

D.10.0 SPANNUNGSNACHWIRKUNGSUNTERSUCHUNGEN:
- MESSUNG DER RETARDATION UND DER AKUSTISCHEN EMISSION.

WOLTER, K.E., AULBACH, E. & BERCKHEMER, H.

Inhaltsverzeichnis:

	Zusammenfassung
D.10.1	Allgemeine Grundlagen
D.10.2	Meßprinzip
D.10.3	Berechnung der ebenen Deformation
D.10.4	Präparation einer Probe
D.10.5	Meßergebnisse
D.10.5.1	Retardation und akustische Emission
D.10.5.2	Trocknungseffekte
D.10.6	Schriftenverzeichnis

Zusammenfassung

Die viskoelastische Spannungsrelaxation der Bohrkerne wird mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern bei konstanter Temperatur und Feuchtigkeit in drei radialen und in einer axialen Richtung gemessen. Zur Erfassung des vollständigen Relaxationsprozesses sind Meßzeiten bis zu einer Woche erforderlich. Zwei Amphibolit - Proben aus den Teufen 1463.5 m und 1487.7 m wurden zur Untersuchung des Entspannungsprozesses und der akustischen Emissionen herangezogen. Ein weiteres Experiment verdeutlicht am Beispiel zweier lithologisch unterschiedlicher Proben das Deformationsverhalten während des Austrocknens der Bohrkerne.

D.10.1 Allgemeine Grundlagen

Wird ein Bohrkern durch den Bohrvorgang aus dem Gebirge herausgetrennt, so ist er von der im Gebirge herrschenden in situ-Spannung entlastet. Die Gebirgsspannung setzt sich zusammen aus dem Auflastdruck, der tektonischen Spannung, Residualspannung (Restspannungen), Paläospannungen und Spannungen, die durch den Porenwasserdruck induziert werden.

Dr. Klaus E. Wolter, KTB-Feldlabor, 8486 Windischeschenbach,
Dipl.Ing. Emil Aulbach, Prof. Dr. H. Berckhemer, Institut für
Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt, Feld-
bergstr. 47, 6000 Frankfurt

Die Spannungsentlastung des Kerns läßt sich durch drei Teilprozesse beschreiben:

(1) Momentane Entspannung durch elastische Deformation (Hooke'sches Verhalten). Bei der nachträglichen Untersuchung von Bohrkernen ist dieser Anteil nicht mehr vorhanden. Bedingt durch die elastische Heterogenität der Minerale hat jedoch ein Aufbau von Residualspannungen stattgefunden.

(2) Zeitabhängige partielle Relaxation von Residualspannungen durch viskoelastische Deformation. Daß es solchen Spannungsabbau durch verzögertes Kriechen (Retardation) in Gesteinen auch bei Zimmertemperatur geben kann, haben Laboruntersuchungen (BERCKHEMER et al. 1985, SOBIESIAK 1987) und Messungen an Sedimentbohrkernen (TEUFEL 1983, LESSI et al. 1988) gezeigt.

(3) Die verbleibenden zeitabhängigen oder remanenten Spannungsanteile können teilweise durch Sprödbruch abgebaut werden. Die so entstehenden Mikrorisse sind indikativ für das Primärspannungsfeld.

Der gesamte Themenkreis ist Gegenstand des Forschungsvorhabens Be 299/63 "Restspannungen in Tiefbohrkernen". Das konkrete Ziel ist dabei, aus den Restspannungen im Bohrkern Aussagen über das in situ-Spannungsfeld zu erhalten.

Ein wichtiges Teilexperiment ist hierbei die Untersuchung der viskoelastischen Spannungsrelaxation. Zur modellmäßigen Beschreibung viskoelastischen Verhaltens eignet sich der sogenannte Kelvin-Körper, eine Parallelschaltung elastischer und viskoser Elemente. Die Entspannung erfolgt entsprechend einer mit der Zeit exponentiell abklingenden Deformation. Die oben erwähnten Laborexperimente und Messungen an Sedimentkernen ließen vermuten, daß mit Relaxationszeiten von mehreren Stunden bis zu einigen Tagen zu rechnen ist. Voraussetzung für die Meßbarkeit des Effektes ist deshalb, daß die Kerne unmittelbar nach der Entnahme aus dem Kernrohr vermessen werden. Hieraus ergab sich der zwingende Grund, dieses Experiment im Feldlabor zu installieren, obwohl es nicht zu den Routineuntersuchungen gehört. Nach den jetzt vorliegenden Erfahrungen sind zur vollständigen Erfassung des Relaxationsprozesses Meßzeiten bis zu einer Woche erforderlich. Dies bedeutet, daß eine Beprobung nur an ausgewählten Kernstücken möglich ist, die etwa im Teufenabstand von 100 m entnommen werden.

Die ersten Retardationsmessungen an Bohrkernmaterial der KTB-Vorbohrung konnten erst ab Ende Februar 1988 vorgenommen werden. Der Grund dieser zeitlichen Verzögerung liegt darin, daß in dem provisorischen Feldlabor in der Volksschule Windischeschenbach die Meßapparaturen wegen technischer Schwierigkeiten nicht aufgebaut werden konnten. Weiterhin sorgten technische Probleme an einem einzelnen Meßgerät dafür, daß

bisher nur wenige Messungen durchgeführt wurden, die aber dennoch aussagekräftige Meßergebnisse lieferten.

Sämtliche Spannungsdaten beziehen sich zunächst auf eine Referenzlinie, die am Bohrkern vor Meßbeginn aufgetragen wird. Eine spätere Nachorientierung des Bohrkerns, die erst nach der Auswertung der Televier- und Formation Micro-Scanner-Aufnahmen möglich ist, läßt Aussagen über die Orientierung des im Gebirge vorliegenden Spannungssystems zu.

