



DECKBLATT

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
EU 081.5	9K 3195	---	H	RB	0020	00

Titel der Unterlage: Untersuchungen zu Festigkeit und Verformbarkeit von Tonmergel- und Tonstein-Prüfkörpern aus der Bohrung Konrad 101 - Ergebnisse von Dauerstandversuchen - Archiv-Nr.: 98650

Seite:
I.

Stand:
04.07.86

Ersteller:
BGR

Textnummer:

Stempelfeld:

PSP-Element TP.....9K/2122414

zu Plan-Kapitel: 3.1.9.7

PL
08.12.86

PL
08.12.86

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung der PTB.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

Laborbericht : - Ref. B2.13 -

"Untersuchungen zu Festigkeit und Verformbarkeit von Tonmergel-
und Tonstein-Prüfkörpern aus der Bohrung Konrad 101 "

- Ergebnisse von Dauerstandversuchen -

Sachbearbeiter: 
Datum:
Arch. Nr.: 98 650
Tgb. Nr.: 11 475/86

Inhalt -----	Seite -----
1. Einleitung	1
1.1 Veranlassung	1
1.2 Ziel der Untersuchungen	1
2. Untersuchungsumfang und Versuchsdurchführung	3
2.1 Untersuchungsumfang	3
2.2 Versuchsführung zur Festigkeitsprüfung	3
2.3 Versuchsführung zum Dauerstandverhalten	4
3. Untersuchungsergebnisse	5
3.1 Festigkeitsprüfung	6
3.2 Dauerstandversuche	8
4. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen zum Dauerstandverhalten von Tonmergel- und Tonstein	12
Literatur	15
Anlagen :	
7 Tabellen	
5 Abbildungen	

1. Einleitung

1.1 Veranlassung

Im Rahmen der "Standorterkundung Konrad" ist die Wirksamkeit der Unterkreide-Tonfolge als natürliche Barriere zu beurteilen. Dies schließt die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der anstehenden Gesteine im Hinblick auf deren Festigkeit und deren Dauerstandverhalten ein.

Im Referat B2.13 "Salzmechanik" stehen Prüfeinrichtungen zur Verfügung, mit denen das Verformungsverhalten unter einer fest vorgegebenen mechanischen Beanspruchung über lange Standzeiten eingemessen werden kann (Kriechprüfstände). Aus einer Serie von Tonmergel- und Tonstein-Prüfkörpern für Festigkeitsuntersuchungen wurden uns vom Referat B2.14 acht Prüfkörper zur Untersuchung des Dauerstandverhaltens überlassen.

1.2 Ziel der Untersuchungen

Das mechanische Verhalten eines Gesteins hängt im wesentlichen von der Art seiner Beanspruchung ab. Dabei können verschiedene Mechanismen zum Tragen kommen. Bei Laboruntersuchungen an intakten Gesteinsprüfkörpern gilt folgender Befund für nahezu jedes Material qualitativ generell:

- Im Falle einer zügigen Beanspruchung (mit z.B. konstanter aufgeprägter Verformungsrate) dominiert die elastische Formänderung, wenn nicht durch gleichzeitige Kriechverformung der Spannungsaufbau teilweise wieder kompensiert wird. In einem spröden Material entstehen bei fortgeführter Verformung mit dem Überschreiten der Festigkeit lokal Risse, bis der Probenbruch auch makroskopisch auftritt.
- Dagegen kann duktiler Materialverhaltens erwartet werden, wenn bei genügend geringen Verformungsraten der innere Spannungsaufbau wegen Kriechens die Festigkeitsgrenze nicht erreicht.

Die Vorhersage des Verformungsverhaltens in einem Gesteinsbereich gemäß der dort vorliegenden Beanspruchung kann mithilfe von Stoffgleichungen unternommen werden, welche (neben anderem) vom gefügekundlichen Nachweis der wirksamen Verformungsmechanismen, von der einzumessenden Temperatur- und Spannungsabhängigkeit der Verformungsrate und von entsprechenden, physikalisch konsistenten Modellansätzen abzuleiten sind. Diese Vorgehensweise hat sich bei der Einschätzung des Verformungsverhaltens bzw. der Verformbarkeit von Steinsalz mit Blick auf die Fragestellung der Endlagerung von HAW-Abfall in einer Steinsalzformation bewährt und ihr soll im Rahmen der versuchs- und zeittechnischen Grenzen auch hier gefolgt werden.

Für die Einschätzung des mechanischen Verhaltens von Tonmergel- und Tonstein stehen mit Blick auf das in der Regel spröde Materialverhalten folgende Untersuchungsziele im Mittelpunkt:

- Bestimmung der Bruchfestigkeit zur Berechnung von Standsicherheitsgrenzen,

- Untersuchungen zum Nachbruchverhalten, um die Reibungszahl bei Abgleitung auf inneren Bruchflächen in Abhängigkeit von der Verformungsrate und dem Überlagerungsdruck und die Nachbruchfestigkeit im Falle der Wiederverfestigung zu ermitteln,
- Dauerstanduntersuchungen, bei denen festgestellt werden soll, ob die Prüfkörper bruchfrei bleibend verformbar sind, ohne daß zuvor die Festigkeitsgrenze überschritten worden ist (d.h. Kriechverformbarkeit).

Mit diesem Laborbericht werden die Befunde zum zuletzt genannten Untersuchungsziel vorgelegt.

2. Untersuchungsumfang und Versuchsdurchführung

2.1 Untersuchungsumfang

In Tab. 2.1 sind die für die Untersuchung zur Verfügung gestellten acht Prüfkörper aufgeführt. Stratigraphisch ist im wesentlichen nach zwei Gruppen zu unterscheiden. Im Teufenbereich um 350 m wird Tongestein aus dem Oberalb und dem Mittelalb angetroffen, im Teufenbereich um 530 m aus dem Mittelbarreme. Nach den in Tab. 2.1 aufgeführten petrographischen Merkmalen sind Unterschiede kaum zu erkennen. Die stratigraphisch-petrographischen Angaben sind einer Zusammenstellung von [REDACTED] entnommen worden.

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal für die Prüfkörper aus den beiden untersuchten Teufenbereichen liefert der Mineralgehalt. Im Laborbericht -Tiefbohrung Konrad 101-, Sachbearbeiter: H. Rösch, sind u.a. die Befunde zu den ausführlichen röntgenographischen Untersuchungen zusammengefaßt. Daran ist durchgehend abzulesen, daß die Minerale Smektit und Calcit einerseits und das Mineral Kaolinit andererseits einander nahezu ausschließen. Beim Nachweis von Smektit (und Calcit) geht auch der Gehalt von Muskovit eindeutig zurück. Dabei enthält Tongestein aus dem Alb durchgehend nur wenig Kaolinit und Tongestein aus dem Barreme entsprechend nur wenig Smektit und Calcit. In Tab. 2.1 sind die Befunde der teuffennächsten Mineralanalysen aus dem oben genannten Laborbericht aufgenommen worden.

Die mit dem Prüfkörpermaterial durchgeführten Versuche sind in Tab. 2.2 zusammengestellt. Festigkeitsversuche wurden durchgeführt, um Anhaltswerte für die möglichen Prüfspannungen in einem Dauerstandversuch zu erhalten. In einigen Fällen konnte nach dem Dauerstandversuch noch die Prüfung auf Festigkeit angeschlossen werden.

2.2 Versuchsführung zur Festigkeitsprüfung

Die Festigkeitsprüfung an den zylindrischen Prüfkörpern erfolgte bei einachsialer Druckbeanspruchung in Wegregelung, d.h. unter Vorgabe einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit für den Druckkolben. Diese wird abgeleitet von der Verformungsrate $\dot{\epsilon}_0 = (\Delta l / \Delta t) / l_0$ für einen Prüfkörper der Ausgangslänge l_0 . (Meßtechnisch kann hier nicht zwischen der technischen Verformung $\dot{\epsilon}_0 = \Delta l / l_0$ und der wahren Verformung $\dot{\epsilon}_w = \ln(l / l_0)$ unterschieden werden, da bei Verformungen von weniger als 4 % die Abweichungen kleiner als 1 % bleiben.)

Den Druck auf den Kolben erzeugt eine Servohydraulik, die über einen elektronisch arbeitenden Regelkreis angesteuert wird. Die Wegmessung mit induktiven Wegaufnehmern, Typ HBM W5TK, ist hinsichtlich Reproduzierbarkeit und Linearität genauer als +/- 20 µm über einen Meßweg von 10 mm möglich, d.h. besser als +/- 0,2 %. Die von den Vorgaben für die Kolbengeschwindigkeit jeweils aufgezeichneten Abweichungen in der Verformungsrate bleiben in allen Versuchen geringer als $5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Von einer Kraftmeßdose kann die jeweilige Fließspannung für die kontinuierliche Aufzeichnung

abgegriffen werden (Meßbereich bis 400 kN und $\pm 1,5$ kN Fehler in Reproduzierbarkeit und Linearität im gesamten Meßbereich). Die ermittelten Bruchfestigkeiten von der Größenordnung um 150 kN $\hat{=} 20$ MPa sind somit auf besser als ± 1 % bestimmbar. Die Versuchsaufzeichnung wurde bei einem Andruck zwischen 0,2 kN bis 0,5 kN gestartet. Dies entspricht ca. 0,1 % bis 0,5 % der erreichten Bruchspannung. Fließen konnte während der Maschineneinrichtung unter diesem Andruck nicht beobachtet werden.

2.3 Versuchsführung zum Dauerstandverhalten

Die Untersuchungen zum Dauerstandverhalten sind unter einachsialer Druckbeanspruchung in einem Säulenkriechprüfstand durchgeführt worden, in den bis zu 5 Prüfkörper gleichzeitig eingebaut werden können. Die Temperatur im Prüflabor wird durch eine aufwendige Klimatisierung auf 22°C ± 1 °C konstant geregelt. Die Prüfkörper sind zum Schutz gegen Feuchteverlust oder Feuchteaufnahme mit einer PE-Ummantelung versiegelt worden. Die Regelung des Prüfdruckes erfolgt mithilfe eines digitalen Dreipunkt-Komparators (4 1/2-Stellen) nach dem Prinzip einer Bedarfsregelung mit einer Regelbreite von absolut $\pm 16,5$ N (entsprechend $\pm 0,002$ MPa bei Prüfkörpern mit 100 mm Durchmesser).

