

Spannungsmeßprinzip für den Einsatz
in tiefen Bohrlöchern auf der Basis des seitlichen
Überbohrens von Dehnungsmeßsensoren
an der Bohrlochwandung

R. Azzam

SPANNUNGSMEßPRINZIP FÜR DEN EINSATZ IN TIEFEN BOHR- LÖCHERN AUF DER BASIS DES SEITLICHEN ÜBERBOHRENS VON DEHNUNGSMEßSENSOREN AN DER BOHRLOCHWANDUNG

R. AZZAM, Aachen

Einleitung

Die durch die bautechnische Entwicklung in den letzten Jahren sich immer komplexer ergebenden Anforderungen im Hinblick auf Dimensionierung, Standsicherheit und Verbau von Felsbauwerken, die Einführung neuer numerischer Berechnungsverfahren in die Felsstatik sowie die weltweite Forschung auf dem Gebiet der Tiefbohrtechnik, machen die Anwendung neuer Untersuchungsmethoden und Meßverfahren zur genauen Bestimmung der für das mechanische Verhalten des Felses relevanten Parameter und die Ermittlung des in-situ-Spannungszustandes sowie dessen Einfluß auf die Felsstabilität erforderlich. Ein weiterer wichtiger Aspekt besteht darin, daß in-situ-Spannungsmessungen großen Anteil daran haben, die Erfassung des geodynamischen Geschehens und somit ein besseres Verständnis über tektonische Vorgänge in der Erdkruste zu ermöglichen.

Spannungen im Fels können durch unterschiedliche Methoden erfaßt werden. Das für die Ingenieurwissenschaften wesentliche Untersuchungsprinzip beruht auf der in-situ Messung

Dr. R. Azzam, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH Aachen, Lochnerstr. 4 - 20, 5100 Aachen

der Verformung des Gesteins nach Spannungsentlastung. Dieses Meßprinzip wird z. B. beim bekannten Überbohrverfahren angewandt. Die durch das Überbohren und die Entlastung erzeugte Verformung des Gesteins wird durch eingeklebte Zellen, die mit DMS bestückt sind, ermittelt.

Die lokale Dehnung, wie sie durch DMS über einer verhältnismäßig kurzen Basislänge gemessen wird, ist von der Heterogenität und der Anisotropie des Gesteins stark abhängig. Daher liefern solche Messungen im Fels streuende Ergebnisse. Weitere Ungenauigkeiten der Messungen werden durch das Vorhandensein von Diskontinuitäten und ein nicht lineares Spannungs-Formänderungs-Verhalten verursacht. Diese Faktoren, die die Versuchsergebnisse direkt beeinflussen, sind statistisch verteilt. Daher hängt die Qualität der ermittelten Ergebnisse nicht nur von der Genauigkeit der Meßmethode, sondern auch von Anzahl und Streuung der Meßwerte ab. Da das deterministische Konzept der Mittelwertbildung von Meßwerten nicht mehr die wachsenden Ansprüche an die Qualität der Daten erfüllen kann, besteht ein dringendes Bedürfnis, neue rationelle und präzise Meßmethoden zu entwickeln und genauere Konzepte der Datenauswertung anzuwenden.

Die Komplexität und die hohen Kosten des Überbohrverfahrens sowie die o.g. Gründe machen die Entwicklung und in-situ Erprobung neuartiger Spannungsmesstechniken erforderlich. Eine neue kostengünstige und verhältnismäßig einfache Methode, die an existierenden Bohrlöchern bis zu größeren Tiefen anwendbar ist, wurde vom Verfasser im Rahmen einer Forschungsförderung der Deutschen Forschungs-Gemeinschaft unter Hilfeleistung der "Department of Civil and Systems-Engineering-James-Cook-University, Townsville, Australien" entwickelt und zum Teil erprobt. Mit Hilfe dieses Verfahrens können Spannungen dreidimensional in kurzer Zeit ermittelt werden. Die in diesem Zusammenhang entwickelte Meßsonde besitzt gegenüber existierenden Techniken folgende Vorteile:

- * Wiedergewinnbarkeit und daher kontinuierliche Testoperation,
- * preisgünstig und in vorhandenen Bohrlöchern einsetzbar,
- * schnelle Testoperation und daher viele Messungen über kurze Bohrlochentfernungen in relativ kurzer Zeit,
- * einsetzbar bis zu einer relativ großen Tiefe.

Die Fülle der erhaltenen Meßdaten erlaubt eine statistische Auswertung sowie die Ermittlung der Spannungsverteilung in Abhängigkeit von der Tiefe. Dieser Beitrag soll eine allgemeine und komprimierte Übersicht über die neuartige Spannungsmeßtechnik geben.