In diesem ersten Bericht beschränken wir uns bewußt darauf, die unmittelbaren Meßdaten der ersten zwei Proben vorzustellen unter Verzicht auf jede physikalische oder geologische Interpretation. Es soll hier in erster Linie gezeigt werden, daß der gesuchte Effekt existiert und daß das hierfür entwickelte System geeignet ist für quantitativ auswertbare Messungen. Mit dem Trocknungsversuch wird deutlich gemacht, daß erfolgreiche Retardationsmessungen nur bei strenger Konstanz des Wassergehaltes der Probe zu aussagefähigen Resultaten führen kann. Neu und unerwartet ist der hier nur pauschal erwähnte Zusammenhang zwischen Deformation und akustischer Emission.

D.10.2 Meßprinzip

Mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern (Hottinger Baldwin W1T3) wird die Deformation des Bohrkerns in drei radialen und in axialer Richtung gemessen. Abb. D.10.1 zeigt eine Skizze der Meßapparatur. Die radialen Deformationen werden jeweils als Summenwerte diametral gegenüberliegender Wegaufnehmer bestimmt. Die Aufnehmerpaare I_A , I_B , I_C sind in der radialen Ebene so angeordnet, daß sie jeweils einen Winkel von 60° miteinander einschließen (Abb. D.10.3). Axial ist nur ein Aufnehmer erforderlich, da die Probe mit ihrer unteren Stirnfläche statisch definiert auf einer Dreispitzenlagerung ruht. Die Probe besteht aus einem Kernabschnitt von 100 mm Länge. Die Messung erfolgt mit einer 4-Kanal Trägerfrequenzmeßbrücke (Hottinger Baldwin KWS 73.AG).

Während des Meßvorganges werden Wassergehalt und Temperatur des Bohrkerns konstant gehalten. Dadurch werden Deformationen ausgeschlossen, die durch Temperaturschwankungen und Austrocknungseffekte hervorgerufen werden. Zu diesem Zweck wird der Bohrkern mit einer hermetisch dichten Wachsschicht versiegelt, bevor er in die Meßapparatur eingebaut wird. Die mit Stahlspitzen versehenen Meßfühler dringen durch die Wachsschicht und sitzen auf der Kernoberfläche auf. Die Meßapparatur befindet sich in einer thermostatisierten Kammer. Die Messungen erfolgten bei einer Kammertemperatur von 25°C . Die Probe wird so in die Meßapparatur eingesetzt, daß die Orientierung der an der Probe angezeichneten Referenzlinie (siehe Kap. D.10.4.) mit der Orientierung des Aufnehmers I_A übereinstimmt.

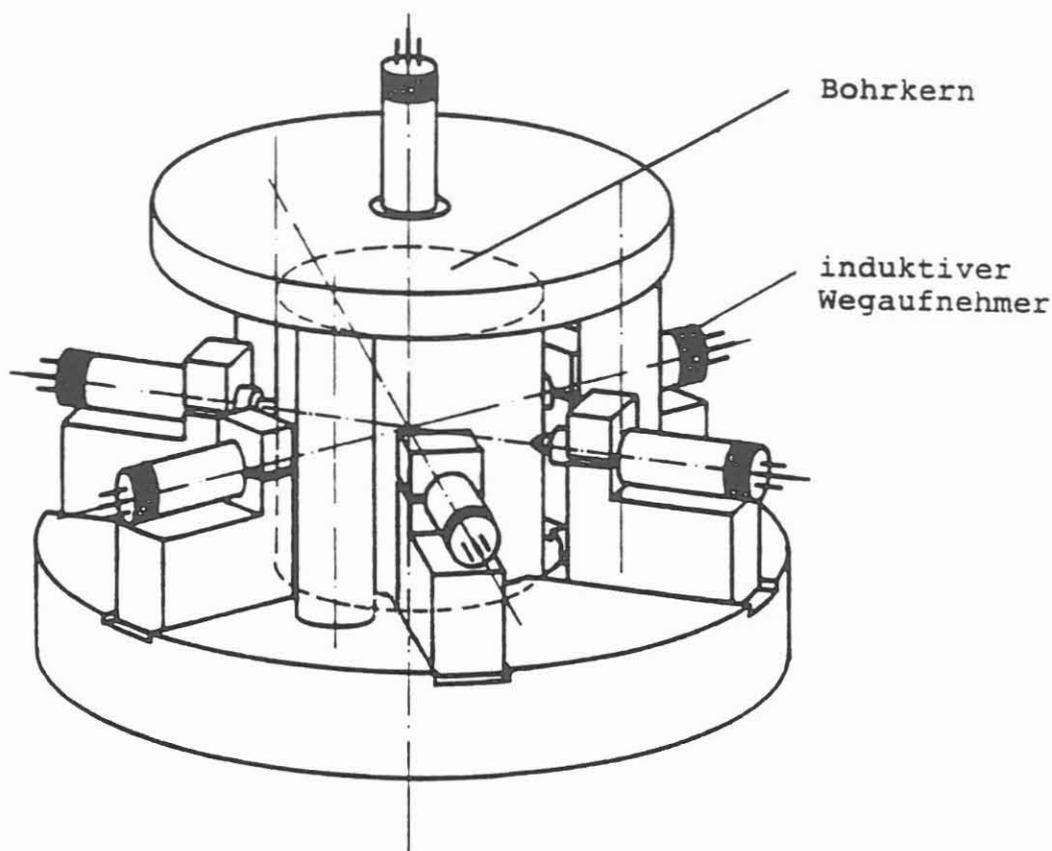


Abb. D.10.1: Skizze der Meßapparatur

Zur Erkennung und Messung akustischer Emissionen während des Retardationsprozesses wird ein piezoelektrischer Sensor an die Mantelfläche der Probe angedrückt. Die akustischen Signale werden als Ereignisse über einen Zähler summiert (AET 204B). Parallel dazu können sie mit Hilfe eines Digital-Speicheroszilloskops (VUKO VKS220-16) als Zeitfunktion dargestellt werden. Zur Vermeidung akustischer Störungen ist die Apparatur in einer weitgehend schalldichten Kammer eingeschlossen und erschütterungsgedämpft gelagert.