Da bei Tonmergel- und Tonstein angenommen werden muß, daß bleibende Verformung über primär vorhandene Gefüge-Trennflächen und über Trennflächen erfolgen kann, die lokal nach Überschreiten der Festigkeit zusätzlich entstanden sind, ist auch ein Dauerstandversuch in einer Karmanzelle durchgeführt worden. Der hydrostatische Überlagerungsdruck betrug bei diesem Versuch $p = 10$ MPa. Die Temperatur konnte in diesem Laborraum auf 22°C $\pm 1,5$ °C eingeregelt werden. Zeitweilig hat die hier installierte Klimaanlage aber weniger zuverlässig gearbeitet, so daß die Prüftemperatur bis zu $\pm 2,0$ °C vom Sollwert abwich. Dies führt zu thermischen Längenänderungen im Prüfkörper und auch im Wegmeßsystem. Die Verformungsmessungen sind entsprechend den Temperaturaufzeichnungen ausgeglichen worden. Als Beleg für den Einfluß thermischer Längenänderungen sind die Kurvenabschnitte der ersten und der letzten Belastungsstufe ohne Ausgleich belassen, siehe Abb. 3.3.

Gegen das Drucköl (und damit auch gegen Feuchteänderungen) ist der Prüfkörper mit einer übergestülpten Gummimanschette geschützt worden. Hydrostatischer Überlagerungsdruck und achsiale Deviatorspannung werden bei dieser Maschine mittels gewichtsbelasteter hydraulischer Pressen erzeugt (Ölwaagen-Prinzip), wobei zum stetigen Anfahren der Prüfwerte auf eine rampengesteuerte Servohydraulik umgeschaltet werden kann. Infolge von Reibung an den Steuer- und Druckkolben beträgt die Regelbreite beim Seitendruck $\pm 0,04$ MPa und bei der Achsialkraft ca. ± 1 kN (entsprechend $\pm 0,1$ MPa bei Prüfkörpern mit 100 mm Durchmesser).

Die Belastung erfolgte bei dem einachsialen wie dem dreiachsialen Dauerstandversuch mit ca. 1 MPa/min. Die Verformungsmessung erfolgte anhand von Meßuhren, die eine Ablesegenauigkeit von 5 μ m gewährleisten. Die Meßgenauigkeit im Wegmeßsystem wird auf ± 10 μ m geschätzt. Parallel ist eine kontinuierliche Wegaufzeichnung über induktive Wegaufnehmer angeschlossen. Da die Halterungen für die Wegaufnehmer direkt an den Druckplatten montiert sind, wird allein die Verformung am Prüfkörper gemessen.

3. Untersuchungsergebnisse

Die Prüfkörper wurden vor Versuchsbeginn vermessen und gewogen, um daraus das Ausgangsvolumen und die Dichte zu bestimmen. Ultraschalllaufzeiten konnten mangels Durchgang nicht gemessen werden. Prüfkörper, die während der Dauerstandversuche nicht gebrochen waren, sind nach dem Ausbau wieder vermessen worden. Das Nachmessen der bleibenden Gesamtverformung dient sonst als Gegenprobe zu den Meßaufzeichnungen für den elastischen und den plastischen Verformungsbetrag. Das Nachmessen erfolgte hier aber auch, um zu prüfen, ob während der Versuche Volumenänderungen infolge Mineralumwandlung entstanden sind, die zur gleichen Zeit an den eingelagerten Bohrkernen offenkundig zu beobachten sind ("Quellen der Bohrkern" und in extremen Fällen "Sprengen der Kernkisten" für Material aus dem Mittelbarreme, insbesondere im Teufenbereich 540 m bis 555 m).

Da die Prüfkörper bei nicht vermeidbarer Endflächenreibung während der Verformung vertonnen können, wird in einer Standardprozedur über die Höhe der Prüfzylinder an sieben äquidistanten Abschnitten dreimal um jeweils 120° versetzt der Durchmesser gemessen und nach der Mittelung in jedem Abschnitt und nach Ausgleichsberechnung für eine gekrümmte Mantelberandung das Volumen errechnet. Die Ergebnisse sind in Tab. 3.1 zusammengefaßt.

Im Rahmen der Meßgenauigkeit von ca. 0,5 % können nur bei Probe 1 (Oberalb) und bei Probe 7 (Mittelbarreme) Volumenänderungen festgestellt werden. Bei Probe 1 tritt eine bleibende Verdichtung auf. Bei Probe 7 wird nach dem Entlasten dagegen eine Volumenzunahme gemessen. Aufgrund der Befunde zum Festigkeits- und Dauerstandverhalten ist davon auszugehen, daß durch das Belasten nicht Mikrorißbildung und Rißweitung dominieren, sondern daß primäre Hohlräume und gegebenenfalls auch Auflockerungen, die beim Kerngewinn entstanden sind, verdichtet werden. Andererseits kann nach dem Entlasten Feuchte aus der umgebenden Luft in sich wieder öffnende Hohlräume und Mikrorisse eindringen, wodurch die Prüfkörper in Abhängigkeit vom Mineralgehalt quellen und wie im Fall der Probe 7 schließlich sogar aufblättern.

Wie erwähnt, waren während der Dauerversuche und auch während der kurzzeitigen Festigkeitsversuche die Prüfkörper gegen Feuchteverlust bzw. -aufnahme durch PE-Schlauche geschützt. Eine systematische Untersuchung bezüglich "Mineralinventar" und Volumenstabilität ist an dieser Stelle wegen der geringen Anzahl der Prüfkörper nicht durchgeführt worden. Auslösend für die Volumenweitung scheint die Verwitterung des in Tongestein aus dem Mittelbarreme enthaltenen Minerals Pyrit FeS_2 zu sein. Damit zeigt sich, daß die sorgfältige Versiegelung des Kernmaterials unmittelbar nach Kerngewinn erforderlich ist, um zuverlässige, d.h. zutreffende Ergebnisse erhalten zu können. Und dies um so mehr, als sich außerdem zeigt, daß die Auflockerung der Bohrkern überwiegend in Schichten senkrecht zur Kernachse erfolgt, was nicht immer auf eine durchgehende 0° - Gefügeregelung sondern auch auf Bohreinwirkung ("disking") zurückzuführen ist.

3.1 Festigkeitsprüfung

Die Ergebnisse aus der Festigkeitsprüfung an den in Tab. 2.2 aufgeführten Prüfkörpern sind im Kraft-Weg-Diagramm der Abb. 3.1 zusammengefaßt. Die mit (+) wiedergegebenen Festigkeitskurven stammen von zuvor in Dauerstandversuchen geprüften Prüfkörpern. Die Probe 2 ist mit der Verformungsrate $\dot{\epsilon}_0 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ geprüft worden, sonst wurde mit $\dot{\epsilon}_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ geprüft. Die Probe 5 ist aus einem Kern gearbeitet worden, der schon im Lieferzustand eine Schlagmarke aufwies. Zudem hatte die Probe 5 mittig einen Riß, der bei der ca. ein Jahr zurückliegenden Anlieferung noch nicht beobachtet worden war. Die zugehörige Festigkeitskurve (5) weicht eindeutig von den anderen ab. Zunächst nimmt die Probe relativ wenig Kraft auf. Nach Verdichtung der Rißauflockerung ist die Kraftaufnahme ähnlich wie bei den festeren Proben, die im Bruchpunkt aufgenommene Kraft und die Verformung bis zum Bruch sind aber geringer. Das Festigkeitsverhalten der Probe 5 ist aufgrund der offenkundigen Vorschädigung als nicht repräsentativ anzusehen.

Probe 2 und Probe 4 stammen aus eng benachbarten Teufenbereichen mit im wesentlichen gleichem Mineralinventar, siehe Tab. 2.1. Der in Kurve (2) gegenüber Kurve (4) steilere Festigkeitsverlauf $(\Delta\sigma/\Delta\epsilon)_{\max}$, die höhere Bruchfestigkeit σ_{\max} und die geringere Verformung bis zum Bruch $\epsilon(\sigma_{\max})$ bei der Probe 2 können ihre Ursachen daher allein in der höheren aufgeprägten Verformungsrate haben. Der flachere Festigkeitsverlauf bei der Probe 4 ist entsprechend aber nur erklärbar, wenn neben dem elastischen Materialverhalten bleibende Formänderung infolge der geringeren aufgeprägten Verformungsrate begünstigt in der Tat auch vorliegt. Aus dem Vergleich der Kurven (2) und (4) allein kann diese Möglichkeit wegen des nahezu linearen Anstiegs beider Festigkeitskurven nicht eindeutig abgelesen werden. Mit dieser Versuchsführung könnte wegen der beobachteten Streuung im Materialverhalten nur anhand eines größeren Prüfumfanges über Variation der aufgeprägten Verformungsrate analysiert werden, ob neben der elastischen Formänderung bis zum Erreichen des Probenbruchs eine bleibende "plastische" Formänderung überlagert ist. Wegen der begrenzten Anzahl von Prüfkörpern sind bezüglich dieser Fragestellung die Dauerstandversuche durchgeführt worden.

Aus den Festigkeitskurven für die zuvor in Dauerstandversuchen beanspruchten Prüfkörper kann dagegen eindeutig abgelesen werden, daß eine Verfestigung, d.h. eine Streckgrenze gegen bleibende Formänderung durch Vorbeanspruchung nicht erzeugt wird. Den Prüfspannungen von ca. 10 MPa und mehr während der Dauerstandversuche entspricht eine Prüfkraft von mindestens 80 kN. Eine ausgeprägte Streckgrenze mit dem Übergang vom allein elastischen zum zusätzlich plastischen Verhalten liegt an keiner Stelle vor. Eine ausgeprägte Streckgrenze wird nach bleibender Vorbeanspruchung aber immer nur dann erwartet, wenn die Verformung durch eine transkristalline Versetzungsbewegung im Kristallgitter getragen ist und aus dem intrakristallinen Versetzungsnetzwerk die Streckgrenze selbst resultiert (siehe Befunde zum "Verformungsgedächtnis" und der Streckgrenzenerhöhung nach Vorbelastung bei den Untersuchungen zum Verformungsverhalten von Steinsalz).

Daraus ist zu schließen, daß sich die Formänderung hier aus elastischer Verformung und gegebenenfalls auch interkristalliner Abgleitung auf Gefüge-Trennflächen zusammensetzt, für die kein Streckgrenzeneffekt, d.h. keine Fließgrenze erwartet wird. Nur wenn die Prüfkraft die Festigkeitsgrenze erreicht, kann kataklastische Verformung infolge neu erzeugter Trennflächen hinzukommen. Diese "Fließgrenze" wird bei der hier vorgenommenen einachsialen Festigkeitsprüfung nicht beobachtet, da mit dem Erreichen der Festigkeitsgrenze der vollständige Probenbruch eintritt. An dieser Stelle sei aber auf die unter dreiachsialer Beanspruchung durchgeführten Festigkeitsuntersuchungen des Ref. B2.14 hingewiesen, die im 4. Kapitel exemplarisch skizziert sind und wonach für das Verformungsverhalten im Nachbruchbereich ein linear-plastisches Verformbarkeitsgesetz angesetzt werden kann, das als Fließgrenze die Festigkeitsgrenze enthält.