Spannungsmeßmethode, Modus Operandi

Da Spannungen im Untergrund nicht direkt gemessen werden können, ist man darauf angewiesen, den Spannungszustand mit Hilfe der durch die Spannungsentlastung verursachten Verformung zu ermitteln. Basierend auf diesem Meßprinzip operieren die wichtigsten auf dem Markt erhältlichen Zellen. Diese sind:

- Doorstopper-Zelle
- Südafrikanische-Dreiaxiale
- Modifizierte CSIRO-Australische Dreiaxiale

Die Verformung bzw. Oberflächendehnung wird mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen (DMS) ermittelt. Da Dehnungsmeßstreifen empfindliche Elemente sind, die nur unter idealen Bedingungen einsetzbar sind, wurden sie bei den o.g. Zellen für den in-situ-Einsatz modifiziert, d. h. mit einer Kunststoffschicht überzogen oder in Acrylplastik eingebettet. Um einen intakten Kontakt der Zellen mit der Bohrlochwandung zu ga-

rantieren, werden solche Zellen mit Kunstharz eingeklebt. Die Spannungsentlastung wird durch das von der Oberfläche aus erfolgte Überbohren erzielt, wodurch das Verfahren komplex und teuer wird.

Die vom Verfasser neu entwickelte und in diesem Beitrag beschriebene Spannungsmessmethode beruht dagegen auf dem Einsatz von wiedergewinnbaren Dehnungsmesssensoren, die speziell für diesen Zweck entwickelt wurden (AZZAM, R. & BOCK, H. (1987) und AZZAM, R. & YUEN, S. (1988)). Um das Überbohren von der Oberfläche aus zu umgehen, wurde ein neues Konzept der Spannungsentlastung erarbeitet.

Das neue Konzept beruht darauf, daß in einem existierenden Bohrloch ein Dehnungsmesssensor gegen die Bohrlochwandung gepreßt und unter Druck gehalten wird, während eine Bohrkronen, die radial und außenseitig angetrieben wird, den Sensor überbohrt. Die Bohrlochwandung wird lokal spannungsentlastet, wobei die dadurch erzeugte Dehnung vom Sensor ermittelt werden kann (Abb. 1). Da es für das Problem der Spannungsverteilung um ein Bohrloch im Hinblick auf Richtung und Größe der Hauptspannung eine mathematische Exaktlösung (LEEMAN, 1968) gibt, läßt sich die isotrope 3-D-Verformungsmatrix aus insgesamt 6 einzelnen linearen oder 3 planaren Dehnungsmessungen an der Bohrlochwandung nach der Spannungsentlastung erstellen. Für die Leeman-Lösung werden mindestens 3 unabhängige tangentiale Dehnungsmessungen ($\epsilon_{\theta\theta}$), eine Messung in der axialen Richtung (ϵ_{zz}) und zwei in Richtung 45° dazu ($\epsilon_{\theta z}$) benötigt.

Der 3-D-Spannungszustand läßt sich mit Hilfe dieser Matrix und unter Zugrundelegung eines mittleren E-Moduls errechnen. Abb. 2 zeigt eine schematische Abbildung des neuentwickelten und des konventionellen Meßprinzips im Vergleich. Das neue Konzept eignet sich für den Einsatz in jedem vorhandenen Bohrloch und überwindet somit die Schwierigkeiten, die im

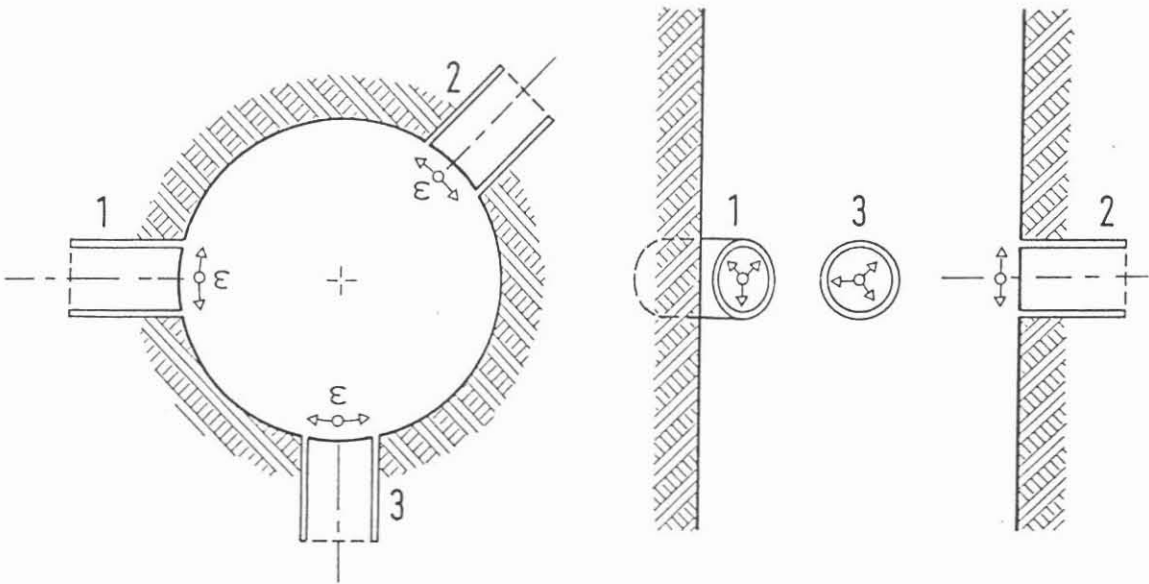


Abb. 1: Prinzipskizze der Spannungsentlastung der Bohrlochwandung

Zusammenhang mit dem konventionellen Überbohrverfahren von der Oberfläche aus existieren.

