

Differenz-Deformations-Analyse
an Bohrkernen aus großer Teufe

H. Baumann
J. W. F. Negendank

DIFFERENZ-DEFORMATIONS-ANALYSE AN BOHRKERNEN AUS GROBER TEUFE

H. BAUMANN und J.F.W. NEGENDANK, Trier

1 ZUSAMMENFASSUNG

Mit Hilfe der "Differenz-Deformations-Analyse (DDA)" soll der Gebirgsspannungstensor in verschiedenen Teufen untersucht werden. Der wesentliche Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß es bis zu Teufen von einigen tausend Metern einsetzbar ist. Die Teufenbegrenzung ist letztendlich durch die Intensität des core-diskings der Bohrkern gegeben. Die Untergrenze der Scheibendurchmesser liegt bei ca. 3 cm. Von Vorteil ist, daß das Probenmaterial nicht unmittelbar nach der Trennung aus dem Gesteinsverband gemessen werden muß, sondern daß die Messungen zu einem beliebigen Zeitpunkt im Labor erfolgen können. Mit der DDA ist es möglich, ein Spannungsprofil des vollständigen Spannungstensors über einen Tiefenbereich von einigen tausend Metern zu erstellen (bis heute existieren weltweit erst wenige Meßwerte über 3 km). Unter günstigen Voraussetzungen wird es möglich sein, den aus bisherigen Spannungsmessungen postulierten Peak der Scherspannungen zu erfassen, dessen Lage im Teufenbereich zwischen 5 und 10 km angenommen wird (RUMMEL, 1986).

Mit Gefügeuntersuchungen (Polarisationsmikroskopie, Raster-Elektronenmikroskopie) wollen wir einen Beitrag zum Verständnis des Mechanismus, der der DDA zugrunde liegt, liefern.

2 ENTWICKLUNG UND GRUNDLAGEN DER DIFFERENZ-DEFORMATIONS-ANALYSE

Spannungsmessungen wurden bisher hauptsächlich in Tiefen bis ca. 3 km durchgeführt. Gründe hierfür sind vor allem technischer, bzw. finanzieller Art. Das traditionelle Überbohrverfahren, das auch von uns bisher eingesetzt wurde, erreicht zur Zeit erst Tiefen von wenigen hundert Metern. Das hydraulic fracturing Verfahren erreichte an drei Meßlokationen Tiefen zwischen 3 km bis maximal 5 km (HAIMSON, 1978; RUMMEL, 1986). Zunehmende Bedeutung innerhalb der Spannungsmeßmethoden haben in den letzten Jahren die Bohrlochrandausbrüche gewonnen. Mit Hilfe der Bohrlochrandausbrüche ist es möglich, die Richtungen der horizontalen Hauptspannungen zu bestimmen (BLÜMLING et al., 1983; ZOBACK et al., 1985). Bisher war den Bemühungen, aus der Form und Tiefe der Ausbrüche auf die

Dr. H. Baumann; Prof. Dr. J.F.W. Negendank
Universität Trier
Fachgruppe Geographie/Geowissenschaften
Abteilung Geologie

Beträge der horizontalen Spannungen zu schließen, kein Erfolg beschieden (mündliche Mitteilung von Herrn Dr. P. Blümling). Retardationsmessungen an Bohrkernen wurden in neuester Zeit vor allem von SANDIA und LOS ALAMOS Laboratories mit Erfolg eingesetzt (TEUFEL, 1983; BLANTON, 1983). Unter bestimmten Annahmen lassen sich mit diesem Verfahren die Richtungen und Beträge der Hauptspannungen mit guter Näherung berechnen. Voraussetzung dafür ist, daß die Messungen möglichst schnell nach dem Freischneiden des Bohrkerns aus dem Gebirgsverband durchgeführt werden können.

Retardationsmessungen sind auch für die KTB-Lokation "Oberpfalz" vorgesehen (BERCKHEMER et al., 1985) und werden im Feldlabor ausgeführt. Von einer Karlsruher Arbeitsgruppe wurde jüngst ein hard inclusion Verfahren für tiefe Bohrlöcher vorgestellt (NATAU et al., 1986). Die Diskussion, welche physikalischen Parameter gemessen werden können, ist kontrovers. Technische Begrenzung erfährt das Verfahren dadurch, daß der Sensor immer Teil der Verrohrung der Bohrung ist und dadurch wahrscheinlich nicht in Tiefen größer 3000 m - 5000 m eingesetzt werden kann.

