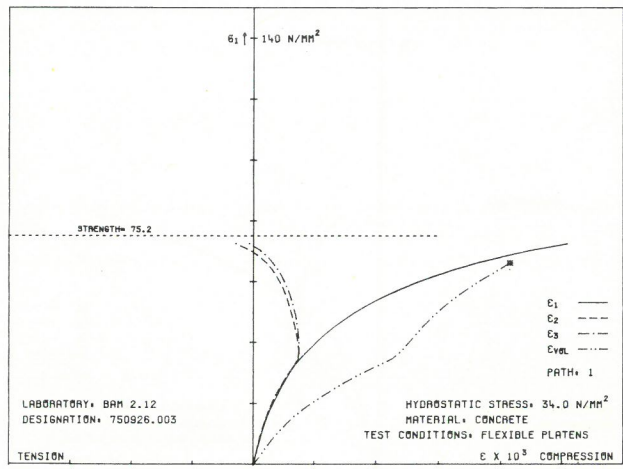


Bild
Figure 6.6-2a

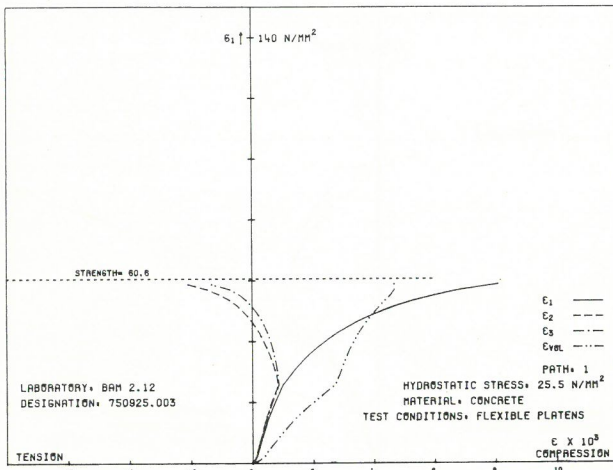


Bild
Figure 6.6-1b

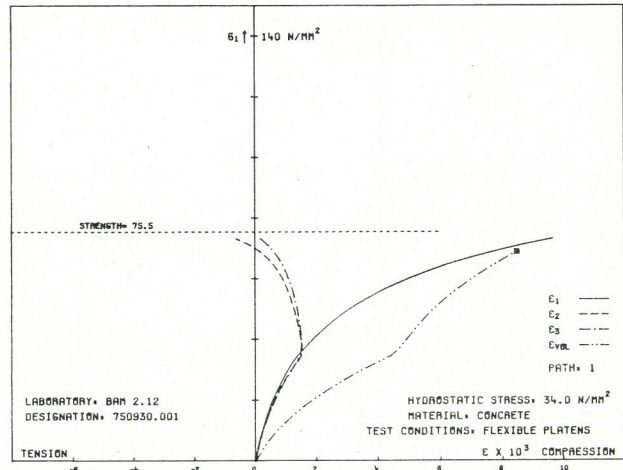


Bild
Figure 6.6-2b

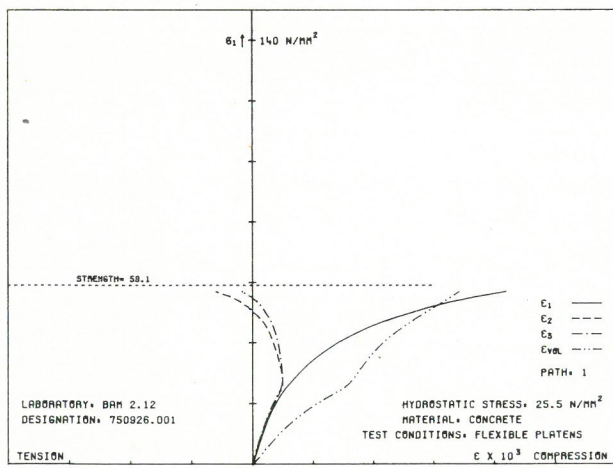


Bild
Figure 6.6-1c

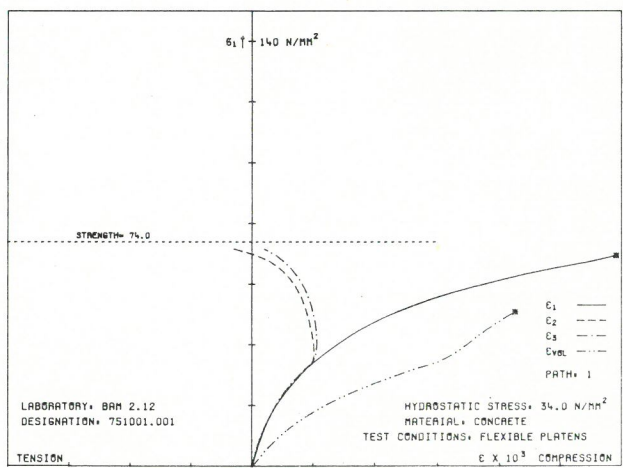


Bild
Figure 6.6-2c

Bilder
Figures 6.6-1a...c

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung 0,75 fc' (25,5 N/mm²)

Stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 1, hydrostatic stress level 0.75 fc' (25.5 N/mm²)

Bilder
Figures 6.6-2a...c

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung 1,0 fc' (34,0 N/mm²)

Stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 1, hydrostatic stress level 1.0 fc' (34.0 N/mm²)

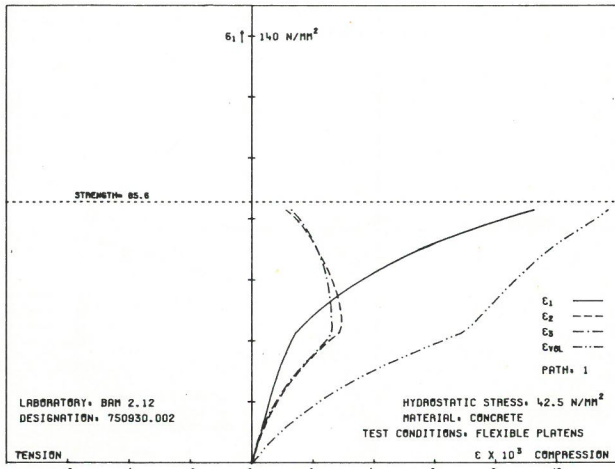


Bild
Figure 6.6-3a

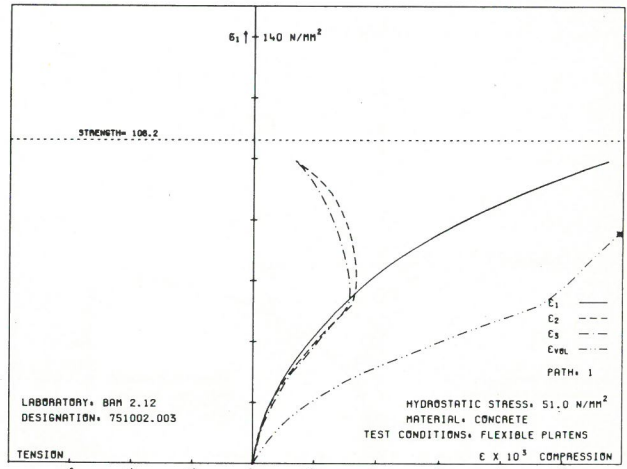


Bild
Figure 6.6-4a

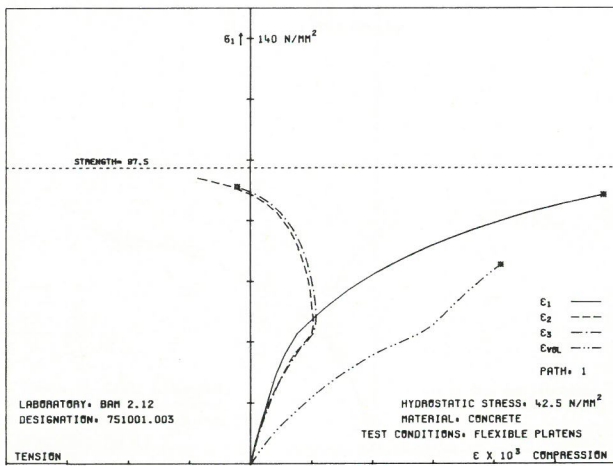


Bild
Figure 6.6-3b

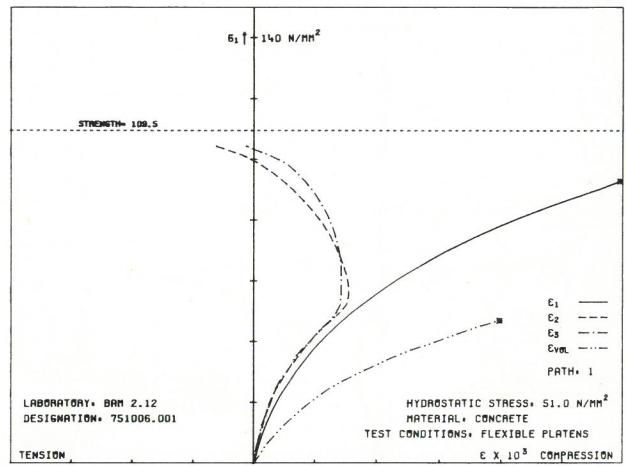


Bild
Figure 6.6-4b

Bilder
Figures 6.6-3a/b

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung 1,25 fc' (42,5 N/mm²)

Stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 1, hydrostatic stress level 1.25 fc' (42.5 N/mm²)

Bilder
Figures 6.6-4a/b

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung 1,5 fc' (51,0 N/mm²)

Stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 1, hydrostatic stress level 1.5 fc' (51.0 N/mm²)

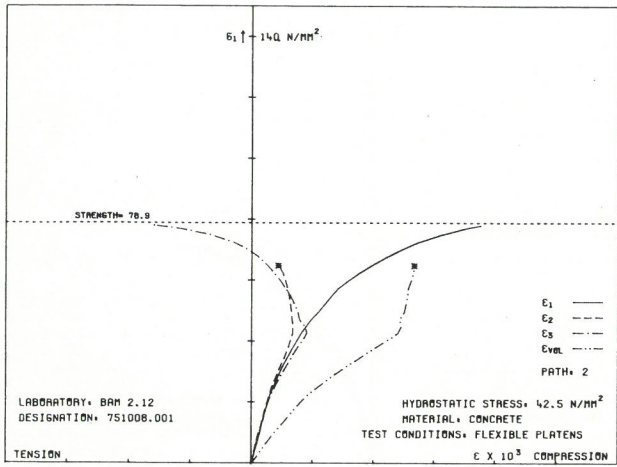


Bild
Figure 6.6-5a

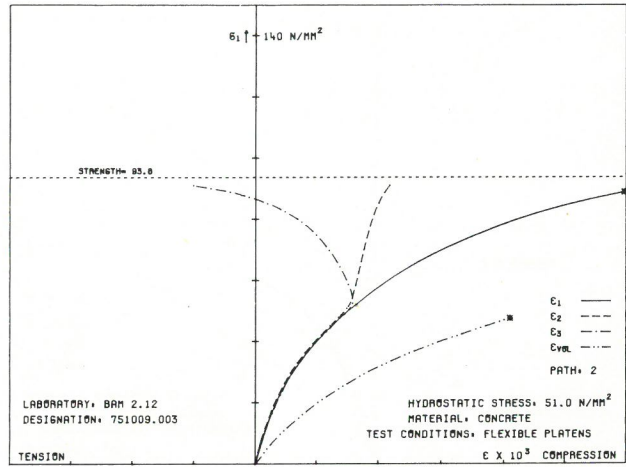


Bild
Figure 6.6-6a

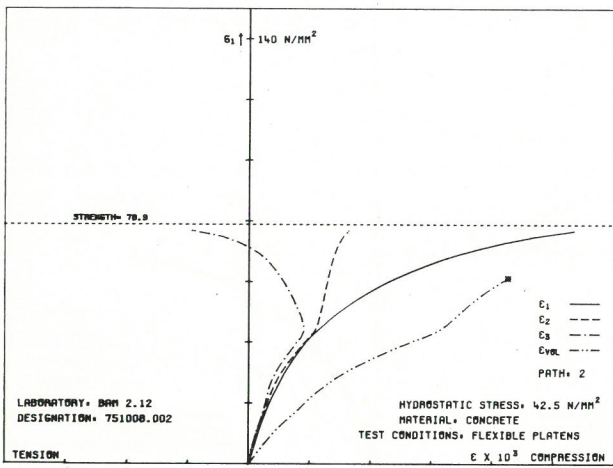


Bild
Figure 6.6-5b

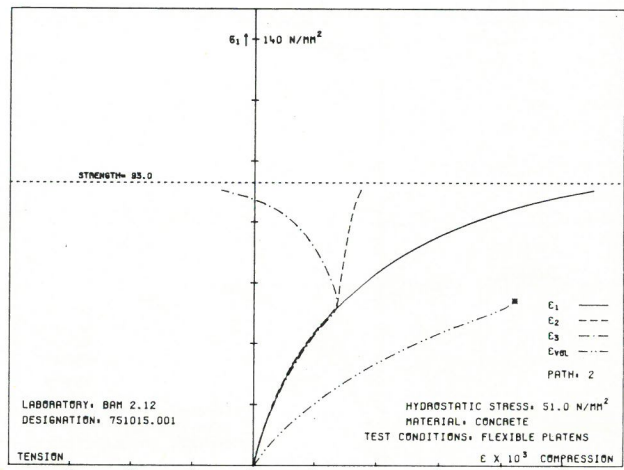


Bild
Figure 6.6-6b

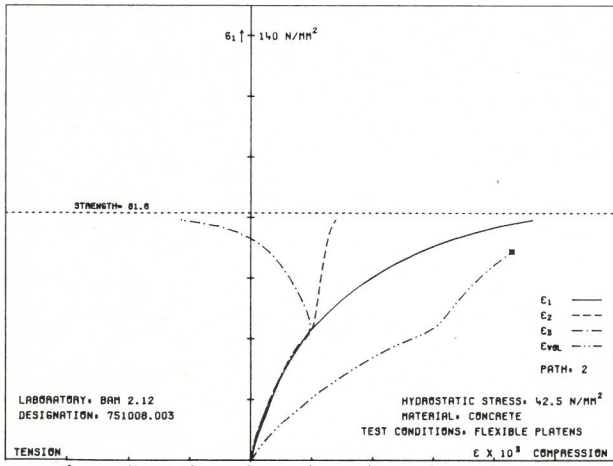


Bild
Figure 6.6-5c

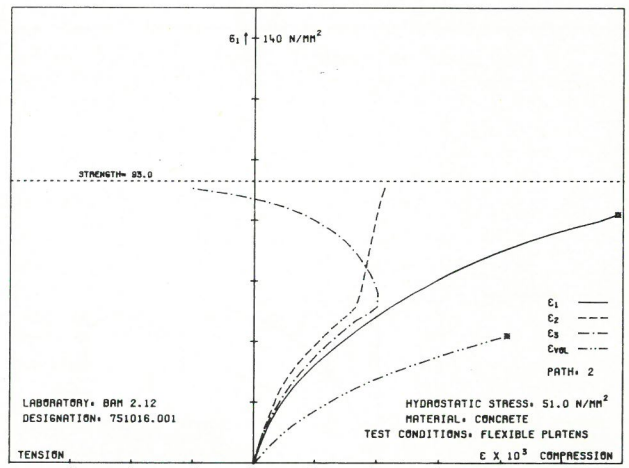


Bild
Figure 6.6-6c

Bilder
Figures 6.6-5a...c

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 2, hydrostatische Druckbeanspruchung 1,25 fc' (42,5 N/mm²)

Stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 2, hydrostatic stress level 1.25 fc' (42.5 N/mm²)

Bilder
Figures 6.6-6a...c

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 2, hydrostatische Druckbeanspruchung 1,5 fc' (51,0 N/mm²)

Stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 2, hydrostatic stress level 1.5 fc' (51.0 N/mm²)

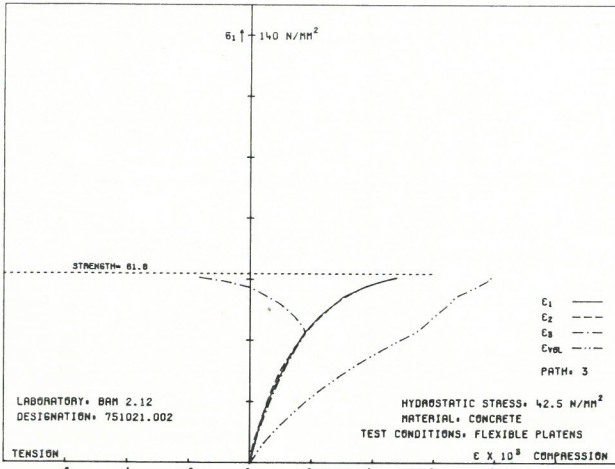


Bild
Figure 6.6-7a

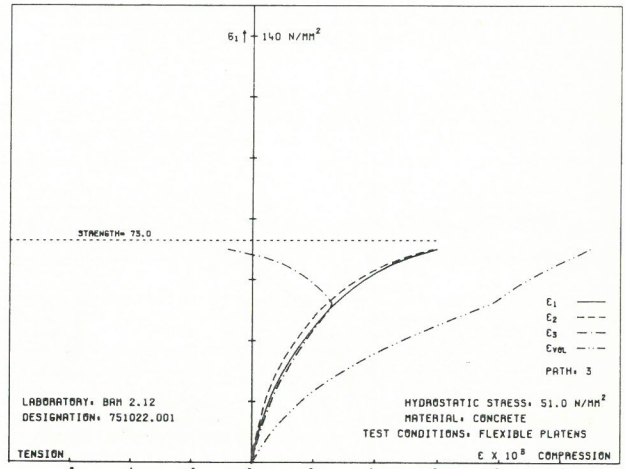


Bild
Figure 6.6-8a

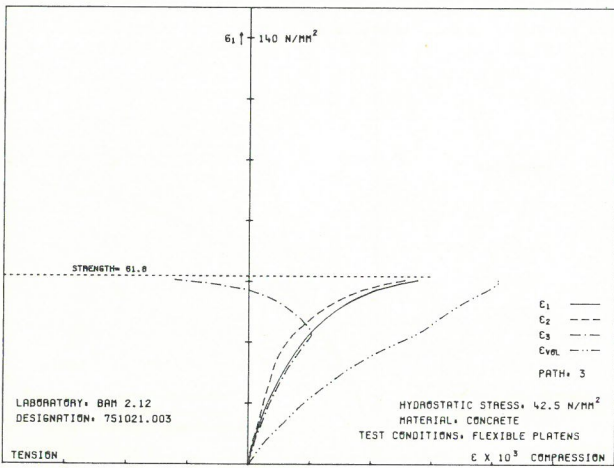


Bild
Figure 6.6-7b

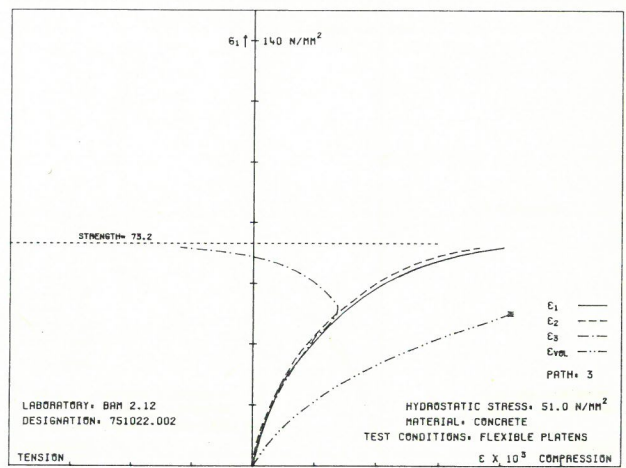


Bild
Figure 6.6-8b

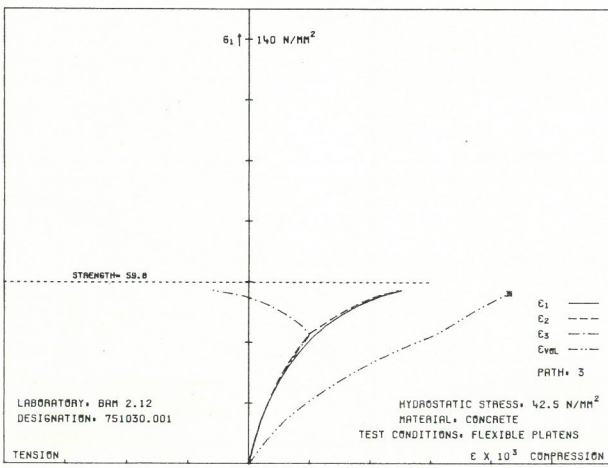


Bild
Figure 6.6-7c

Bilder
Figures 6.6-7a...c

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 3, hydrostatische Druckbeanspruchung 1,25 fc' (42,5 N/mm²)

Stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 3, hydrostatic stress level 1.25 fc' (42.5 N/mm²)

Bilder
Figures 6.6-8a/b

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 3, hydrostatische Druckbeanspruchung 1,5 fc' (51,0 N/mm²)

Stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 3, hydrostatic stress level 1.5 fc' (51.0 N/mm²)

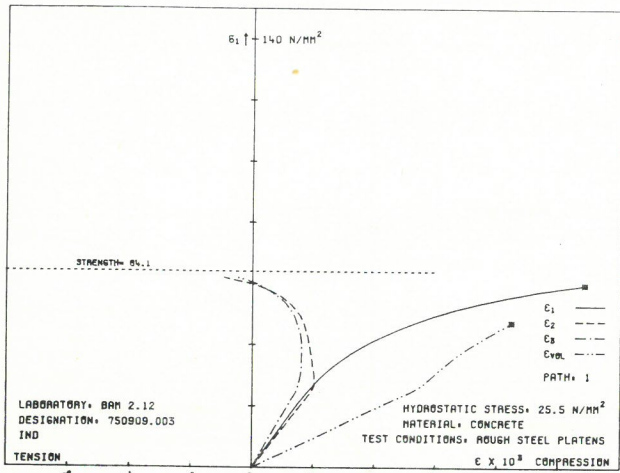


Bild
Figure 6.6-9a

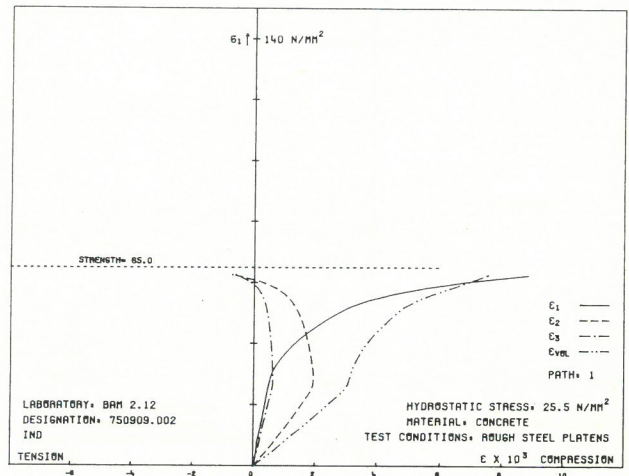


Bild
Figure 6.6-9d

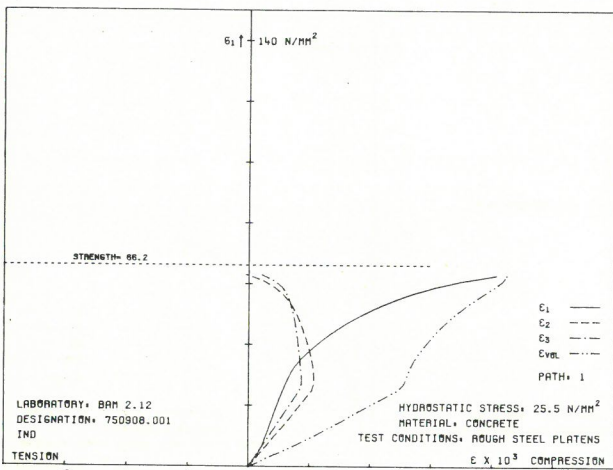


Bild
Figure 6.6-9b

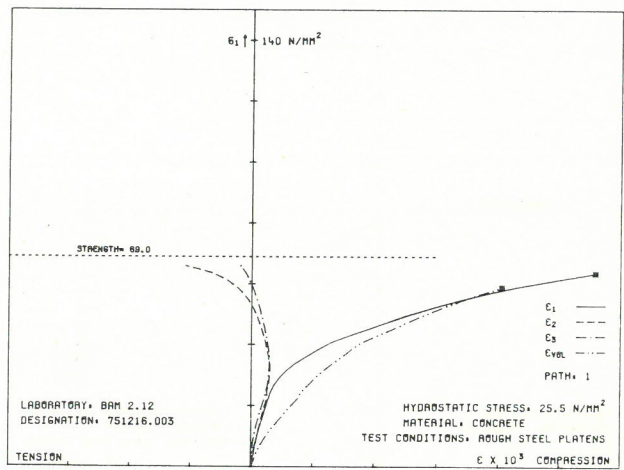


Bild
Figure 6.6-9e

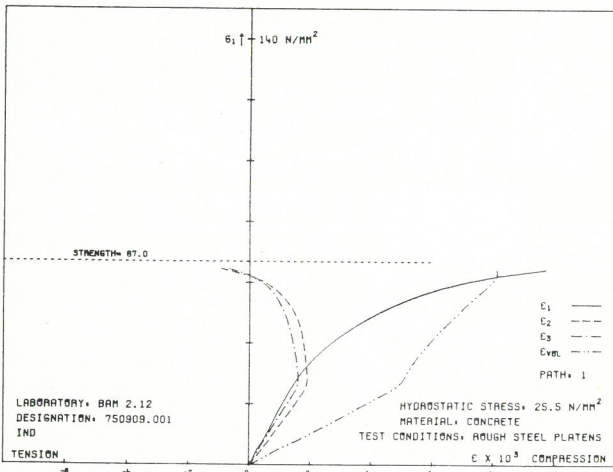


Bild
Figure 6.6-9c

Bilder
Figures 6.6-9a...e

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit starren Druckplatten; Spannungsprofil 1, hydrostatische Druckbeanspruchung 0,75 fc' (25,5 N/mm²)

Stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with rough steel platens; stress path 1, hydrostatic stress level 0.75 fc' (25.5 N/mm²)

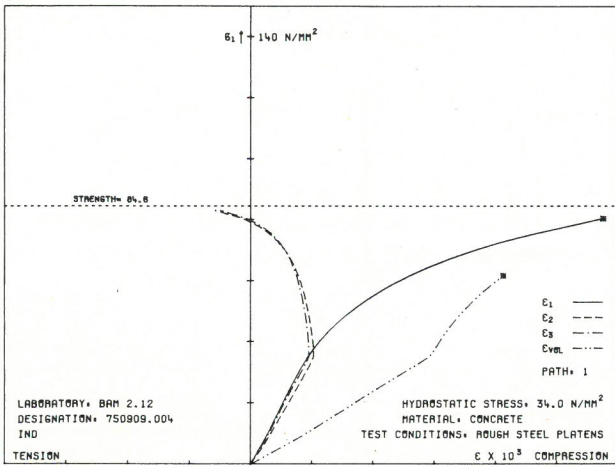


Bild
Figure 6.6-10a

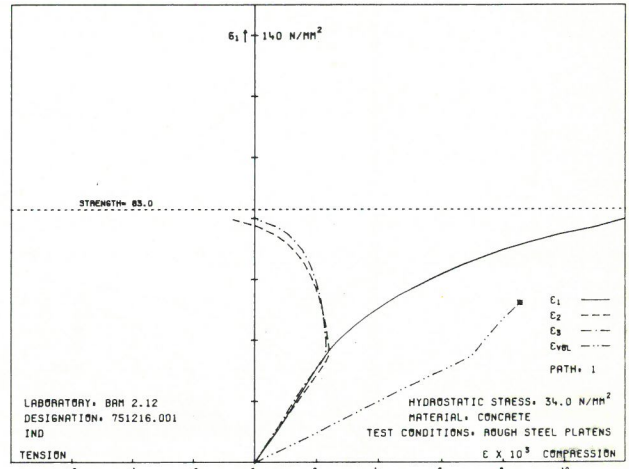


Bild
Figure 6.6-10d

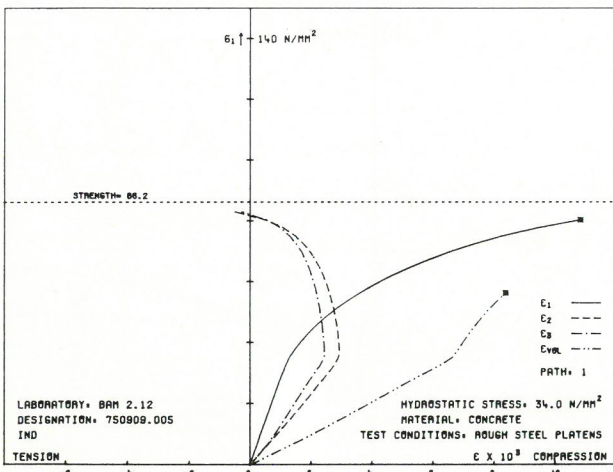


Bild
Figure 6.6-10b

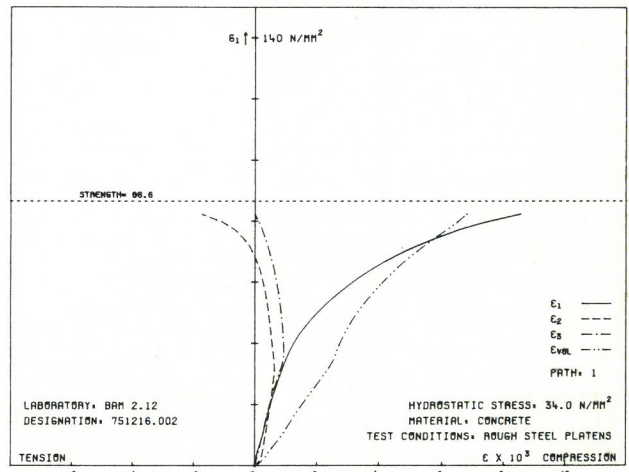


Bild
Figure 6.6-10e

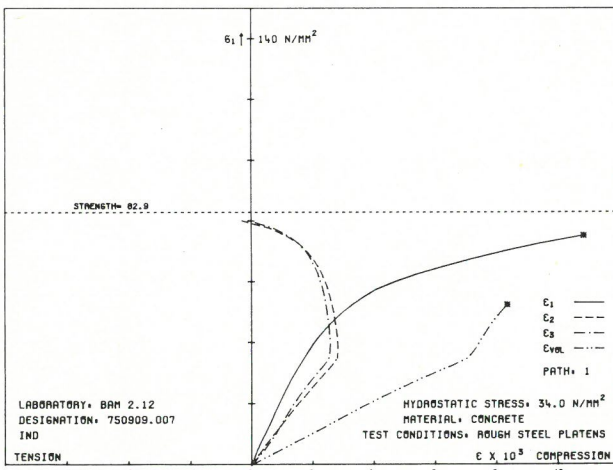


Bild
Figure 6.6-10c

Bilder
Figures 6.6-10a...e

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit starren Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung 1,0 fc' (34,0 N/mm²)

Stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with rough steel platens; stress path 1, hydrostatic stress level 1.0 fc' (34.0 N/mm²)

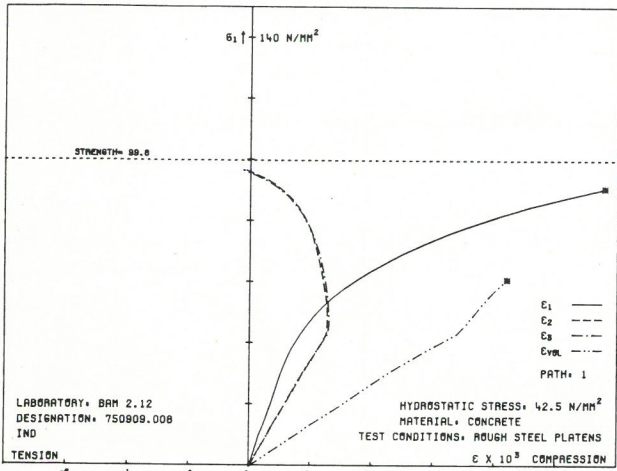


Bild
Figure 6.6-11a

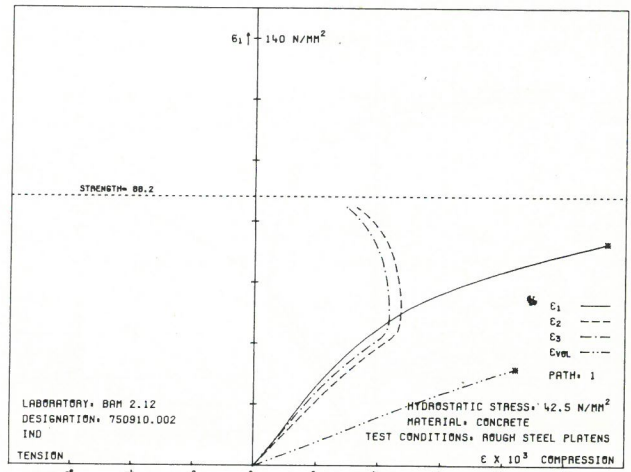


Bild
Figure 6.6-11d

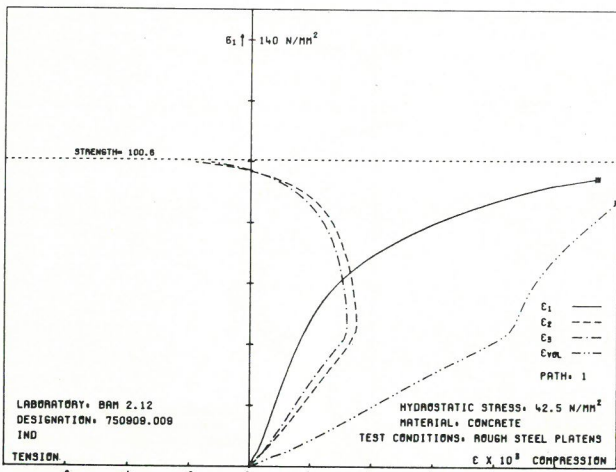


Bild
Figure 6.6-11b

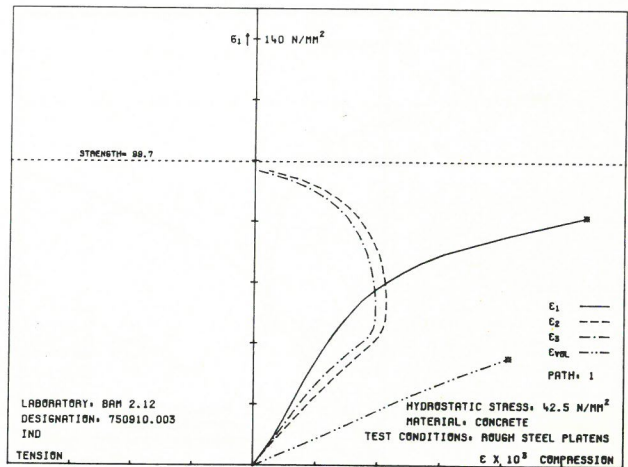


Bild
Figure 6.6-11e

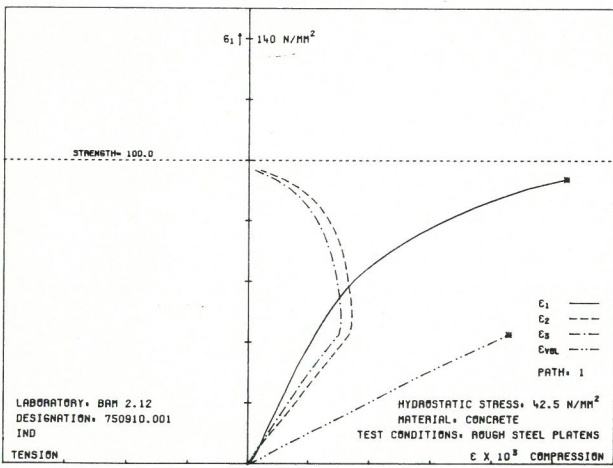


Bild
Figure 6.6-11c

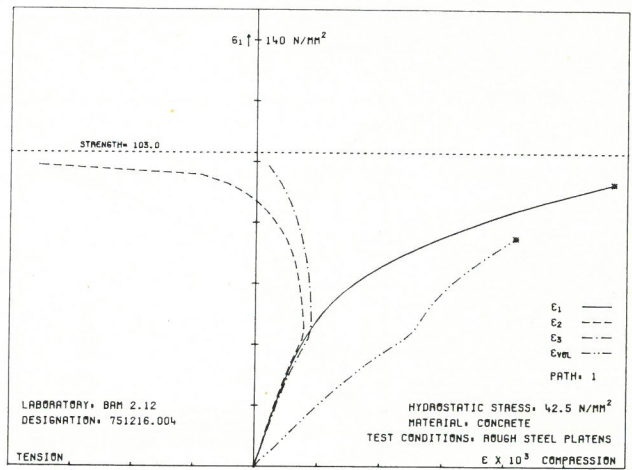


Bild
Figure 6.6-11f

Bilder
Figures 6.6-11a...f

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit starren Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung 1,25 f_c' (42,5 N/mm²)

Stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with rough steel platens; stress path 1, hydrostatic stress level 1.25 f_c' (42.5 N/mm²)

