



**Untersuchungen zur
Ermittlung der Dilatanzgrenze
an Steinsalz
aus der Lokation Gorleben**

Auftraggeber: BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Stilleweg 2
30655 Hannover

Bestellnummer AG: 201-4500065661

Auftragsnummer AN: B IfG 34/2011

Projektbearbeiter: Dr. rer. nat. Till Popp

Leipzig, 17.10.2011

Dr.-Ing. habil. Wolfgang Minkley
Geschäftsführer

Bundesanstalt
für Geowissenschaften und Rohstoffe

Archiv

0132019

Einlieferung von Archivstücken

Archiv - Nr.: 0132019

Nur von Archivpersonal auszufüllen

Unpubliziertes geowissenschaftliches Material (wie Berichte oder Karten), das eine wesentliche Grundlage für die geowissenschaftliche Arbeit darstellt, wird - nach Maßgabe der Archivordnung - von der einliefernden Stelle unaufgefordert dem Archiv übergeben. Zur Übergabe ist von der einliefernden Stelle dieses Formular auszufüllen.

Autor(en):	Popp, Till, Dr.
Titel:	Untersuchungen zur Ermittlung der Dilatanzgrenze an Steinsalz aus der Lokation Gorleben
Berichtsdatum/-zeitraum	17.10.2011
Tagebuch-Nr.	B3.2/B50123-15/2014-0001/001 IfG-Bericht Lokation Gorleben
Forschungsprogramm:	Gorleben
Projekt:	9GE331400000
Auftraggeber:	BGR

TK25-Nummer(n):
Zuständige, federführende Institution oder Behörde:
Staat (wenn Ausland) Verwaltungseinheit / Gebiet
Lokation Bohrungs- / Aufschlussname

Nur für vertrauliche Dokumente

Archive stehen Bediensteten für dienstliche Zwecke zur Verfügung. Externe können sie nutzen, soweit keine wichtigen Gründe entgegenstehen. Wichtige Gründe können schutzwürdige Interessen Dritter sein, z. B. personenbezogene Daten, Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse oder hochrangige Interessen (Landesverteidigung, öffentliche Sicherheit, schwebende Gerichts- oder Verwaltungsverfahren).

Falls die Einsichtnahme beschränkt werden soll, ist die Beschreibung des schutzwürdigen Belanges zwingend gefordert (Fundstelle und Namen von Betroffenen (Firma, Person etc.)):

Gesperrt bis:

Einliefernde Organisationseinheit lt. OrgPlan:

B3.2

Datum:

11.04.14

P. J. W.

Unterschrift des/der Einlieferers/in

INHALTSVERZEICHNIS

1	VERANLASSUNG / UNTERSUCHUNGSPROGRAMM.....	3
2	UNTERSUCHUNGSPROGRAMM UND PRÜFKÖRPERKONDITIONEN.....	4
2.1	Probenmaterial – Herkunft und Probennahme	4
2.2	Prüfkörpervorbereitung	6
3	VERSUCHSTECHNIK ZUR GEWINNUNG DER MATERIALPARAMETER.....	6
3.1	Gesteinsphysikalische Probencharakterisierung	6
3.2	Prüfsystem RBA 2500 / D2000.....	8
4	ERGEBNISSE	10
4.1	Probencharakterisierung.....	10
4.2	Festigkeit und Dilatanz	13
5	ZUSAMMENFASSUNG.....	18
	LITERATUR	19
	ANLAGENVERZEICHNIS	20

1 VERANLASSUNG / UNTERSUCHUNGSPROGRAMM

Mit Schreiben vom 16.06.2011 beauftragte die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover das Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG) mit der Durchführung von Untersuchungen zur Ermittlung der Dilatanzgrenze von Steinsalz aus der Lokation Gorleben.

Das Moratorium zur Erkundung des Salzstocks Gorleben als mögliches Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle endete am 1. Oktober 2010. Um die Frage zu klären, ob Gorleben ein geeigneter Standort für ein mögliches Endlager ist, wurden die Erkundungsarbeiten danach wieder aufgenommen. Im Rahmen der begleitenden gesteinsmechanischen Untersuchungen kommt der Bestimmung der Lage der Dilatanzgrenze als Bewertungskriterium für Integritätsbetrachtungen im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen eine besondere Rolle zu.

Das Untersuchungsprogramm umfasste die Durchführung von folgenden Leistungen:

- Probenherstellung mit Ablängen bzw. Herausbohren des Probekörpers und Feinschleifen der Endflächen,
- Triaxialer Druckversuch an zylindrischen Probekörpern in Kompression mit konstanter Axialverformungsrate ($\dot{\epsilon} = 2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/s – Standardversuch - bzw. $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-7}$ 1/s – langsame Rate) unter Bestimmung der Axialspannung σ_1 und der Volumenverformung $\Delta V/V$ zur Darstellung der Arbeitslinien beider Parameter für die Längsdehnung,
- Fotografische Dokumentation der Probekörper vor und nach Versuchsdurchführung,
- Berichtserstellung (Kurzdarstellung Versuchsmethodik und -ergebnisse)

Insgesamt wurden neun Proben untersucht, wobei unterschiedliche Einspannungen und Verformungsraten realisiert wurden (Tab. 1-1).

Tab. 1-1. Versuchsprogramm

Versuch lfd. Nr.	Eps-rate [1/s]	σ_3 [MPa]
1	2,5E-05	0,2
2	2,5E-05	0,5
3	2,5E-05	1
4	2,5E-05	2
5	2,5E-05	5
6	2,5E-05	10
7	2,5E-05	24,0
8	1,0E-07	1
9	1,0E-07	2

Grundlage der Versuchsdurchführung bildeten neben den Vorgaben des Auftraggebers die verschiedenen spezifischen Empfehlungen des Arbeitskreises „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGG).

Dem IfG wurden durch den AG vier Steinsalzblöcke mit den Abmessungen 0,3 m x 0,3 m x 0,3 m zur Verfügung gestellt, aus denen mittels Herausbohren eines zylindrischen Probenkörpers und Abdrehen Prüfkörper hergestellt wurden.

Im Zeitraum Juli/August 2011 wurden die Untersuchungen durchgeführt. Der vorliegende Laborbericht fasst diese Ergebnisse zusammen.

2 UNTERSUCHUNGSPROGRAMM UND PRÜFKÖRPERKONDITIONEN

2.1 Probenmaterial – Herkunft und Probennahme

Zielstellung war die Untersuchung von repräsentativem Steinsalz, wobei über das Heraussägen einer Großprobe die Gewinnung möglichst schonend erfolgen sollte, um eine Vorschädigung der Proben zu minimieren. Der Probennahmeort liegt im Südostteil des Salzstockes Gorleben, in dem bisher aufgefahrenen Erkundungsfeld EB1 im Bohrort 1.2. Die genaue Lokation sowie lithologisch-petrographische Angaben sind in Tab. 2-1 zusammengefasst.

Tab. 2-1. Probenlokation und litho-stratigraphische Kurzbeschreibung (mdl. Mittlg. Hr. Plischke)

Lokation:	Gorleben 840m-Sohle, Querschlag 1 West, Bohrort 1.2
Stratigraphische Stellung:	z2HS2 (Streifensalz)
Petrographie:	Steinsalz, hellgrau, mittel-grobkristallin, von zerrissenen z.T flockigen Anhydritlinien durchzogen, vereinzelt Carnallit-spots, Einfallen ca. 75-85 gon, Einfallsrichtung generell gegen Norden (380 – 20 gon)

Die Probennahme erfolgte mittels einer Großkettensäge („Schwertfisch“ bzw. Korfmannsäge). Dabei wurde über bis zu 1,50m-tiefe Sägeschnitte ein Gesteinsquader mit ca. 3 m Meter Länge und einer Höhe von ca. 1 m (unterteilt in mehrere Segmente: Probekblock sowie Reservestücke für potentielle Folgeuntersuchungen) aus dem Gebirgsverband herausgesägt (Abb. 2-2). Der Probekblock mit einer Kantenlänge von ca. 1 m und einer Masse von ca. 2,2 Mg wurde unter Verwendung eines hydraulischen Druckkissens von der Rückseite abgebrochen und in die Strecke gezogen. Danach wurde er über die Korfmannsäge in einzelne quaderförmige Teilsegmente von ca. 30 cm x 30 cm Grundfläche und ca. 1 m Länge zerlegt. Anschließend wurden mittels einer Handkettensäge aus den jeweils auf der Seite liegenden

Scheiben orientierte Proben (Würfel – 0,3 m x 0,3 m x 0,3 m) bzw. Quader – ca. 0,1 m x 0,1 m x 0,3 m, senkrecht zur steil einfallenden Salzschichtung) heraus geschnitten (Abb. 2-3).

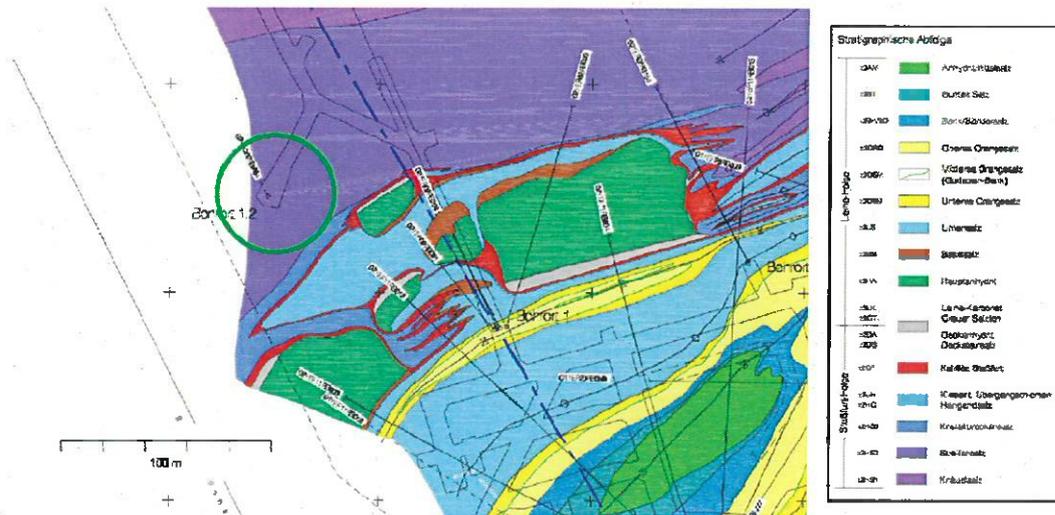


Abb. 2-1. Lage des Probennahmeortes: Gorleben 840m-Sohle, Querschlag 1 West, Bohrort 1.2

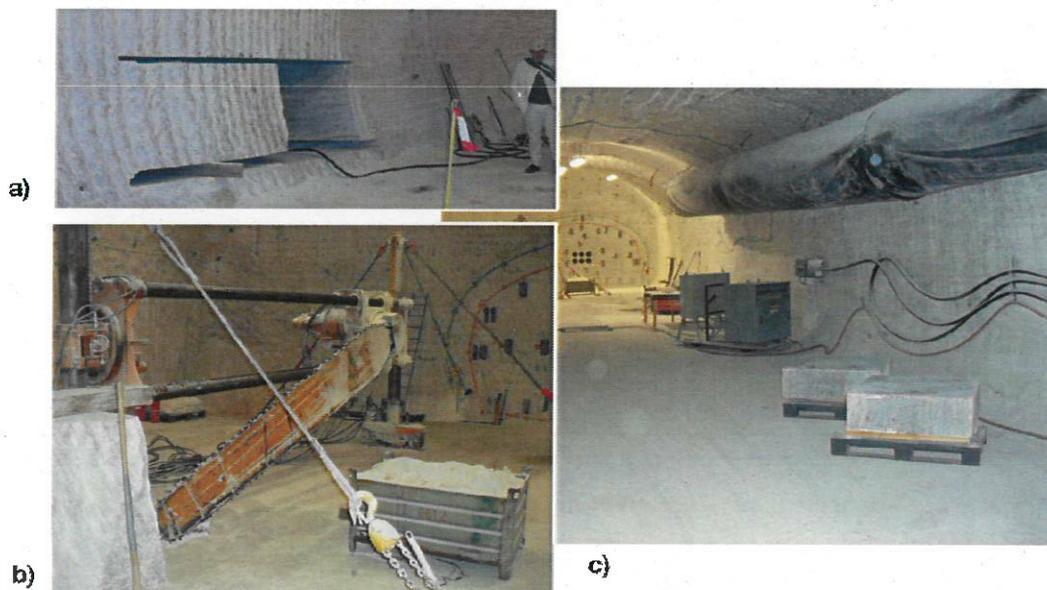


Abb. 2-2. Vorortsituation zur Gewinnung eines Großblocks. a) Probeentnahmeort – Hohlraum nach Herausziehen des Großblocks bzw. Reserveblock; b) „Schwertfischsäge“; c) Blick in den Streckenstummel des Bohrortes 1.2 mit der Probenentnahmestelle sowie den auf Paletten gelagerten Teilblöcken.



Abb. 2-3. Herstellung der Rohprüfkörper bzw. Probenwürfel. (li.) auf der Seite liegendes Teilsegment des Großblocks mit steilstehender Schichtung. (re.) manuelle Zerlegung des Teilsegments in Rohprüfkörper.

2.2 Prüfkörpervorbereitung

Dreiaxiale Druckversuche werden an geraden kreiszylindrischen Probekörpern durchgeführt. Hierfür wurden aus den angelieferten Würfelproben mittels einer Drehbank über Hartmetallbestückte Streuselkronen unter konstantem Vorschub zylindrische Kernstücke erbohrt. Diese wurden zunächst mittels einer konventionellen Hartgesteinssäge (Fa. CLIPPER) grob auf Länge gebracht, und anschließend in einer Drehbank sowohl längs als auch an den Endflächen geplant. Die Mantelflächen der Probekörper waren danach glatt und frei von Unregelmäßigkeiten. Die Endflächen der Probekörper waren eben und rechtwinklig zur Prüfkörperachse, wobei die Maßhaltigkeit $\pm 0,02$ bis $\pm 0,06$ mm betrug.

3 VERSUCHSTECHNIK ZUR GEWINNUNG DER MATERIALPARAMETER

3.1 Gesteinsphysikalische Probencharakterisierung

Unmittelbar vor Versuchsbeginn erfolgte die Vermessung der Prüfkörper. Die Höhe sowie der Durchmesser der Prüfkörper werden mit einer digitalen Schublehre auf $\pm 0,02$ mm gemessen. Die Masse der Prüfkörper wird mit einem Fehler von $\pm 0,2$ g bestimmt. Davon aus-

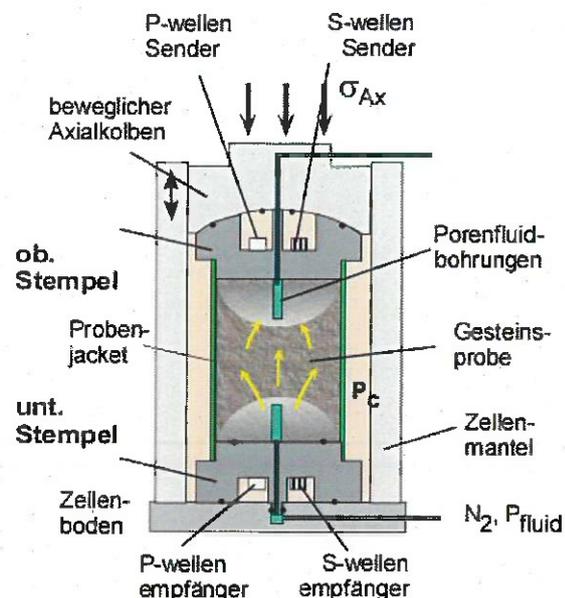
gehend wird die Dichte ρ der zylindrischen Prüfkörper berechnet. Die daraus resultierende Dichte ρ weist einen Fehler von ca. $0,002 \text{ g/cm}^3$ auf.

Die Messung der Ultraschall-Laufzeiten der P- und S-Wellen nach der Durchschallungsmethode dient der Bewertung der vorhandenen Probenintegrität bzgl. Auflockerung sowie der Bestimmung der dynamischen elastischen Konstanten.