Von zunehmender Bedeutung ist ein Verfahren, das über die Messung des "Riß-Tensors" auf die Spannungen schließt und vor allem in der Erdölindustrie und in hot-dry-rock Projekten eingesetzt wird. Seinen Ausgang hat dieses Verfahren in der Beobachtung von ADAMS & WILLIAMSON (1923), daß die Kompressibilität von Gesteinsproben mit steigendem Druck kleiner wurde, wenn die Proben mit einem für das Druckmedium dichten Mantel umgeben wurden. Setzte man die Proben direkt dem Druckmedium aus, so war die Kompressibilität nahezu linear. BIRCH (1960, 1961) fand ähnliche Unterschiede bei ummantelten und nichtummantelten Proben im Anstieg der Wellengeschwindigkeit von Kompressionswellen. BRACE (1965) und WALSH (1965) beschäftigten sich eingehend mit dem Phänomen der nichtlinearen Kompressibilität von Gesteinen und führten sie quantitativ auf Porosität und Mikrorisse zurück. SIMMONS et al. (1974) verfeinerten die Meßtechnik zur Untersuchung des Verhaltens von Mikrorissen unter allseitigem Druck und nannten sie "Differential Strain (Curve) Analysis (DSA)".

REN & ROEGIERS (1983) setzten die DSA zum ersten Mal zur Bestimmung von Gesteinsspannungen ein, indem sie die gemessenen, richtungsabhängigen Deformationen als Funktion des hydrostatischen Druckes ansahen und über den so erhaltenen Deformationstensor das Verhältnis der Hauptspannungen zueinander abschätzten. Versuchstechnisch gingen die genannten Autoren so vor, daß sie eine eingekapselte und mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) versehene Gesteinsprobe (Abb. 1) mit einem Probenstandard (Quarzglas), der ebenfalls mit DMS versehen wurde, in einen Hochdruckbehälter brachten und die Proben simultan, hydrostatisch belasteten. Durch die gleichzeitige Belastung von Gesteinsprobe und Referenzprobe wurden experimentell bedingte Nichtlinearitäten und Fehler, wie Meßgerätedrift, Widerstandsänderungen der DMS durch den aufgebrachten Druck, Temperatureffekte auf die DMS oder Kabeleinfluß minimiert. Neun Druck-Deformationskurven wurden aufgezeichnet,

