

# Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

## Verfahrensunterlage

**Titel:** ERA Morsleben  
Gebirgsspannungsuntersuchungen im Grubengebäude Bartensleben  
Abschlussbericht

**Autor:** Heusermann, S., Hanisch, J., Sprado, K.H., Kunz, H., Hoppe, F.J. & Küchemann, W.

**Erscheinungsjahr:** 2000

**Unterlagen-Nr.:** P 097

**Revision:** 00

**Unterlagenteil:**



<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
<b>Verkürzte Zusammenfassung</b>	4
<b>1 Vorgang</b>	5
<b>2 Ziel der Untersuchungen und Auswahl der Lokationen für Gebirgsspannungsmessungen</b>	5
<b>3 Ingenieurgeologische Untersuchungsmethodik</b>	7
<b>4 Geotechnische Untersuchungsmethoden</b>	7
4.1 Spannungsmessungen nach der BGR-Überbohrmethode	7
4.1.1 Messmethodik und Messgeräte	7
4.1.2 Kriterien für die Bewertung der Versuchsqualität	8
4.1.3 Auswertung von Überbohrversuchen	9
4.2 Spannungsmessungen nach der Hydrofrac-Methode	12
4.3 Dilatometermessungen	14
4.3.1 Messmethodik und Messgeräte	14
4.3.2 Auswertung von Dilatometermessungen	15
4.4 Begleitende Laborversuche	15
4.4.1 Laborversuchseinrichtung	15
4.4.2 Auswertung von Biaxialversuchen an Hohlkernen	16
<b>5 Darstellung der Untersuchungsergebnisse</b>	17
5.1 Lokation 1 (Bohrbereich 3.05)	17
5.1.1 Ingenieurgeologische Untersuchungsergebnisse	17
5.1.2 Ergebnisse der Spannungsmessungen	18
5.1.3 Ergebnisse der Laborversuche	20
5.2 Lokation 2 (Bohrbereich 3.07)	21
5.2.1 Ingenieurgeologische Untersuchungsergebnisse	22
5.2.2 Ergebnisse der Spannungsmessungen	22
5.2.3 Ergebnisse der Dilatometermessungen	24
5.2.4 Ergebnisse der Laborversuche	24
5.3 Lokation 3 (Bohrbereich 3.02)	25
5.3.1 Ingenieurgeologische Untersuchungsergebnisse	26
5.3.2 Ergebnisse der Spannungsmessungen	26
5.3.3 Ergebnisse der Dilatometermessungen	28
5.3.4 Ergebnisse der Laborversuche	29

5.4	Lokation 4 (Bohrbereich 3.04)	29
5.4.1	Ingenieurgeologische Untersuchungsergebnisse	30
5.4.2	Ergebnisse der Spannungsmessungen	32
5.4.3	Ergebnisse der Dilatometermessungen	34
5.4.4	Ergebnisse der Laborversuche	35
5.5	Lokation 5 (Bohrbereich 3.06)	36
5.5.1	Ingenieurgeologische Untersuchungsergebnisse	36
5.5.2	Ergebnisse der Spannungsmessungen	37
5.5.3	Ergebnisse der Dilatometermessungen	40
5.5.4	Ergebnisse der Laborversuche	40
5.6	Lokation 6 (Zentralbereich Bartensleben)	41
5.6.1	Ingenieurgeologische Untersuchungsergebnisse	41
5.6.2	Ergebnisse der Spannungsmessungen	42
5.6.3	Ergebnisse der Laborversuche	43
<b>6</b>	<b>Bewertung der Spannungsmessungen</b>	<b>44</b>
6.1	Lokation 1 (Bohrbereich 3.05)	44
6.2	Lokation 2 (Bohrbereich 3.07)	45
6.3	Lokation 3 (Bohrbereich 3.02)	46
6.4	Lokation 4 (Bohrbereich 3.04)	47
6.5	Lokation 5 (Bohrbereich 3.06)	49
6.6	Lokation 6 (Zentralbereich Bartensleben)	51
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>52</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>55</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>56</b>
	<b>Anlagenverzeichnis</b>	<b>57</b>
	<b>Anlagen</b>	
	Gesamtblattzahl (einschließlich Anlagen):	166