Alle Daten der Deformations- und der akustischen Emissionsmessungen werden über einen Mehrkanalschreiber dokumentiert. Speicheroszilloskop und Mehrkanalschreiber stehen über eine IEEE-488 Schnittstelle in Verbindung mit einem IBM-AT Personal Computer, über den alle Meßdaten in frei wählbaren Meßintervallen aufgezeichnet und auf Diskette abgespeichert werden können. Aus Abb. D.10.2 ist die Anordnung des Versuchsaufbaues zu entnehmen. Die Entwicklung der Meßapparatur, die Erarbeitung des Meßprinzips und die Fertigstellung der entsprechenden Software erfolgte am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt.

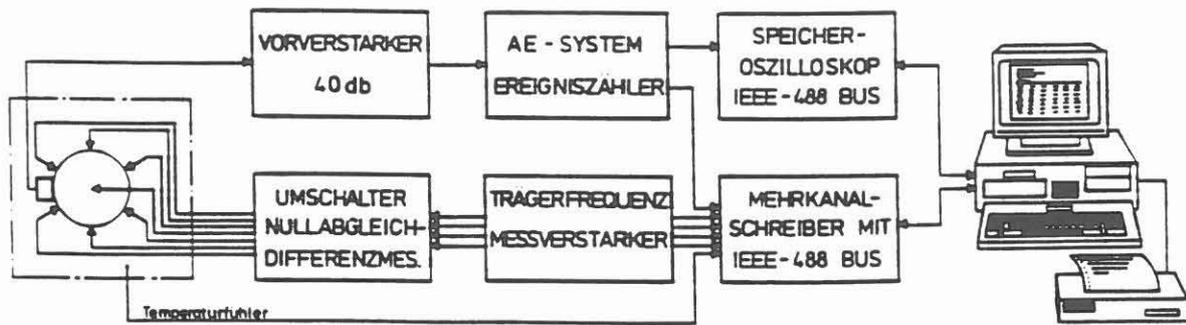


Abb. D.10.2: Skizze der Meßgeräte-Anordnung

D.10.3 Berechnung der ebenen Deformation

Aus den in der Querschnittsebene des Kerns gemessenen radialen Deformationswerten

$$e_A = \Delta l_A / l_A, \quad e_B = \Delta l_B / l_B, \quad e_C = \Delta l_C / l_C$$

lassen sich für infinitesimale Deformationen (tensorieller Zusammenhang) Betrag und Richtung der maximalen Hauptdeformation e_1 und der minimalen Hauptdeformation e_2 berechnen. Für ein vorgegebenes ebenes Hauptdeformationssystem e_1, e_2 ergibt sich in Analogie zum Mohr'schen Spannungskreis (JAEGER & COOK 1979, S. 45,46) die Dehnung in Richtung θ bezüglich der Richtung von e_1 zu:

$$e(\theta) = \frac{1}{2}(e_1 + e_2) + \frac{1}{2}(e_1 - e_2) \cos 2\theta \quad (1)$$

Bildet im speziellen Fall der Anordnung (Abb. D.10.3) der Aufnehmer I_A den Winkel β mit e_1 , so gilt:

$$\begin{aligned} e_A &= \frac{1}{2}(e_1 + e_2) + \frac{1}{2}(e_1 - e_2) \cos 2\beta \\ e_B &= \frac{1}{2}(e_1 + e_2) + \frac{1}{2}(e_1 - e_2) \cos 2(\beta + 60^\circ) \\ e_C &= \frac{1}{2}(e_1 + e_2) + \frac{1}{2}(e_1 - e_2) \cos 2(\beta + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2)$$

Wegen

$$\begin{aligned} \cos 2(\beta + 60^\circ) &= -\frac{1}{2} \cos 2\beta + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\beta \\ \cos 2(\beta + 120^\circ) &= -\frac{1}{2} \cos 2\beta - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\beta \end{aligned} \quad (3)$$

ergibt die Auflösung von (2) nach den Hauptdeformationen

$$e_1 + e_2 = \frac{2}{3}(e_A + e_B + e_C)$$

$$(e_1 - e_2)^2 = \frac{4}{3}(e_B - e_C)^2 + \frac{4}{9}(2e_A - e_B - e_C)^2$$

und damit

$$e_1 = \frac{1}{3}(e_A + e_B + e_C) + \frac{1}{3}\sqrt{3(e_B - e_C)^2 + (2e_A - e_B - e_C)^2} \quad (4)$$

$$e_2 = \frac{1}{3}(e_A + e_B + e_C) - \frac{1}{3}\sqrt{3(e_B - e_C)^2 + (2e_A - e_B - e_C)^2}$$

$$\tan 2\beta = \sqrt{3}(e_C - e_B) / 2e_A - e_B - e_C \quad (5)$$

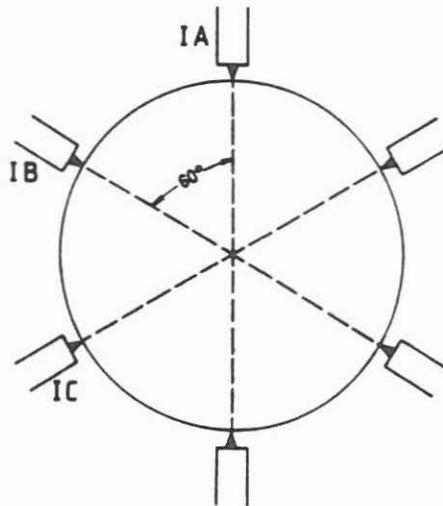


Abb. D.10.3: Anordnung der induktiven Wegaufnehmerpaare in der radialen Ebenen.

Wird die Probe so in die Meßapparatur eingesetzt, daß die zuvor am Kern angebrachte D-Referenzlinie (siehe Kap. D.10.4) mit dem Aufnehmer I_A zusammenfällt, dann ist β der im Uhrzeigersinn positive Winkel zwischen der e_1 -Richtung und der D-Referenzrichtung. (Wäre die D-Referenzrichtung gleich der Nordrichtung, so wäre β positiv nach Osten zu zählen).

