

Universität (TH) Fridericiana zu Karlsruhe
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik

Richard-Willstätter-Allee 2
7500 Karlsruhe 1

Änderung von Festigkeitseigenschaften
kristalliner Gesteine bei thermomechanischer
Wechselbelastung im Hinblick
auf die Bohrlochstabilität

Ch. Lempp
O. Natau



Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Problemstellung.....	67
2. Bisherige Experimente mit Wechselbelastungen..	67
3. Forderungen an ein Laborversuchsprogramm zur Feststellung des Ermüdungsverhaltens kristal- liner Gesteine.....	69
4. Laborversuchsprogramm.....	70
4.1 Probenauswahl.....	70
4.2 Prüfkörperherstellung.....	71
4.3 Prüfmaschinenbeschreibung.....	71
4.4 Versuchsablauf.....	73
4.5 Schema der Versuchsauswertung.....	74
5. Versuchsergebnisse.....	75
5.1 Vergleich zwischen den Versuchsserien No. 1 bis No. 5 (Übersicht).....	75
5.2 Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit.....	76
5.3 Einfluß des Spannungszustandes.....	77
5.4 Zeitlicher Verlauf der Axialstauchung unter Wechselbelastung auf bestimmten Spannungs- niveaus.....	79
5.5 Zeitlicher Verlauf der Spannungen unter Wechselbelastung mit verschiedenen Verfor- mungsinkrementen.....	81
6. Diskussion zum Materialverhalten unter Wechselbelastung.....	84
7. Literatur.....	91
 Anhang	
Teil 1: Versuchsserien No. 1 bis No. 3.....	93
Teil 2: Versuchsserien No. 4 und No. 5.....	131

Handwritten text, likely bleed-through from the reverse side of the page. The text is mostly illegible due to fading and orientation.

1. Problemstellung

Die kristallinen Gesteine der Erdkruste werden im Laufe des Abteufens der KTB-Tiefbohrung durch häufige Wechsel der Spülungstemperatur indirekt sowie durch den Bohrvorgang direkt mechanisch beansprucht, sie werden zyklisch wechselnd belastet. Insbesondere in der Nähe der Bohrlochberandung induzieren die Temperaturwechsel auf Grund des unterschiedlichen thermischen Ausdehnungsverhaltens der verschiedenen gesteinsbildenden Minerale eine erhebliche mechanische Beanspruchung, außerdem wirkt sich dort der Bohrvorgang besonders stark aus. Thermisch und mechanisch verursachte Wechselbelastungen werden zu einer Materialermüdung führen und so die Bohrlochstabilität beeinflussen.

Effekte der Materialermüdung infolge von Wechselbelastungen sollen im Laborversuch unter erhöhter Temperatur (250° C) an Granitgesteinsproben untersucht werden, damit die Bedeutung dieses Lastfalls "Wechselbelastung" auf die langzeitliche Bohrlochstandsicherheit quantifiziert werden kann.

Das Ziel der Untersuchung ist die bessere Kenntnis des mechanischen Verhaltens der polykristallinen Granite und dessen Veränderungen infolge wechselnder mechanischer bzw. thermischer Belastung unter den bei der KTB-Hauptbohrung zu erwartenden Bedingungen (Gebirgs- und Spülungsdruck sowie Temperatur).

2. Bisherige Experimente mit Wechselbelastungen

Während in der Materialforschung, vornehmlich im Metallbereich, die experimentelle Untersuchung von Ermüdungserscheinungen durch Wechselbelastungen einen festen Platz im Standardversuchsprogramm besitzt, ist im Bereich der Felsmechanik diese Versuchstechnik nur in relativ wenigen Fällen zur Ausführung gekommen. Die Mehrzahl der hier vorliegenden experimentellen Arbeiten berichtet über Ergebnisse bei relativ hohen Lastwechselfrequenzen von 0,3 bis 20 Hz (z.B. HAIMSON und KIM 1971; ATTEWELL und FARMER 1973; HAIMSON 1974; SCHOLZ und KRANZ 1974; MINKLEY 1982; KURAOKA und HAIMSON 1983), außerdem handelt es sich hier jeweils um Versuche unter einaxialen Spannungsverhältnissen. Sowohl die relativ hohe Lastwechselfrequenz als auch die Randbedingungen dieser Experimente stimmen nicht mit den Verhältnissen am wechselbelasteten Bohrlochrand überein, so daß eine direkte Übernahme

der Ergebnisse nicht geboten ist. Berücksichtigt man, daß vor allem auf erhöhtem Temperaturniveau auch kristalline Gesteine in ihrem Materialverhalten nur mit zeitabhängigen Stoffgesetzen charakterisiert werden können, so verbieten vor allem die relativ hohen Lastwechselfrequenzen eine Übertragung der Ergebnisse auf die Verhältnisse der Tiefbohrung. CHO und HAIMSON (1987) zeigen in einer experimentellen Studie, in der zylindrische Bohrlöcher in Gesteinsprüfkörpern aus Dolomit in zyklischem Wechsel von innen hydraulisch bis zum Versagen belastet werden, daß die Lastwechselfrequenz deutlichen Einfluß auf das Versuchsergebnis hat. Sie erweiterten daher die Lastwechselfrequenz auf den Bereich von 0,1 bis 0,0001 Hz. Dabei wird deutlich gezeigt, daß bei relativ raschen Lastwechseln (0,1 bis 0,01 Hz) wesentlich später Ermüdungserscheinungen zum Versagen führen als bei geringerer Lastwechselfrequenz (0,001 bis 0,0001 Hz). Im Hinblick auf die bei KTB auftretenden Spülungstemperaturschwankungen sollte dementsprechend eine möglichst niedrige, versuchstechnisch aber noch sinnvoll realisierbare Lastwechselgeschwindigkeit gewählt werden; in jedem Fall sollten "quasidynamische" Belastungsverhältnisse $> 0,1$ Hz nicht simuliert werden.

Ein weiterer bedeutungsvoller Faktor, der die Ermüdungszeit beeinflusst, wird von CHO und HAIMSON (1987) herausgestellt: Die Prüfkörpergröße bestimmt wesentlich das Versuchsergebnis. Durch Vergleich mit entsprechenden älteren Versuchen (KURAOKA und HAIMSON 1983) ergibt sich ein geometrischer Einflußfaktor, der bewirkt, daß die Ermüdungszeit von relativ großen Proben mit einem Bohrlochdurchmesser von 76 mm um ca. 50% geringer ist als bei den kleineren Proben mit einem Bohrlochdurchmesser von 14 mm bei sonst gleichen Versuchsbedingungen. Diesen geometrischen Effekt gilt es besonders bei polykristallinen Gesteinen im Auge zu behalten; er schränkt auch die Aussagekraft der Ergebnisse von ZOBACK und BYERLEE (1975) etwas ein. Diese führten einaxiale und triaxiale Wechselbelastungs - Kompressionsversuche mit Verformungsraten von 10^{-5} /sec an relativ kleinen Granitproben, allerdings bei Drücken im Kilobarbereich durch. Die ganz auf die Beobachtung des Dilatanzverhaltens ausgerichteten Versuche zeigen nur im einaxialen Fall deutliches Ermüdungsversagen, wogegen die triaxial belasteten Proben nicht während der Lastwechselzyklen versagten. So resumieren die Autoren, daß es nicht bekannt sei, ob seitendruckgestützte Proben unter solch hohen Drücken

(500 bis 2000 bar) überhaupt instabil reagieren und bei genügend großer Lastwechselanzahl schließlich versagen werden. Aus diesem Literaturrückblick ergeben sich einige Orientierungspunkte für die Aufstellung eines Laborversuchsprogramms, das die Frage von Ermüdungserscheinungen durch zyklische Belastungswechsel weiter beantworten kann.

3. Forderungen an ein Laborversuchsprogramm zur Feststellung des Ermüdungsverhaltens kristalliner Gesteine

Bei der Konzipierung eines Laborversuchsprogrammes sollte vorrangig folgenden Randbedingungen Beachtung geschenkt werden.

- Die Prüfkörpergeometrie bzw. -größe muß repräsentativ sein für den Betrachtungsbereich Bohrloch; der Bohrlochdurchmesser und der Prüfkörperdurchmesser sollten in derselben Größenordnung liegen, damit keine schwerwiegenden Geometrieeffekte die Versuchsergebnisse beeinflussen.
- Die Verformungsrate, d.h. die Lastwechselgeschwindigkeit bei der zyklischen Be- und Entlastung, sollte in der Größenordnung nicht gänzlich von den in-situ erwarteten thermischen bzw. mechanischen Lastwechselverhältnissen abweichen. Lastwechselfrequenzen von $> 0,1$ Hz erscheinen dabei auf jeden Fall zu groß; andererseits ergibt sich aus Gründen der praktischen Durchführbarkeit der Versuche eine Geschwindigkeitsuntergrenze, die durch die Versuchserfahrung genauer einzugrenzen ist.
- Die Spannungsrandbedingungen im Laborversuch sollten den Verhältnissen am Bohrlochrand angepaßt werden. Je nach Permeabilität der Gesteinsmatrix kann es sinnvoll sein, entweder die Prüfkörper unter einem hydrostatischen, durch die Spülung hervorgerufenen "Stützdruck" zusätzlich axial zyklisch zu be- und entlasten (in diesem Fall wird eine sehr geringe Gesteinspermeabilität vorausgesetzt), oder einen Porenwasserdruck infolge der Spülung anzunehmen und die zyklischen Wechselbelastungen quasi einaxial auf die unter Porendruck stehende Probe einwirken zu lassen (hier wird eine relativ große Gesteinspermeabilität vorausgesetzt). Beide genannten Randbedingungen könnten in unterschiedlicher Entfernung vom Bohrlochrand im gleichen Gesteinstyp auftreten; sie sind daher entsprechend im Versuchsprogramm vorzusehen.

- Die Temperaturbedingungen sollten nicht vorrangig variabel angesetzt werden. Wesentlich ist ein deutlich erhöhtes Temperaturniveau; auf diesem sollten die zu vergleichenden Versuche gefahren werden.

Die genannten Gesichtspunkte wurden bei der Aufstellung des Laborversuchsprogramms berücksichtigt.

4. Laborversuchsprogramm

4.1 Probenauswahl

Als ein repräsentativer Gesteinstyp der Oberen Erdkruste wurde ein Granit gewählt. Die Proben wurden aus einem fein- bis mittelkörnigen, grauen Zweiglimmergranit gewonnen. Dieser Granit steht in - feldgeologisch gesehen - nahezu unverwittertem Zustand bei Forbach im Murgtal (Nordschwarzwald) an. Nach feldgeologischen Merkmalen (vgl. BRAUNS et al. 1985) stehen die entnommenen Klufkörper in Verwitterungsstufe WO(unverwittert) an. Nach der Klassifikation der Granite entsprechend ihren festigkeitsmechanischen Eigenschaften (vgl. LEMPP und NATAU 1985) beträgt die einaxiale Druckfestigkeit der unverwitterten, frischen (WO) Granite bei Raumtemperatur 120 MPa bis 180 MPa. Dieser Granit besitzt eine natürliche Porosität von $n = 1,1 \pm 0,7 \%$ und eine Wichte von $26,1 \pm 0,2 \text{ kN/m}^3$. Der mittlere modale Mineralgehalt beträgt (Angaben in Vol %): Qz 34,6; Kf 35,0; Pl 19,0; Bi 4,3; Mu 6,2; Akz. 0,9 (vgl. KREUTER 1987).

Feldgeologisch als ähnlich anzusprechende natürliche Klufkörper mit Kantenlängen von mehreren Dezimetern wurden an einer Entnahmestelle geborgen und im Labor weiter bearbeitet. Aus jedem Klufkörper wurden 5 bis 6 Bohrkerne mit 70 mm Durchmesser und etwa 140 mm Höhe mit einer Diamantbohrkrone herausgebohrt. Für jede der verschiedenen Versuchsserien No 1 bis No 5 mit jeweils festgelegten Randbedingungen (vgl. Anhang Tabelle 1 und 2) standen somit 5 bis 6 Rohproben aus jeweils demselben Klufkörper zur Verfügung.

4.2 Prüfkörperherstellung

Die zylindrischen Rohproben (mit 70 mm Durchmesser) wurden auf eine dem doppelten Durchmesser entsprechende Länge von ca. 140 mm abgesägt. Die Endflächen wurden planparallel und glatt geschliffen. Die auf Maß gebrachten Prüfkörper wurden durch Anlegen eines Vacuums unter Wasserbedeckung entlüftet und mit Wasser gesättigt. In diesem Zustand wurden sie in die Triaxialzelle eingebaut und entsprechend dem Versuchsprogramm belastet.

4.3 Prüfmaschinenbeschreibung

Zwischen die Druckplatten einer servogeregelten, prozeßrechnergesteuerten 5 MN-Prüfmaschine der Güteklasse 1 wird eine auf 300⁰ C heizbare, für 70 MPa hydrostatischen Druck ausgelegte Triaxialzelle positioniert. Diese Triaxialzelle besteht aus hochfestem, wärmebeständigem Stahl. Der Prüfkörper wird axial zwischen zwei Kugelkalotten belastet, die minimale Abweichungen von der Planparallelität ausgleichen und für eine endflächennormale Krafteinleitung sorgen. Die Aufheizung des Prüfkörpers erfolgt über das Druckmedium mit drei getrennt geregelten elektrischen Heizbändern, die über die zylindrische Außenfläche der Triaxialzelle gespannt sind. Als Wärme- und Druckübertragungsflüssigkeit dient ein temperaturstabiles Silikonöl. Die Aufheizung erfolgt in der Regel unter hydrostatischem Druck. Die Temperatur des Silikonöls ist auf $\pm 1,5^0$ C regelbar. Der Manteldruck wird über einen elektrischen Druckaufnehmer gemessen und mit einem eigenen Regelsystem auf einem wählbaren Wert (bis 70 MPa) konstant gehalten. Der Kolben der Prüfmaschine wird über einen Rampengenerator mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers weggeregelt gefahren. Die Wegmessung erfolgt am Kolben der Prüfmaschine. Die Axialkraft wird mit einer elektrischen Kraftmeßdose außerhalb der Triaxialzelle gemessen.

Die Versuche werden über einen Tischrechner gesteuert, der auch die Datenerfassung übernimmt. Dabei werden folgende Meßgrößen aufgezeichnet: Zeit (seit Versuchsbeginn), Axialkraft, Seitendruck, Deviatorspannung, Temperatur, Kolbenweg und Axialstauchung.

Im Detail ist die Versuchsanlage von LEMPP und NATAU (1986) beschrieben.

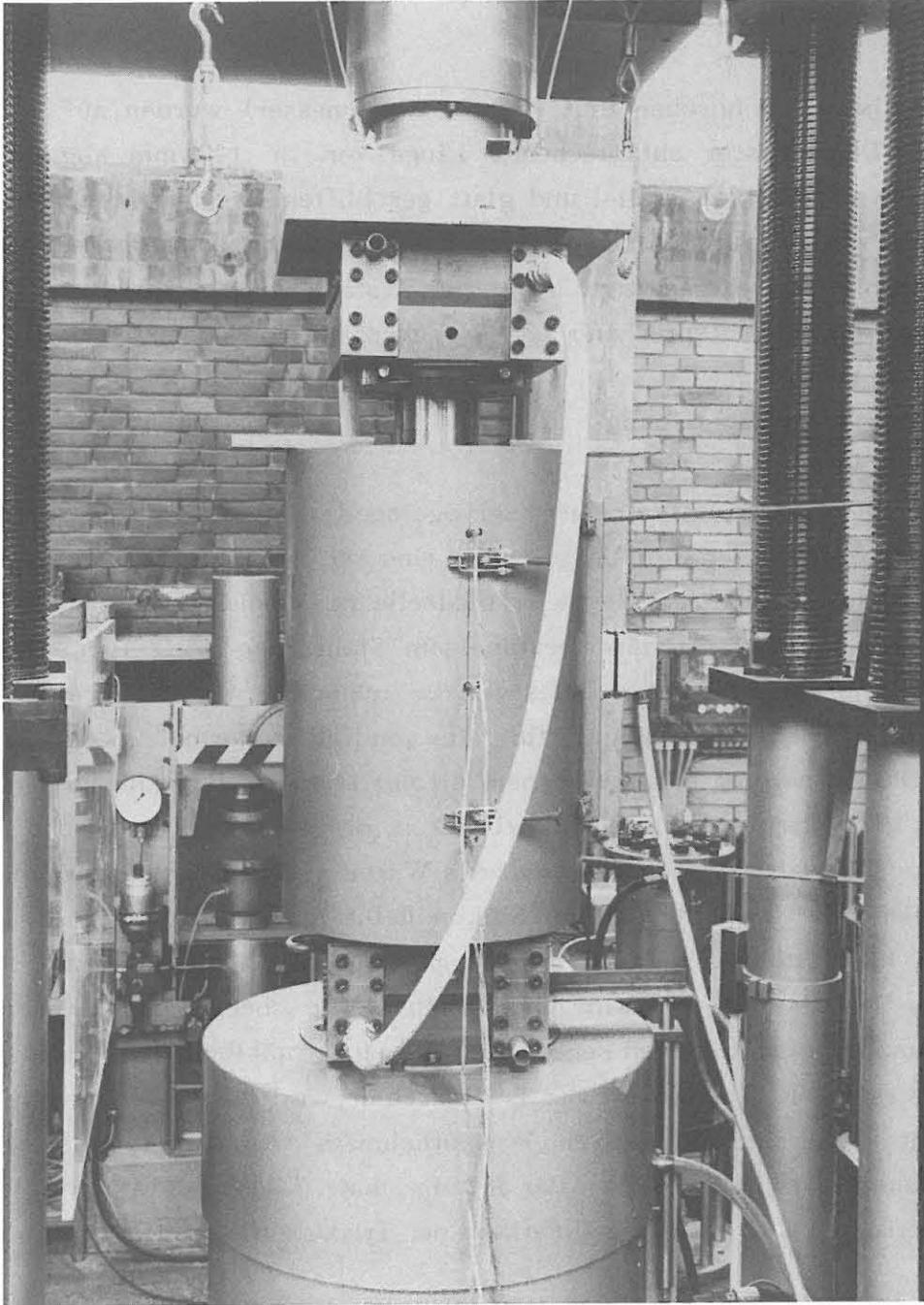


Abb. 1: Triaxialzelle im Isoliermantel zwischen gekühlten Endplatten
in 5MN - Prüfmaschine

4.4 Versuchsablauf

Je nach Art der Versuchsserie wurden die Prüfzylinder mit geschlossenem oder perforiertem Mantel umgeben. Versuche mit dichter Probenhülle sind als klassische triaxiale Kompressionsversuche konzipiert, während Versuche mit durchlässiger Probenhülle als quasi einaxiale Kompressionsversuche mit einem durch den Seitendruck erzeugten Porendruck gefahren werden. Letzterer Versuchstyp dient der Simulation der Verhältnisse unmittelbar an der Bohrlochbohrung mit quasi einaxialem Spannungszustand unter Porendruck durch eindringende Spülungsflüssigkeit, wogegen der erstgenannte Versuchstyp die Verhältnisse im angrenzenden Gebirge repräsentiert, das unter triaxialem Spannungszustand steht und das noch nicht von Spülflüssigkeit durchströmt wird.

Nach Einbau der Probe in die Triaxialzelle und deren Installierung in der 5 MN-Prüfmaschine wurden die Prüfkörper in der Regel unter einen hydrostatischen Druck von 65 MPa gebracht. Unter diesem Druck erfolgte die allmähliche Aufheizung auf 250⁰ C. Der Aufheizvorgang ging mit ca. 1⁰ C Temperaturänderung pro Minute vor sich, damit keine zusätzliche thermisch bedingte Ribbildung infolge der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Minerale das Gefüge zusätzlich schwächt (vgl. RICHTER u. SIMMONS 1974). Nach Erreichen der vorgesehenen Versuchstemperatur wurden die Prüfkörper über weitere 8 bis 12 Stunden unter den gleichbleibenden Druck- und Temperaturverhältnissen belassen, damit sich stationäre Verhältnisse in der Probe einstellen konnten. Danach wurde mit der Aufbringung zyklischer Be- und Entlastungen in axialer Richtung begonnen.

Bei einem Teil der Proben wurde zu Beginn der Wechselbelastungszyklen ein Lastzyklus bis 50 MPa Deviatorspannung oder ein Verformungszyklus bis 4000 $\mu\text{m}/\text{m}$ gefahren, um Anlegesetzungen der Probe vorwegzunehmen und den plastischen Verformungsanteil bei vergleichbarem Belastungs- oder Verformungszustand ermitteln zu können. Anschließend wurde das eigentliche Wechselbelastungsprogramm gestartet, wobei entweder die maximale Deviatorspannung oder die Verformungszunahme pro Lastwechsel innerhalb einer Versuchsserie variiert wurden. Als weitere variierte Größe ist die Be- und Entlastungsgeschwindigkeit zu nennen, die bei den verschiedenen Versuchsserien teilweise unterschiedlich hoch gewählt wurde. Die Einzelheiten sind im Abschnitt 5 (Versuchser-

gebnisse) dargelegt. Eine Übersicht über die Versuche gibt Tabelle 1 und 2 im Anhang.

Die beschränkte Kapazität des Datenerfassungsprogramms führt bei den Wechselbelastungsversuchen dazu, daß die Meßpunktdichte und die Lastwechselanzahl in Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit die mögliche Versuchsdauer bestimmen. Die Lastwechselanzahl kann dabei auf Kosten der Meßpunktdichte in weiten Grenzen variiert werden, vor einem Überlaufen des Meßwertspeichers muß allerdings der Versuch jeweils zur Meßwertabspeicherung einige Minuten unterbrochen werden. Dies bedeutet, daß der regelmäßige Lastwechselrhythmus eines Versuches für kurze Zeit gestört wird; die Probe steht in dieser Zeit nur unter hydrostatischem Druck von 65 MPa. Eine derartige Lastwechselunterbrechung beeinflußt offenbar das Versuchsergebnis entscheidend, wie dies entsprechende Vergleichsversuche ergeben (s. Abschnitt 5). Aus diesem Grunde wurde in der Regel ein Lastwechselversuch nicht unterbrochen, sondern ggf. auch vor Eintritt des Versagens der Probe bei Erreichen der maximalen Meßwertspeicherkapazität beendet. In der Regel wurde eine Probe, die nicht im Verlauf der Wechselbelastungen versagte, dann anschließend in einem weiteren Versuch bis zum Bruch belastet.

4.5 Schema der Versuchsauswertung

Die bei Kompressionsversuchen übliche Darstellung der Ergebnisse als Arbeitslinie im $\sigma_1 - \sigma_3 / \varepsilon$ - Diagramm ist im Falle von Wechselbelastungen nur eingeschränkt aussagekräftig, weil bei größerer Zyklenanzahl der Kurvenverlauf nicht nachvollziehbar ist, allenfalls lassen sich Hystereseflächen erkennen. Von wesentlicher Bedeutung sind bei diesen Wechselbelastungen die zeitlichen Veränderungen der Meßgrößen. Dementsprechend erfolgte eine zeitabhängige Auswertung der Deviatorspannung ($\sigma_1 - \sigma_3$ [MPa]) und der Axialstauchung (ε [$\mu\text{m}/\text{m}$]). $\sigma_1 - \sigma_3$ [MPa] und ε [$\mu\text{m}/\text{m}$] aus allen Wechsellastversuchen wird über die Versuchszeit t [sec] in einem gemeinsamen Diagramm dargestellt. Diese zeitabhängige Darstellung bildet eine wesentliche Grundlage der Versuchsauswertung (vgl. Tabelle 1 und 2 sowie Anlagen im Anhang). In der Regel sind nur die Versuche der sogenannten Referenzprobe aus jeder Versuchsserie als normale Arbeitslinie ($\sigma_1 - \sigma_3 / \varepsilon$ -Diagramm) dargestellt, bei den eigentlichen Wech-

sellastversuchen sind jeweils die Deviatorspannung und die Axialstauchung in ihrer zeitlichen Entwicklung als Graphik dargestellt. Außerdem sind die Ergebnisse von Prüfkörpern, die unter Wechselbelastung nicht versagt haben und anschließend in einem weiteren Triaxialversuch getestet worden sind, wiederum als $\sigma_1 - \sigma_3 / \epsilon$ -Arbeitslinie dargestellt (s. Anhang).

5. Versuchsergebnisse (vgl. Tabellen 1 und 2, Diagramme im Anhang)

5.1 Vergleich zwischen den Versuchsserien No 1 bis No 5 (Übersicht)

Alle Wechselbelastungsversuche wurden an Granitproben bei einer Temperatur von 250⁰ C durchgeführt. Bei den Versuchsserien No 1 bis No 3 wurden die Wechselbelastungen entsprechend einer vorgegebenen maximalen Deviatorspannung gesteuert. In den anschließenden Versuchsserien No 4 und No 5 wurden verformungsgesteuerte Wechselbelastungen gefahren, wobei ein bestimmtes Axialstauchungsinkrement pro Lastzyklus vorgegeben wurde.

Zunächst werden die spannungsgesteuerten Versuchsserien No 1 bis No 3 vergleichend ausgewertet. Diese Versuchsserien unterscheiden sich entweder durch die Spannungsrandbedingungen oder durch die Geschwindigkeit der Wechselbelastungen. Die Versuchsserien No 1 und No 2 wurden als triaxiale Kompressionsversuche mit geschlossener Probenhülle und mit unterschiedlichen Be- und Entlastungsgeschwindigkeiten von 0,1 mm/min und 0,6 mm/min gefahren. Ergebnisvergleiche erlauben einen Rückschluß auf den Einfluß der Wechselbelastungsgeschwindigkeit auf das festigkeitsmechanische Verhalten.

Die Versuchsserien No 1 und No 3 wurden bei gleicher Belastungsgeschwindigkeit von 0,1 mm/min bei unterschiedlichen Spannungsrandbedingungen gefahren. Im Gegensatz zu Versuchsserie No 1 wurde bei Versuchsserie No 3 mit durchlässigen Probenhüllen gearbeitet, die Prüfkörper standen also unter einem Porendruck als Reaktion auf den Flüssigkeitsdruck von 65 MPa, d.h. es bestand kein echt triaxialer Spannungszustand. Ergebnisvergleiche ermöglichen eine Einschätzung des Porendruckeinflusses auf das festigkeitsmechanische Verhalten.

Anschließend werden die verformungsgesteuerten Wechsellastversuche (Versuchsserien No 4 und No 5) ausgewertet. Bei Versuchsserie No 4 wurden die

Prüfkörper mit einem versuchsspezifischen Axialstauchungsinkrement pro Lastwechsel stetig bis zum Bruch belastet. Bei Versuchsserie No 5 wurde die gleichmäßig ansteigende Axialstauchung durch 15 Lastwechsel ohne Steigerung der Axialstauchung (bei 4700 $\mu\text{m}/\text{m}$) unterbrochen. Durch Vergleich mit den ersten Versuchsserien wird schließlich eine modellhafte Vorstellung über die Vorgänge gewonnen, die bei Wechselbelastungen in polykristallinem Gestein von Bedeutung sind.

5.2 Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit

Bei einem Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchsserien No 1 und No 2 kann folgende tabellarische Gegenüberstellung den Einfluß der Be- und Entlastungsgeschwindigkeit belegen:

Tabelle 3

Vergleichsgröße	Be- und Entlastungsgeschwindigkeit		
	0,03 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$	0,1 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$	0,6 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$
Max. Deviatorspannung $\sigma_{\text{max.}}$	-	94,4 MPa	77,0 MPa
Max. plast. Verf. bei $\sigma_{\text{zykl.}} = 66 \text{ MPa}$	1700 $\mu\text{m}/\text{m}$	-	3200 $\mu\text{m}/\text{m}$
Max. plast. Verf. bei $\sigma_{\text{zykl.}} = 71 \text{ MPa}$	-	1600 $\mu\text{m}/\text{m}$	2250 $\mu\text{m}/\text{m}$
Max. elast. Verf. bei $\sigma_{\text{zykl.}} = 66 \text{ MPa}$	4500 $\mu\text{m}/\text{m}$	-	5800 $\mu\text{m}/\text{m}$
Max. elast. Verf. bei $\sigma_{\text{zykl.}} = 71 \text{ MPa}$	-	5050 $\mu\text{m}/\text{m}$	6050 $\mu\text{m}/\text{m}$
Max. plast. Verf. bei $\sigma_{\text{zykl.}} \approx 0,74 \sigma_{\text{max.}}$	-	1600 $\mu\text{m}/\text{m}$	2400 $\mu\text{m}/\text{m}$
Max. plast. Verf. bei $\sigma_{\text{zykl.}} \approx 0,85 \sigma_{\text{max.}}$	-	1500 $\mu\text{m}/\text{m}$	3200 $\mu\text{m}/\text{m}$
Max. elast. Verf. bei $\sigma_{\text{zykl.}} \approx 0,74 \sigma_{\text{max.}}$	-	5050 $\mu\text{m}/\text{m}$	4500 $\mu\text{m}/\text{m}$
Max. elast. Verf. bei $\sigma_{\text{zykl.}} \approx 0,85 \sigma_{\text{max.}}$	-	5600 $\mu\text{m}/\text{m}$	5800 $\mu\text{m}/\text{m}$

Mit Erhöhung der Be- und Entlastungsgeschwindigkeit verringert sich die Festigkeit und die axiale Verformung nimmt in der Regel zu.

Das Bruchversagen unter Wechselbelastung hängt einerseits vom Spannungsniveau (bezogen auf die maximal aufnehmbare Deviatorspannung $\sigma_{\max.}$) und andererseits wiederum von der Be- und Entlastungsgeschwindigkeit ab.

Bei Geschwindigkeiten von 0,1 mm/min versagten die Proben auf einem Spannungsniveau von $0,86 \sigma_{\max.}$ bis $0,91 \sigma_{\max.}$ bereits nach 7 bis 9 Lastzyklen, wogegen bei höherer Geschwindigkeit von 0,6 mm/min auf einem Spannungsniveau von $0,55 \sigma_{\max.}$ bis $0,86 \sigma_{\max.}$ selbst 320 bis 370 Lastwechsel nicht zum Bruch führten. Erst auf einem Spannungsniveau von $0,92 \sigma_{\max.}$ erfolgte nach 275 Lastwechseln Versagen durch Bruch.

Aus dieser Gegenüberstellung kann ein erheblicher Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf das Verformungs- und Bruchverhalten abgeleitet werden. Trotz meßbar geringerer Verformungen tritt bei relativ geringerer Wechselbelastungsgeschwindigkeit eher Bruchversagen ein als bei relativ höherer Geschwindigkeit und größeren Verformungen.

Zu diesem Befund gilt es eine Modellvorstellung zu entwickeln, welche die zeitabhängigen Prozesse des Rißwachstums beim Versagensvorgang berücksichtigt. Dieser Befund deckt sich generell mit den experimentellen Ergebnissen von CHO und HAIMSON (1987) zum Einfluß der Wechselbelastungsfrequenz auf das Ermüdungsversagen.

5.3 Einfluß des Spannungszustandes

Die mit gleicher Wechselbelastungsgeschwindigkeit von 0,1 mm/min gefahrenen Versuchsserien No 1 und No 3 unterscheiden sich durch eine geschlossene bzw. durchlässige Probenummantelung. In Versuchsserie No 3 wirkte ein Porendruck, der von der Durchlässigkeit der Probe abhängt; es wurden dieselben 65 MPa Flüssigkeitsdruck aufgebracht, die in Versuchsserie No 1 als Manteldruck auf die geschlossene Probenhülle einwirkten.

Unter Porendruckeinfluß wird die maximale Spannung (Bruchspannung) deutlich reduziert (vgl. Tabelle 4). In einem Versuch trat der Bruch bereits bei 40,3 MPa ein. Es ist anzunehmen, daß entsprechend dem individuellen Rißmuster bzw.

den Fließbahnen in jeder Probe starke Streuungen der Festigkeit bei wirksamen Porendruck auftreten. Die Verformungen unterscheiden sich ebenfalls (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4

Vergleichsgröße	Vers.-Serie No 1 ohne Porendruck	Vers.-Serie No 3 mit Porendruck
$\sigma_{\max.}$ (Referenzprobe)	94,4 MPa	64,7 MPa
$\sigma_{\max.}$ (Mittelwert)	91,5±2,9 MPa	67,6±16,7 MPa
max. plast. Verf. bei $\sigma_{\text{zykl.}} = 0,83 \rightarrow 0,85 \sigma_{\max.}$	1500 $\mu\text{m/m}$	2400 $\mu\text{m/m}$
max. elast. Verf. bei $\sigma_{\text{zykl.}} = 0,83 \rightarrow 0,85 \sigma_{\max.}$	5600 $\mu\text{m/m}$	5000 $\mu\text{m/m}$
max. plast. Verf. bei $\sigma_{\text{zykl.}} = 0,91 \rightarrow 0,94 \sigma_{\max.}$	1450 $\mu\text{m/m}$	1800 $\mu\text{m/m}$
max. elast. Verf. bei $\sigma_{\text{zykl.}} = 0,91 \rightarrow 0,94 \sigma_{\max.}$	5800 $\mu\text{m/m}$	5000 $\mu\text{m/m}$

Vor allem die plastischen Verformungen sind auf demselben Spannungsniveau (bezogen auf die Deviatorspannung $\sigma_{\max.}$) jeweils mit Porendruck deutlich größer als ohne Porendruck bei geschlossenem Probenmantel; umgekehrt sind die elastischen Verformungen bei Porendruck geringer als ohne Porendruck.

Vergleicht man die Verformungen ergänzend bei derselben Wechselbelastung von $\sigma_{\text{zykl.}} = 65$ MPa unter verschiedenen Porendrücken (vgl. Tabelle 5), so ergibt sich eine deutliche Abhängigkeit von der Höhe des Porendruckes.

Tabelle 5

Vergleichsgröße	Porendruck $\hat{=} 65$ MPa	Porendruck $\hat{=} 28,3$ MPa
max. plast. Verf. bei $\sigma_{\text{zykl.}} = 65$ MPa	3100 $\mu\text{m/m}$	1800 $\mu\text{m/m}$
max. elast. Verf. bei $\sigma_{\text{zykl.}} = 65$ MPa	6800 $\mu\text{m/m}$	5400 $\mu\text{m/m}$

Die Verformungen steigen bei gleicher Höhe der Wechselbelastung mit dem Porendruck an.

Bei den Wechsellastversuchen mit Porendruck trat auffallend häufig eine Prüfkörperverfestigung auf, zum Versagen unter Wechselbelastung kam es nur einmal (vgl. Tabelle 1). In den übrigen Fällen reduzierte sich die axiale Verformung bei gleicher maximaler Deviatorspannung während 20 bis 40 Wechselbelastungen. Dem Porendruck kommt demnach bei den spannungsgesteuerten Wechselbelastungsversuchen ein erheblicher Einfluß auf die Größe der Verformungen zu, außerdem werden (bei zunehmender Streuung) die Bruchspannungswerte deutlich verringert als Folge des Porendruckes.

5.4 Zeitlicher Verlauf der Axialstauchung unter Wechselbelastung auf bestimmten Spannungsniveaus (vgl. Tabelle 1)

Läßt man die Effekte der Be- und Entlastungsgeschwindigkeit sowie des Porendruckes außer Betracht, so stellt sich bei den spannungsgesteuerten Wechselbelastungsversuchen der Versuchsserien No 1 bis No 3 die Frage, ob das Verformungsverhalten (Axialstauchung) während der Wechselbelastungen irgendwelche Rückschlüsse auf Veränderungen im Korngerüst, auf Vorgänge der Ver- oder Entfestigung zuläßt.

Der zeitliche Verlauf der mit induktivem Weggeber gemessenen Axialstauchungen bei zyklischen Wechselbelastungen erlaubt folgende Differenzierung (bei jeweils gleichbleibenden Maximalwerten der Deviatorspannung):

- Die Axialstauchung bleibt unverändert.
- Die Axialstauchung verringert sich.
- Die Axialstauchung nimmt zu.
- Die Axialstauchung verändert sich wellenförmig oder in Sprüngen zu- und abnehmend.

Das Ausmaß der wechsellastbedingten Verformungsänderungen läßt sich im einzelnen aus Tabelle 1 ablesen bzw. den graphischen Darstellungen entnehmen (Anhang).

Das Bruchversagen während der Lastwechselfolge ist nicht nur von der Be- und Entlastungsgeschwindigkeit abhängig (vgl. Abschnitt 5.2), auch mit der Verfor-

mungscharakteristik besteht offenbar folgender Zusammenhang: Während der zyklischen Belastungen trat dann *kein Bruch* ein, wenn eine mit der Zeit deutlich abfallende Axialstauchungscharakteristik gemessen worden ist, also bei Materialverfestigung. Teilweise konnte bei diesen Proben eine Porositätsabnahme nachgewiesen werden. Ebenfalls kein Bruch trat bei einer wellenförmigen oder sprunghaft zu- und abnehmenden Axialstauchungscharakteristik auf. Diese Charakteristik wurde vor allem in Versuchsserie No 2 bei relativ hohen Geschwindigkeiten von 0,6 mm/min beobachtet.

Bruchversagen trat während der zyklischen Wechselbelastungen nur bei den Proben auf, die eine annähernd gleichbleibende, allenfalls mit der Zeit gering abfallende oder eindeutig ansteigende Axialstauchungscharakteristik aufwiesen.

Bei gleichbleibender oder geringfügig mit der Zeit abfallender Axialstauchung trat der Bruch meist während der *Entlastungsphase* in einem Lastwechselzyklus ein, während bei zeitlich ansteigender Axialstauchung der Bruch in der *Belastungsphase* eintrat (Auflockerung und Entfestigung).

Bei der Beschreibung der zeitlichen Veränderung der Axialverformung ist es teilweise notwendig, zwischen plastischen und elastischen Verformungsanteilen zu unterscheiden. Beispielsweise vergrößerte sich bei einigen Proben nur der plastische Verformungsanteil bis es nach einer bestimmten Anzahl von Lastwechseln zum Bruch kam (z.B. Probe L5 T25 P65).

Bei den Proben, die während der Wechselbelastungen versagten, sind selbstverständlich Gefügeveränderungen anzunehmen. Allerdings gibt es auch bei den Proben, die nicht unter Wechselbelastungen versagten, deutliche Hinweise auf qualitative Gefügeveränderungen. Die Proben Nr. J2 T25 P65, L2 T25 P65 und L3 T25 P65 wurden jeweils in mehreren Fortsetzungsversuchen wechselbelastet, ohne daß Versagen eintrat. In den verschiedenen Versuchsabschnitten (Fortsetzungen) variierte das zeitabhängige Axialstauchungsverhalten bei jeweils derselben Probe in einigen Fällen erheblich. Es traten also verschiedene Axialstauchungscharakteristiken bei derselben Probe in den verschiedenen Fortsetzungsphasen des Versuches auf. Es gibt dabei einen Trend, der sich mit jeder Versuchsfortführung weiter fortsetzt: Die Verformungsamplitude zwischen

Entlastung und Belastung wird mit jeder Versuchsfortsetzung kleiner. Dies kommt auch in einer abnehmenden Zeitdauer pro Lastzyklus zum Ausdruck, die sich bei konstanter Kolbengeschwindigkeit ergibt (vgl. Tabelle 1).

Zunächst kann dieses Ergebnis als Verfestigungsvorgang (Erhöhung des Quotienten σ/ε) interpretiert werden, der sich infolge der Wechselbelastungen besonders in den Proben vollzogen hat, die nicht während der Wechselbelastungen versagten. In den spannungsgesteuerten Wechselbelastungsversuchen trat in den meisten Fällen kein Bruchversagen ein, weil die Wechselbelastungen eine Verschiebung der Grenzbedingung zur Folge haben, die formal als Verfestigung angesprochen werden kann (s. Abschnitt 6).

5.5 Zeitlicher Verlauf der Spannungen unter Wechselbelastung mit verschiedenen Verformungsinkrementen (vgl. Tabelle 2)

Die experimentelle Erfahrung, daß Ermüdungsversagen des polykristallinen Granites bei spannungsgesteuerten Wechselbelastungen in vielen Fällen nicht auftrat, sondern daß durch nicht im einzelnen bekannte Spannungsumlagerungen bzw. durch mikrostrukturelle Veränderungen häufig eine Verschiebung der Grenzbedingung herbeigeführt wird, so daß die Probe nicht bricht sondern verfestigt wird, hat Veranlassung gegeben, die Wechselbelastungen am oberen Belastungsumkehrpunkt nicht spannungsgesteuert, sondern verformungsgesteuert zu fahren. Durch ein solches Vorgehen wird die häufig gemessene Abnahme der Axialstauchung bei gleicher Axialspannung verhindert und es müssen sich dabei entsprechende Veränderungen der Deviatorspannung im Laufe der Wechselbelastungen ergeben.

In Versuchsserie No 4 wurden die Wechselbelastungen jeweils bis zu einer vorgegebenen Axialstauchung gefahren; die dabei auftretende Spannungsdifferenz $\sigma_1 - \sigma_3$ [MPa] wurde gemessen. Die Versuche wurden unter 65 MPa Flüssigkeitsdruck mit durchlässigen Probenhüllen (Porendruckbedingungen) gefahren; die Kolbengeschwindigkeit der Prüfmaschine betrug 0,1 mm/min, die Temperatur 250° C.