Um die Vorteile der neuen Methode vor Augen zu führen, ist ein Vergleich dieser Methode mit den z. Z. existierenden Verfahren in Tab. 1 zusammengestellt.

Eine technische Realisierung des vorgestellten Meßkonzeptes läßt sich durch die Kombination des neuentwickelten planaren Sensors und geeignete Bohrwerkzeuge zur seitlichen und radialen Überbohrung und somit Spannungsentlastung erreichen. Folglich besteht die neu konstruierte und auf dem beschriebenen Konzept basierende Sonde aus zwei Hauptkomponenten:

- Ein planarer Sensor zur Dehnungsmessung der Bohrlochwandung,
- eine radiale Überbohrvorrichtung zur Spannungsentlastung.

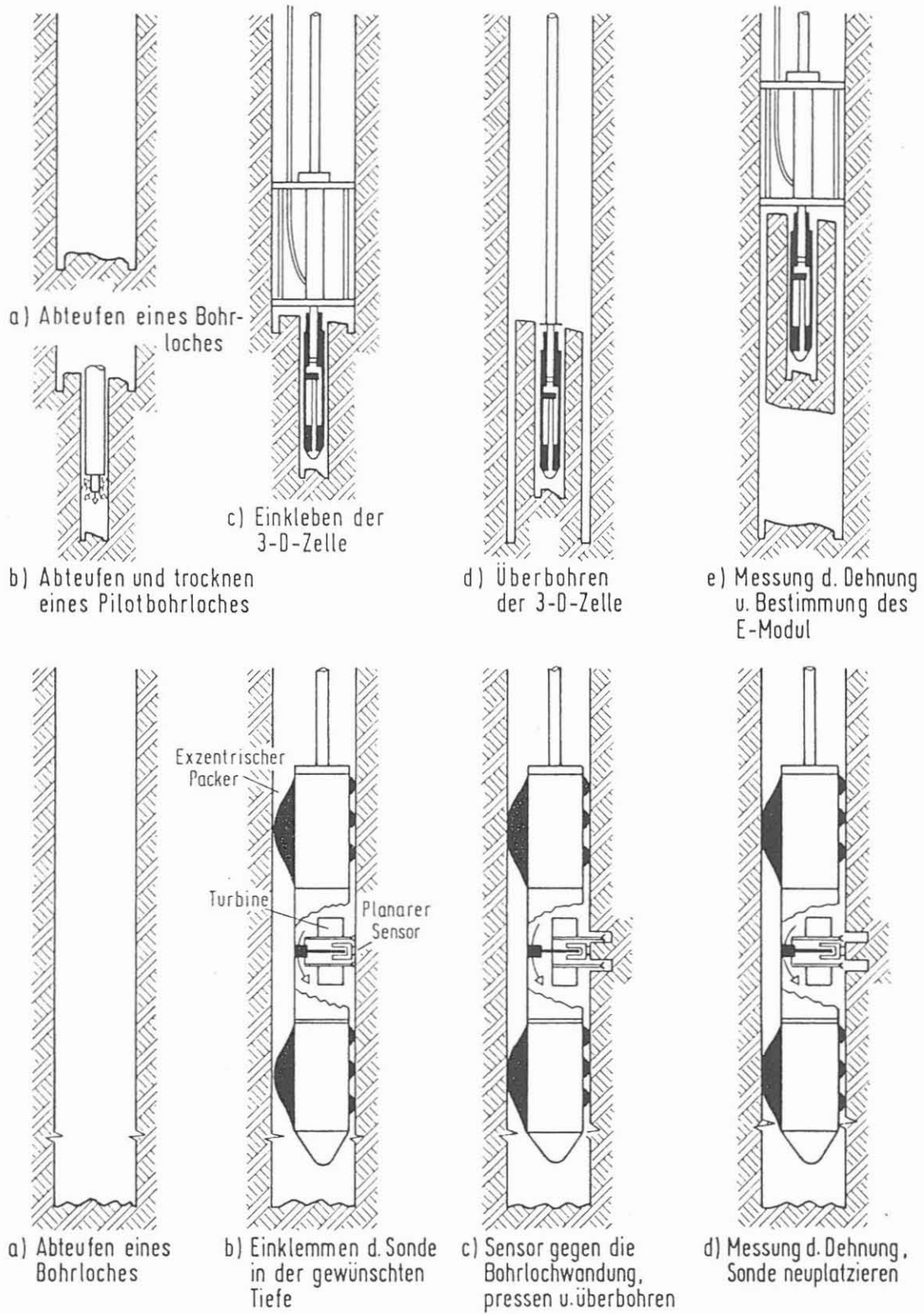


Abb. 2: Schematische Darstellung des konventionellen und des neu entwickelten Meßprinzips