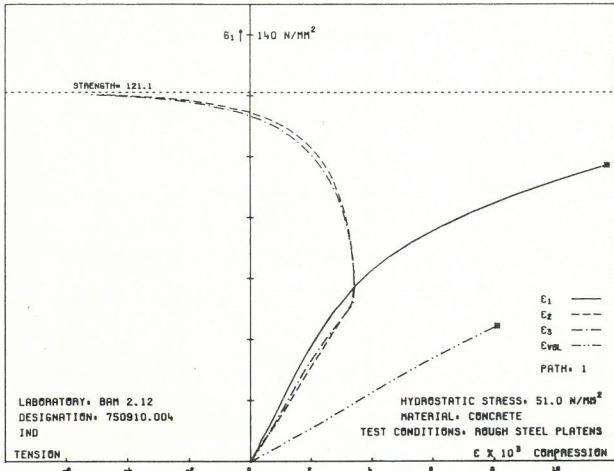


Bild
Figure 6.6-12a

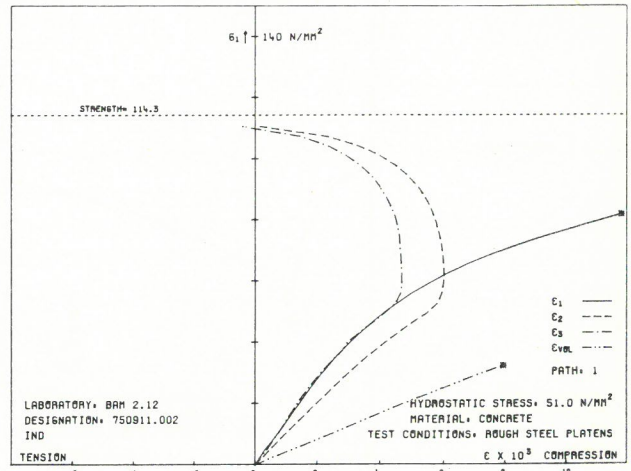


Bild
Figure 6.6-12d

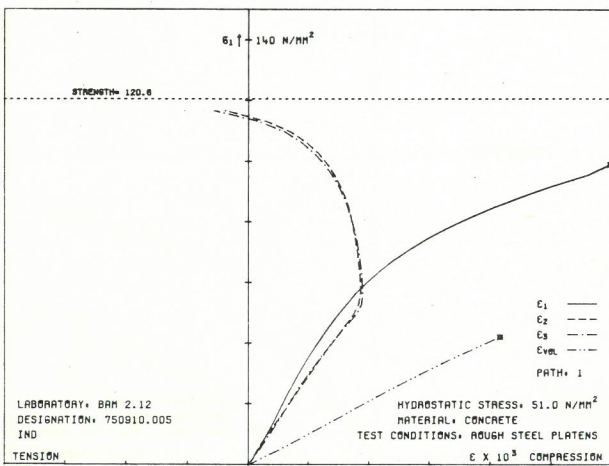


Bild
Figure 6.6-12b

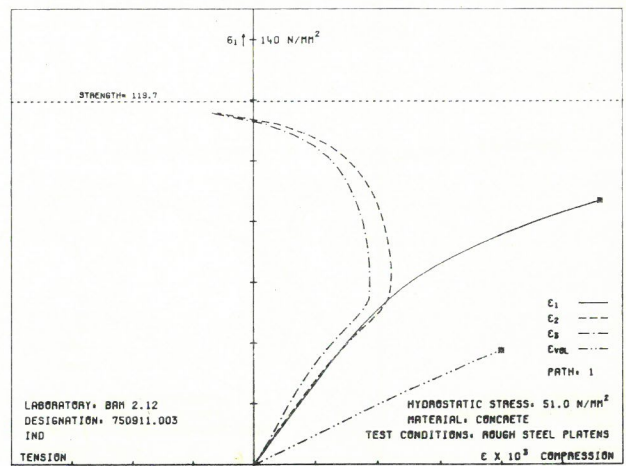


Bild
Figure 6.6-12e

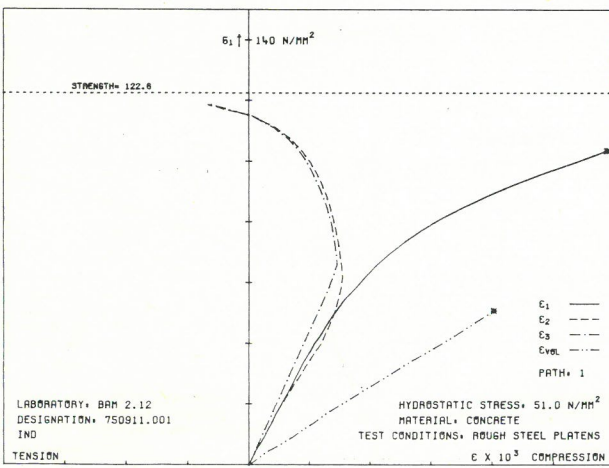


Bild
Figure 6.6-12c

Bilder
Figures 6.6-12a...e

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit starren Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung 1,5 fc' (51,0 N/mm²)

Stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with rough steel platens; stress path 1, hydrostatic stress level 1.5 fc' (51.0 N/mm²)

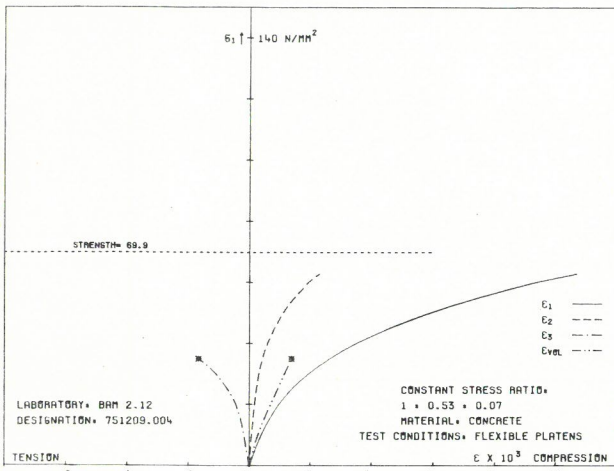


Bild
Figure 6.6-13

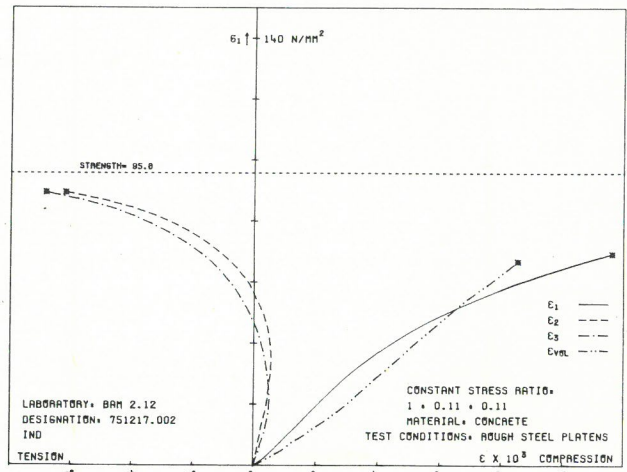


Bild
Figure 6.6-16a

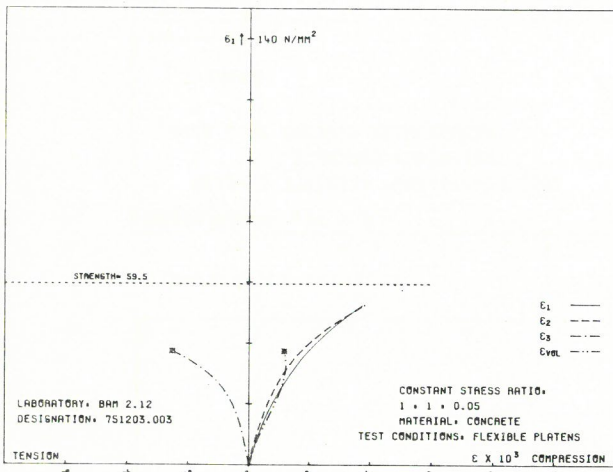


Bild
Figure 6.6-14

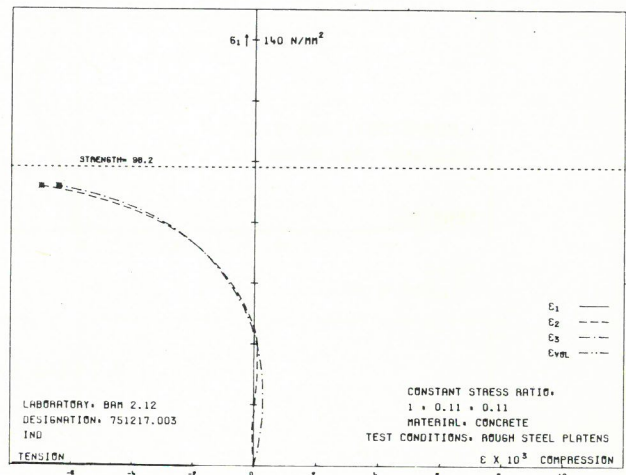


Bild
Figure 6.6-16b

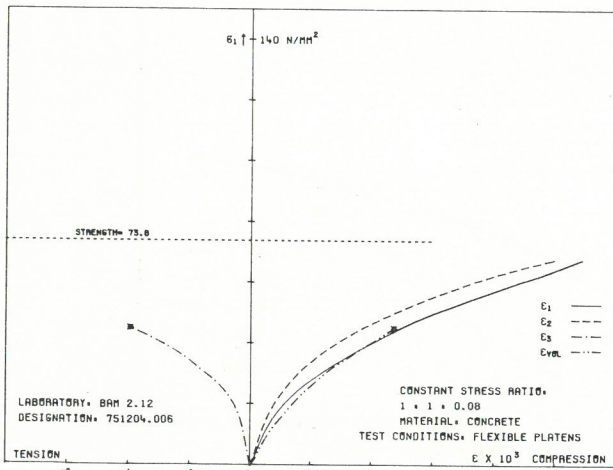


Bild
Figure 6.6-15

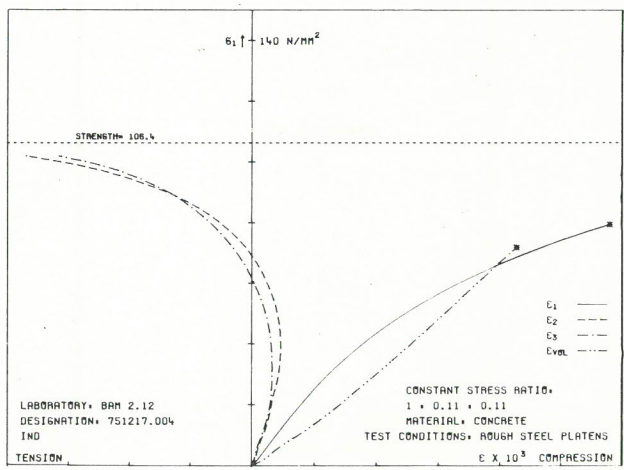


Bild
Figure 6.6-16c

Bilder
Figures 6.6-13...15

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten, konstantes Spannungsverhältnis

Stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with flexible platens; constant stress ratio

Bilder
Figures 6.6-16a...c

Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit starren Druckplatten, konstantes Spannungsverhältnis 1 : 0,11 : 0,11

Stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with rough steel platens; constant stress ratio 1 : 0.11 : 0.11

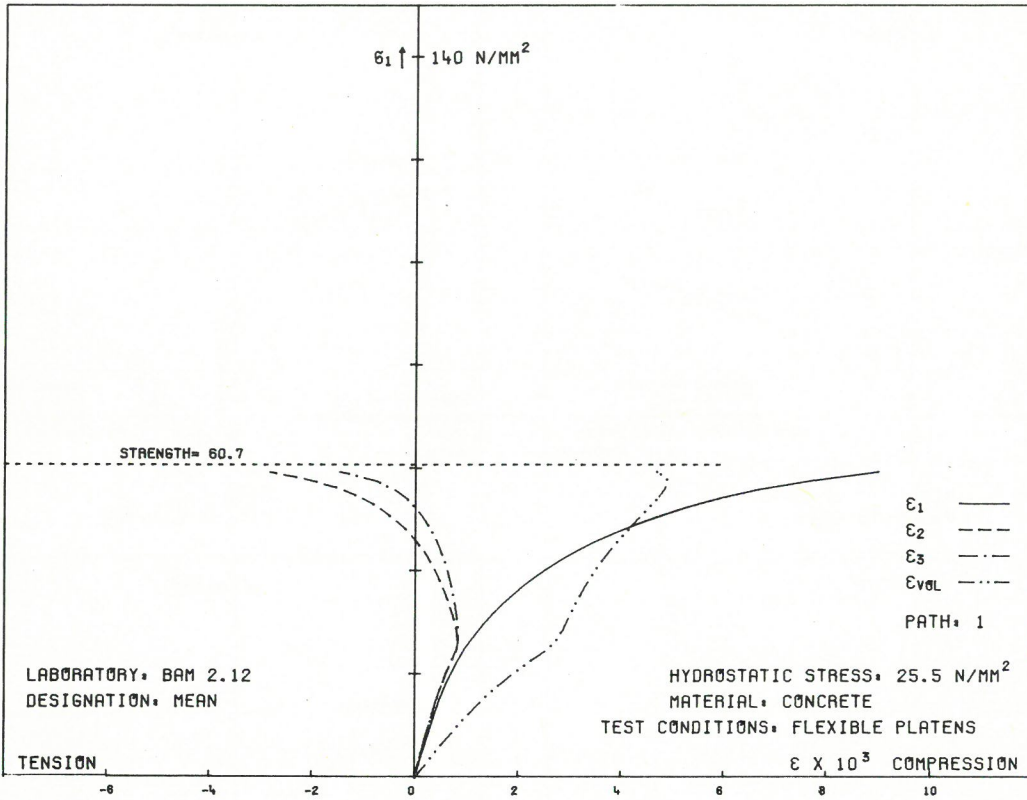


Bild
Figure 6.6-17

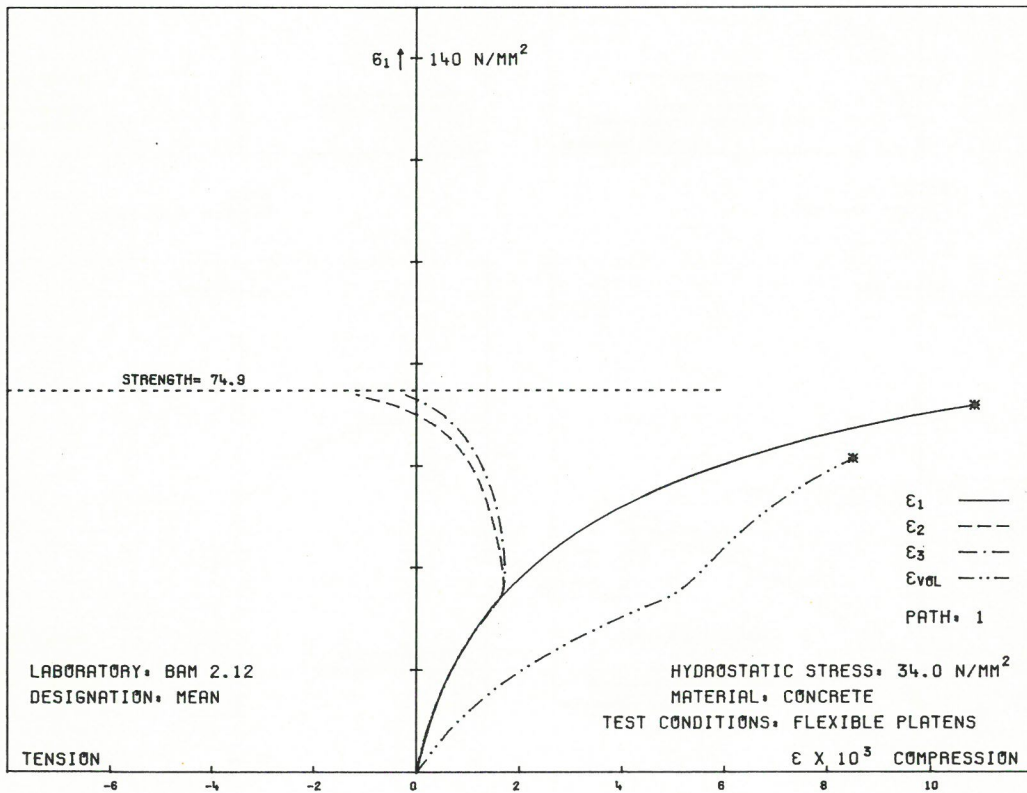


Bild
Figure 6.6-18

Bilder
Figures 6.6-17/18

Mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung

Mean stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 1, hydrostatic stress level