Im IfG Leipzig wird für die Laufzeitmessung der Ultraschallgeschwindigkeit das Gerät USD 10 (Hersteller: Krautkramer/Branson) in Verbindung mit den p-Wellengeber und -empfänger B 0,5 y (Senkrechtprüfköpfe: Frequenz 0,5 MHz) eingesetzt. Die Ankopplung der Prüfkörper erfolgt mit einer dünnen Schicht Bienenhonig, der nach der Messung entfernt wird. Die Laufzeitanzeige erfolgt mit einer scheinbaren Genauigkeit von $0,01 \mu\text{s}$. Wegen der Ankopplungsschwierigkeiten an die Prüfkörper beträgt die Genauigkeit der Laufzeitmessung ca. $0,1 \mu\text{s}$ und damit die Genauigkeit der Geschwindigkeit ca. 10 m/s . Aus den P- und S-Wellengeschwindigkeiten v_p und v_s werden die „dynamisch bestimmten“ elastischen Konstanten berechnet (GEBRANDE, H., 1982).



a)



b)

Abb. 3-1. Servohydraulisches Prüfsystem RBA 2500: a) Prüfmaschine im servohydraulischen Gesteinslabor des IfG; b) Druckzelle (Schemazeichnung) zur Simulation triaxialer Spannungs- und Verformungsbedingungen mit gleichzeitiger Durchschallung und Durchströmung bzw. Porendruckkontrolle.

3.2 Prüfsystem RBA 2500 / D2000

Für die Durchführung der dreiaxialen Druckversuche werden im IfG Leipzig zwei servohydraulische Prüfmaschinen (RBA 2500 mit $F_{\max} = 2500$ kN - Hersteller: SCHENK/TREBEL bzw. D2000 mit $F_{\max} = 2000$ kN - Hersteller: GL TEST SYSTEMS) eingesetzt, die auf Grund ihrer Bauweise, der eingesetzten Messmittel und der verwendeten Servotechnik als steife Prüfmaschine der Güteklasse 1 klassifiziert sind.

Mittels einer Druckzelle können routinemäßig triaxiale Festigkeitsuntersuchungen nach dem KARMAN-Prinzip ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$) durchgeführt werden (vgl. Abb. 3-1). Die Axialbelastung bzw. -verformung und der Manteldruck werden jeweils über eine Servohydraulik (oder Schrittmotorbetriebene Spindelpumpe, im Fall der D2000) unabhängig voneinander geregelt.

Der gewünschte Manteldruck ($p_{c-\max} = 100$ MPa) wird entweder durch einen servohydraulisch (RBA 2500) bzw. oder einen Spindelmotor-betriebenen Druckübersetzer erzeugt. Aus der Axialdeformation und der gemessenen Volumenveränderung des lateralen Druckraumes (Kolbenverschiebung des Druckübersetzers) kann bei konstantem Manteldruck die Volumenänderung des Prüfkörpers, im Folgenden als Dilatanz bezeichnet, bestimmt werden:

$$\Delta V = \Delta h \cdot A_{pp} - \Delta S_{pl} \cdot A_{pl} \quad (3-1)$$

mit ΔS_{pl} = axiale Verschiebung des Druckkolbens im Druckübersetzer
 A_{pl} = Querschnittsfläche des Druckübersetzerkolbens
 Δh = Verschiebung des Probenstempels in der Druckzelle
 A_{pp} = Querschnittsfläche des Probenstempels.

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (3-2)$$

Voraussetzung für die Dilatanzmessung ist eine absolute Leckölfreiheit des Druckübersetzersystems. Sie wird generell über eine Haltezeit unter hydrostatischen Bedingungen von 1 Stunde vor dem Versuchsbeginn nachgewiesen. Unabhängig davon hängt die Zuverlässigkeit der Volumenmessung wesentlich von der Temperaturkonstanz des Prüfsystems ab, die trotz der Klimaregelung des Versuchslabors nur über einen begrenzten Zeitraum von Stunden gewährleistet ist.

Vor allem bei mehrtägigen Versuchen, wie in Abb. 3-2 für den Versuch 435/9 mit einer langsamen Verformungsrate von $1 \cdot 10^{-7}$ 1/s dargestellt, beträgt die Schwankung der Temperatur an der Prüfmaschine im tageszeitlichen Gang maximal $\pm 0,5^\circ\text{C}$, wobei diese Temperaturänderung phasenverschoben mit einer gemessenen Volumenänderung von maximal ca. 0,1% einhergehen kann. Darüber hinaus gibt es kurzzyklische Schwankungen (Periode ca. 1h) mit einer Amplitude von ca. $\pm 0,1^\circ\text{C}$, die aus der Klimaregelung resultieren.

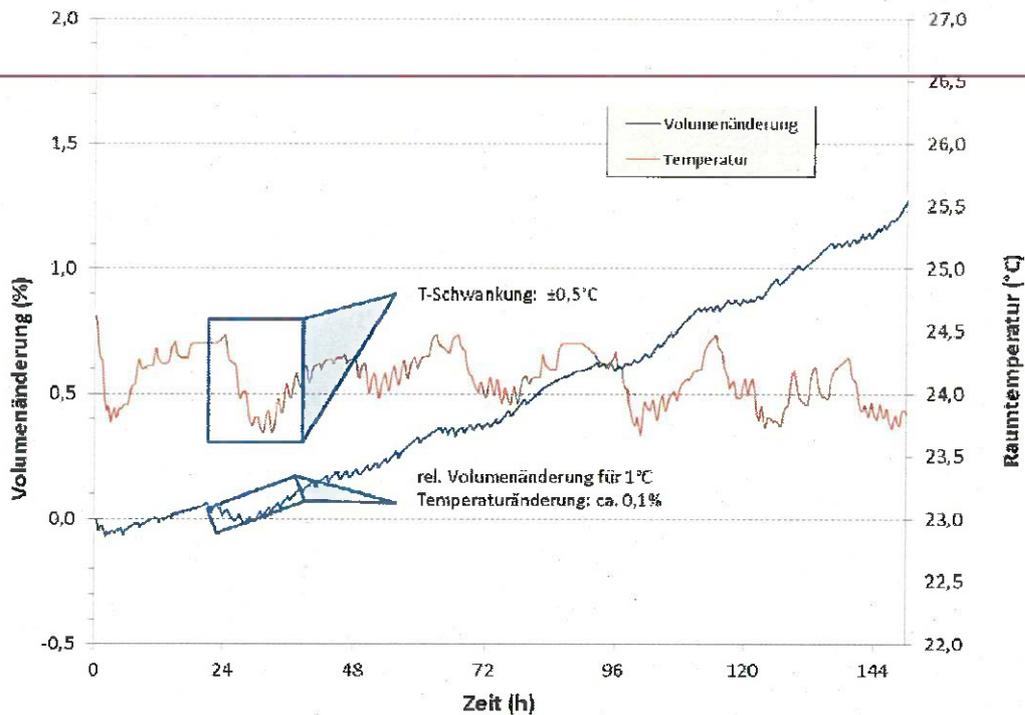


Abb. 3-2. Raumtemperaturschwankungen und deren Einwirkung auf die Volumenmessung. Langzeitverformungsversuch 453/9 (Verformungsrate: $1 \cdot 10^{-7}$ 1/s).

Die Manteldruckmessung erfolgt mit Druckaufnehmern der Genauigkeitsklasse 0.1. Die Axialverformung des Prüfkörpers wird als Verschiebung des Druckstempels, der die Axialbelastung vermittelt, außerhalb der Druckzelle, d.h. nicht am Prüfkörper, als Mittelwert von drei induktiven Wegaufnehmern, die im Winkel von 120° zueinander angeordnet sind, gemessen. Deshalb muss, in allen Fällen bei denen die Eigenverformung des Druckstempels einen wesentlichen Beitrag zur Verformung liefert, eine Korrektur vorgenommen werden.

Die Kraftmessung erfolgt mit einer Kraftmessdose ebenfalls außerhalb der Druckzelle. Bei der Spannungsberechnung wird nach der Empfehlung Nr. 2 und Nr. 16 der DGEG (DGEG, 1979 und DGGT, 1994) bei Triaxialversuchen die Querschnittsänderung infolge der Prüfkörperstauchung berücksichtigt.

4 ERGEBNISSE

4.1 Probencharakterisierung

Die an den Laborproben gemessenen Dichten und Geschwindigkeitswerte sowie die daraus abgeleiteten elastischen Kennwerte sind als Einzelkennwerte in Tab. 4-1 bzw. als Mittelwerte in Tab. 4-2 zusammengefasst.

Tab. 4-1. Probenliste / petrophysikal. Charakterisierung z2HS2 IfG-Charge 453.

IfG - Labor.-Nr.	453/1	453/3	453/4	453/5	453/2	453/7	453/8	453/6	453/9
Höhe h (mm) =	220,54	220,33	220,25	220,34	220,66	200,30	200,20	220,33	200,50
Durchm. (mm) =	109,46	109,47	109,46	109,52	109,42	100,01	100,12	109,57	100,18
Masse M (g) =	4498,8	4498,6	4504,4	4535,8	4500,0	3437,6	3445,0	4530,8	3422,4
Dichte ρ (g/cm ³) =	2,168	2,169	2,173	2,185	2,169	2,185	2,186	2,181	2,166
$V_{p\text{-axial}}$ (km/s) =	4,42	4,16	4,43	4,35	4,39	4,45	4,14	4,35	4,12
$V_{p\text{-radial: a-c}}$ (km/s) =	4,54	4,43	4,54	4,58	4,54	4,61	4,49	4,49	4,49
$V_{p\text{-radial: b-d}}$ (km/s) =	4,54	4,48	4,60	4,58	4,54	4,67	4,49	4,55	4,49
$V_{s\text{-axial}}$ (km/s) =	2,53	-	2,56	2,50	2,95	2,54	-	2,51	2,32
Elast. Konstanten (GPa) - axiale Richtung -									
E_d =	34,83	-	35,51	34,21	41,13	35,46	-	34,29	29,50
K_d =	23,85	-	23,77	23,24	16,74	24,48	-	23,04	21,18
G_d =	13,86	-	14,19	13,64	18,86	14,09	-	13,69	11,63
ν_d =	0,257	-	0,251	0,255	0,091	0,259	-	0,252	0,268

Tab. 4-2. Mittelwerte gesteinsphysikalischer Probenparameter z2HS2 IfG-Charge 453.

	Mittelwert	Std.-abw.
Dichte ρ (g/cm ³) =	2,18	0,01
V_p (km/s) =	4,54	0,06
V_{sl} (km/s) =	2,56	0,19
Elast. Konstanten (GPa) - axiale Richtung -	Mittelwert	Std.-abw.
E_d =	34,99	3,40
K_d =	22,33	2,67
G_d =	14,28	2,20
ν_d =	0,23	0,06

Die Geschwindigkeiten elastischer Wellen können bereits unter Normalbedingungen (d. h. unabhängig von den physikalischen Einflussfaktoren Druck und Temperatur) sehr stark variieren. Sie hängen sowohl von der mineralogisch/chemischen Zusammensetzung des Matrix-

gefüges (einschließlich möglicher Textur- und Anisotropieeffekte der gesteinsbildenden Minerale) als auch vom Volumenanteil, der Größe und Orientierung von Poren und Rissen sowie der Art der Porenfüllung ab, was integral über die Dichte beschrieben werden kann. Bezüglich des hier relevanten Porenraumes wird vereinfachend zunächst nur die integrale Porosität betrachtet. Sie lässt sich für Steinsalz (hier näherungsweise als Steinsalz mit der Nebenkomponente Anhydrit beschrieben) über die Korrelation von Dichte mit den Ultraschallgeschwindigkeiten abschätzen. Eine allgemeine Formel, die den Anteil der Porosität als Geschwindigkeits-Effekt in einem Gestein berücksichtigt, ist die von WYLLIE (WYLLIE et al., 1956). Sie wird als Zeitmittel-Gleichung beschrieben, da sie auf einer Mittelung der Laufzeiten- und -wege einer Welle durch das Gestein in einem Medium aus ideal abwechselnden Schichten basiert.

Unter Annahme eines nur luftefüllten Porenraums lautet die WYLLIE-Gleichung:

$$\frac{1}{V_p} = \frac{\phi}{V_{p_{Luft}}} + \frac{1-\phi}{V_{p_{Matrix}}}$$

- mit V_p = P-Wellengeschwindigkeit Gesteinsprobe
 $V_{p_{Luft}}$ = Geschwindigkeit der luftefüllten Porosität
 $V_{p_{Matrix}}$ = Geschwindigkeit der Gesteinsmatrix
 ϕ = Porosität

Tab. 4-3. Geschwindigkeits- und Dichtewerte des Dreikomponenten-Systems Steinsalz-Anhydrit-Luft.

	Vp (km/s)	Dichte (g/cm ³)
Anhydrit	6,05	2,96
Steinsalz	4,52	2,16
Luft	0,33	≈ 0

Unter Annahme obiger Kennwerte sowie eines linearen Zusammenhangs zwischen den Geschwindigkeiten der Mineralgeschwindigkeiten relativ zum Volumenanteil der Festphasen und proportional zur Matrixdichte lässt sich auf Basis der WYLLIE-Gleichung ein Nomogramm¹ für die Abhängigkeit der P-Wellengeschwindigkeit von Gesteinsdichte erstellen, in dem zusätzlich Isolinien für unterschiedliche Porositätswerte enthalten sind (Abb. 4-1).

¹ Zentrale Bezugspunkte des Diagramms sind die Endpunkte der reinen Mineralphasen, aus deren Volumenanteilen Dichte- und Geschwindigkeitswerte der rissfreien Mischphasen abgeleitet sind. Ausgehend von diesen Matrixkennwerten verschieben sich mit zunehmender Porosität die Geschwindigkeits/Dichtepaare in Form gekrümmter Kurvenscharen zu kleineren Werten. Wird von einem realistischen Porositätsspektrum bis 10% ausgegangen, hängt die Gesteinsdichte wesentlich vom Volumenverhältnis von Anhydrit und Steinsalz ab, während die P-Wellengeschwindigkeit infolge des großen Geschwindigkeitskontrasts zwischen Luft und der Gesteinsmatrix vor allem durch den Porenraumanteil bestimmt wird (bei Anwesenheit von Salzlösung mit deutlich größerer Wellengeschwindigkeit wäre dieser Effekt reduziert).

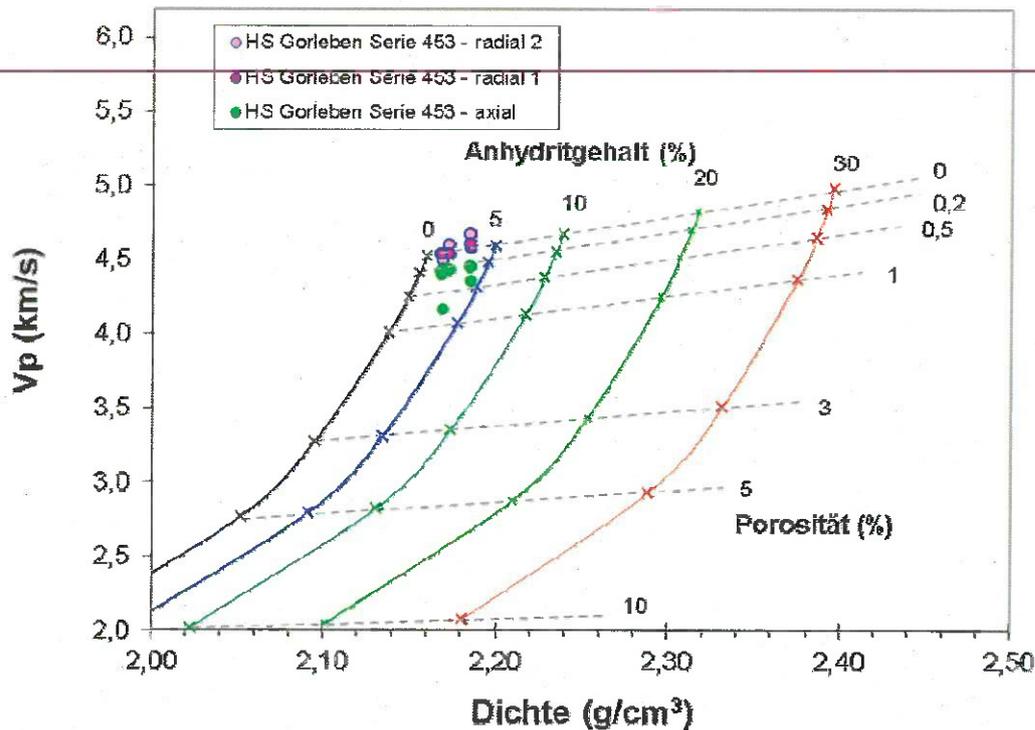


Abb. 4-1. Diagramm zur Abhängigkeit der P-Wellengeschwindigkeiten von der Gesteinsdichte von Anhydrit-führendem Steinsalz mit unterschiedlichen Luftporositäten. Dargestellt sind Geschwindigkeits/Dichtepaare von aus Steinsalzwürfeln erbohrten Zylinderproben für unterschiedliche Messrichtungen.