D.10.4 Präparation einer Probe

Da der Deformationsvorgang eines Bohrkerns zu dem Zeitpunkt beginnt, in dem dieser aus dem Gebirge herausgebohrt wird, ist es erforderlich die Deformationsmessung so schnell wie möglich nach der Kernentnahme zu beginnen. Aus einem frisch erbohrten Kernmarsch wird sofort nach der Bohrkernentnahme ein Kernstück ausgewählt und mit einer D-Referenzlinie (Referenzlinie für die Deformationsmessung) versehen. Dieses Kernstück stammt aus dem untersten Meter des Kernmarsches, d.h. dem Teil, der zuletzt erbohrt wurde. Aus diesem Kernstück wird ein planparalleler Probenzylinder mit einer Höhe von 100 ± 1 mm herausgetrennt. Dieser Probenzylinder ($\phi = 94$ mm) wird in ein vorbereitetes Wachsbad (Temp. ca. 78°C) kurz eingetaucht und so mit einer Wachsschicht umgeben, um den Feuchtigkeitsgehalt in der Probe konstant zu halten. Dieser präparierte Probenzylinder wird in die Meßapparatur eingebaut, die induktiven Wegaufnehmer justiert (Nullmessung) und die Messung gestartet.

Zwischen der Bohrkernentnahme und dem Beginn der Messung sind ca. 45 Min. erforderlich, um den Probenzylinder zu präparieren. Zeitpunkt der Bohrkernentnahme ist, wenn der Bohrkern im Kernrohr atmosphärische Bedingungen erreicht, d.h. wenn das Kernrohr auf dem Drehtisch des Bohrturms angekommen ist. Die Zeitdauer, die zwischen dem Herausbohren des Kerns und dem Beginn einer Messung liegt, beträgt ca. 2-3 Stunden. In dieser Zeit vollzieht sich ein großer Teil des Deformationsvorganges. Dennoch lassen sich an dem Bohrkern auch nachher noch Deformationen über mehrere Tage registrieren bis eine Stabilisierung des Deformationsablaufes eingetreten ist. Dies geht aus den bisher vorliegenden Messungen deutlich hervor.

Die beiden Endstücke des Kernstücks, aus dem der Probenzylinder herausgetrennt wurde, gehen in die Kerninventarisierung. Dort werden sie in den Kernmarsch eingepaßt, mit der F-Referenzlinie (die eigentliche Feldlabor-Referenzlinie) versehen und inventarisiert. Mit Hilfe der Winkeldifferenz zwischen der D-Referenzlinie und der F-Referenzlinie kann die errechnete Orientierung der größten Deformation auf die F-Referenzlinie bezogen werden.

D.10.5 Meßergebnisse

D.10.5.1 Retardation und akustische Emission

Bei den zahlenmäßigen Ergebnissen wird die kumulative Deformation angegeben, bezogen auf einen Nullpunkt, der drei Stunden nach Meßbeginn angesetzt wird. Die Zeit von drei Stunden ist erforderlich, damit zwischen Bohrkern und Meßraum der Temperatúrausgleich erfolgen kann. Dadurch wird verhindert, daß Deformationen gemessen werden, die auf thermische Einflüsse zurückzuführen sind.

Die Deformation ist mit vier Meßwerten ($\mu\text{m}/\text{m}$) angegeben. Dabei bedeuten e_A , e_B und e_C , die radial erzielten Deformationswerte und e_V der axiale Meßwert. Weiterhin beinhaltet die Darstellung der Meßergebnisse die berechnete maximale und minimale Hauptdeformation (e_1 , e_2) und die Orientierung β von e_1 bezogen auf die Feldlabor-Referenzlinie. Das Ergebnis der akustischen Emissions-Messung enthält die Anzahl der registrierten akustischen Ereignisse.

Aus den Kernmärschen 305 und 310 wurden jeweils an einem Bohrkern Retardationsmessungen durchgeführt. Bei beiden Bohrkernen handelt es sich um einen mittelkörnigen, schwach texturierten Amphibolit.

Probe 305:

Kernstück-Nr.:	305D1q
Obere Teufe des Kernstücks:	1463,5 m
Beginn der Messung nach Kernentnahme:	1h 10 min
Deformationszeit:	8h 30 min
Kumulative Deformation:	$e_A = 150 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_B = 51 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_C = 128 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_V = -97 \mu\text{m}/\text{m}$
Maximale und minimale Hauptdeformation:	$e_1 = 171 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_2 = 50 \mu\text{m}/\text{m}$
Orientierung von e_1 bezogen auf die Feldlabor-Referenzlinie:	$\beta = 25^\circ$
Anzahl der akustischen Ereignisse:	238 in 8,5h

Probe 310 (1.Versuch):

Kernstück-Nr.:	310J4ab
Obere Teufe des Kernstücks:	1487,7 m
Beginn der Messung nach Kernentnahme:	45 min
Deformationszeit:	14h 30 min
Kumulative Deformation:	$e_A = 279 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_B = 563 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_C = 487 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_V = 681 \mu\text{m}/\text{m}$
Maximale und minimale Hauptdeformation:	$e_1 = 613 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_2 = 273 \mu\text{m}/\text{m}$

Orientierung von e_1 bezogen
auf die Feldlabor-Referenzlinie: $\beta = 17^\circ$

Anzahl der akustischen Ereignisse: 1900 in 7,5h

Der Versuch mußte nach 14,5h wegen technischer Probleme abgebrochen werden. Nach einer Neujustierung der induktiven Wegaufnehmer und Überprüfung der Meßgeräte wurde der Versuch neu gestartet. Der Beginn der Messung erfolgte 21,5h nach der Kernentnahme. Die Meßergebnisse sind im folgenden dargestellt:

Probe 310 (2. Versuch):

Kernstück-Nr.: 310J4ab
Obere Teufe des Kernstücks: 1487,7 m
Beginn der Messung nach Kernentnahme: 21h 30 min
Deformationszeit: 97h 30 min