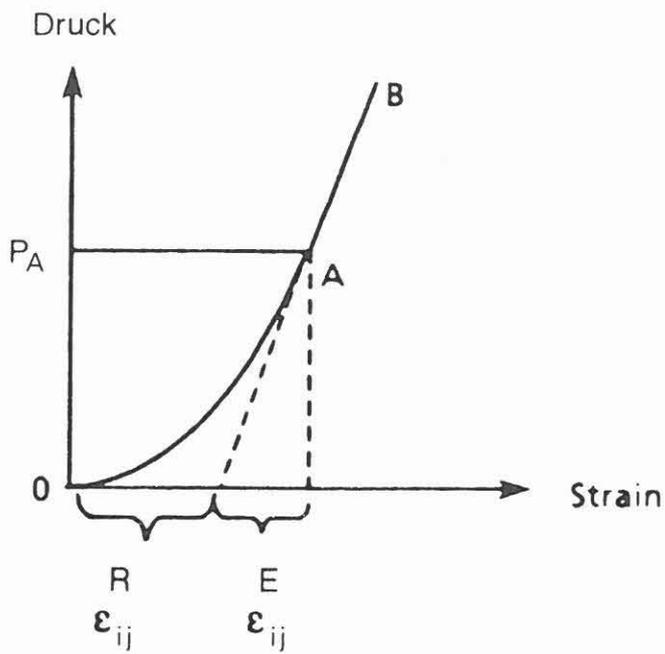


Abb. 1: Anordnung der applizierten Dehnungsmeßstreifen auf einem Gesteinswürfel

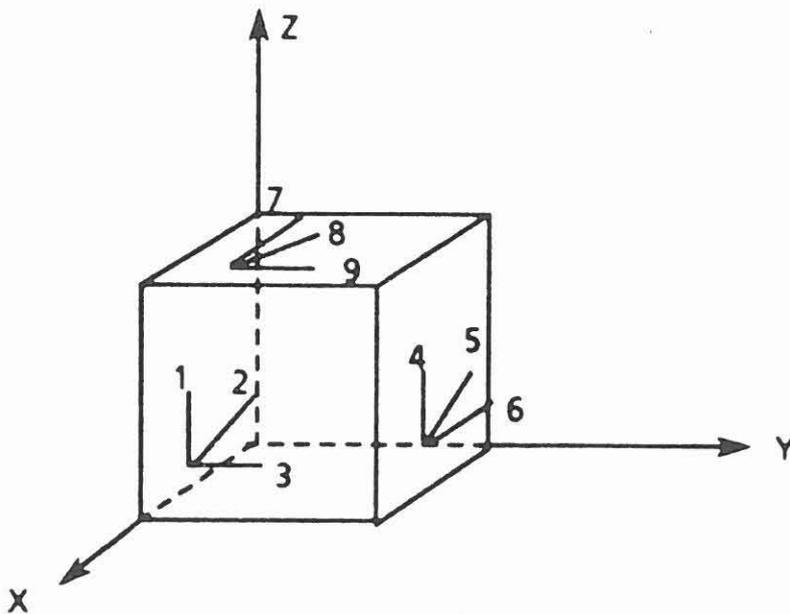


Abb. 2: Prinzipskizze einer Druck-Strain Kurve wie sie mit Hilfe der Differenz-Deformations-

ähnlich der in Abb. 2. Der nichtlineare Kurvenabschnitt (0 A) entspricht dem Bereich des Schließens der Mikrorisse in der entsprechenden Richtung. Der lineare Kurvenanteil (A B) entspricht dem elastischen Gesteinsverhalten. Zu jedem Kurvenpunkt (0 A) läßt sich eine Deformationskomponente ausschließlich bedingt durch Rißschließung (Hochindex R), und eine Deformationskomponente aus ausschließlich elastischer Deformation (Hochindex E) angeben. Beim Druck P_A sind alle Mikrorisse in entsprechender Richtung geschlossen. Die zu P_A gehörende Deformationskomponente ist das "Gedächtnis" für den Druck im Gebirge in dieser Richtung. Mit den acht weiteren Druck-Deformationskurven läßt sich ein Rißdeformationstensor erstellen:

$$\underline{\epsilon}^R = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx}^R & \epsilon_{xy}^R & \epsilon_{xz}^R \\ \epsilon_{yx}^R & \epsilon_{yy}^R & \epsilon_{yz}^R \\ \epsilon_{zx}^R & \epsilon_{zy}^R & \epsilon_{zz}^R \end{bmatrix}$$

Mit der Annahme von Proportionalität zwischen Rißdeformationstensor und erzeugendem Spannungstensor erhält man:

$$\underline{\sigma}^* = A * \underline{\epsilon}^R$$

wobei:

$$A = \frac{D * g * Z}{\epsilon_{zz}^R}$$

- $\underline{\sigma}^*$ = effektive Spannung
- A = Auflastspannung
- D = mittlere Gesteinsdichte
- g = Erdbeschleunigung
- Z = Entnahmetiefe der Probe

CHARLEZ et al. (1986) argumentieren gegen diese Betrachtungsweise indem sie sagen, daß obige Beziehung nur von Wert ist, wenn es sich um einen isotropen Spannungszustand handelte, bevor das Gestein entlastet wurde und die Mikrorißbildung einsetzte. Unter diesen Voraussetzungen wäre aber die Mikrorißbildung in allen Richtungen gleich und es würde sich keine Anisotropie der Rißverteilung einstellen. Trotz dieser theoretischen Einwände benutzten die genannten Autoren, ebenso wie DEY & BROWN (1986), die dargestellten Beziehungen, um den Rißtensoren als Spannungstensor auszuwerten. Die Ergebnisse, die mit der DSA (DDA) Methode erzielt wurden, sind indes gut und an Lokationen, wo sie mit anderen Spannungsmeßmethoden zusammen eingesetzt wurde, z.B. dem hydraulic fracturing, sind die Daten im Rahmen der Meßgenauigkeiten identisch (CHARLEZ et al., 1986; DEY & BROWN, 1986). Hier kommt eine Parallelität zu den Bohrlochrandausbrüchen zutage. Man weiß, daß das Verfahren brauchbare Werte liefert, aber der Aus-

bruchsmechanismus läßt sich mathematisch nicht exakt beschreiben. Sicher ist, daß sich der Reißschließungsdruck, bei dem alle Mikrorisse geschlossen sind, nicht mit der maximalen tektonischen Spannung gleichsetzen läßt (CHARLEZ et al., 1986). Dies ist auch selbstverständlich wenn man die klassische Formel von SNEDDON zum Schließungsdruck von elliptischen Rissen betrachtet. Bisher liegen mit der DSA (DDA) keine Spannungsmessungen für Tiefen größer als 5000 m vor.