Bei der Referenzprobe dieser Versuchsserie No 4 trat der Bruch bei einer Axialstauchung von 6660 $\mu\text{m}/\text{m}$ ein. Die Proben der folgenden Wechselbelastungsversuche wurden zunächst bis 4000 $\mu\text{m}/\text{m}$ Axialstauchung gefahren. Nach der Entlastung wurde dann bei den weiteren Lastzyklen die Axialstauchung inkrementell bis zum Bruch gesteigert. Die Größe des Verformungsinkrements wurde für jeden Versuch festgelegt, sie betrug 100 $\mu\text{m}/\text{m}$, 75 $\mu\text{m}/\text{m}$, 50 $\mu\text{m}/\text{m}$, 33 $\mu\text{m}/\text{m}$ und 25 $\mu\text{m}/\text{m}$ für jeden Lastwechsel (s. Tabelle 2).

Die Größe des Verformungsinkrements beeinflusst anscheinend die Zahl der möglichen Lastwechsel, die bis zum Erreichen des Bruches gefahren werden können. Bei einer Steigerung der Verformung um 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ pro Lastwechsel waren nur 20 Lastwechsel bis zum Bruch möglich, während bei einer Steigerung der Verformung um 25 $\mu\text{m}/\text{m}$ erst 60 Lastwechsel zum Bruch führten. Die übrigen Versuche lagen dazwischen (vgl. Tabelle 2). Die maximal erreichbare Axialstauchung bis zum Eintritt des Bruches lag bei den Wechselbelastungen zwischen 5000 $\mu\text{m}/\text{m}$ und 6000 $\mu\text{m}/\text{m}$, d.h. deutlich unter dem Bruchstauchungswert von 6660 $\mu\text{m}/\text{m}$ bei der Referenzprobe.

Die maximale Deviatorspannung, die sich bei der inkrementell gesteigerten Verformung ergab, betrug zwischen 45,5 MPa und 72,5 MPa, d.h. die maximale Spannung war ebenfalls gegenüber der Referenzprobe ($\sigma_{\text{max.}} = 77,1 \text{ MPa}$) vermindert. Ermüdungs- und Entfestigungserscheinungen durch Wechselbelastungen sind somit nachgewiesen (vgl. Abschnitt 6).

Bei den ersten Wechselbelastungen stieg die Spannung noch etwa proportional mit der zunehmenden Verformung an. Es besteht also ein Bereich, in dem sich Spannung und Verformung gleichsinnig verändern. Nach 8 Lastzyklen (bei relativ großem Verformungsinkrement) bis 23 Lastzyklen (bei kleinem Verformungsinkrement) endete dieser Bereich, die Deviatorspannung veränderte sich dann über mehrere Lastwechsel nicht mehr, oder sie fiel sogar trotz steigender Verformung ab. Häufig trat dann ein Spannungsminimum auf (nach 16 bis 30 Lastwechseln) und bei weiteren Lastwechseln kam es wieder zu einem vorübergehenden Spannungsanstieg. Im Verlauf der verformungsgeregelten Lastwechsel kam es also nach einer anfänglichen Zunahme des Verhältnisses σ/ε zu einer unregelmäßigen Abnahme, sobald sich die Spannung nicht mehr gleichsinnig mit

der Verformung veränderte; der Quotient σ/ϵ wurde auf 40% bis 80% des Höchstwertes reduziert, bis schließlich der Bruch während der Wechselbelastungen eintrat. Die maximale Deviatorspannung veränderte sich unregelmäßig wellenförmig schwankend bei gleichmäßig zunehmender Verformung. Dies läßt wiederum auf komplexe, zeitabhängige Vorgänge der Spannungsumlagerung und der Mineralkorngerüstverformung schließen.

Bei den wechselbelasteten Proben der Versuchsserie No 4 setzte der Spannungsabfall bzw. das Ende des Spannungsanstieges bei weiter inkrementell gesteigerter Axialstauchung bei Werten zwischen $\epsilon = 4370 \mu\text{m}/\text{m}$ und $\epsilon = 4700 \mu\text{m}/\text{m}$ ein, d.h. nach ca. 2/3 der Bruchverformung bei einmaliger Belastung. Trendmäßig deutet sich an, daß mit Vergrößerung des Verformungsinkrementes eine Verschiebung des Spannungseinbruchpunktes hin zu höheren Verformungen erfolgt. Je geringer die pro Lastwechsel zusätzlich aufgebrachte Verformung war, desto niedriger war die Axialstauchung, bei der die Spannung nicht mehr anstieg, sondern gleichblieb, abnahm oder sprunghaft schwankte.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen der Versuchsserie No 4 wurden in der letzten Versuchsserie No 5 die Steuerungsbedingungen wie folgt festgelegt: Da spätestens nach einer Axialstauchung von $\epsilon = 4700 \mu\text{m}/\text{m}$ die Spannung im Wechselbelastungsversuch trotz fortgesetzter Steigerung der Verformung nicht weiter angestiegen war, wurden nun die Proben zunächst mit unterschiedlichem Verformungsinkrement pro Lastzyklus ($50 \mu\text{m}/\text{m}$, $33 \mu\text{m}/\text{m}$, $25 \mu\text{m}/\text{m}$, $20 \mu\text{m}/\text{m}$) von $4000 \mu\text{m}/\text{m}$ bis $4700 \mu\text{m}/\text{m}$ axial zusammengedrückt, anschließend wurde dieser Verformungszustand über 15 Lastwechsel beibehalten, die Spannung bzw. Spannungsänderungen wurden dabei gemessen. Anschließend wurde die Verformung weiter inkrementell mit jedem Lastzyklus bis zum Bruch gesteigert.

Bei gleichbleibender Axialstauchung von $\epsilon = 4700 \mu\text{m}/\text{m}$ schwankte die maximale Deviatorspannung der belasteten Proben zwischen 98 MPa und 112,5 MPa, danach waren weitere 8 bis 16 Lastwechsel mit weitergehender inkrementeller Verformungszunahme erforderlich, um die Proben in den Bruchzustand zu überführen. Die Bruchstauchung lag zwischen $\epsilon = 4900 \mu\text{m}/\text{m}$ und $\epsilon = 5300 \mu\text{m}/\text{m}$ und damit deutlich unter dem Wert der Referenzprobe von $\epsilon = 7460 \mu\text{m}/\text{m}$ (vgl. Tabelle 2). Es wird deutlich, daß die größte Deviatorspannung

nicht bei Bruch auftritt, sondern vorher bei ca. 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ bis 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ geringerer Axialstauchung im Laufe der Wechselbelastungen. Die Bruchspannung lag zwischen $\sigma_{\text{max.}} = 108 \text{ MPa}$ und $\sigma_{\text{max.}} = 114 \text{ MPa}$ und zwar jeweils unterhalb der im Laufe der Wechselbelastung aufgetretenen maximalen Deviatorspannung (vgl. Abschnitt 6 und Tabelle 2).

Mit Abnahme der Größe des Verformungsinkrementes von 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ auf 20 $\mu\text{m}/\text{m}$, welches mit jedem Lastwechsel zusätzlich aufgebracht wurde, vergrößerte sich wiederum die Anzahl der Lastwechsel bis zum Bruch von 41 Zyklen auf 67 Zyklen (vgl. Tabelle 2). Wegen der offenbar überdurchschnittlich hohen Festigkeit bzw. unterdurchschnittlichen Porosität der Prüfkörper dieser Versuchsserie No 5 ist ein direkter Vergleich mit den Ergebnissen der Versuchsserie No 4 nicht möglich, die Versuchsserien müssen getrennt betrachtet werden. Wiederum ist jedoch auch bei Versuchsserie No 5 eine deutliche Ermüdung des Materials infolge der Wechselbelastungen festzustellen: Die maximale Deviatorspannung lag zwischen 109 MPa und 114 MPa, während bei der Referenzprobe ohne Lastwechsel 130 MPa erreicht wurden.

Auch die erreichbare Axialstauchung lag mit $\varepsilon = 4900 \mu\text{m}/\text{m}$ bis $\varepsilon = 5300 \mu\text{m}/\text{m}$ deutlich niedriger als bei der Referenzprobe mit einer Bruchstauchung von $\varepsilon = 7460 \mu\text{m}/\text{m}$. Während jeweils 15 Lastwechseln bei einer gleichbleibenden maximalen Axialstauchung von $\varepsilon = 4700 \mu\text{m}/\text{m}$, die bei Versuchsserie No 5 die kontinuierliche Folge zunehmender Verformung unterbrochen hat, ergeben sich deutliche Schwankungen der maximalen Deviatorspannung trotz gleicher Axialstauchung. Die maximale Deviatorspannung bei $\varepsilon = 4700 \mu\text{m}/\text{m}$ lag zwischen 98 MPa und 112,5 MPa (vgl. Tabelle 2).

6. Diskussion zum Materialverhalten unter Wechselbelastung

Zwei wichtige Faktoren, die das Materialverhalten des ausgewählten Granitgesteins bei 250⁰ C Temperatur unter Wechselbelastung wesentlich beeinflussen, konnten nur ansatzweise im Laborexperiment verfolgt werden. So wirken sich die Belastungsgeschwindigkeit und die Spannungsrandbedingungen (triaxiale Kompression mit oder ohne Porenflüssigkeitsdruck) sehr deutlich auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten bei Wechselbelastung aus. Die im Ab-

schnitt 5.2 dargelegten Effekte der Belastungsgeschwindigkeit stimmen prinzipiell mit den Erfahrungen von CHO und HAIMSON (1987) überein, wonach eine relativ höhere Be- und Entlastungsgeschwindigkeit eine relativ größere Anzahl von Lastwechseln bis zum Bruch erlaubt. Ein Zusammenhang mit den zeitabhängigen Prozessen der Mikrorißbildung und daraus abzuleitenden Entfestigungsvorgängen ist zwar anschaulich zu verstehen, er ist jedoch quantitativ noch nachzuweisen.

Auch die im Abschnitt 5.3 dargelegten Effekte infolge des äußeren Spannungszustandes, vor allem die Folgen eines wirksamen Porenflüssigkeitsdruckes sind physikalisch verständlich. Sowohl eine stärkere Streuung der Festigkeit als auch ihre generelle Reduzierung unter Porenflüssigkeitsdruck sind Folge der jeweils prüfkörperspezifischen Mikrorißgeometrie und Durchlässigkeit. Die festgestellten Unterschiede im Verformungsverhalten bei unterschiedlichen Porendrücken erscheinen ebenfalls plausibel. Diese Einflüsse wurden bisher nicht weitergehend experimentell untersucht.

Bei den unter vergleichbarem Spannungszustand und mit gleicher Be- und Entlastungsgeschwindigkeit gefahrenen Wechselbelastungsversuchen muß allerdings eingeschränkt werden, daß Streuungen der Festigkeit und der Porosität des Prüfkörpermaterials vorhanden sind, die mit den eingesetzten feldgeologischen Entnahmemethoden nicht abgegrenzt werden konnten. Diese natürlichen Streuungen der Materialeigenschaften führen dazu, daß möglichst nur die Prüfkörper innerhalb einer Versuchsserie verglichen werden sollten, weil sie aus einem größeren Kluftkörper gewonnen werden konnten. Dennoch sind auch zwischen diesen Prüfkörpern Unterschiede - z.B. im Mikrorißsystem - nicht auszuschließen, die sich auf den Porenwasserdruckaufbau auswirken können. Trotz dieser hier vorausgeschickten Einschränkungen ermöglichen die Versuche eine Einschätzung zu den Auswirkungen von Wechselbelastungen auf das Festigkeitsverhalten der Granite.

Bei Wechselbelastungen mit einer vorgegebenen maximalen Deviatorspannung kam es in den meisten Versuchen nicht zum Bruch, vielmehr reduzierte sich mit der Zahl der Wechselbelastungen die Axialstauchung, es kam zu einer Verfestigung der Probe. Nur in einigen Fällen trat Bruchversagen bei den Wechselbelas-

stungen ein, meist erfolgte der Bruch dann in der Entlastungsphase. Es muß demnach angenommen werden, daß nicht nur während der Belastung sondern vor allem auch während der Entlastung bleibende Verformungen oder dissipative Prozesse im Korngefüge auftreten. Eine mikromechanische Erklärung für ein derartiges Bruchverhalten geben ZOBACK und BYERLEE (1975) in dem sogenannten "backsliding-Mechanismus".

Auch die charakteristische, mit den Wechselbelastungszyklen abnehmende Axialstauchung, läßt sich auf entsprechendem mikromechanischen Wege erklären; sie läßt sich auf elastisch-plastische Effekte im Mineralkorngerüst zurückführen, die in ihrer idealen Ausbildungsform bei Stahl als "Bauschinger-Effekt" bekannt sind. Es sind dies Effekte der kinematischen Verfestigung oder Entfestigung, wie sie auch an Stabwerksmodellen zur Simulation des Verhaltens vielkristalliner Werkstoffe von LIPPMANN und WINTER (1987) nachgewiesen werden konnten. Dem Bauschinger-Effekt praktisch gleichzusetzen ist folgendes von HILL (1967) in einer Abhandlung über notwendige Strukturen von Stoffgesetzen für polykristalline Stoffe beschriebene Phänomen: "Indeed, it is quite possible for the superficial plastic work-rate to be negative, even though the actual internal dissipation is positive. This fact is often overlooked in "thermodynamic" arguments, yet it can be observed in the most elementary mechanical tests. In pure tension, for instance, a superficially compressive plastic strain may appear during partial unloading; in other words the yield stress in reverse straining may itself be tensile."

Ein derartiges, mechanisch komplexes Zusammenwirken zwischen interner Mikromechanik der Mineralkomponenten und äußerem Spannungszustand der polykristallinen Gesteine liegt den gezeigten Ergebnissen zu Grunde: In Wechselbelastungsversuchen mit vorgegebener maximaler Deviatorspannung (Versuchsserien No 1 bis No 3) tritt eine Verschiebung der Grenzbedingung ein (Bauschinger-Effekt), in vielen Fällen ergibt sich eine Festigkeitszunahme und eine nominelle Erhöhung der Probensteifigkeit durch Abnahme der maximalen Axialstauchung bei gleicher maximaler Deviatorspannung (kinematische Verfestigung).

Um diesen Effekt der Verschiebung der Grenzbedingung zu umgehen, wurde in den Wechsellastversuchen der Versuchsserien No 4 und No 5 von einer Vorgabe der Maximalspannung abgesehen und stattdessen ein Verformungsinkrement für jeden weiteren Lastwechsel vorgegeben.

Bei den verformungsgesteuerten Wechsellastversuchen dieser beiden Serien konnte in keinem Fall eine kinematische Verfestigung eintreten, die Prüfkörper erreichten vielmehr infolge Ermüdung frühzeitig den Bruchzustand. Bei Versuchsserie No 4 (mit kontinuierlicher Steigerung der Axialstauchung) trat bei $81 \pm 6\%$ der an der Referenzprobe gemessenen Bruchstauchung ein Ermüdungsversagen ein, bei Versuchsserie No 5 (die kontinuierliche Steigerung der Axialstauchung wurde unterbrochen durch 15 Lastwechsel mit konstanter maximaler Axialstauchung von $\varepsilon = 4700 \mu\text{m/m}$) trat das Ermüdungsversagen bereits bei $69 \pm 2\%$ der an der Referenzprobe gemessenen Bruchstauchung ein (vgl. Tabelle 2).

Neben dieser gegenüber den Referenzproben reduzierten Bruchstauchung infolge von Wechselbelastungen läßt auch die - daran gemessen - geringe Anzahl der Lastwechsel bis zum Bruch das Ermüdungsphänomen deutlich werden: Gegenüber der theoretisch zu erwartenden Lastwechselzahl (Sollwert), die sich aus der Bruchstauchung der Referenzprobe und aus der Größe des versuchsspezifischen Verformungsinkrementes ergibt (bei Wechselbelastungen mit anwachsender Axialstauchung zwischen $4000 \mu\text{m/m}$ und der Bruchstauchung), werden tatsächlich nur etwa die Hälfte der Lastwechsel bis zum Bruch notwendig (Istwert). Bei Versuchsserie No 4 (gleichmäßige Steigerung der Axialstauchung) erreicht man nur $54 \pm 14\%$ der theoretischen Lastwechselanzahl, bei Versuchsserie No 5 (Einschaltung von 15 Lastwechseln ohne Steigerung der Axialstauchung) werden sogar nur $46 \pm 10\%$ der theoretischen Lastwechselanzahl bis zum Bruch benötigt.

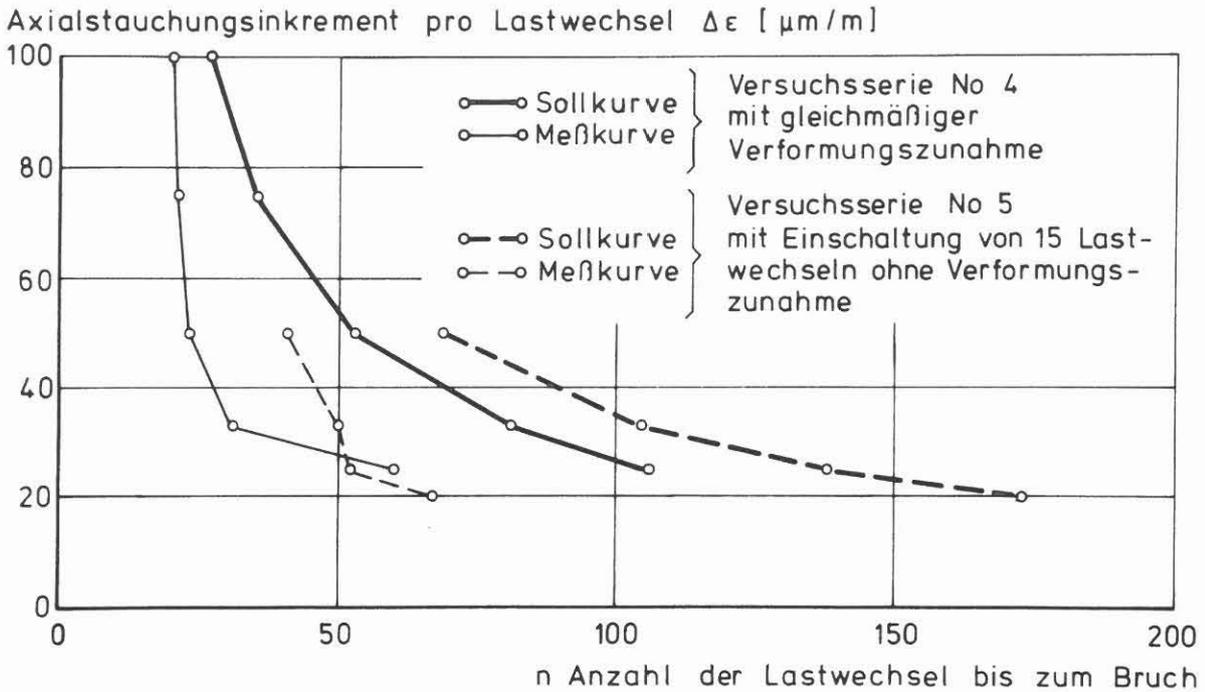


Abb. 2: Ermüdungsverhalten bei verformungsgesteuerten Wechselbelastungen

Vergleicht man nun die bis zum Bruch benötigte Anzahl von Lastwechseln mit der Größe des Verformungsinkrementes, das bei jedem einzelnen Versuch zugrundegelegt worden ist, so ergibt sich beim Vergleich der Soll- und Istwerte ein weiterer Hinweis auf das Ermüdungsphänomen: Entsprechend der Abnahme der Größe des Verformungsinkrementes sollte die Anzahl der Lastwechsel bis zum Erreichen der Bruchstauchung theoretisch in bestimmtem Maße zunehmen. Abbildung 2 zeigt zum einen, daß die tatsächlich zum Erreichen des Bruches notwendige Anzahl von Lastwechseln immer geringer ist als theoretisch zu

erwarten (Mittelwerte s.o.); Abbildung 2 zeigt aber auch, daß bei den verformungsgesteuerten Versuchen der Serien No 4 und No 5 die gemessenen Kurven steiler verlaufen als die theoretisch berechneten. Mit Abnahme der Größe des Verformungsinkrementes wurden also zunehmend weniger Lastzyklen notwendig, um den Bruch zu erreichen, als dies theoretisch zu erwarten ist. Abweichend davon ergibt sich dann allerdings ein Sprung im Kurvenverlauf und eine entsprechende Abweichung von der theoretischen Kurve bei Verformungsinkrementen von nur $20 \mu\text{m}/\text{m}$ bis $25 \mu\text{m}/\text{m}$. Bei diesen geringen Verformungen, die der Probe bei jedem Lastwechsel zusätzlich aufgeprägt werden, steigt die für ein Bruchversagen notwendige Anzahl von Lastwechseln stärker an, als dies bei größeren Verformungsinkrementen oder auch theoretisch der Fall ist. Diese Unstetigkeit im Kurvenverlauf muß nicht unbedingt ausschließlich im tatsächlichen Materialverhalten begründet sein, sondern die Ursache dafür könnte auch darin zu suchen sein, daß hier die Grenzen der Meßgenauigkeit des Systems erreicht werden. Bei den verwendeten Prüfkörpern entsprechen Verformungen von $20 \mu\text{m}/\text{m}$ bis $25 \mu\text{m}/\text{m}$ einem Meßweg von $< 0,005 \text{ mm}$; in diesem Bereich liegt allerdings auch die Auflösung der verwendeten induktiven Wegaufnehmer. Zusätzlich können dann auch kurzfristige Temperaturschwankungen das Ergebnis wesentlich beeinflussen (in der Versuchshalle wurden während der Versuche kurzfristige Temperaturschwankungen von bis zu $\text{ca. } \pm 1,5^{\circ} \text{ C}$ gemessen; langfristig über die Versuchsdauer ansteigende oder abfallende Temperaturen konnten nicht festgestellt werden). Trotz dieser Einschränkung bei den Versuchen mit relativ kleinen Verformungsinkrementen ergibt sich aus dem Verlauf der Meßkurven in Abb. 2 eindeutig eine Abweichung von der theoretischen Kurvensteigung, die als Maß für den Ermüdungseffekt des polykristallinen Gefüges herangezogen werden kann.

Während bei den spannungsgesteuerten Wechsellastversuchen die Verschiebung der Grenzbedingung als Folge von Wechselwirkungen im Mineralkorngefüge die Bruchbildung meistens verhindert hat, die kinematische Verfestigung also deutliche Wirkung gezeigt hat, so ist dieser Effekt bei den Versuchen mit inkrementeller Verformung nicht unmittelbar zu erkennen. Eine Entsprechung für die Verschiebung der Grenzbedingung, für einen Prozess also, der mit der klassischen Plastizitätstheorie nicht erfaßt wird, kann allerdings darin gesehen werden, daß bei den verformungsgesteuerten Wechselbelastungsversuchen die

Deviatorspannung am Bruch immer geringer ist als die maximale Deviatorspannung, die während der vorausgegangenen Lastwechsel aufgetreten ist (vgl. Tabelle 2).

Eine zusätzliche Axialstauchung von $315 \pm 75 \mu\text{m/m}$ (Versuchsserie No 4) bzw. $200 \pm 100 \mu\text{m/m}$ (Versuchsserie No 5) wurde bei weiteren Wechselbelastungen noch nach dem Erreichen der maximalen Deviatorspannung aufgebracht, bevor schließlich das Bruchversagen eintrat. Die maximale Deviatorspannung wurde also bei den Wechselbelastungen nicht gleichzeitig mit der maximalen Axialstauchung gemessen. Beim Bruch lag die Deviatorspannung noch $17,4 \pm 9,8 \text{ MPa}$ (Versuchsserie No 4) bzw. $6,5 \pm 5,8 \text{ MPa}$ (Versuchsserie No 5) niedriger als die maximale Deviatorspannung im Verlauf der vorangegangenen Wechselbelastungen.

Ein komplexes, elastisch-plastisches Zusammenwirken der verschiedenen Komponenten des Mineralkorngefüges muß für dieses ungewöhnliche Materialverhalten von Bedeutung sein, welches mit Hilfe der klassischen Plastizitätstheorie nicht beschrieben werden kann: Einerseits verringert sich bei gleichbleibender maximaler Deviatorspannung durch Wechselbelastungen die maximale Axialstauchung und andererseits verringert sich bei ansteigender maximaler Axialstauchung durch Wechselbelastungen auch die maximale Deviatorspannung; das Maximum der Deviatorspannung wird deutlich vor Eintreten des Bruchversagens bereits bei geringerer Axialstauchung erreicht.

Bei Temperaturen von 250° C werden im Granit offenbar vor Erreichen des Bruchzustandes in hohem Maße Spannungen abgebaut oder umgelagert sowie Verformungen bruchlos oder zumindest ohne durchgreifende Schwächung des Kornverbandes aufgeprägt, wenn das Gestein zyklisch wechselnd beansprucht wird. Das Materialverhalten bei Wechselbelastungen kann alleine mit der klassischen Plastizitätstheorie nicht beschrieben werden.

7. LITERATUR

ATTEWELL, P.B. und FARMER I.W. (1973): Fatigue behavior of rock. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 10, London, 1-9.

BRAUNS, J., H. HÖTZL, K. KAST, Ch. LEMPP, D. METZLER und W. SMYKATZ-KLOSS (1985): Ingenieurgeologie aufgelockerter Granite. Verwitterung und Auflockerung/Einführung und Versuch einer Klassifikation. In: K.H. HEITFELD (Hrsg): Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen. 695 S., 397 Abb., Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.

CHO, T.F. und B.C. HAIMSON (1987): Effect of cyclic loading on circular openings-results of a laboratory simulation. In: Proc. 28th U.S.-Symposium on rock mechanics, ASCE, Tuscon, 805-812.

HAIMSON, B.C. und C.M. KIM(1971): Mechanical behavior of rock under cyclic fatigue. In: Stability of rock slopes. 13th U.S.-Symposium on rock mechanics, ASCE, New York, 845-863.

HAIMSON, B.C. (1974): Mechanical behavior of rock under cyclic loading. In: Advances in rock mechanics. Proc. 3rd Congr. of ISRM., Nat. Acad. of Sciences, Denver, Col., Vol. 2, 373-378.

HILL, R. (1967): The essential structure of constitutive laws for metal composites and polycrystals. J. Mech. Phys. Solids, Vol. 15, London, 79-95.

KREUTER, H. (1987): Verwitterungsuntersuchungen im Forbachgranit (Nordschwarzwald). Unveröffentl. Dipl.-Arbeit, 62 Abb., 11 Tab., 1 Karte, 135 S., Universität Karlsruhe.

KURAOKA, S. und B.C. HAIMSON (1983): Mechanical behavior of energy storage tunnels under cyclic loading. In: Proc. 24th U.S.-Symposium on rock mechanics, ASCE, Texas, 119-125.

LEMPP, CH. und O. NATAU (1985): Mechanische Eigenschaften von Störungen und Verwitterungszonen im Granitgebirge und deren genetische Charakterisierung. In: K.H. HEITFELD (Hrsg): Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen. 695 S., 397 Abb., Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.

LEMPP, CH. und O. NATAU (1986): Festigkeitsverhalten von kristallinen Gesteinen unter hohen Dücken und Temperaturen. In: Berichtsband des Sonderforschungsbereiches 108 "Spannung und Spannungsumwandlung in der Lithosphäre" (1984-1986), 233-278, Universität Karlsruhe.

LIPPMANN, H. und W. WINTER (1987): Elastisch-plastische Stabwerke mit kinematischer Verfestigung als Modell für vielkristallines Werkstoffverhalten unter Wechselbeanspruchung. Teil 1: Modellierung und Simulation der Ermüdung. Ingenieur-Archiv Vol. 57, No 6, 431-445.

MINKLEY, W. (1982): Untersuchungen zum Reibungswiderstand von Gesteinstrennflächen bei pulsierender Belastung. Neue Bergbautechnik, Jg. 12, H.1.

RICHTER, D. und G. SIMMONS (1974): Thermal expansion behaviour of igneous rocks. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 11, London, 403-411.

SCHOLZ, C.H. und R. KRANZ (1974): Notes on dilatancy recovery. J. Geophys. Res. Vol. 79, No 14, 2132-2135.

ZOBACK, M.D. und J.D. BYERLEE (1975): The effect of cyclic differential stress on dilatancy in Westerly Granite under uniaxial and triaxial conditions. J. Geophys. Res. Vol. 80, No 11, 1526-1530.

A N H A N G
VERSUCHSSERIE No. 1 BIS No. 3

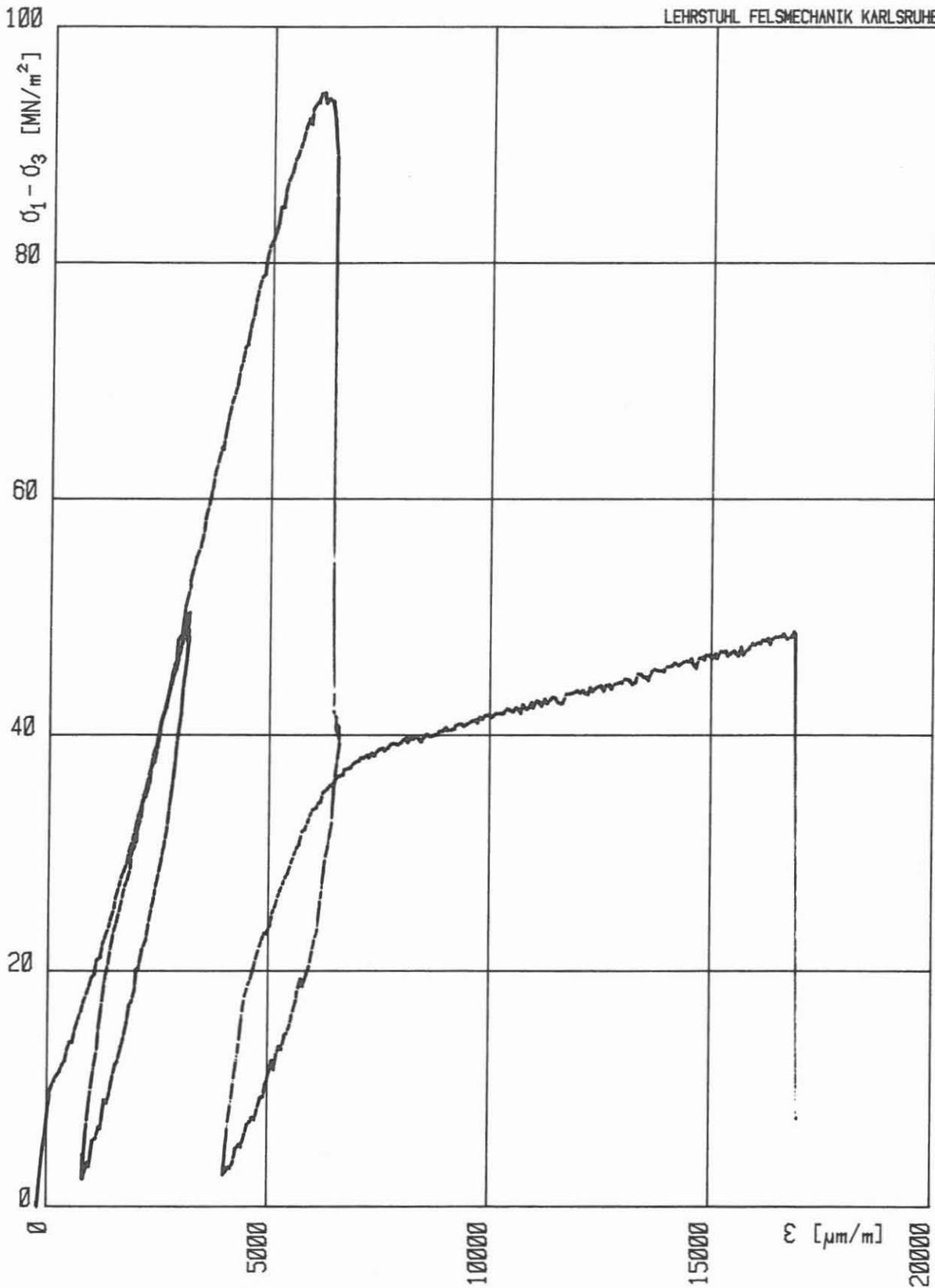
TABELLE 1

(ERLÄUTERUNG S. UMSEITIG)

VERSUCHSSERIE NO 1 mit geschlossener Probenhülle																
Proben- bez. (s. Anh.)	Belastungs- geschwindigkeit [mm/min]	3	4	5	6	7	8	9	10		11		12			
									Besonder- heiten	$\sigma_{zykl.}$ [MPa]	$\sigma_{max.}$ [MPa] (n. Versuch)	$f_{B-Bruch}$ beim Zyklus		$D_{zykl.}$ sec · [10 ⁻³ Hz]	$\frac{sec}{Zyklus}$	$\epsilon_{pl. max.}$ [µm/m]
J5 T25 P65	0,100		50	0,53	94,4	1	-	-	4000	800	(Nachbruch/Bruch)	16870	6000	(Nachbruch/Bruch)	-	
J2 T25 P65	0,100		50 MPa-Startzykl.	0,75	n.e.	15	18432	54	1600	1300	- 300	5050	2350	- 400	3500	-
" 2. Teil	0,100		1. Fortsetzung	0,75	n.e.	5	19269	51	1150	1100	- 50	4500	4400	- 100	3425	±
" 3. Teil	0,100		2. Fortsetzung	0,75	n.e.	18	20832	48	1700	500	- 1200	5000	3500	- 1500	3225	±
" 4. Teil	0,100		3. Fortsetzung	0,75	n.e.	11	31628	31	1200	1100	+ 100	4300	4200	- 100	3150	±
J4 T25 P65	0,100		50 MPa-Startzykl.	0,80	(87,5 → 62,0)	7 B	-	623	800	550	- 250	4700	4500	- 200	3900	±
J3 T25 P65	0,100		50 MPa-Startzykl.	0,85	92,6 → 19,0	9 B	18330	65	1500	1400	- 100	5600	5550	- 50	4150	±
J1 T25 P65	0,100		50 MPa-Startzykl.	0,91	91,6 → 14,0	8 B	19263	52	1450	1400	- 50	5800	5750	- 50	4450	±
VERSUCHSSERIE NO 2 mit geschlossener Probenhülle																
L1 T25 P65	0,600		Referenzprobe	0,65	77,0	1	-	-	7070	1530	(Nachbruch/Bruch)	10100	6270	(Nachbruch/Bruch)	-	
L2 T25 P65	0,600		1. Fortsetzung	0,55	n.e.	42	18432	54	1000	700	- 300	2900	2350	- 550	1900	-
" b	0,600		2. Fortsetzung	0,55	n.e.	57	19269	51	1000	900	+ 100	2700	2500	- 200	1700	±
" c	0,600		3. Fortsetzung	0,55	n.e.	61	20832	48	1350	1100	+ 250	2800	2750	- 50	1550	±
" d	0,600		4. Fortsetzung	0,55	n.e.	100	27646	36	1600	1250	+ 350	2850	2800	- 50	1450	±
" e	0,600		σ_u -Test	0,55	n.e.	370	31628	31	1300	1700	+ 400	2900	2400	± 0	1250	± wellig
" f	0,600		(Verf. 102,7 MPa)	0,65; 1,3	102,7	2	-	-	2000	1270	(2.Zykl./1.Zykl.)	7340	6300	(Nachbruch/Bruch)	± wellig	
L3 T25 P65 a	0,600		1. Fortsetzung	0,73	n.e.	350	18330	65	2400	1400	± 0	4500	3300	- 900	2200	- wellig
" b	0,600		$\sigma_{1,0}$ -Test	0,73	n.e.	350	19263	52	1800	1300	+ 500	3800	3700	- 100	2000	± wellig
" c	0,600		Geschw.-Test!	0,71; 1,0	n.e.	2	-	-	1400	1340	(2.Zykl./1.Zykl.)	5000	3640	(2.Zykl./1.Zykl.)	± wellig	
L4 T25 P65 a	0,600		66	0,86	-	320	16617	60	3200	2200	+ 300	5800	4900	- 500	2500	- wellig
L6 T25 P65	0,030		66	n.b.	-	17	645	1550	1700	1500	- 200	4500	4400	- 100	2900	(-)wellig
L5 T25 P65	0,600		71	0,92	(55)	275 B	11905	84	2250	3200	+ 950	6050	5600	+ 450	3100	(+) wellig
VERSUCHSSERIE NO 3 mit durchlässiger Probenhülle																
M1 T25 P65	0,100		Referenzprobe	0,77	64,7	1	-	-	6200	1800	(Nachbruch/Zykl.)	7400	5730	(Nachbruch/Bruch)	-	
M2 T25 P65	0,100		σ_u -Test	0,83	n.e.	20	2412	415	2400	1800	- 600	5000	4200	- 800	2550	-
" n.ZV	0,100		50	0,77	79,4	1	-	-	6870	2000	(Nachbruch/Zykl.)	8100	6650	(Nachbruch/Bruch)	-	
M3 T25 P65	0,100		61	0,94	n.e.	40	1990	503	1800	400	- 1200	5000	3400	- 1400	3100	- wellig
" n.ZV	0,100		50	0,77	71,2	1	-	-	~6000	2130	(Nachbruch/Zykl.)	-	6050	(- / Bruch)	-	
M4 T25 P65	0,100		Sofortbruch	-	40,3	-	-	-	-	6600	(- / Nachbruch)	7500	6100	(Nachbruch/Bruch)	-	
M5 T25 P65	0,100		65	1,0	-	14 B	1780	562	3100	2800	+ 300	6800	6200	+ 600	3600	+ (*)
M6 T25 P28	0,100		σ_u 28,4 MPa!	1,0	n.e.	40	1919	521	1800	-600	- 2400	5400	2800	- 2600	3500	- wellig
" b	0,100		50	0,77	82,3	1	-	-	~7600	2600	(Nachbruch/Zykl.)	-	7400	(- / Bruch)	-	

ERLÄUTERUNGEN ZU DEN SPALTEN 1 bis 12 (TABELLE 1)

1. Großbuchstabe bezeichnet den Kluftkörper, aus dem die Bohrkern 1 bis n herausgebohrt worden sind; T25 = Versuchstemperatur 250⁰ C; P65 = Zell-
druck = 650 bar; Kleinbuchstaben a.....f, oder n-ter Teil kennzeichnet Ver-
suchsfortsetzung mit demselben Prüfkörper.
2. Belastungsgeschwindigkeit entspricht der Kolbenvorschubgeschwindigkeit bei
Be- und Entlastung [mm/min].
3. Referenzprobe charakterisiert die Kluftkörpereigenschaften im triaxialen
Kompressionsversuch; σ_u -Test ergibt die maximale Prüfkörperfestigkeit im
Triaxialversuch, durchgeführt *nach* dem Wechsellastversuch; $\sigma_{1,0}$ -Test zeigt
das σ - ε -Verhalten bei Belastung bis zur Deviatorbruchspannung der Referenz-
probe; 50 MPa-Startzyklus dient der Vorwegnahme von Anlegeverformungen
vor dem eigentlichen Wechsellastversuch; 'Verf. xxMPa' zeigt Verfestigung
auf einen bestimmten Wert der Deviatorbruchspannung an, der größer ist
als bei der Referenzprobe.
4. $\sigma_{\text{zykl.}}$ = maximale Deviatorspannung bei zyklischer Wechselbelastung.
5. $\sigma_{\text{zykl.}}/\sigma_{\text{max.}}$ = maximale Deviatorspannung bei zyklischer Wechselbelastung
bezogen auf die Deviatorbruchspannung der Referenzprobe.
6. $\sigma_{\text{max.}}$ (nach Versuch) = Deviatorbruchspannung (bei zyklischer Wechselbela-
stung); n.e. = Bruch nicht erreicht.
7. $n_{\text{zykl.}}$ = Anzahl der Lastwechsel im Versuch; B = Bruch unter Wechsellast
eingetreten.
8. $n_{\text{zykl.}}/\text{sec}$ = Mittlere Lastwechselfrequenz in Hz. [10^{-6}].
9. $\text{sec}/\text{zykl.}$ = Mittlere Dauer eines Lastwechsels (Be- und Entlastung) in sec.
10. Bleibende axiale Verformung der entlasteten Probe: maximal $\varepsilon_{\text{pl. max.}}$, minimal
 $\varepsilon_{\text{pl. min.}}$ und über die Wechselbelastungen $n_{\text{max.}}$ sich verändernd $\Delta\varepsilon_{\text{pl.}}$ (ab-
nehmend -, zunehmend +). Bei Referenzproben und σ_u - Test nach Lastwech-
selversuchen zusätzliche Angaben zu den Verformungswerten (z.B. nach 1.
Zyklus).
11. Gesamte axiale Verformung der belasteten Probe: maximal $\varepsilon_{\text{max.}}$, minimal
 $\varepsilon_{\text{min.}}$ und über die Wechselbelastungen $n_{\text{max.}}$ sich verändernd $\Delta\varepsilon$ (ab-
nehmend -, zunehmend +), $\varepsilon_{\text{Ampl.}}$ = Betrag der elastischen Verformung (Mittel-
wert). Bei Referenzproben und σ_u - Test nach Lastwechselversuchen zusätz-
liche Angaben zu den Verformungswerten (z.B. Nachbruchbereich).
12. Zeitlicher Verlauf von $\varepsilon_{\text{axial}}$ über n Lastwechsel, getrennt nach elastisch
(belasteter Prüfkörper) und plastisch (entlasteter Prüfkörper): + ansteigen-
de Verformung, - abfallende Verformung, \pm etwa gleichbleibende Verfor-
mung, wellig sich ändernde Verformung.