Kumulative Deformation: $e_A = 84 \mu\text{m/m}$
 $e_B = 376 \mu\text{m/m}$
 $e_C = 79 \mu\text{m/m}$
 $e_V = 260 \mu\text{m/m}$

Maximale und minimale Hauptdeformation: $e_1 = 376 \mu\text{m/m}$
 $e_2 = -17 \mu\text{m/m}$

Orientierung von e_1 bezogen
auf die Feldlabor-Referenzlinie: $\beta = 40^\circ$

Ein deutliches anisotropes Verhalten im Deformationsverlauf ist aus allen drei Messungen zu entnehmen. Die Probe 305 (Abb. D.10.4) zeigt axial eine negative Deformation mit einem maximalen Wert von $-97 \mu\text{m/m}$. Das bedeutet, daß sich der Kern in der axialen Richtung zusammengezogen hat. Dies ist bei der Probe 310 (Abb. D.10.5, D.10.6 und D.10.7) nicht der Fall. Die axiale Deformation e_V erreicht in beiden Messungen (1. und 2. Versuch) positive Werte ($681 \mu\text{m/m}$ bzw. $260 \mu\text{m/m}$), d.h. der Kern dehnt sich aus. Abb D.10.7 zeigt, daß die Deformation nach 124 h (>5 Tage) immer noch nicht abgeschlossen ist. Die angegebene Orientierung der maximalen radialen Hauptdeformation e_1 bezieht sich auf die F-Referenzlinie. Eine Orientierung des Spannungsfeldes kann noch nicht ermittelt werden, da noch keine Rückorientierung der Bohrkerne vorliegt.

Die Aufzeichnung der akustischen Emissionen zeigt unterschiedliche Ergebnisse. Dies liegt einerseits daran, daß der Kern 310 zeitlich schneller zur Messung zur Verfügung stand als der Kern 305 und andererseits ist es wahrscheinlich, daß sowohl die Anzahl der akustischen Ereignisse als auch die Bandbreite des Frequenzspektrums vom Bohrkernmaterial und dem Deformationsverhalten abhängig ist. Das Ergebnis der Untersu-

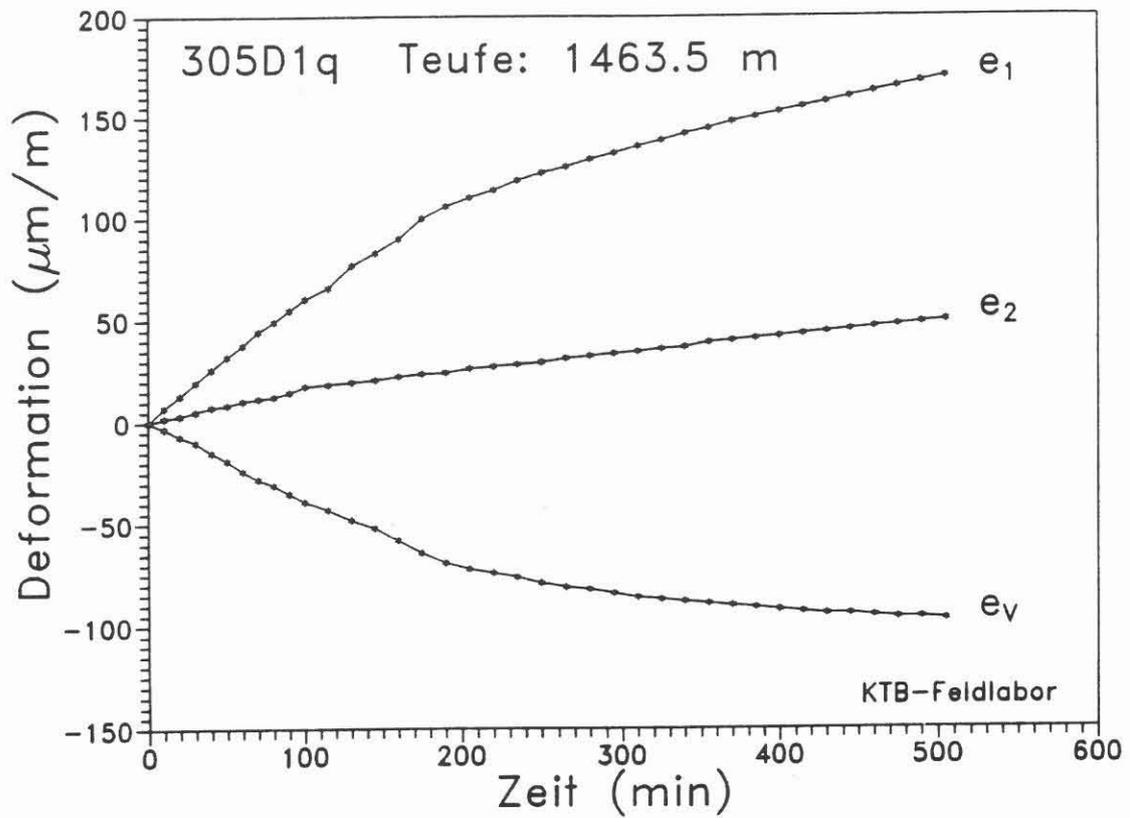


Abb. D.10.4: Zeit-Deformationsverlauf der Probe 305.