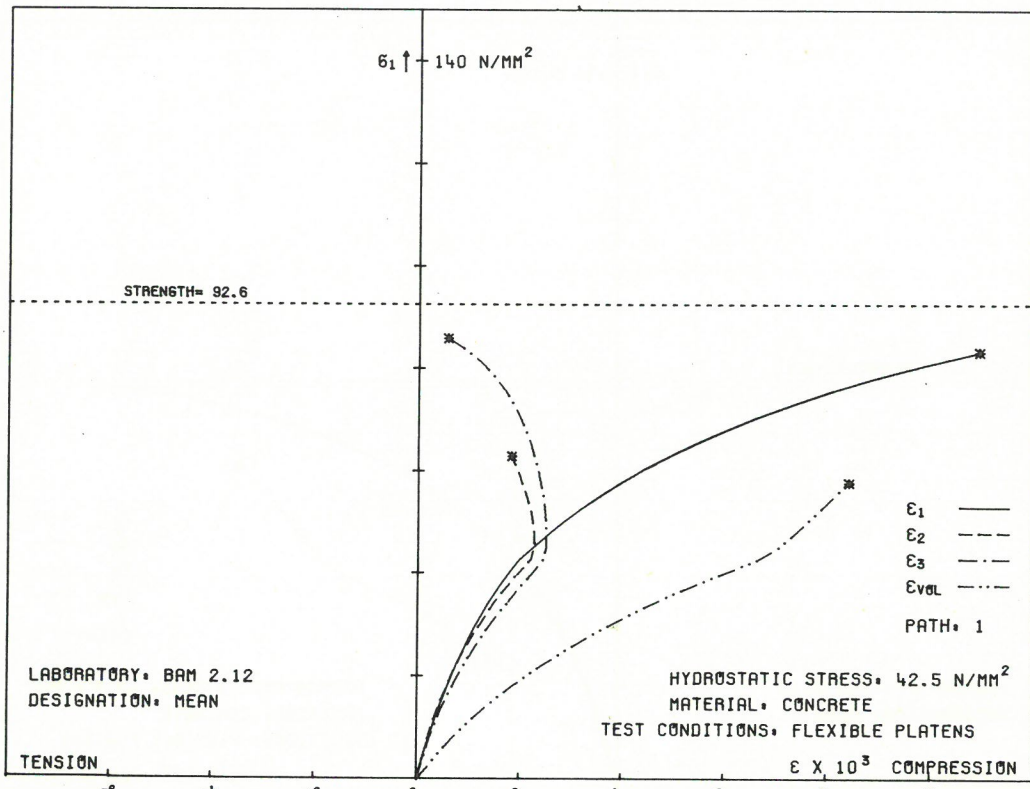


Bild
Figure 6.6-19

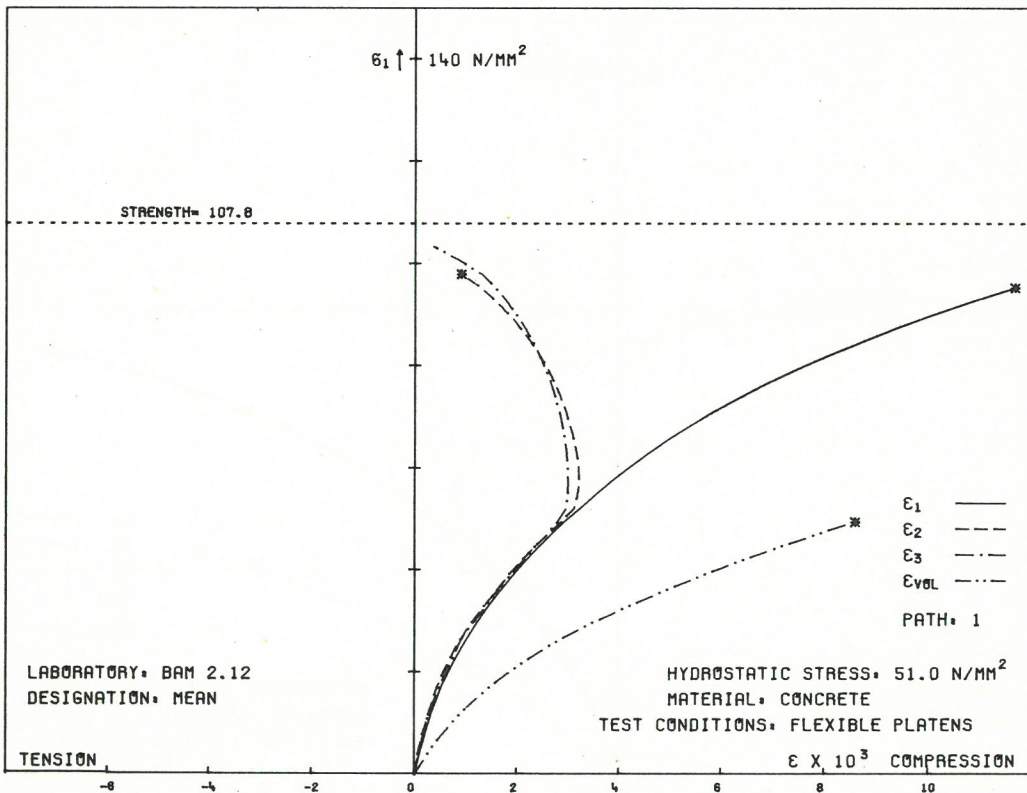


Bild
Figure 6.6-20

Bilder
Figures 6.6-19/20

Mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung

Mean stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 1, hydrostatic stress level

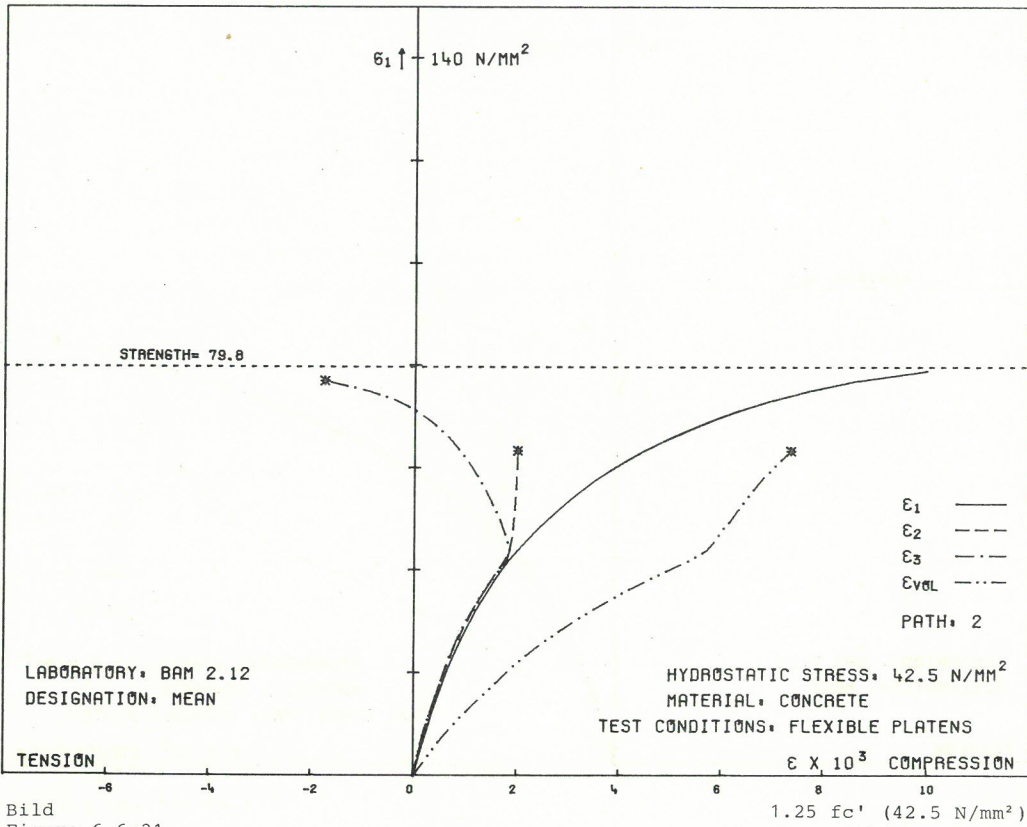


Bild
Figure 6.6-21

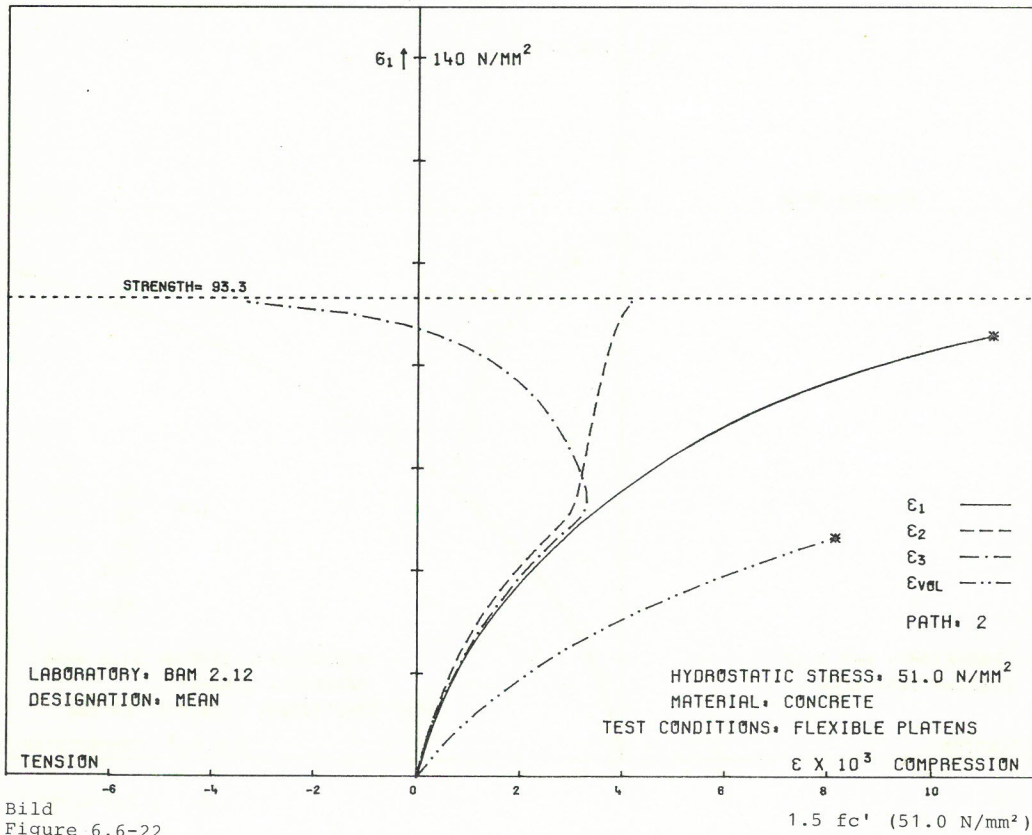


Bild
Figure 6.6-22

Bilder
Figures 6.6-21/22

Mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 2, hydrostatische Druckbeanspruchung

Mean stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 2, hydrostatic stress level

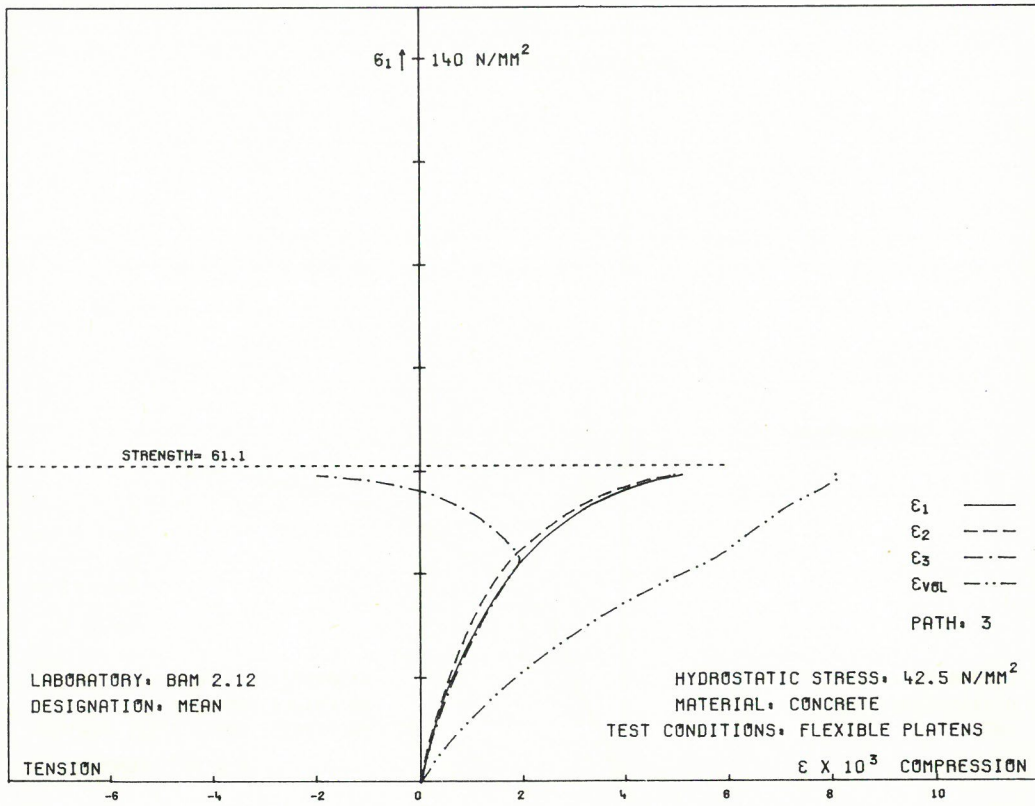


Bild
Figure 6.6-23

1.25 fc' (42.5 N/mm²)

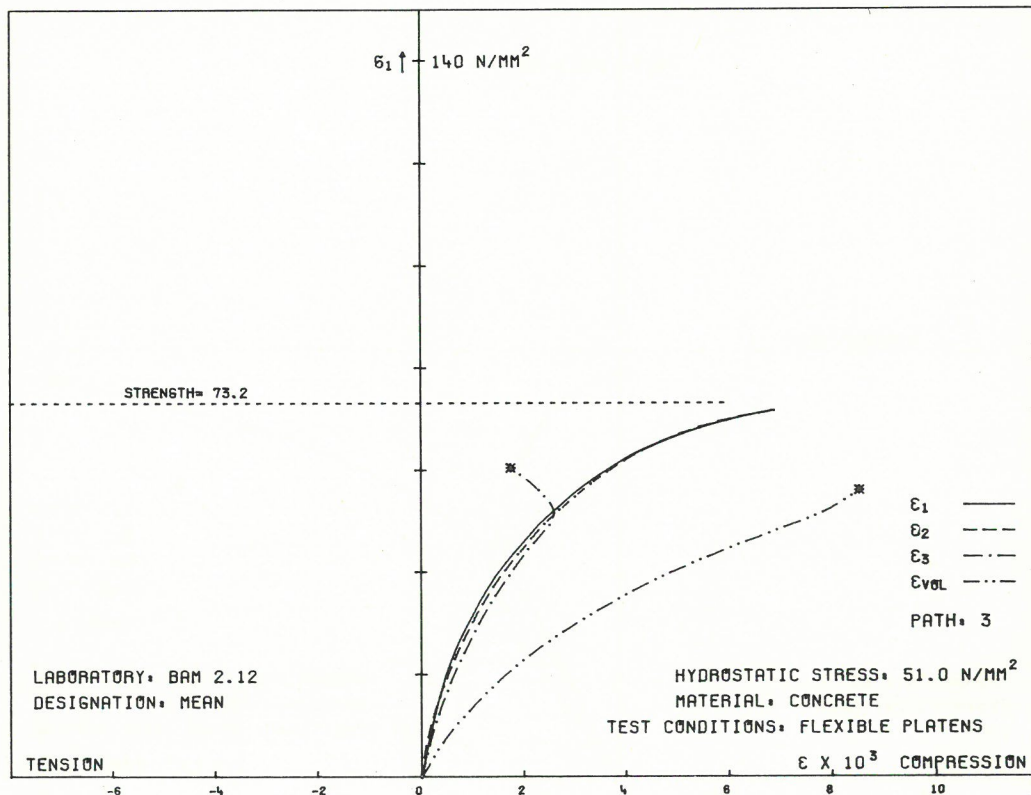


Bild
Figure 6.6-24

1.5 fc' (51.0 N/mm²)

Bilder
Figures 6.6-23/24

Mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 3, hydrostatische Druckbeanspruchung

Mean stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 3, hydrostatic stress level

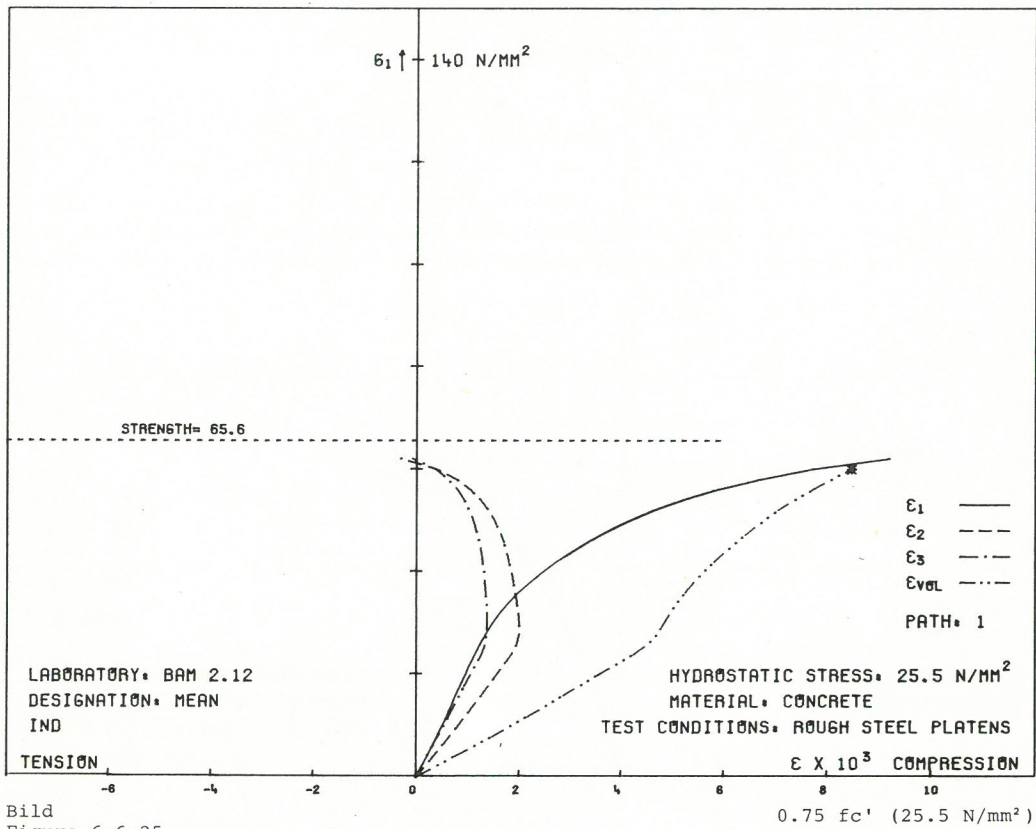


Bild
Figure 6.6-25

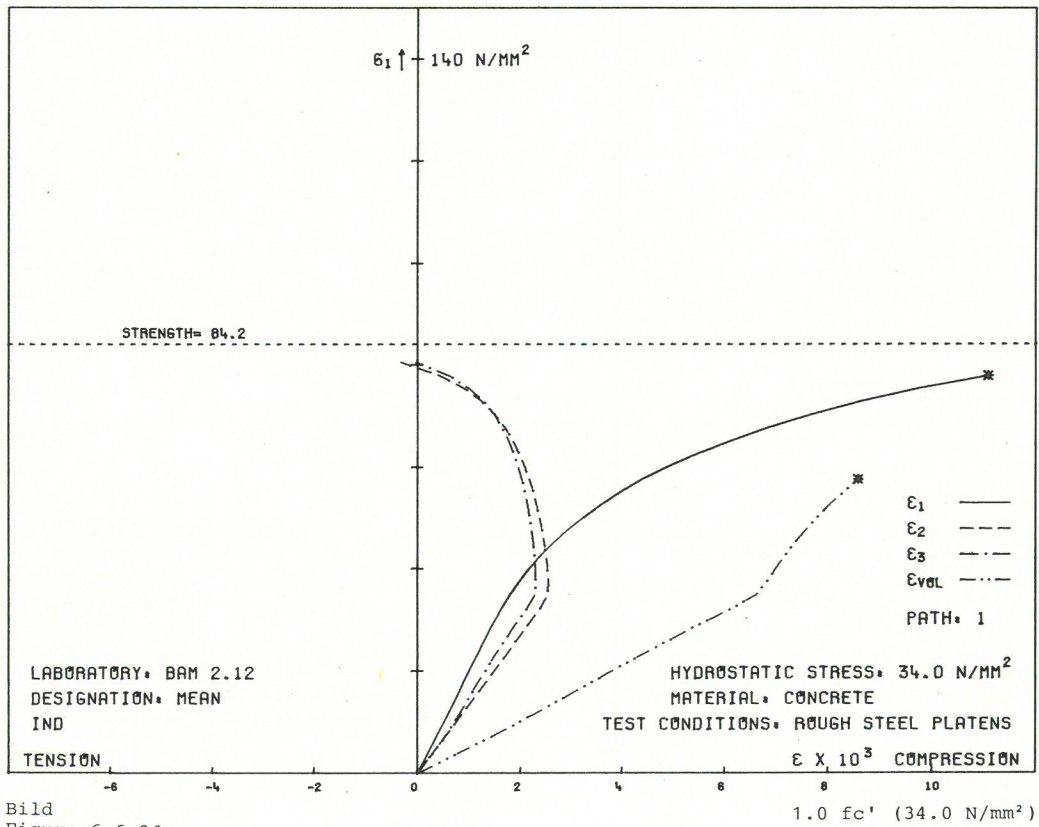


Bild
Figure 6.6-26

Bilder
Figures 6.6-25/26

Mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit starren Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung

Mean stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with rough steel platens; stress path 1, hydrostatic stress level

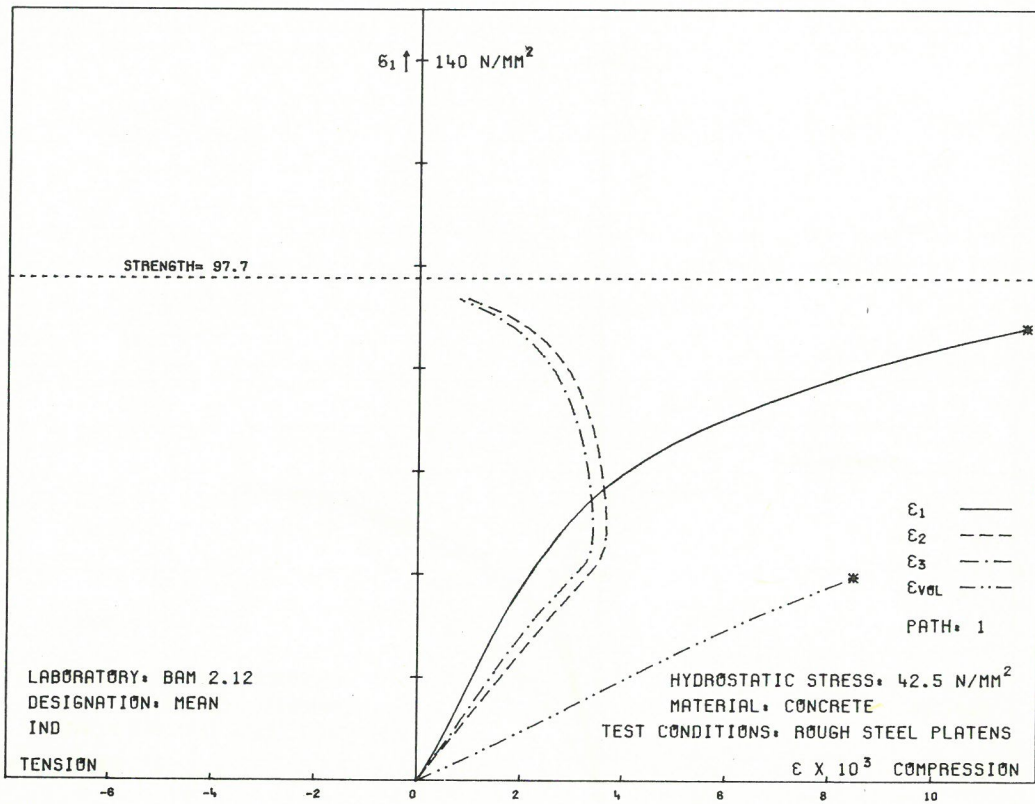


Bild
Figure 6.6-27

1.25 f_c' (42.5 N/mm²)

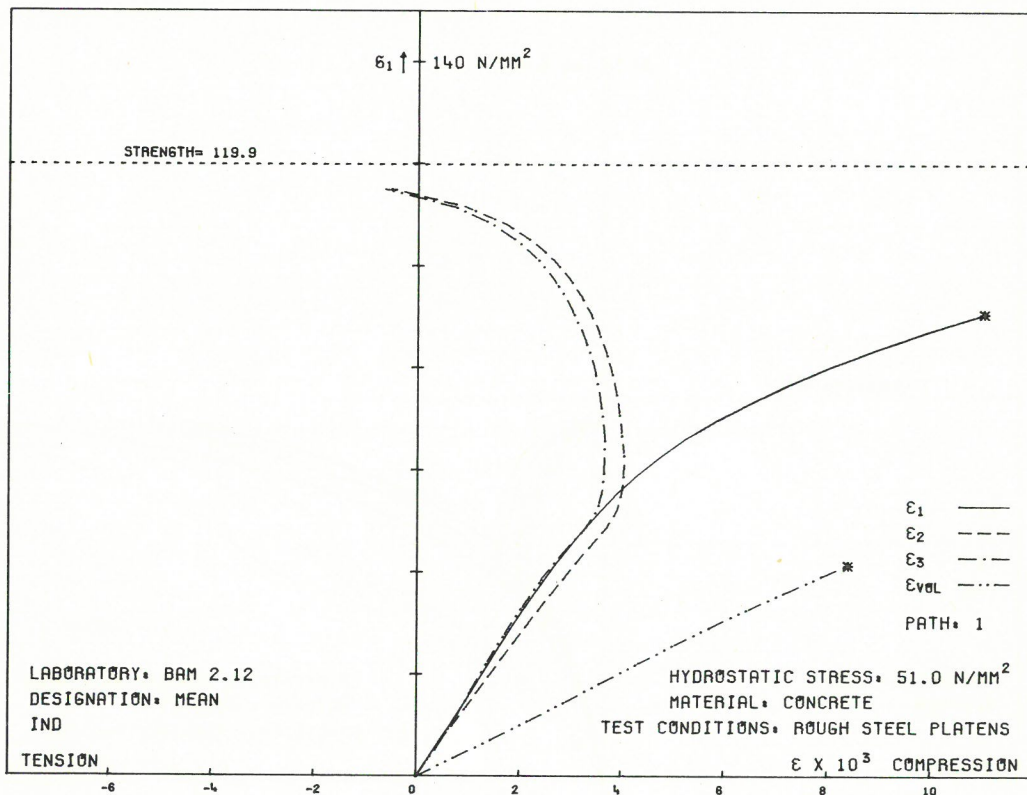


Bild
Figure 6.6-28

1.5 f_c' (51.0 N/mm²)

Bilder
Figures 6.6-27/28

Mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit starren Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung

Mean stress-strain behaviour of concrete, tested triaxially with rough steel platens; stress path 1, hydrostatic stress level

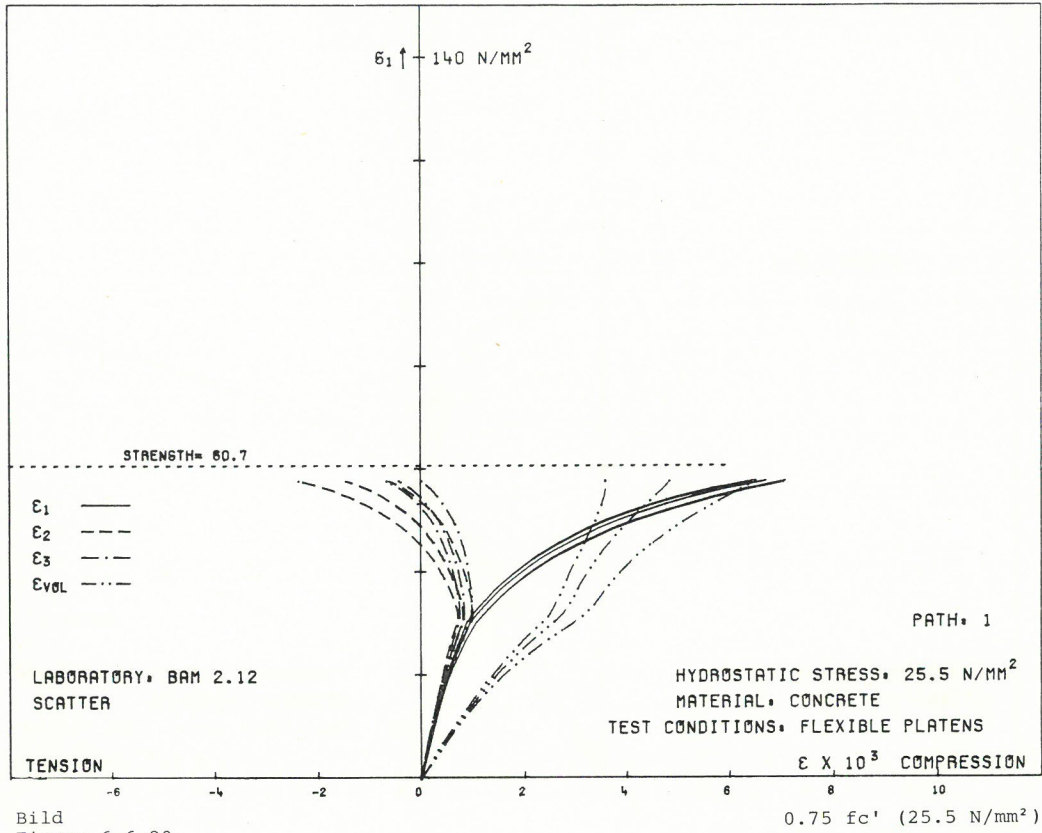


Bild
Figure 6.6-29

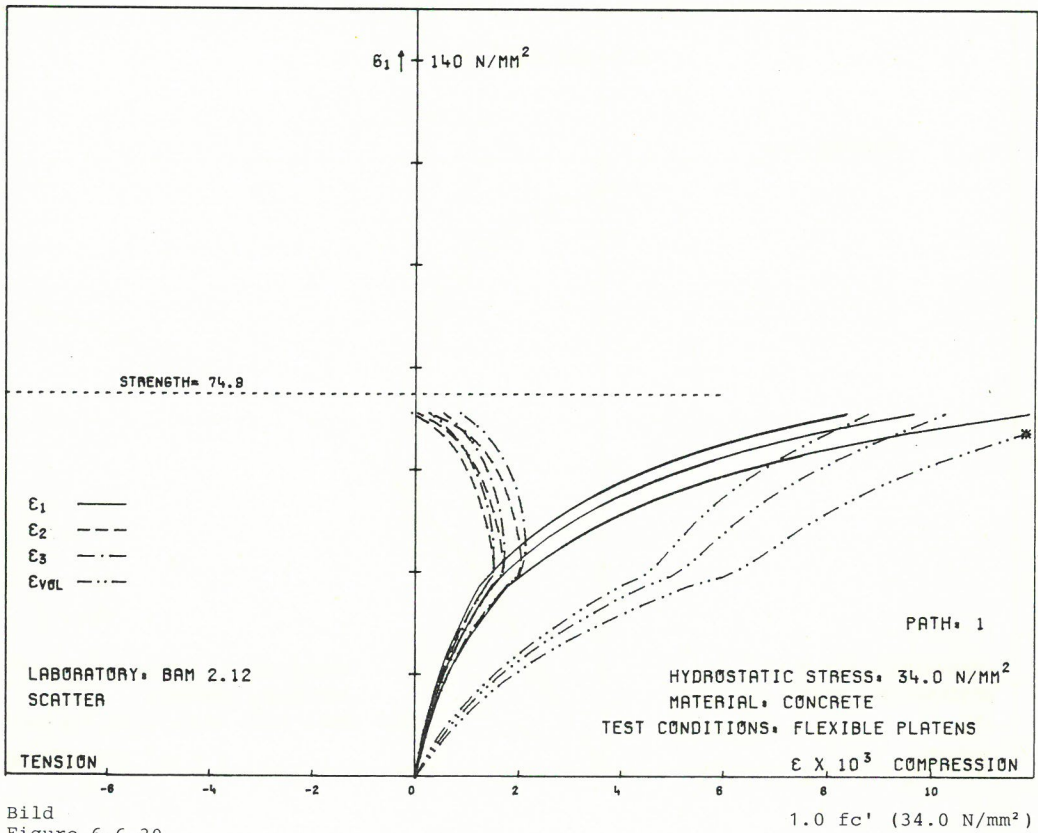


Bild
Figure 6.6-30

Bilder
Figures 6.6-29/30

Spannweite der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung (Spannweite: Grenzlinien der maximalen und minimalen Einzelwerte)

Scatter of mean stress-strain curves of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 1, hydrostatic stress level

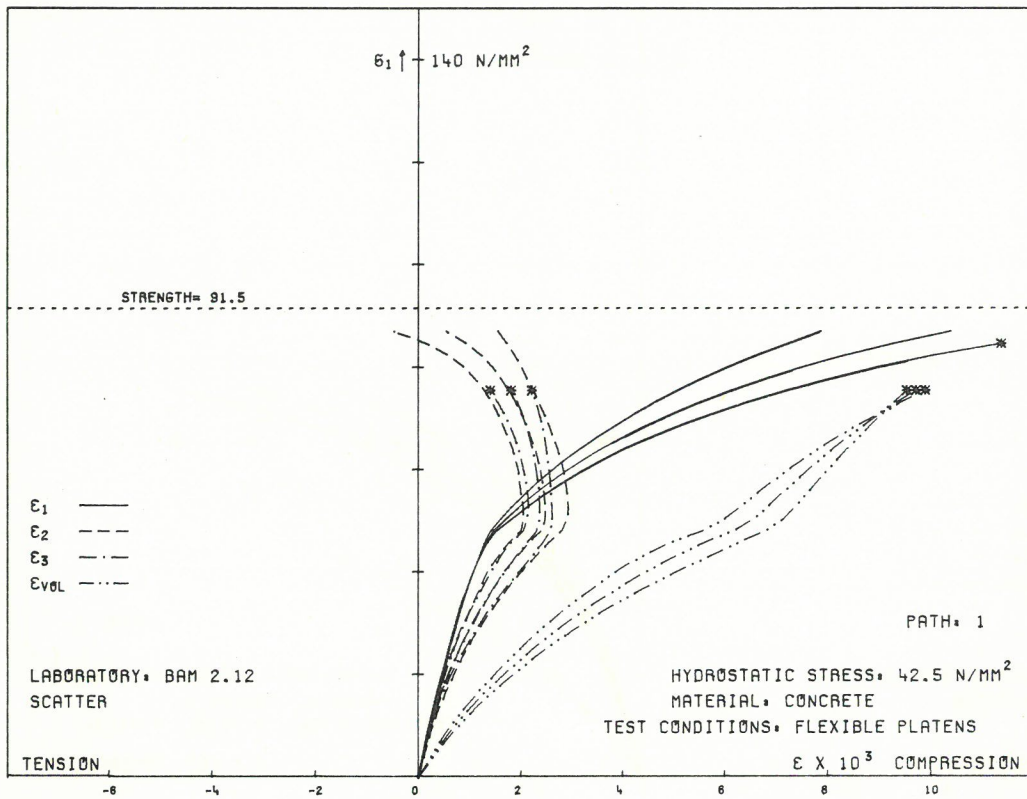


Bild
Figure 6.6-31

1.25 fc' (42.5 N/mm²)

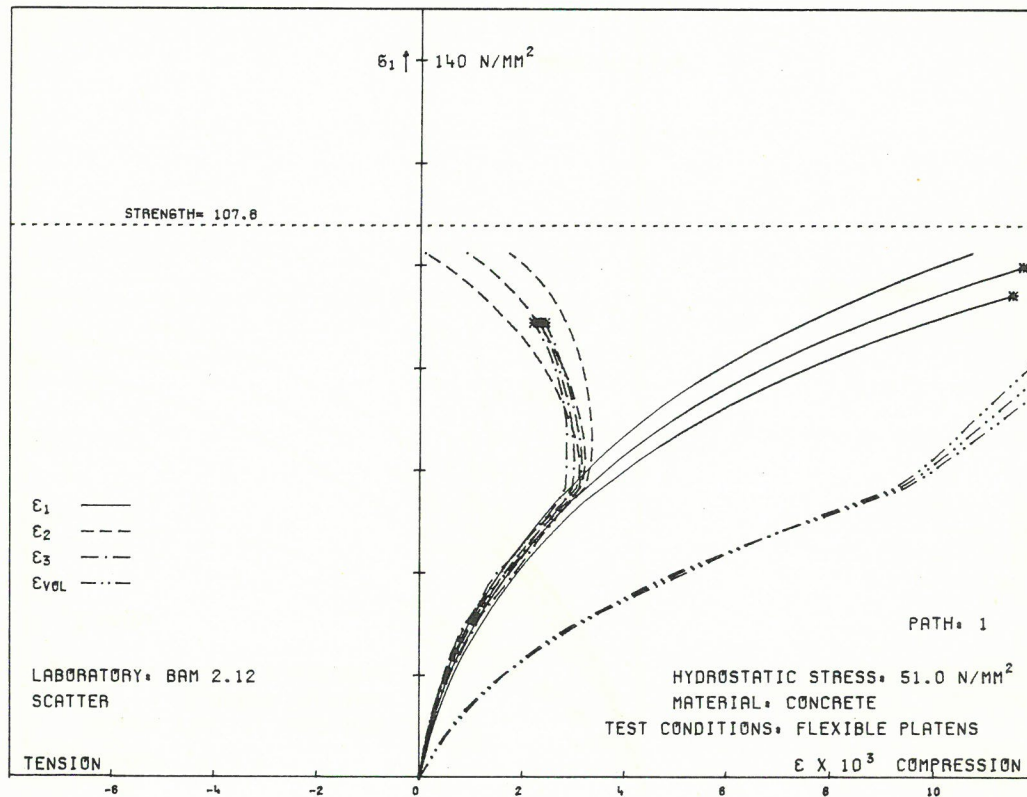


Bild
Figure 6.6-32

1.5 fc' (51.0 N/mm²)

Bilder
Figures 6.6-31/32

Spannweite der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung (Spannweite: Grenzlinien der maximalen und minimalen Einzelwerte)

Scatter of mean stress-strain curves of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 1, hydrostatic stress level