3-D Spannungsmeßsonde - (Autor)	Operationsprinzip		Anmerkungen
	Verformungsmeßsensor	Spannungsentlastungstechnik	
CSIR (Leeman, 1971) LNEC (Rocha et al. 1974) CSIRO (Worotnicki & Wolten 1976)	Zylindrische Zelle (massiv oder hohl) bestückt mit DMS (an der Oberfläche oder eingebettet).	Die Zelle wird in ein Pilotbohrloch, das von der Oberfläche aus abgeteuft ist, eingeklebt und axial auch von der Oberfläche aus überbohrt.	Keine wiedergewinnbare Zelle; die Einbringung und Überbohrung der Zelle geschieht von der Oberfläche mit Hilfe von externen Bohrmaschinen, daher zeitraubend und teuer; erhältlich auf dem Markt.
CALTEC (Bass et al. 1986)	Laser interferometrie der Bohrlochwandung	Ein kleines Entlastungsbohrloch wird in radialer Richtung an der Bohrlochwandung abgetauft.	Im experimentellen Stadium; genaue Aussage über die Größe der Hauptspannung noch nicht möglich.
Neue 3-D Spannungsmeßsonde	Wiedergewinnbarer planarer Sensor zur Messung der Dehnung an der Bohrlochwandung.	Radiale Überbohrung des Dehnungsmeßsensors und der Bohrlochwandung.	Selbstständige Operation; wiedergewinnbar; einsetzbar in existierenden Bohrlöchern; genaue, schnelle und ökonomische Operation.

Tab. 1: Spannungsmeßmethoden im Vergleich

Weitere Komponenten, die die Funktion der Sonde ergänzen, sind:

- Ein Positionierungssystem zur Fixierung der Sonde in der gewünschten Tiefe und Position im Bohrloch. Dieses System erlaubt eine exzentrische Positionierung im Bohrloch, so daß der Sensor und die Überbohrkrone unabhängig vom Bohrl Lochdurchmesser immer den gleichen Abstand von der Bohrl Lochwandung haben.
- Ein Hydrauliksystem mit Zylindern zur Pressung des Sensors gegen die Wandung und zum Vortrieb der Überbohrkrone.
- Ein Pneumatik- oder Hydrauliksystem zum außenseitigen Antreiben der Krone.
- Eine Digitalkompaß/Gamma Ray zur Messung der Orientierung und Tiefenposition der Sonde.

Abb. 3a und b zeigen die Darstellungen möglicher Konstruktionen der Sonde, bei denen die Anordnung der einzelnen Komponente sichtbar ist. Die Konstruktion (a) ist für den Einsatz in flachen Bohrlöchern entworfen, wobei (b) sich, als eine von vielen Möglichkeiten der technischen Realisierung des vorgestellten Meßkonzepts, für den Einsatz in Bohrlöchern bis zu einer Tiefe von etwa 4000-5000 m eignet.

Wiedergewinnbarer Dehnungsmeßsensor

Messungen von Oberflächendehnungen im Fels sind wegen der ungünstigen Feldbedingungen und der Empfindlichkeit der Meßmethode mit Schwierigkeiten behaftet. Dehnungsmeßstreifen eignen sich nicht zum direkten Einsatz und werden daher entweder mit einer Kunstharzschicht überzogen (LEEMAN, 1971, DE LA CRUZ, 1978) oder in Plastik eingebettet (WOROTNICKI & WALTON, 1976).