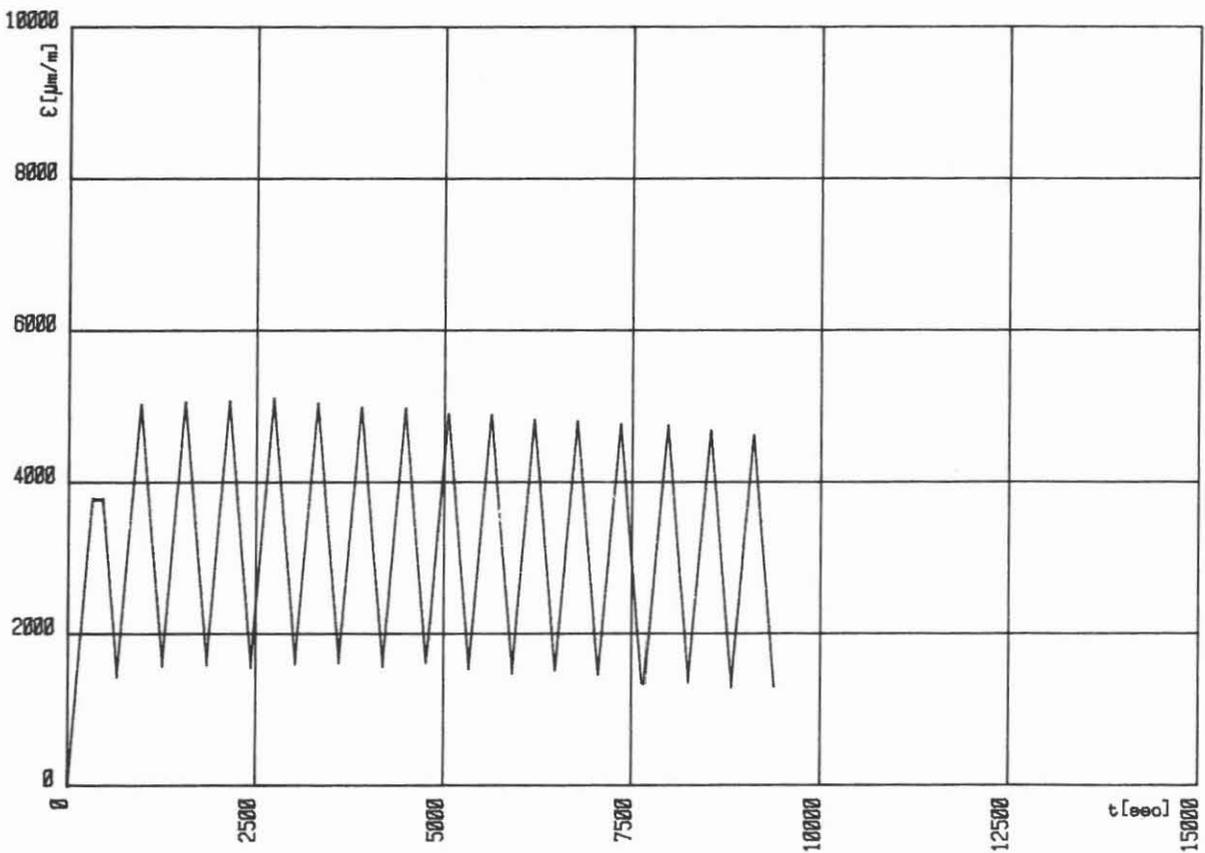
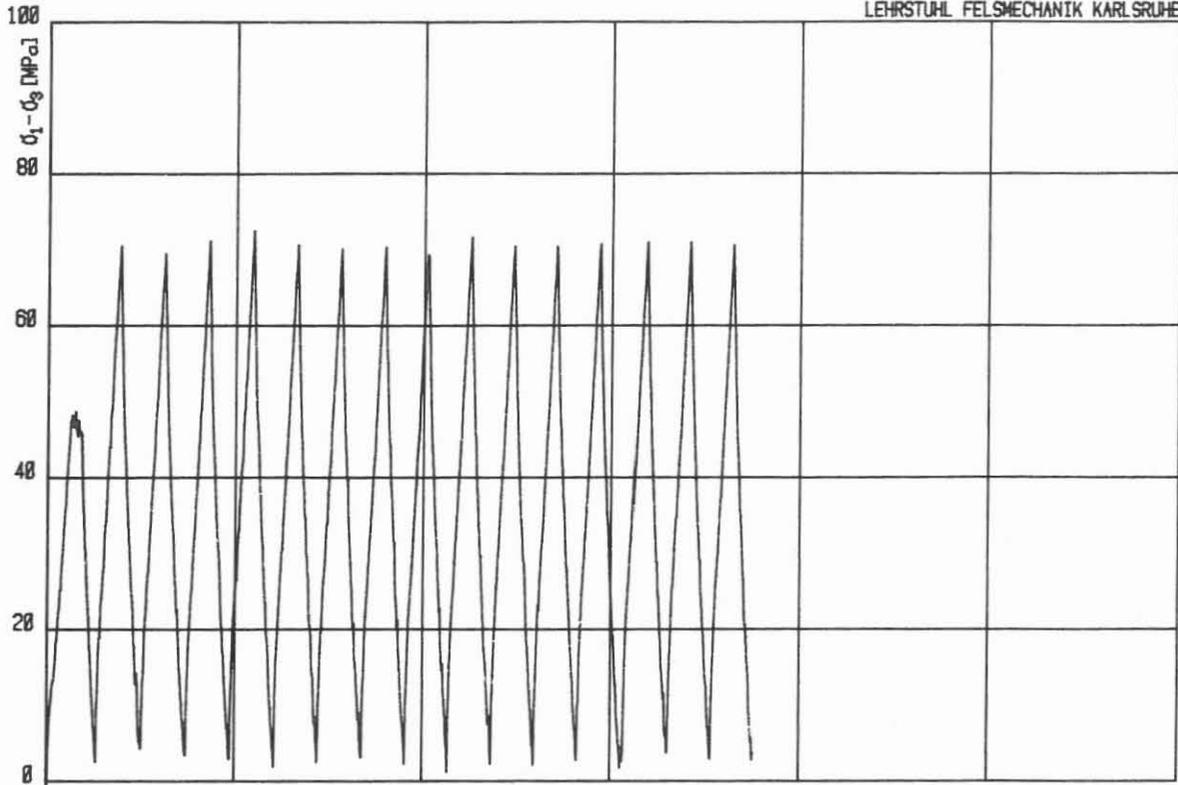
HT-TRIAxIALVERSUCH: Granit J5 T25P65

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min

Zelldruck: 650.5 bar Zelltemperatur: 250 °C

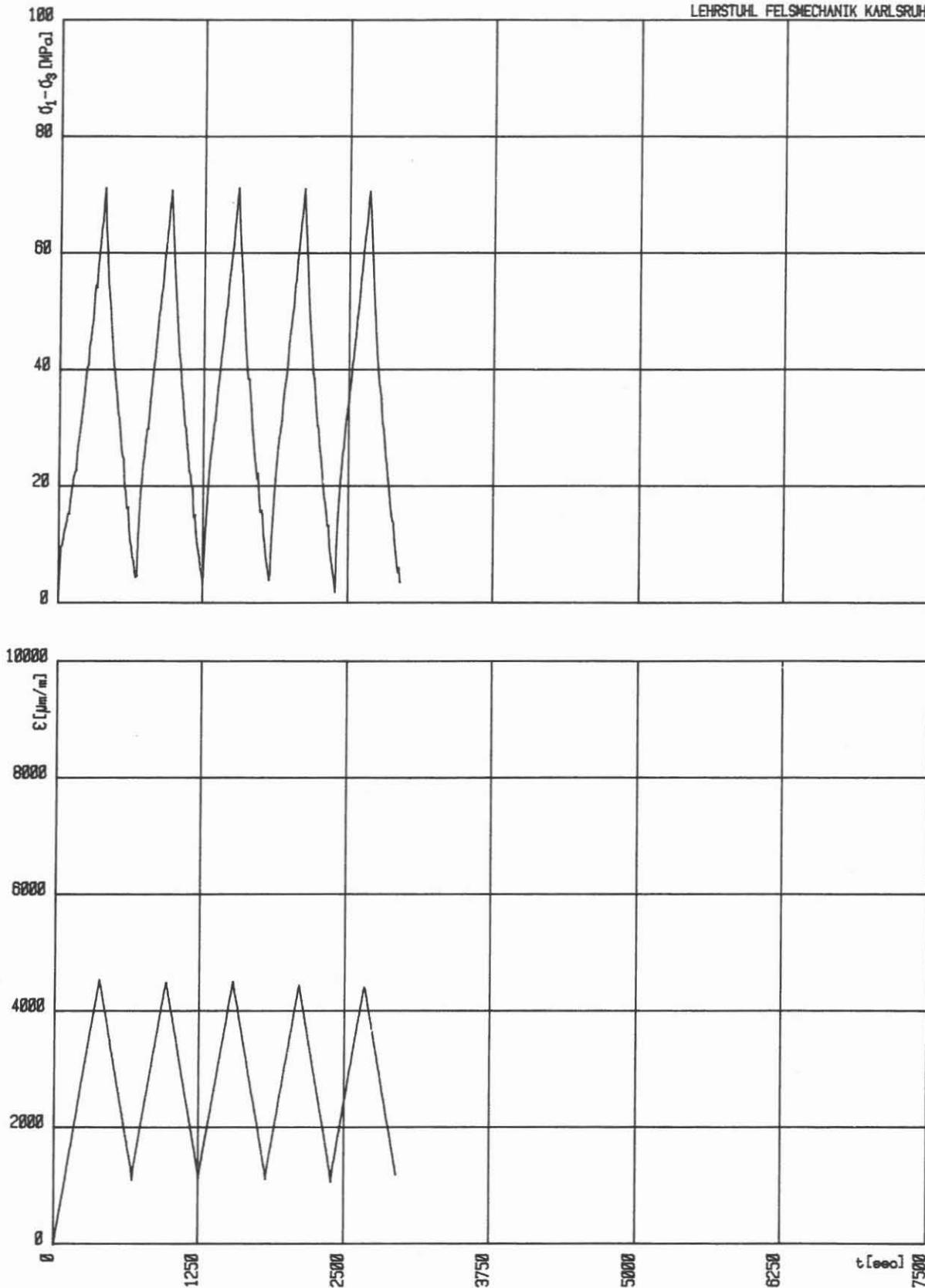
Max. ($\sigma_1 - \sigma_3$): 94.39 MN/m^2

Abmessungen der Probe: H = 138.0 mm D = 70.3 mm H/D = 1.96



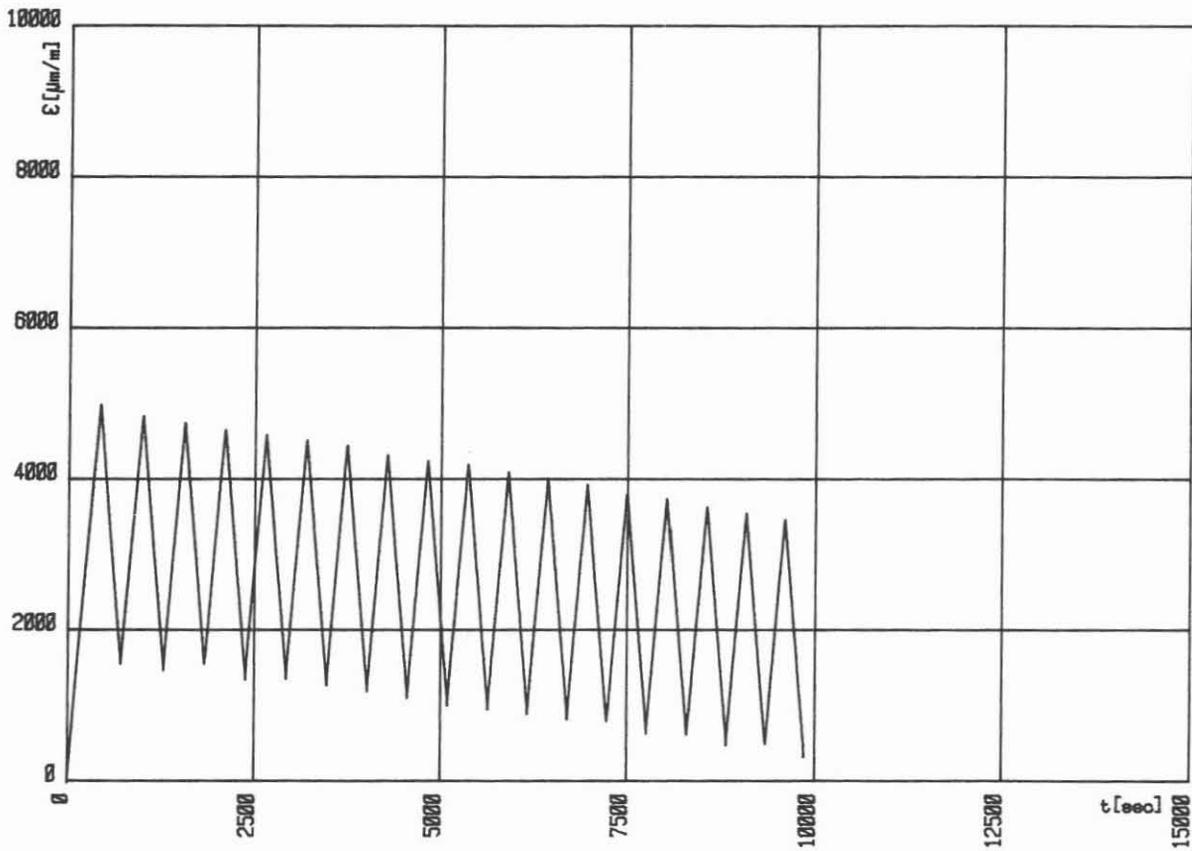
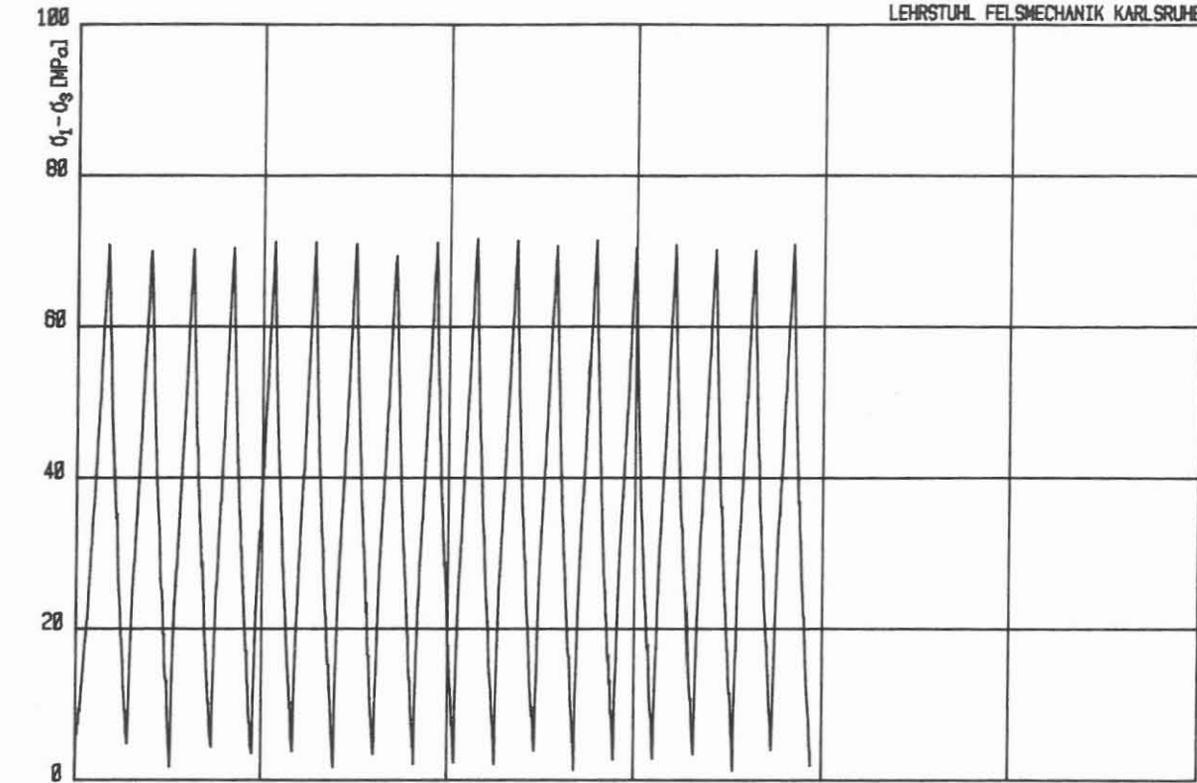
ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: KTB/Granit J2 T25P65 15 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 649.6 bar Zelltemperatur: 252 °C
Abmessungen der Probe: H = 142.2 mm D = 70.2 mm H/D = 2.03



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: KTB/Granit J2 T25P65 2. Teil ab 16 bis 20 Zyk

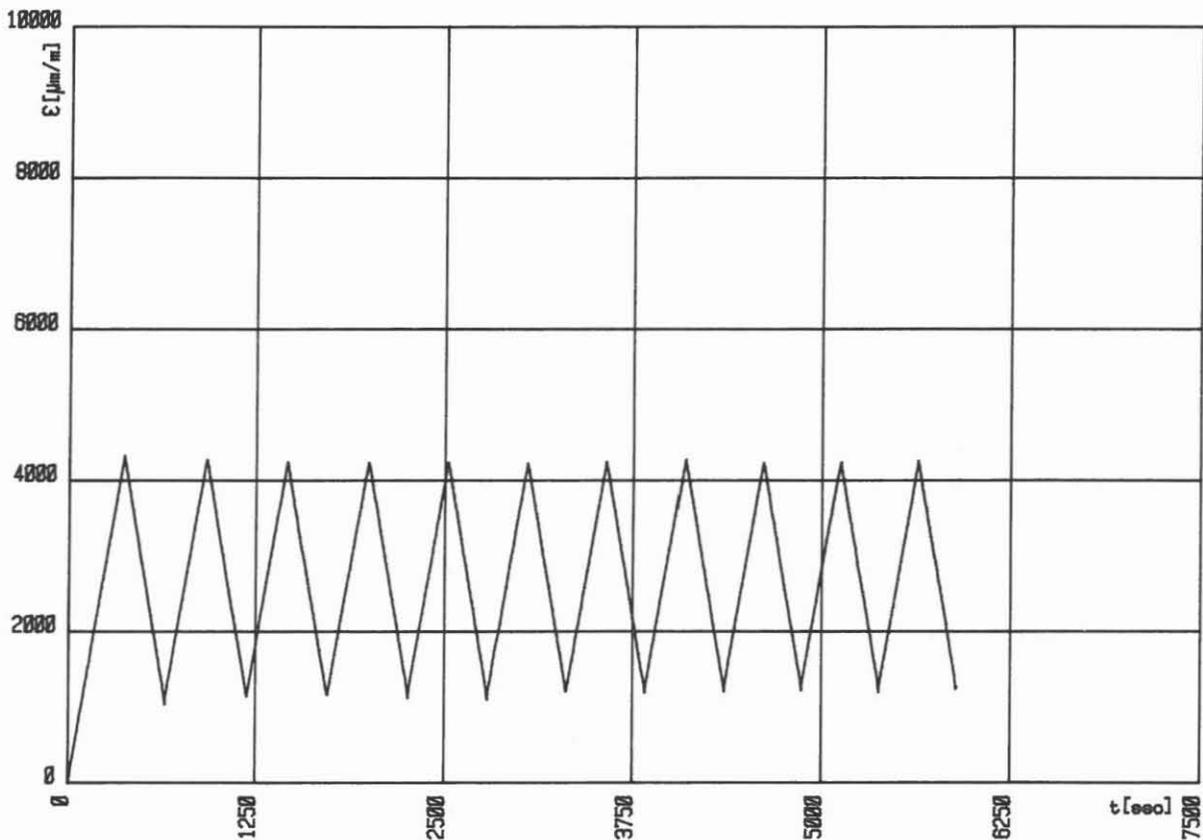
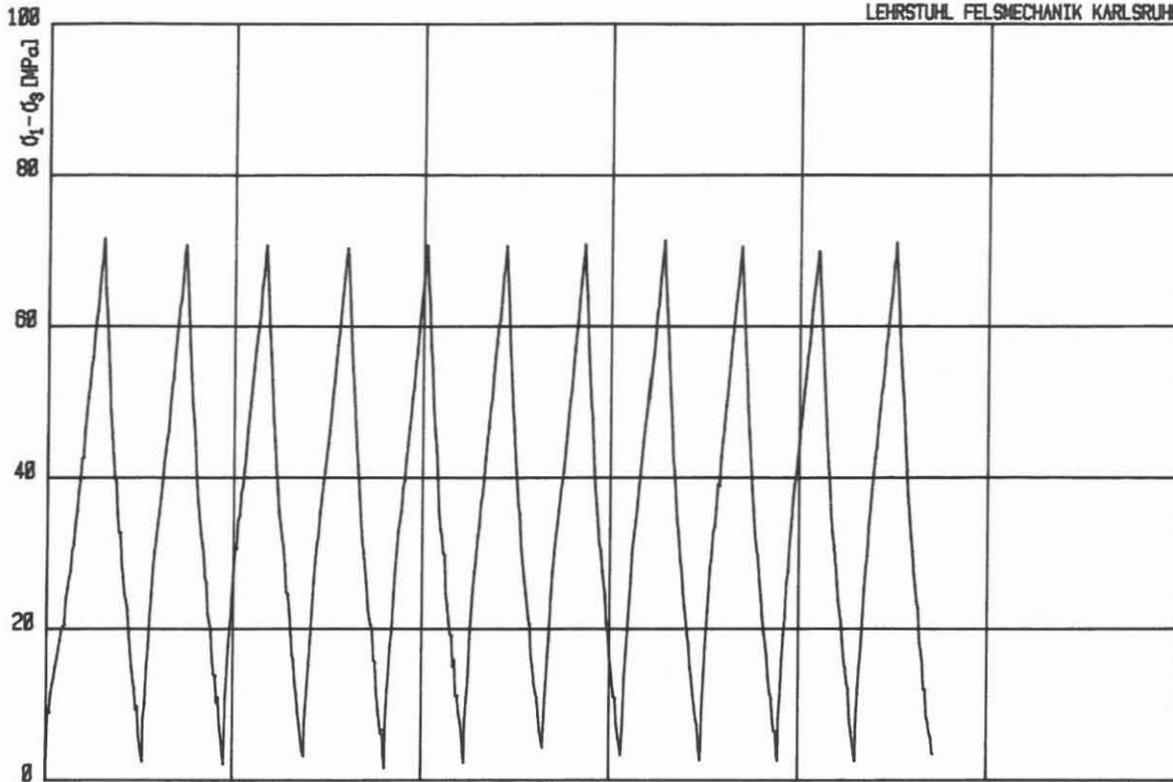
Kolben-Vorschub: $0.100 \text{ mm}/\text{min}$ Zelldruck: 649.4 bar Zelltemperatur: 252 °C
Abmessungen der Probe: $H = 142.2 \text{ mm}$ $D = 70.2 \text{ mm}$ $H/D = 2.03$



ZYKLISCHER HT-TRIAxIALVERSUCH: KTB/Granit J2 T25P65 3. Teil ab 21 bis 39 Zykl

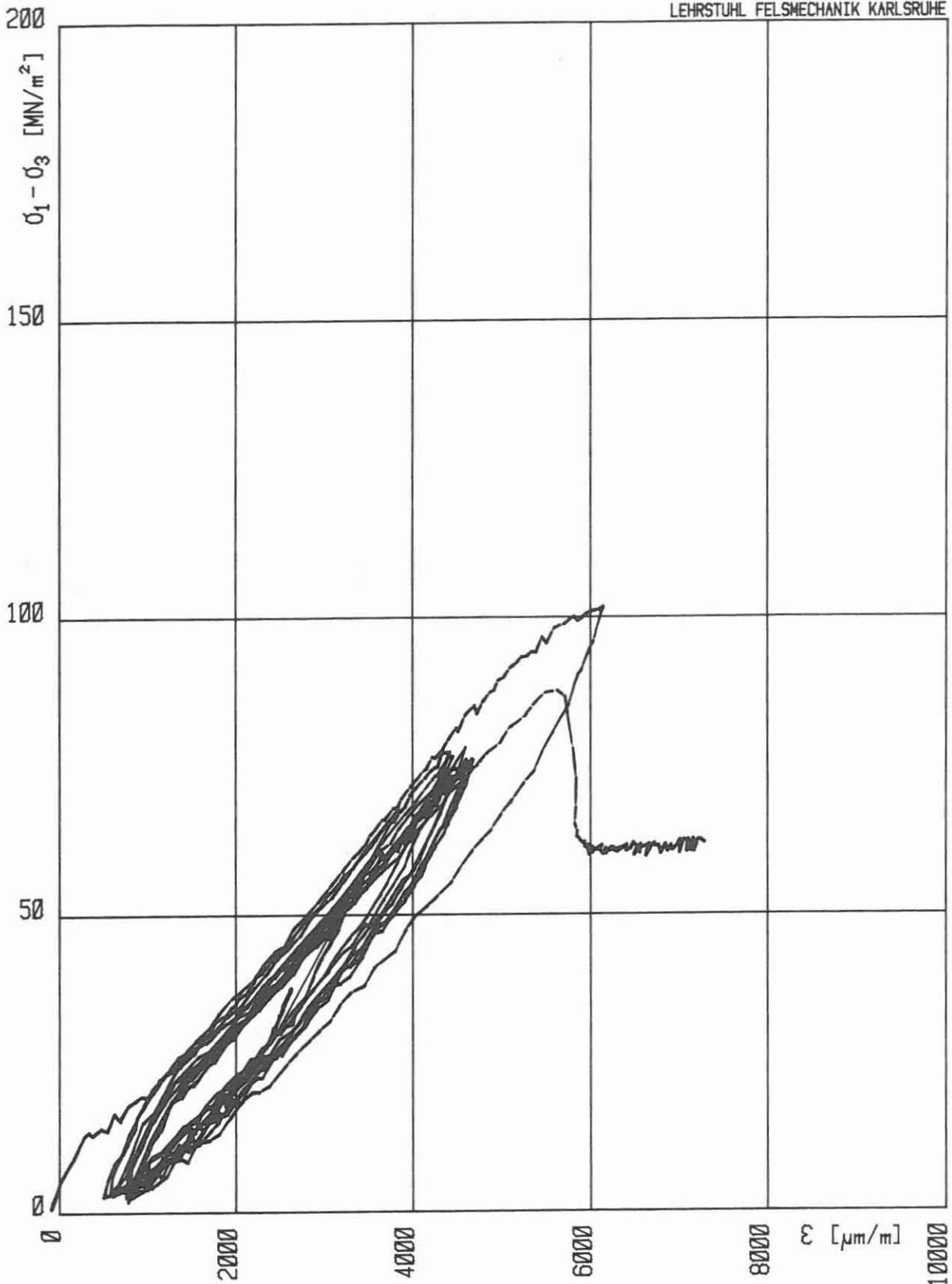
Kolben-Vorschub: \emptyset .100 mm/min Zelldruck: 648,8 bar Zelltemperatur: 251 °C

Abmessungen der Probe: H = 142,2 mm D = 70,2 mm H/D = 2,03



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: KTB/Granit J2 T25P65 4. Teil ab 39 bis 50 Zykl

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 650.7 bar Zelltemperatur: 251 °C
Abmessungen der Probe: H = 142.2 mm D = 70.2 mm H/D = 2.03



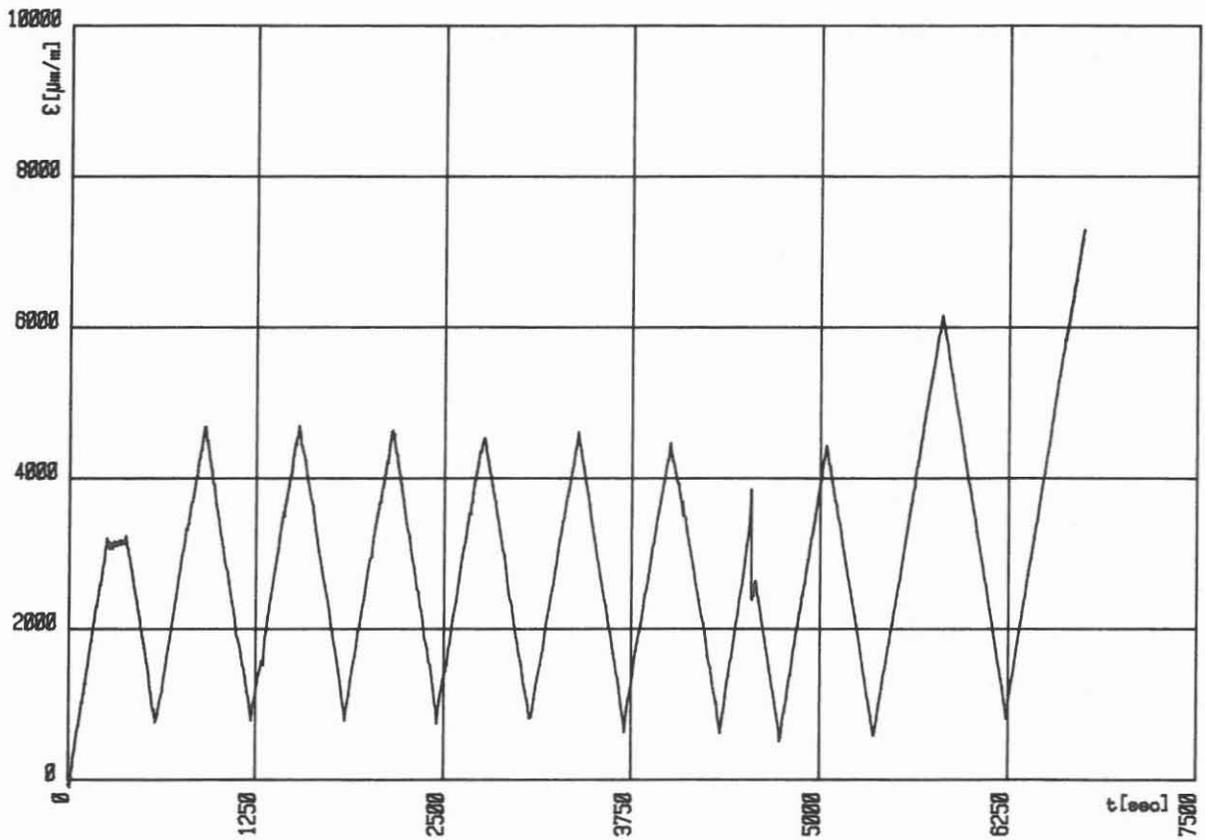
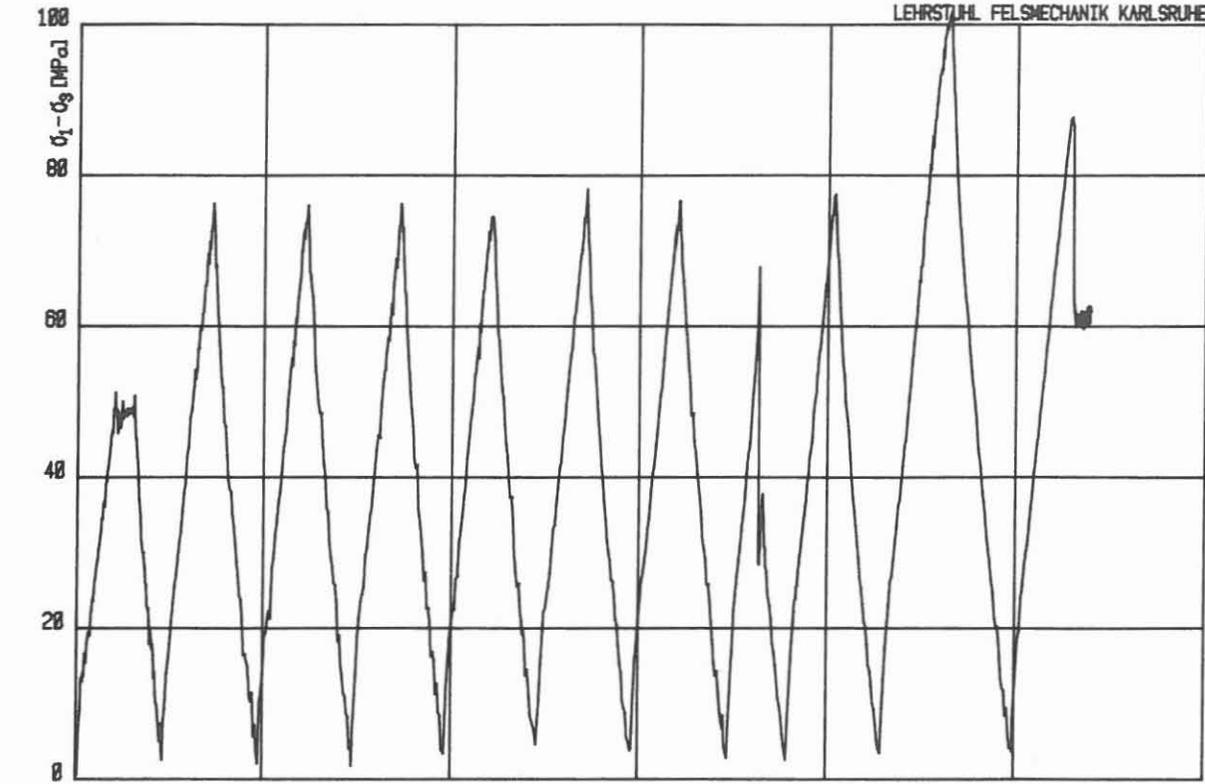
HT-TRIAXIALVERSUCH: KTB/Granit J4 T25P65 7 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min

Zelldruck: 650.0 bar Zelltemperatur: 251 °C

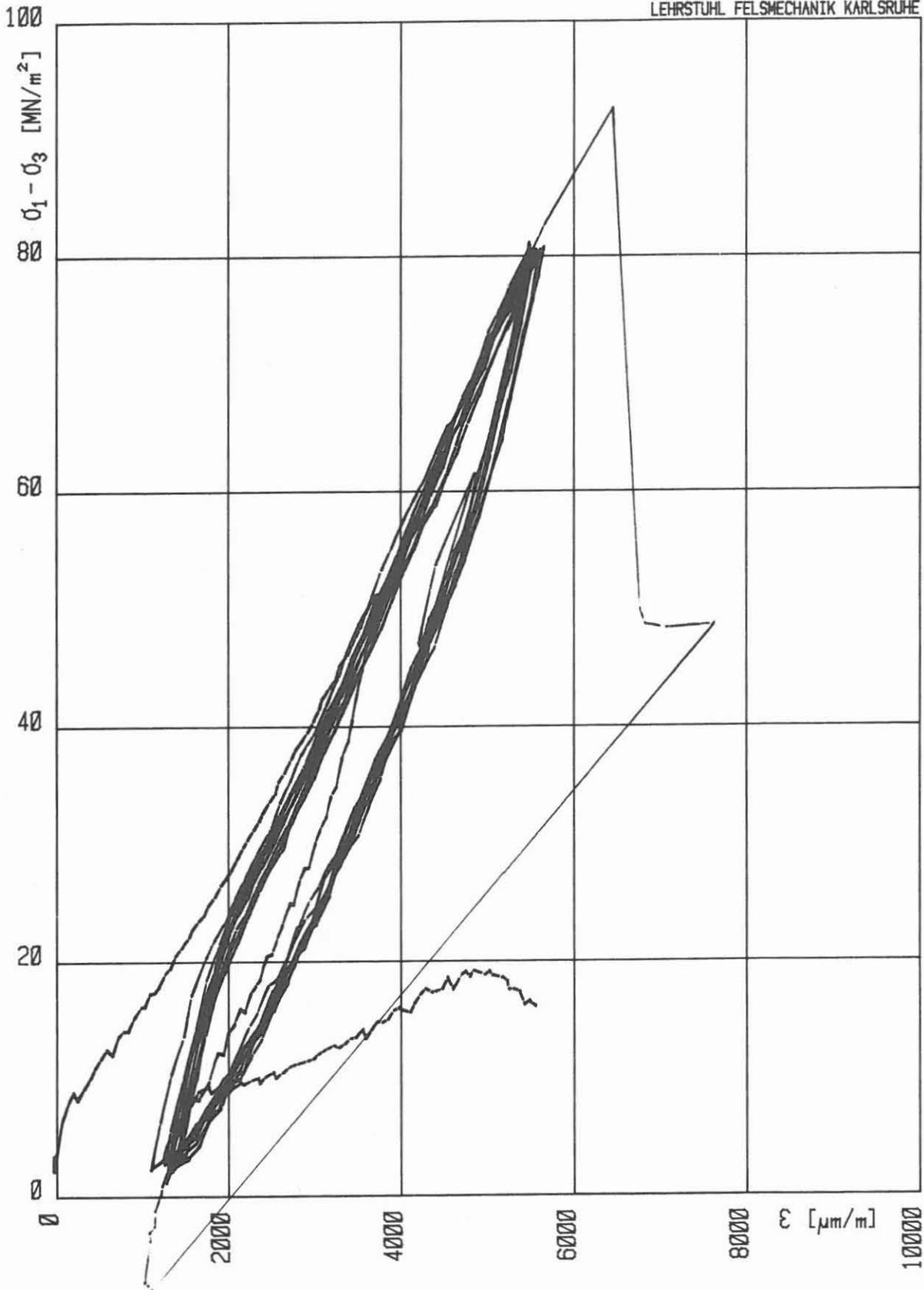
Max. ($\sigma_1 - \sigma_3$): 101.69 MN/m²

Abmessungen der Probe: H = 131.9 mm D = 70.3 mm H/D = 1.88



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: KTB/Granit J4 T25P65 7 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 650.0 bar Zelltemperatur: 251 °C
Abmessungen der Probe: H = 131.9 mm D = 70.3 mm H/D = 1.88



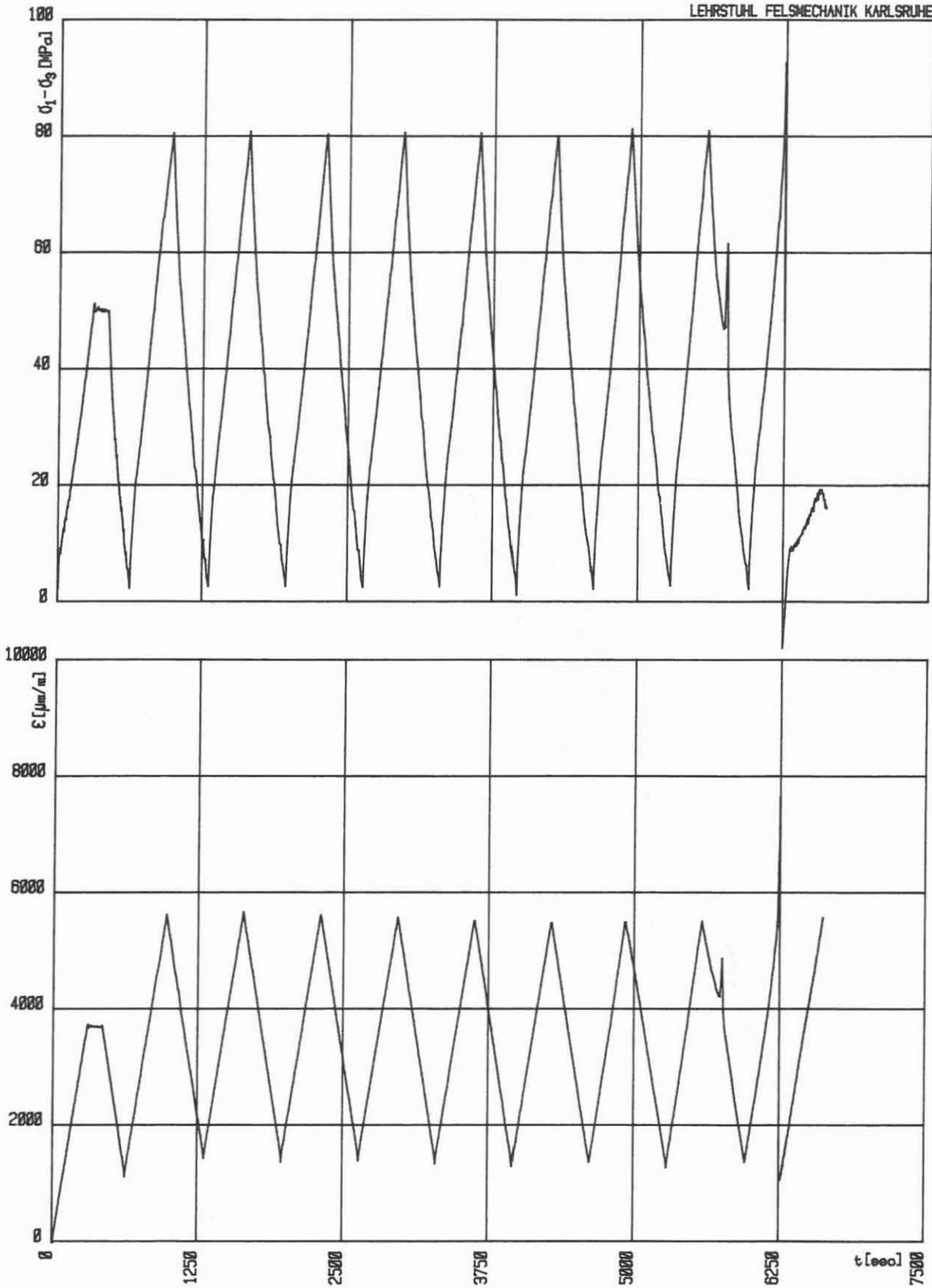
HT-TRIAXIALVERSUCH: KTB/Granit J3 T25P65 9 Zyklen