## Verkürzte Zusammenfassung

- Autoren: Dr. Stefan Heusermann, Dr. Jörg Hanisch, Karl-Heinz Sprado,  
Herbert Kunz, Franz-Josef Hoppe, Wolfgang Küchemann
- Titel: ERA Morsleben - Gebirgsspannungsuntersuchungen im Grubengebäude  
Bartensleben
- Stichwörter: Gebirgsspannungen, Geomechanik, Hydrofrac-Methode, Morsleben,  
Spannungsmessungen, Überbohrmethode

Im ERA Morsleben, Schachtanlage Bartensleben, wurden in insgesamt sechs über das Grubengebäude verteilten Lokationen In-situ-Messungen nach verschiedenen Methoden zur Ermittlung des Spannungszustandes im unverritzten Gebirge durchgeführt. Zur Auswertung und Interpretation dieser Messungen erfolgten begleitend ingenieurgeologische Bohrkernaufnahmen, Dilatometerversuche zur Ermittlung der Gebirgssteifigkeit und felsmechanische Laborversuche zur Ermittlung der Gesteinssteifigkeit.

Im Steinsalzgebirge ergeben sich vorwiegend annähernd isotrope Spannungszustände, deren Beträge etwa dem lithostatischen Gebirgsdruck entsprechen. In einigen Fällen zeigt sich jedoch, dass die im Steinsalz gemessenen Spannungen deutlich geringer als der lithostatische Gebirgsdruck sind. Dies wird auf den Einfluss benachbarter Abbaue oder Abbaufelder zurückgeführt und wird durch die Ergebnisse großräumiger Modellberechnungen in der Tendenz bestätigt.

Im Hauptanhydrit belegen die messtechnischen Befunde, dass die Spannungszustände in den untersuchten Anhydritschollen deutlich vom lithostatischen Gebirgsdruck abweichen können und dass sie auch untereinander unterschiedlich sind. Insbesondere im westlich des Zentralbereichs anstehenden Hauptanhydrit zeigen sich beträchtlich hohe Spannungen und Spannungsanisotropien, deren Beträge und Orientierung gut mit Ergebnissen großräumiger Modellberechnungen übereinstimmen.

Die Ergebnisse der Spannungsmessungen sind geeignet, die in den bisherigen geomechanischen Modellberechnungen zum ERA Morsleben angenommenen Ausgangsspannungszustände zu bestätigen.

## 1 Vorgang

Der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) wurde vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) die Aufgabe übertragen, im Grubengebäude des Endlagers für radioaktive Abfälle (ERA) Morsleben, Schachanlage Bartensleben, Untersuchungen zum Gebirgsspannungszustand durchzuführen. Der vorliegende Abschlussbericht beschreibt die an insgesamt sechs Lokationen erzielten Ergebnisse von Kurzzeitspannungsmessungen zur Ermittlung von Gebirgsspannungen.

## 2 Ziel der Untersuchungen

Im Zuge des Erkundungs- und Beweissicherungsprogramms zum ERA Morsleben sind Untersuchungen zum Gebirgsspannungszustand und zum Gebirgsdeformationsverhalten im Salinar und im Anhydrit durchzuführen. Im einzelnen sind Größe und ggf. Richtung der Gebirgsspannungen zu ermitteln, um den Spannungszustand und damit auch den Beanspruchungszustand des Gebirges im Bereich des Grubengebäudes zu charakterisieren und um Daten aus In-situ-Messungen für numerische Sicherheitsanalysen bereitzustellen.

Für die In-situ-Messungen wurden folgende über das Grubengebäude der Schachanlage Bartensleben verteilte Lokationen ausgewählt (Anlage 2.1<sup>(\*)</sup>):

- Lokation 1 (Bohrbereich 3.05) auf der 4. Sohle, Ostsattel, nördlich des UMF-Feldes,
- Lokation 2 (Bohrbereich 3.07) auf der 4. Sohle, Südostfeld,
- Lokation 3 (Bohrbereich 3.02) auf der 2. Sohle, Ostquerschlag / Abzweigung 1. Südliche Richtstrecke,
- Lokation 4 (Bohrbereich 3.04) auf der 4. Sohle, Ostfeld,
- Lokation 5 (Bohrbereich 3.06) auf der 4. Sohle, Nordfeld,
- Lokation 6 auf der 2. und 3. Sohle des Zentralbereichs.