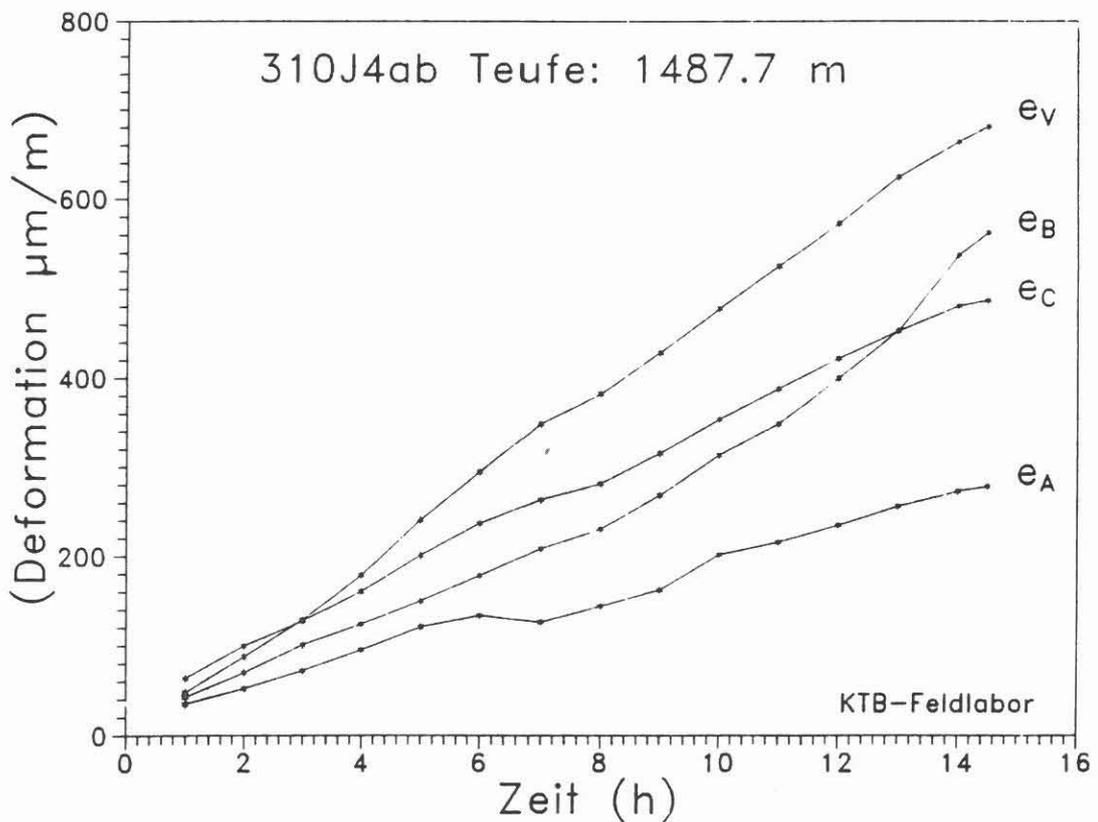


Abb. D.10.5: Zeit-Deformationsverlauf der Probe 310 (1. Versuch).

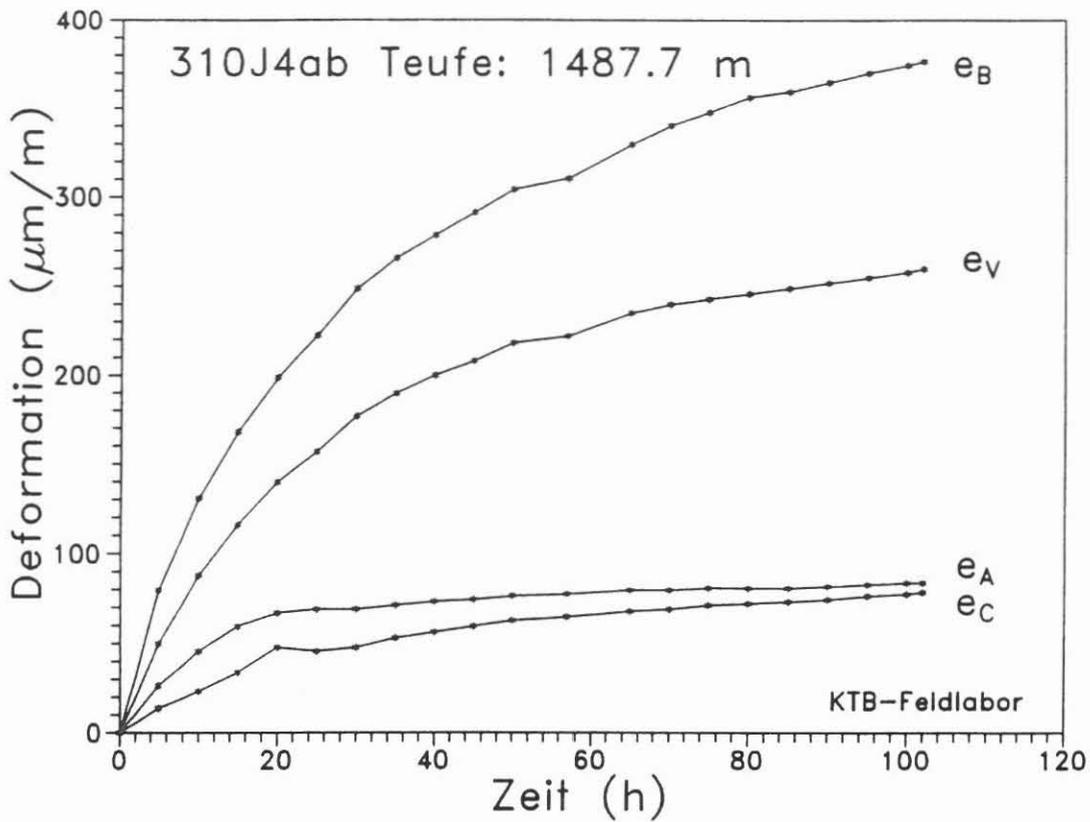


Abb. D.10.6: Zeit-Deformationsverlauf der Probe 310 (2. Versuch).