Kolben-Vorschub: \emptyset .100 mm/min

Zelldruck: 650.1 bar Zelltemperatur: 254 °C

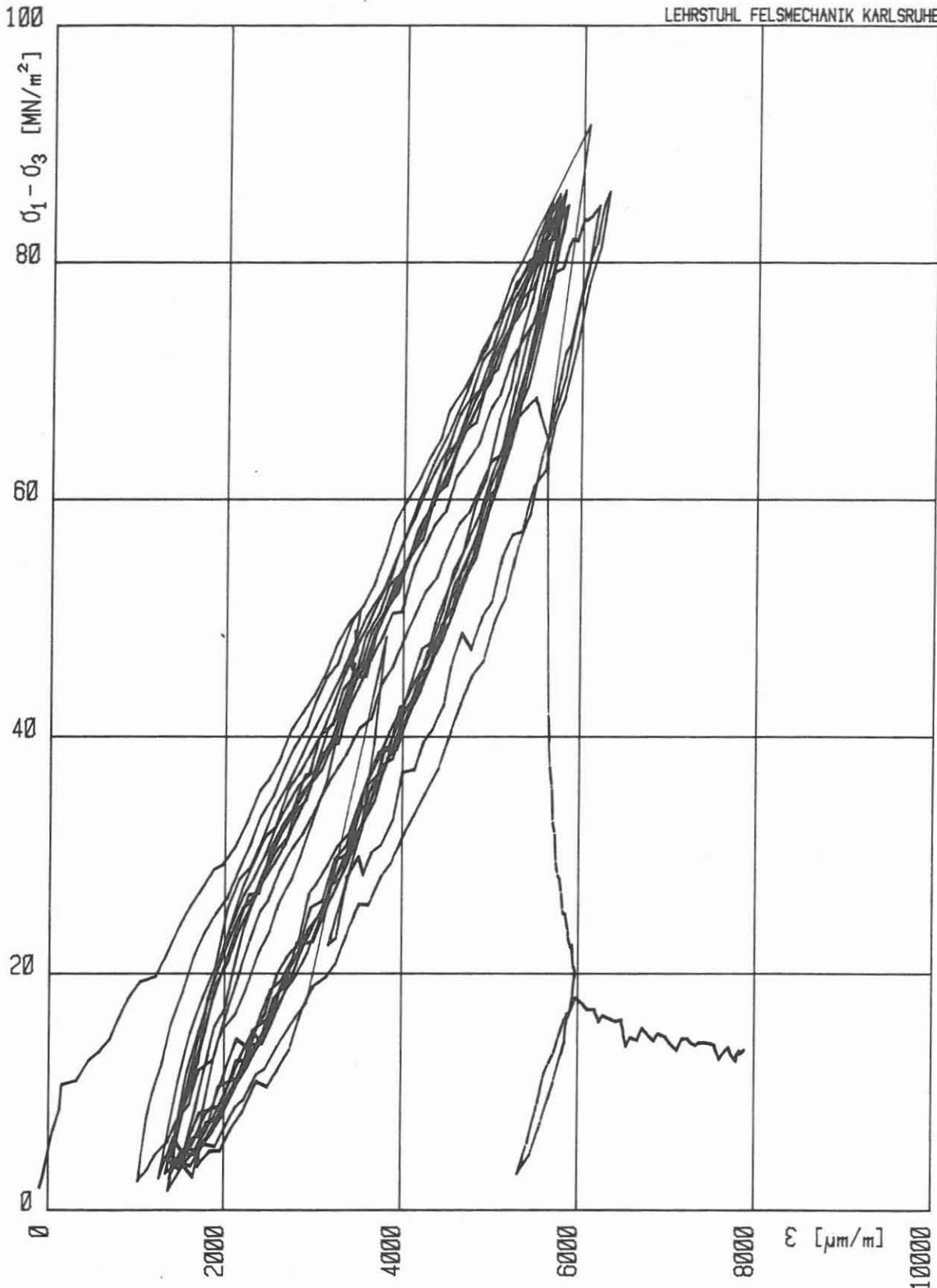
Max. $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 92.58 MN/m^2

Abmessungen der Probe: H = 131.1 mm D = 70.3 mm H/D = 1.86



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: KTB/Granit J3 T25P65 9 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 650.1 bar Zelltemperatur: 254 °C
Abmessungen der Probe: H = 131.1 mm D = 70.3 mm H/D = 1.86



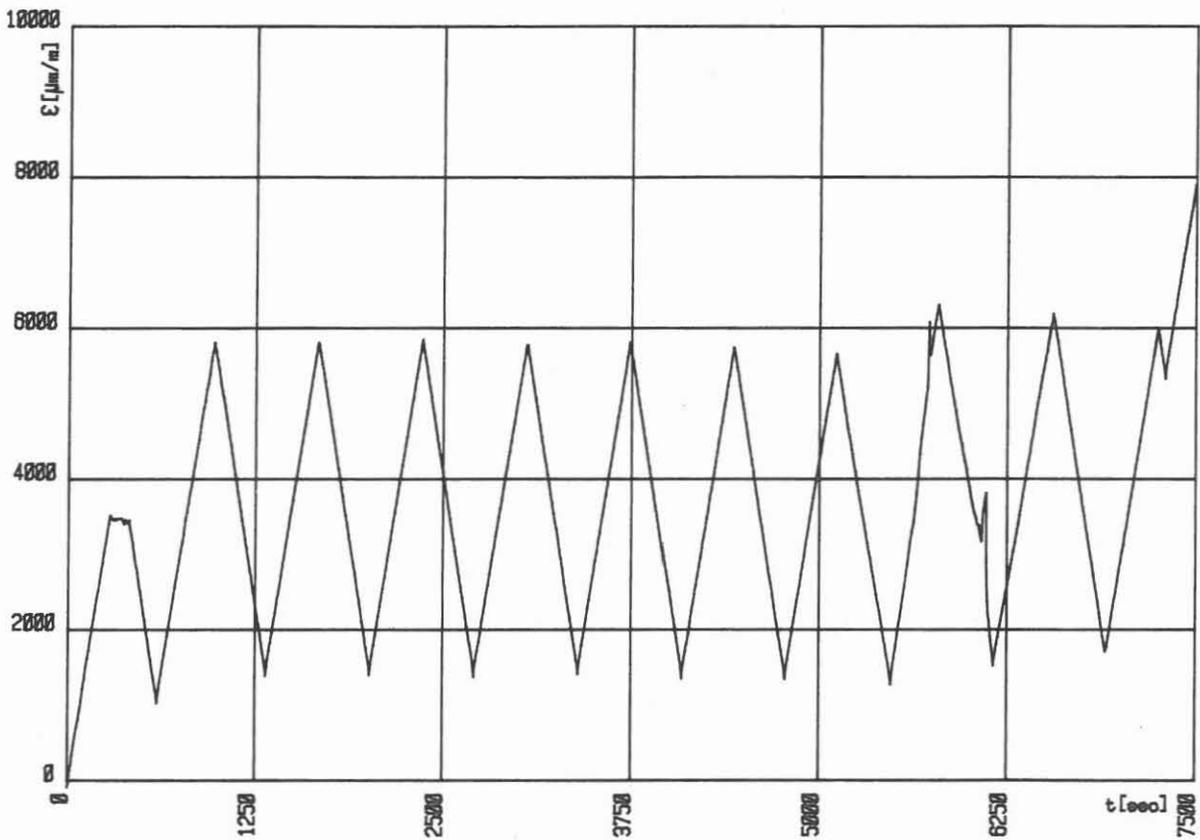
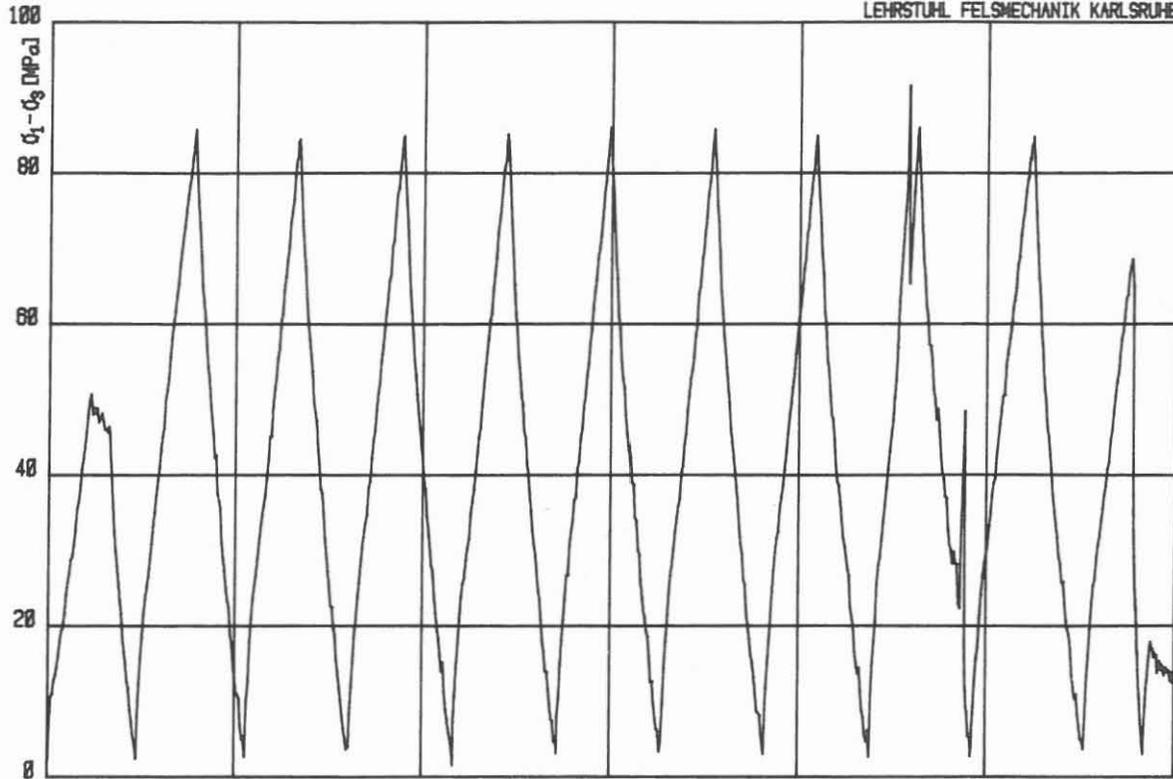
HT-TRIAXIALVERSUCH: KTB/Granit J1 T25P65 10 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min

Zelldruck: 651.3 bar Zelltemperatur: 251 °C

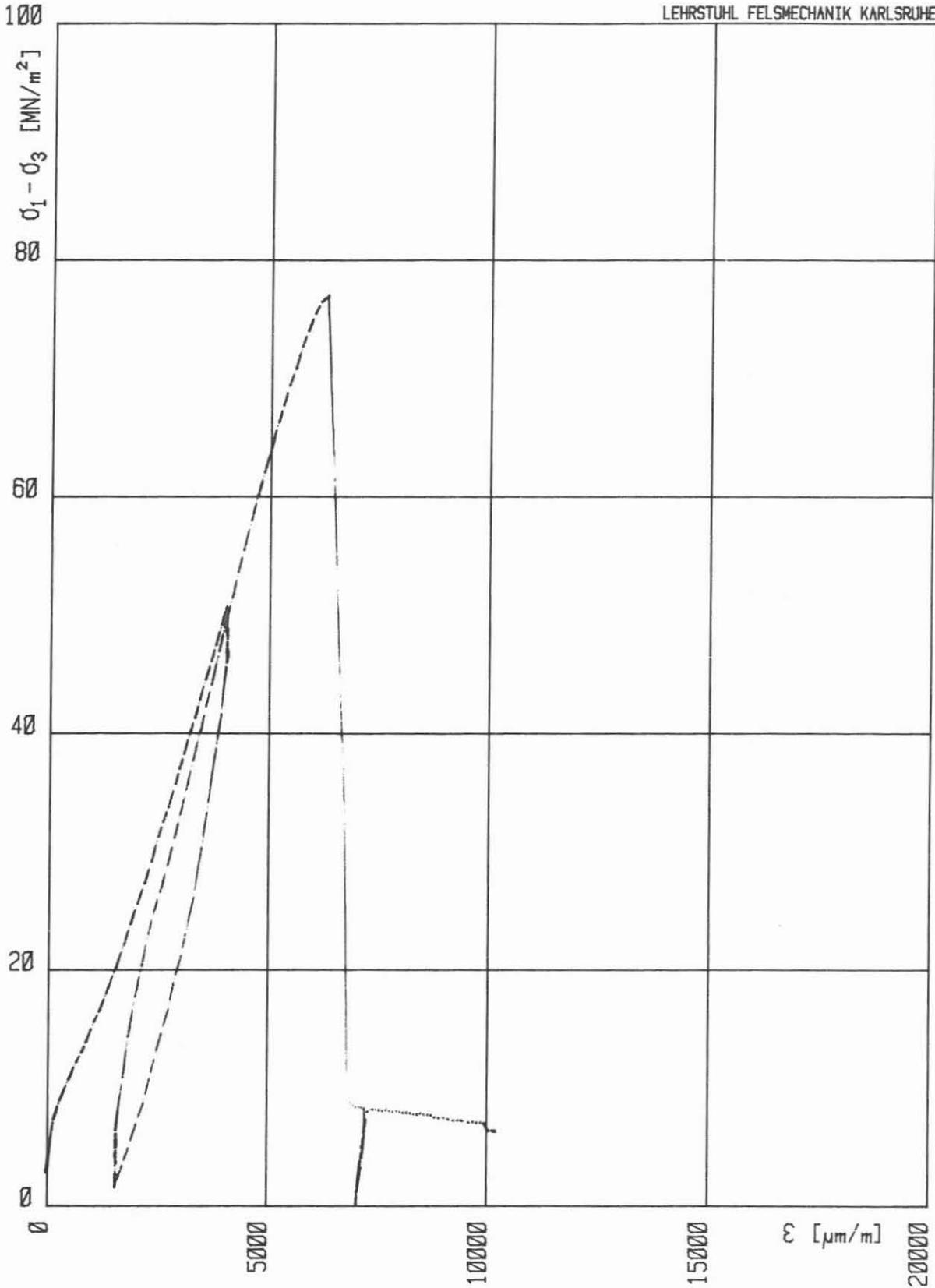
Max. ($\sigma_1 - \sigma_3$): 91.58 MN/m²

Abmessungen der Probe: H = 130.4 mm D = 70.3 mm H/D = 1.85



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: KTB/Granit J1 T25P65 10 Zyklen

Kolben-Vorschub: $\dot{\epsilon}$ 100 mm/min Zelldruck: 651.3 bar Zelltemperatur: 251 °C
Abmessungen der Probe: H = 130.4 mm D = 70.3 mm H/D = 1.85



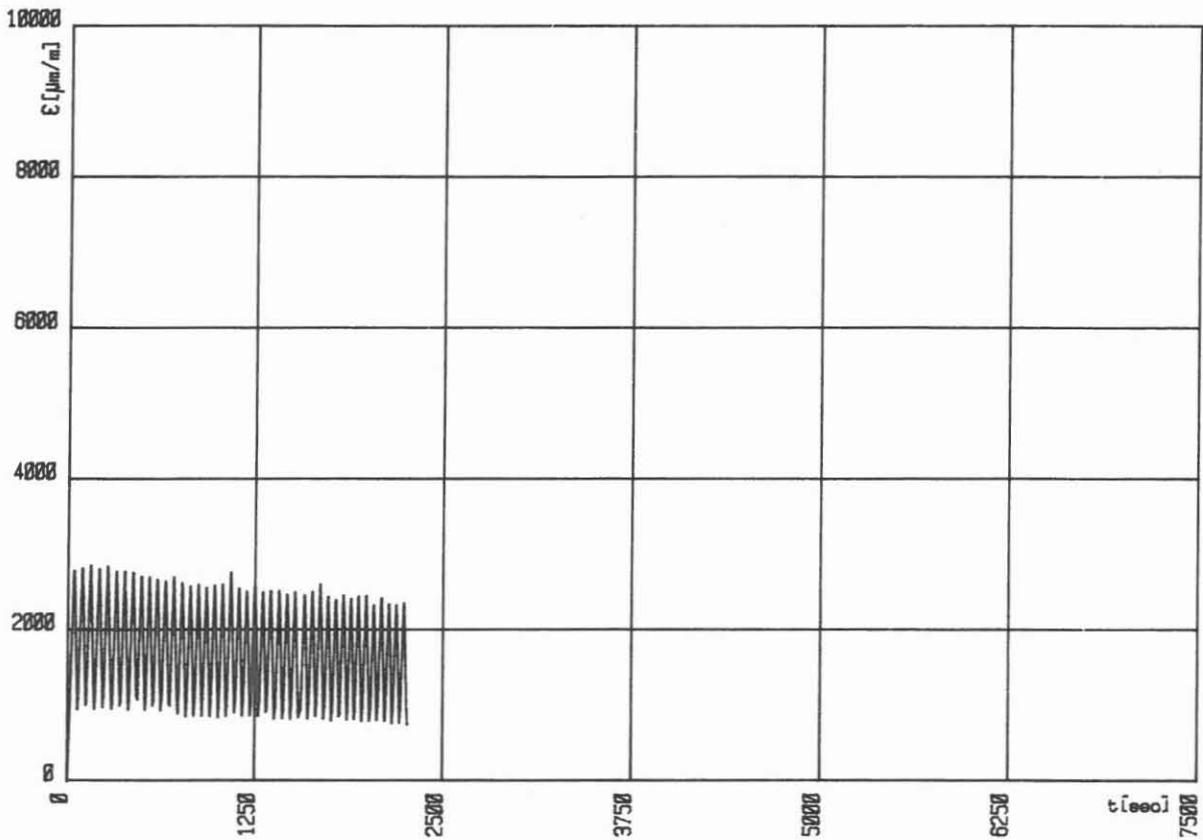
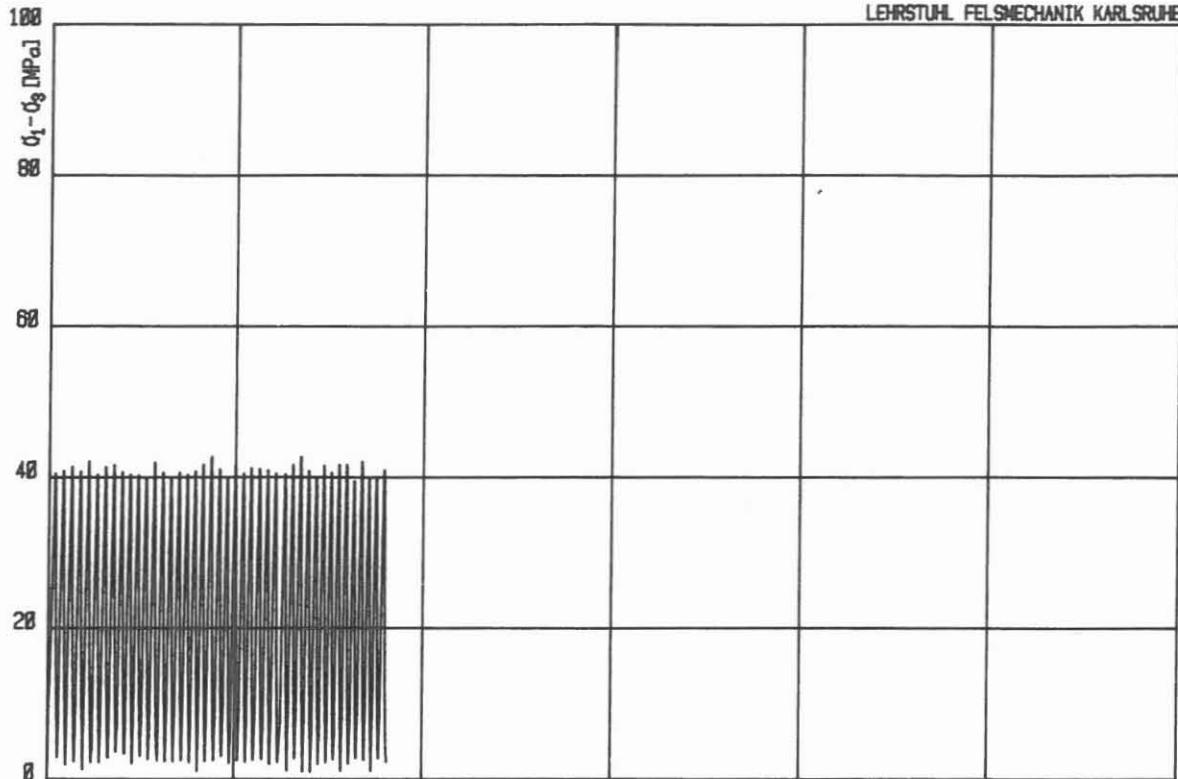
HT-TRIAXIALVERSUCH: L1T25P65

Kolben-Vorschub: $\emptyset.600$ mm/min

Zelldruck: 649.8 bar Zelltemperatur: 253 °C

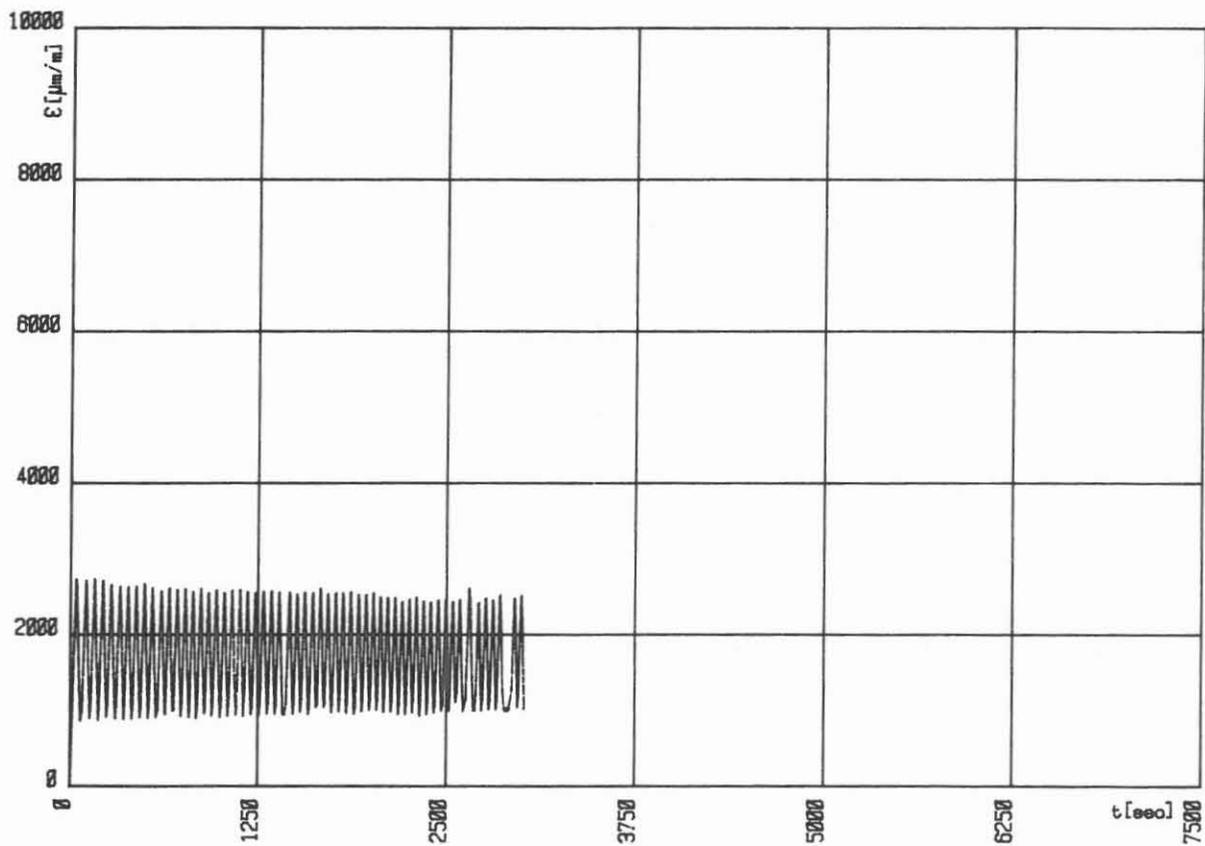
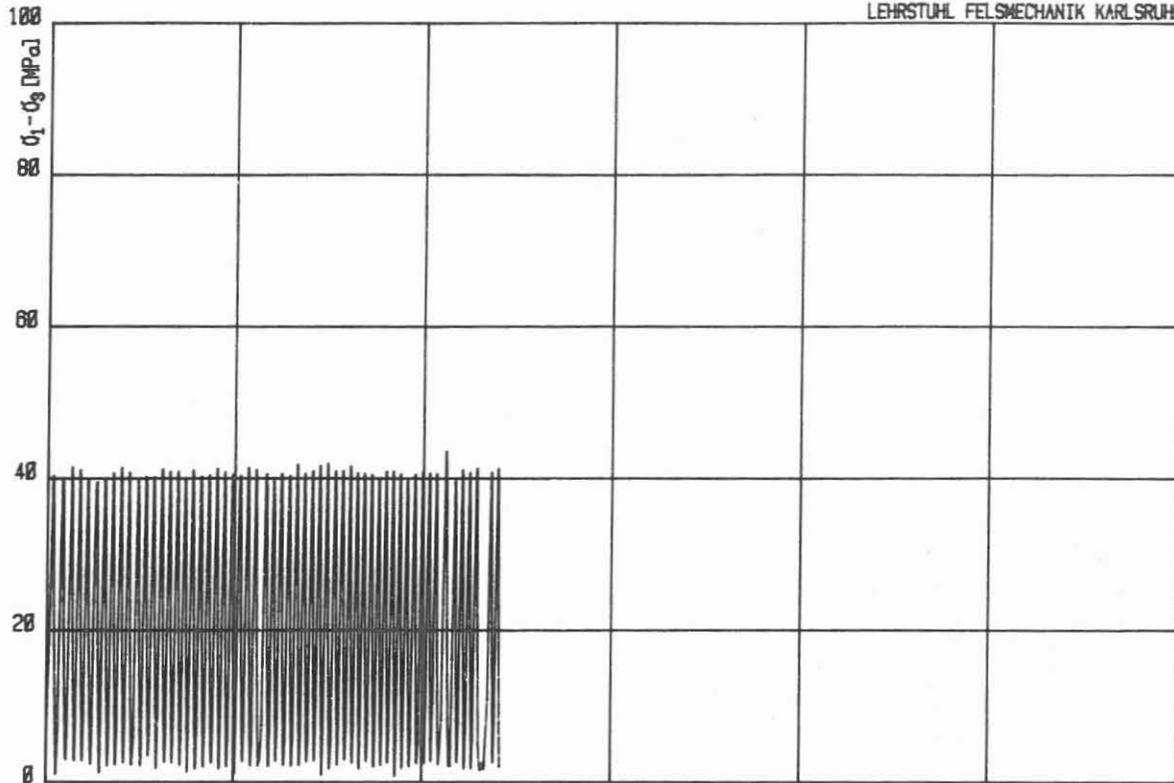
Max. $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 77.02 MN/m^2

Abmessungen der Probe: H = 140.2 mm D = 69.8 mm H/D = 2.01



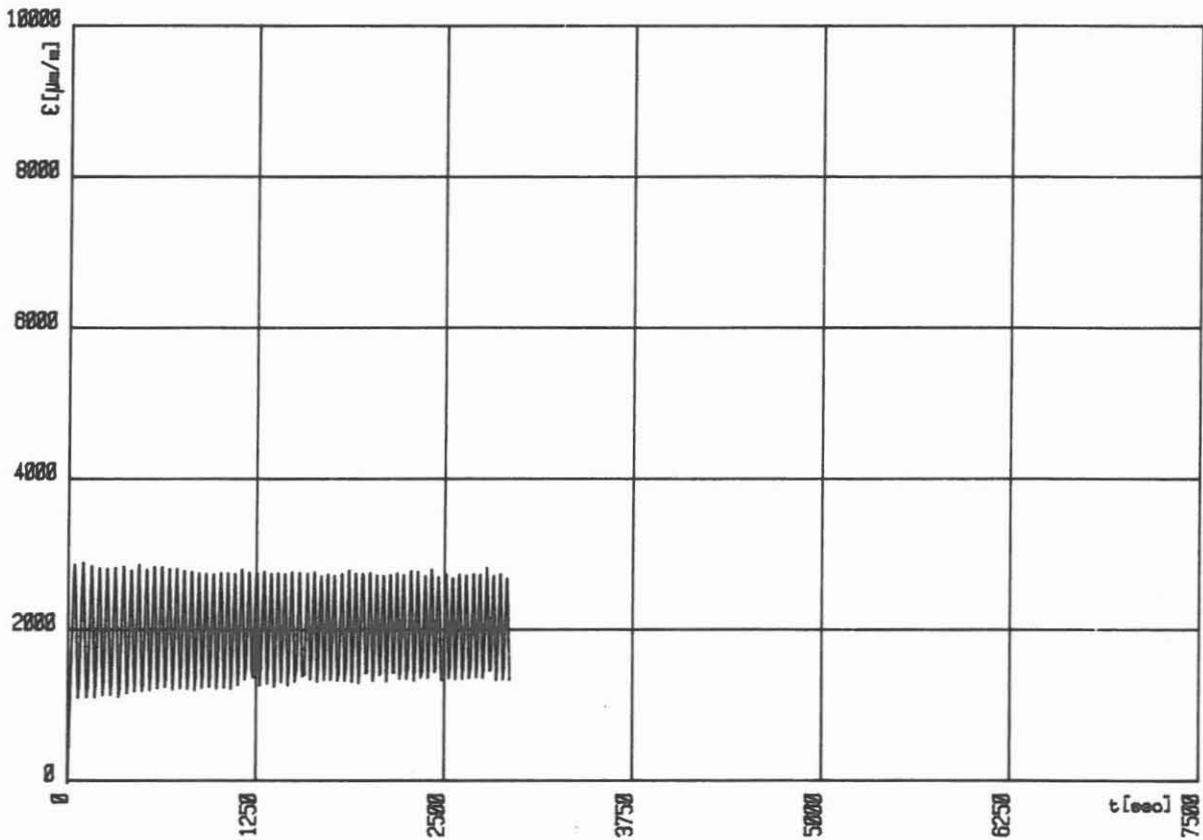
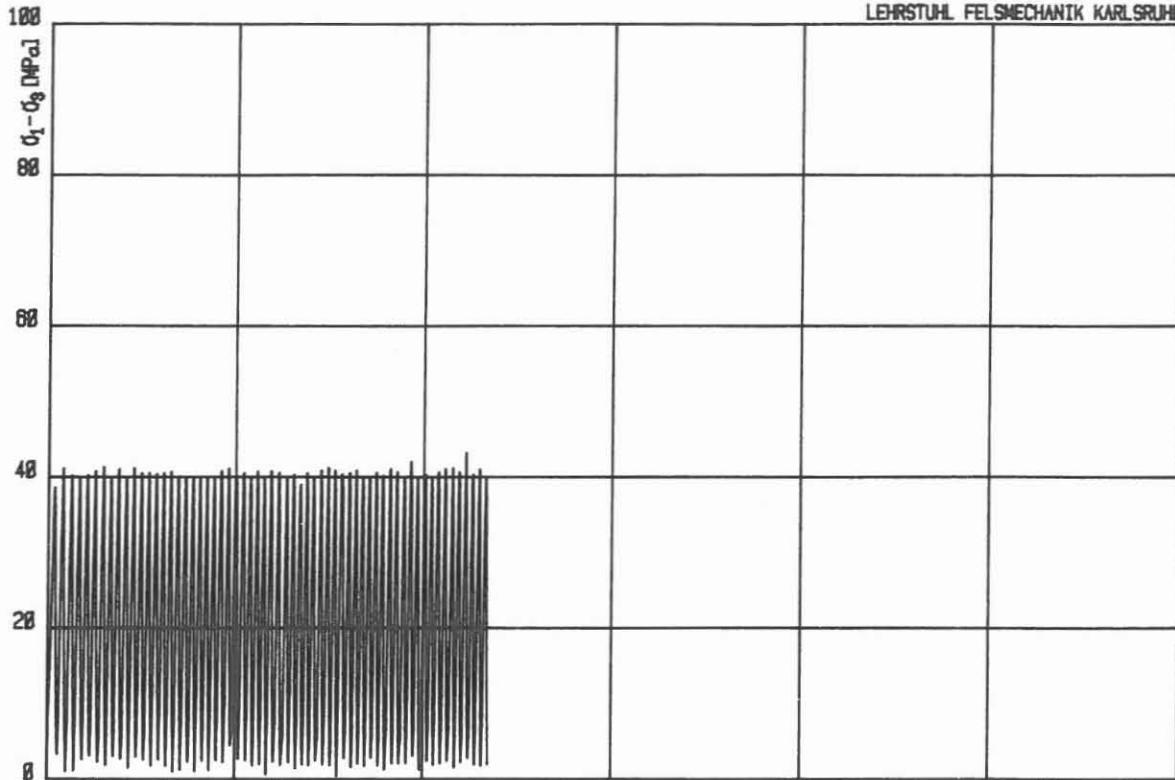
ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: L2T25P65 42 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.600 mm/min Zelldruck: 649.0 bar Zelltemperatur: 249 °C
Abmessungen der Probe: H = 137.0 mm D = 69.3 mm H/D = 1.98



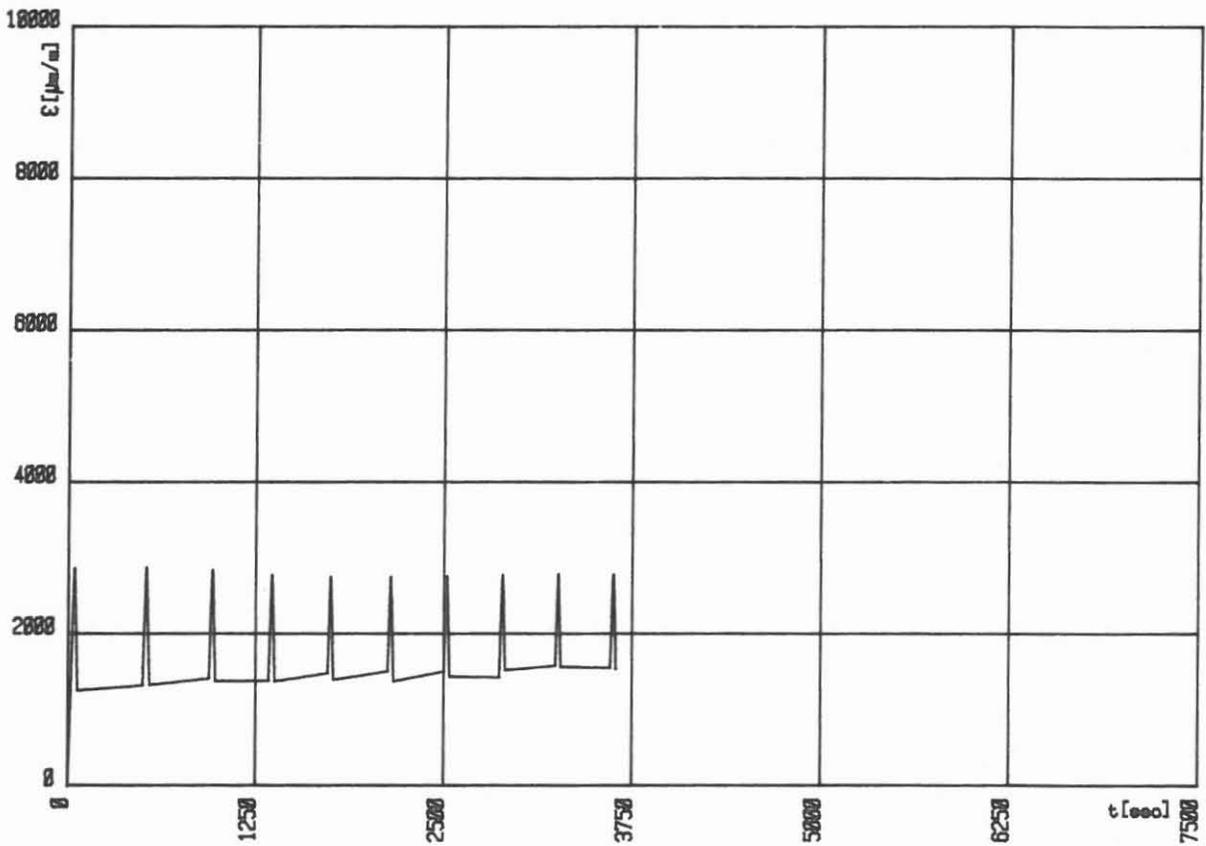
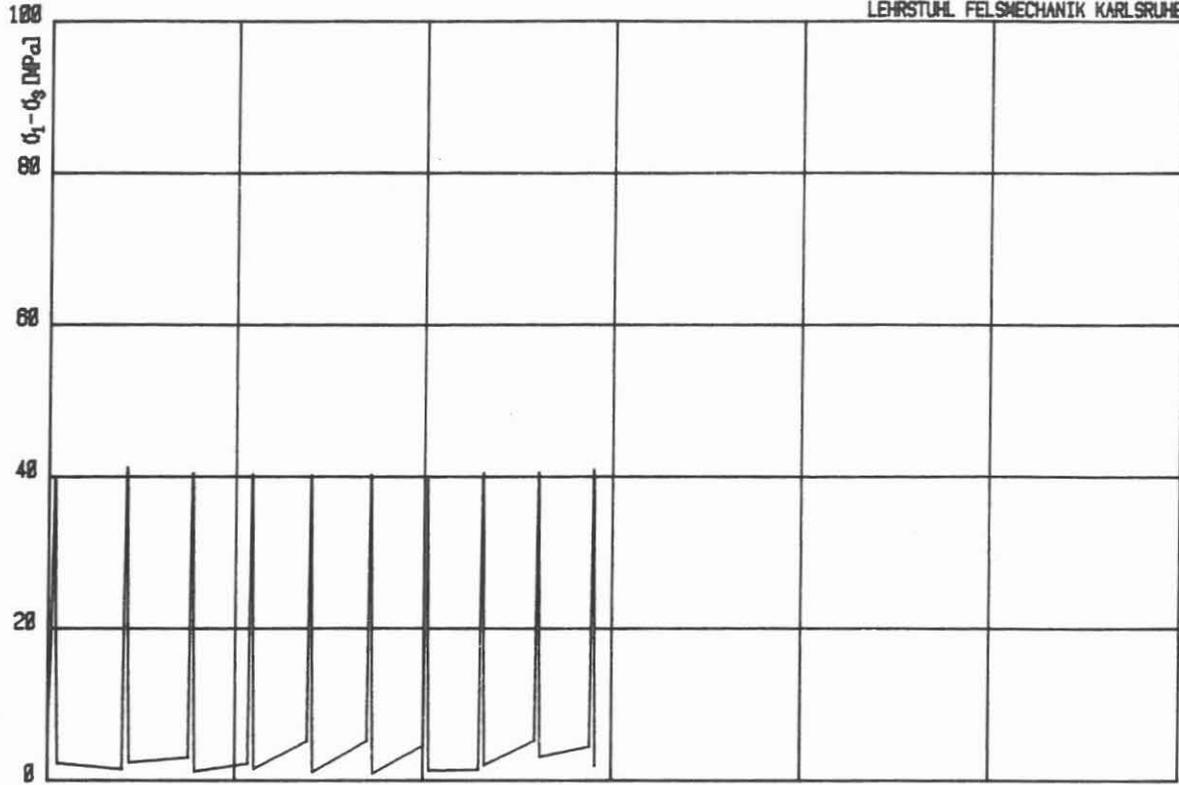
ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: L2T25P65b von 42 bis 99 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0,600 mm/min Zelldruck: 648,3 bar Zelltemperatur: 249 °C
Abmessungen der Probe: H = 137,0 mm D = 69,3 mm H/D = 1,98