Aus den Festigkeitskurven kann auch noch abgelesen werden, daß bereits nach der vorangegangenen Dauerstandbelastung der Widerstand gegen Formänderung abgenommen hat. Die entsprechenden Festigkeitskurven (+) sind unmittelbar zu Beginn weniger steil, wie an den Achsenabschnitten $\xi(\sigma = 0)$ auf der Verformungsachse bei linearer Extrapolation aus dem Bereich größter Steigung in der Festigkeitskurve einfach abzulesen ist. (Der Anfangsverlauf der Festigkeitskurve für Probe 5 fällt aus den zuvor genannten Gründen aus diesem Bild.) Die Ursache kann in der zusätzlichen Abgleitung auf Gefüge-Trennflächen liegen, die während der Dauerstandbelastung entstanden sein müßten. Im weiteren Verlauf weisen die Festigkeitskurven der Versuche (1), (2), (4), (6) und auch (5) trotz unterschiedlicher Prüfbedingungen und Ausgangszustände annähernd die gleiche Steigung auf. Dies ist wiederum nur möglich, wenn bei annähernd gleichen elastischen Eigenschaften der Proben der Verformungsbeitrag auf den Gefüge-Trennflächen wieder entfällt, d.h. wenn die Trennflächen wieder verdichtet werden, bzw. wenn sich die Abgleitwege mangels Rißfortschritt erschöpfen. Infolge der durch die Vorbeanspruchung im Dauerstandversuch vermutlich geschaffenen "Plastifizierung" über Mikrorisse in Gefügebereichen mit Spannungskonzentration ist bei diesen Prüfkörpern die Verformung bis zum Bruch aber schließlich größer und damit korrespondierend die Bruchspannung. In einem Mineralgemenge entstehen lokal begrenzte Spannungskonzentrationen bevorzugt im Grenzbereich von Mineralen mit extrem verschiedenen elastischen Eigenschaften. Dies gilt auch für den Gefügebereich um Poren.

Ein gänzlich abweichendes Verhalten zeigt Probe 7. Wie schon zur Vermessung der Prüfkörper (siehe Tab. 3.1) angemerkt wurde, ist der Prüfkörper infolge Mineralumwandlung aufgelockert und entsprechend "weich" geworden. Der Festigkeitsverlauf ist nicht vergleichbar mit dem beim intakten Material. Die Zusammenfassung charakterisierender Festigkeitsdaten gibt Tab. 3.2 wieder.

3.2 Dauerstandversuche

Die Ergebnisse aus den Dauerstandversuchen unter einachsialer Druckbeanspruchung bei Raumtemperatur (ca. 22°C) sind in den Verformungs-Zeit-Diagrammen der Abb. 3.2 zusammengefaßt. Der unter dreiachsialer Druckbeanspruchung durchgeführte Versuch ist in Abb. 3.3 wiedergegeben. Die Prüfkörper nehmen unter Dauerstandbelastung stetig eine bleibende Verformung auf. Um die Spannungsabhängigkeit der Verformungsrate trotz der geringen Anzahl von Prüfkörpern untersuchen zu können, sind Belastungswechsel eingeplant worden. Die Temperaturabhängigkeit ist nicht untersucht worden.

Aus den einzelnen Abschnitten der Verformungskurven unter jeweils konstant gehaltener Prüfspannung ist erkennbar, daß sich ein stationäres Kriechen nicht einstellt, wie es beispielsweise im Falle des Steinsalzes beobachtet wird, sondern daß die Verformungsrate auch nach erhöhter Belastung wieder stetig abnimmt. Die Zeitabhängigkeit des Verformungsverhaltens kann daher nicht durch eine für Steinsalz gebräuchliche Stoffgesetzformulierung beschrieben werden, die neben dem spontan-elastischen Beitrag und dem Übergangsverformungsbeitrag, der aus der Verformungsverfestigung zur Entwicklung einer Gleichgewichts-Substruktur resultiert, als mit zunehmender Verformung dominierenden Beitrag den Ansatz für das stationäre Kriechen enthält. Aus diesem Grund kann auch die Spannungsabhängigkeit der Verformungsrate $\dot{\epsilon}$ nicht einfach nach der Formel $n = \Delta \log \dot{\epsilon} / \Delta \log \sigma$ wie für stationäres Versetzungs-Kriechen bestimmt werden.

Instationäre Verformung ist immer dann zu erwarten, wenn die tragenden Verformungsmechanismen einer zeitlich oder durch die Verformung selbst bedingten Veränderung in der Gesteinsstruktur folgen müssen. Bei der Verformung in einem duktilen Material, Steinsalz wieder als Beispiel vor Augen, befinden sich im Kristall Verfestigung und Erholung in der die Verformung tragenden Versetzungsstruktur nach dem Übergangsverhalten und während bruchfreier Verformung im stationären Gleichgewicht. In einem Tongestein erfolgt eine bleibende Verformung interkristallin, stationäre Verformung bleibt der instabile Sonderfall. Bei stärkerer Beanspruchung öffnen und vermehren sich durch bruchbehaftete Verformung nach lokalem Überschreiten der Bruchfestigkeit die Gefüge-Trennflächen und "Kriech"-Beschleunigung ist wegen fehlender Erholungsmechanismen die Folge. (Nur wenn, wie unter in situ - Bedingungen möglich, mit der Verformung eine Spannungsumlagerung und damit der Spannungsabbau verbunden sind, kann der Rißfortschritt unterbleiben.) Wird die Bruchfestigkeit nicht überschritten, tritt Abgleitung auf den stets vorhandenen primären Gefüge-Trennflächen auf, bis die lokale Verformbarkeit, d.h. die lokal verfügbare Abgleitstrecke an Hohlräumen, Spalten, Einschlüssen, Schichten etc. sich zunehmend erschöpft. Bei einem derartigen Konsolidierungsvorgang wächst der Widerstand gegen Formänderung an, so daß kein zeitlineares Spannungs-Verformungsverhalten mit z.B. konstantem Reibbeiwert angesetzt werden darf.

Modellierungsansätze aus der Gesteinsrheologie, die z.B. von LANGER (1979, Tabelle 3) ausführlich diskutiert worden sind, können bei einem idealen rheologischen Gebirgskörper zur Beschreibung der

Verformung $\xi(t)$ aus einem elastischen Beitrag $\xi_{el} = \sigma/E$ und einem anelastischen Beitrag $\xi_{anel} = (\sigma/E) \cdot (1 - \exp(-E/\eta_k \cdot t))$ zusammengesetzt werden. Hinzu kann die plastische Formänderung kommen:
 $\xi_{pl} = (\sigma - \sigma^*)/\eta^* \cdot t$. η_k ist der Viskositätsmodul bei visko-elastischem Verhalten, η^* der Viskositätsmodul für plastisches Verhalten nach Überschreiten der Fließgrenze σ^* .

Der linear-plastische Ansatz enthält also die Schwellenspannung σ^* , die zur Erzeugung und Aktivierung von Abgleitebenen (d.h. Bruchflächen) übertroffen werden muß. Bei den vorliegenden Untersuchungen zum Dauerstandverhalten wird jedoch keine zeitproportionale stationäre Plastizität beobachtet. Auch verformen sich die untersuchten Tongesteinsproben bleibend, ohne daß eine Schwellenspannung σ^* für die "Plastifizierung" überwunden sein muß.

Ausgangspunkt für die Modellierung des Verformungsverhaltens kann ein von [] (1984) diskutierter statistischer Ansatz zur Beschreibung der Dichte primärer abgleitfähiger Gefüge-Trennflächen und das damit verbundene Spektrum im Formänderungswiderstand sein. Als Lösung folgt für die Zeit- und Spannungsabhängigkeit der Verformung unabhängig von der in der Regel nicht einfach bestimmbar oder zutreffend festzulegenden Abgleitflächendichte und dem Reibkraftspektrum im Formänderungswiderstand die bekannte und in empirischen Ansätzen bereits vielfach genutzte Formulierung zum "logarithmischen Kriechen":

$$\dot{\xi} \propto c \cdot \ln(1 + t/t_0) \quad \text{und} \quad \dot{\xi} \propto c \cdot 1/(t + t_0) .$$

Der Parameter c ist eine Funktion von Temperatur und Spannung, die Stoffkonstante t_0 folgt aus der Anfangsbedingung $\dot{\xi}(t=0) = c/t_0$.

Da die Untersuchungen insgesamt bei Raumtemperatur durchgeführt worden sind, muß auf die Betrachtung der Temperaturempfindlichkeit verzichtet werden. Es sei angemerkt, daß im Bereich geringer Temperatur in der Regel eine lineare Abhängigkeit gefunden wird ([] 1984; [] 1973, S. 77). Die Spannungsabhängigkeit kann erfahrungsgemäß ebenfalls linear angesetzt werden.

In Abb. 3.4 ist die Verformung über einer logarithmischen Zeitskala aufgetragen. Da die Kurvenverläufe einander stets ähnlich sind, wurden hier der Überschaubarkeit halber nur die jeweiligen Belastungsabschnitte der Probe 1 (Oberalb) und der Probe 7 (Mittelbarreme) sowie die der unter dem allseitigen Überlagerungsdruck $p = 10$ MPa geprüften Probe 6 (Mittelalb) aufgezeichnet. Für das Diagramm wurden an vorgegebenen Zeitpunkten die Verformungen abgelesen und statt eines ausgleichenden Polygons der zur überprüfenden logarithmischen Verformung-Zeit-Relation gemäß verbindende Geraden durch die Ablesepunkte gelegt.

Die Annahme einer logarithmischen Zeitabhängigkeit des Kriechens findet sich in guter Näherung bestätigt. Lediglich bei der "weicheeren" Probe 7 zeigen sich in der letzten Belastungsstufe mit $\sigma = 13$ MPa größere Abweichungen. Die Verformungsrate nimmt aber auch hier noch stetig ab, siehe Abb. 3.2 .