Es zeigt sich, dass die Probenwerte nur eine geringe Streuung (2,16 bis 2,19 g/cm³) hinsichtlich der Dichte aufweisen, während V_p vor allem richtungsabhängig zwischen 4,1 und 4,7 km/s variiert. Die Probenvariabilität resultiert zunächst aus den variablen Anhydritgehalten (bis ca. 5%) und einer inhärenten Auflockerung (bis ca. 1%) infolge der zeitabhängigen Streckenstandzeit (mit Ausbildung einer Auflockerungszone bis zu einer Konturteufe von mindestens 1 m) sowie sekundären Effekten infolge Probengewinnung und -präparation. Die aus dem Diagramm abgeleiteten Eigenschaften (niedrige Anhydritgehalte, geringe Porosität) entsprechen den Ergebnissen, wie sie z.B. für Staßfurt-Steinsalz mit vergleichbaren Anhydritgehalten experimentell bestimmt wurden (z.B. POPP et al., 1999). Ähnlich ordnen sich die in Tab. 4-2 zusammengefassten dynamisch gemessenen elastischen Parameter in den bekannten Datenfundus ein.

4.2 Festigkeit und Dilatanz

Den dreiaxialen Druckversuchen wurde eine hydrostatische Belastung vorangestellt. Die Axialbelastung σ_1 und der Manteldruck σ_3 wurden dabei unter der Bedingung einer konstanten Belastungsrate 0,05 MPa/s erhöht, bis $\sigma_1 \approx \sigma_3 = 24$ MPa. Dieser Zustand wurde für 12 Stunden konstant gehalten (Setzung). Danach wurde die Probenbelastung bis auf den Manteldruck für den TC-Test abgesenkt, wobei die Entlastungsrate zur Verringerung einer entspannungsbedingten Auflockerung deutlich kleiner als im Belastungszyklus war: 3,8 MPa / h (die probenspezifischen Setzungskurven mit den daraus abgeleiteten Rissvolumina werden hier nicht weiter diskutiert). Ein entsprechender Belastungszyklus ist beispielhaft in dargestellt.

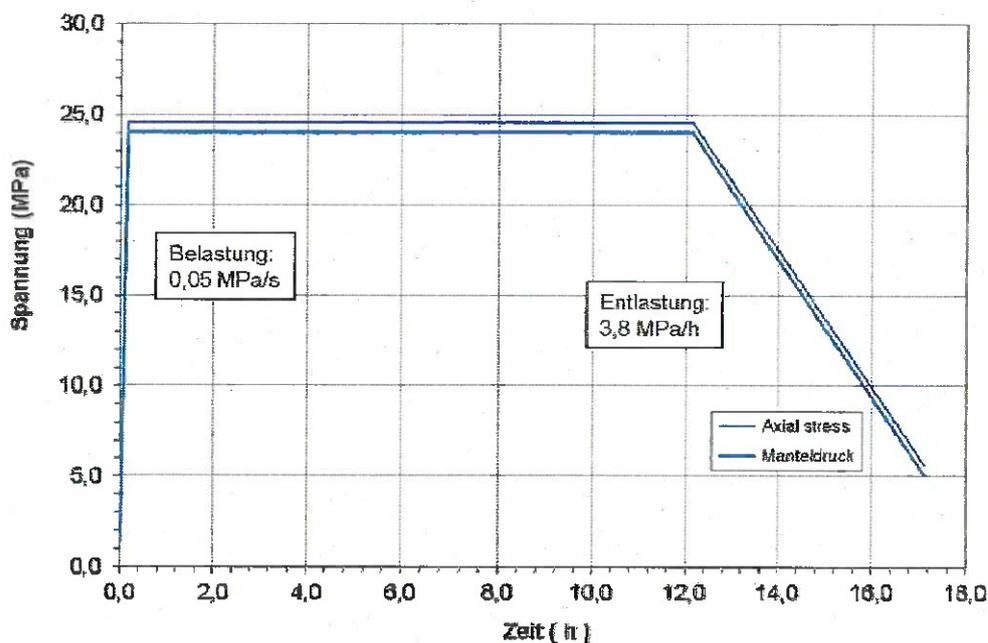


Abb. 4-2. Probenvorkonsolidation (Probe 453/2).

Tab. 4-4. Kenndaten zum Verformungs- und Festigkeitsverhalten sowie der Dilatanz für Hauptsalz der Lokation Gorleben (z2HS2 - IfG-Charge 453).

IfG - Labor.-Nr.	453/1	453/3	453/4	453/5	453/2	453/7	453/8	453/6	453/9
Festigkeit / Dilatanz									
σ_3 (MPa) =	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	24,0	1,00	2,00
σ_{Dil} (MPa) =	17,35	19,48	18,10	20,06	24,19	33,82	40,32	18,35	15,5
ΔV_{Dil} (%) =	-0,05	-0,09	-0,08	-0,11	-0,07	-0,16	-0,21	-0,07	-
ϵ_{Dil} (%) =	0,14	0,20	0,18	0,26	0,40	1,31	1,98	0,18	-
σ_{Fail} (MPa) =	31,43	32,23	37,01	43,51	54,83	63,56	68,35	34,40	38,68
ΔV_{Fail} (%) =	2,78	2,93	3,25	3,45	2,83	2,75	1,06	2,87	2,70
ϵ_{Fail} (%) =	3,07	3,46	5,00	7,49	13,11	19,35	19,12	5,85	9,51

Hinweis: Bei der Laborprobe 453/9 konnten aufgrund von Raumtemperatureffekten keine zuverlässigen Dilatanzkennwerte bestimmt werden.

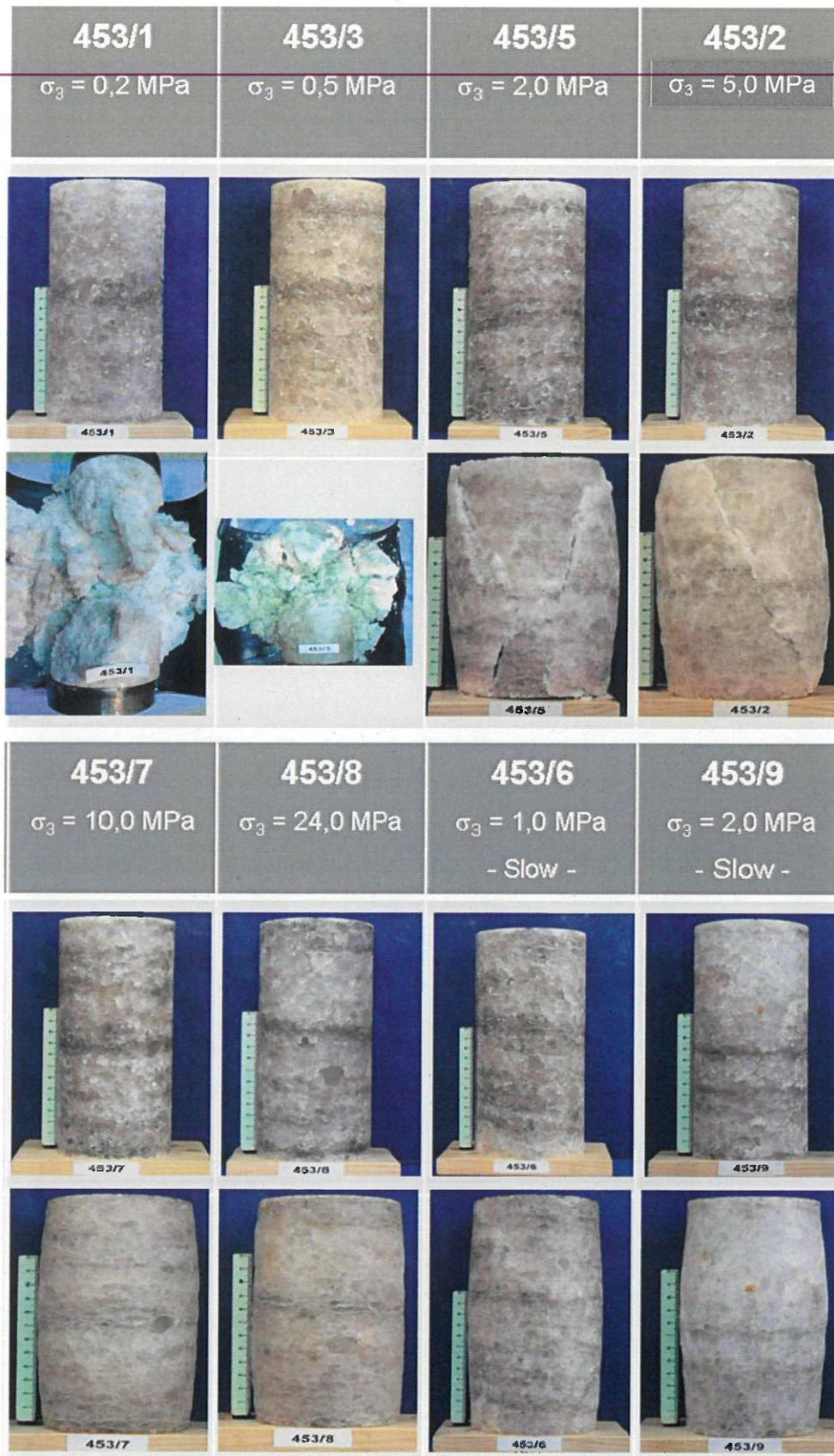


Abb. 4-3. Fotodokumentation der untersuchten Steinsalzproben (Hinweis: von der Probe 453/4 liegen infolge Datenverlust keine Probenbilder vor).

Der triaxiale Kompressionsversuch erfolgte für die Mehrzahl der Versuche (Normalversuche) verformungsgeregelt mit einer konstanten Verformungsrate von 9 %/h ($2,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$). Die Prüfkraft F der für die triaxiale Einspannung maßgebliche Manteldruck σ_3 und die axiale Verformung Δh (Mittelwert aus drei voneinander unabhängigen Einzelmessungen) wurden während der Prüfung rechentechnisch erfasst und gespeichert.

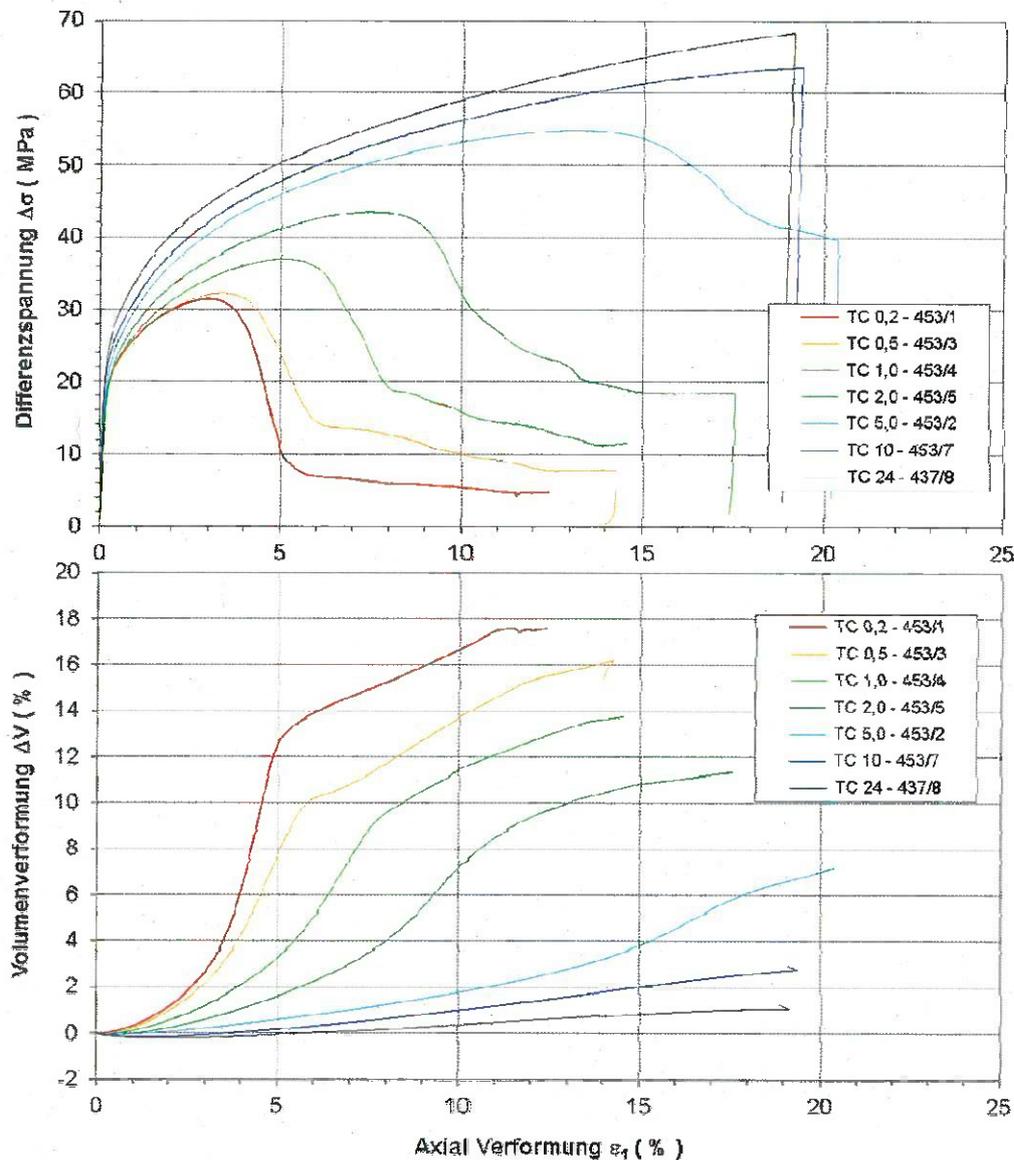


Abb. 4-4. Festigkeits- und Verformungsverhalten von Proben aus dem Hauptsalz Gorleben (z2HS2 – Probenserie IfG 453). (oben) Spannungs-Verformungskurven: σ_{Diff} vs. ϵ_{Ax} . (unten) Dilatanz-Verformungskurven ϵ_V vs. ϵ_{Ax} .

Auf Basis der Messdaten wurden die versuchsrelevanten Parameter Festigkeit und Dilatanz in Abhängigkeit von der Verformung ausgewertet und dargestellt (vgl. Tab. 4-4). Die Einzeldiagramme aller durchgeführten TC-Tests sind in den Anlagen 4.1 – 4.9 zusammengestellt.

Die durchgeführten Laborversuche decken bzgl. der realisierten Manteldruckstufen zwischen 0,2 und 24 MPa ein hinreichend repräsentatives Belastungsspektrum ab. Es umfasst sowohl rupturale Verformungsprozesse bei kleinen Einspannungen von wenigen MPa als auch den Übergang von bruchhaft zu plastisch (σ_{\min} zwischen 5 und 10 MPa) bis zur Dominanz plastischer Deformationsprozesse ($\sigma_{\min} \geq 10$ MPa), wie aus dem Vergleich der Festigkeits- und Dilatanzentwicklung der durchgeführten Festigkeitsversuche (Abb. 4-4) sowie den Verformungsbildern hervorgeht (Abb. 4-3). Das Festigkeitsverhalten wird allgemein von zunehmender Probenverfestigung bis zum Probenbruch (= maximale Festigkeit) beherrscht, wobei bereits vor dem Probenbruch bei Überschreiten eines spezifischen Festigkeitswertes (= Dilatanzfestigkeit) dilatante Verformung (infolge von Mikrorissbildung) einsetzt. Die aus den Versuchen erhaltenen Materialparameter sind in Tab. 4-4 zusammengefasst.