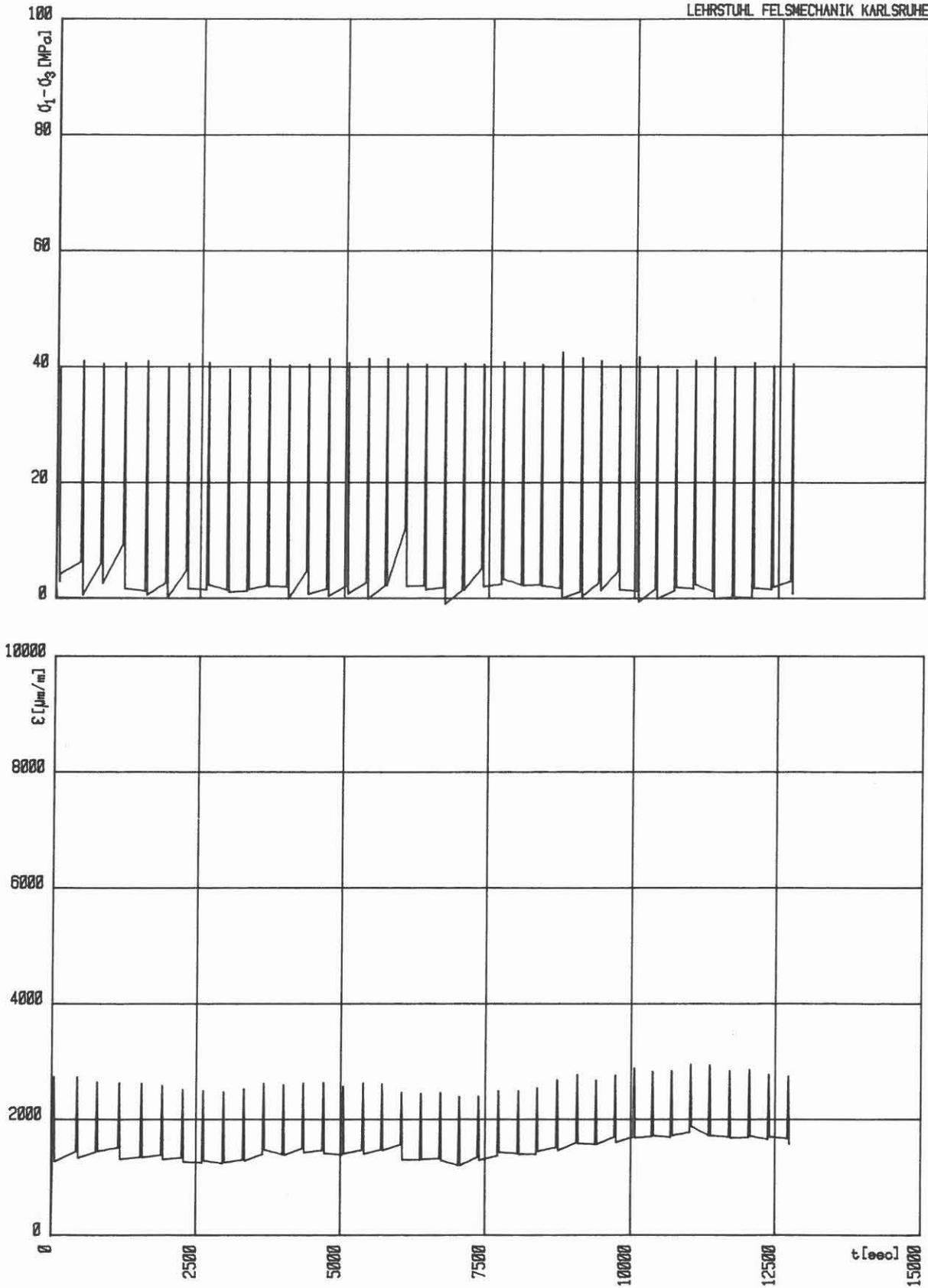
ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: L2T25P65c von 99 bis 160 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.600 mm/min Zelldruck: 648.3 bar Zelltemperatur: 249 °C
Abmessungen der Probes: H = 137.0 mm D = 69.3 mm H/D = 1.98



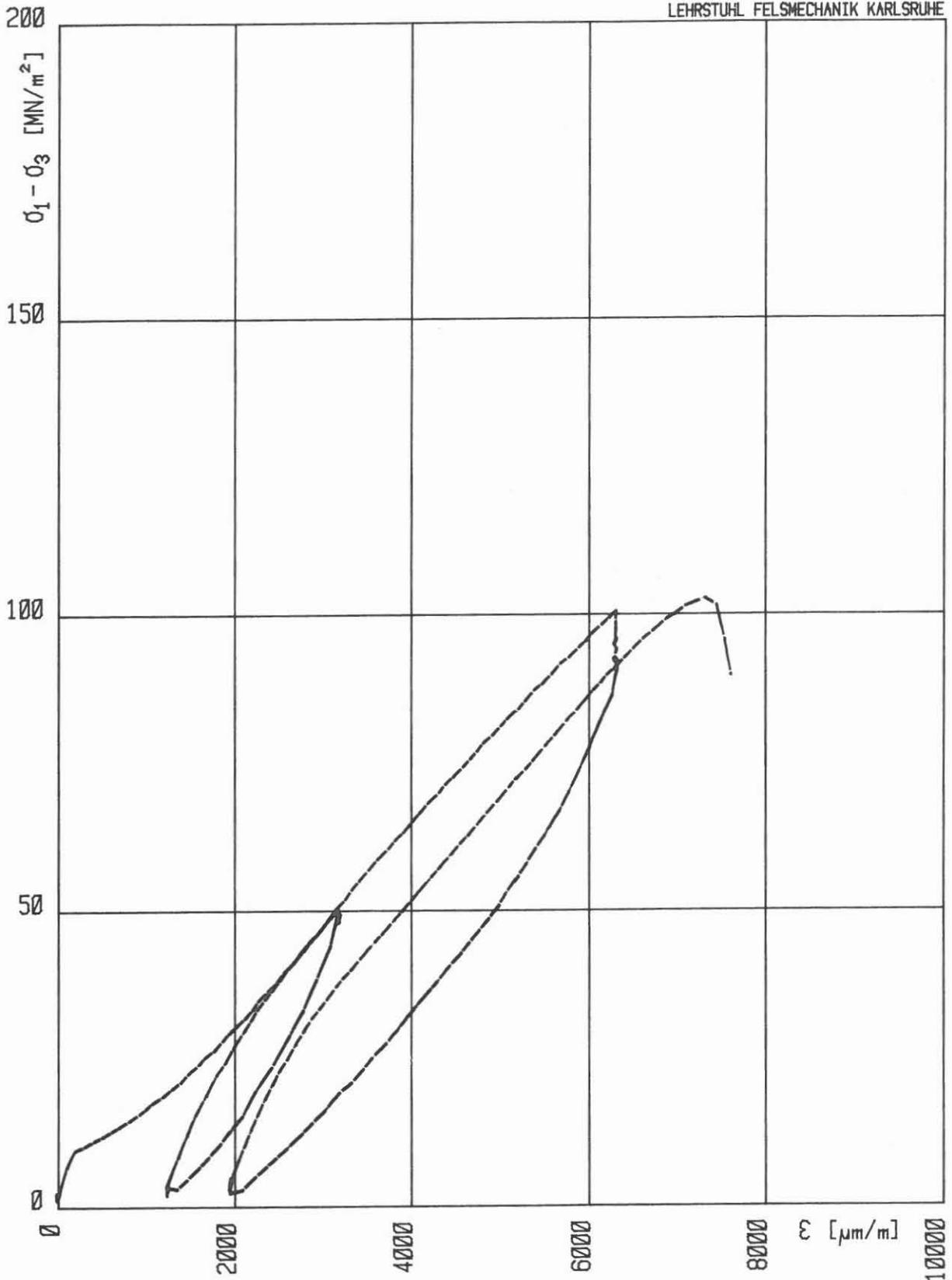
ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: L2T25P65d von 160 bis 260 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0,600 mm/min Zelldruck: 647,8 bar Zelltemperatur: 249 °C
Abmessungen der Probe: H = 137,0 mm D = 69,3 mm H/D = 1,98



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: L2T25P65e von 260 bis 630 Zyklen

Kolben-Vorschub: $\emptyset.600$ mm/min Zelldruck: 648.8 bar Zelltemperatur: 250 °C
Abmessungen der Probe: H = 137.0 mm D = 69.3 mm H/D = 1.98



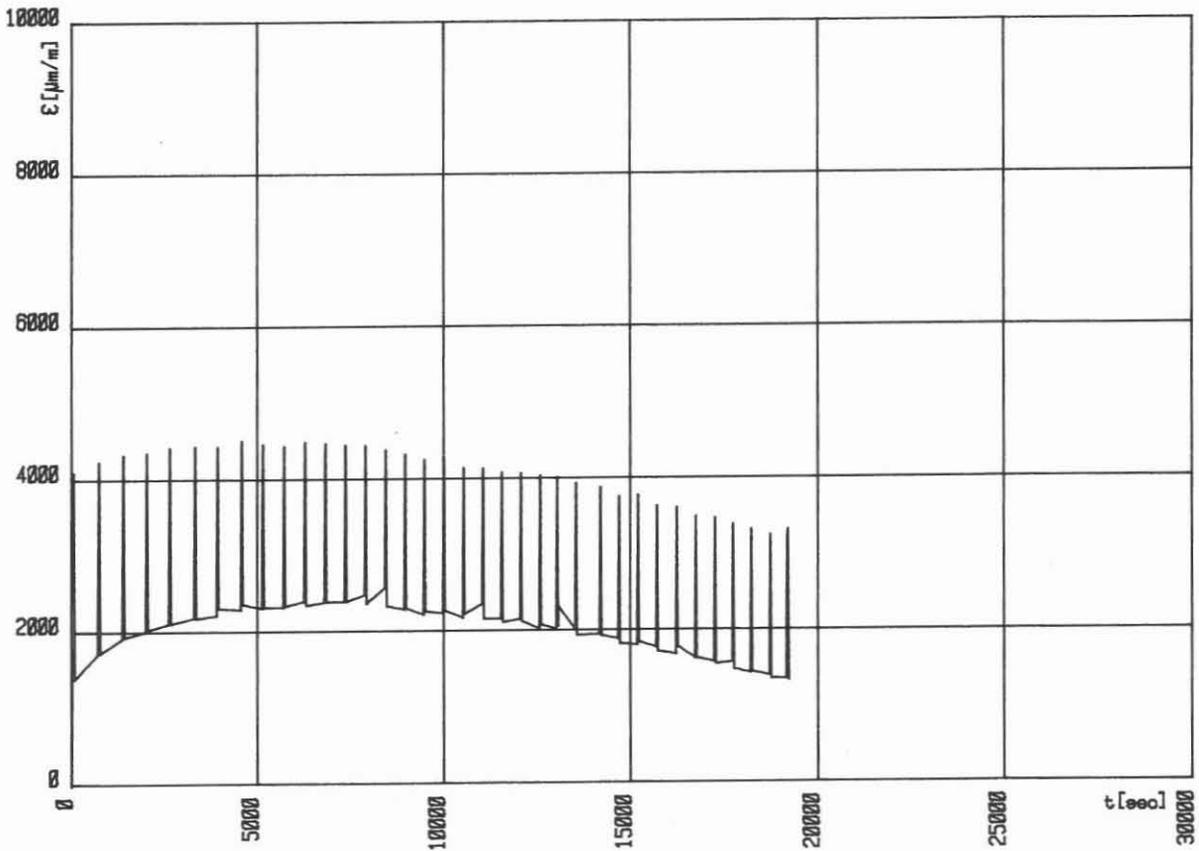
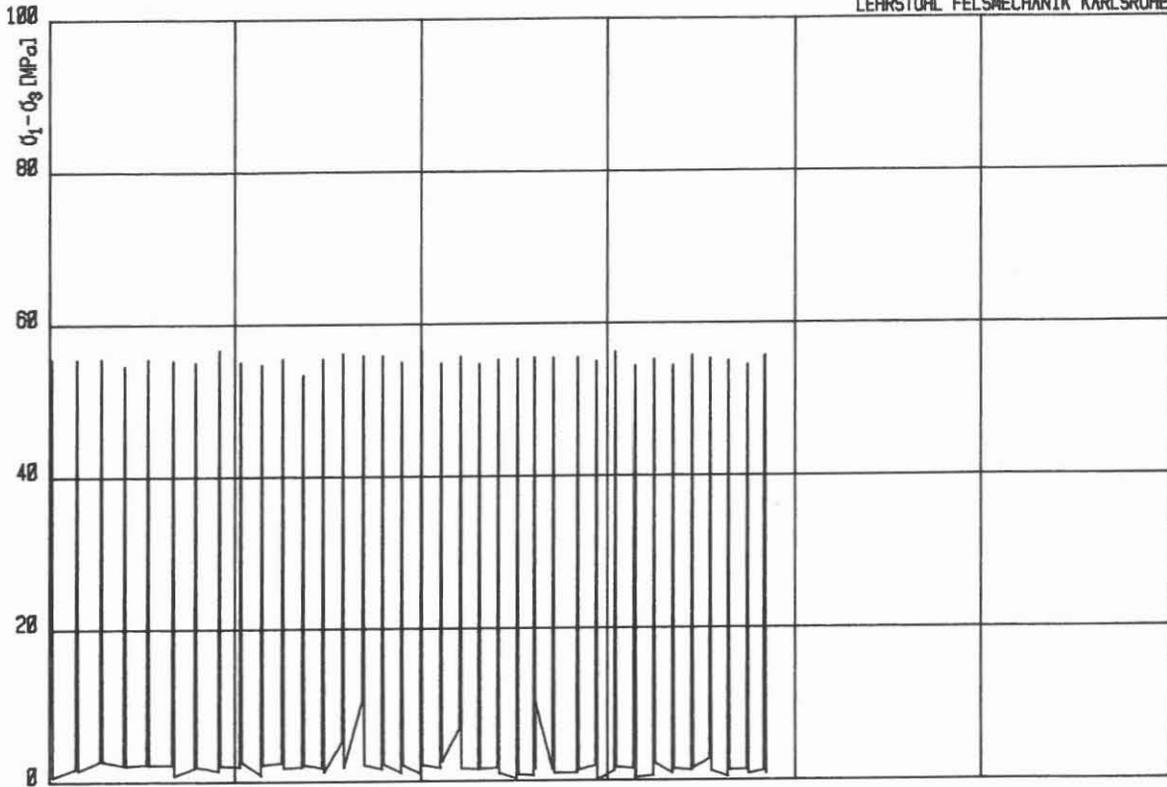
HT-TRIAXIALVERSUCH: L2T25P65f

Kolben-Vorschub: \emptyset .600 mm/min

Zelldruck: 648.8 bar Zelltemperatur: 249 °C

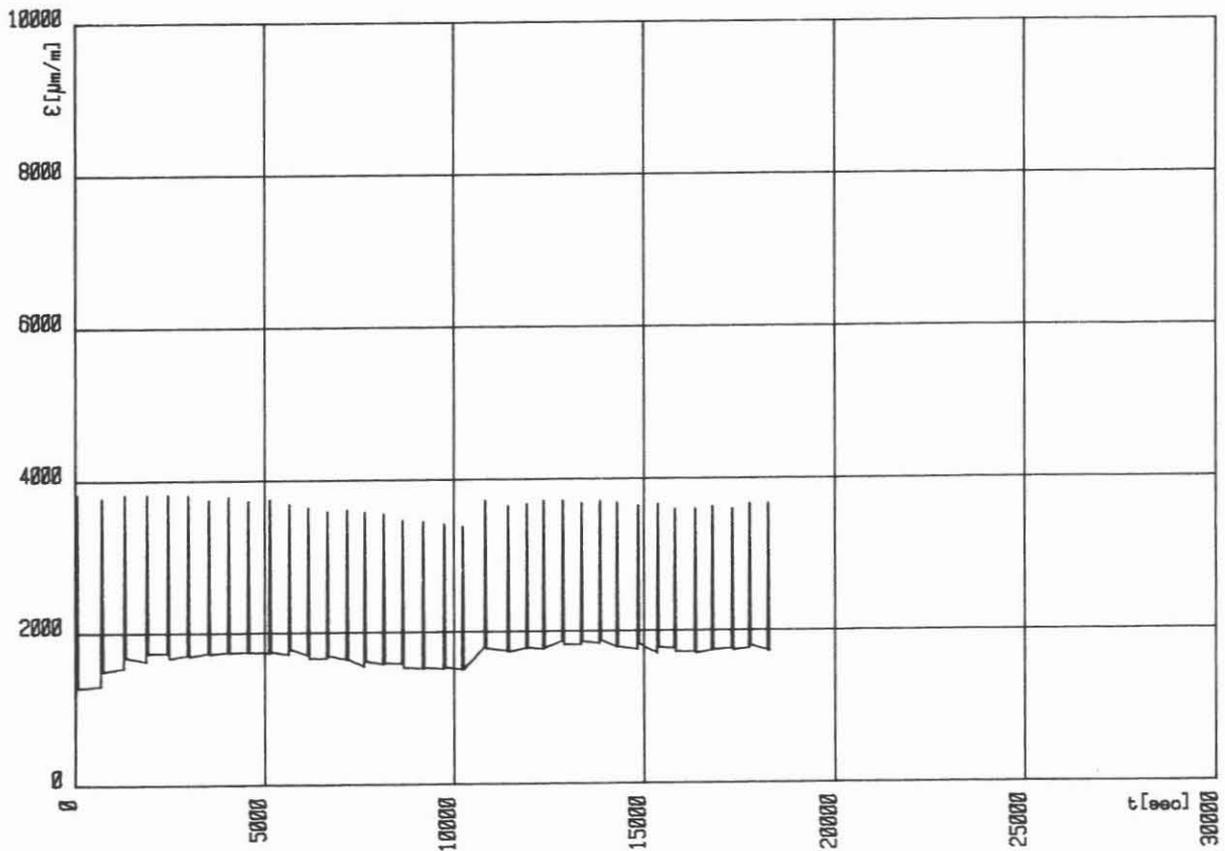
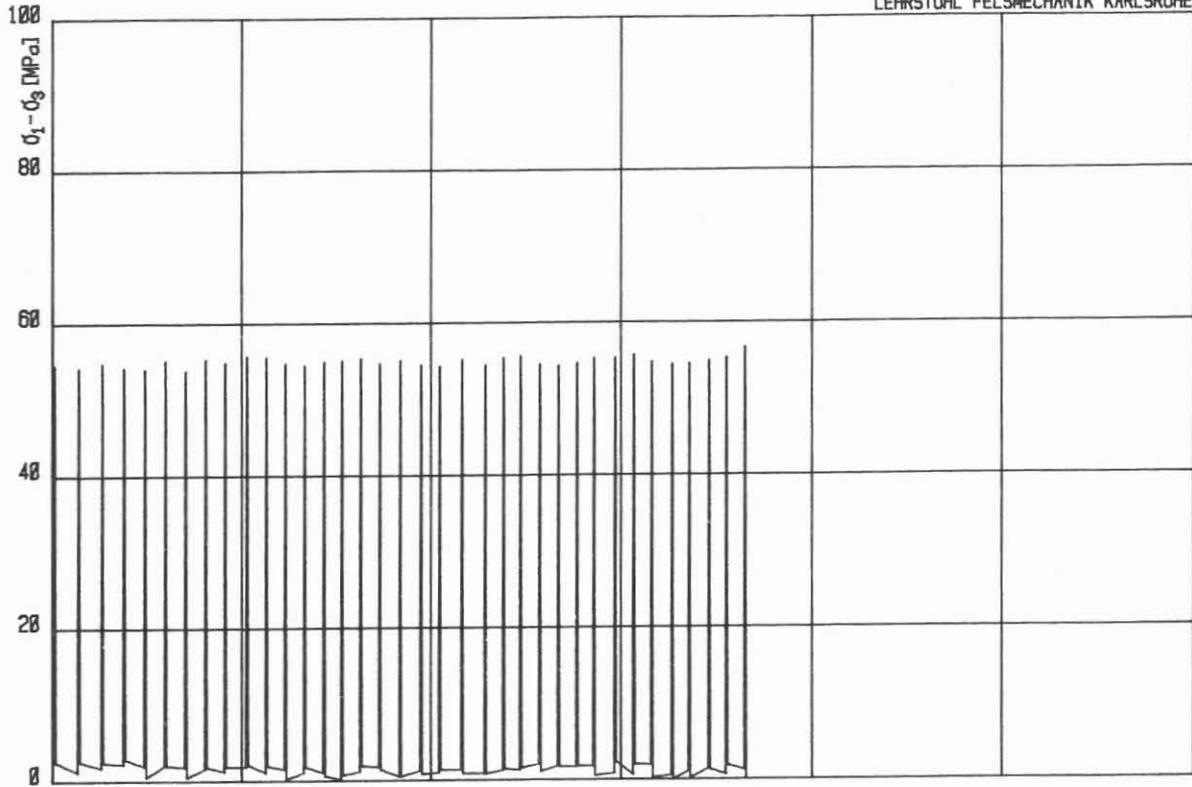
Max. $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 102.71 MN/m^2

Abmessungen der Probe: H = 137.0 mm D = 69.3 mm H/D = 1.98



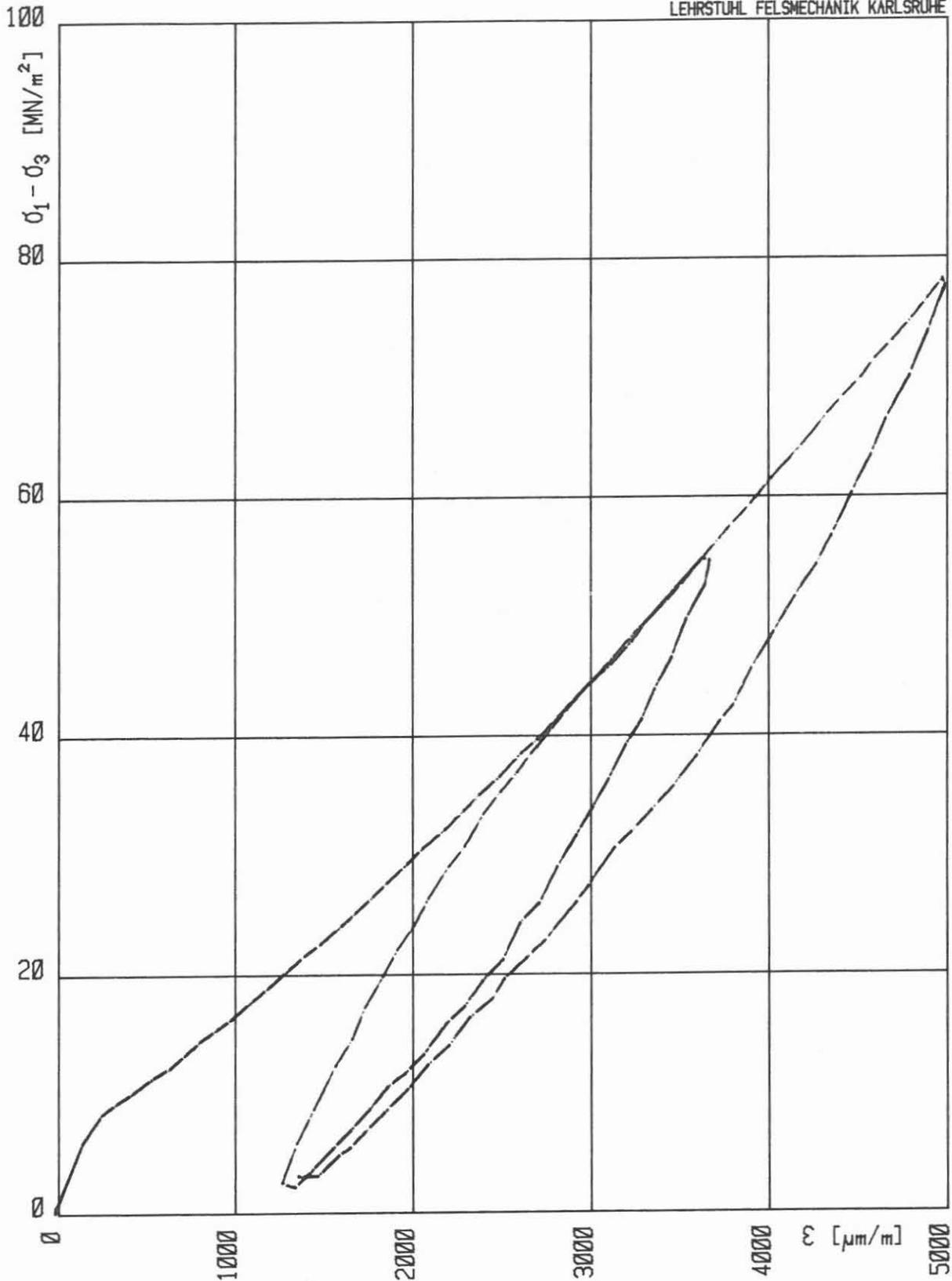
ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: L3T25P65a von 0 bis 350 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.600 mm/min Zelldruck: 647.5 bar Zelltemperatur: 249 °C
Abmessungen der Probe: H = 125.0 mm D = 69.6 mm H/D = 1.80



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: L3T25P65/b von 350 bis 700 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.600 mm/min Zelldruck: 647.6 bar Zelltemperatur: 250 °C
Abmessungen der Probe: H = 125.0 mm D = 69.6 mm H/D = 1.80



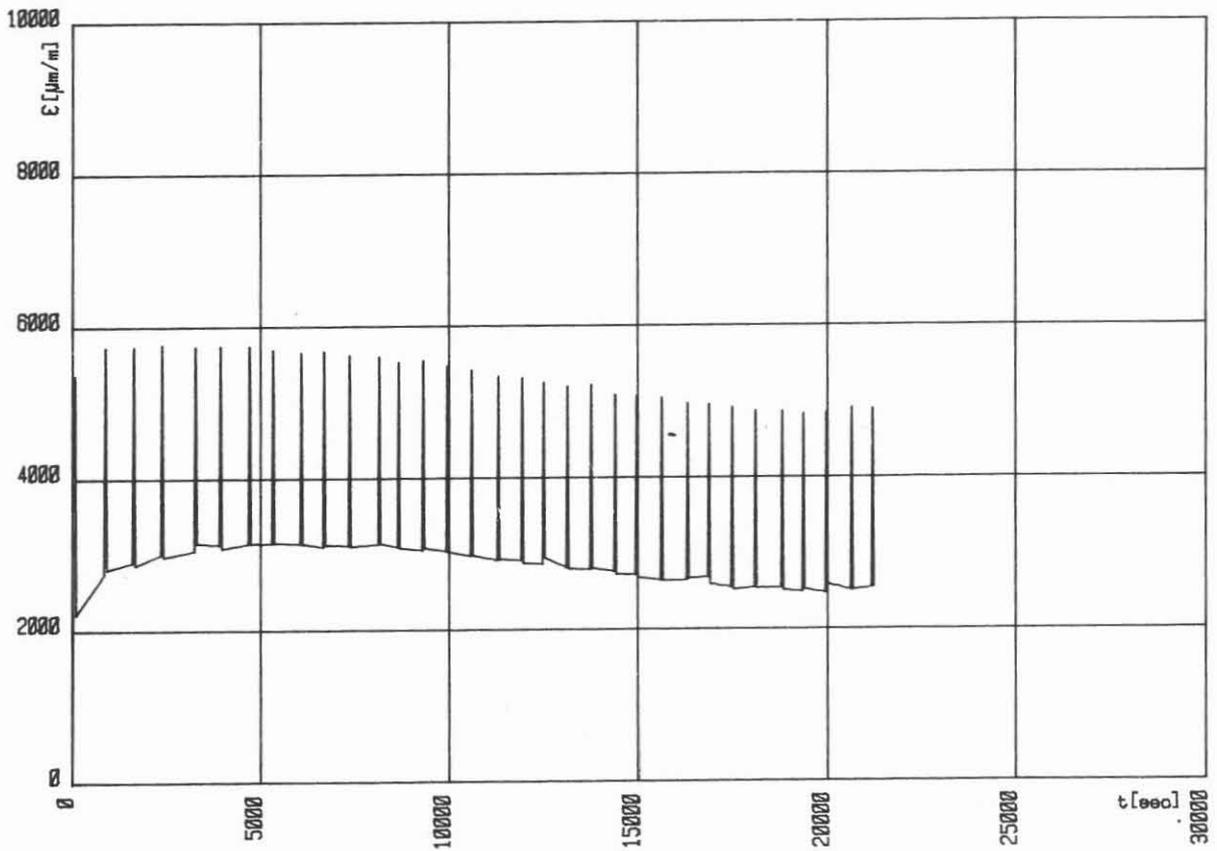
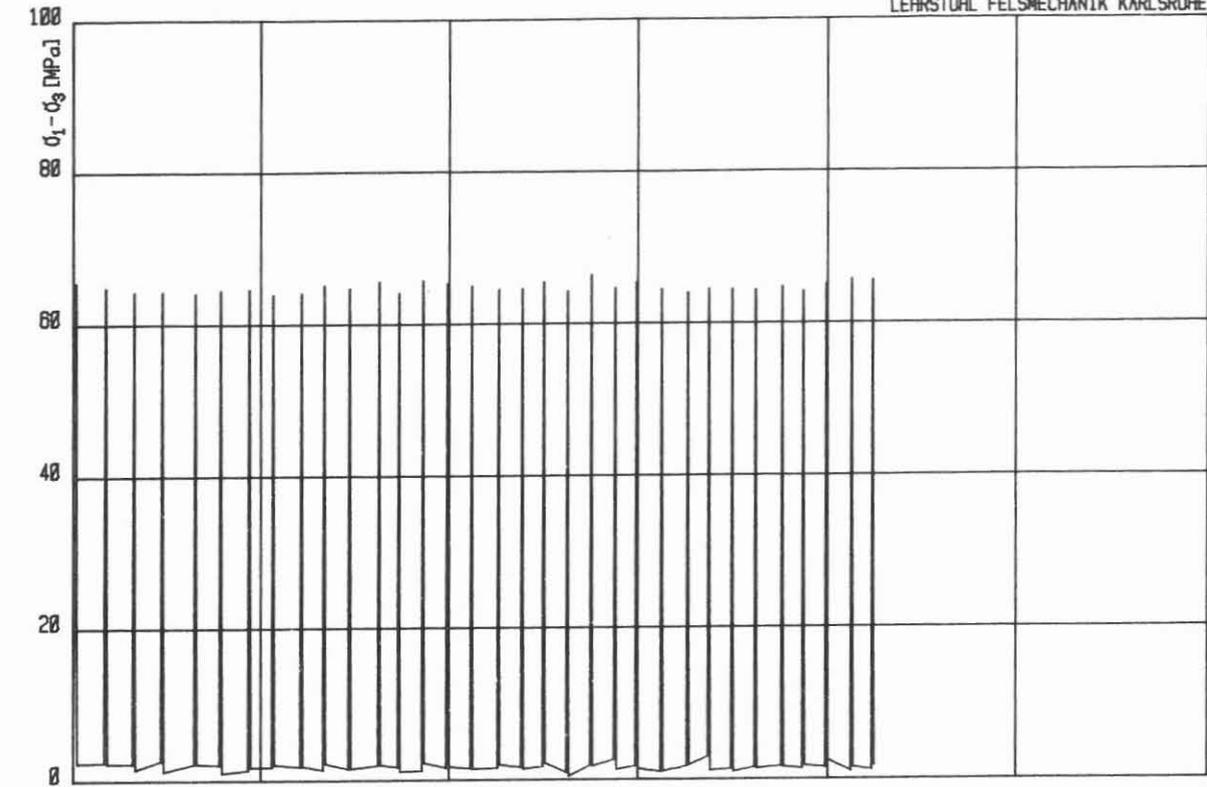
HT-TRIAXIALVERSUCH: L3T25P65/c

Kolben-Vorschub: \emptyset . 600 mm/min

Zelldruck: 649.4 bar Zelltemperatur: 250 °C

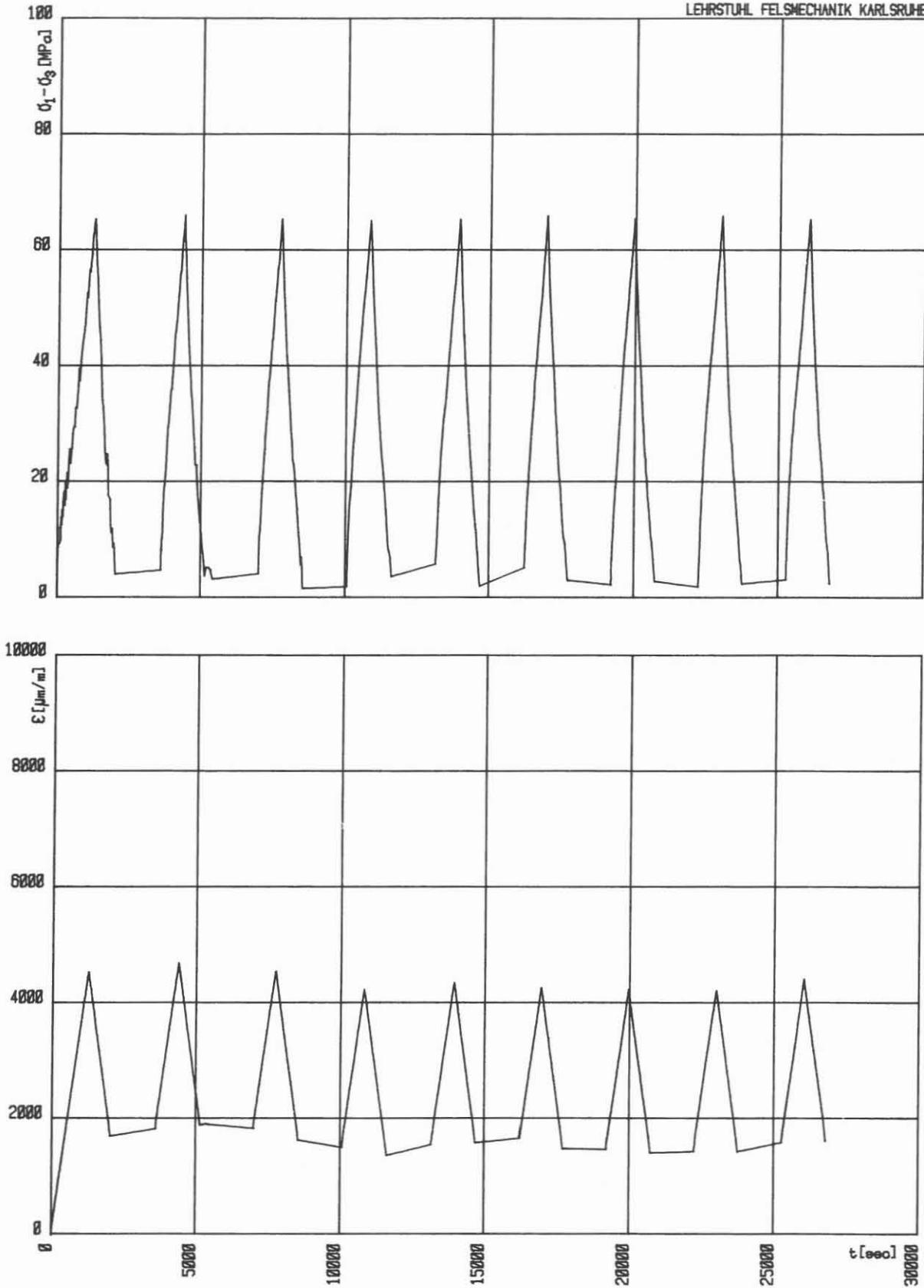
Max. $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 78.16 MN/m^2

Abmessungen der Probe: H = 125.0 mm D = 69.6 mm H/D = 1.80



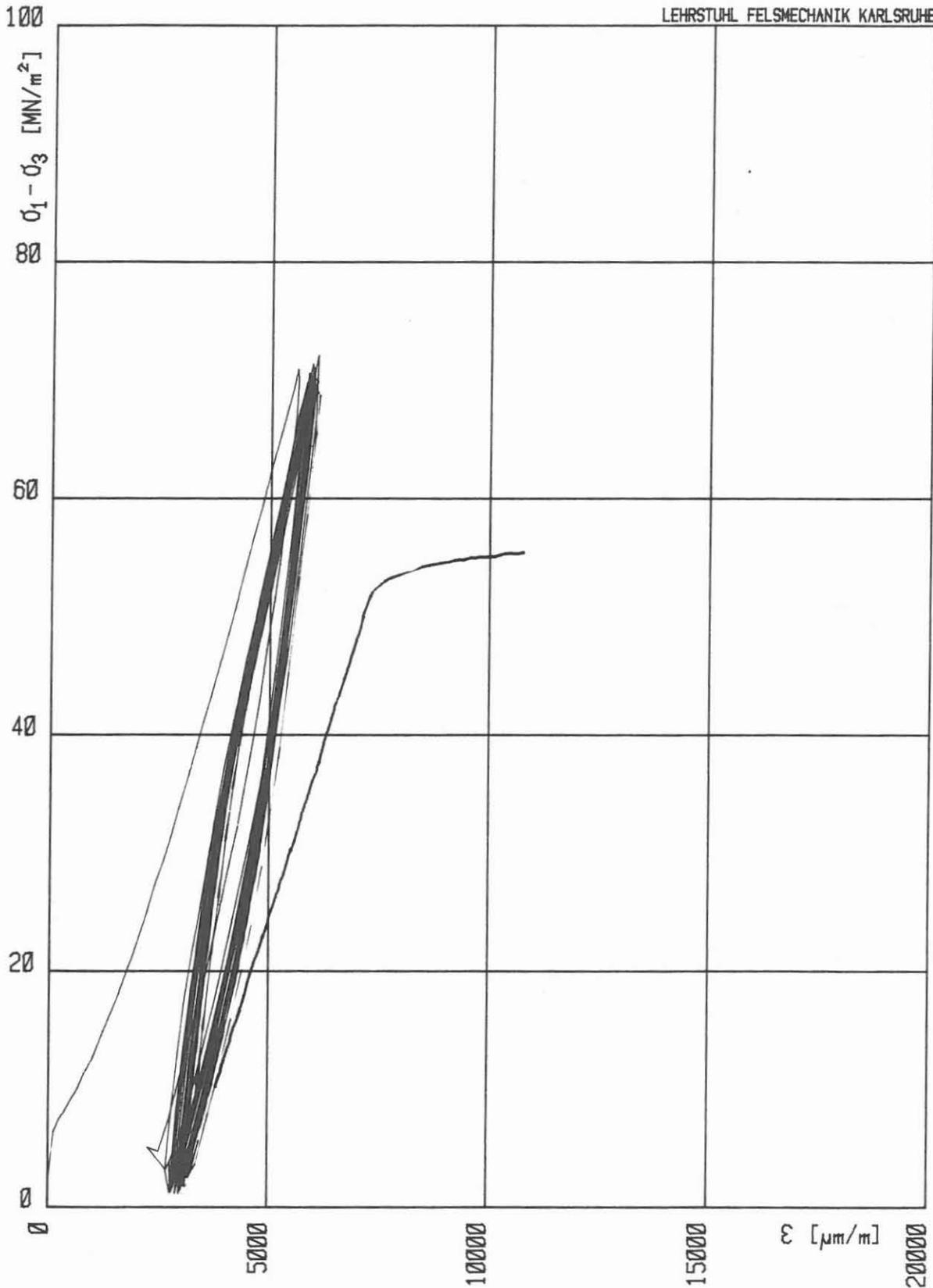
ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: L4T25P65/a 1293.1gr. von 0 bis 320 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.600 mm/min Zelldruck: 647.7 bar Zelltemperatur: 250 °C
Abmessungen der Probe: H = 128.8 mm D = 69.8 mm H/D = 1.85



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: L6T25P65 1394.2gr. von 0 bis 17 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.030 mm/min Zelldruck: 648.9 bar Zelltemperatur: 248 °C
Abmessungen der Probe: H = 138.3 mm D = 69.9 mm H/D = 1.98