Die Annahme einer linearen Spannungsabhängigkeit der Verformungsrate kann nur unter der für den Vergleich zu machenden Voraussetzung, daß sich das Gefüge während eines Belastungswechsels nicht ändert, überprüft werden. Bei einer linearen Spannungsabhängigkeit muß im Zeitpunkt des Belastungswechsels t_w gelten :

$$\dot{\epsilon}_{1,2} \propto \sigma_{1,2} \cdot c \cdot 1/(t_w + t_0) \quad \text{bzw.} \quad \dot{\epsilon}(\sigma_2) / \dot{\epsilon}(\sigma_1) = \sigma_2 / \sigma_1 .$$

Zur Einmessung d.h. zur meßtechnischen Auflösung der "spontanen" Wechsel in den Verformungsraten im Falle eines Belastungswechsels ist eine Versuchszeit von ca. zwei Wochen erforderlich. Dadurch wird die Verformungsrate nach dem Belastungswechsel zu einem verspäteten Zeitpunkt ermittelt. Folglich ist bei logarithmischem Kriechen die Verformungsrate bereits wieder abgefallen, es wird ein zu kleiner Wert abgelesen. Wegen der logarithmischen d.h. nur schwachen Zeitabhängigkeit sind trotz dieser Einschränkung die Spannungsabhängigkeiten der Verformungsraten bestimmt und in Tab. 3.3 zusammengestellt worden. Danach ist die lineare Spannungsabhängigkeit für die unter einachsialer Dauerstandbelastung geprüften Prüfkörper bestätigt. Im Falle der letzten Belastungssteigerung auf $\sigma = 13$ MPa nach der zwischenzeitlichen Entlastung auf $\sigma = 8$ MPa schlägt jedoch der aus Abb. 3.4 erkennbare Trend durch: Im Bezug auf die logarithmische Zeitskala (aber nicht im Bezug auf die lineare Zeitskala der Abb. 3.2) liegt eine "Kriechbeschleunigung" vor, die aus der Zunahme von Abgleitung auf neu entstandenen Gefüge-Trennflächen, d.h. vor allem Mikrorissen, resultiert. Diese ist der dem logarithmischen Zeitgesetz folgenden Abgleitung auf primären Abgleitflächen überlagert.

Noch deutlicher wird dieser Effekt bei dem Dauerstandversuch mit allseitigem Überlagerungsdruck. Die Verformung auf den vorhandenen primären und den in einem Belastungsabschnitt jeweils erzeugten sekundären Abgleitflächen klingt bei der dreiachsialen Versuchsführung schneller ab. Dies folgt aus der trotz höherer Differenzspannung stets geringeren Steigung der in Abb. 3.4 wiedergegebenen Ausgleichsgeraden. Nach einer Belastungssteigerung wirkt sich die Abgleitung auf lokal neu geschaffenen Abgleitflächen entsprechend auf das Verhältnis in den Verformungsraten aus. Die Spannungsabhängigkeit der Verformungsrate kann in diesem Fall zutreffend also nicht bestimmt werden.

Aus den Verformung-Zeit-Diagrammen zu den Dauerstandversuchen in Abb. 3.2 und Abb. 3.3 sind zudem Parameter abgelesen worden, die Aussagen zum elastischen Verhalten der Prüfkörper liefern sollen. Die gegenüber der elastischen Längenänderung $\Delta \epsilon_{el}$ während der Belastungswechsel in Tongestein vergleichsweise geringen Zuwächse in der bleibenden Verformung $\Delta \epsilon_{pl}$ erlauben, aus der Spannungsänderung $\Delta \sigma$ bzw. $\Delta(\Delta \sigma)$ beim dreiachsialen Dauerstandversuch und der spontanen Verformungsänderung $\Delta \epsilon \approx \Delta \epsilon_{pl}$ den Steifemodul $\Delta \sigma / \Delta \epsilon$ bzw. $\Delta(\Delta \sigma) / \Delta \epsilon$ zu bestimmen. Aus den Ergebnissen folgt, daß ein aus dem Belastungsbeginn bestimmter Modul stets nur ca. halb so groß ist wie ein aus den Belastungswechseln bestimmter. Zu Belastungsbeginn ist der elastischen Verformung noch die Verformung an primären Gefüge-Trennflächen und den prinzipiell nicht-ideal planen Prüfkörperendflächen überlagert. Auch während der vollständigen Entlastung kommt zur ela-

stischen Verformung ein Verformungsbeitrag von sich wieder öffnenden Hohlräumen, Spalten etc. hinzu. Nur die aus den vier bzw. drei Belastungswechseln (beim dreiachsialen Dauerstandversuch) ermittelten Werte für den Steifemodul können daher als Näherungswert für den Elastizitätsmodul jeweils zutreffend sein. Aus den ermittelten Werten ist ablesbar, daß der Prüfkörper aus dem Oberalb neben der höchsten Festigkeit, siehe Tab. 3.2, auch den höchsten Steifemodul aufweist. Der Prüfkörper aus dem Mittelbarreme zeigt im Dauerstandversuch zwar von vornherein die höhere Duktilität, aber erst nach der Entlastung und dem Ausbau wird im Zuge der Festigkeitsprüfung eine wesentliche "Erweichung" eingemessen. Zwischen dem Ende des Dauerstandversuchs und der Festigkeitsprüfung lag ein Zeitraum von ca. 30 Tagen. Die Prüfkörper waren auch während dieser Lagerzeit durch PE-Schläuche geschützt.

Abschließend soll zum Dauerstandverhalten noch auf das Rückwärtskriechen nach einer Belastungserniedrigung eingegangen werden. Aus Abb. 3.2 ist abzulesen, daß im Falle der Prüfkörper aus dem Mittel- und Oberalb nach ca. 30 Tagen Standzeit unter der von $\sigma = 11$ MPa auf $\sigma = 8$ MPa reduzierten Spannung wieder Vorwärtskriechen erfolgt. Bei den Prüfkörpern aus dem Mittelbarreme ist dies schon nach ca. 10 Tagen der Fall. Das Rückwärtskriechen resultiert aus nicht-ontaner aber auch aus nicht-bleibender Verformung. Ein derartiges anelastisches Kriechen kann durch elastische Energiespeicherung bestimmt sein, die an Gefüge-Trennflächen aufgrund von Reibung nur zeitlich verzögert abbaubar ist. Die anelastische Formänderung ist prinzipiell begrenzt. Entsprechend den Befunden zu den Elastizitäts- bzw. Steifemoduln weist der Prüfkörper aus dem Oberalb (Probe 1) den geringsten Verformungsbetrag im Rückwärtskriechen auf, bei den "weicheren" Prüfkörpern aus dem Mittelbarreme klingt das Rückwärtskriechen dagegen am schnellsten ab.

4. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen zum Dauerstandverhalten von Tonmergel- und Tonstein

Mit den Befunden zur einachsialen Festigkeit und zum Dauerstandverhalten wird nachgewiesen, daß auch Tongesteine, von denen im Rahmen der technischen Möglichkeiten schonend und somit bei weitgehend unveränderter Poren- und Kluftstruktur Prüfkörper gewonnen worden sind, bleibend verformbar sind, ohne daß die Festigkeitsgrenze zur Aktivierung kataklastischen Fließens zuvor überschritten gewesen sein muß. Der Widerstand gegen Formänderung wächst mit der Standzeit allerdings an. Aus dem qualitativen Vergleich von Abb. 3.2 und Abb. 3.3 folgt weiter, daß die Verformbarkeit im Falle eines allseitigen Überlagerungsdrucks von vornherein reduziert ist. Die Ursache wird in der begrenzten Verfügbarkeit von Gefüge-Trennflächen gesehen, deren Abgleitvermögen in Abhängigkeit vom Überlagerungsdruck unterdrückt wird.

In Ergänzung zu den hier mitgeteilten Befunden sei ein weiterer Gesichtspunkt angeführt, der aus den Untersuchungen zum Verformungsverhalten nach Überschreiten der Bruchfestigkeit folgt. Als Beispiel sollen zwei der Versuche dienen, die beim Ref. B2.14 an Prüfkörpern aus dem Teufenbereich des Mittelbarreme durchgeführt worden sind. Zu den Befunden insgesamt wird ein separater Bericht erstellt. Die Prüfbedingungen, der schematisierte Versuchsablauf und charakterisierende Parameter sind für die beiden ausgewählten Beispiele in Tab. 4.1 und Abb. 4.1 zusammengefaßt.

Bei beiden Versuchen wurden die Prüfkörper verformungsgeregelt unter vorgegebenem Überlagerungsdruck achsial druckbelastet, siehe Tab. 4.1. Im Bereich des steilsten Festigkeitsverlaufs wurden vor Erreichen der Bruchfestigkeit jeweils ein Ent- und Wiederbelastungszyklus zur Ermittlung des Steifemoduls $(\Delta(\Delta\sigma)/\Delta\varepsilon)_{\text{max}}$ gefahren. Bei Erreichen der Bruchfestigkeit fällt die für die weiter aufgeprägte Verformungsrate erforderliche Fließspannung $\Delta\sigma_{\text{fl}}$ abrupt auf einen nahezu konstanten Wert ab. Bei Probe A wurden anschließend die Verformungsrate konstant beibehalten und der Überlagerungsdruck in Stufen gesenkt, bei Probe B wurden im weiteren der Überlagerungsdruck konstant beibehalten und die Verformungsrate variiert.

Anhand des Moduls $(\Delta(\Delta\sigma)/\Delta\varepsilon)_{\text{max}}$, der an den schematisch gekennzeichneten Stellen des steilsten Festigkeitsverlaufs abgelesen worden ist, zeigt sich für Probe A und Probe B, daß nach dem Bruch wegen der überlagerten Plastifizierung der Zahlenwert im Ent- und Wiederbelastungszyklus an der Stelle [5-6] deutlich niedriger ist als im vorhergehenden Zyklus an der Stelle [3-4]. Im Gegensatz zur Probe B kann an der Anfangssteigung an der Stelle [1-2] für die Probe A abgelesen werden, daß dieser Prüfkörper schon im Ausgangszustand "weich" war und erst nach dem Verdichten im Ent- und Wiederbelastungszyklus an der Stelle [3-4] einen zu Probe B vergleichbaren Festigkeitsverlauf erreicht, der ähnlich zu den in Abb. 3.1 wiedergegebenen Kurven dem überwiegend elastisch bestimmten Grenzfall nahekommt. Dieser Schluß folgt auch aus den in Tab. 3.2 angegebenen Zahlenwerten für $(\Delta\sigma/\Delta\varepsilon)_{\text{max}}$, die ebenfalls in der Größenord-

nung um 3500 MPa liegen. Dies ist wegen der dort aufgeprägten Verformungsrate von nur $\dot{\epsilon}_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ allein im Falle überwiegend elastisch bestimmten Materialverhaltens möglich. Im bei Probe B mit der gesteigerten Verformungsrate $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ angeschlossenen Zyklus kann plastische (d.h. kataklastische) Verformung noch durch die elastisch aufgeprägte Formänderung zeitlich überfahren werden, im darauf folgenden Zyklus dominiert bei der verringerten Verformungsrate $\dot{\epsilon} = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ im Ent- und Wiederbelastungszyklus dann die bleibende Abgleitung auf Bruchflächen.