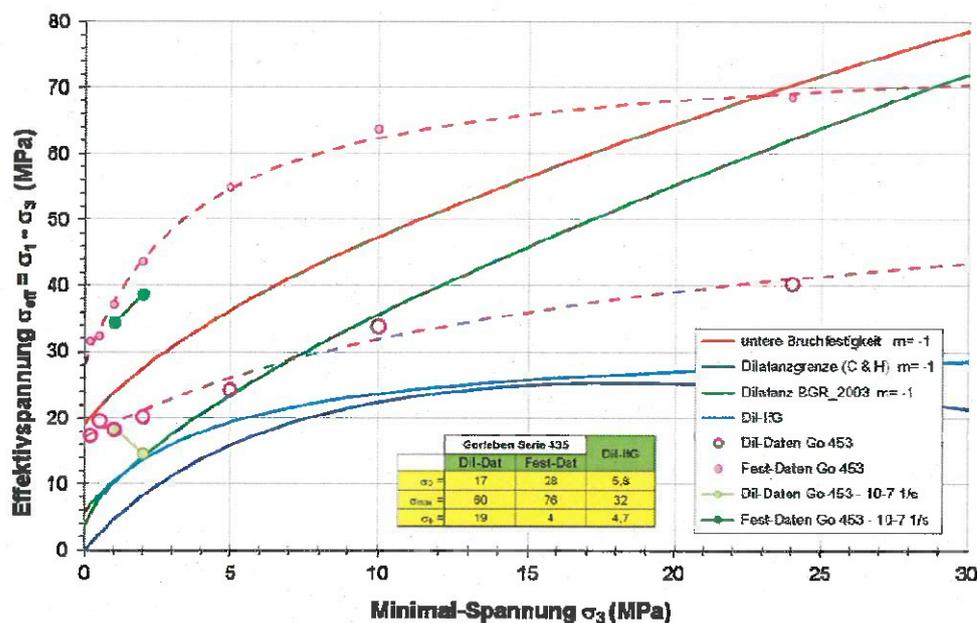


Abb. 4-5. Festigkeits- und Dilatanzwerte für Hauptsalz der Lokation Gorleben (z2HS2 - IfG-Charge 453). Effektivspannung σ_{Diff} vs. kleinste Hauptspannung σ_{\min} bzw. Manteldruck σ_3 . Zusätzlich sind mittlere Festigkeits- und Dilatanzkurven unter Verwendung des MINKLEY-Ansatzes (für Details s. Minkley et al., 2001) dargestellt.

Bei Druckversuchen mit höheren Manteldrücken (≥ 10 MPa) wurde versuchsbedingt (technische Begrenzung maximaler Prüfkörperstauchungen auf ≤ 20 %) kein Axialspannungsmaximum erreicht. Die ausgewiesenen maximalen Differenzspannungen nach Erreichen der Enddeformation von ca. 20 % lagen im Bereich von $(\sigma_{\text{Diff}})_{\text{MAX}} = 60 - 70$ MPa.

Die als Kennwerte aus den Festigkeitsversuchen abgeleitete Maximal- bzw. Dilatanzfestigkeit sind in Abb. 4-5 dargestellt. Es zeigt sich, dass Dilatanz, d.h. eine messbare Volumenvergrößerung infolge von Rissbildung, bei kleinen Einspannungen (hier zwischen $\sigma_3 = 0,2 - 1,0$ MPa) bei Spannungsdeviatoren in der Größenordnung von 18 – 20 MPa einsetzt, wobei die notwendigen Spannungsdeviatoren stark vom Manteldruck abhängen und mit steigendem Druck zunehmen. Bei hohen Einspannungen (hier für $\sigma_{3\text{max}} = 24,0$ MPa) wird ein Niveau von ca. 40 MPa erreicht.

In Abb. 4-5 sind zusätzlich verschiedene Beschreibungen für die Dilatanzgrenze aus der Literatur dargestellt. Auffällig ist das der Ansatz von Cristescu & Hunsche (1998) deutlich niedriger liegt (in etwa vergleichbar mit dem von IfG für die VSG verwendeten Parametrisierung), während die Dilatanzgrenze aus BGR (2003) erheblich höher liegt und bei Einspannungen $\sigma_3 > 25$ MPa den Bereich der hier gemessenen Bruchfestigkeiten erreicht.

Zusätzlich wurden bei $\sigma_3 = 1$ bzw. 2 MPa noch triaxiale Festigkeitsversuche mit kleiner Deformationsrate ausgeführt. Die Einzelverformungsdiagramme sind in den Anlagen 4.8 und 4.9 dargestellt. In Tab. 4-5 werden die aus den Spannungs-Dehnungs- bzw. Volumen-Dehnungskurven abgeleiteten Festigkeits- und Dilatanzkennwerte mit den entsprechenden Standardfestigkeitswerten verglichen. Es zeigt sich in beiden Fällen, dass die Verringerung der Verformungsrate um den Faktor 250, d.h. $2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/s auf $1,0 \cdot 10^{-7}$ 1/s zu einer Reduzierung der Festigkeit von etwas mehr als 10% gegenüber den Normalversuchen führt. Während die Dilatanzfestigkeiten der Versuche bei $\sigma_3 = 1,0$ MPa praktisch identisch, sind die Ergebnisse der beiden Versuche bei $\sigma_3 = 2,0$ MPa deutlich unterschiedlich.

Tab. 4-5. Vergleich der aus Triaxialversuchen mit unterschiedlichen Verformungsraten abgeleiteten Kennwerte für die Bruch- und Dilatanzfestigkeit.

	Eps-Rate (1/s)	σ_3 (MPa)	σ_{dill} (MPa)	σ_{fail} (MPa)
453/4	$2,5 \cdot 10^{-5}$	1,0	18,10	37,01
453/6	$1,0 \cdot 10^{-7}$	1,0	18,35	34,40
453/5	$2,5 \cdot 10^{-5}$	2,0	20,06	43,51
453/9	$1,0 \cdot 10^{-7}$	2,0	(14,50)	38,68

Allerdings herrschen bei dem Versuch 453/9 offenbar sehr ungünstige „klimatische“ Bedingungen, d.h., wie aus Anlage 4.9b ersichtlich, ist die entsprechende Messkurve zur Volumenänderung extrem stark verrauscht. In der Konsequenz ist der hier bestimmte Dilatanzwert nicht zuverlässig.

Davon unabhängig wird aufgrund der am IfG vorliegenden Erfahrungen eingeschätzt, dass die Lage der Dilatanzgrenze, d.h. das spannungsinduzierte Einsetzen von Mikrorissbildung mit einer messbaren Volumenzunahme, unabhängig von der Verformungsrate ist, im Gegensatz zur Bruchfestigkeit. Bzgl. der Dilatanzfestigkeit ist aber anzumerken, dass die Gesteinslithologie einen erheblichen Einfluss besitzt.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen von weiterführenden gesteinsmechanischen Arbeiten am Steinsalz von der Lokation Gorleben wurde das IfG mit der Durchführung von Festigkeits- und Dilatanzuntersuchungen an 9 Salzgesteinsproben beauftragt. Zielstellung war die Überprüfung früherer Daten zur Lage der Dilatanzgrenze.

Zur Vermeidung sekundärer Effekte (u.a. infolge einer Vorschädigung) wurde das Probenmaterial in Form von Großblöcken sehr schonend gewonnen und auch weiter verarbeitet (Herstellung von qualitativ hochwertigen Prüfkörpern). Der Schädigungszustand der Proben wurde mittels der Ultraschallvermessung überprüft, wobei die Auswertung der P-Wellengeschwindigkeiten in Korrelation mit der Dichte eine maximale Auflockerung der Salzproben bis ca. 1 Vol.-% bei Anhydritgehalten bis ca. 5% ergab. Dies entspricht den Erwartungen unter Berücksichtigung einer Auflockerungszone innerhalb der Hohlräumkontur nach einer Streckenstandzeit von mehr als 10 Jahren.

Im Vorfeld der Festigkeitsuntersuchungen wurden die Proben deshalb über eine hydrostatische Belastung bei 24 MPa über 24 h mit langsamer Entlastung bis auf den Prüfdruck vorkonsolidiert. Anschließend wurden 7 triaxiale Druckversuche an zylindrischen Probenkörpern in Kompression mit konstanter Axialverformungsrate mit $\dot{\epsilon} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/s}$ (Standardversuch) sowie 2 mit $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ 1/s}$ (langsame Rate) durchgeführt. Während die Bruchfestigkeiten der Standardversuche im Variationsspektrum früherer Proben liegen, sind die gemessenen Dilatanzkennwerte generell höher als durch die Cristescu-Hunsche-Dilatanzkurve ausgewiesen wird, wobei letztere den Charakter einer Schädigungsgrenze besitzt, d.h. oberhalb von ihr kann, wie durch Ultraschallmessungen nachgewiesen wurde, lokal Schädigung auftreten,

die noch nicht mit einer makroskopischen Volumendehnung einhergeht. Die hier gemessenen Dilatanzmesswerte liegen aber insbesondere bei höheren Einspannungen deutlich niedriger als die Kennwerte aus BGR (2003).

Die als Erweiterung durchgeführten „langsamen“ Festigkeitsversuche mit $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ 1/s}$ bestätigten die Beobachtung, dass die Gesteinsfestigkeit wesentlich von der Verformungsrate abhängt, wobei hier bei Reduzierung der Verformungsrate um einen Faktor 250 die Festigkeiten um ca. 10% niedriger lagen, als beim Standardversuch. Der Vergleich der Dilatanzkennwerte ergab kein einheitliches Bild, weil bei dem Versuch 453/9 mit $\sigma_3 = 2,0 \text{ MPa}$ die Volumenmesswerte aufgrund von Raumtemperatureffekten stark verrauscht waren und deshalb das Einsetzen von Dilatanz nicht zuverlässig detektiert werden konnte. Bei den beiden Versuchen mit $\sigma_3 = 1,0 \text{ MPa}$ sind die Dilatanzfestigkeiten praktisch identisch, d.h. die Lage der Dilatanzgrenze ist unabhängig von der Verformungsrate, was sich auch mit den Erfahrungen des IfG bzw. älteren Einschätzungen der BGR deckt.

LITERATUR

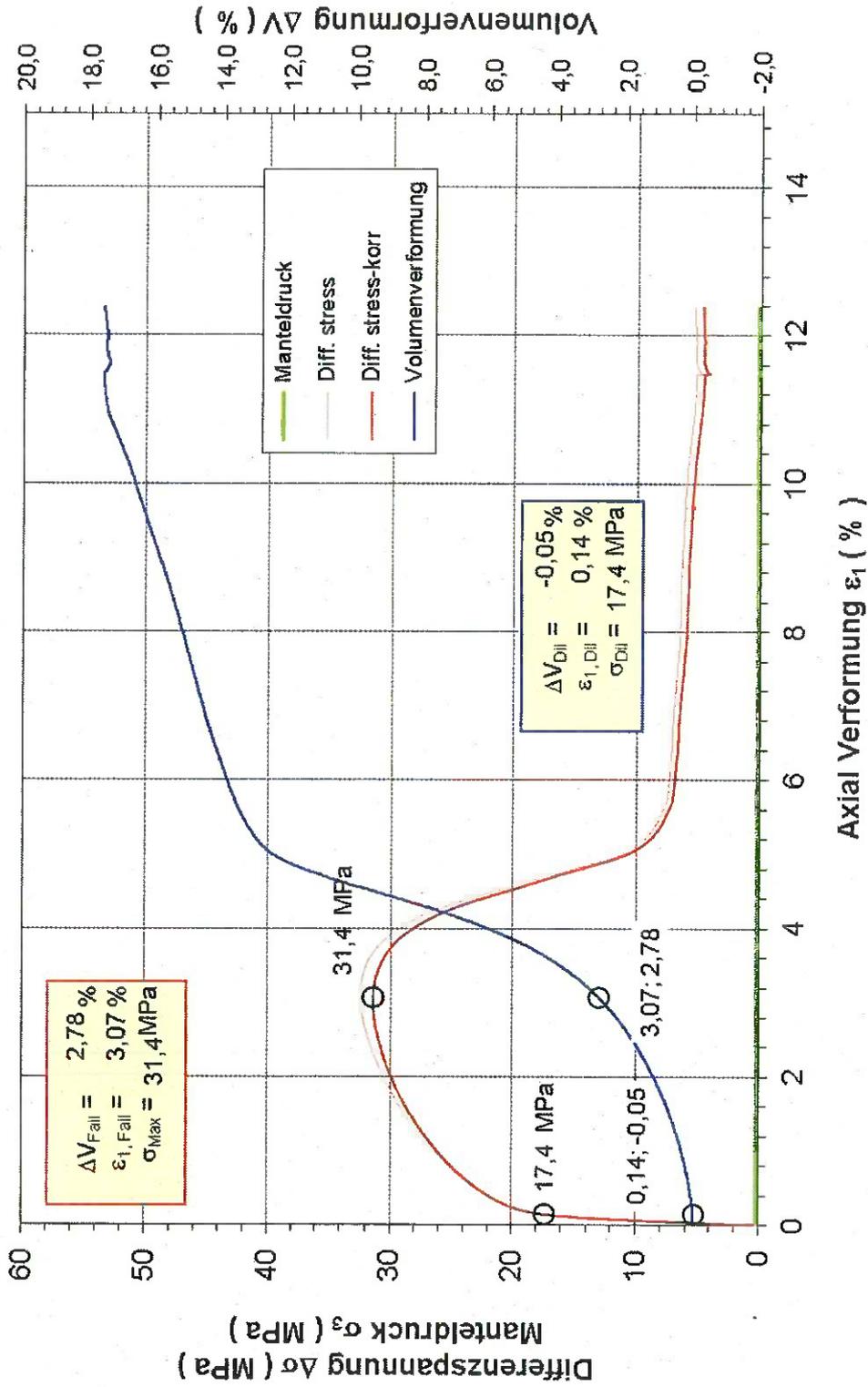
- BGR (2003): Projekt Gorleben - Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein: Abschlussbericht / U. Hunsche ; O. Schulze ; F. Walter. - Hannover, BGR Archiv-Nr. 0123873 - 157 S..
- DGEG (1979): Empfehlung Nr. 2 des AK 19 „Versuchstechnik Fels“ der DGEG (Dreiaxiale Druckversuche).
- DGEG (1987): Empfehlung Nr. 12 des AK 19 „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau (Mehrstufigentechnik bei dreiaxialen Druckversuchen und direkten Scherversuchen).
- GEBRANDE, E. H. (1982): LANDOLT-BÖRNSTEIN, Neue Serie, Gruppe V, Bd. 1, Physikalische Eigenschaften der Gesteine (Teilband b), Springer-Verlag.
- MINKLEY, W.; MENZEL, W.; KONIETZKY, H. TE KAMP, L. (2001): A visco-elasto-plastic softening model an its application for solving static and dynamic stability problems in potash mining. Proc. 2nd Int. FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics. Lyon, 29.-31. October, 21 - 27.
- POPP, T., KERN, H. & O. SCHULZE, 1999. Lithologische Variabilität der petrophysikalischen und mineralogisch-gefügekundlichen Eigenschaften des älteren Steinsalzes (z2) aus dem Salzstock Gorleben. Meyniana, Vol. 51, 55-75.
- WYLLIE, M. R. J., GREGORY, A. R. & GARDNER, G. H. F. (1956): Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, Geophysics, 21, 41-70.