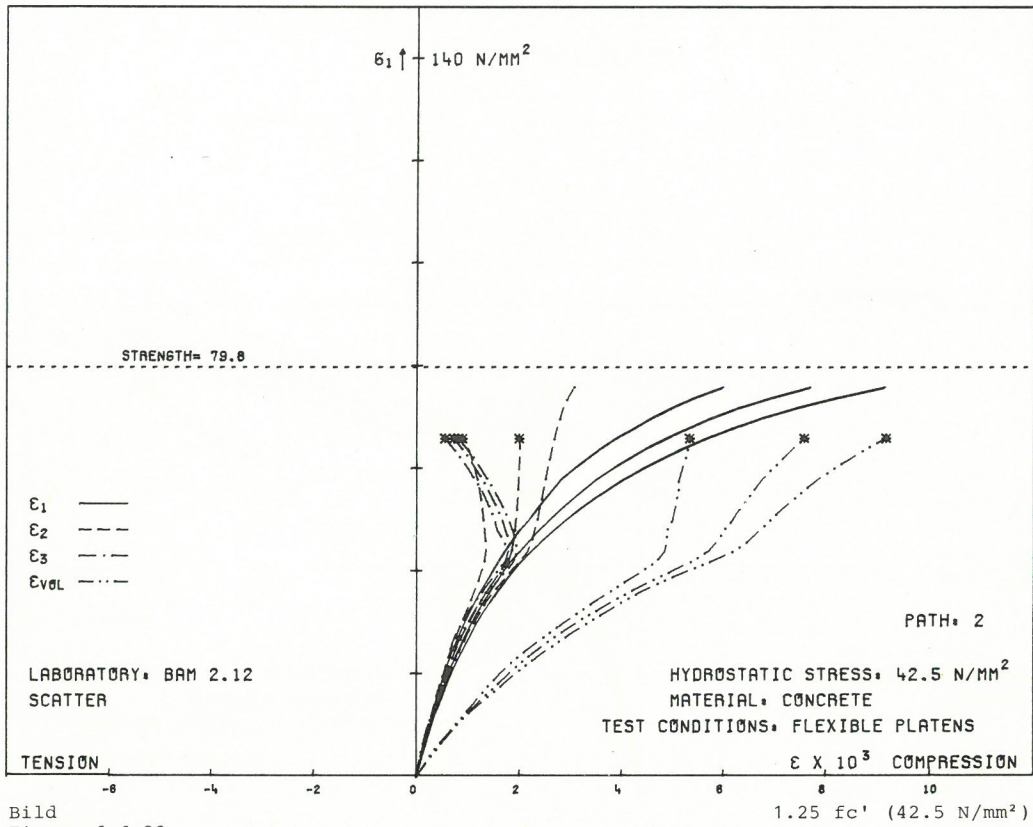


Bild
Figure 6.6-33

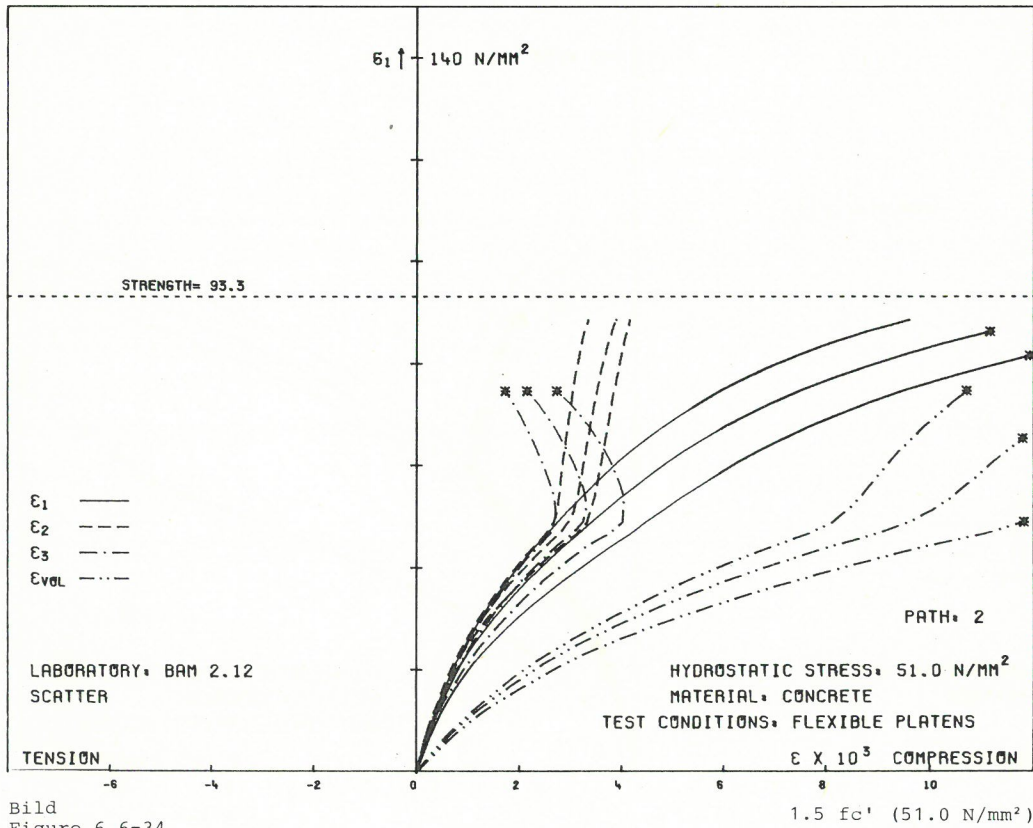


Bild
Figure 6.6-34

Bilder
Figures 6.6-33/34

Spannweite der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 2, hydrostatische Druckbeanspruchung (Spannweite: Grenzlinien der maximalen und minimalen Einzelwerte)

Scatter of mean stress-strain curves of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 2, hydrostatic stress level

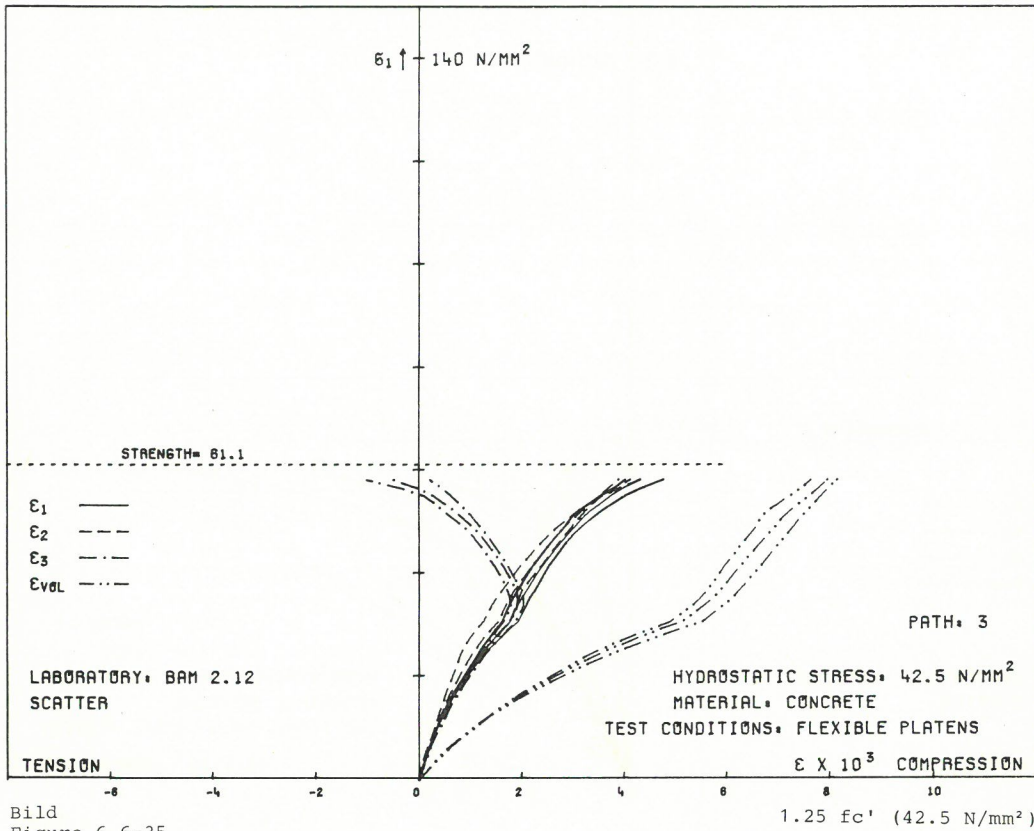


Bild
Figure 6.6-35

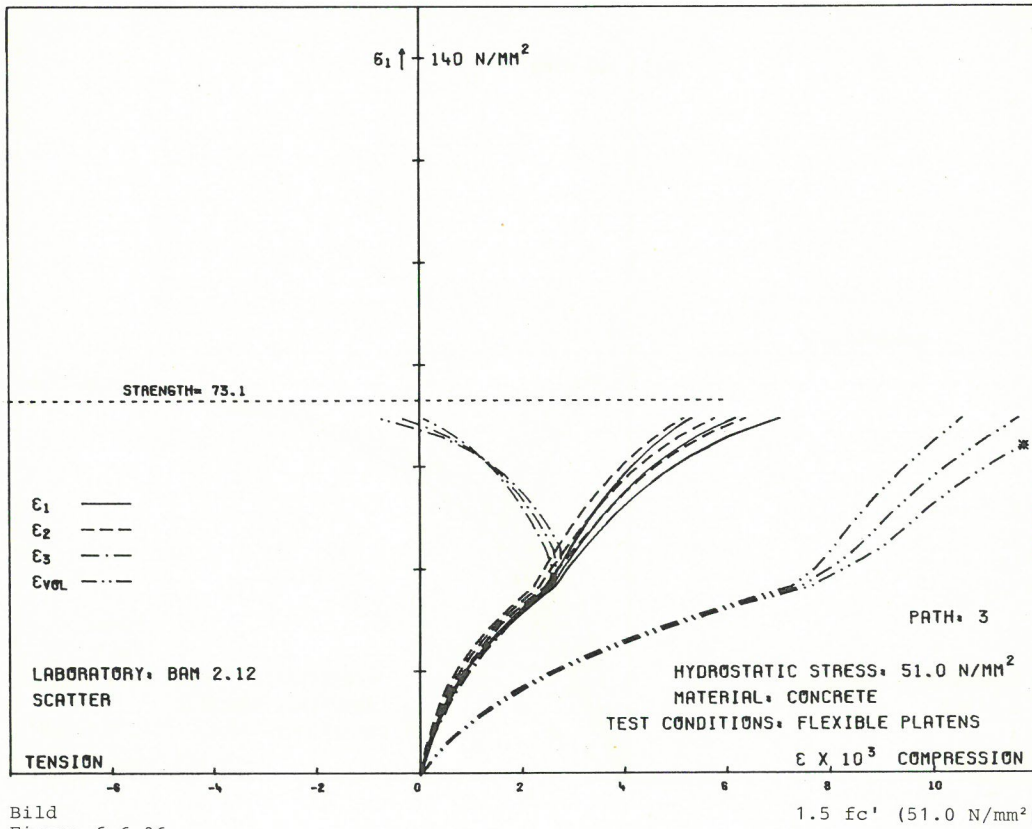


Bild
Figure 6.6-36

Bilder
Figures 6.6-35/36

Spannweite der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 3, hydrostatische Druckbeanspruchung (Spannweite: Grenzlinien der maximalen und minimalen Einzelwerte)

Scatter of mean stress-strain curves of concrete, tested triaxially with flexible platens; stress path 3, hydrostatic stress level

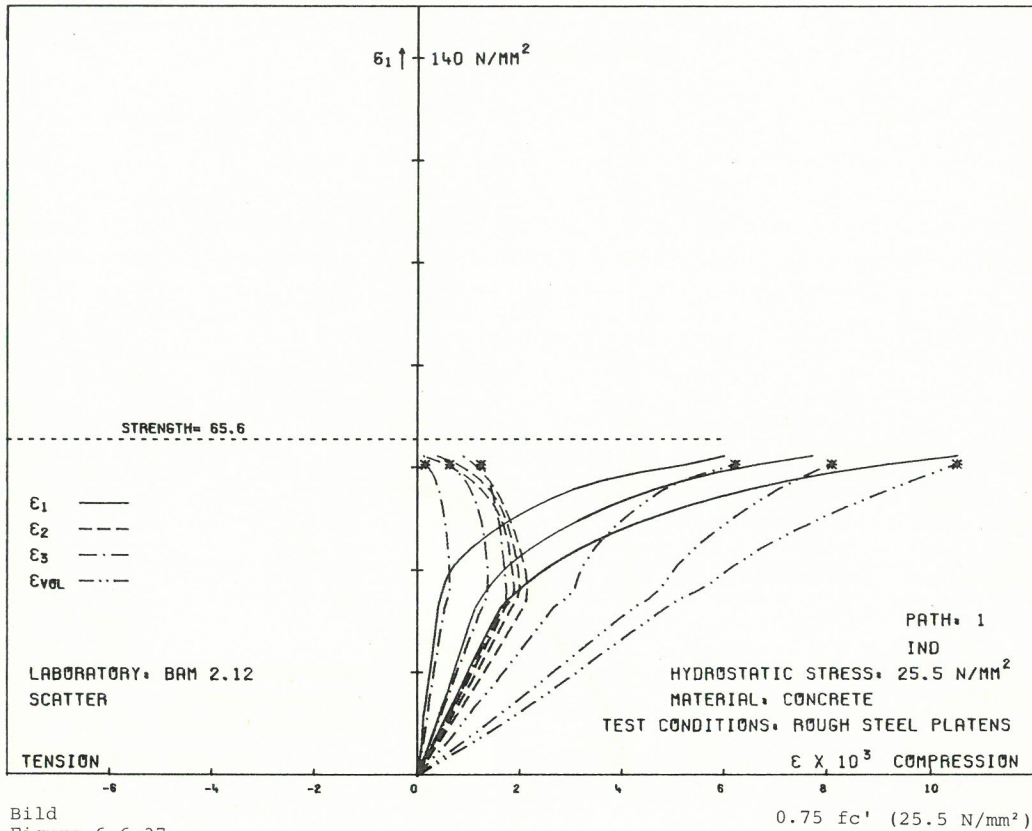


Bild
Figure 6.6-37

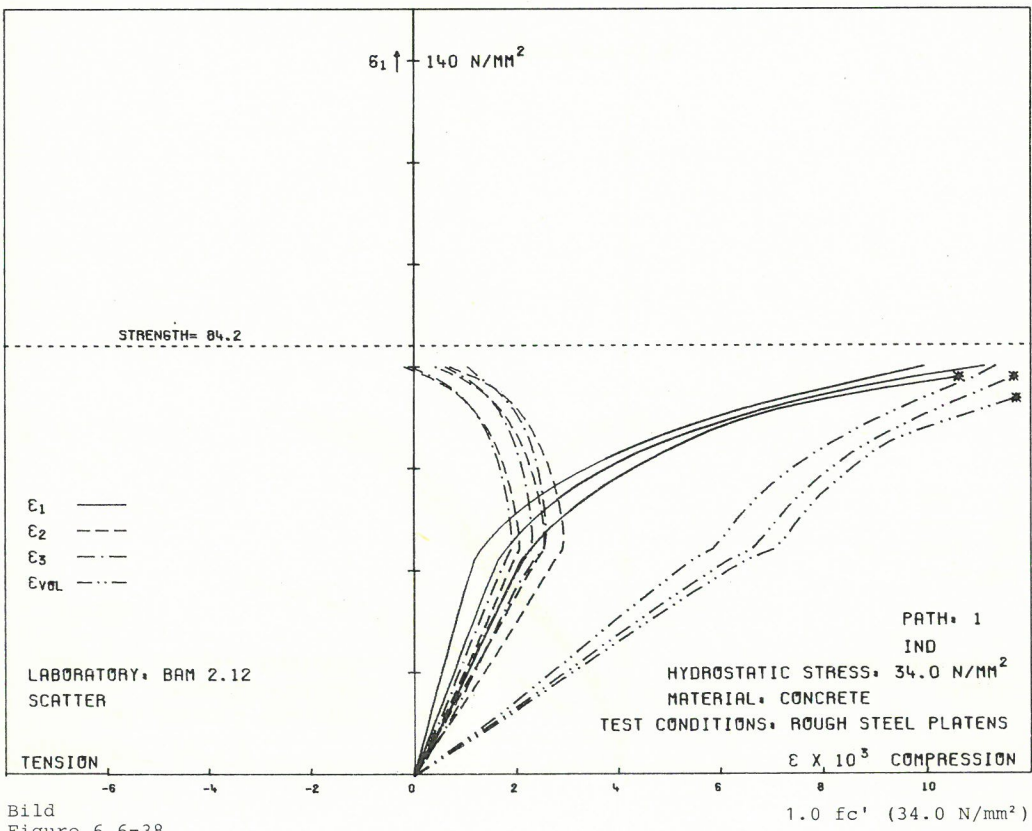


Bild
Figure 6.6-38

Bilder
Figures 6.6-37/38

Spannweite der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit starren Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung (Spannweite: Grenzlinien der maximalen und minimalen Einzelwerte)

Scatter of mean stress-strain curves of concrete, tested triaxially with rough steel platens; stress path 1, hydrostatic stress level

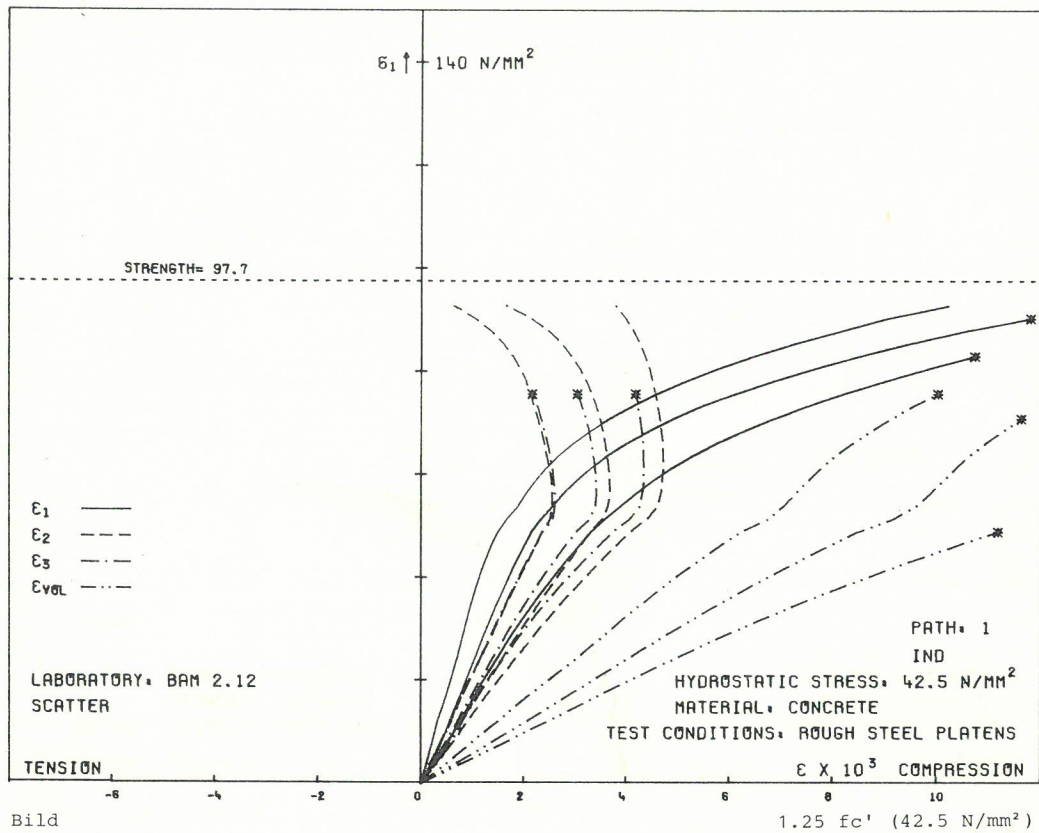


Bild
Figure 6.6-39

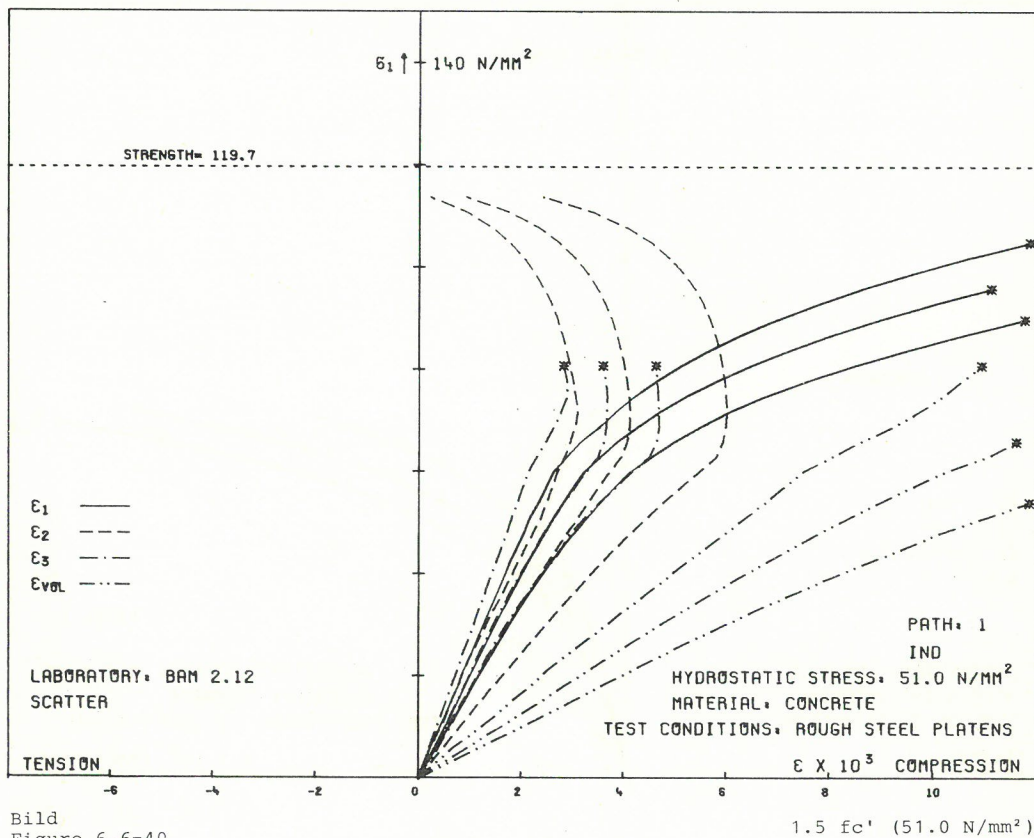


Bild
Figure 6.6-40

Bilder
Figures 6.6-39/40

Spannweite der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit starren Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung (Spannweite: Grenzlinien der maximalen und minimalen Einzelwerte)