In Abb. 4.1 ist die Fließspannung $\Delta\sigma_{\mu}$ im Nachbruchbereich in Abhängigkeit von der aufgeprägten Verformungsrate $\dot{\epsilon}$ bzw. dem Überlagerungsdruck p wiedergegeben. Schon aus diesen zwei Prüfbeispielen wird deutlich, daß bei vorgegebenem Überlagerungsdruck die Fließspannung $\Delta\sigma_{\mu}$ sich nur wenig ändert, wenn die aufgeprägte Verformungsrate zwischen immerhin $\dot{\epsilon} = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ und $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, also um einen Faktor 100, variiert wird, d.h. im Falle von Änderungen in der anstehenden Differenzspannung reagiert die Verformungsrate empfindlich. Wird bei vorgegebener Verformungsrate $\dot{\epsilon} = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ der Überlagerungsdruck von $p = 2,5 \text{ MPa}$ auf $p = 7,5 \text{ MPa}$ erhöht, folgt für die erforderliche Fließspannung eine Steigerung von $\Delta\sigma_{\mu} = 6 \text{ MPa}$ auf $\Delta\sigma_{\mu} = 13 \text{ MPa}$ und für z.B. $p = 10 \text{ MPa}$ bei linearer Extrapolation eine Steigerung auf $\Delta\sigma_{\mu} = 17 \text{ MPa}$, d.h. im Falle eines allseitigen zunehmenden Überlagerungsdrucks reagiert die Verformungsrate im Nachbruchbereich trotz der "Plastifizierung" zunehmend unempfindlicher auf Änderungen in der Differenzspannung.

Zum Vergleich mit der Verformbarkeit intakten Materials können die Bandbreiten in der Verformungsrate aus den Dauerstandversuchen dienen. Als repräsentativ sind in jeder Belastungsstufe die Extremalwerte in den Verformungsraten abgelesen worden, d.h. nach einwöchiger Standzeit zu Beginn eines Belastungsabschnitts und am Ende der sechs- bis zehnwöchigen Belastungsabschnitte. Im Gegensatz zum Nachbruchverhalten unter einachsialen Prüfbedingungen zeigt sich, daß Änderungen in der Differenzspannung die Verformungsrate nur wenig beeinflussen. Im Falle eines allseitigen Überlagerungsdrucks reagiert die Verformungsrate noch unempfindlicher auf Änderungen in der Differenzspannung.

Daraus sind folgende Schlußfolgerungen ableitbar:

Die Annahme elastischen Gesteinverhaltens bis zum Erreichen der Bruchfestigkeit ("Sprödbbruch") und die Folgerung, daß "in situ" die für die Konvergenz von Klüften und Hohlräumen bis zum vollständigen Abbau von Differenzspannungen erforderliche bleibende Verformbarkeit allein in den Gesteinsbereichen gegeben ist, die durch Überschreiten der Festigkeitsgrenze "plastifiziert" worden sind, bleiben als konservativer Ansatz für die Konvergenzberechnung von einer gegebenenfalls bruchfreien Kriechverformbarkeit auch in den benachbarten Gesteinsbereichen, die nicht durch Bruch plastifiziert worden sind, im wesentlichen unbetroffen. Die Ursache liegt in den aus den Laboruntersuchungen ablesbaren Unterschieden in den jeweils zu erwartenden Verformungsraten. Bei gleicher Differenzspannung bleiben die Verformungsraten wegen deren linearer Spannungsabhängigkeit sowohl für das "logarithmische Kriechen" im intakten Gestein wie auch für die kataklastische Verformung nach Bruchauflockerung

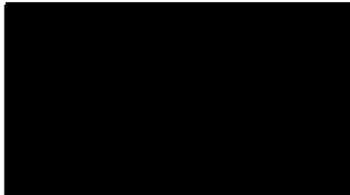
stets um mindestens drei Größ/enordnungen im auflockerten Bereich höher, siehe Abb. 4.1 .

Auch im Falle von Abschlußbauwerken kann daher ohne weitergehende Analyse angenommen werden, daß der Abbau von Spannungsdifferenzen im Umfeld der bergmännisch geschaffenen Hohlräume durch die Konvergenz in den offenen und damit wahrscheinlicher plastifizierten Bereichen entsprechend schneller erfolgt als die Lage- und Formänderung an den Abschlußbauwerken, deren Gesteinsumgebung durch den festen Verbund mit dem Abschlußbauwerk nur dem logarithmischen Kriechen unterliegen kann und während der in diesem Bereich wirksamen aber im Zuge der Konvergenz abklingenden Spannungsdifferenz vernachlässigbare Beiträge liefern wird.

Die Bedeutung der Frage: "Spannungsumlagerung unter bruchfreier Verformung" wird vor allem in den Ansätzen zur Abschätzung der Auflockerungszone um Hohlräume gesehen. Deren Berechnung wird bei Einbeziehung eines "logarithmischen Kriechansatzes" zu geringer ausgedehnten Bereichen im Gestein führen müssen, wenn die aufgeprägten Formänderungen und Änderungen im Spannungszustand für bruchfreien Spannungsabbau durch Kriechen genügend langsam sind.

Diese Folgerungen sind im Prinzip auch auf andere Gesteinsbereiche übertragbar, wenn in diesen zum Abbau von Spannungen das Verhältnis der Verformungsraten im intakten Gestein einerseits und im nach Überschreiten der Festigkeitsgrenze plastifizierten Gestein andererseits ähnlich eindeutig zu Gunsten der Nachbruchverformung ausfällt.

Im Auftrag



Sachbearbeiter



Literatur

ILSCHNER, B. (1973): Hochtemperatur-Plastizität, Springer-Verlag, S. 77.

LANGER, M. (1979): Rheologisches Verhalten von Gesteinen und Fels, Generalbericht, 4. Internat. Congr. on Rock Mechanics, Montreux, Vol. 3: 29-96, Tab. 3.

PUSCH, R. (1984): Creep in Rock as a Stochastic Process, Eng. Geol. Vol. 20: 301-310.

Tab. 2.1: Prüfkörper aus der Bohrung Konrad 101 für Festigkeits- und Dauerstanduntersuchungen

Kernkennung Versuchsarten Labor-Nr.	Teufe in m	Stratigraph. - petrograph. Beschreibung				
		Probe: Teufe:	"Leitminerale" : Massengehalte in %			
Probe 1 101/048/334/01 85007/148	326,55 - 326,00	41 326,08	Oberalb, Tonstein; schluffig, bioturbat, Belemniten Calcit: 22	Muskovit: 12	Smektit: 27	Kaolinit: 2
Probe 2 101/052/360/01 85007/147	351,56 - 351,81	44 351,55	Mittelalb, Tonstein; schluffig, schwach karbonatisch, bioturbat, Belemniten Calcit: 14	Muskovit: 10	Smektit: 26	Kaolinit: 2
Probe 3 101/052/361/01 85007/152	352,38 - 352,63	44 351,55	Mittelalb, Tonmergel; schluffig, dünne helle karbon. Lagen, bioturbat Calcit: 14	Muskovit: 10	Smektit: 26	Kaolinit: 2
Probe 4 101/052/361/02 85007/153	352,81 - 353,06	44 351,55	Mittelalb, Tonstein; schluffig, schwach karbonat., bioturbat, Pyrit, Gips Calcit: 14	Muskovit: 10	Smektit: 26	Kaolinit: 2
Probe 5 101/052/363/01 85007/150	354,29 - 354,54	44 351,55	Calcit: 14	Muskovit: 10	Smektit: 26	Kaolinit: 2
Probe 6 101/052/368/01 85007/149	358,87 - 359,12	45 358,40	Calcit: 14	Muskovit: 10	Smektit: 30	Kaolinit: 2
Probe 7 101/080/539/01 85008/157	527,80 - 528,05	75 530,37	Mittelbarreme, Tonst.; schluffig Calcit: 4	Muskovit: 19	Smektit: 3	Kaolinit: 14
Probe 8 101/081/545/01 85008/159	533,03 - 533,28	76 532,78	Mittelbarreme, Tonst.; schluffig, schwach karbonat., Bruchschill Calcit: 2	Muskovit: 23	Smektit: -	Kaolinit: 20

*1) röntgenographische Befunde von teuffenächster Probe, entnommen aus dem Laborbericht vom 02.08.85
- Tiefbohrung Konrad 101 - , Sachbearbeiter: [REDACTED]

Tab. 2.2: Prüfmatrix zu Festigkeits- und Dauerstanduntersuchungen an Prüfkörpern aus der Bohrung Konrad 101

Proben-Nr.	Dauerstandversuche	Festigkeitsversuche
Probe 1	einachs. Dauerstandvers. σ : 8; 10; 11; 8; 13 MPa	einachs. Festigk'versuch $\dot{\epsilon}_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$
Probe 2	./.	einachs. Festigk'versuch $\dot{\epsilon}_0 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$
Probe 3	einachs. Dauerstandvers. σ : 8; 10; 11; 8; - MPa	
Probe 4	./.	einachs. Festigk'versuch $\dot{\epsilon}_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$
Probe 5	./.	einachs. Festigk'versuch $\dot{\epsilon}_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$
Probe 6	dreiachs. Dauerstandvers. $\Delta\sigma$: 11; 13; 15; 17 MPa $p = 10 \text{ MPa}$	einachs. Festigk'versuch $\dot{\epsilon}_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$
Probe 7	einachs. Dauerstandvers. σ : 8; 10; 11; 8; 13 MPa	einachs. Festigk'versuch $\dot{\epsilon}_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$
Probe 8	einachs. Dauerstandvers. σ : 8; 10; 11; 8; - MPa	

Tab. 3.1: Vermessung der Prüfkörper
Länge l, Durchmesser d, Volumen V, Dichte ρ

Proben- Nr.	Ausgangswerte				Änderungen	
	l in mm	d in mm	V in cm ³	ρ in g/cm ³	l in mm	V/V ₀
Probe 1	250,0	100,1	1967	2,39	1) 249,3 2) 249,4	0,996 0,996
2	250,1	98,1	1890	2,29		
3	250,1	100,1	1968	2,29		
4	250,1	97,1	1852	2,27		
5	249,9	98,0	1885	2,29	3) 250,0	1,002
6	250,1	99,1	1929	2,28	1) 249,85	0,999
7	249,6	98,0	1883	2,43	1) 248,6 2) 249,55	0,998 1,002
8	249,9	98,1	1888	2,38		

- 1) unmittelbar nach Beendigung des Dauerstandversuchs
- 2) 30 Tage nach dem Probenausbau (im PE-Schlauch aufbewahrt)
- 3) unverformter Prüfkörper nach einjähriger Lagerung im PE-Schlauch