Die Messlokationen wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Untersuchung unterschiedlicher Bereiche der Schachanlage Bartensleben (Einlagerungsfelder, Bereiche mit hohem Durchbauungsgrad, Bereiche mit geringem Durchbauungsgrad),
- Untersuchung unterschiedlicher geologischer Schichten (Salzschichten, Hauptanhydrit),

---

(\*) Die Anlagen sind kapitelweise numeriert; die erste Ziffer bezieht sich auf das betreffende Hauptkapitel, die folgenden Ziffern geben die fortlaufende Numerierung der Anlagen in dem betreffenden Hauptkapitel wieder.

- Auswahl unterschiedlicher Sohlen zur Untersuchung der Teufenabhängigkeit,
- Berücksichtigung bergbaulich-betrieblicher Vorgaben (Zugangsmöglichkeit, vorhandene Infrastruktur).

Die In-situ-Untersuchungen umfassten folgende Arbeiten:

- Ermittlung der aktuellen Spannungen im unverritzten Gebirge (an allen Lokationen),
- Ermittlung von Sekundärspannungen im unmittelbaren Streckennahbereich (Lokationen 1, 3 und 5),
- Ermittlung von Gebirgsspannungsänderungen mit Hilfe von Dauermesseinrichtungen (Lokationen 1 bis 5).

Dazu wurden folgende Messmethoden eingesetzt:

- BGR-Überbohrmethode zur indirekten Ermittlung der aktuellen Spannungen im unverritzten Gebirge (an allen Lokationen),
- Hydrofrac-Methode zur direkten Ermittlung der aktuellen Spannungen im unverritzten Gebirge (an den Lokationen 1 bis 5),
- BGR-Schlitzentlastungsmethode zur Ermittlung von Sekundärspannungen, speziell Vertikalspannungen, im unmittelbaren Streckennahbereich (an den Lokationen 1, 3 und 5),
- Bohrlocheinschlussmethode mit stationären Spannungsmonitorstationen zur langfristigen Beobachtung von Gebirgsspannungsänderungen (an den Lokationen 1 bis 5).

Darüber hinaus wurden als Grundlage für die Auswertung und die Interpretation der Messungen die folgenden ingenieurgeologischen und felsmechanischen Untersuchungen durchgeführt:

- Geologische Bohrkernaufnahme (für alle Lokationen),
- BGR-Dilatometerversuche zur Ermittlung der Gebirgssteifigkeit (an den Lokationen 2 bis 5),
- Laborversuche an Prüfkörpern aus den Spannungsmessbohrungen zur Ermittlung der Gesteinssteifigkeit (für alle Lokationen).

Der vorliegende Bericht umfasst die abschließende Darstellung und Bewertung der Spannungsmessungen im unverritzten Gebirge unter Anwendung der Überbohr- und der Hydrofrac-Methode. Die Ergebnisse der Sekundärmessungen nach dem Schlitzentlastungsverfahren und der Langzeitspannungsmessungen mittels stationärer Bohrlochspannungsgeber werden in speziellen Berichten beschrieben.

### 3 Ingenieurgeologische Untersuchungsmethodik

Die Aufnahme und Beschreibung der für die Spannungsmessungen abgeteufte Kernbohrungen erfolgte nach einem von der BGR entwickelten ingenieurgeologischen Standard (BGR 1991). Hierbei werden

- Schichtung,
- Klüftung,
- Kernmarsch,
- Kerngewinn,
- RQD (Kernzustand),
- Kristallgröße,
- Grad der Verunreinigung und
- Lage der Überbohrversuche

aufgenommen. Kristallgröße und Verunreinigungsgrad des Salzes (durch Anhydrit) stellen visuell bestimmte semi-quantitative Größen dar, die in vier Kategorien eingeteilt werden. Wenn möglich, wurden die Kerne nachträglich mit Hilfe einer beim Überbohrversuch an den Überbohrkernen angebrachten Hilfslinie orientiert. Schichtung wurde an Anhydrit-Bändern eingemessen.