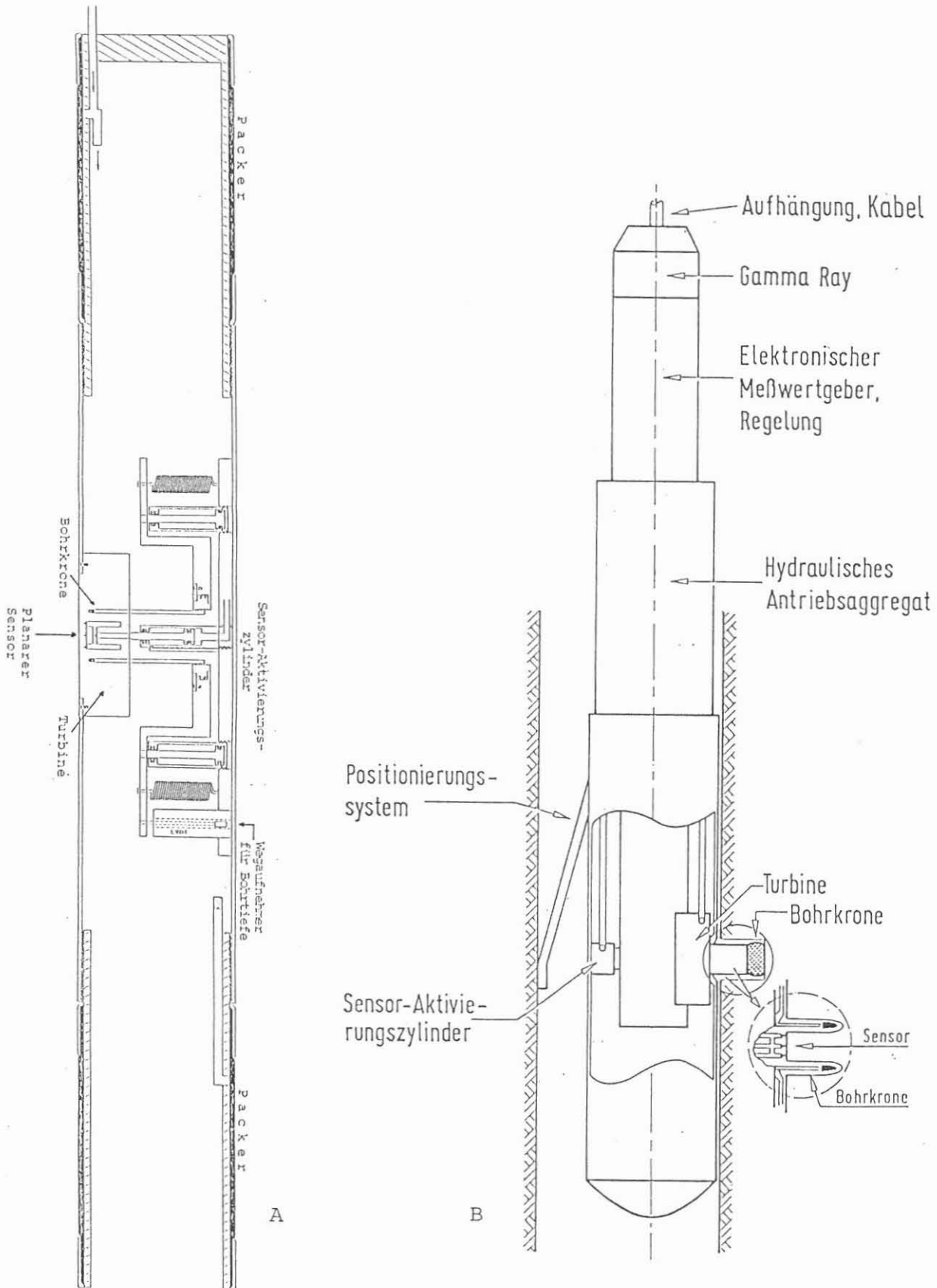


Abb. 3: Darstellung möglicher Konstruktionen der Spannungsmeßsonde

Andere Dehnungsmeßverfahren, bei denen die Oberflächendehnung durch Stahlpinnen, die in die Felsoberfläche gepreßt werden, auf die eigentliche Meßstelle übertragen wird, wurden von vielen Autoren vorgestellt (DRYSELIUS, 1965; BONNECHERE et al, 1977; LEAHY, 1974 und 1986; BOCK et al, 1984). Die Hauptprobleme der bisher vorgestellten Dehnungsmeßsensoren sind die Empfindlichkeit und Stabilität des Meßsignals.

Diese Schwierigkeiten wurden bei der Entwicklung eines geeigneten Typen für die allgemeinen Dehnungsmessungen im Fels berücksichtigt und beseitigt (AZZAM & YUEN, 1987). Ausgehend vom linearen Dehnungsmeßsensor, wurde ein planarer Dehnungsmeßsensor speziell für die Spannungsmessung entwickelt. Der planare Sensor (Abb. 4) liefert drei lineare Meßwerte, wodurch der planare Dehnungszustand bestimmt werden kann.

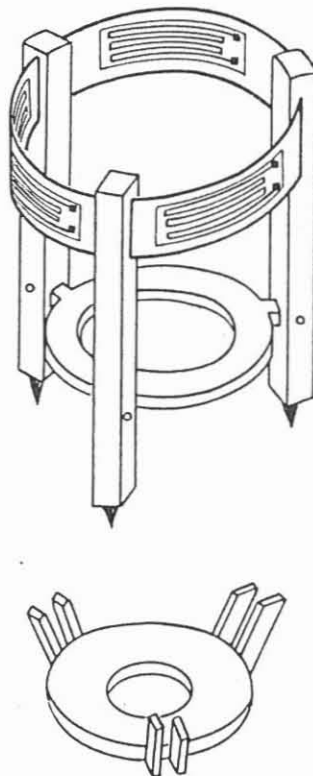


Abb. 4: Der planare Dehnungsmeßsensor

Kalibrationsversuche des planaren Sensors an einem Biegebalken mit konstantem Biegemoment zeigten, daß der Sensor den planaren Dehnungszustand mit einer Fehlerquote der Versuchsergebnisse von unter 1 % genau anzeigt. Die dabei erzielte Empfindlichkeit liegt bei etwa 1 bis 2 $\mu V/\mu\epsilon$. Abb. 5 zeigt die Kalibrationsversuche an einem Biegebalken. Die experimentell ermittelten Meßwerte stimmen mit der theoretischen Verteilung der Dehnung in Abhängigkeit von den Orientierungswinkeln überein.