Tab. 3.2: Festigkeitsdaten

Proben-Nr.	Vorbelastung	Achsenschnitt $\xi(\sigma = 0)$ in %	$(\Delta\sigma/\Delta\xi)$ in GPa	σ_{max} in MPa	$\xi(\sigma_{max})$ in %
Probe 1	+	0,10	4,08	26,3	0,92
2 (*)	-	0,04	3,52	19,1	0,61
4	-	0,03	2,52	15,0	0,66
5 (**)	-	0,18	3,43	15,5	0,72
6	+	0,16	3,20	21,7	0,92
7	+	0,12	1,91	19,3	1,20

(*) $\dot{\xi}_0 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; sonst $\dot{\xi}_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$
 (**) Prüfkörper mit Schlagmarke und Rißspalt

Tab. 3.3: Aus Belastungswechseln zum Zeitpunkt t_w bestimmte
 Spannungsabhängigkeit der Verformungsrate
 $\dot{\epsilon}_{1,2} \propto \sigma_{1,2} \cdot c^* \cdot 1/(t_w + t_0)$

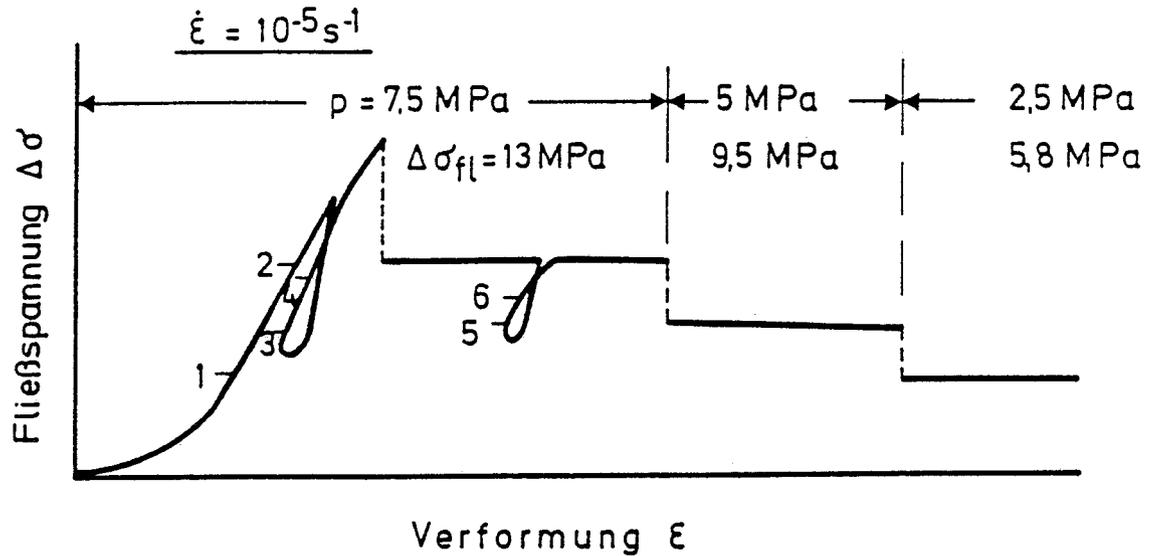
σ_2 ; σ_1	[[$\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1$] / (σ_2 / σ_1)] $_{t_w}$				6
	Probe: 1	3	7	8	
10 MPa; 8 MPa	1,2	1,3	1,1	0,9	
11 MPa; 10 MPa	0,9	1,1	1,0	1,0	
13 MPa; 8 MPa	1,7	-	2,7	-	
15 MPa; 13 MPa					2,8
17 MPa; 15 MPa					5,9

Tab. 3.4: Steifemoduli $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ in GPa, die von den Dauerstandversuchen bei Belastungswechsel aus der spontanen Längenänderung folgen

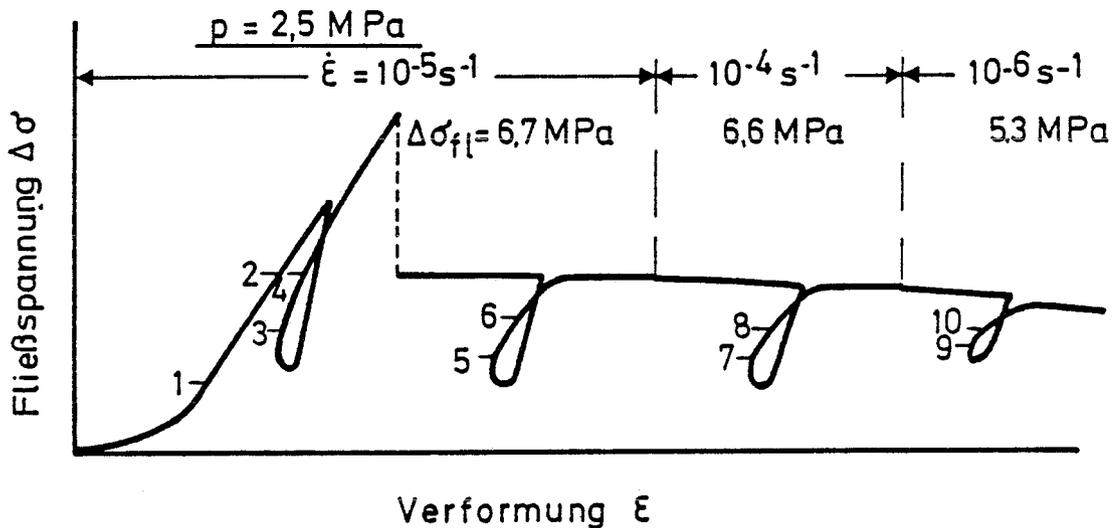
Probe:	$\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$				$\Delta(\Delta\sigma)/\Delta\varepsilon$
	1	3	7	8	6
aus Belastung zu Versuchsbeginn	3,8	3,0	2,6	3,1	2,1
Mittelwert aus Belastungswechseln und Streuung (+/-)	7,9	5,5	6,1	6,4	6,1
aus Gesamtverformung - bleibender Verformung nach Entlastung	5,7	-	3,7	-	3,3
aus einachsialer Festigkeitsprüfung	4,1	-	1,9	-	3,2

Tab. 4.1: Prüfbedingungen, schematisierter Versuchsablauf und charakteristische Parameter zur Festigkeitsprüfung im Nachbruchbereich

Probe A: Ko101/080/536/02; Länge: 104,1 mm; Durchmesser: 51,1 mm
 Teufe: 524,62 - 524,72 m; Labor-Nr.: 85014/327



Probe B: Ko101/080/538/01; Länge: 249,7 mm; Durchmesser: 98,0 mm
 Teufe: 526,95 - 527,20 m; Labor-Nr.: 85008/158



	$\Delta(\Delta\sigma)/\Delta\varepsilon$ in GPa im Zyklus	$\dot{\varepsilon} = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$			10^{-4} s^{-1}	10^{-6} s^{-1}
		[1-2]	[3-4]	[5-6]	[7-8]	[9-10]
Probe A	$p = 7,5 \text{ MPa}$	3,0	4,0	2,9	-	-
Probe B	$p = 2,5 \text{ MPa}$	4,1	4,5	3,4	4,2	1,1

Nachweis zu den Abbildungen

Abb. 3.1: Kraft-Weg-Diagramme aus der einachsialen Festigkeitsprüfung; (-) unbelastetes Ausgangsmaterial
 (+) nach Dauerstandbelastung;
 Verformungsrate: bei Probe (2) $\dot{\epsilon}_0 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ sonst
 $\dot{\epsilon}_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$; Proben-Kennung siehe Tab. 2.1

Abb. 3.2: Verformung-Zeit-Diagramme aus der einachsialen Dauerstandbelastung; Proben-Kennung siehe Tab. 2.1 ;
 a. Gesamtverlauf; b. Entlastungsabschnitt

Abb. 3.3: Verformung-Zeit-Diagramm aus der dreiachsialen Dauerstandbelastung; Proben-Kennung siehe Tab. 2.1

Abb. 3.4: Verformung versus logarithmischer Zeitskala für einzelne Belastungsabschnitte aus der Dauerstandbelastung;
 Proben-Kennung siehe Tab. 2.1 ;

σ :	8 MPa	10 MPa	11 MPa	13 MPa	15 MPa	17 MPa
Probe 1:	0	0	0	0	-	-
Probe 7:	Δ	\blacktriangle	∇	\blacktriangledown	-	-
Probe 6:	-	-	-	X	0	+

Abb. 4.1: Abhängigkeit der Fließspannung $\Delta \sigma_f$ von der aufgeprägten Verformungsrate $\dot{\epsilon}$ und dem Überlagerungsdruck p im Nachbruchverformungsverhalten; zum Vergleich sind die aus Abb. 3.2 und Abb. 3.3 abzulesenen Verformungsraten aus den Dauerstandversuchen an intakten Kernen eingetragen, die Bandbreiten folgen aus der Verformungsrate zu Beginn und am Ende eines Belastungsabschnitts