2.1 Zielsetzung der DDA in der KTB

Die KTB bietet eine fast einzigartige Möglichkeit, Spannungsmessungen in Tiefen größer 5000 m durchzuführen. Daher wollen wir die DDA-Technik nutzen, um in neue Tiefenbereiche für Spannungsmessungen vorzudringen. Eine weitere wichtige Frage, deren Lösung ansteht, ist das postulierte Scherspannungsmaximum in 5 - 10 km Teufe (RUMMEL, 1986). Wir hoffen, daß die DDA zu einer Klärung beitragen kann. Von gleicher Wichtigkeit scheint uns auch die Frage, was sich aus dem "Rißtensor" von Tiefengesteinen, die heute an der Erdoberfläche anstehen, über deren tektonischen Werdegang aussagen läßt. Erfahrungen aus diesem Bereich werden dann auch mit Sicherheit die Interpretation der tieferen Daten beeinflussen und eventuell die Interpretation bisheriger, flacher Spannungsmessungen.

Gefügeuntersuchungen der Proben mit Hilfe von Dünnschliffen und U-Tisch sollen die Raumlage der Mikrorisse erfassen. Rißform und Rißausbildung werden mit Polarisationsmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie studiert. Unter Hinzunahme der Probenpetrographie läßt sich dann vielleicht der Mechanismus, der der DDA zugrunde liegt, besser verstehen und die beeinflussenden Faktoren quantitativ erfassen.

3 VERSUCHSAUFBAU UND DURCHFÜHRUNG DER DDA AN KTB-GESTEINEN

Eine Versuchsanordnung zur DDA umfaßt folgende Komponenten:

1. Probenkörper mit applizierten DMS
2. Meß- und Registrierapparatur für DMS
3. Autoklav mit "Druckstandard" (Abb. 3)
4. Druckerzeugungseinheit und Druckmedium (Abb. 3)
5. Auswerteeinheit

Zu 1: Die Abmessungen des Probenkörpers sind nicht willkürlich wählbar. Ein zu großer Probenkörper bedingt einen großen Autoklaven und damit sehr hohe Kosten. Ein kleiner Probenkörper senkt die Kosten, aber ermöglicht nur die Applikation von sehr kurzen DMS, was die Messung auf sehr feinkörnige Gesteine beschränken würde. DMS mit Meßgitterlängen von 6 mm halten wir für einen guten Kompromiß. Wegen der besseren Applikation werden Dehnungsmeßbrosetten mit drei Meßgittern verwendet (HBM-

Typ: 6/120 RY 81) und keine Einzel-DMS. Aus der DMS-Trägerfläche und der der Lötstützpunkte ergibt sich eine Kantenlänge des Probenwürfels von 30 mm. Da ein Rißschließungsdruck gemessen werden soll, muß verhindert werden, daß Druckflüssigkeit in die Diskontinuitäten eindringt. Da aber auch 9 DMS appliziert sind und deren elektrischen Leitungen durch die Abdichtung geführt werden müssen, eignen sich Gummimanschetten oder Kupferumhüllungen nicht zum Schutz der Probe vor der Druckflüssigkeit. Als geeigneter Ersatz bieten sich Polyurethanlacke an (DEY & BROWN, 1986), z.B. Sylgard 186 (SIEGFRIED, 1977). Bevor die Proben versiegelt werden, muß sichergestellt sein, daß keine Feuchtigkeit mehr in der Probe ist. Dies soll durch Vakuumtrocknung erreicht werden. Dann werden die Proben mit Stickstoff entlüftet, um unerwünschte chemische Reaktionen zu verhindern. Der technische Kniff, um hohe Genauigkeiten bei den Deformationsmessungen zu bekommen, ist der, daß ein mit DMS applizierter "Druckstandard" gleichzeitig und im gleichen Autoklaven mit der Probe hydrostatisch belastet wird. So können experimentell bedingte Nichtlinearitäten und Fehler, wie oben beschrieben, minimiert werden. Der ideale Druckstandard zeigt eine lineare, isotrope Kompressibilität. PESELNICK et al. (1967) verwendeten Quarzglas (Optosil) als Standard. Besser geeignet scheint, nach Rücksprache mit dem Hersteller von Optosil (Heraeus-Hanau), Homosil zu sein, eine eigenspannungslose Varietät von Optosil.