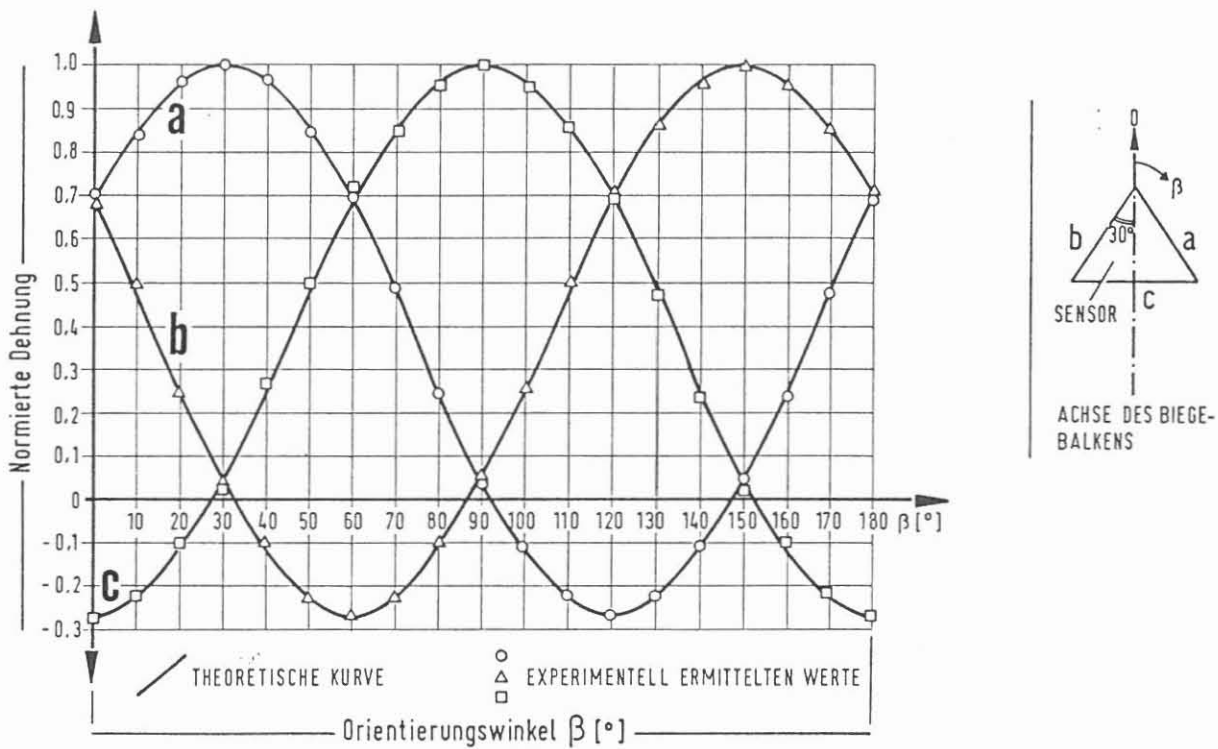


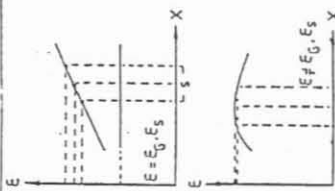
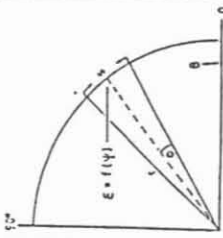
Abb. 5: Kalibrationsversuche an einem Biegebalken

Um die insgesamt resultierende Fehlerquote bei dem Einsatz des Sensors in der beschriebenen Spannungsmeßmethode abschätzen zu können, wurde die Oberflächendehnung theoretisch und allgemein untersucht. Da die Dehnungsmessung auf der Integration der Punktdehnung über einer bestimmten Basis-

länge basiert, können Dehnungsmessungen an verschiedenen Oberflächengeometrien und/oder in variablen Dehnungsfeldern mit Fehlern behaftet sein. Wie hoch die Fehlerquote sein kann, läßt sich anhand von Tab. 2 von Fall zu Fall errechnen. Für den Fall der tangentialen Dehnungsmessung der Bohrlochwandung wird die Fehlerquote aus der Oberflächengeometrie mit einem Fehler resultierend aus der nicht linearen Dehnungsverteilung überlagert. In einem Bohrloch mit 100 mm Durchmesser beträgt die Fehlerquote z. B. für eine Basislänge von 10 mm etwa 0.34 %. Viel höher liegt der Fehler, der durch die nichtlineare Dehnungsverteilung verursacht wird. Unter den gleichen Bedingungen beträgt die Fehlerquote etwa 2 %. Dies gilt nur für die tangentialen Dehnungsmessungen. Zum Vergleich liegt die Fehlerquote der Soft-inclusion-cell (Bohrloch = 38 mm, DMS-Länge = 10 mm) mit über 8 % viel höher. Im Berechnungsverfahren des Spannungszustandes kann dieser Fehler, der sich nur in der tangentialen Richtung ergibt, durch Iteration minimiert werden.