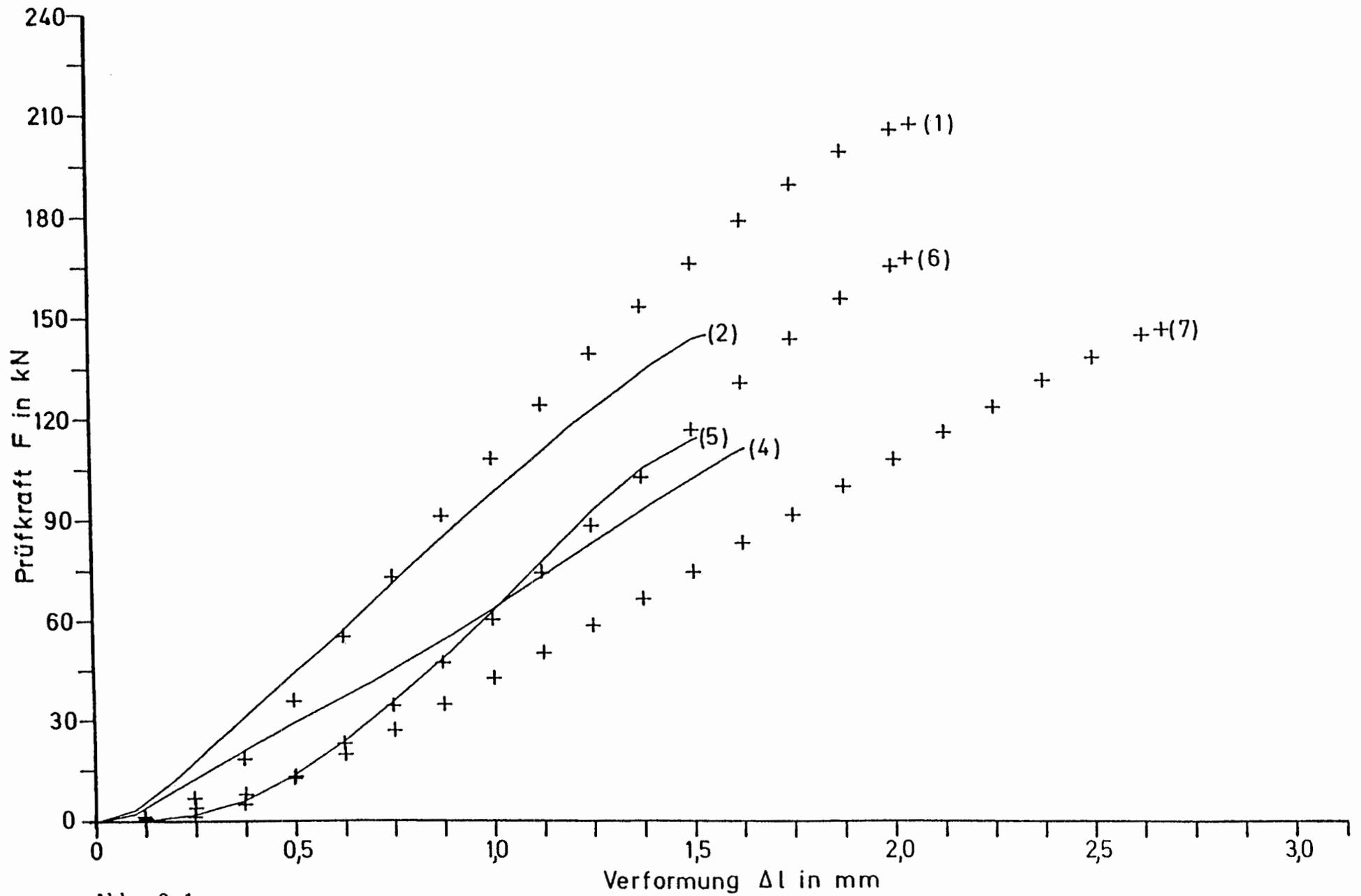


Abb. 3.1:

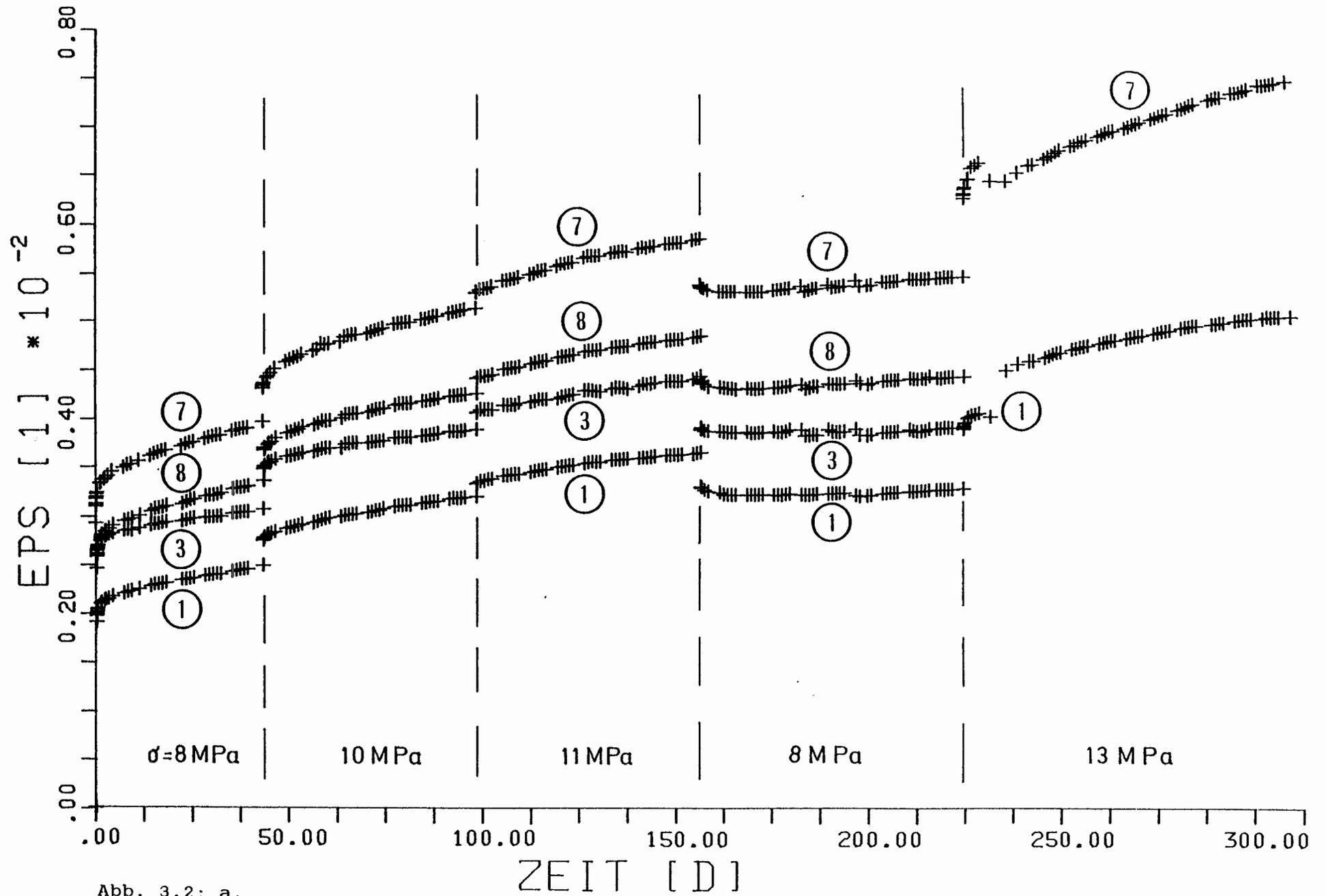


Abb. 3.2: a.

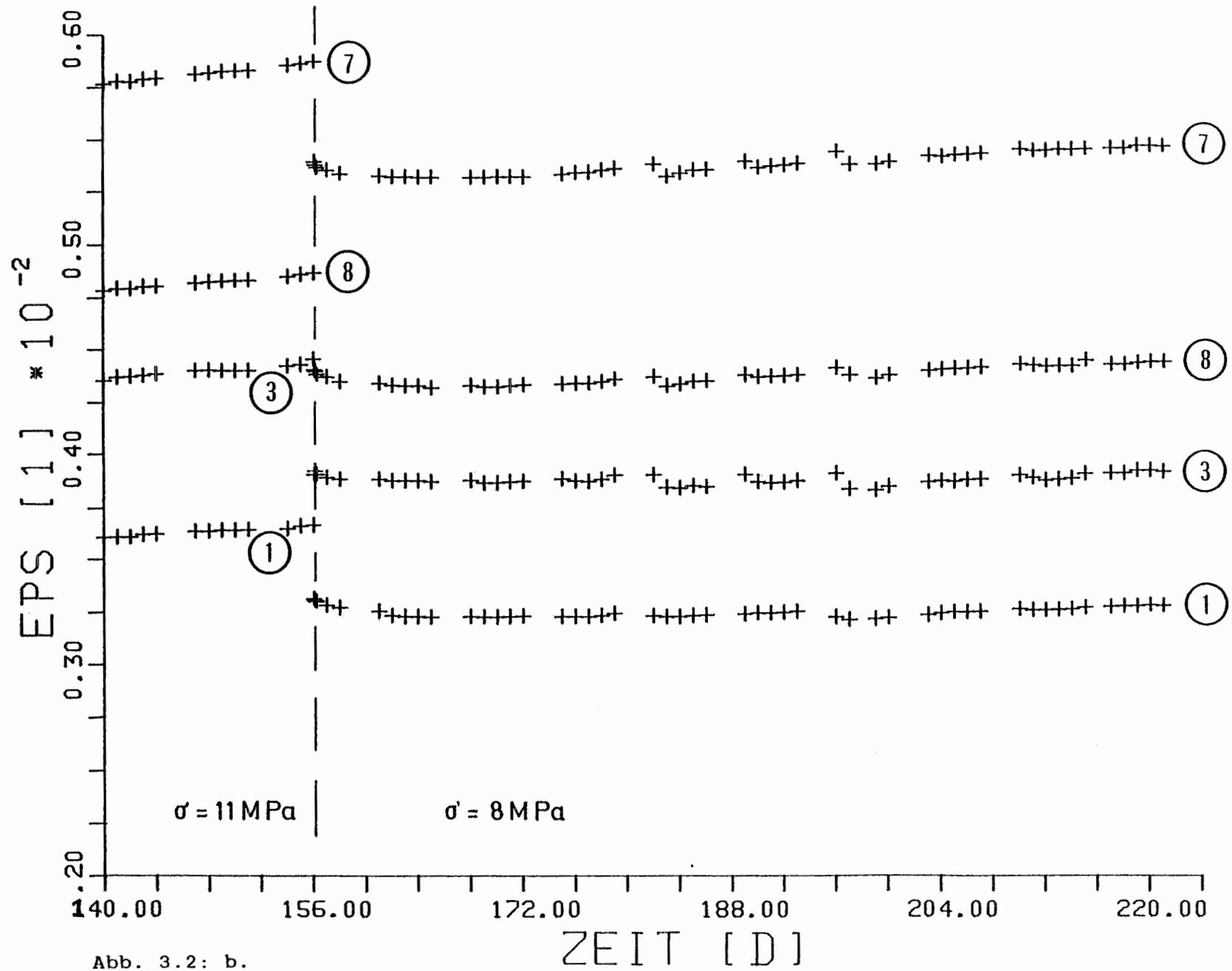


Abb. 3.2: b.