Scatter of mean stress-strain curves of concrete, tested triaxially with rough steel platens; stress path 1, hydrostatic stress level

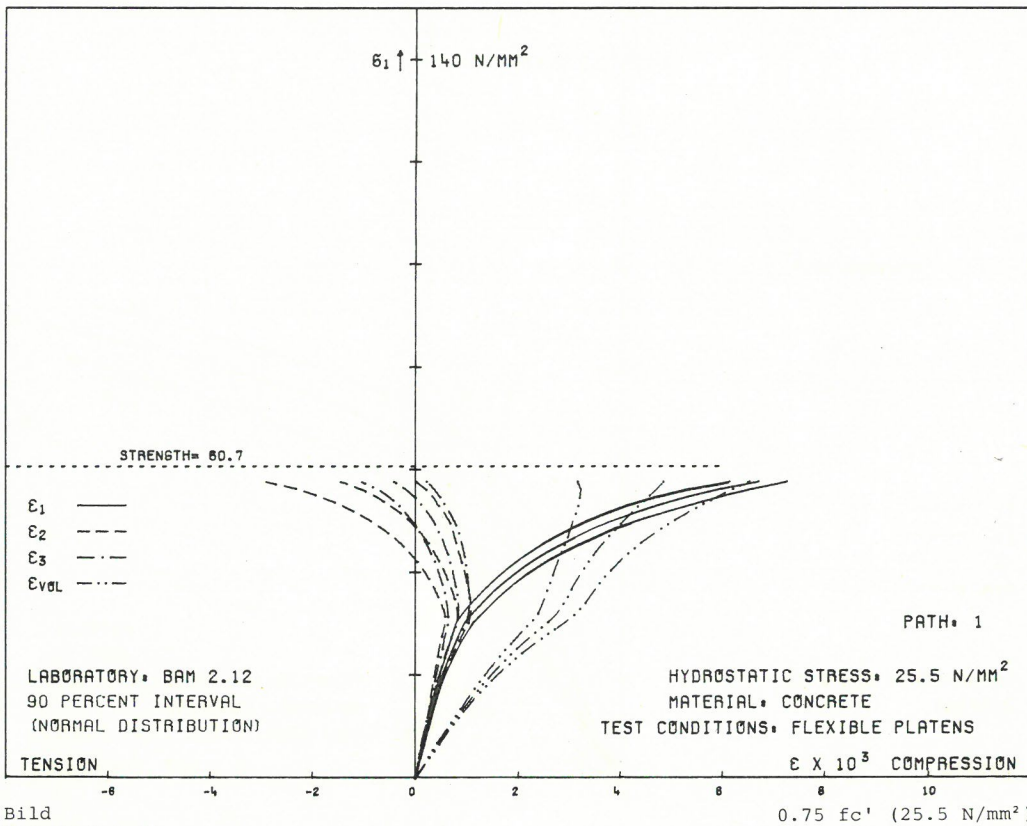


Bild
Figure 6.6-41

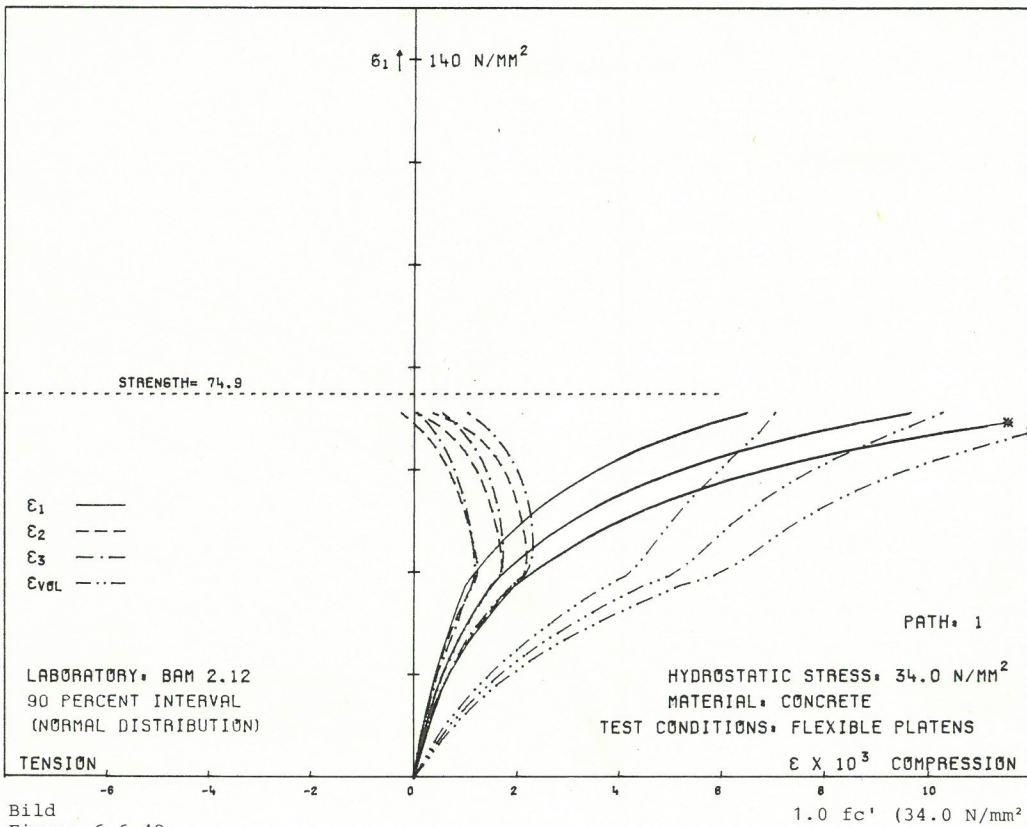


Bild
Figure 6.6-42

Bilder
Figures 6.6-41/42

Streubereich der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung (Streubereich: 90% Intervall der Normalverteilung)

90% interval of normal distribution of the individual strain values of concrete together with corresponding mean stress-strain curves, tested triaxially with flexible platens; stress path 1, hydrostatic stress level

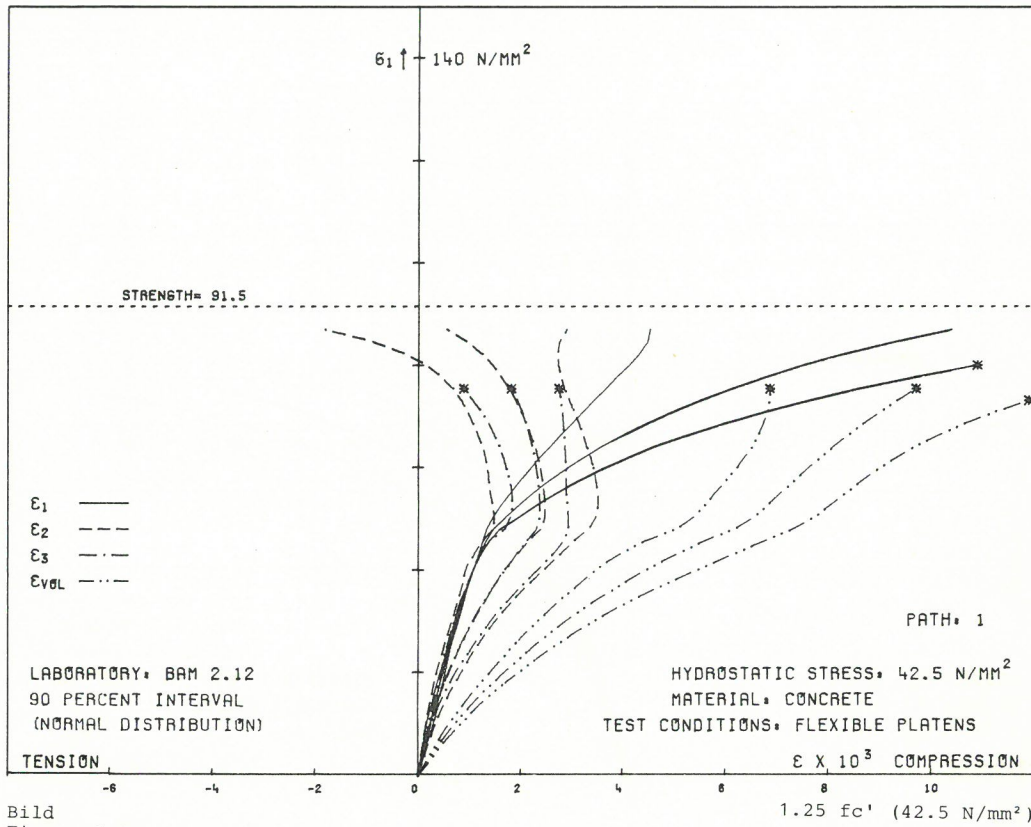


Bild
Figure 6.6-43

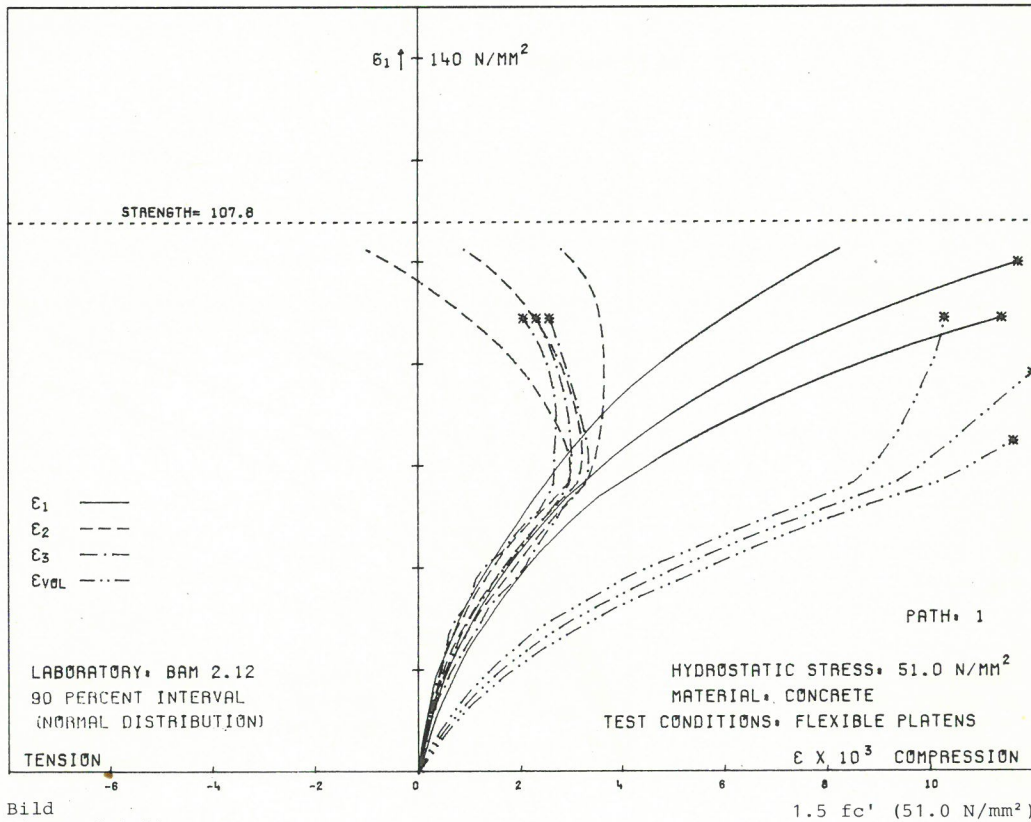


Bild
Figure 6.6-44

Bilder
Figures 6.6-43/44

Streubereich der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung (Streubereich: 90% Intervall der Normalverteilung)

90% interval of normal distribution of the individual strain values of concrete together with corresponding mean stress-strain curves, tested triaxially with flexible platens; stress path 1, hydrostatic stress level

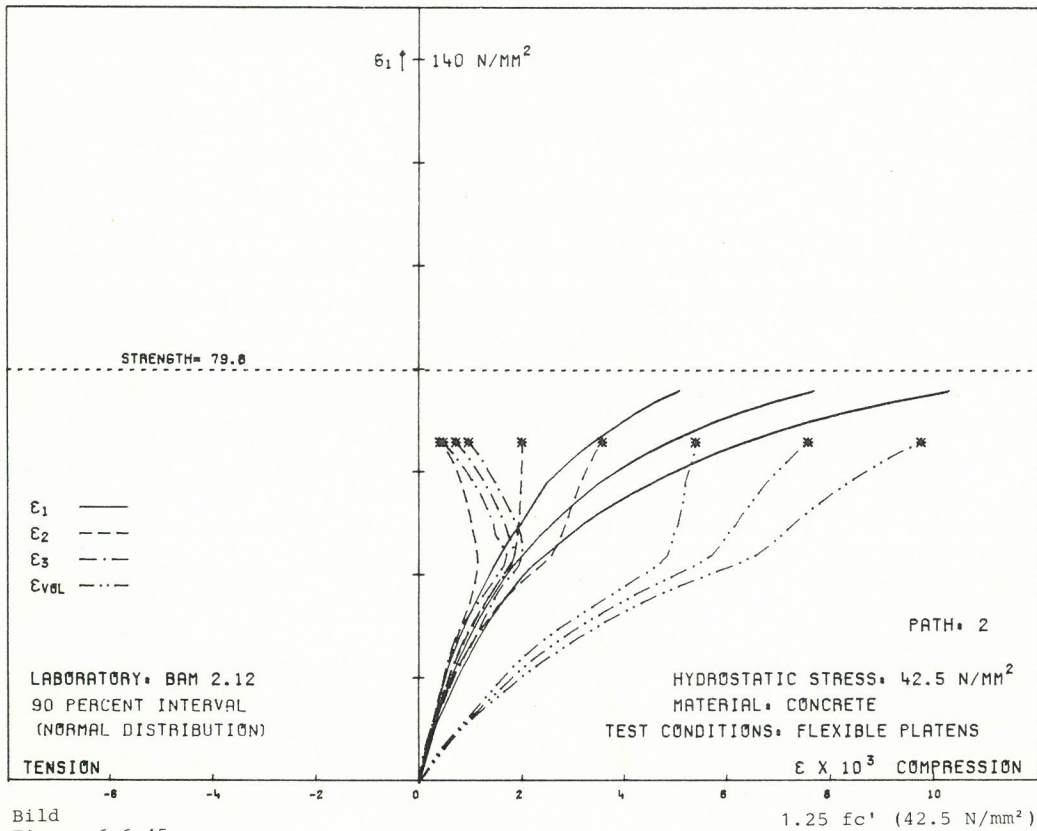


Bild
Figure 6.6-45

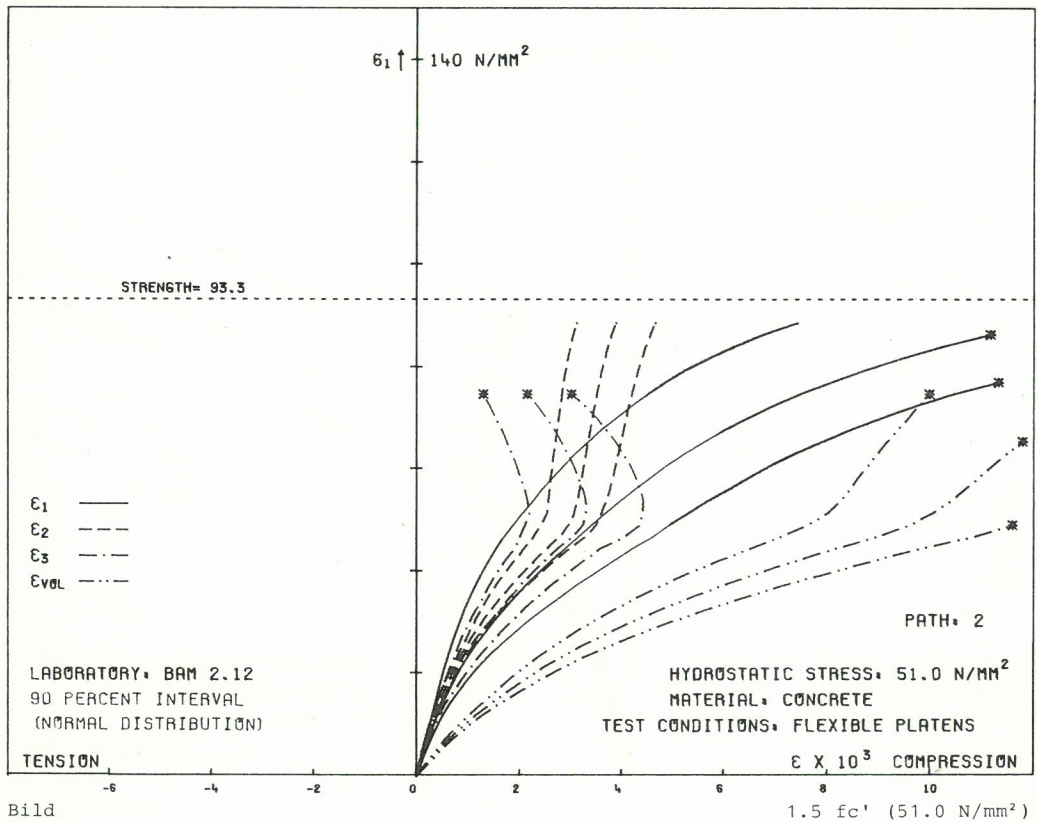


Bild
Figure 6.6-46

Bilder
Figures 6.6-45/46

Streubereich der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 2, hydrostatische Druckbeanspruchung (Streubereich: 90% Intervall der Normalverteilung)