Ausblick

Das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept der Spannungsmessung besitzt entscheidende Vorteile gegenüber existierender Methoden. Die Möglichkeit des Einsatzes in vorhandenen Bohrlöchern, die Wiedergewinnbarkeit und die Schnelligkeit sowie die Kontinuität der Operation machen diese Methode außerordentlich interessant. Sie ist dadurch ekonomisch und erlaubt somit eine statistische Auswertung der Meßergebnisse sowie die Ermittlung des Spannungszustandes in Abhängigkeit von der Tiefe. Das Konzept läßt sich auf einfache Weise technisch realisieren, da die radiale Überbohrvorrichtung von existierenden Systemen übernommen werden kann. Die Methode des "side wall coring" wird z. B. seit geraumer Zeit bei der Erdölexploration in tiefen Bohrlöchern bis 5000 m Tiefe mit Erfolg eingesetzt. Dabei wird eine Kernbohrung lateral in die Bohrlochwandung niedergebracht, um Kernproben

Planare Oberfläche						
Dehnungsfeld	Mathematische Funktion wahre Dehnung ϵ	Dehnung gemessen mit DNS ϵ_G	Dehnung gemessen mit dem Sensor ϵ_S	Fehler relativ zur DNS-Messung e_r	wahrer Fehler e	Bemerkungen
Konstant	$\epsilon = \text{Konstant}$ $= c$	$\epsilon_G = \int_d^{d+s} \epsilon dx / s$ $= c$	$\epsilon_S = \int_d^{d+s} \epsilon dx / s$ $= c$	$e_r = 0.00$	$e = 0.00$	$a, b = \text{Konstanten}$ $d = \text{arbiträre Konstante}$ $s = \text{Baseslänge}$
Linear	$\epsilon = ax + b$	$\epsilon_G = \int_d^{d+s} (ax+b) dx / s$ $= ad + \frac{as}{2} + b$	$\epsilon_S = \int_d^{d+s} (ax+b) dx / s$ $= ad + \frac{as}{2} + b$	$e_r = 0.00$	$e = 0.00$	
Variabel	$\epsilon = f(x)$	$\epsilon_G = \int_d^{d+s} f(x) dx / s$ $F = \int f dx$ $\epsilon_G = \frac{F(d+s) - F(d)}{s}$	$\epsilon_S = \int_d^{d+s} f(x) dx / s$ $F = \int f dx$ $\epsilon_S = \frac{F(d+s) - F(d)}{s}$	$e_r = 0.00$	$e = \epsilon - \epsilon_S$ $= f(d + \frac{s}{2}) - F(d+s) + F(d)$ (absolut)	$\theta = \text{arbiträre Konstante}$ $r = \text{Radius der gekrümmten Oberfläche}$ $\phi = \text{Halbwinkel des durch die Baseslänge festgelegten Bogens}$
Gekrümmte Oberfläche						
Konstant	$\epsilon = \text{Konstant}$ $= c$	$\epsilon_G = \int_{\theta-\phi}^{\theta+\phi} \epsilon r d\psi / 2r\phi$ $= c$	$\epsilon_S = \frac{\cos\phi \int_{\theta-\phi}^{\theta+\phi} \epsilon r d\psi}{2r \sin\phi}$ $= c \cot\phi$	$e_r = 1 - \phi \cot\phi$ (prozentual)	$e = 1 - \phi \cot\phi$ (prozentual)	
Variabel	$\epsilon = f(\psi)$	$\epsilon_G = \int_{\theta-\phi}^{\theta+\phi} f(\psi) r d\psi / 2r\phi$ $F = \int f r d\psi$ $\epsilon_G = \frac{F(\theta+\phi) - F(\theta-\phi)}{2r\phi}$	$\epsilon_S = \frac{\cos\phi \int_{\theta-\phi}^{\theta+\phi} f(\psi) r d\psi}{2r \sin\phi}$ $\epsilon_S = c \phi \cot\phi$	$e_r = 1 - \phi \cot\phi$	$e = \epsilon - \epsilon_S$ $= f(\theta) - \epsilon_S$ $= f(\theta) - \frac{F(\theta+\phi) - F(\theta-\phi)}{2r \tan\phi}$ (absolut)	

Tab. 2: Mathematische Funktionen der Dehnungen in verschiedenen Dehnungsfeldern (Azzam & Yuen)

zu entnehmen. Diese Technik läßt sich ohne Einschränkung bei dem beschriebenen Konzept zur Spannungsentlastung verwenden. Durch die Kombination dieser Technik mit dem planaren Sensor, der für ungünstige Operationsbedingungen, wie hohe Temperaturen bis 250° C und statische Drücke konzipiert ist, läßt sich eine Spannungsmeßsonde herstellen, mit deren Hilfe präzise und ekonomische Messungen in Bohrlöchern in Tiefen bis etwa 5000 m durchgeführt werden können.