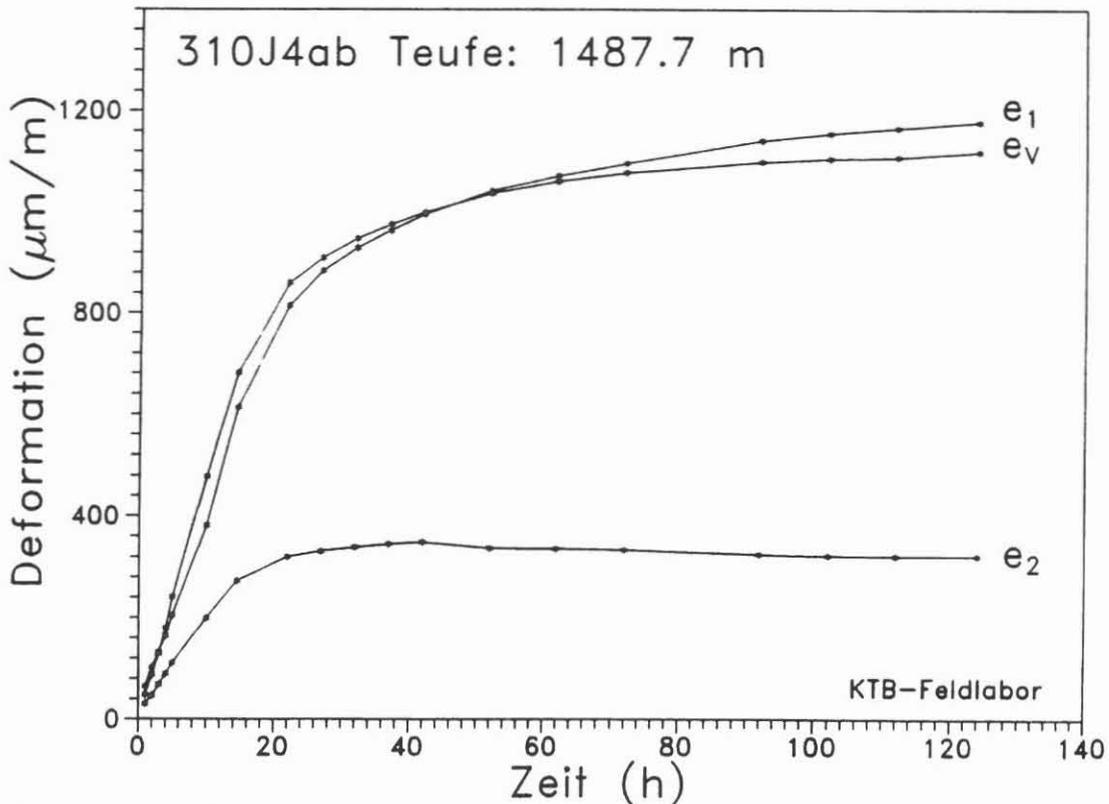


Abb. D.10.7: Zeit-Deformationsverlauf der Probe 310 (1.+2.Versuch)

chung des Frequenzspektrums ergab eine Bandbreite von 135-220 KHz. Die Analyse der akustischen Emissionen wird in Zukunft noch stärker verfolgt, so daß die hier vorgestellten Meßergebnisse nur als erste vorläufige Resultate zu betrachten sind.

D.10.5.2 Trocknungseffekte

Makroskopisch ließ sich an verschiedenen Bohrkernen im Kernlager des KTB-Feldlabors beobachten, daß sich an dem Kernmaterial nach mehreren Tagen Risse und Brüche zeigen, die nach der Kernentnahme noch nicht vorhanden waren. Mit den folgenden Versuchen sollte herausgefunden werden, welche Effekte auftreten, wenn ein Bohrkern austrocknet. Dazu wurde folgende Methode angewendet:

Nach Beendigung der Retardationsmessung wurde von der Probe die Wachsschicht entfernt und der Kern 24 h gewässert. Danach wurde der Kern wieder in die Meßapparatur eingebaut und dort über mehrere Tage zwischen 18-20°C getrocknet. Die Abb.D.10.8 und D.10.9 zeigen den Zeit-Deformationsverlauf zweier lithologisch unterschiedlicher Proben. Probe 305 ist der schon oben erwähnte mittelkörnige, schwach texturierte Amphibolit und Probe 402 ist ein sehr strafflagiger, deutlich geschieferter Paragneis.