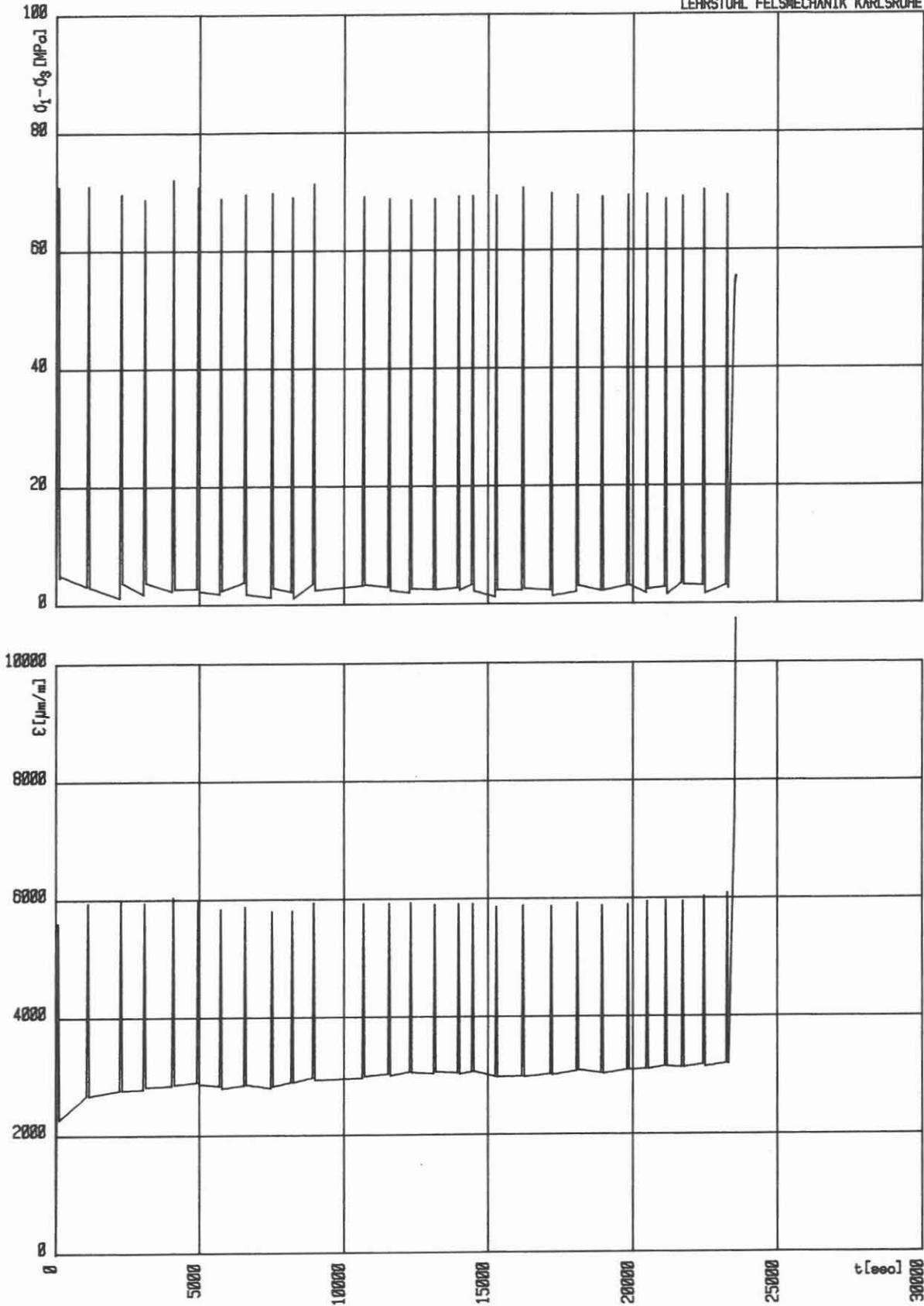
HT-TRIAXIALVERSUCH: L5T25P65 1409.9gr. von 0 bis 275 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.600 mm/min

Zelldruck: 649.5 bar Zelltemperatur: 248 °C

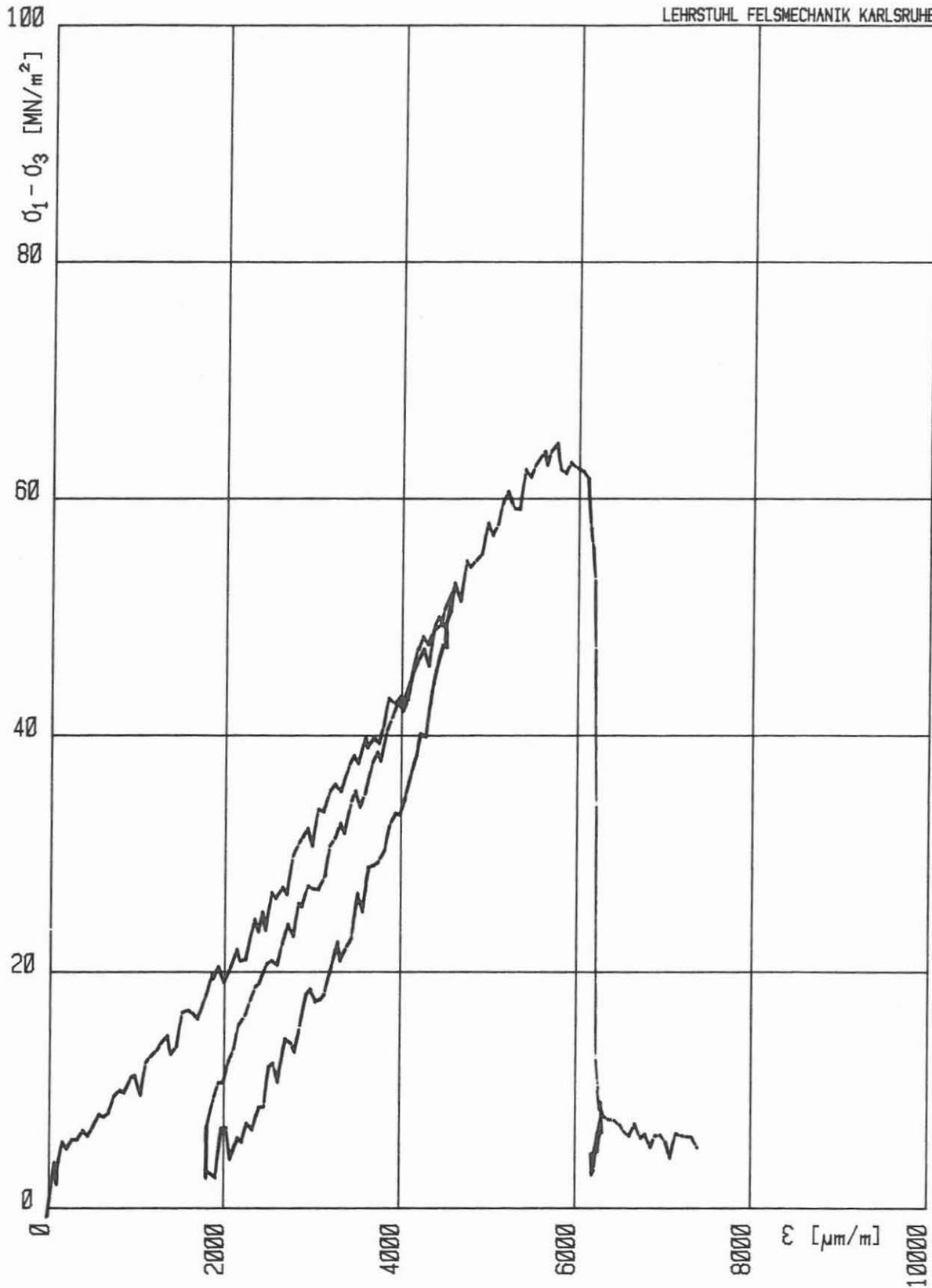
Max. ($\sigma_1 - \sigma_3$): 72.06 MN/m²

Abmessungen der Probe: H = 140.1 mm D = 69.8 mm H/D = 2.01



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: L5T25P65 1409.9gr. von 0 bis 275 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.600 mm/min Zelldruck: 649.5 bar Zelltemperatur: 248 °C
Abmessungen der Probe: H = 140.1 mm D = 69.8 mm H/D = 2.01



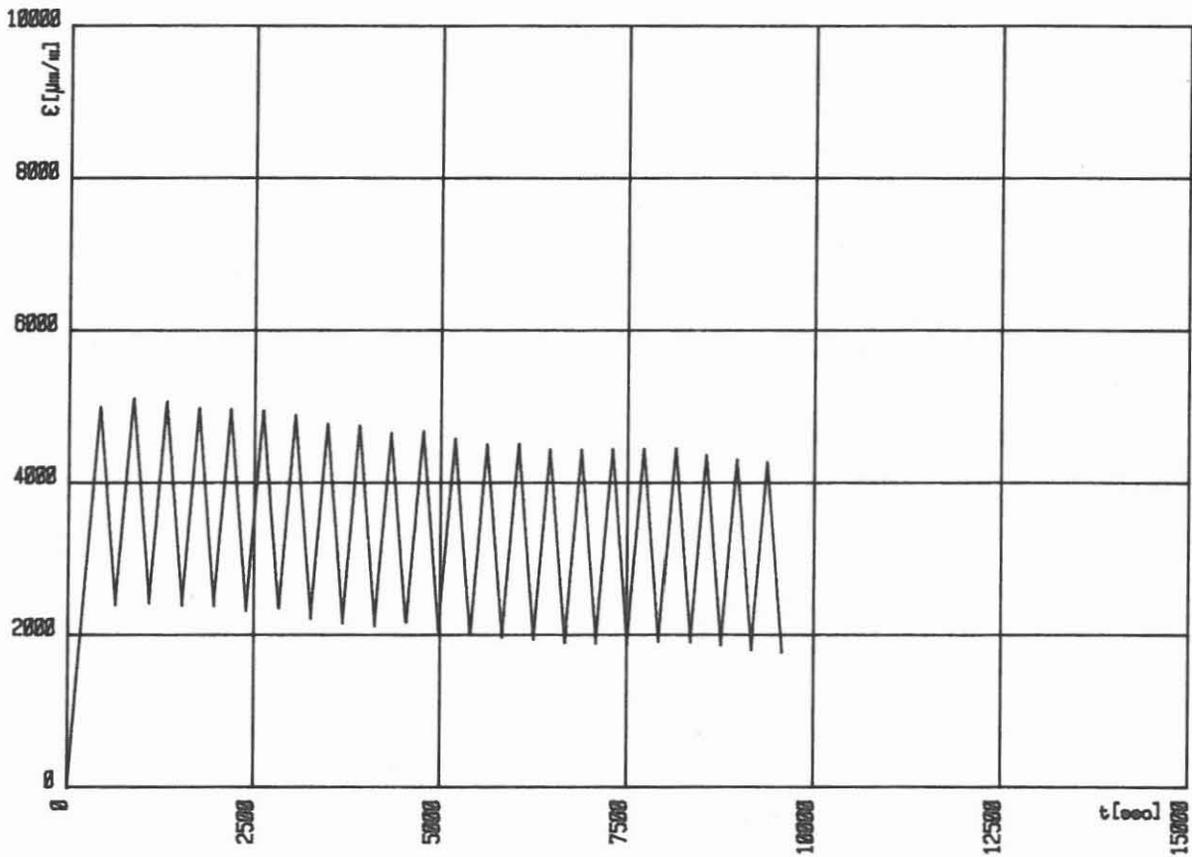
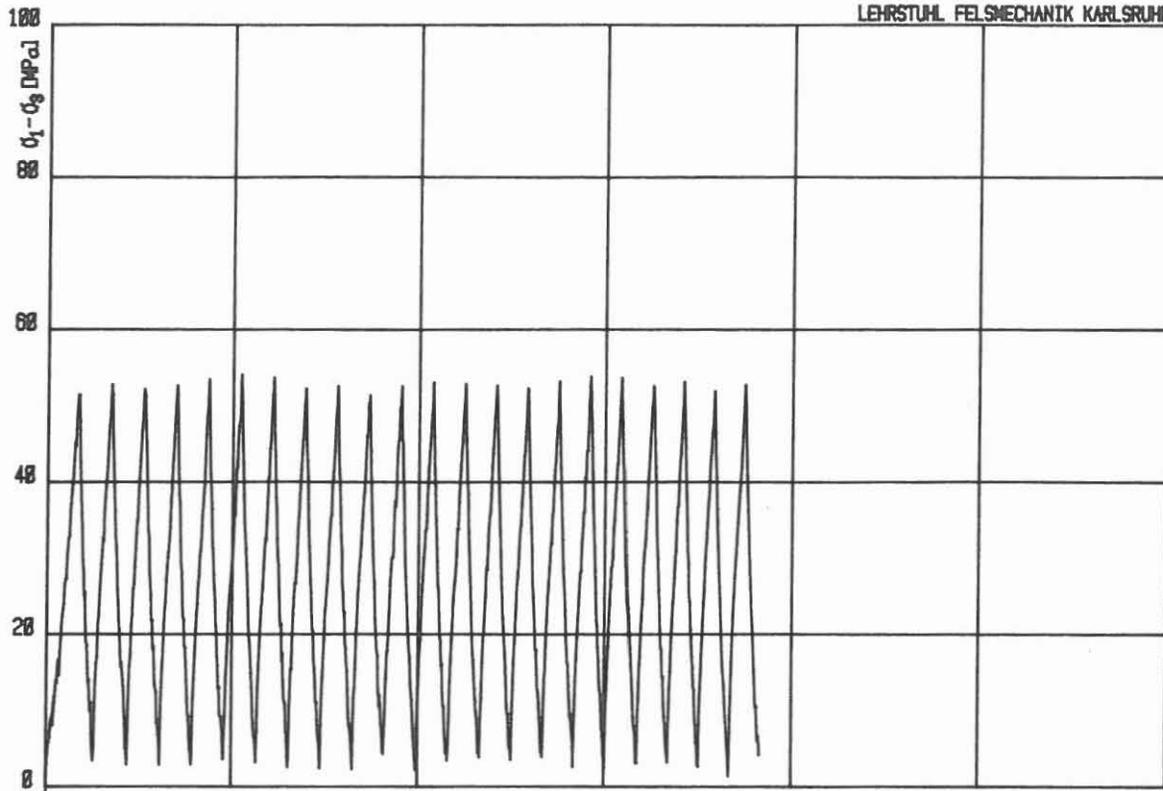
HT-TRIAXIALVERSUCH: M1T25P65

Kolben-Vorschub: \emptyset .100 mm/min

Zelldruck: 650.2 bar Zelltemperatur: 249 °C

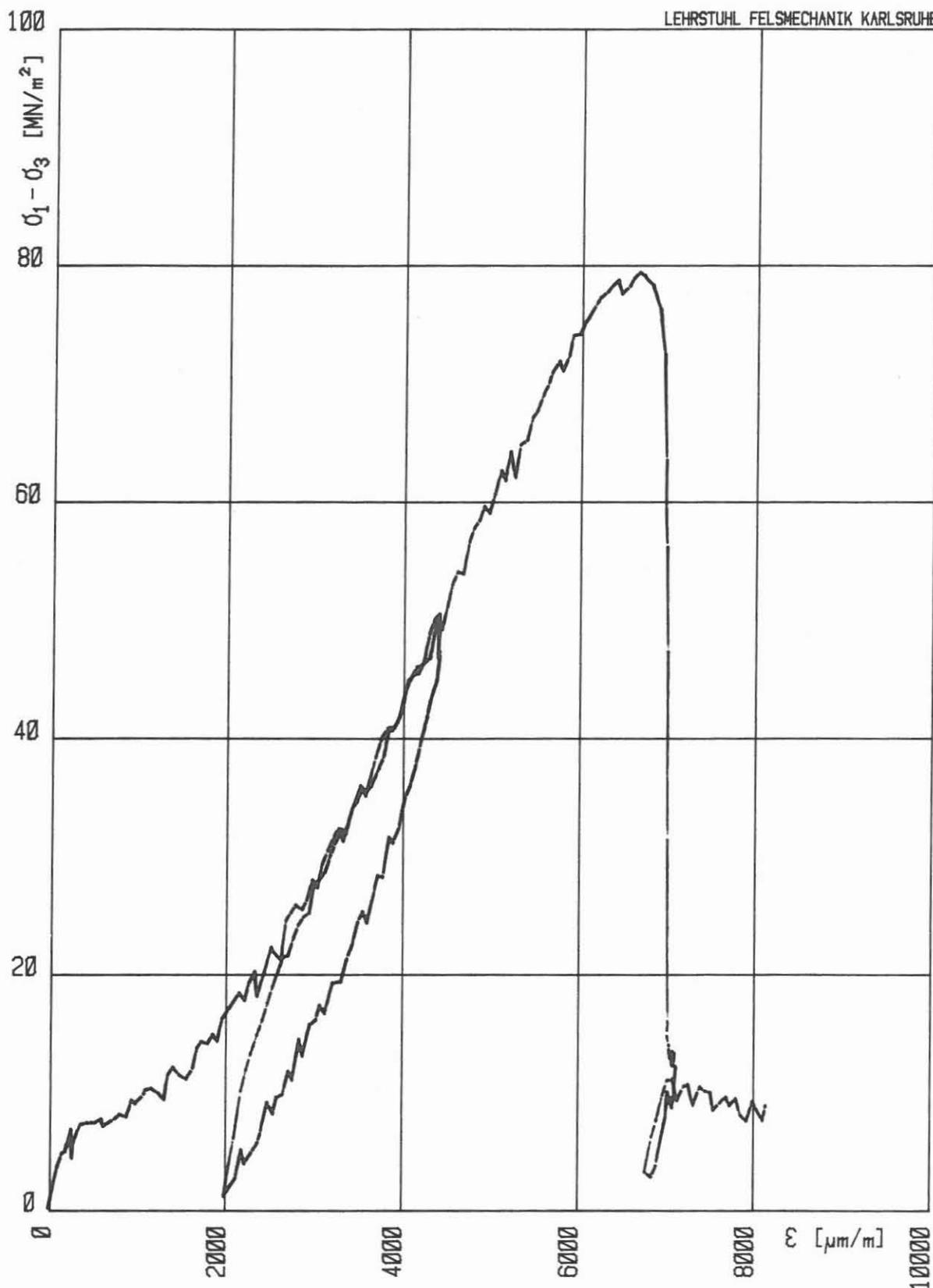
Max. $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 64.69 MN/m^2

Abmessungen der Probe: H = 139.0 mm D = 70.2 mm H/D = 1.98



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: M2T25P65 von 0 bis 20 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 650.9 bar Zelltemperatur: 251 °C
Abmessungen der Probes: H = 138.6 mm D = 70.0 mm H/D = 1.98



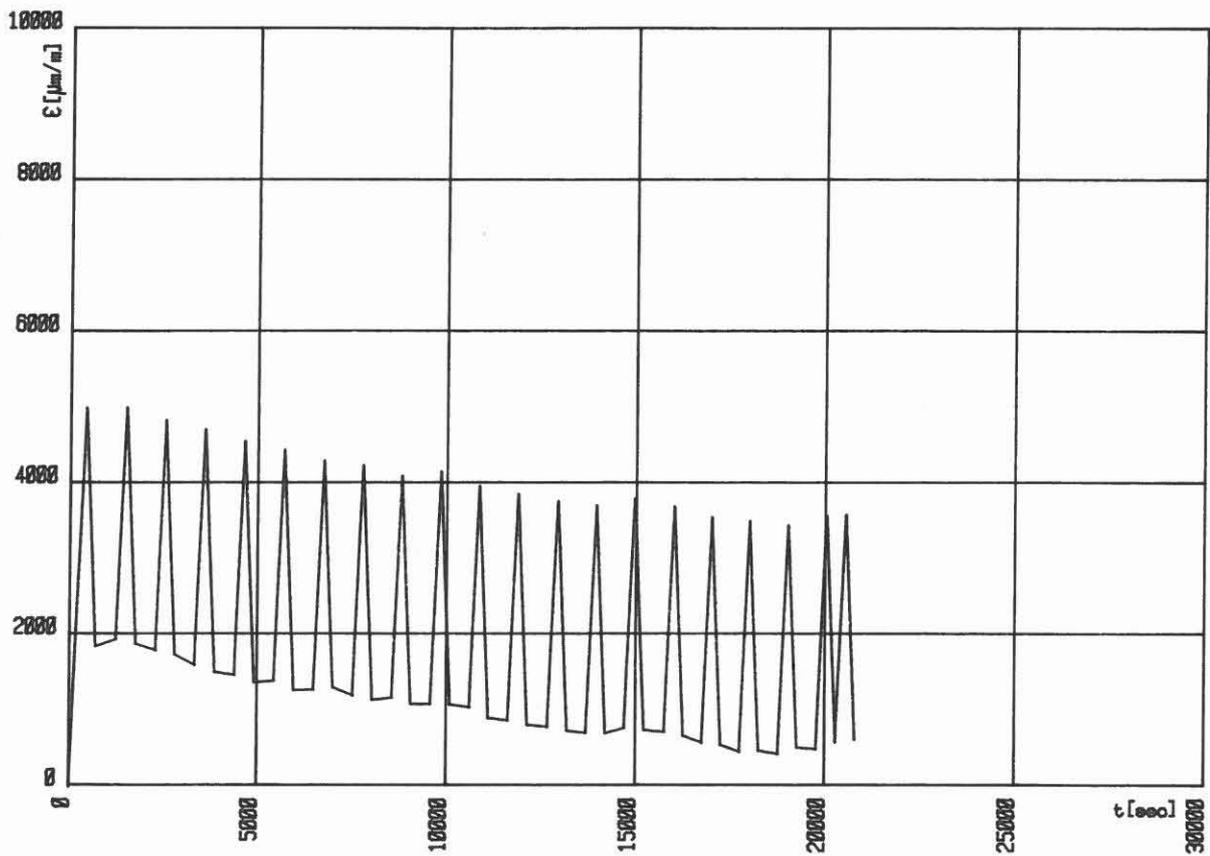
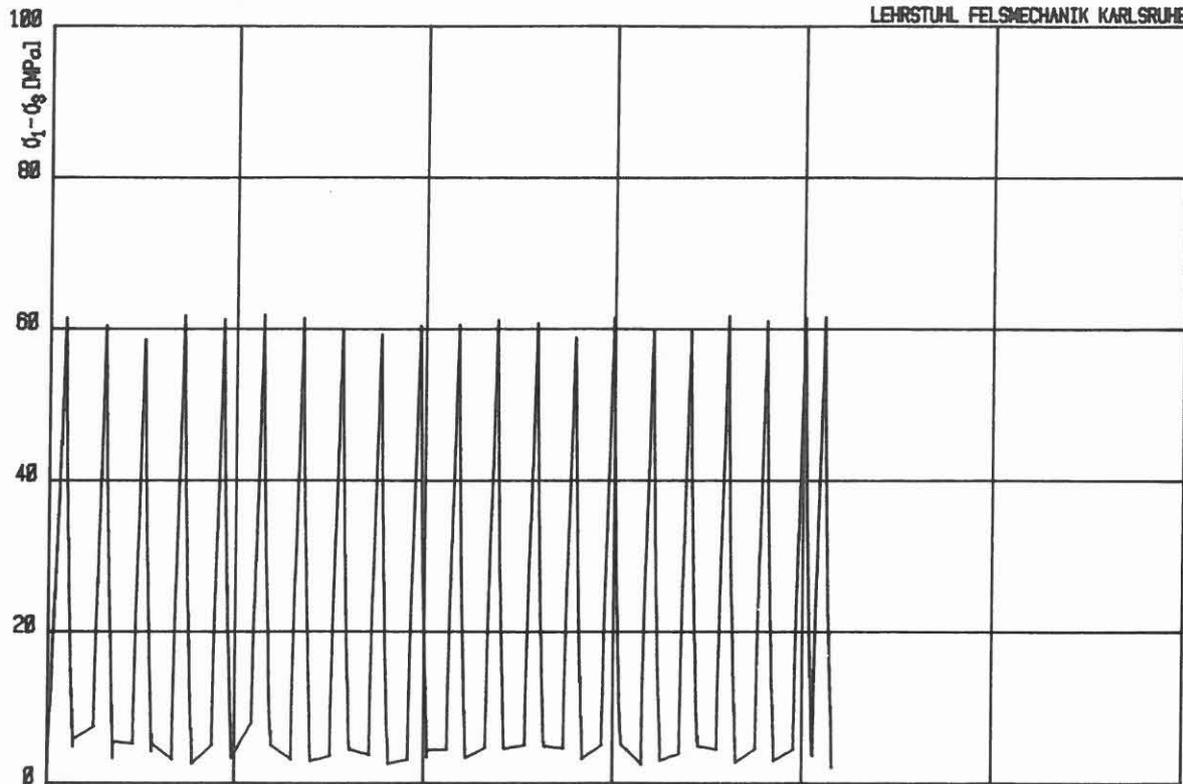
HT-TRIAxIALVERSUCH: M2T25P65 Nach Zyklenversuch

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min

Zelldruck: 651.0 bar Zelltemperatur: 250 °C

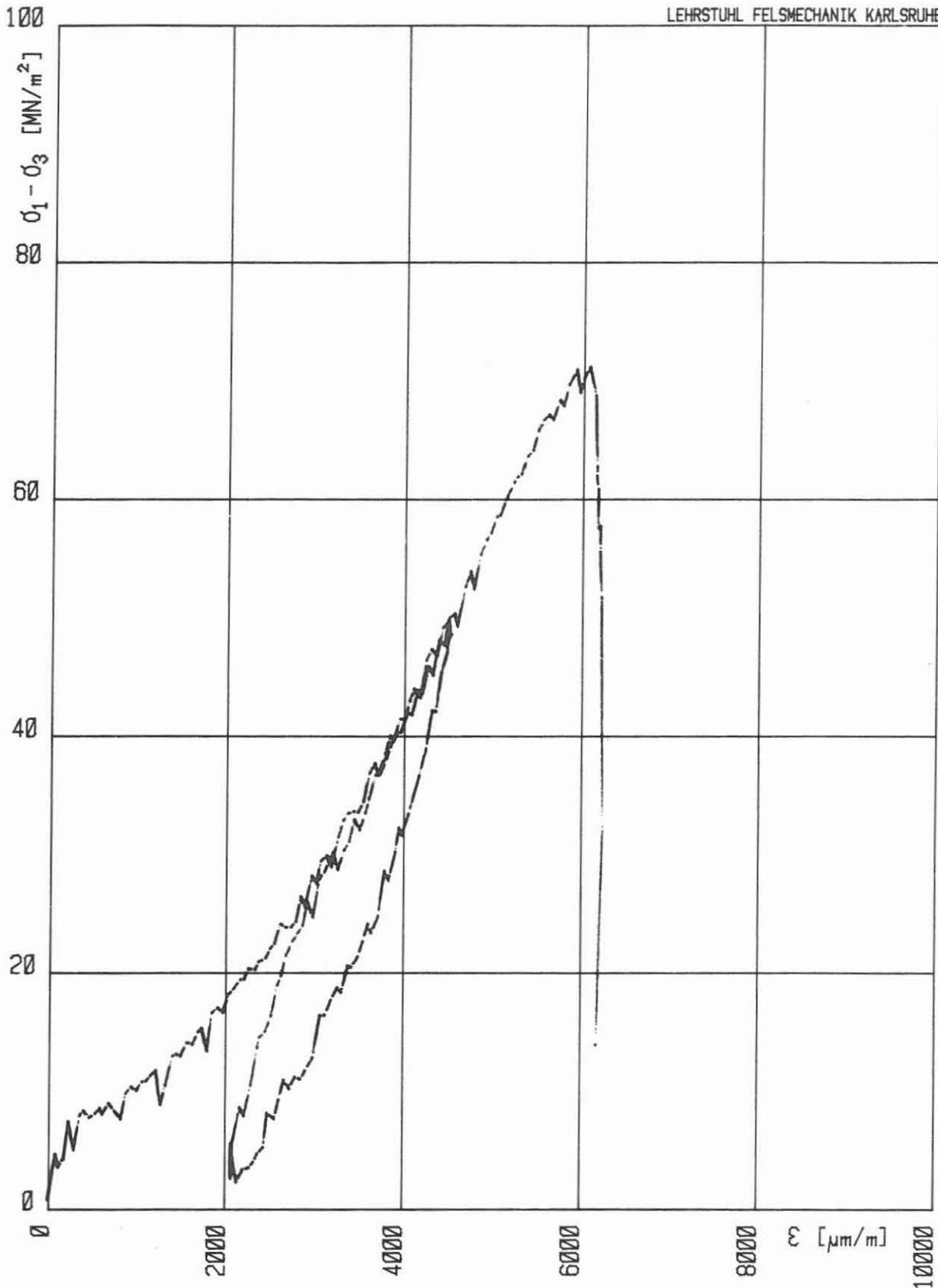
Max. $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 79.43 MN/m²

Abmessungen der Probe: H = 138.6 mm D = 70.0 mm H/D = 1.98



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: M3T25P65 von 0 bis 40 Zyklen

Kolben-Vorschub: $\dot{\epsilon}$ 100 mm/min Zelldruck: 649.2 bar Zelltemperatur: 251 °C
Abmessungen der Probe: H = 141.6 mm D = 70.0 mm H/D = 2.02



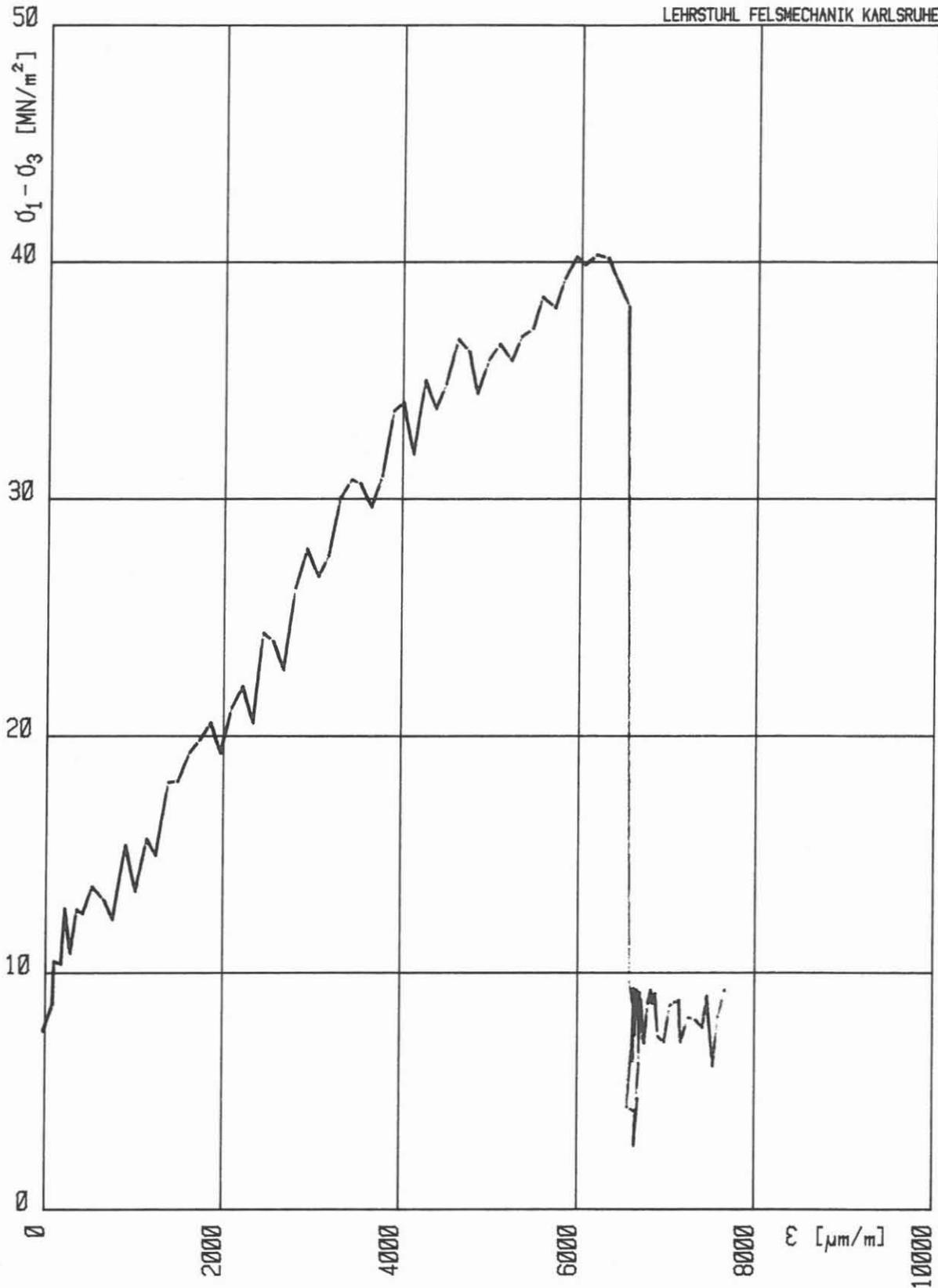
HT-TRIAXIALVERSUCH: M3T25P65 nach Zyklenversuch

Kolben-Vorschub: $\emptyset.100$ mm/min

Zelldruck: 649.9 bar Zelltemperatur: 251 °C

Max. $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 71.22 MN/m^2

Abmessungen der Probe: H = 141.6 mm D = 70.0 mm H/D = 2.02



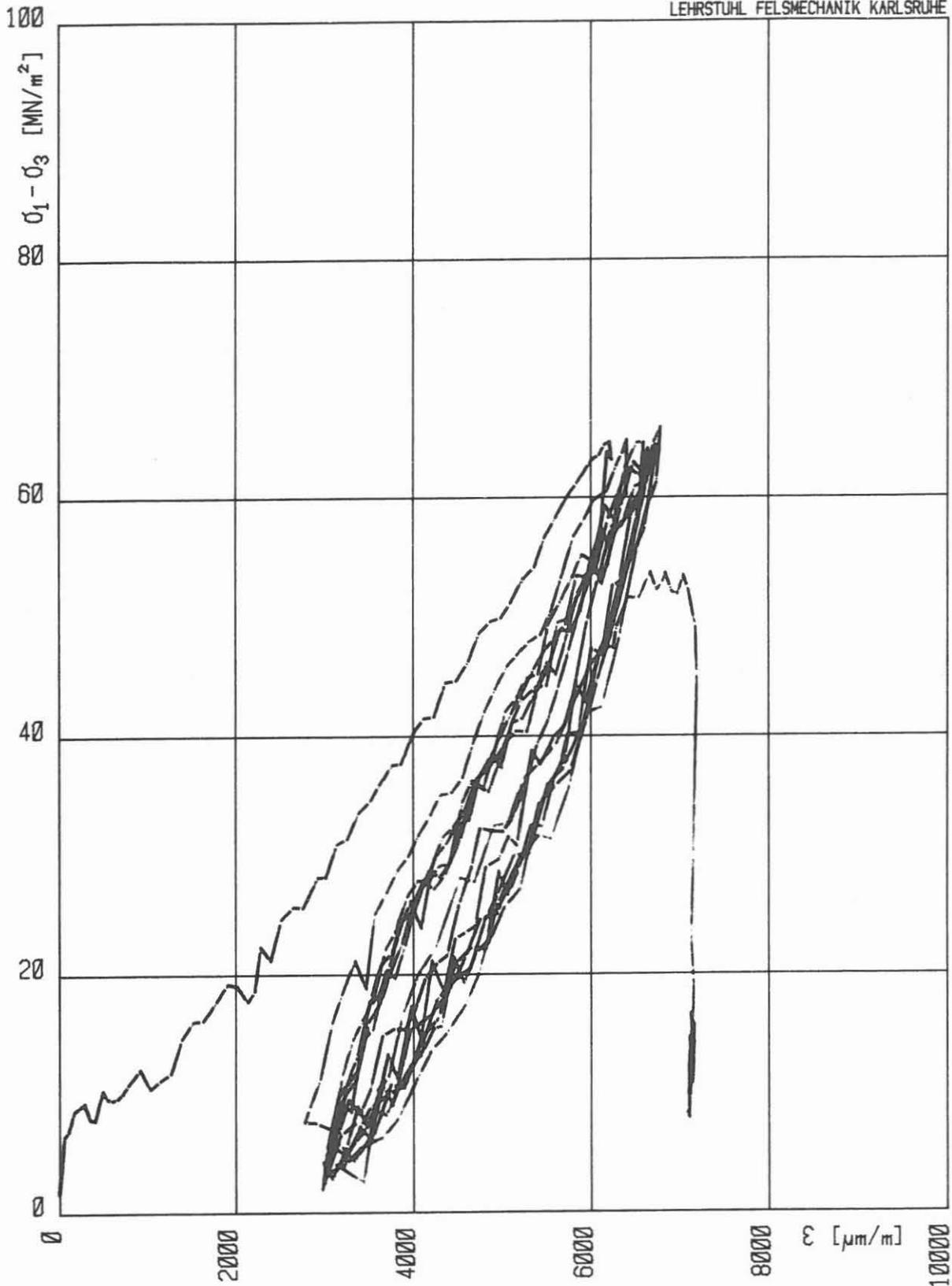
HT-TRIAxIALVERSUCH: M4T25P65

Kolben-Vorschub: $\emptyset.100$ mm/min

Zelldruck: 650.4 bar Zelltemperatur: 250 °C

Max. $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 40.30 MN/m^2

Abmessungen der Probe: H = 137.5 mm D = 70.0 mm H/D = 1.96



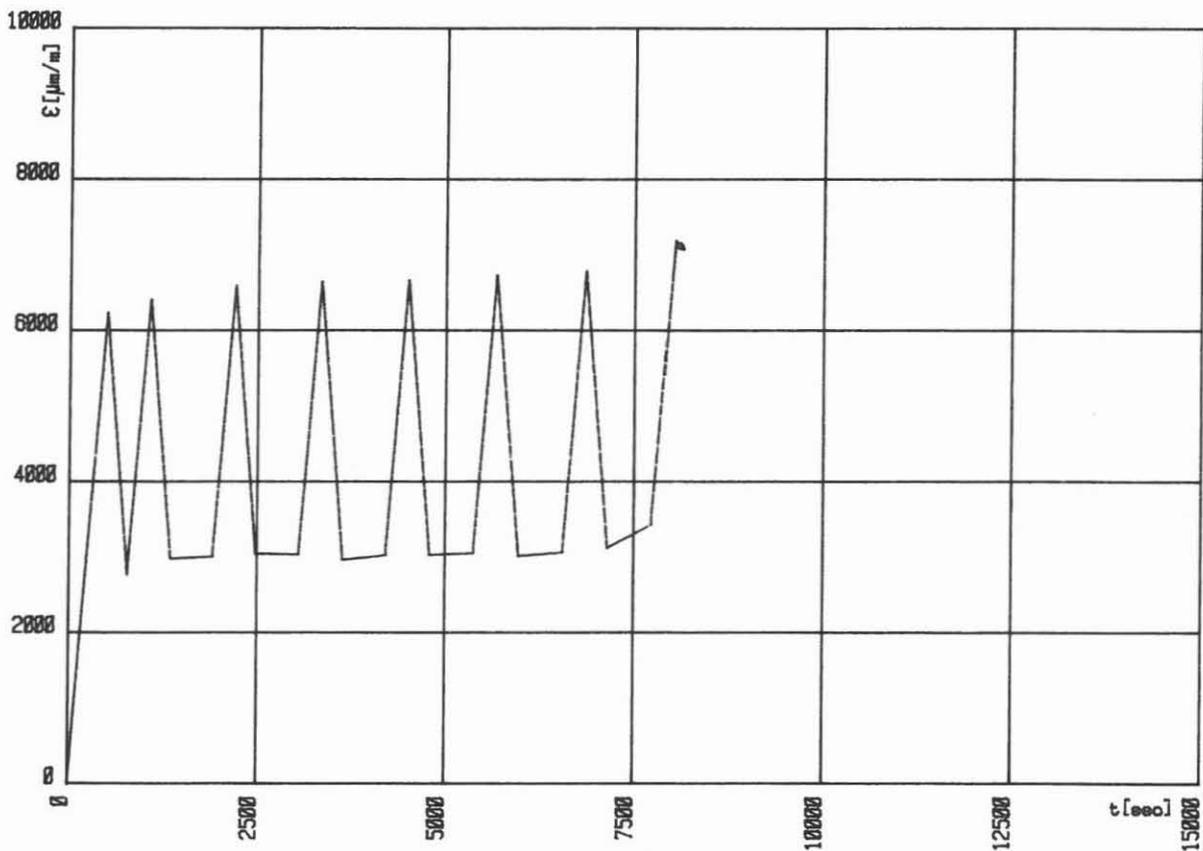
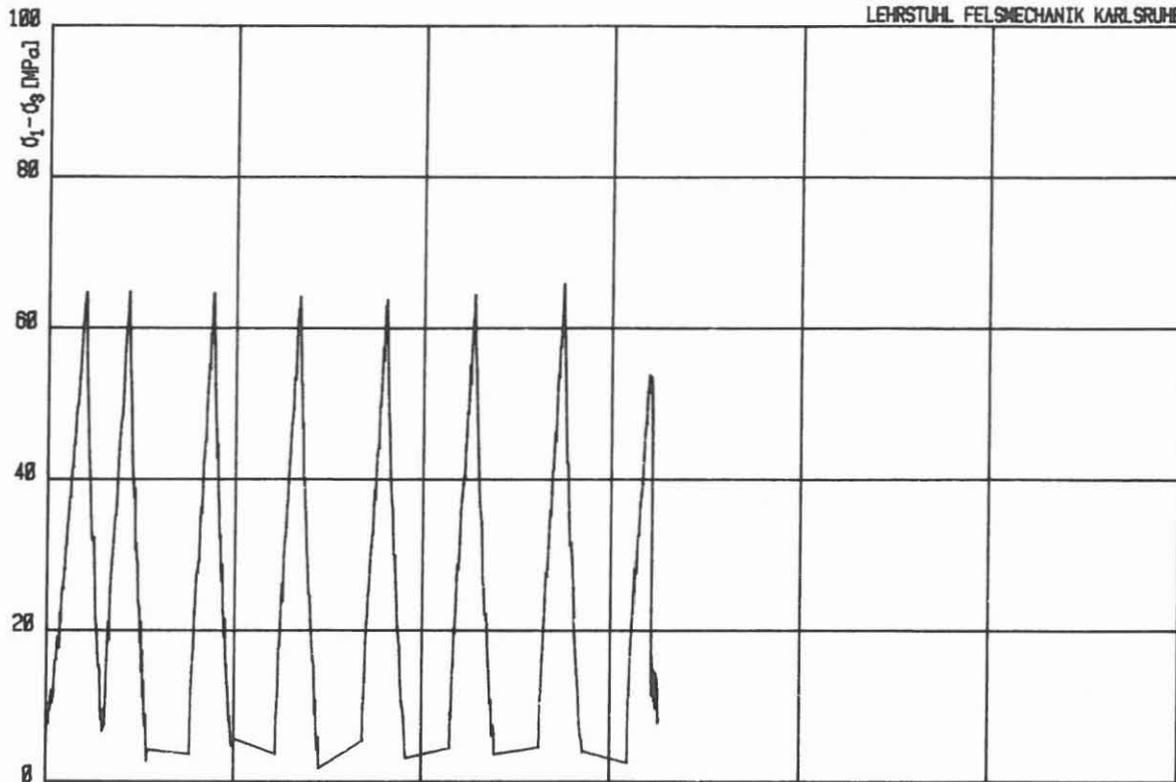
HT-TRIAxIALVERSUCH: M5T25P65 von 0 bis 14 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min