90% interval of normal distribution of the individual strain values of concrete together with corresponding mean stress-strain curves, tested triaxially with flexible platens; stress path 2, hydrostatic stress level

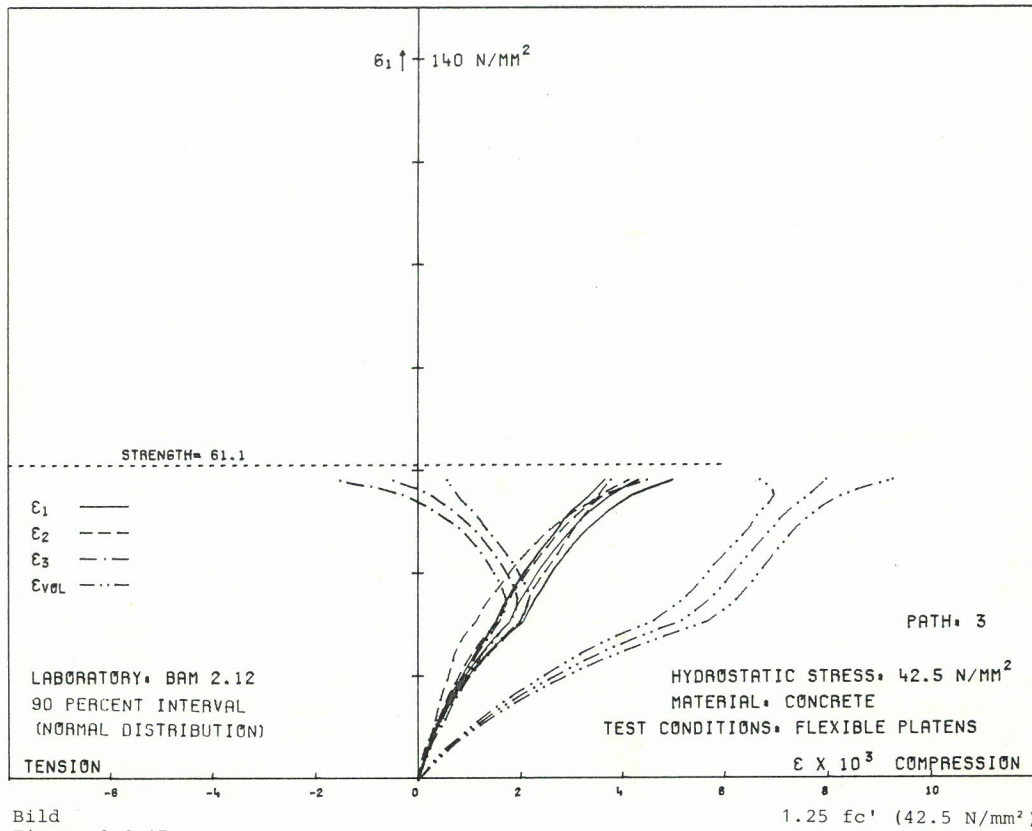


Bild
Figure 6.6-47

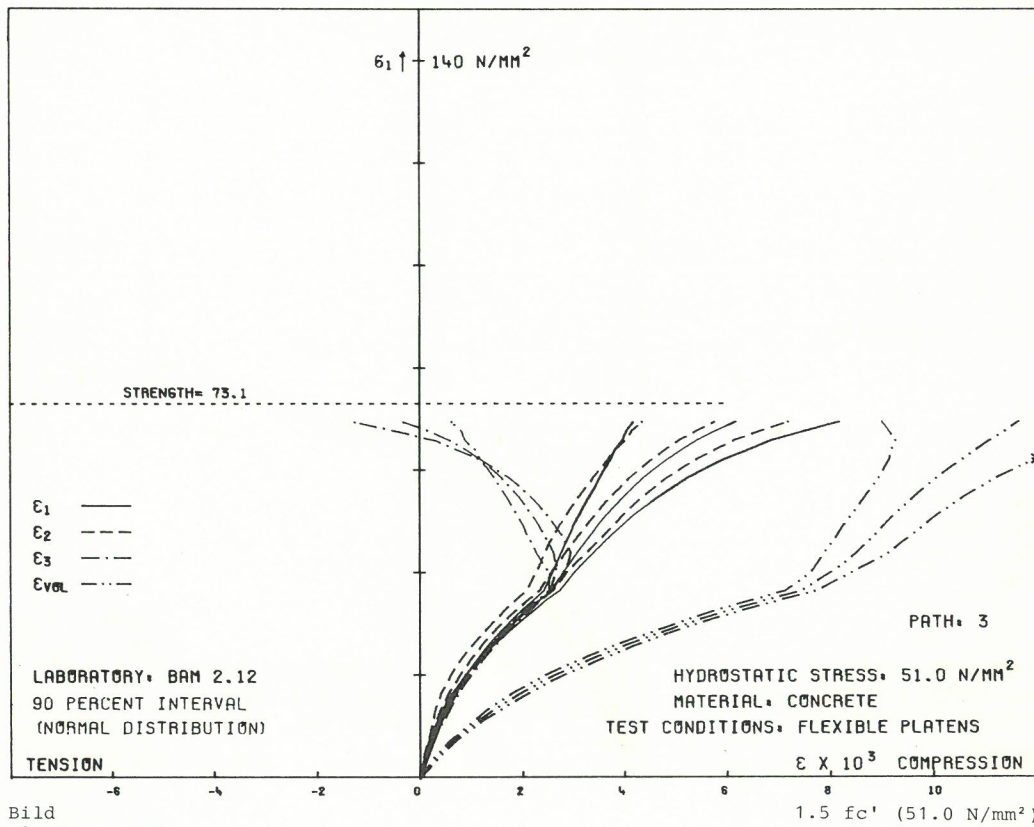


Bild
Figure 6.6-48

Bilder
Figures 6.6-47/48

Streibereich der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit schlaffen Druckplatten; Spannungspfad 3, hydrostatische Druckbeanspruchung (Streibereich: 90% Intervall der Normalverteilung)

90% interval of normal distribution of the individual strain values of concrete together with corresponding mean stress-strain curves, tested triaxially with flexible platens; stress path 3, hydrostatic stress level

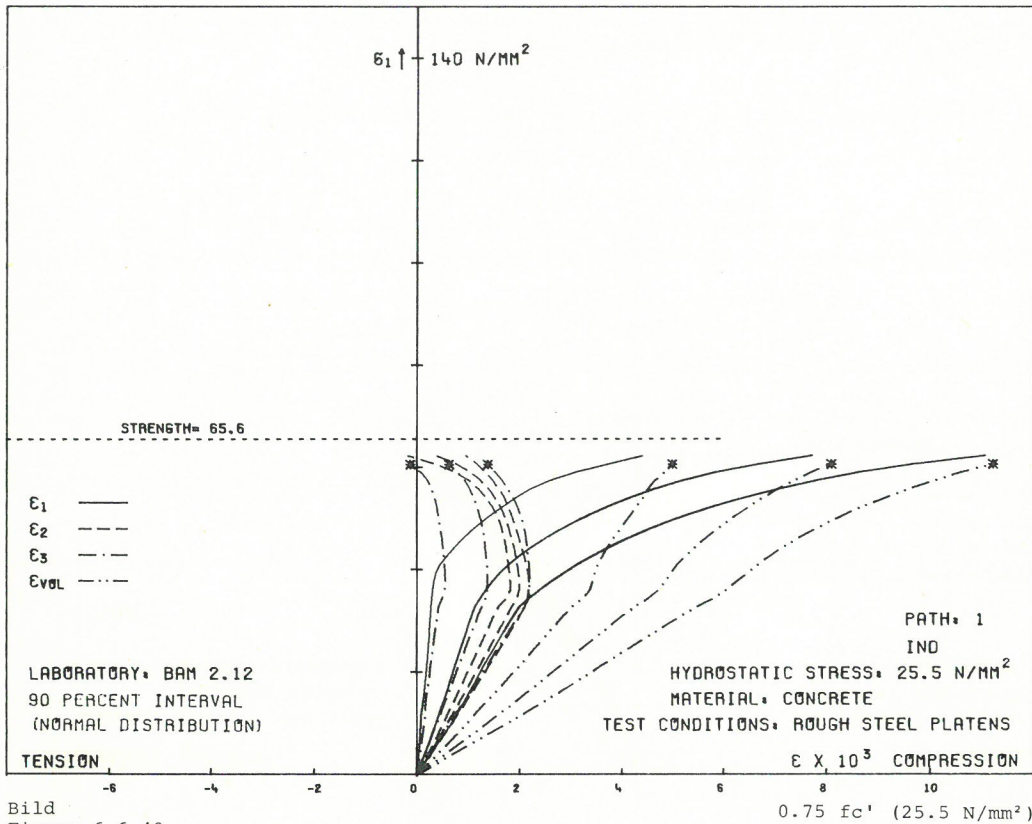


Bild
Figure 6.6-49

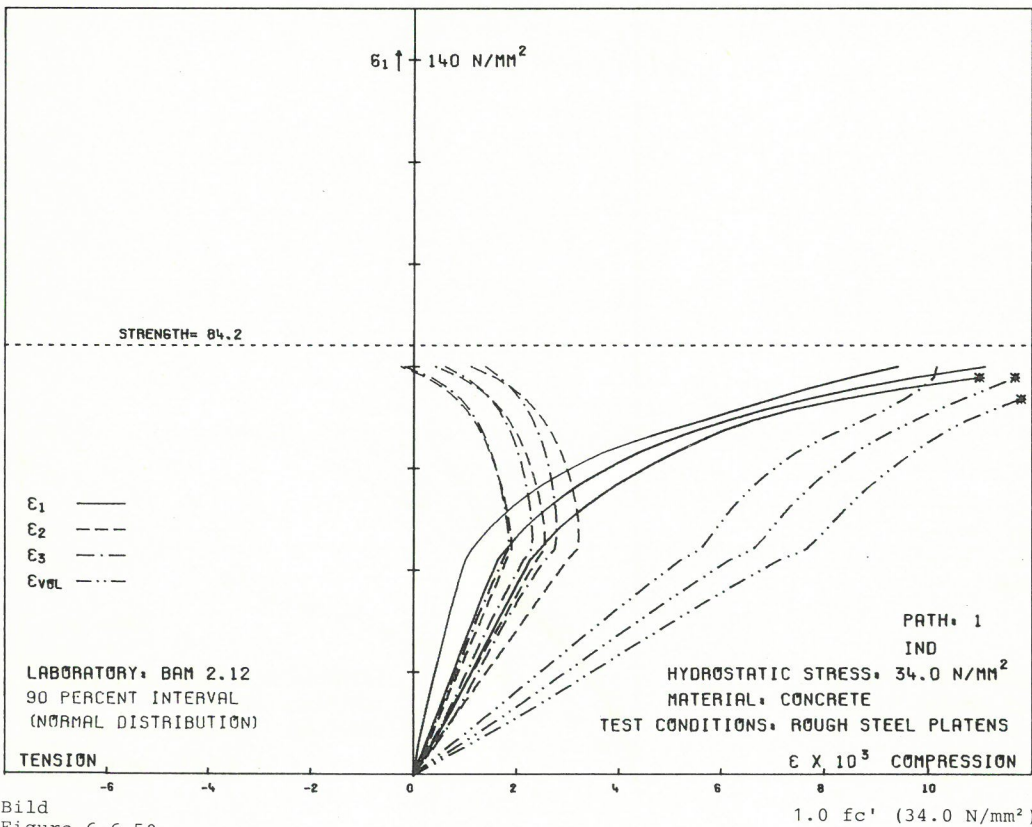


Bild
Figure 6.6-50

Bilder
Figures 6.6-49/50

Streubereich der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit starren Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung (Streubereich: 90% Intervall der Normalverteilung)

90% interval of normal distribution of the individual strain values of concrete together with corresponding mean stress-strain curves, tested triaxially with rough steel platens; stress path 1, hydrostatic stress level

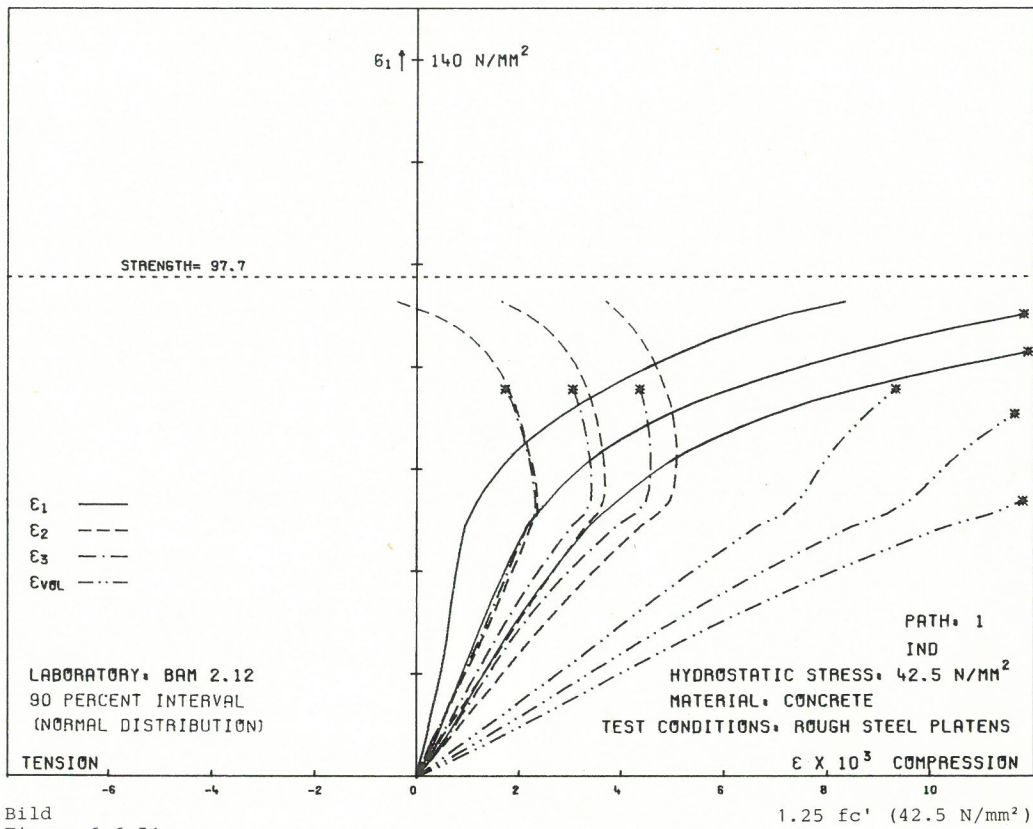


Bild
Figure 6.6-51

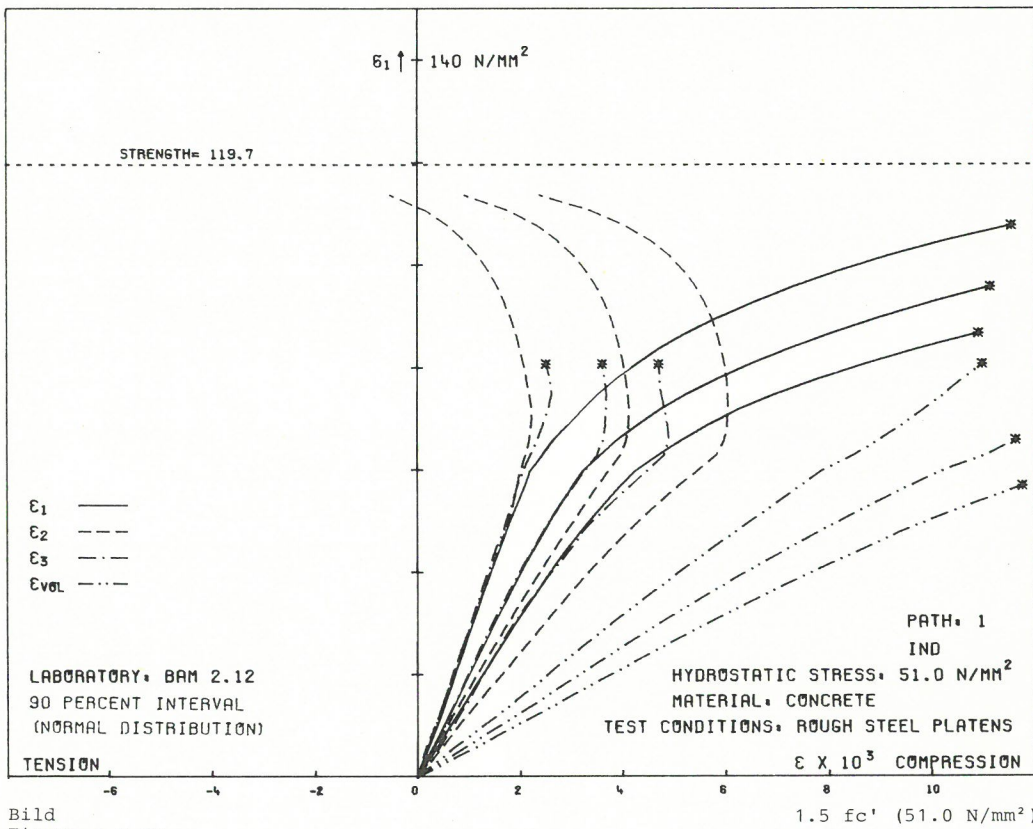


Bild
Figure 6.6-52

Bilder
Figures 6.6-51/52

Streubereich der Dehnungswerte um mittlere Spannungs-Dehnungslinien von Beton bei dreiaxialer Prüfung mit starren Druckplatten; Spannungspfad 1, hydrostatische Druckbeanspruchung (Streubereich: 90% Intervall der Normalverteilung)

90% interval of normal distribution of the individual strain values of concrete together with corresponding mean stress-strain curves, tested triaxially with rough steel platens; stress path 1, hydrostatic stress level