ANLAGENVERZEICHNIS

Anlagen 4.1 – 4.9: Triaxiale Mehrstufen-Druckversuche an Hauptsalz der Lokation Gorleben (z2HS2 - IfG-Charge 453: Belastung senkrecht zur Schichtfläche mit $\text{eps-rate} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) - je Versuch zwei Darstellungen:

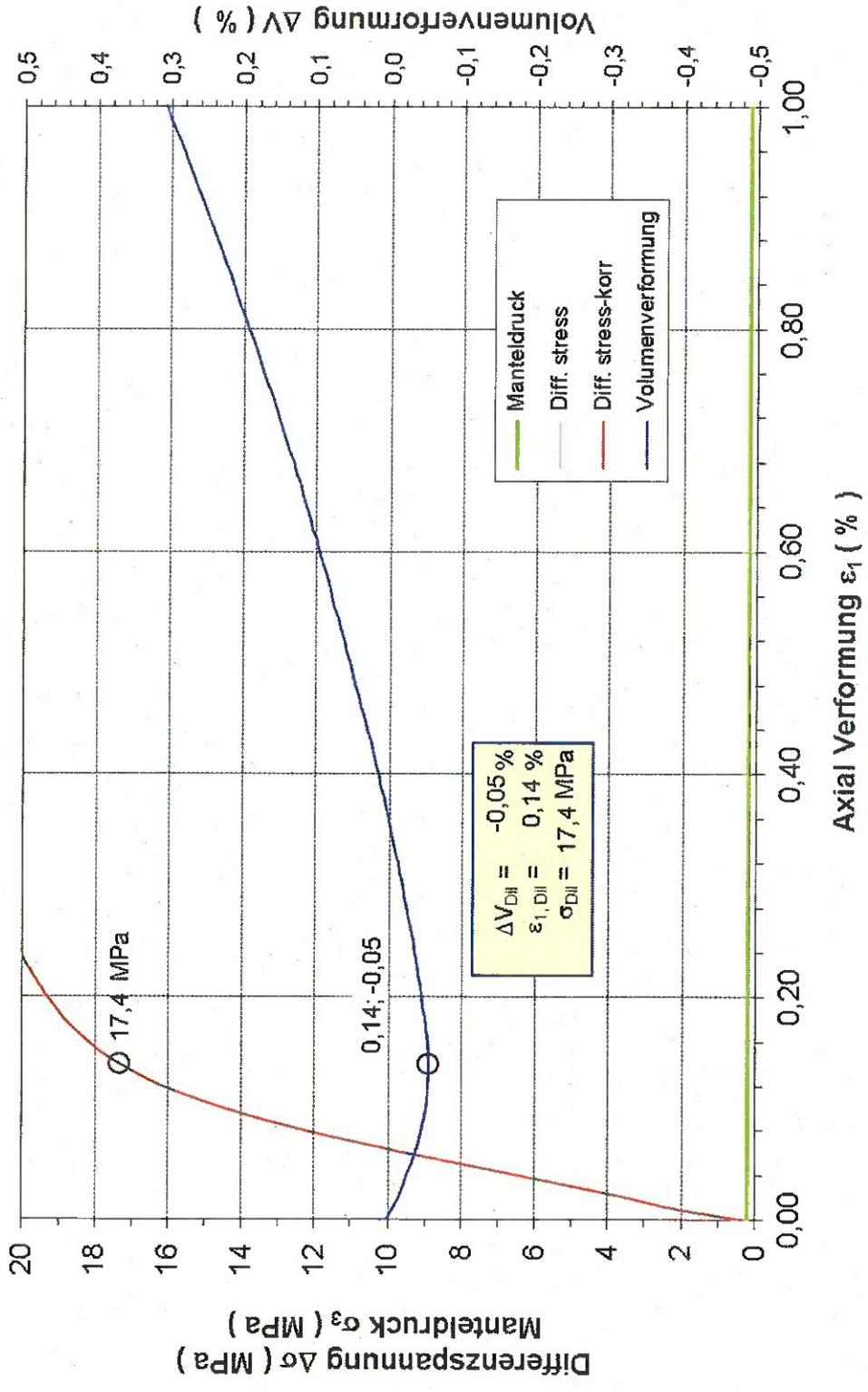
- a) Spannungsverformungsdiagramm mit Versuchsdaten
- b) Detailausschnitt zur Ableitung der Dilatanzgrenze.

Anlage 4.1	453/1-TC0,2
Anlage 4.2	453/3-TC0,5
Anlage 4.3	453/4-TC1,0
Anlage 4.4	453/5-TC2,0
Anlage 4.5	453/2-TC5,0
Anlage 4.6	453/7-TC10,0
Anlage 4.7	453/8-TC24,0
Anlage 4.8	453/6-TC1,0 - $\text{eps-rate} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$
Anlage 4.9	453/9-TC2,0 - $\text{eps-rate} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$



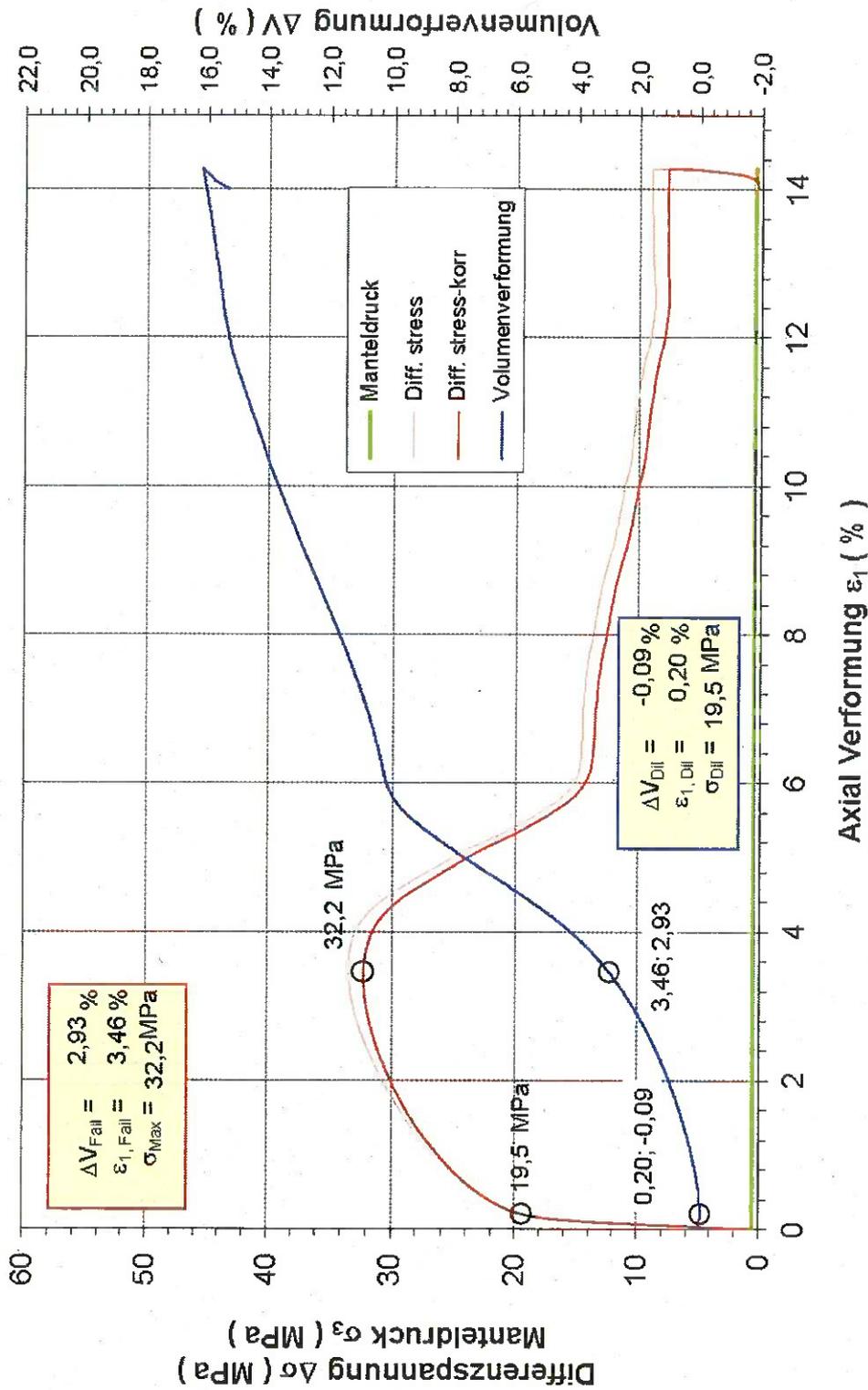
Triaxialer Kompressionsversuch: 453/1 - Überblick

σ_{Diff} und σ_3 sowie $\Delta V/V$ vs. ϵ_1



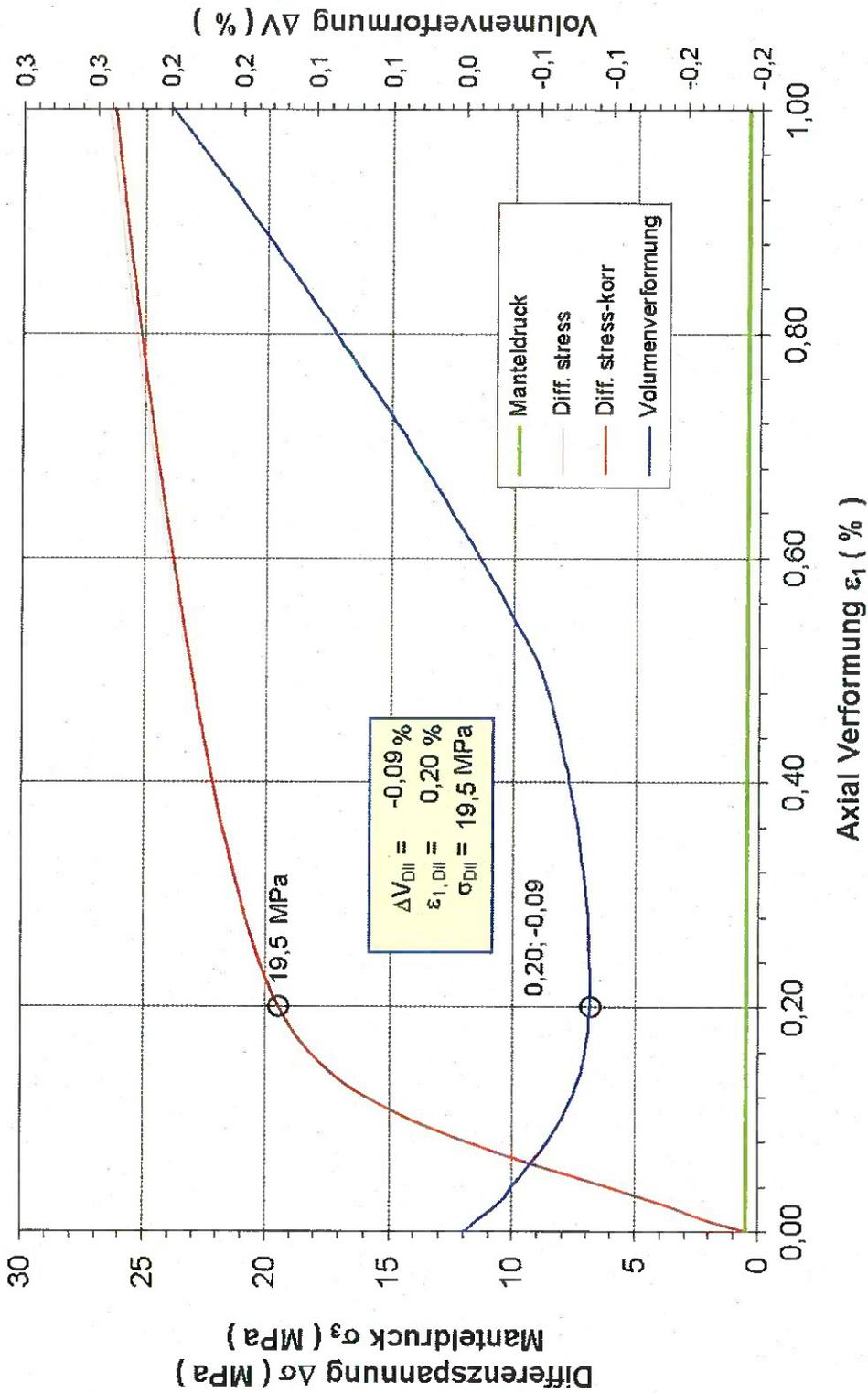
Triaxialer Kompressionsversuch: 453/1 - Dilatanzgrenze

σ_{Diff} und σ_3 sowie $\Delta V/V$ vs. ε_1



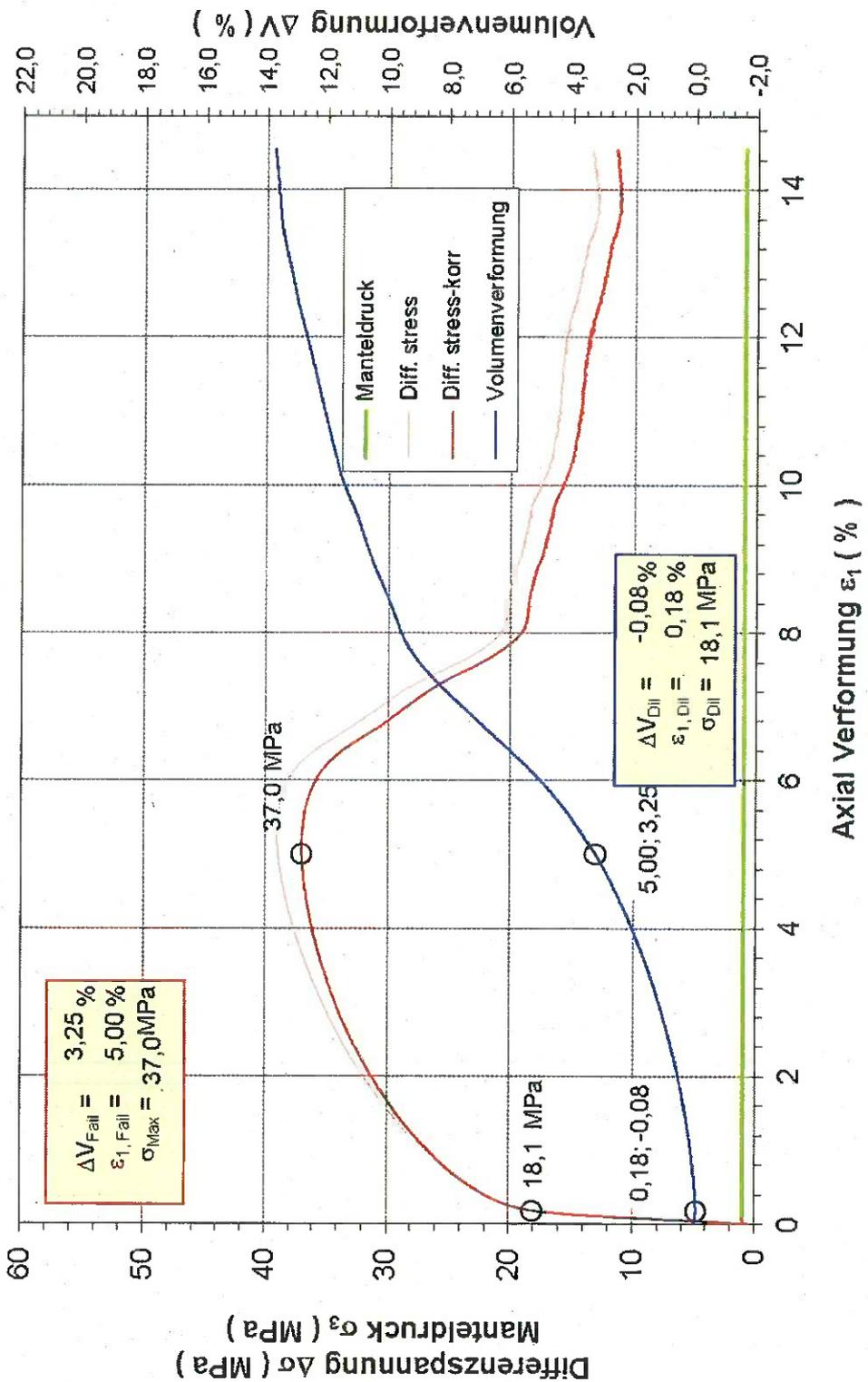
Triaxialer Kompressionsversuch: 453/3 - Überblick