Zelldruck: 646.9 bar Zelltemperatur: 250 °C

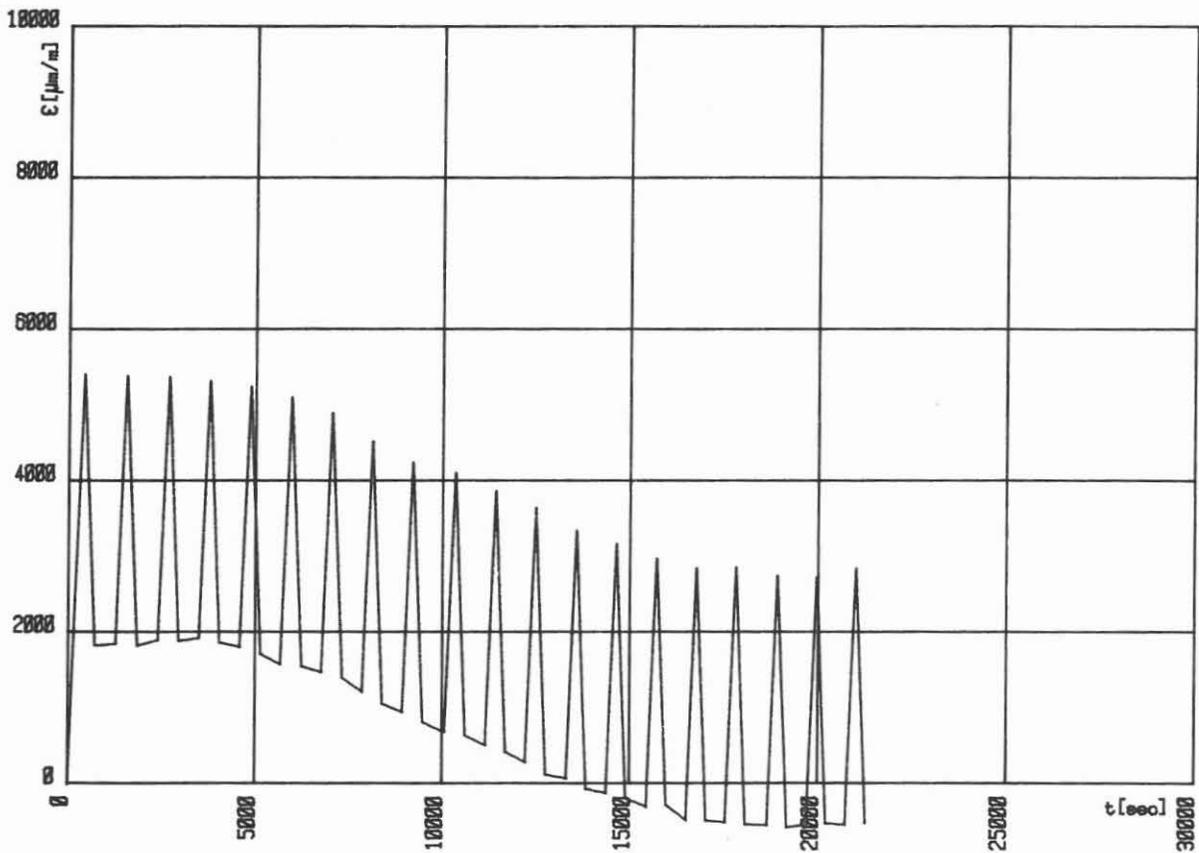
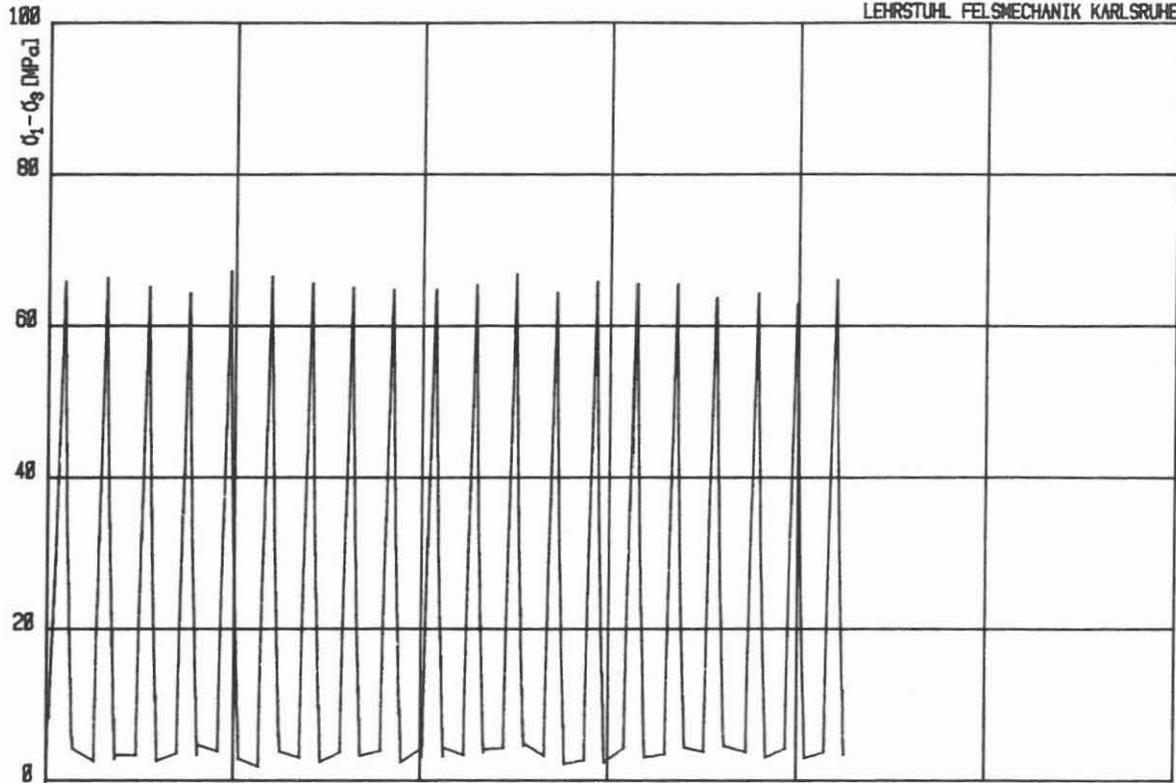
Max. ($\sigma_1 - \sigma_3$): 65.87 MN/m²

Abmessungen der Probe: H = 133.9 mm D = 70.0 mm H/D = 1.91



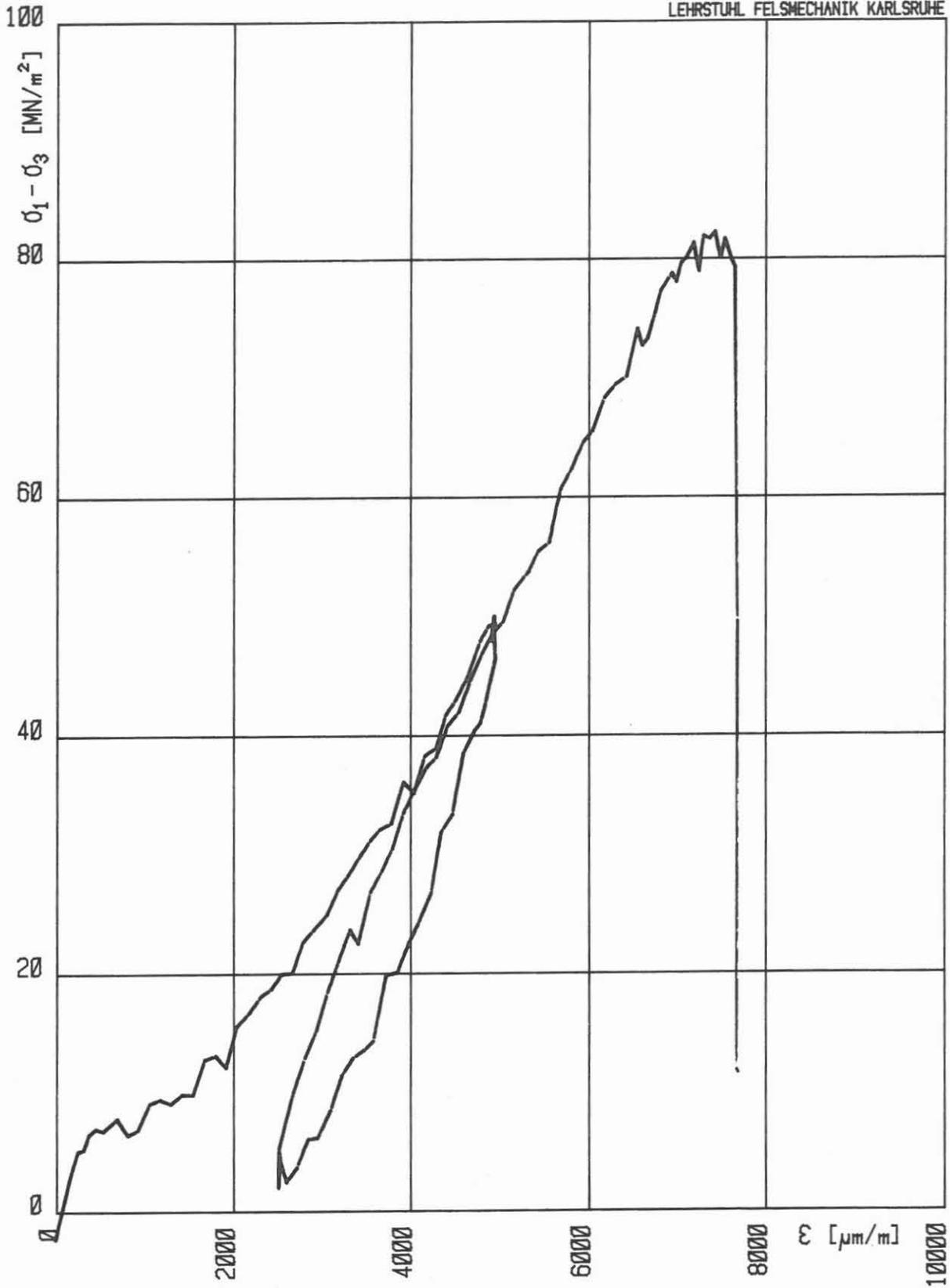
ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: M5T25P65 von 0 bis 14 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 646.9 bar Zelltemperatur: 250 °C
Abmessungen der Probe: H = 133.9 mm D = 70.0 mm H/D = 1.91



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: M6T25P28 von 0 bis 40 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 284.8 bar Zelltemperatur: 251 °C
Abmessungen der Probe: H = 133.2 mm D = 69.9 mm H/D = 1.91



HT-TRIAXIALVERSUCH: M6T25P28/b

Kolben-Vorschub: \emptyset .100 mm/min

Zelldruck: 283.5 bar Zelltemperatur: 251 °C

Max. $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 82.26 MN/m^2

Abmessungen der Probe: H = 133.2 mm D = 69.9 mm H/D = 1.91

A N H A N G

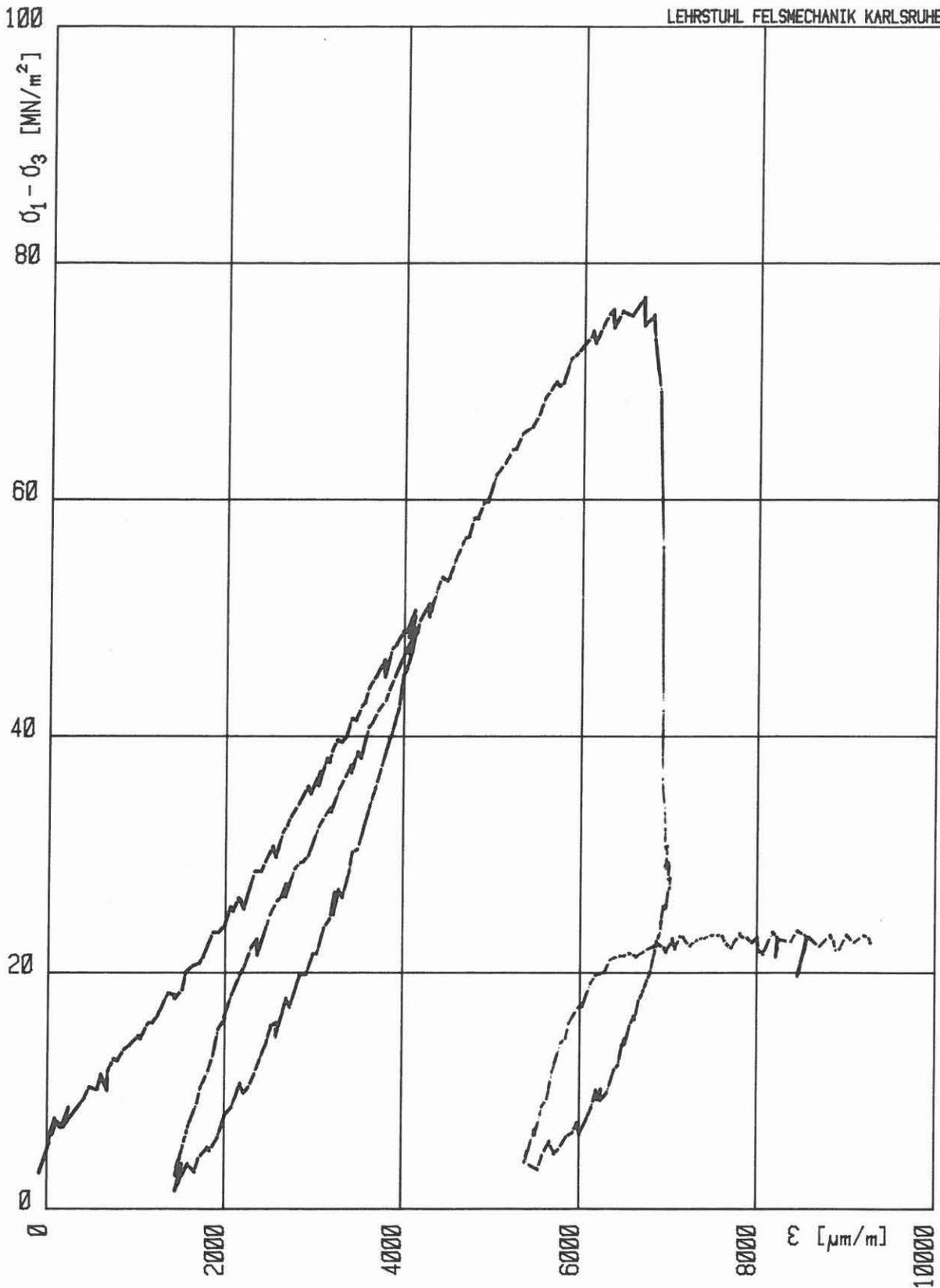
VERSUCHSSERIE No. 4 UND No. 5

TABELLE 2
(ERLÄUTERUNG S. UMSEITIG)

Probe No.	Bel. Geschw. [mm/min]	Besonderheiten, σ_{Bruch}	$\frac{\Delta \epsilon}{\Delta t}$ [1/m]	$\epsilon_{(0 \text{ max.})}$ [($\mu\text{m}/\text{m}$)]	$\sigma_{max.}$ [MPa]	$\frac{n_{zkl.}}{sec.}$ [$\text{Hz} \cdot 10^{-4}$]	$\frac{sec.}{Zykl.}$	$n_{zkl.}$ B-Bruch bei Zyklus	$\epsilon_{pl.}$ Anfang [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\epsilon_{pl.}$ Ende [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$n_{zkl.}$ No.bis No. [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\Delta \sigma_{zkl.}$ [MPa]	$\sigma_{min.}$ [MPa]	$\sigma_{max.}$ [MPa]	$n_{zkl.}$ No.bis No. [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\sigma_{min.}$ [MPa]	$\sigma_{max.}$ [MPa]	$\epsilon_{Br.}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	
VERSUCHSREIHE NO 4 mit durchlässiger Probenhülle																			
U6 T25 P65	0,100	Referenzprobe	-	6660	77,1	-	-	-	1430	5330	-	-	-	-	-	-	-	-	7000
U5 T25 P65	0,100	Entlast.-Beben $\sigma_{Br.} = 69,0 \text{ MPa}$	100	5800	72,5	1770	56,5	20B	1100	(n.Bruch) 1900	1-8	4700	1,3	-	9-20	2300	65	72,5	6000
U3 T25 P65	0,100	allmähl. Entf. $\sigma_{Br.} = 21,5 \text{ MPa}$	75	5050	45,6	3115	321	21B	2300	4700	1-10	4675	8	-	11-21	875	24	45,5	5550
U4 T25 P65	0,100	rel.rasche Entf. $\sigma_{Br.} = 40,8 \text{ MPa}$	50	4700	64,2	1876	533	23B	1200	1700	1-10	4400	8	-	11-23	650	41	64,2	5050
U1 T25 P65	0,100	allmähl. Entf. $\sigma_{Br.} = 25,0 \text{ MPa}$	33	4700	50,4	1879	352	31B	1950	4300	1-12	4370	6,5	-	13-31	630	25	50,4	5000
U2 T25 P65	0,100	rel.rasche Entf. $\sigma_{Br.} = 56,0 \text{ MPa}$	25	5100	66,7	1996	501	60B	1300	2700	1-23	4525	11	-	24-60	900	56	66,7	5425
VERSUCHSREIHE NO 5 mit durchlässiger Probenhülle																			
S3 T25 P65	0,100	Referenzprobe	-	7460	130,2	-	-	-	800	7300	-	-	-	-	-	-	-	-	7730
S1 T25 P65	0,100	$\sigma_{Br.} = 105,5 \text{ MPa}$	50	5200	113,5	1278	782	41B	580	(n.Bruch) - 80	1-15	4700	32	98	30-41	600	102	113	5300
S2 T25 P65	0,100	$\sigma_{Br.} = 113,4 \text{ MPa}$	33	5030	114,2	1276	784	50B	900	- 350	1-22	4700	36	100	37-50	460	107	114	5170
S4 T25 P65	0,100	$\sigma_{Br.} = 109,6 \text{ MPa}$	25	4700	112,9	1250	800	52B	850	- 200	1-29	4700	40	107,5	44-52	225	108,5	111	4925
S5 T25 P65	0,100	$\sigma_{Br.} = 95,2 \text{ MPa}$	20	4700	109,2	1308	764	67B	900	600	1-36	4700	39	100,5	51-67	340	93,5	108	5040

ERLÄUTERUNGEN ZU DEN SPALTEN 1 bis 14 (TABELLE 2)

1. Großbuchstabe bezeichnet den Kluftkörper, aus dem die Bohrkern 1 bis n herausgebohrt worden sind; T25 = Versuchstemperatur 250⁰ C; P65 = Zell-druck = 650 bar.
2. Belastungsgeschwindigkeit entspricht der Kolbenvorschubgeschwindigkeit bei Be- und Entlastung [mm/min].
3. Referenzprobe charakterisiert die Kluftkörpereigenschaften im triaxialen Kompressionsversuch; Verlauf der Entfestigung bei vorgegebener Verände-rung der Axialstauchung ε wird charakterisiert. Bei Versuchsserie No 5 sind 15 Lastwechsel mit konstanter Axialstauchung (bei 4700 $\mu\text{m}/\text{m}$) eingeschalt-et; Angabe der Bruchspannung σ_{Br} bei Wechselbelastung.
4. $\frac{\Delta\varepsilon}{\text{Zykl.}}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$] gibt die Zunahme der Axialstauchung pro Lastwechsel an, die im jeweiligen Versuch gewählt wurde.
5. Gibt die Axialstauchung ε an, bei der die relativ größte Deviatorspan-nung $\sigma_{\text{zykl.}}$ im Lastwechselversuch erreicht wurde.
6. Maximal erreichte Deviatorspannung $\sigma_{\text{zykl.}}$ im Lastwechselversuch (zu Spal-te 5).
7. $n_{\text{zykl.}}/\text{sec.}$ = Mittlere Lastwechselfrequenz in Hz [$\cdot 10^{-6}$].
8. $\text{sec.}/\text{zykl.}$ = Mittlere Dauer eines Lastwechsels (Be- und Entlastung) in sec.
9. Anzahl der Lastwechsel beim Versagen des Prüfkörpers, B = Bruch.
10. Bleibende Axialstauchung am Beginn des Wechselbelastungsversuches $\varepsilon_{\text{pl.Anf.}}$.
11. Bleibende Axialstauchung bzw. -dehnung am Ende des Wechselbelastungs-versuches $\varepsilon_{\text{pl.Ende.}}$.
12. 1. Phase des Wechselbelastungsversuches, in der die Deviatorspannung $\sigma_{\text{zykl.}}$ i.d.R. gleichgerichtet mit der Axialstauchung ε ab- und zunimmt; da-bei Angabe der Zyklenanzahl bis die max. Deviatorspannung $\sigma_{\text{zykl.}}$ gleich-bleibt oder abfällt; Angabe der entsprechenden Axialstauchung $\varepsilon = 4000 + \Delta\varepsilon$ [$\mu\text{m}/\text{m}$] und Angabe des Unterschiedes der maximalen Deviator-spannung $\Delta\sigma_{\text{zykl.}}$ in der 1. Phase.
13. 2. Phase des Wechselbelastungsversuches, in dem die maximale Axialstau-chung konstant gehalten wurde; dabei Angabe der minimalen und der maximalen Deviatorspannung $\sigma_{\text{min.}}$ und $\sigma_{\text{max.}}$ bei $\varepsilon = 4700 \mu\text{m}/\text{m} = \text{const.}$ (nur bei Versuchsserie No 5).
14. 3. Phase des Wechselbelastungsversuches, in dem die Axialstauchung ε weiter gesteigert wurde, dabei Angabe der Zyklenzahl $n_{\text{zykl.}}$, der Zunahme der Axialstauchung $\Delta\varepsilon$, der minimalen und der maximalen Deviatorspannung in der 3. Phase und der Bruchstauchung ε_{Br} .



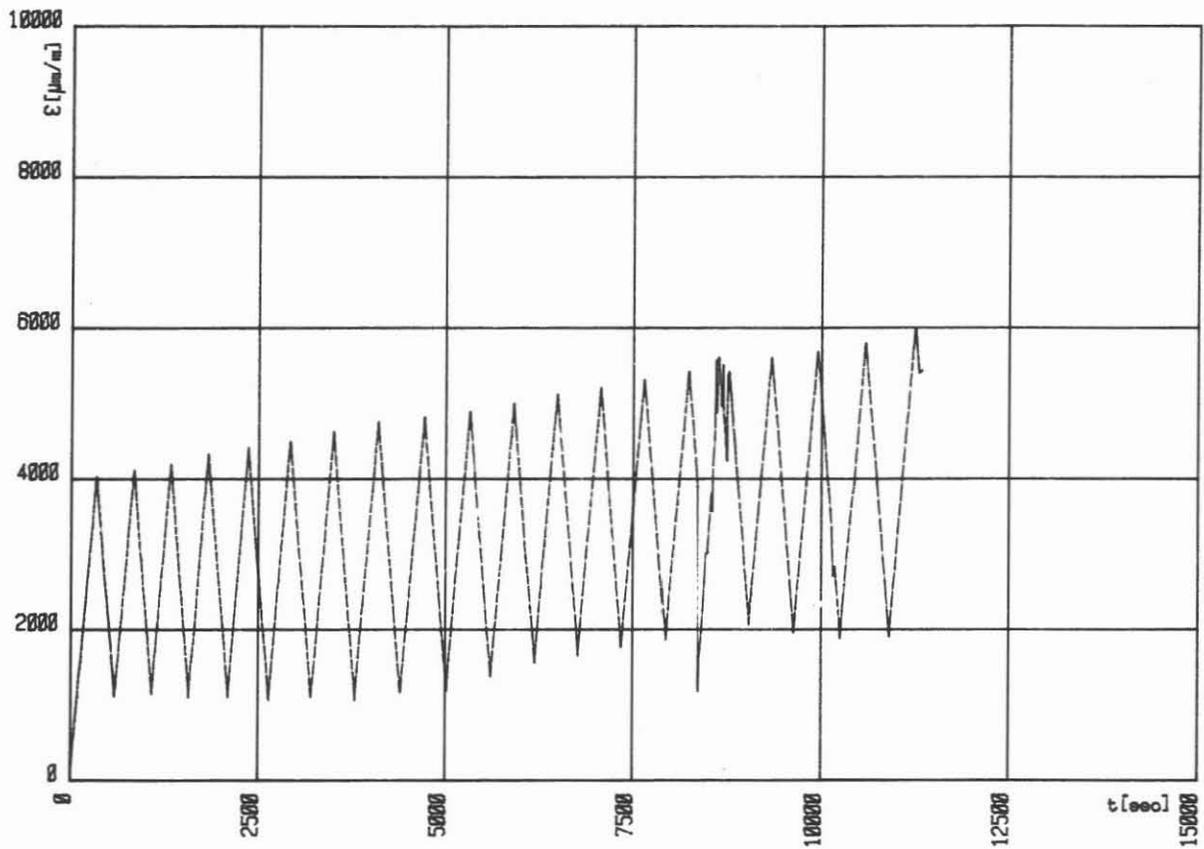
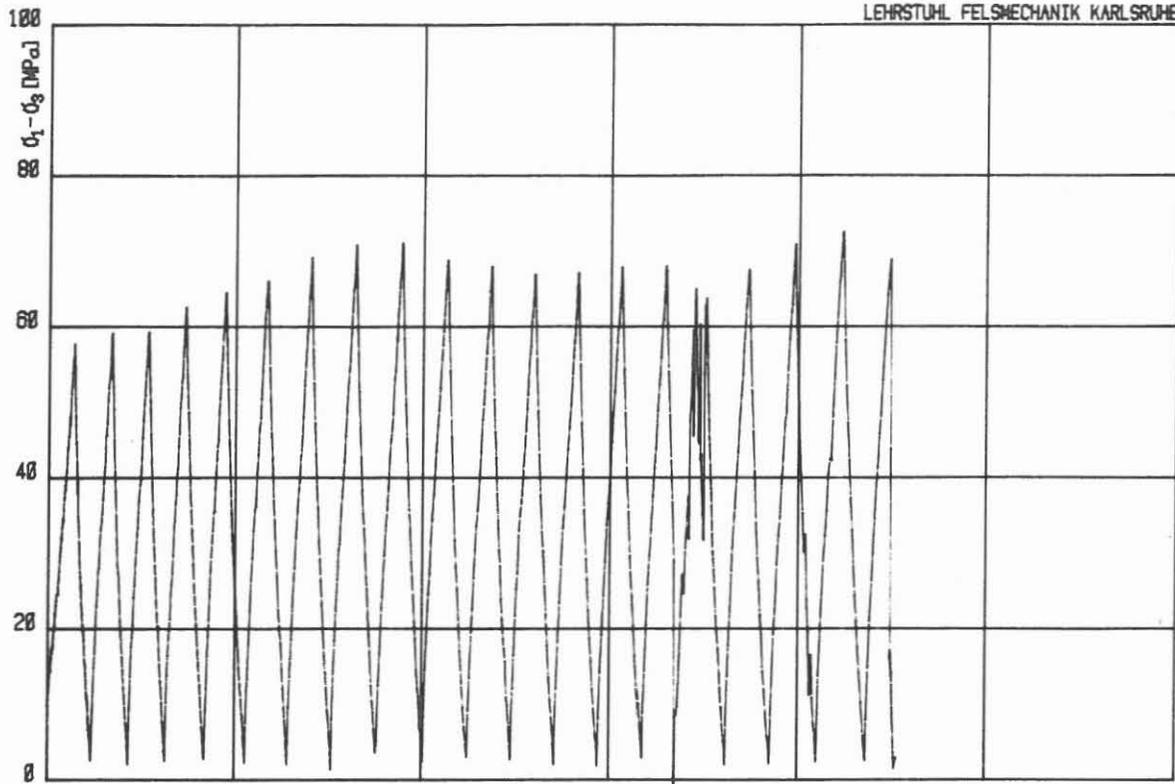
HT-TRIAxIALVERSUCH: U6/T25P65

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min

Zelldruck: 650.1 bar Zelltemperatur: 251 °C

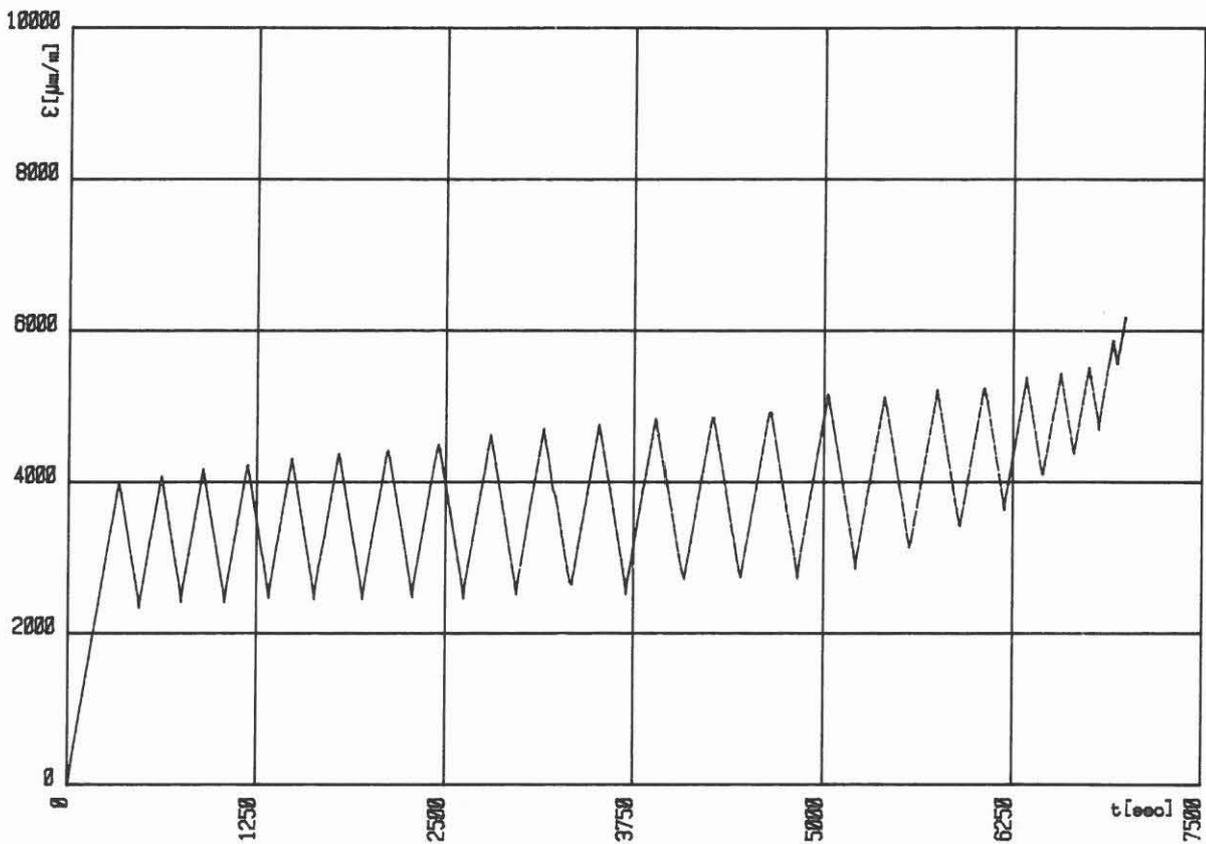
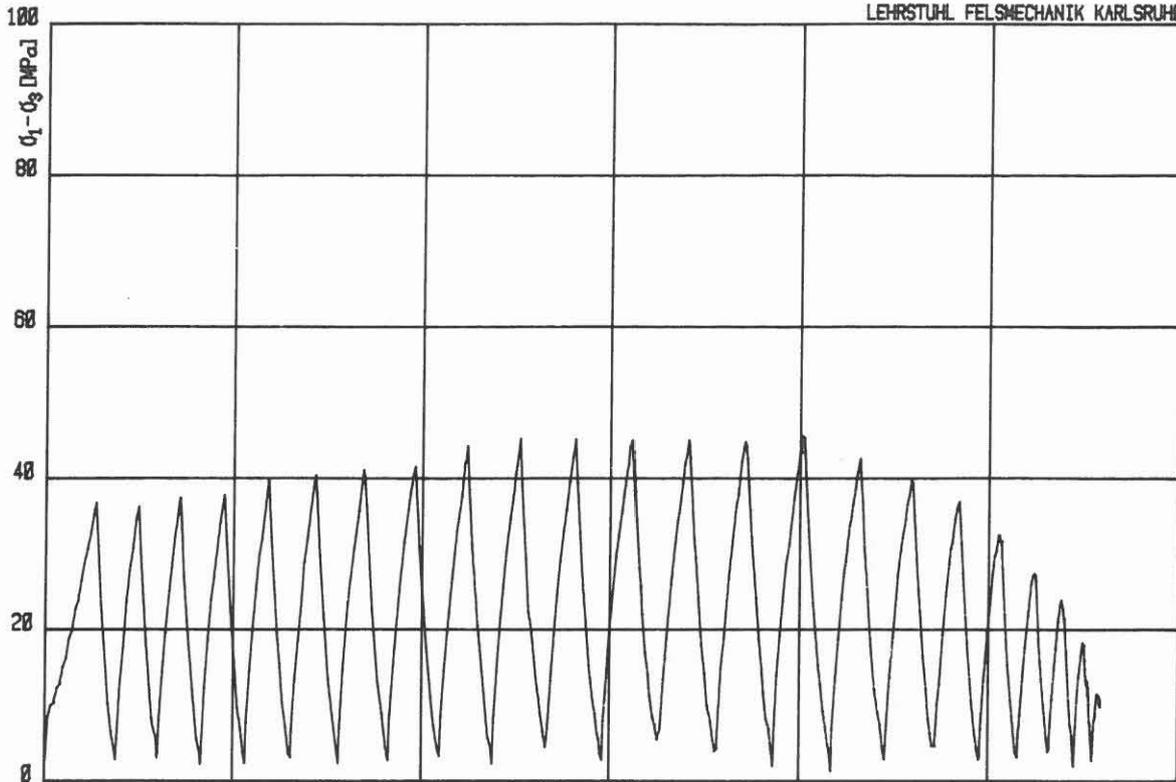
Max. $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 77.13 MN/m^2

Abmessungen der Probe: H = 137.1 mm D = 70.1 mm H/D = 1.96



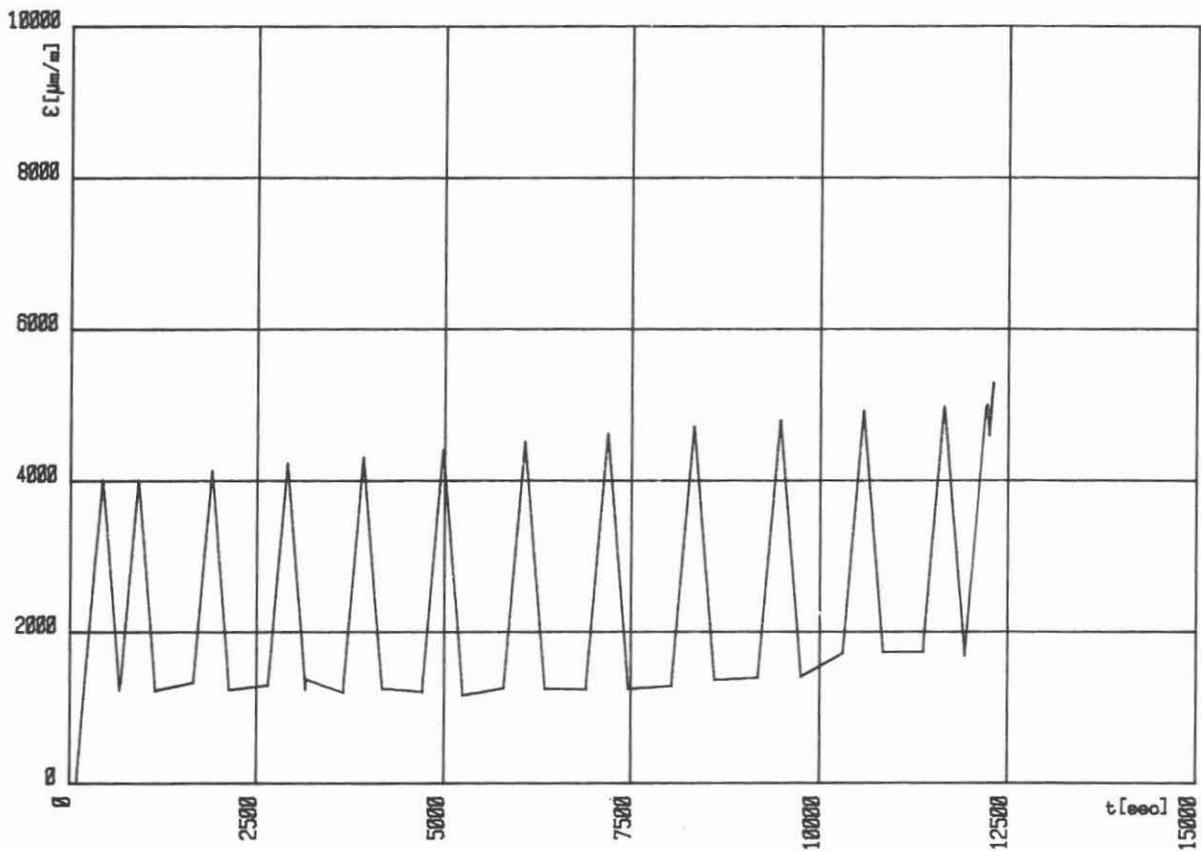
ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: U5T25P65 von 1 bis 19 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 650.4 bar Zelltemperatur: 250 °C
Abmessungen der Probe: H = 136.3 mm D = 70.2 mm H/D = 1.94