In solcher Tiefe herrschen im Normalfall Temperaturen um etwa 150° C und hydrostatische Drücke um etwa 50 MPa. die Überbohrvorrichtung und der elektronische Meßwertverstärker sind unter Temperaturen bis max. 150° C einsetzbar, sodaß zunächst davon ausgegangen werden muß, daß die Tiefe von 5000 m eine physikalische Grenze darstellt. Es ist jedoch nicht auszuschließen, daß die existierende Überbohrvorrichtung für höhere Einsatztemperaturen modifiziert werden kann. In diesem Fall läßt sich auf die elektronische Signalverstärkung verzichten. Mit Hilfe eines symmetrisch verdrillten Kabels lassen sich analoge Signale kleiner Amplitude mehr als 5 km mit einem geringen Rauschpegel übertragen. Die Gesamtauflösung des Signals würde sich zwar verschlechtern, bleibt jedoch in einem vertretbaren Rahmen. Es ist jedoch davon auszugehen, daß der Zustand der Bohrlochwandung sich mit der Tiefe hin verschlechtert. Plastische Verformungen der Wandung beeinträchtigen zwar die genaue Ermittlung der Hauptspannungsamplituden, die Richtung der Hauptspannungen bleibt jedoch als wertvolle Information erhalten.

Zusammenfassung

In-situ Spannungsmessungen sind von großer und immer noch zunehmender Bedeutung für die Geo- und Ingenieurwissenschaften. Ein wichtiger Aspekt besteht darin, daß sie großen Anteil daran haben, die Erfassung des geodynamischen Geschehens zu ermöglichen. Spannungen im Fels können durch unterschiedliche Methoden ermittelt werden. Das wesentliche Untersuchungsprinzip beruht auf der Messung der Verformung des Gesteins nach Spannungsentlastung. Die Verformung wird im allgemeinen durch eingeklebte Zellen erfaßt, die überbohrt und somit spannungsentlastet werden.

Im Rahmen dieses Beitrages wird über eine neue Spannungsmeßmethode berichtet, die in existierende Bohrlöcher einsetzbar ist. Diese Methode hat sowohl theoretische als auch ökonomische Vorteile gegenüber existierender Methoden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß Spannungsmessungen bis zu einer großen Tiefe durchgeführt werden können.

Literatur:

- AZZAM, R. and BOCK, H. (1987): A new modified borehole jack for stiff rock. Rock Mech. Rock Eng. 20, 191 - 211
- AZZAM, R. and BOCK, H. (1987): Recoverable sensor for measurement of tangential strain at borehole walls - A key component in some innovative borehole instrumentation. Proceed. 2nd Int. Sympos. Field Meas. in Geomech., Kobe, 1987
- AZZAM, R. and OTTO, B. (1987): Variation in the Young's modulus of rock as determined by new laboratory and in-situ testing method. Proceed. 2nd. Int. Sympos. Field Meas. in Geomech., Kobe, 1987
- AZZAM, R. (1988): Wiedergewinnbare Sensoren zur Messung tangentialer Dehnungen an Bohrlochwandungen - Abschlußbericht der Deutschen Forschungsgemeinschaft (unveröff.)
- AZZAM, R. & YUEN, S. (1987): The Theory of the recoverable linear strain sensor and its application in geomechanics. Rock Mech. Rock Eng. (inprint)
- BOCK, H., FORURIA, V. and LEQUERICA, R. (1984): A new stress relief concept for in-situ stress measurements in rock and its implementation in two recoverable stressmeters. Proceed. 4th ANZ Conf. on Geomech., Perth, Vol. 2: 498 - 508, Barton: Inst. Eng., Australia
- BONNECHERE, F. J. and CORNER, F. H.: In-situ stress measurements with a borehole deformation cell. Proceed. Int. Sympos. on Field Measurements in Rock Mech., Zurich, 4 - 6, April 1977, VI, p. 151 - 159

DE LA CRUZ, R. V. (1978): Modified borehole jack method for elastic property determination in rocks. Rock Mech. 3: 25 - 50

DRYSELIUS, G. (1965): Design of a measuring cell for the study of rock pressure (in Swedish). IVA Meddelande, 142: 135 - 144

LEAHY, T. F. (1974): A reusable biaxial transducer. Experim. Mech. 14: 111 - 118

LEAHY, E. R. (1986): The theory of the star element strain transducer. Inst. Eng., Australia, Queensland Div. Techn. Pap. 27, No. 12: 10 - 15

LEEMAN, E. R. (1971): The CSIRO "DOORSTOPPER" and triaxial rock stress measuring instruments. Rock. Mech. 3: 25 - 50

WOROTNICKI, G. and WALTON, R. J. (1976): Triaxial "Hollow inclusion" gauges for determination of rock stresses in-situ. Proceed. ISRM Sympos. Investigation Stresses in Rock, Sydney, p. 1 - 8