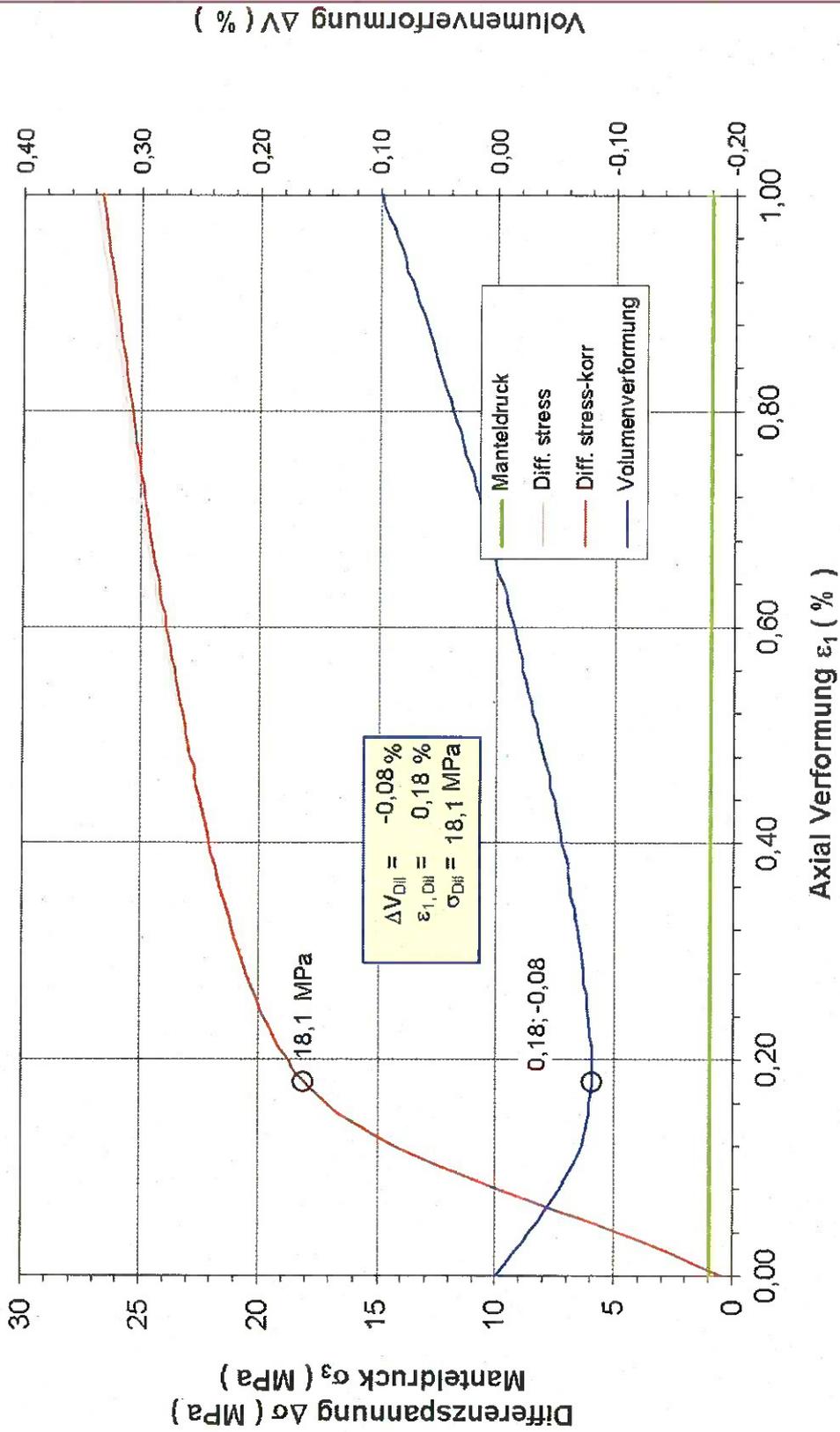
σ_{Diff} und σ_3 sowie $\Delta V/V$ vs. ϵ_1



Triaxialer Kompressionsversuch: 453/3 - Dilatanzgrenze

σ_{Dil} und σ_3 sowie $\Delta V/V$ vs. ϵ_1

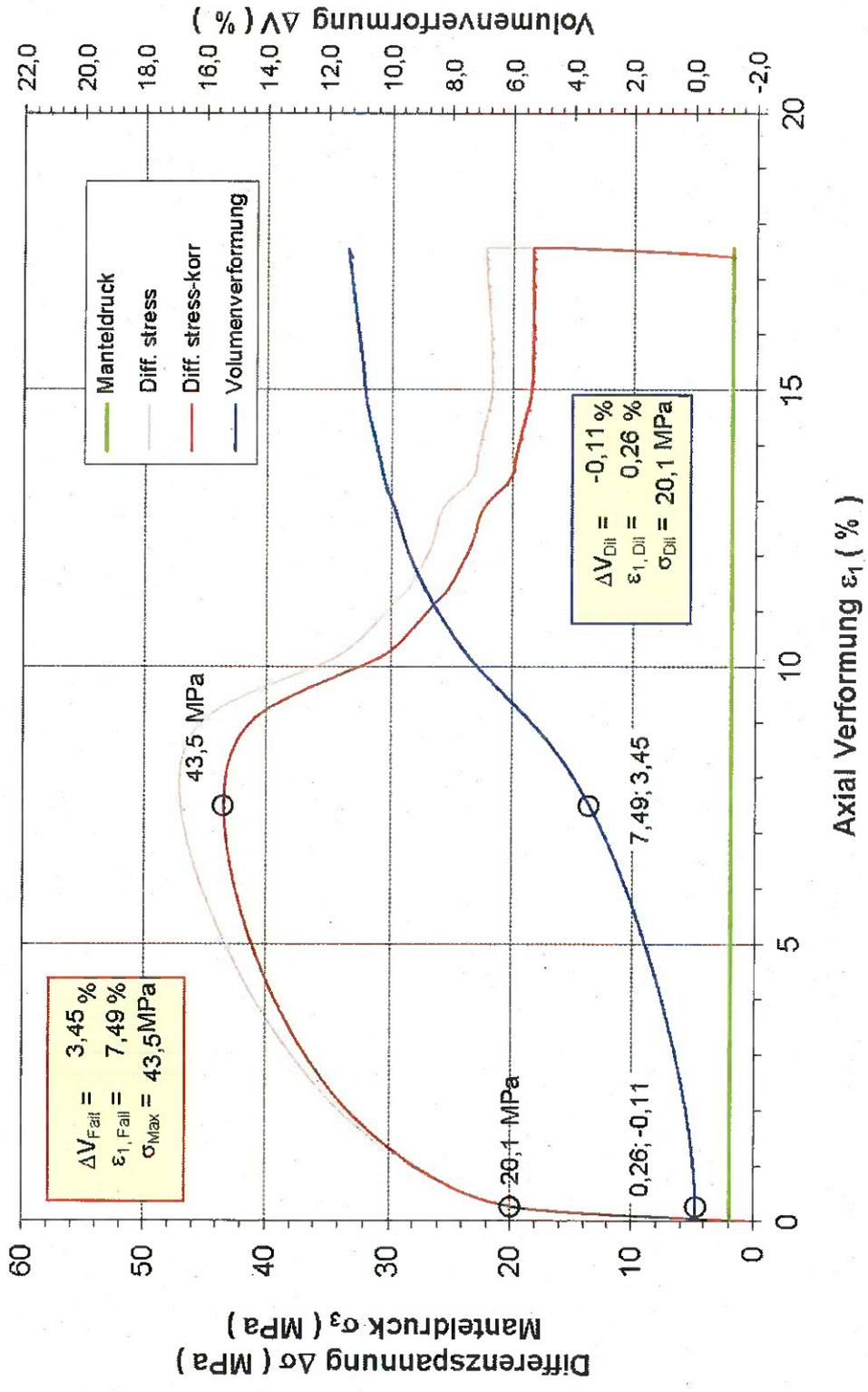


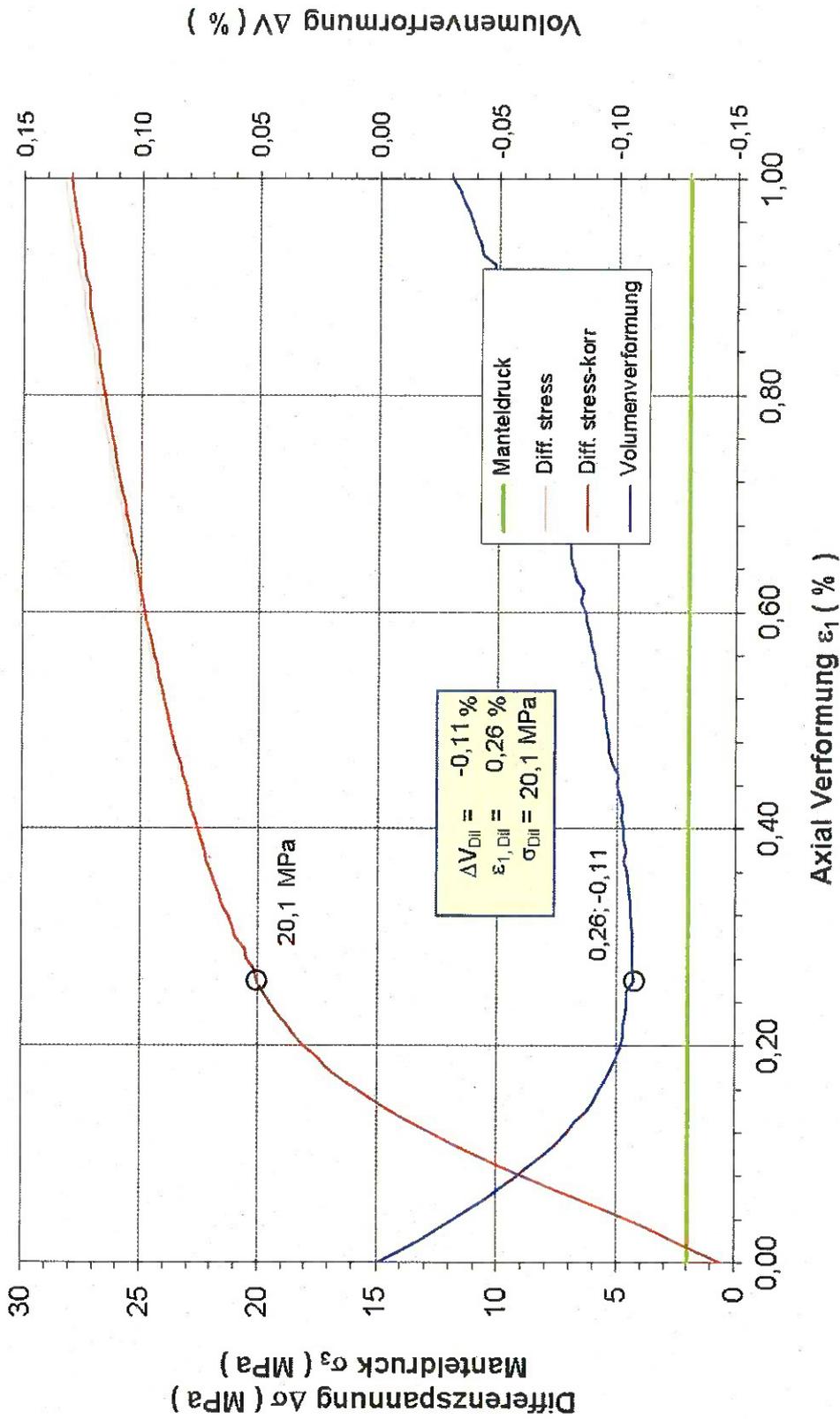


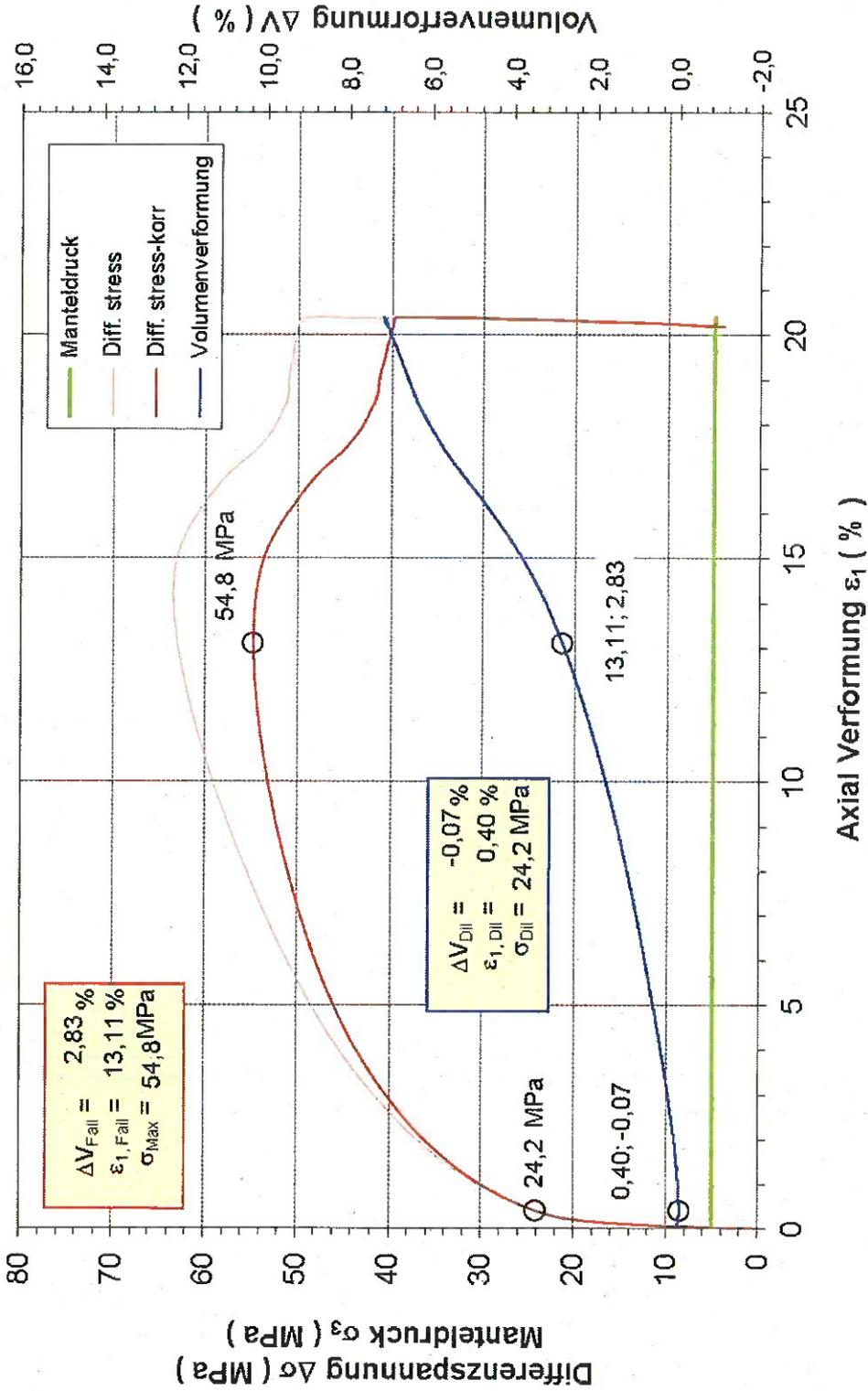
Triaxialer Kompressionsversuch: 453/4 - Dilatanzgrenze