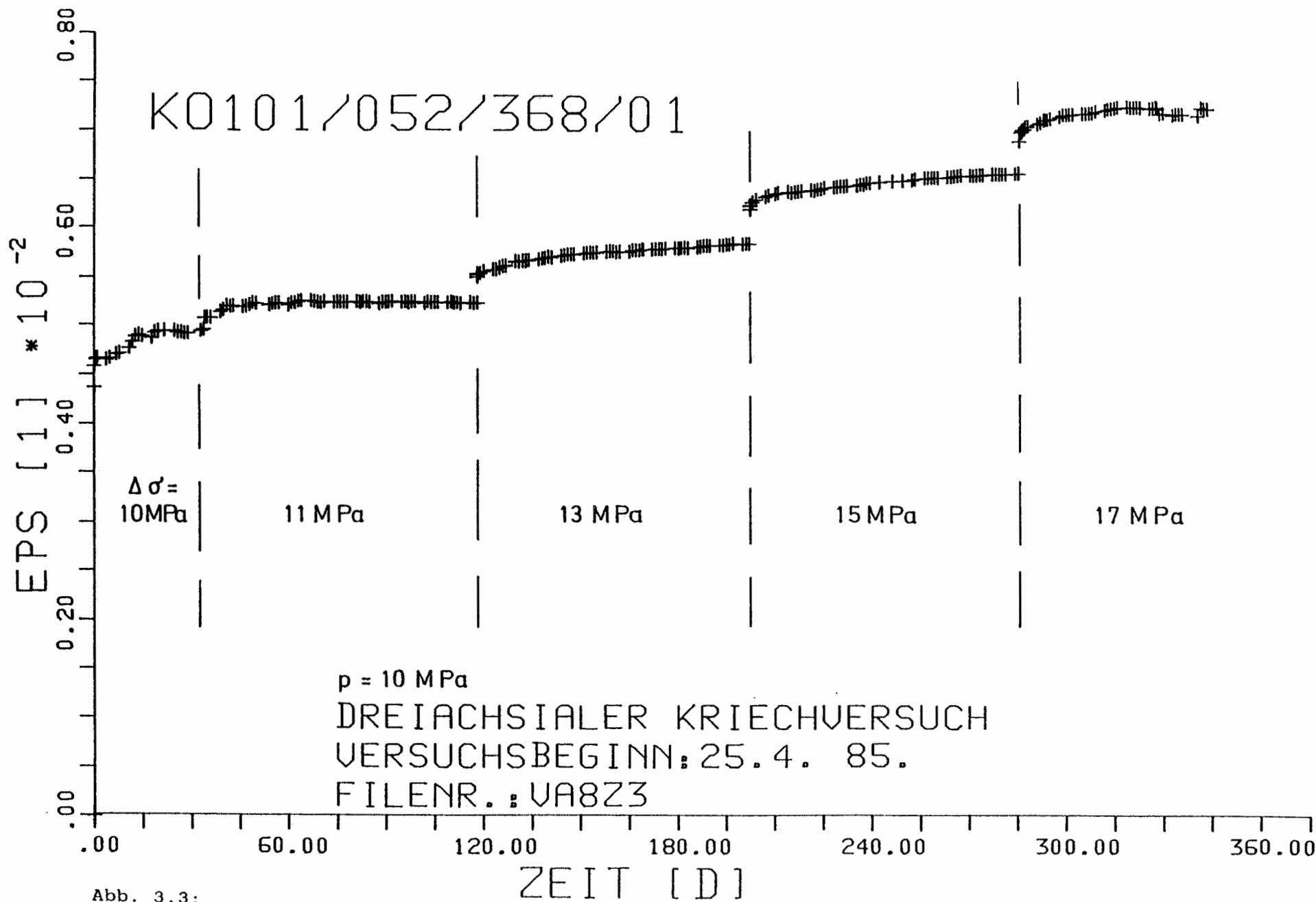


Abb. 3.3:

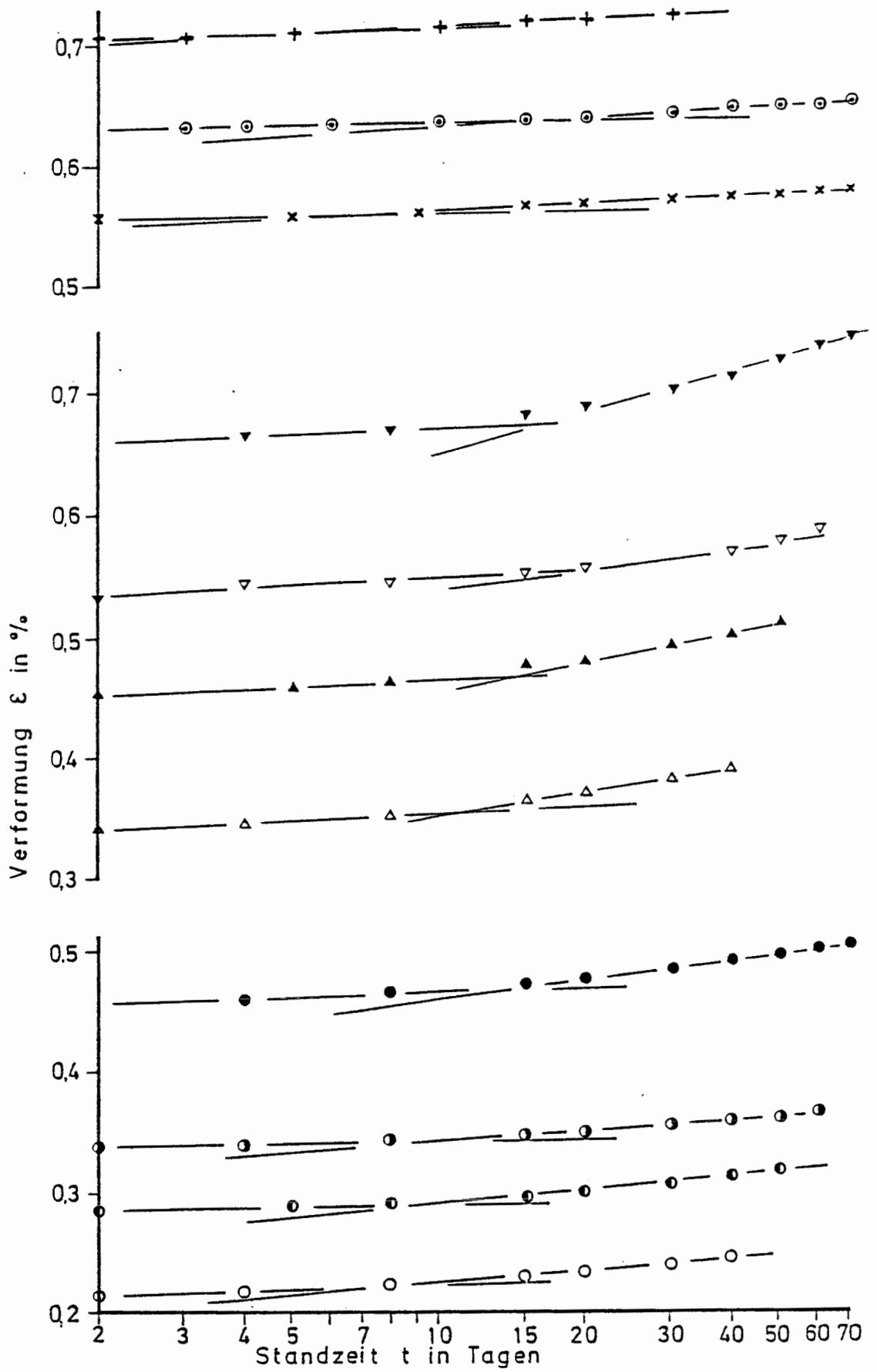


Abb. 3.4:

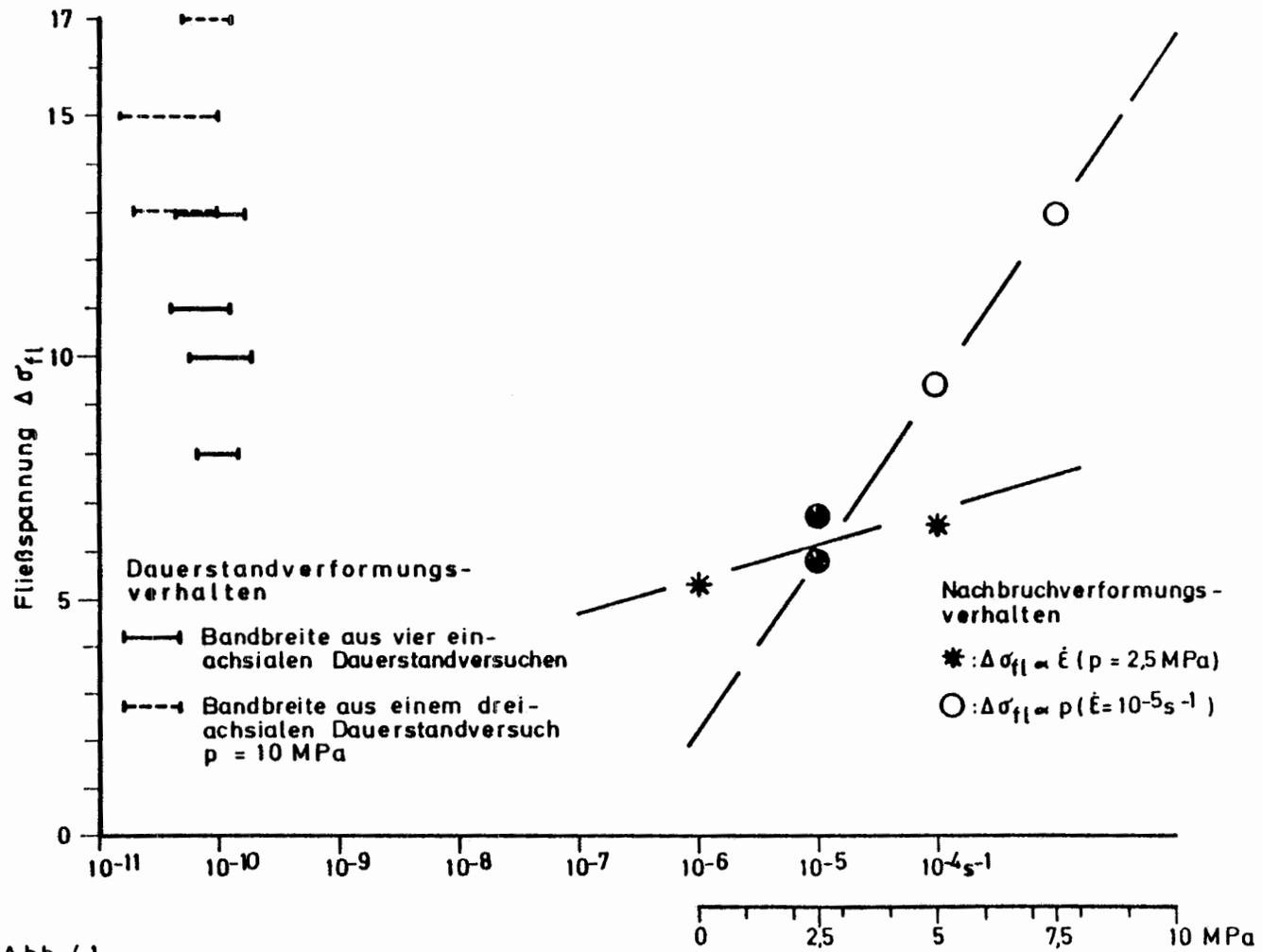


Abb. 4.1