Zu 2: Eine UPM 40 A (HBM) ist als Meßverstärker vorgesehen. Es handelt sich um einen selbstkalibrierenden 225 kHz-Meßverstärker mit Mikroprozessor, Drucker und V-24 Rechnerschnittstelle.

Zu 3: Der Durchmesser des Autoklaven (60 mm x 120 mm) ergibt sich aus der Probengröße und den Abmessungen des Druckstandards. Problematisch ist die Durchführung der elektrischen Leitungen. Insgesamt sind 21 Adern vorgesehen, die in einer Kombination von Vergiessen und Schraubabdichtung aus dem Autoklaven herausgeführt werden. Die Druckmessung erfolgt mit einem Aufnehmer auf DMS-Basis mit hoher Genauigkeit so daß auch der Innendruck mit der UPM 40 registriert werden kann.

Zu 4: Als Druckmedium wird eine elektrisch nichtleitende Hochdruckflüssigkeit verwendet. Gas als Druckmedium ist schlechter geeignet, da dann große Probleme bei der Abdichtung der Kabeldurchführungen zu erwarten wären. Die Druckerzeugung erfolgt in zwei Stufen. Bis zu ca. 200 MPa mit einer Handpumpe, darüber oder zur Feineinstellung, mit einer Spindelpresse.

Zu 5: Die von der UPM 40 gemessenen Werte werden via V-24 Schnittstelle auf einen PC übertragen, ausgewertet und graphisch ausgegeben. Berechnet werden Deformationstensor, Spannungstensor, ebene Hauptdeformationen auf den Würfel Flächen und die Volumendeformation. Den Spannungsberechnungen werden die in (2) dargelegten Beziehungen zugrunde gelegt.

Voraussetzung für die Interpretation von Meßdaten, die mit Hilfe der DDA gewonnen wurden, ist ein orientierter Bohrkern. Wir hoffen, daß möglichst bald eine Nachorientierung der Bohrkern mit Hilfe des Teviewers erfolgt.

U-Tisch-Messungen zur Raumlage der Mikrorisse sollen durchgeführt und Rißform und Rißausbildung mit Polarisationsmikroskop und Rasterelektronenmikroskop studiert werden. Unter Hinzunahme der genauen Probenpetrographie und der DDA-Daten werden wir versuchen, den Mechanismus, auf dem die DDA beruht, besser zu verstehen und die Einflüsse der verschiedenen Parameter (z.B. Rißlänge) quantitativ zu erfassen.