σ_{Dif} und σ_3 sowie $\Delta V/V$ vs. ϵ_1







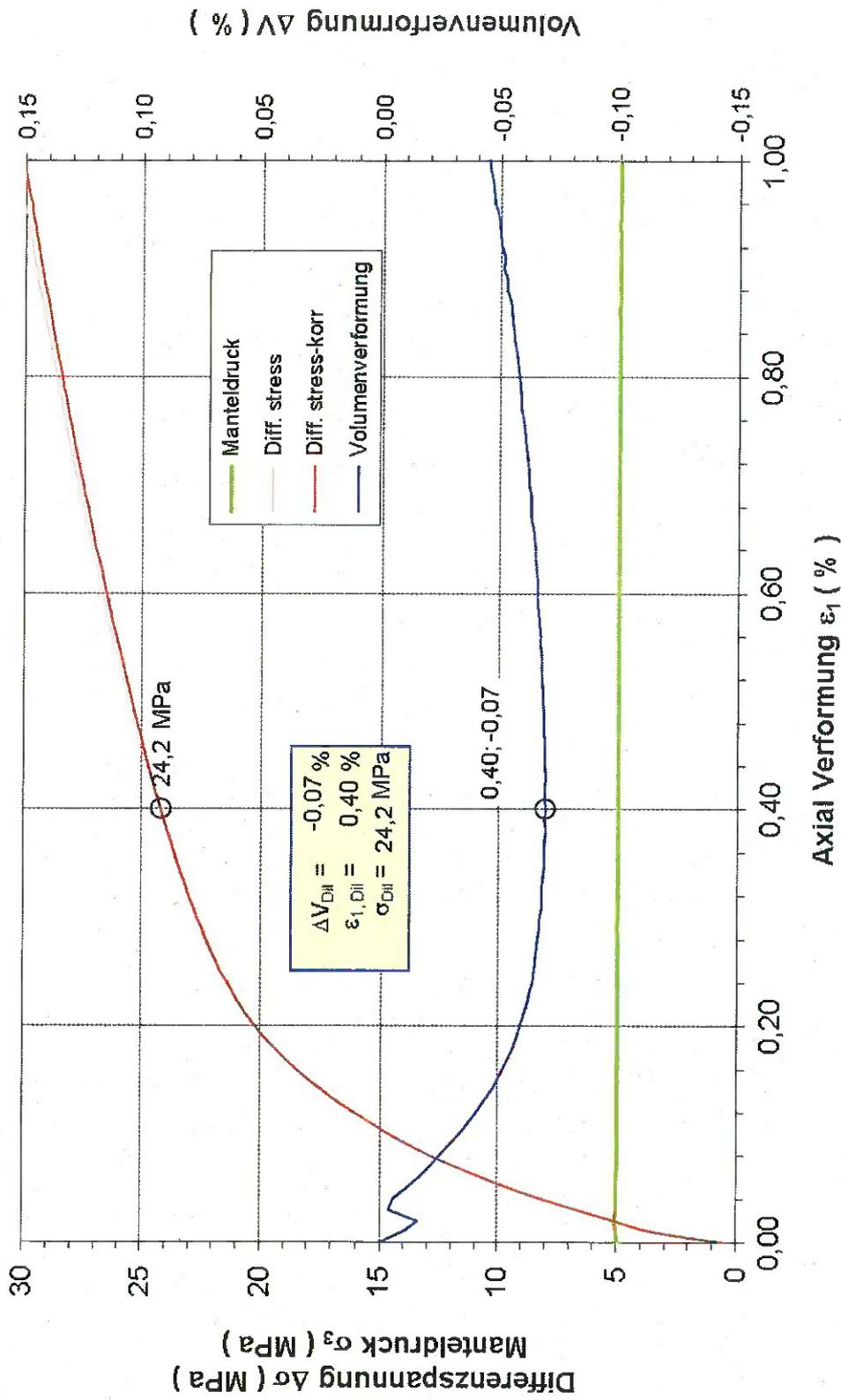


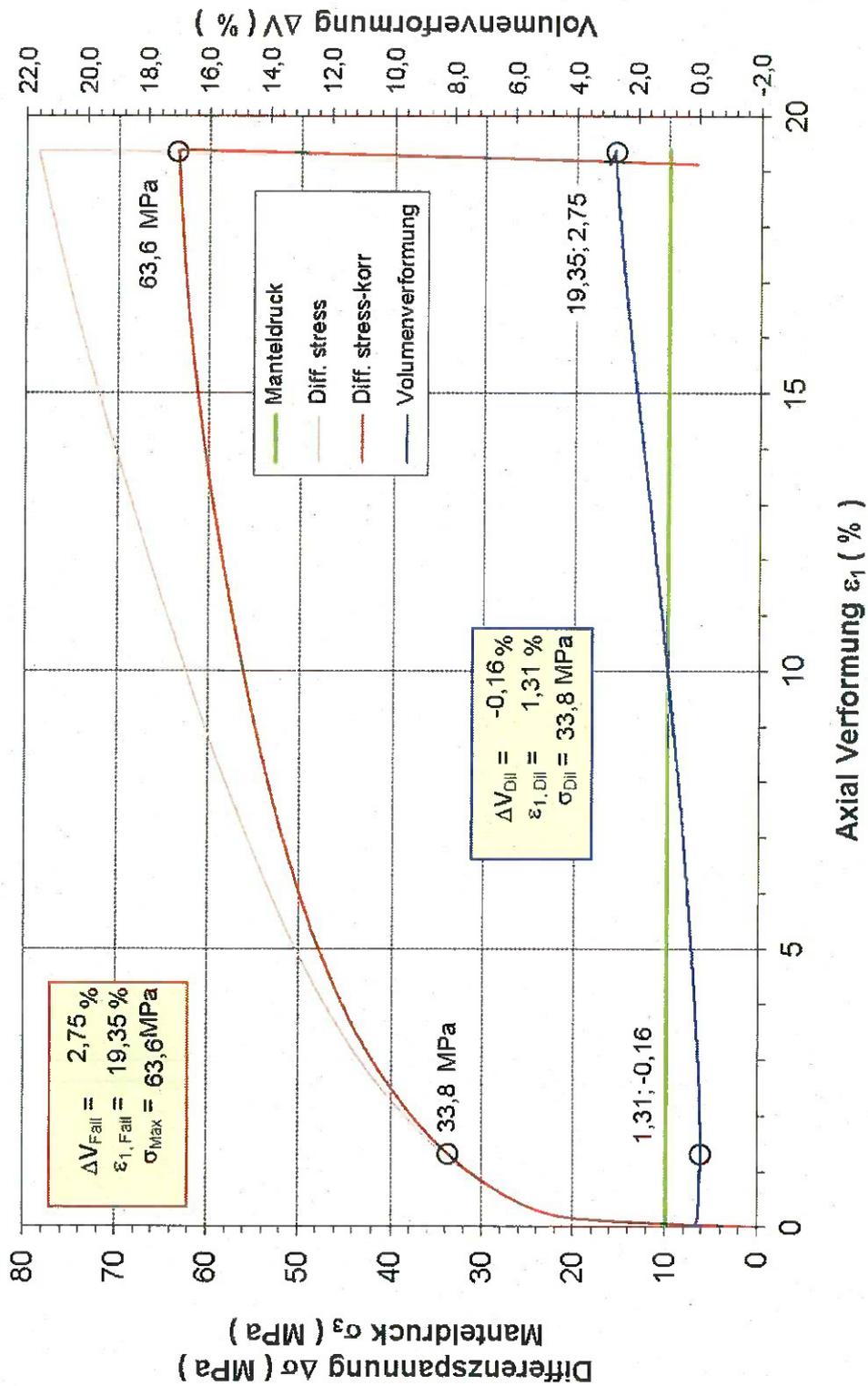
Triaxialer Kompressionsversuch: 453/2 - Überblick