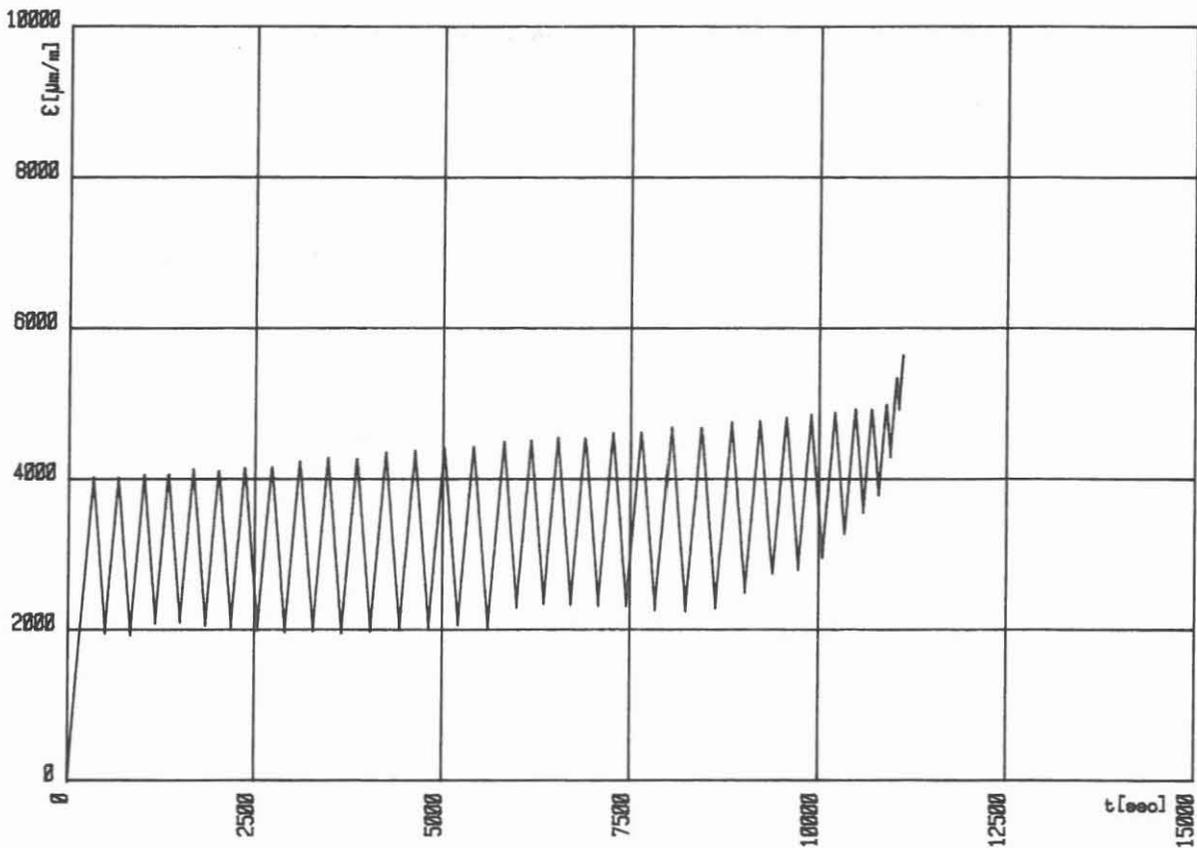
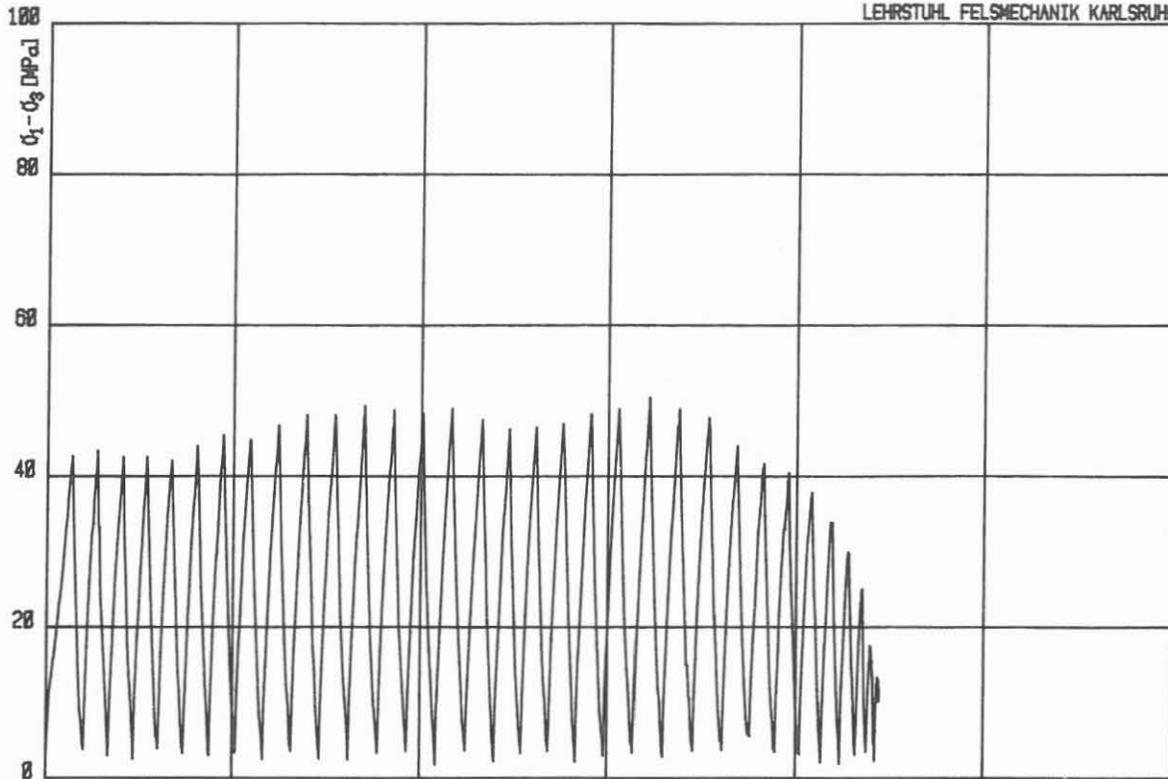
ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: U3T25P65 von 1 bis 21 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 649.8 bar Zelltemperatur: 252 °C
Abmessungen der Probe: H = 138.8 mm D = 70.2 mm H/D = 1.98



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: U4T25P65 von 1 bis 23 Zyklen

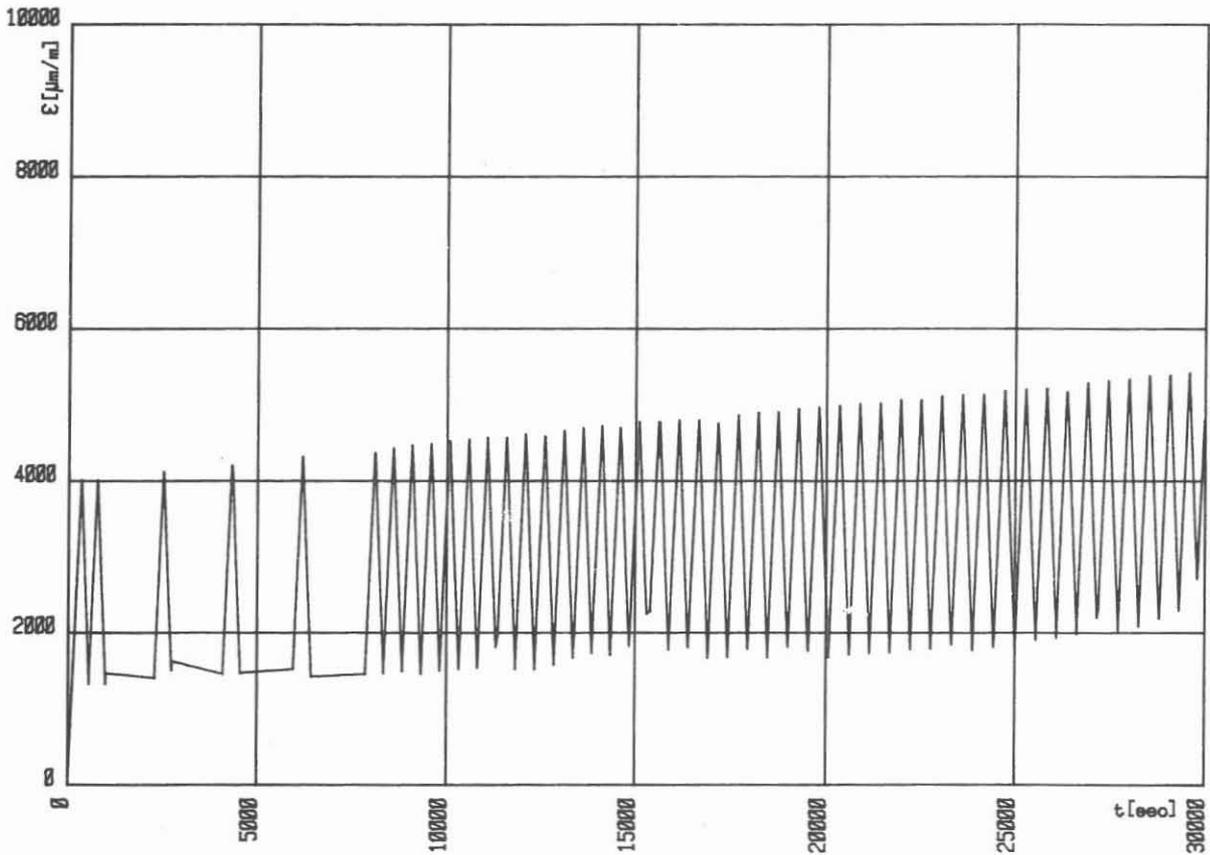
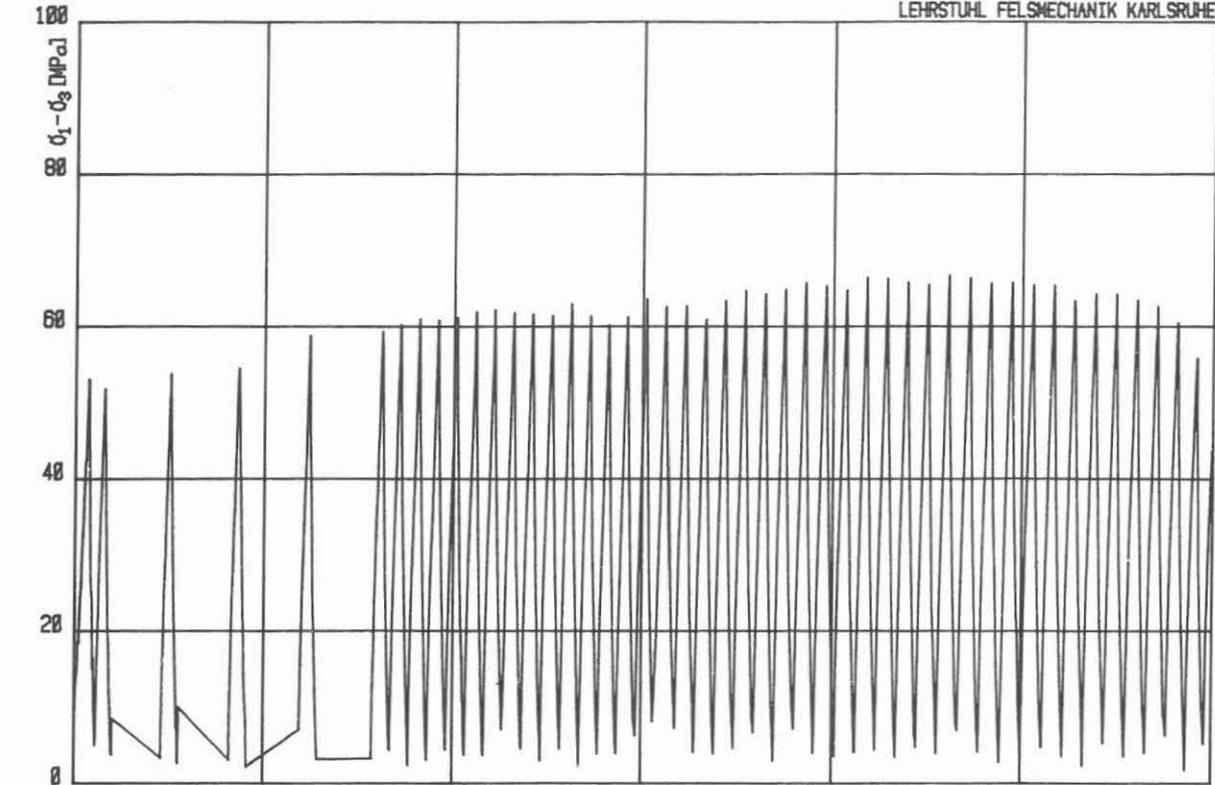
Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 650.7 bar Zelltemperatur: 251 °C
Abmessungen der Probe: H = 139.8 mm D = 70.2 mm H/D = 1.99



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: U1T25P65 von 1 bis 33 Zyklen

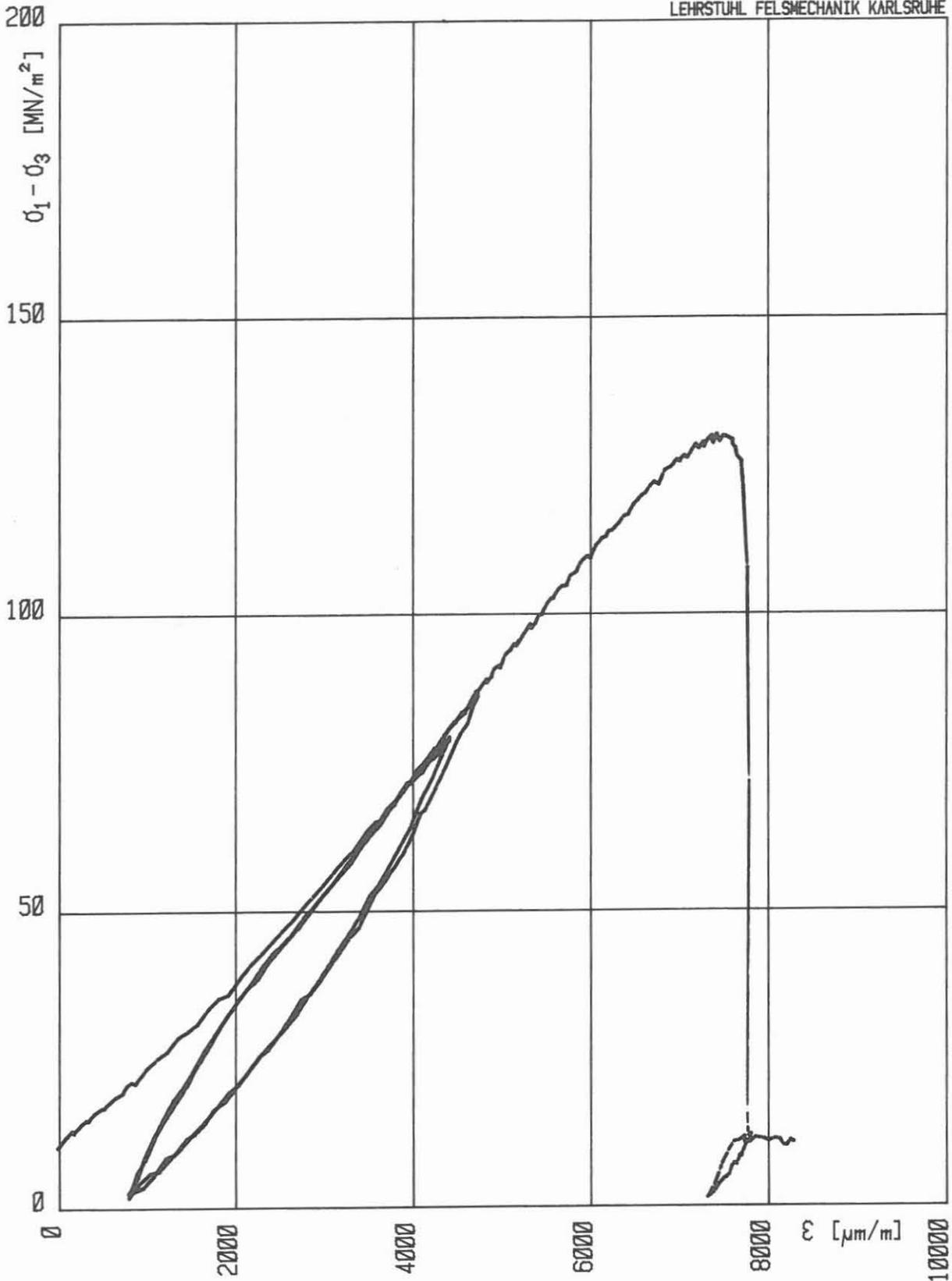
Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 650.7 bar Zelltemperatur: 251 °C

Abmessungen der Probe: H = 138.6 mm D = 70.2 mm H/D = 1.97



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: U2T25P65 von 1 bis 60 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 650.5 bar Zelltemperatur: 250 °C
Abmessungen der Probe: H = 138.7 mm D = 70.2 mm H/D = 1.98



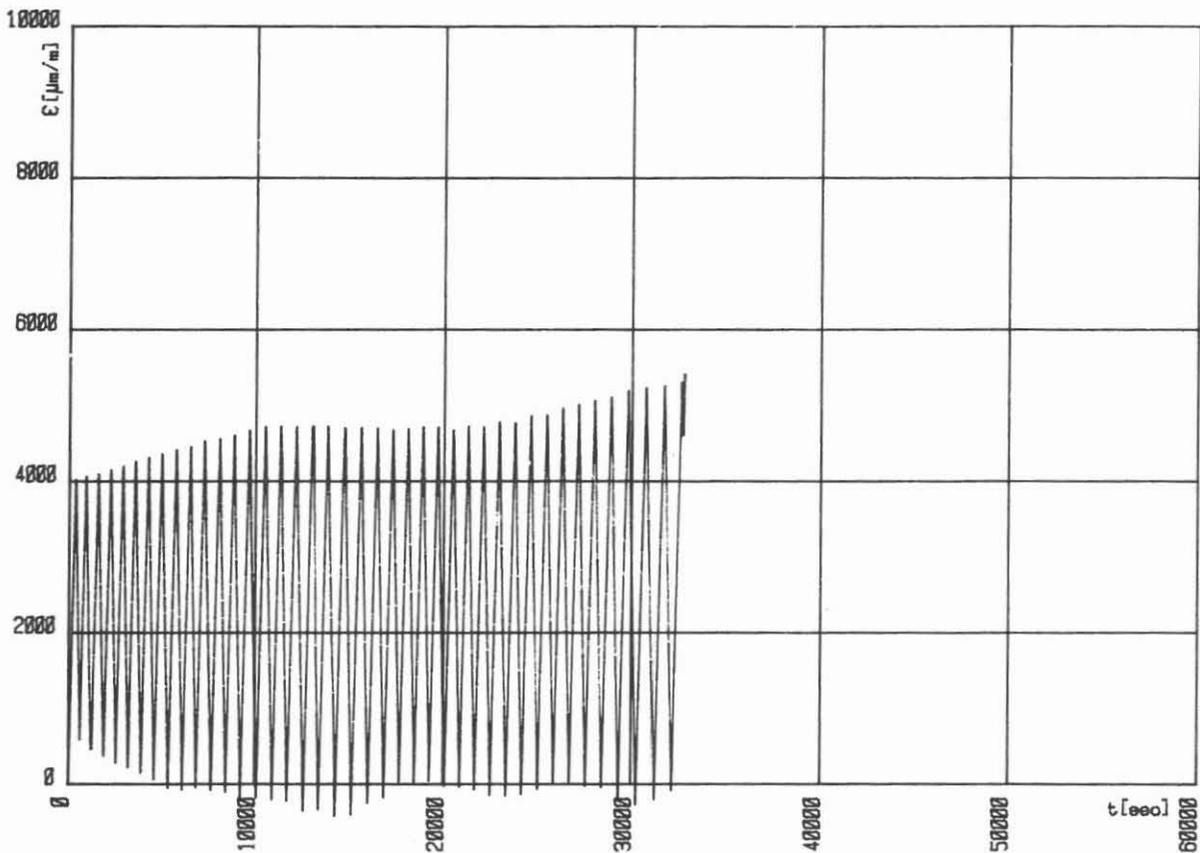
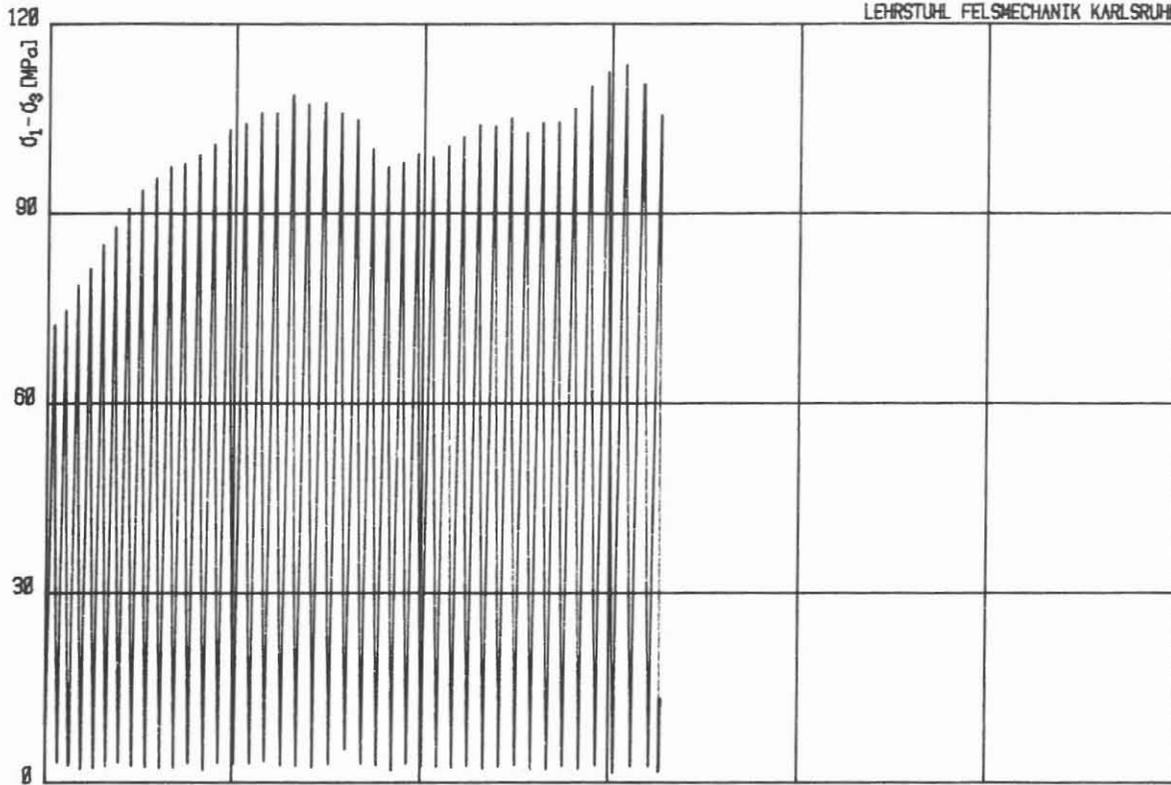
HT-TRIAXIALVERSUCH: S3T25P65

Kolben-Vorschub: $\emptyset.100$ mm/min

Zelldruck: 650.7 bar Zelltemperatur: 249 °C

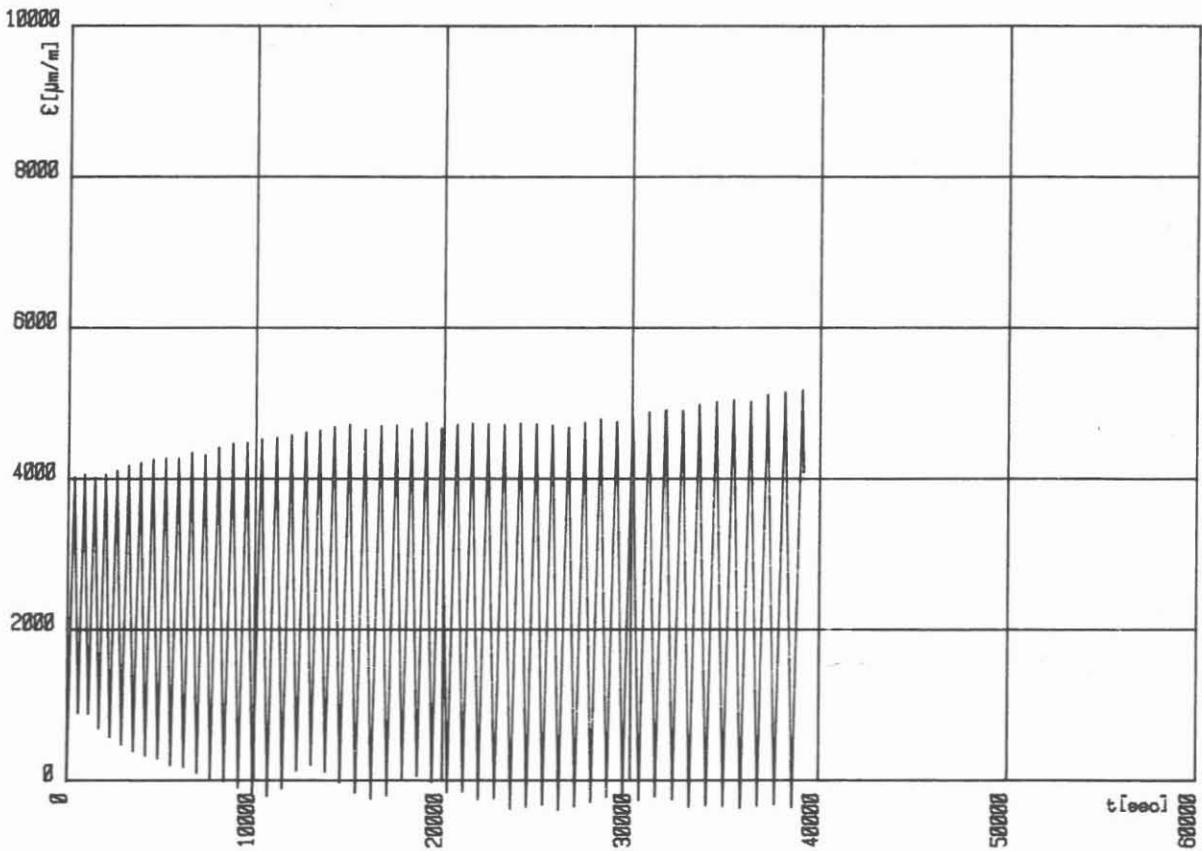
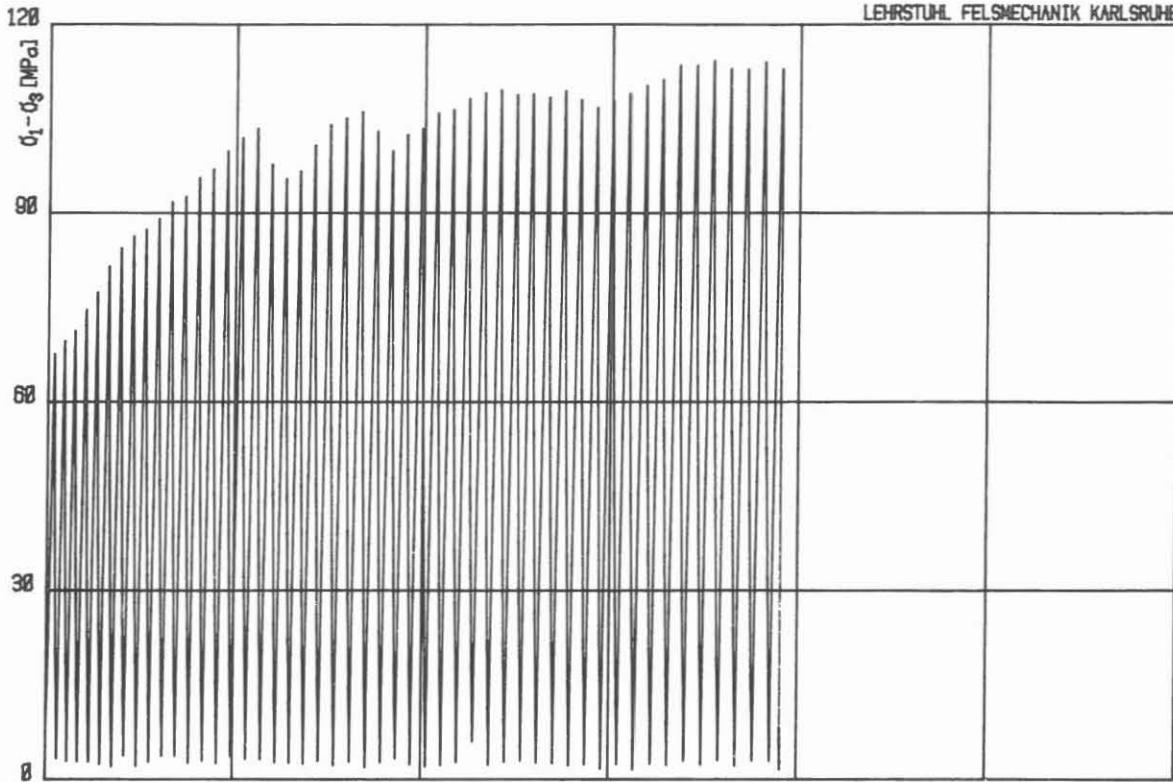
Max. $(\sigma_1 - \sigma_3)$: 130.18 MN/m^2

Abmessungen der Probe: H = 141.1 mm D = 70.1 mm H/D = 2.01



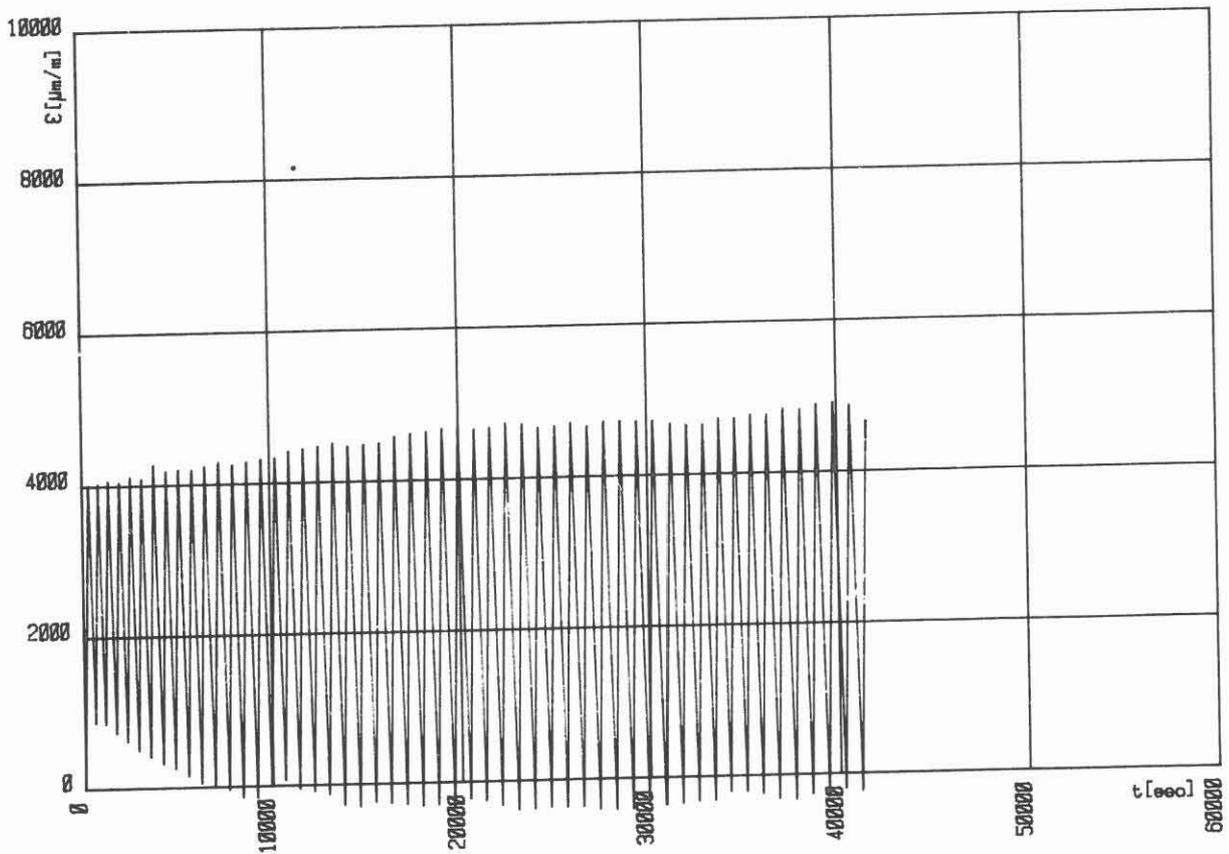
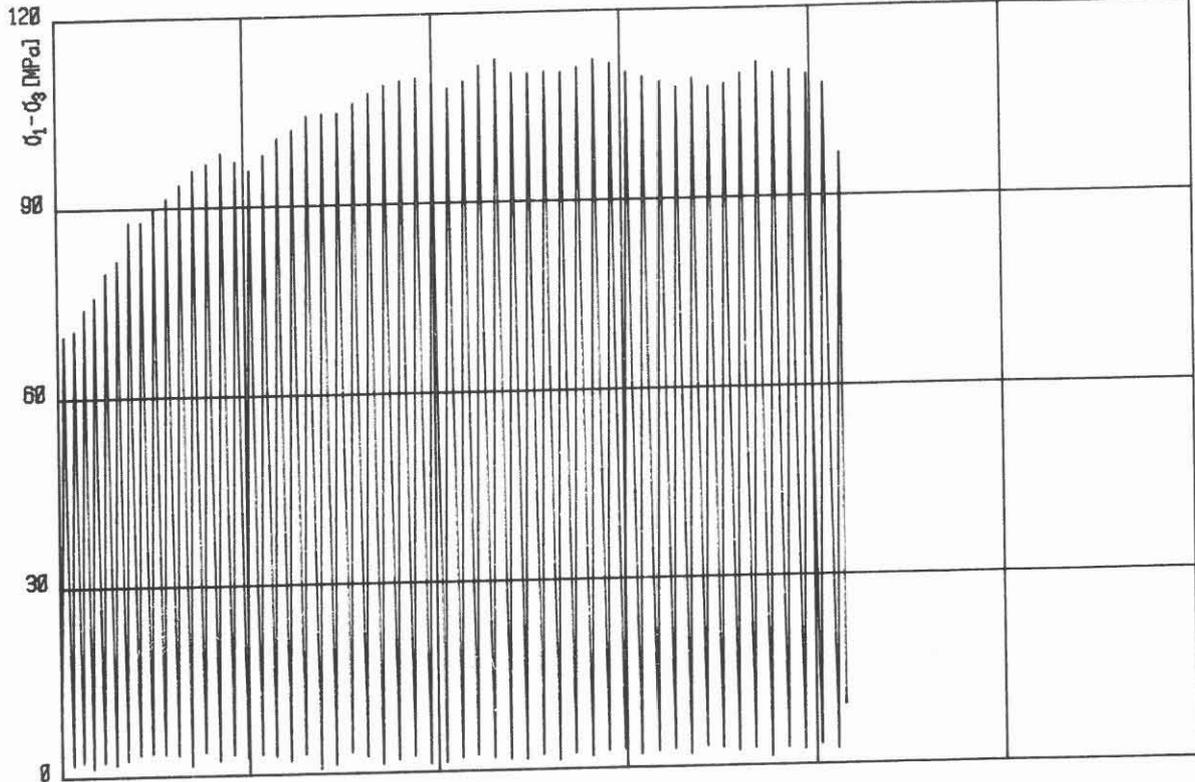
ZYKLISCHER HT-TRIAxIALVERSUCH: S1T25P65 von 1 bis 46 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 649.5 bar Zelltemperatur: 250 °C
Abmessungen der Probe: H = 141.0 mm D = 70.1 mm H/D = 2.01



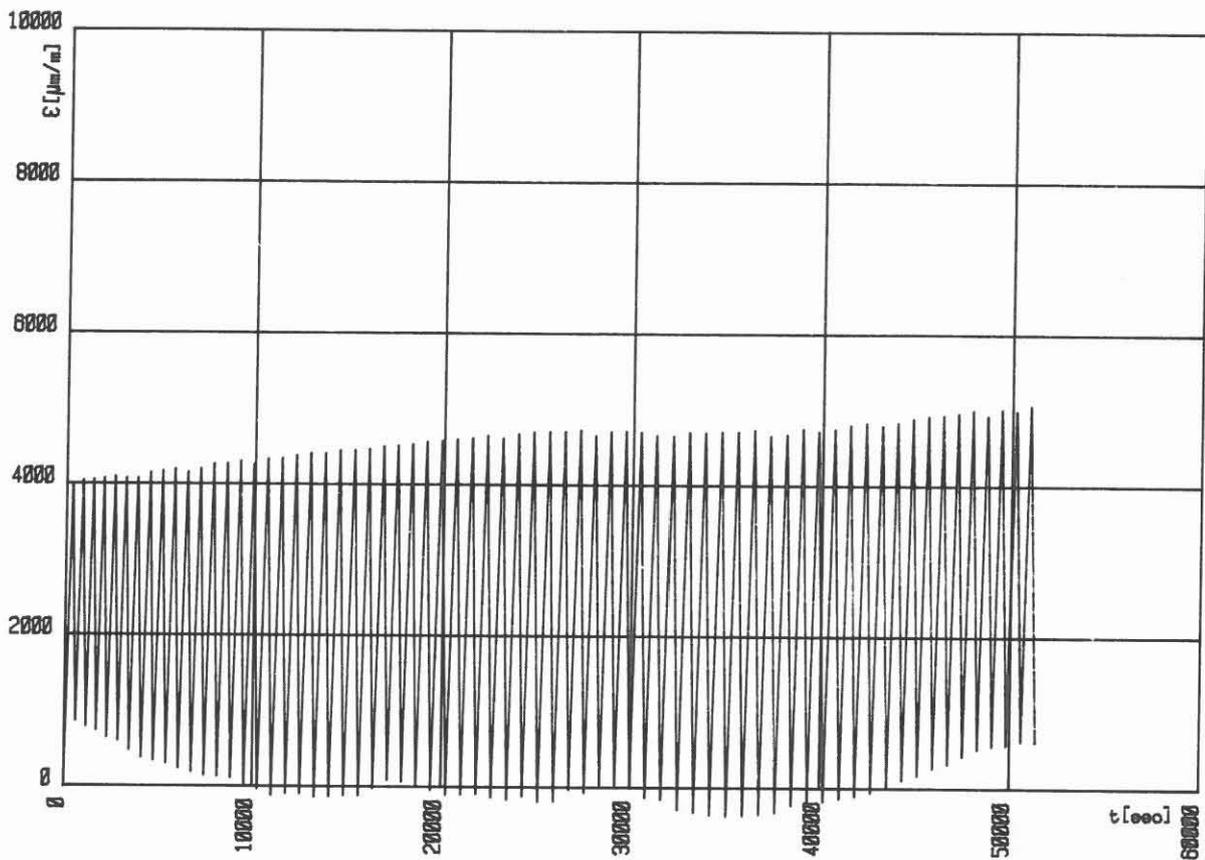
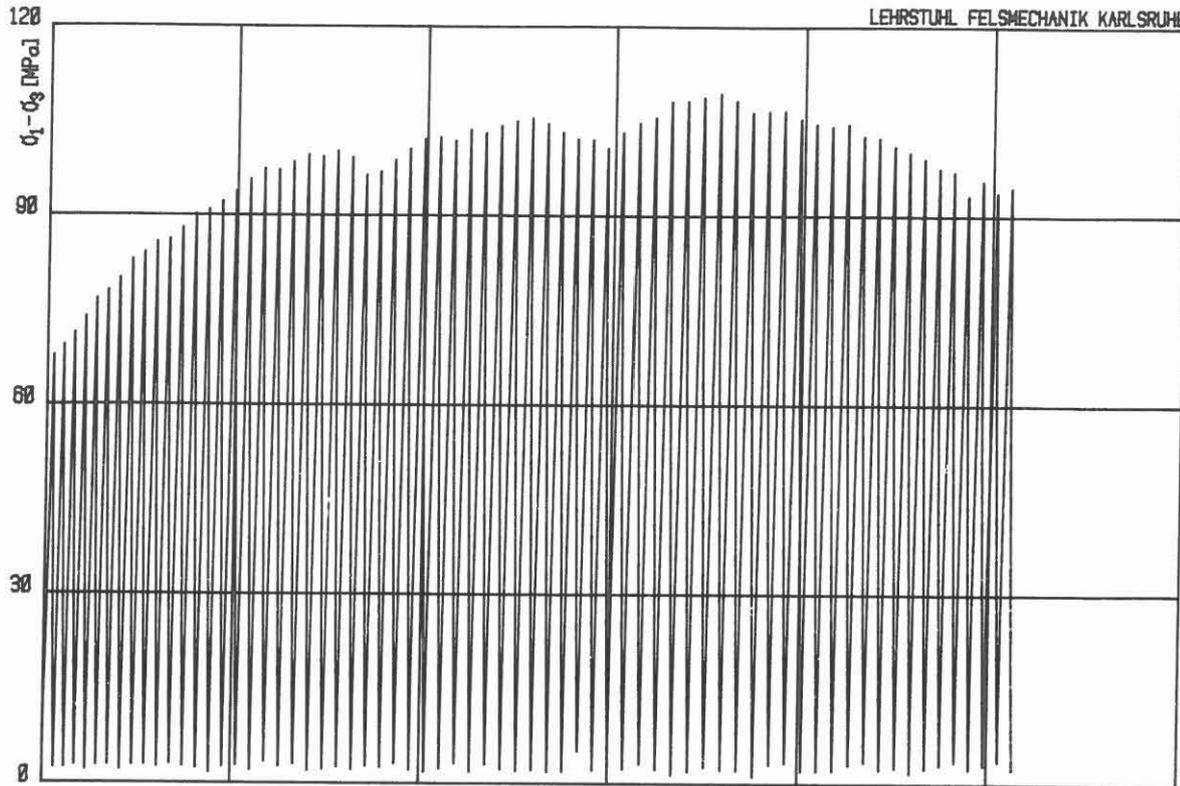
ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: S2T25P65 von 1 bis 50 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 650.4 bar Zelltemperatur: 249 °C
Abmessungen der Probe: H = 141.1 mm D = 70.1 mm H/D = 2.01



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: S4T25P65 von 1 bis 52 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 649.4 bar Zelltemperatur: 251 °C
Abmessungen der Probe: H = 141.0 mm D = 70.2 mm H/D = 2.01



ZYKLISCHER HT-TRIAXIALVERSUCH: S5T25P65 von 1 bis 67 Zyklen

Kolben-Vorschub: 0.100 mm/min Zelldruck: 649.1 bar Zelltemperatur: 251 °C
Abmessungen der Probe: H = 141.1 mm D = 70.1 mm H/D = 2.01