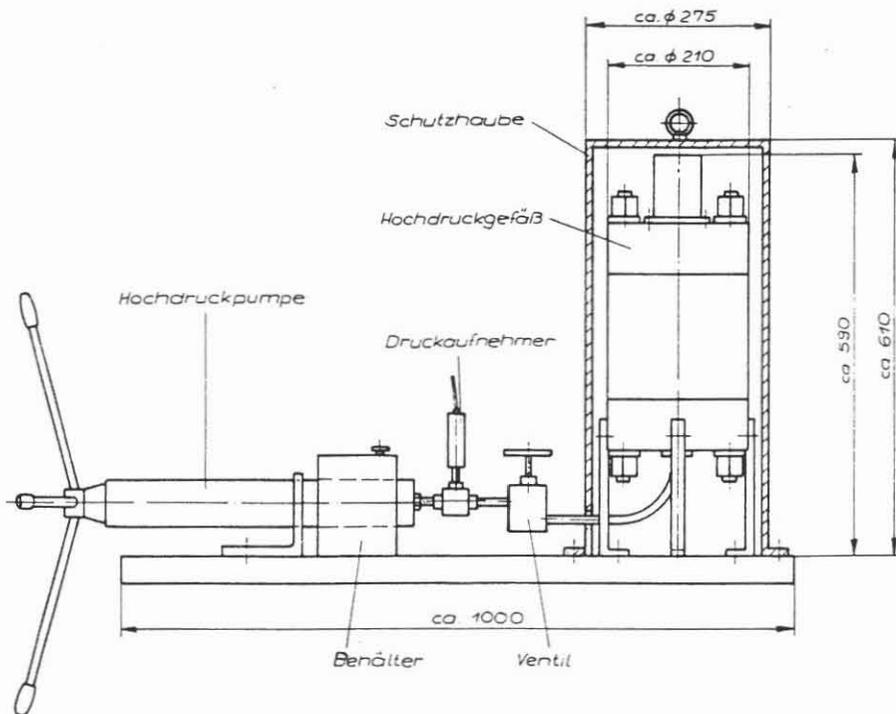


Abb. 3: Skizze des Hochdruckautoklaven mit Druckerzeugungseinheit

4 LITERATUR

- ADAMS, L.H. & WILLIAMSON, E.D. (1923): The compressibility of minerals and rocks at high pressures. - J. Franklin Inst., 195: 475-529.
- BERCKHEMER, AULBACH, BAUMANN, BÄUMLER & SOBIESAK (1985): Residual stress in drill cores. - In: 2nd Int. Symp. on Observation of the Continental Crust through Drilling, Seeheim 1985: 91.
- BIRCH, F. (1960): The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars - 1. - J. Geophys. Res., 65: 1083-1102.
- BIRCH, F. (1961): The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars - 2. - J. Geophys. Res., 66: 2199-2224.
- BLANTON, T.L. (1983): The relation between recovery deformation and in situ stress magnitudes. - In: Low permeability gas reservoirs, 1983, SPE/DOE 11624, Joint Symposium, Denver (Colorado), 1983: 213-218.
- BLÜMLING, P., FUCHS, K. & SCHNEIDER, T. (1983): Orientation of the stress field from breakouts in a crystalline well in a seismic active area. - Phys. Earth Planet. Inst., 33: 250-254.
- BRACE, W.F. (1965): Some new measurements of linear compressibility of rocks. - J. Geophys. Res., 70: 391-398.
- CHARLEZ, Ph., HAMAMDJIAN, C. & DESPAX, D. (1986): Is the microcracking of a rock a memory of its initial state of stress? - In: Proceedings of the Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm 1-3 Sept. 1986: 341-350.
- DEY, T.N. & BROWN, D.W. (1986): Stress measurements in a deep granitic rock mass using hydraulic fracturing and differential strain curve analysis. - In: Proceedings of the Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm 1-3 Sept. 1986: 351-357.
- HAIMSON, B.C. (1978): Crustal stresses in the Michigan Basin. - J. Geophys. Res., 83: 5857-5867.
- NATAU, O., LEMPP, Ch. & BORM, G. (1985): Stress relaxation monitoring by prestressed hard inclusions. - In: Proc. of the Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm 1-3-Sept. 1986: 509-514.
- PESELNICK, L., MEISTER, R. & WILSON, W.H. (1967): Pressure derivations of Elastic Moduli of fused quartz to 10 kb.- J. Phys. Chem. solids, 28: 635-639.

- REN, N.K & ROEGIERS, J.L. (1983): Differential strain curve analysis - a new method for determining the pre-existing in situ stress state of rock core measurements. - In: Proc. 5th Int. Conf. of the Int. Soc. of Rock Mechanics, Melbourne, Australia: F117-F127.
- RUMMEL, F. (1986): Stresses and tectonics of the upper continental crust - a review. - In: Proc. of the Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm 1-3-Sept. 1986: 177-196.
- SIEGFRIED, R.W. (1977): Differential Strain Analysis: Application to Shock induced Microfractures (Doctorate Dissertation), Massachusetts Institute of Technology.
- SIMMONS, G., SIEGFRIED, R.W. & FEVES, M. (1974): Differential strain analysis: A new method for examining cracks in rocks. - J. Geophys. Res., 79: 4383-4385.
- TEUFEL, L.W. (1983): Determination of in situ stress from anelastic strain recovery measurements of oriented core. - In: Low permeability gas reservoirs, 1983, SPE/DOE 11649, Joint Symp., Denver (Colorado), 1983: 421-430.
- WALSH, J.B. (1965): The effect of cracks on the compressibility of rock. - J. Geophys. Res., 70: 381-389.
- ZOBACK, M.D., MASTIN, L.G. & ANDERSON, R. (1985): Wellbore breakouts and in situ stress. - J. Geophys. Res., 90: 5523-5530.