σ_{Diff} und σ_3 sowie $\Delta V/V$ vs. ϵ_1

Anlage 4-5a

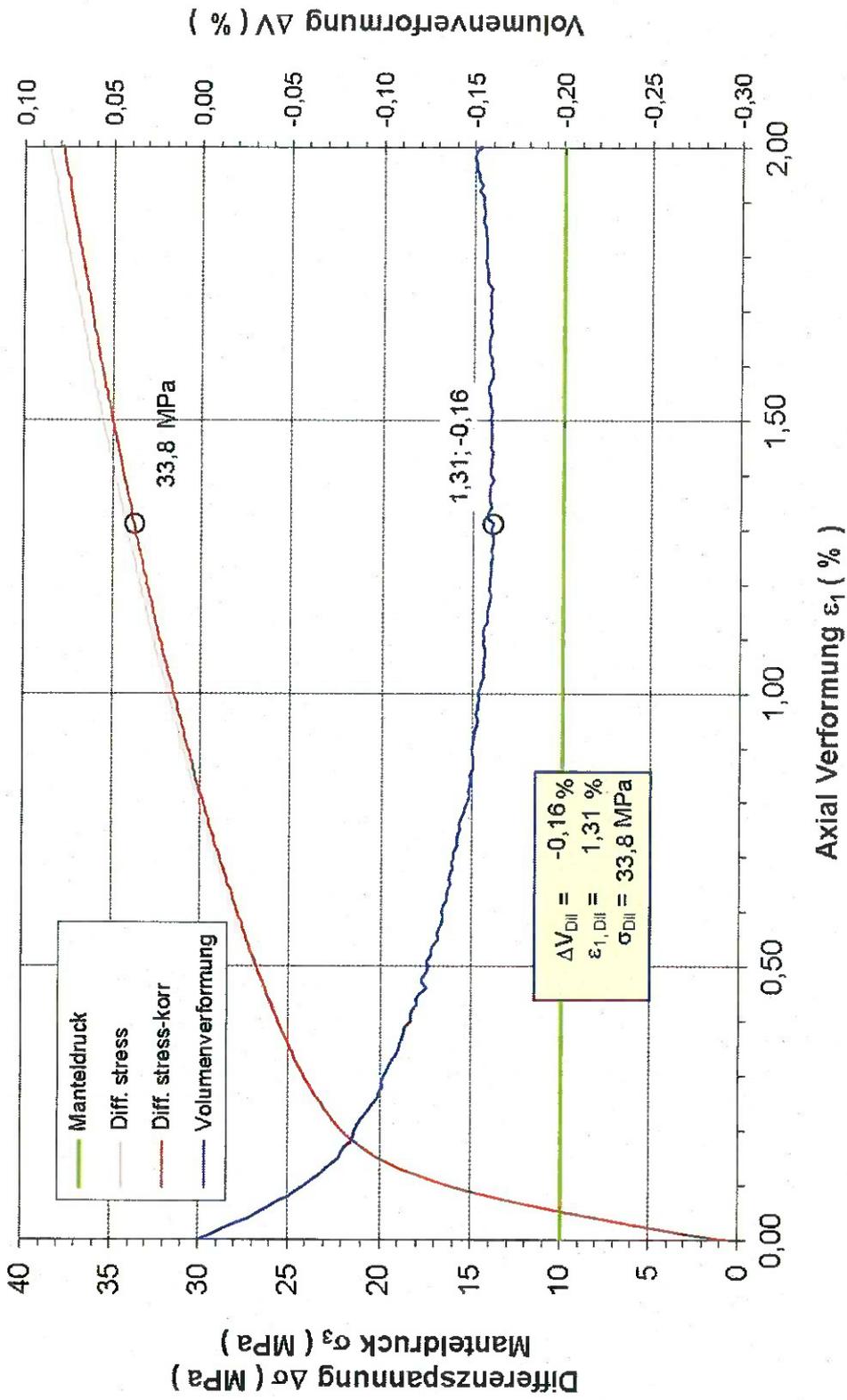


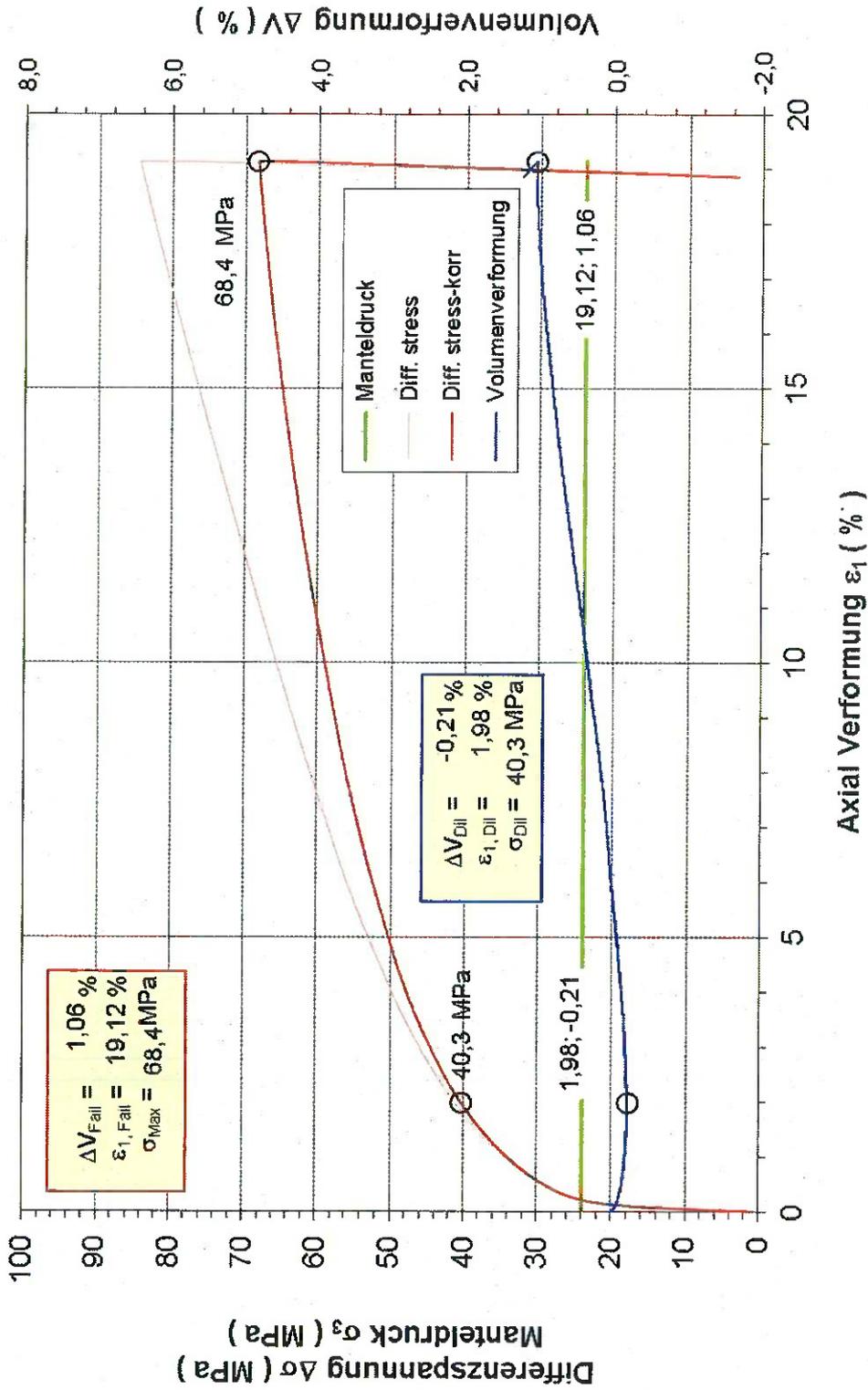




Triaxialer Kompressionsversuch: 453/7 - Überblick

σ_{Diff} und σ_3 sowie $\Delta V/V$ vs. ϵ_1

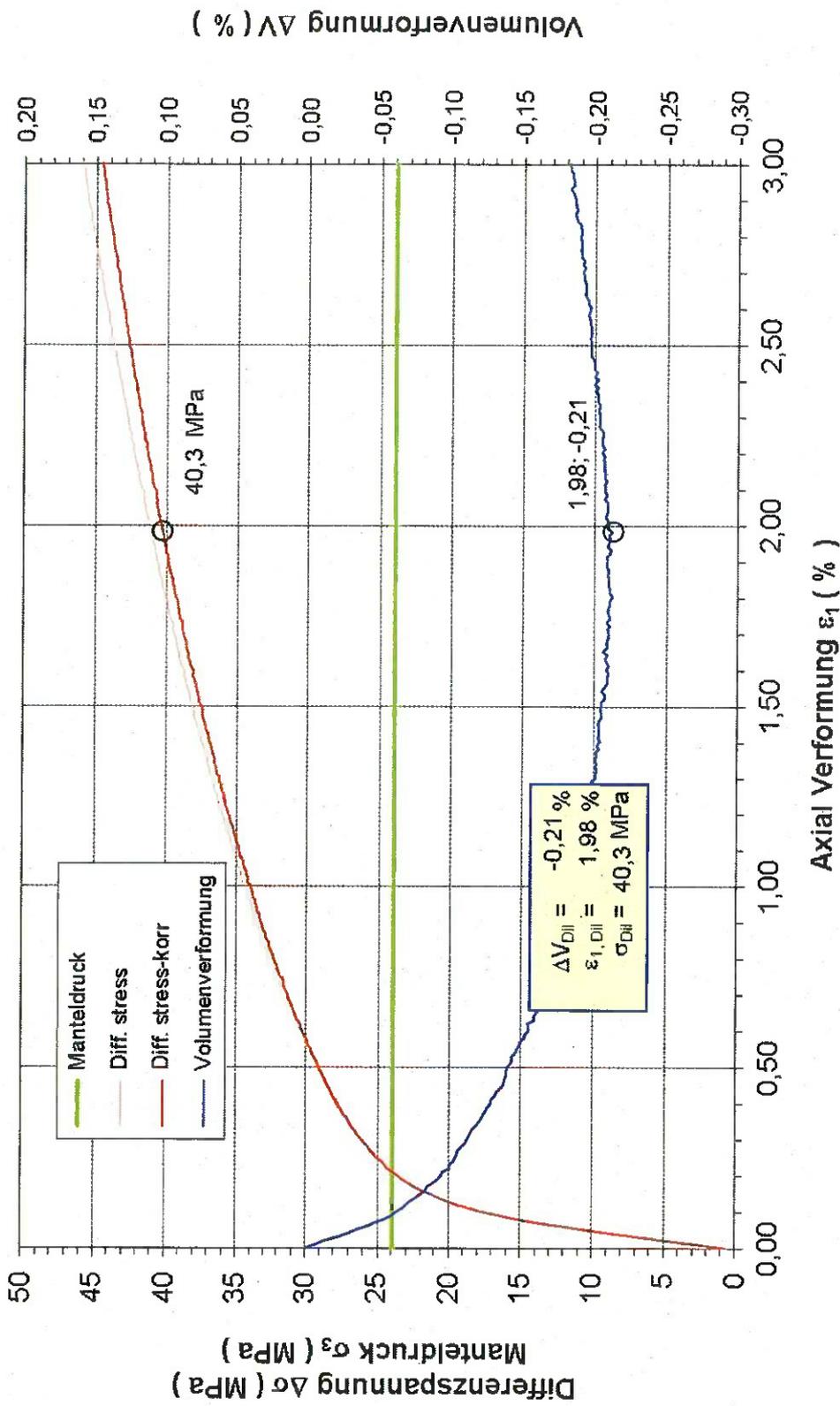


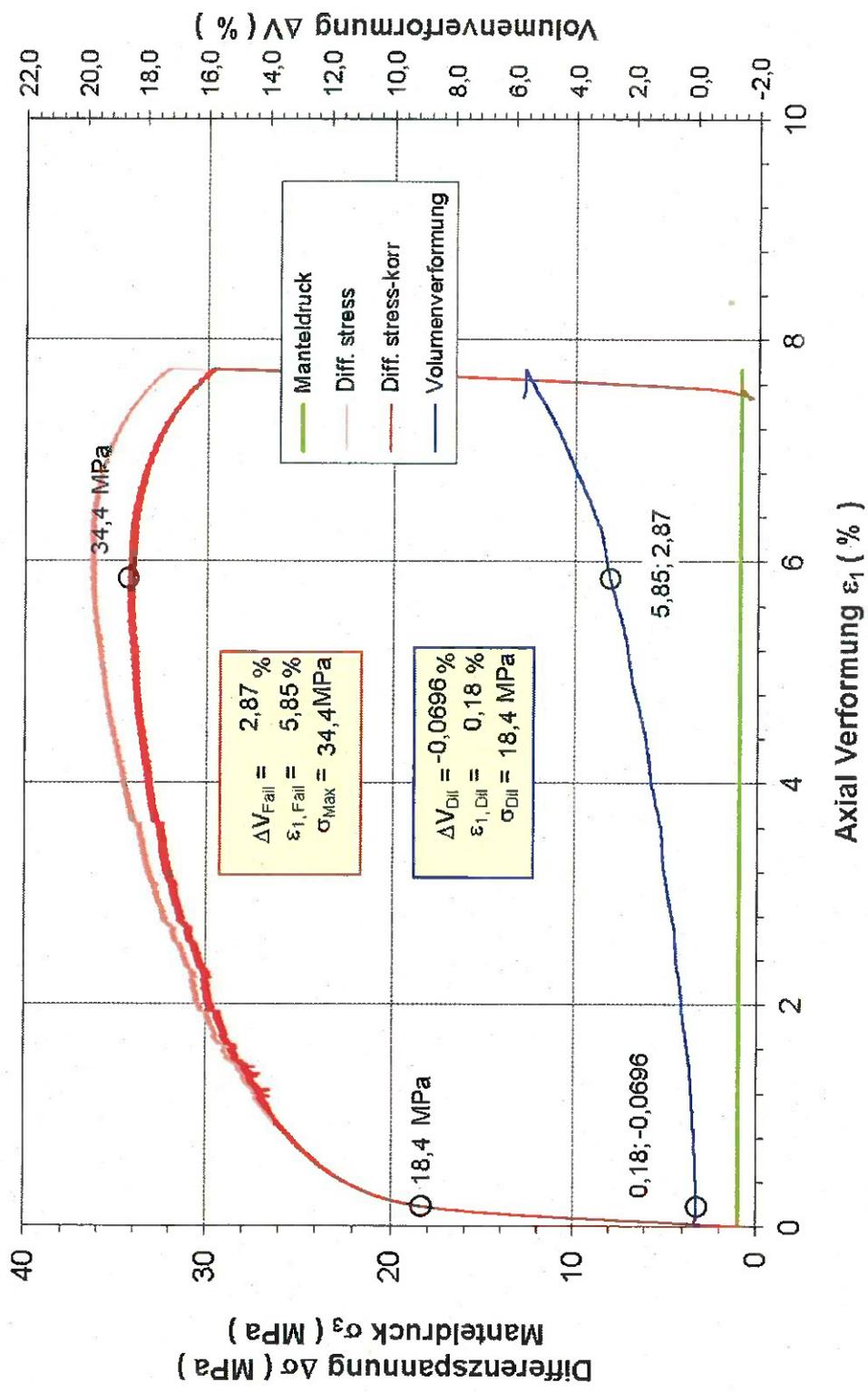


Triaxialer Kompressionsversuch: 453/8 - Überblick

σ_{DII} und σ_3 sowie $\Delta V/V$ vs. ε_1

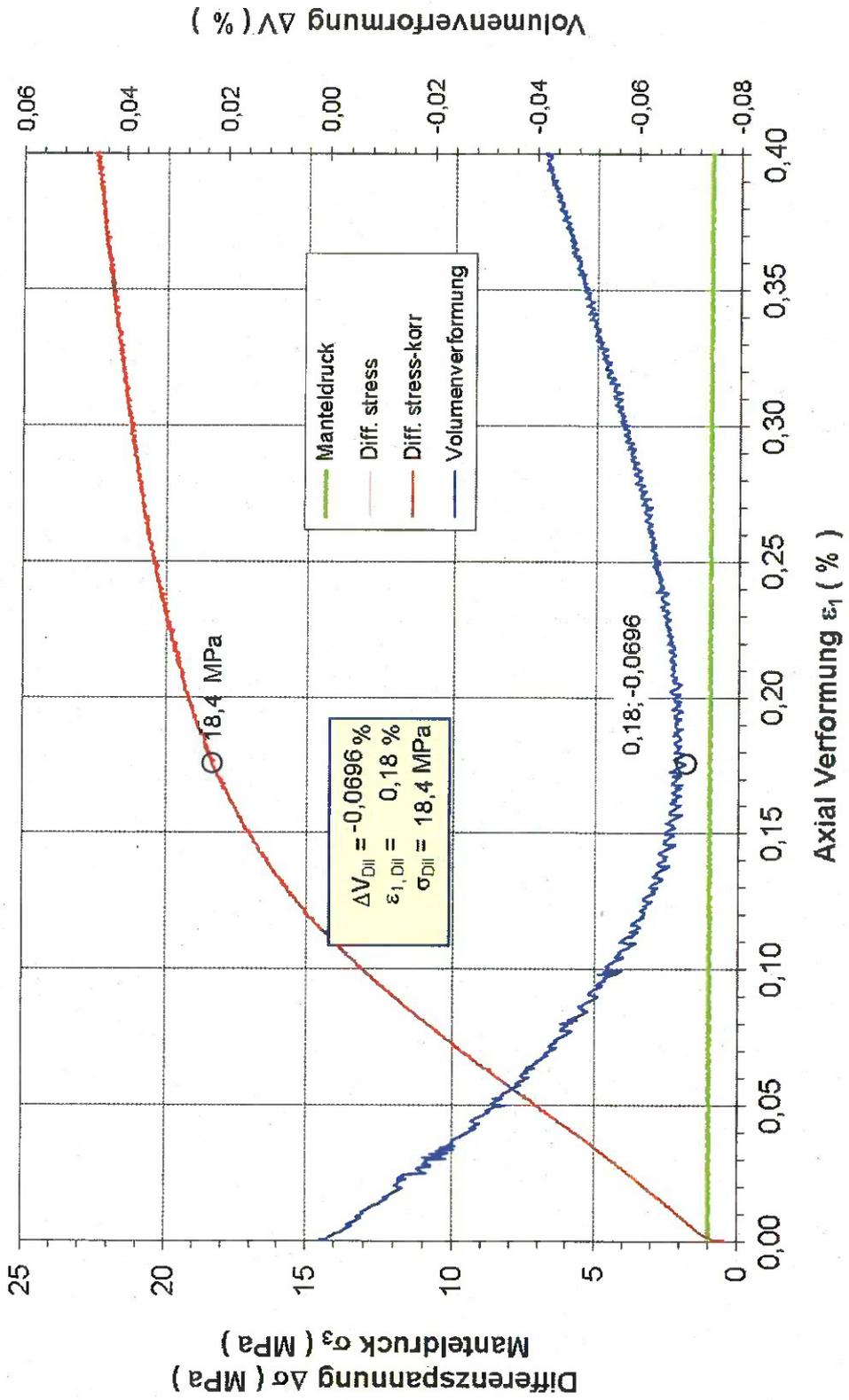
Anlage 4-7a





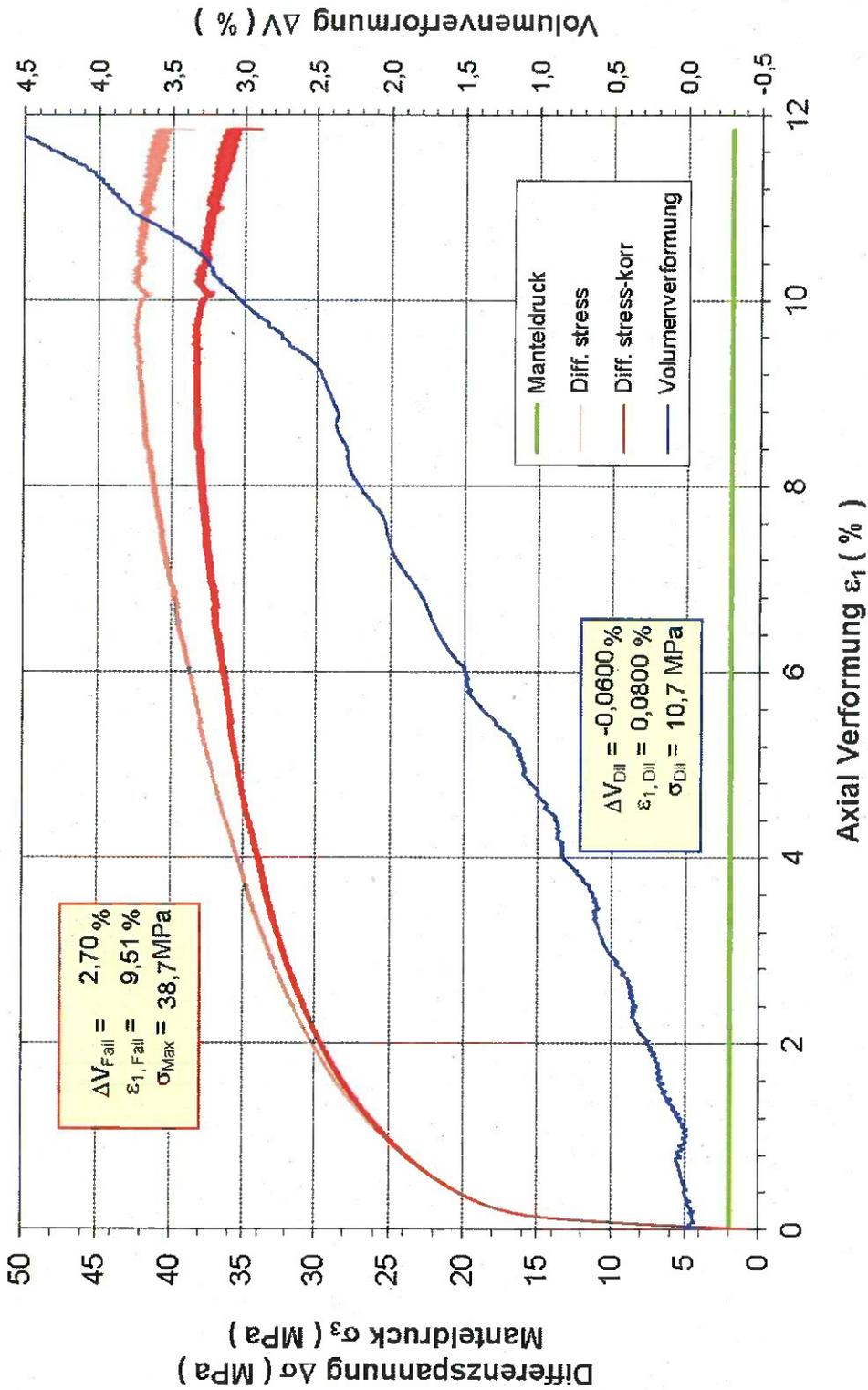
Triaxialer Kompressionsversuch: 453/6 - Überblick

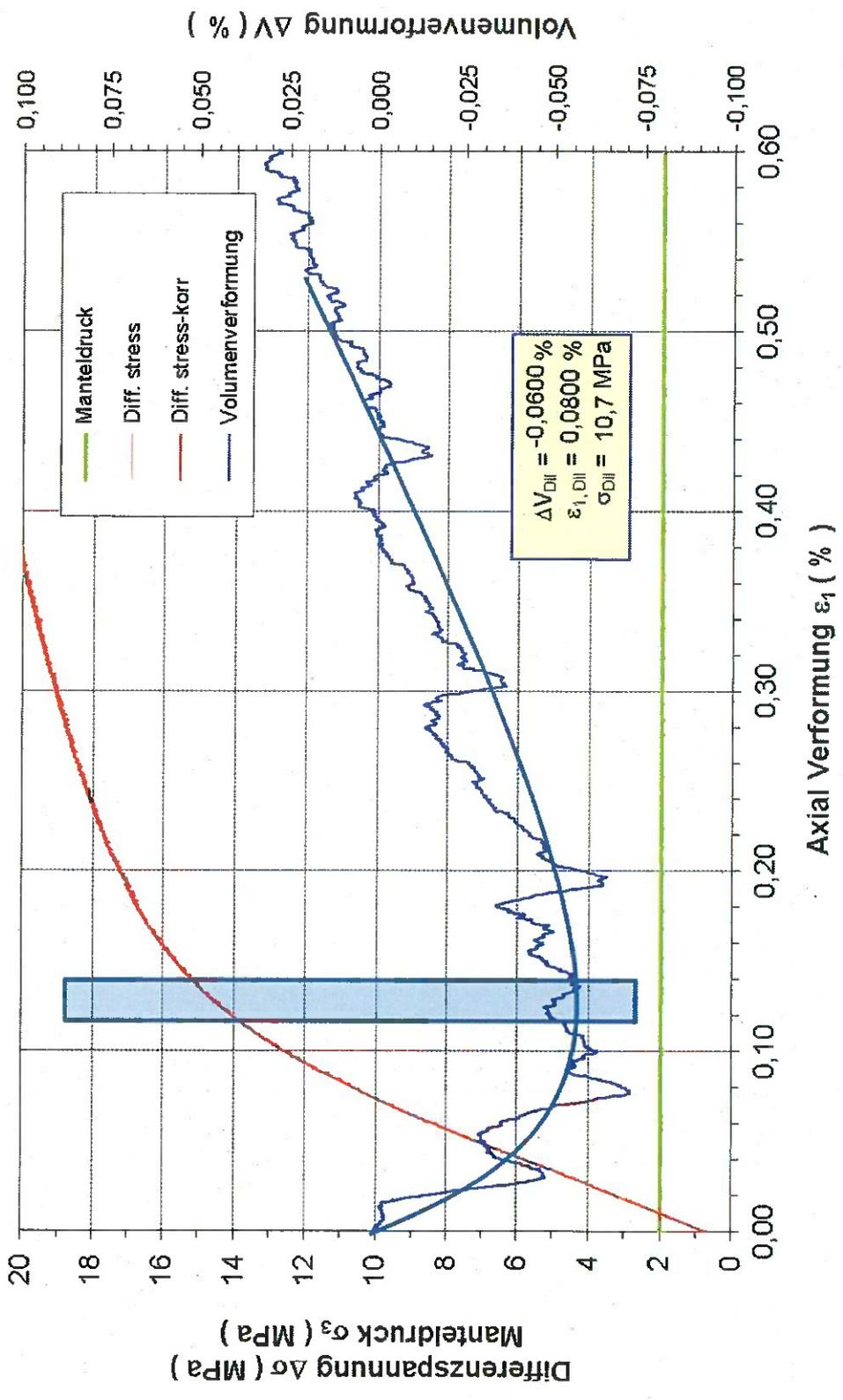
σ_{Diff} und σ_3 sowie $\Delta V/V$ vs. ϵ_1



Triaxialer Kompressionsversuch: 453/6 - Dilatanzgrenze

σ_{Diff} und σ_3 sowie $\Delta V/V$ vs. ϵ_1





Triaxialer Kompressionsversuch: 453/9 - Dilatanzgrenze

σ_{Diff} und σ_3 sowie $\Delta V/V$ vs. ϵ_1