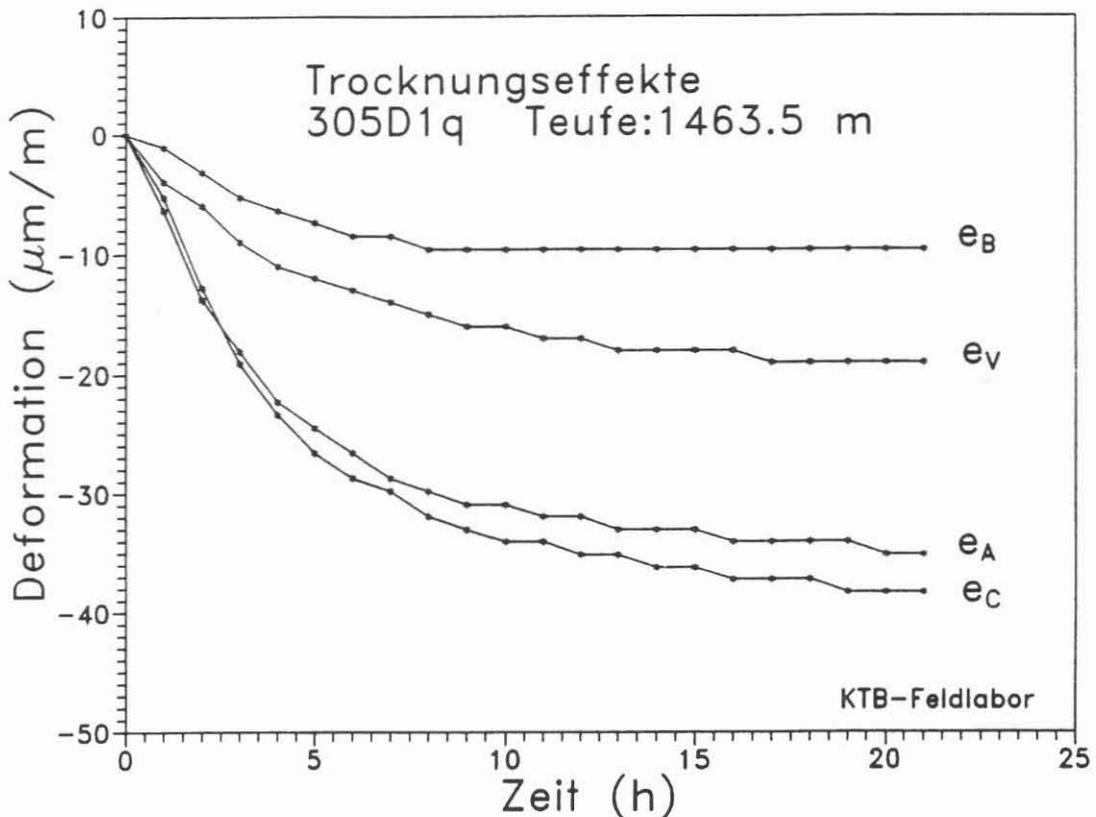


Abb. D.10.8: Trocknungseffekte im Amphibolit

Der Amphibolit zeigt eine geringe Schrumpfung von maximal $-38 \mu\text{m}/\text{m}$. Dagegen treten bei dem Paragneis wesentlich größere Schrumpfungen auf. Der Meßwert e_A verläuft parallel zum Streichen der Foliation und wie aus Abb. D.10.9 ersichtlich, ist die Deformation in dieser Richtung gleich Null. Die Meßwerte e_B und e_C zeigen dagegen sehr große Deformationen von $-320 \mu\text{m}/\text{m}$ bzw. $-407 \mu\text{m}/\text{m}$. Das bedeutet, daß während des Austrocknens des Materials sich die größte Kontraktion senkrecht zum Streichen der Foliation ereignet. Das ausgeprägte Trennflächengefüge im Paragneis hat einen erheblichen Einfluß auf das Deformationsverhalten während des Trocknungsprozesses. Wahrscheinlich spielen Kapillarkräfte eine wesentliche Rolle. Quelleffekte können ausgeschlossen werden, da keine quellfähigen Minerale vorhanden sind. Im Vergleich zu dem Amphibolit sind die Deformationen im Paragneis ca. 10 mal größer.

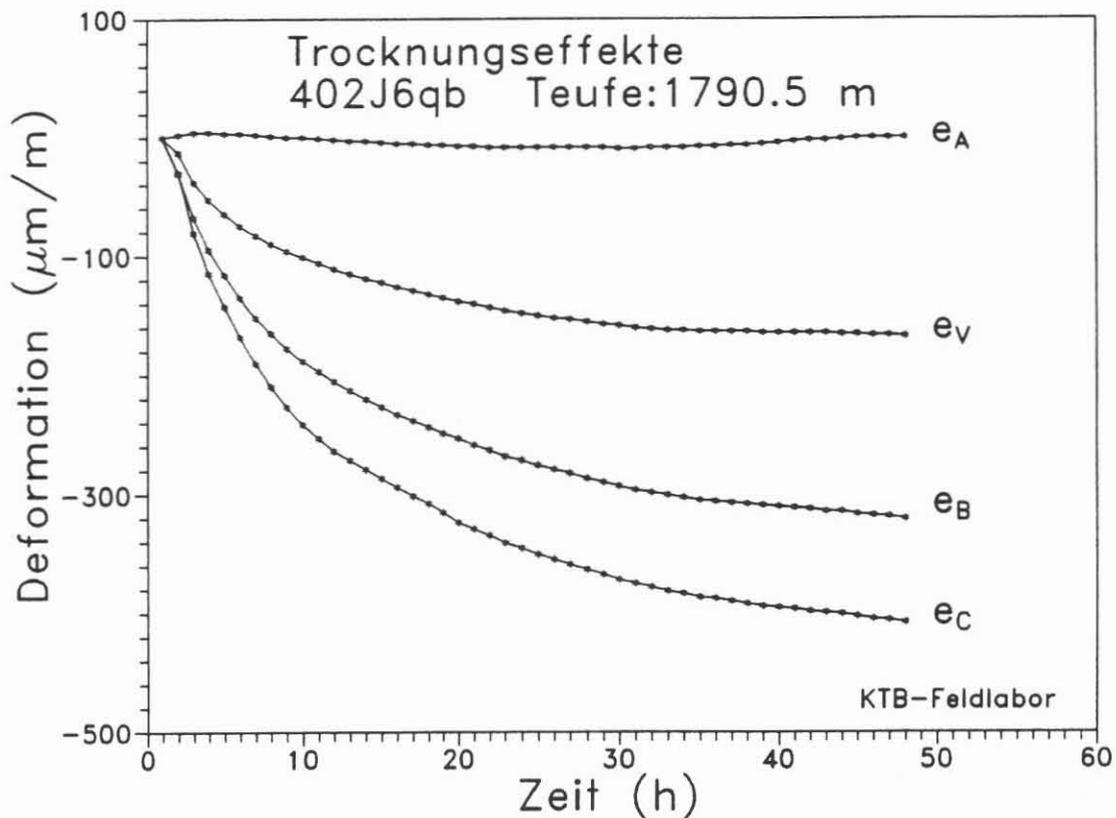


Abb. D.10.9: Trocknungseffekte im Paragneis

D.10.6 Schriftenverzeichnis

- BERCKHEMER, H., Aulbach, E., BÄUMLER, P. & SOBIESIAK, M. (1985): Residual stress in drill cores.- 4th Alfred Wegener Conference, Seeheim, S.91.
- JAEGER, J.C. & COOK, N.G.W. (1979): Fundamentals of rock mechanics.- Chapman & Hall, London.
- LESSI, J., PERREAU, PH. & KOCHER, M. (1988): Mesures de contraintes in-situ méthode relaxation des carottes.-Rev. de l'Institut Français du Pétrole, 43: 17-42.
- SOBIESIAK, M. (1987): Thermische Relaxation von Eigenspannungen in Glas- und Basaltproben. - Dipl.Arbeit, Inst. f. Met. u. Geoph. Frankfurt.
- TEUFEL, L.W. (1983): Determination of in situ-stress from anelastic strain recovery measurements of oriented cores. - Symposium SPE/DOE 11649, Denver, 421-430.