Die Darstellung der Ergebnisse der Bohrkernbearbeitung erfolgte über die Programme ‚SolidLOG‘ und ‚SolidDIP‘ der Firma Harbourdom, Köln. Für die o. g. Bearbeitungsweise wurden im Programm die entsprechenden Bohrkernsäulen mit den dreidimensional wiedergegebenen Trennflächen neben der Darstellung der Lithologie generiert. Diese Säulen neben der Spalte ‚Lithologische Beschreibung‘ stellen den Bohrkern jeweils so dar, als ob er horizontal mit oben liegender Orientierungshilfslinie liegen würde.

### 4 Geotechnische Untersuchungsmethoden

#### 4.1 Spannungsmessungen nach der BGR-Überbohrmethode

##### 4.1.1 Messmethodik und Messgeräte

Die Durchführung von Überbohrversuchen nach der BGR-Methode erfolgt nach folgendem Schema (Anlage 4.1):

- Erstellung einer Kernbohrung mit einem Durchmesser  $\varnothing = 148$  mm bis zum vorgesehenen Messhorizont unter Verwendung von Luftspülung,

- ggf. Glätten der Bohrlochfront mit Glättekrone,
- Erstellung einer koaxialen (zentrischen) Pilotbohrung  $\varnothing = 46$  mm, Länge ca. 1,0 m,
- gründliche Reinigung der Haupt- und Pilotbohrung,
- Einbau des Überbohrgestänges SK6L mit Spezial-Doppelkernrohr T6  $\varnothing = 146$  mm,
- richtungsorientierter Einbau der BGR-Sonde mittels eines Setzgestänges in der vorgesehenen Teufe,
- Ausbau des Setzgestänges,
- Überbohren des Pilotbohrlochs und der BGR-Überbohrsonde mit Bohrkronen  $\varnothing = 148$  mm bei gleichzeitiger Messung der Entspannungsdeformationen,
- Ausbau der Überbohrsonde am Messkabel oder mit dem Setzgestänge,
- Ausbau des hohlzylindrischen Bohrkerns und Weiter-teufen der Kernbohrung  $\varnothing = 148$  mm bis zum nächsten Versuchshorizont.

Für die Spannungsmessungen wurden zweidimensional messende BGR-Überbohrsonden, Typ MkIV, eingesetzt (Anlage 4.2). Sie bestehen aus einem Grundkörper mit vier um jeweils  $45^\circ$  versetzt angeordneten induktiven Wegaufnehmern, die in Radialrichtung die Durchmesseränderung des Pilotbohrlochs messen. Zur Fixierung der Sonde im Pilotbohrloch dienen vier Backenpaare, die federnd gelagert sind und einen festen Sitz der Sonde gewährleisten.

Die Datenerfassung erfolgte über ein Messkabel, das von der Überbohrsonde durch das Bohrgestänge zum Messverstärker geführt wurde. Neben der manuellen Datenerfassung auf speziellen Versuchsprotokollen wurden alle Messdaten digital über einen A/D-Wandler auf einem Laptop gespeichert und angezeigt, so dass eine direkte Kontrolle des Versuchsablaufs möglich war. Die einzelnen Komponenten der Datenerfassung sind in Anlage 4.2 dargestellt.

#### 4.1.2 Kriterien für die Bewertung der Versuchsqualität

Zur Beurteilung der Qualität der Überbohrversuche sind von der BGR auf der Grundlage aller über die letzten Jahrzehnte durchgeführten Versuche verschiedene Kriterien festgelegt worden, die als Entscheidungshilfe bei der Einstufung und Auswahl der Rohdaten bezüglich der weiteren Auswertung der einzelnen Versuche dienen. Diese Kriterien betreffen einerseits die technische Beurteilung der Qualität der Bohr- und Versuchsarbeiten vor Ort und andererseits die wissenschaftliche Prüfung der Qualität der Messergebnisse im Zuge der weiteren Versuchsauswertung. Dabei sind folgende Punkte zu beurteilen:

### **Technische Beurteilung der Versuchsdurchführung:**

- Mindestens drei Messrichtungen der Überbohrsonde müssen funktionstüchtig sein.
- Die Einbautiefe der Überbohrsonde im Pilotbohrloch muss ausreichend sein; d. h. die Wegaufnehmer der Sonde müssen bei dem hier verwendeten Überbohrdurchmesser von 148 mm einen Abstand von mindestens 15 cm zum Pilotbohrlochmund aufweisen. Ein im Bohrlochtiefsten ggf. vorhandener Kernstummel muss beim Glätten der Bohrlochfront vollständig beseitigt werden.
- Die Pilotbohrung ist zentrisch anzuordnen. Die Exzentrizität der Pilotbohrung darf im Ansatzpunkt nicht mehr als 2 mm betragen.
- Das Pilotbohrloch muss kreisförmig sein. Bei einer elliptischen Bohrung dürfen die Hauptachsen maximal 0,5 mm voneinander abweichen, z.B. 46,0 mm und 46,5 mm. Die Kontrolle dieser Werte erfolgt durch die Nullmessung zu Beginn eines Überbohrversuchs.
- Die Bohrvortriebsgeschwindigkeit beim Überbohren muss weitgehend konstant sein (ca. 2 cm/min).
- Die Pilotbohrlochstandzeit (Zeit zwischen Herstellung der Pilotbohrung und Durchführung des Überbohrversuchs) soll möglichst gleich bleiben und ca. 1 Std. betragen.
- Die nach Augenschein beurteilte Kernqualität muss hinsichtlich der Länge (mindestens 40 cm), des Aussendurchmessers (123 mm) und der Kernbeschaffenheit (glatte Oberfläche, keine Risse) ausreichend sein.

### **Wissenschaftliche Beurteilung der Messwerte:**

- Prüfung der Messkurven hinsichtlich der Einbautiefe der Überbohrsonde,
- Prüfung der Plausibilität der Messkurven hinsichtlich Konsistenz der in verschiedenen Richtungen gemessenen Entspannungswege,
- Prüfung des Messkurvenverlaufs hinsichtlich einer regulären Versuchsdurchführung oder hinsichtlich möglicher Beeinflussungen durch Messwertdrift, Kernbruch oder Bohrtechnik.

Auf der Basis der o. g. Kriterien werden die Überbohrversuche hinsichtlich ihrer Qualität grob in drei Klassen (gut, ausreichend, mangelhaft) eingestuft. Bei mangelhafter Qualität einzelner Versuche ist die Gesamtanzahl der Versuche in einer Bohrung entsprechend zu erhöhen.

#### 4.1.3 Auswertung von Überbohrversuchen

Die im Anhydrit durchgeführten Überbohrversuche werden unter Berücksichtigung elastischen Gesteinsverhaltens ausgewertet. Für die im Salz durchgeführten Versuche ist zusätzlich inelastisches Gesteinsverhalten zu berücksichtigen.

### Elastisches Gesteinsverhalten:

Bei der BGR-Überbohrmethode werden die Gebirgsspannungen aus den während des Überbohrens registrierten Durchmesseränderungen des Pilotbohrlochs ermittelt. In jedem Versuch werden Durchmesseränderungen in vier um jeweils 45° versetzten radialen Messrichtungen berücksichtigt. Aus diesen Messwerten wird eine Verformungsellipse berechnet.

Aus den Hauptachsen  $\Delta D_H$  und  $\Delta D_h$  der Verformungsellipsen werden die maximalen und minimalen Gebirgsspannungen  $S_1$  und  $S_2$  in der Messebene senkrecht zur Bohrachse nach Gl. (1) und Gl. (2) berechnet:

$$S_1 = \frac{E}{8 \cdot D \cdot (1 - \nu^2)} \cdot (3 \cdot \Delta D_H + \Delta D_h) \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{E}{8 \cdot D \cdot (1 - \nu^2)} \cdot (3 \cdot \Delta D_h + \Delta D_H) \quad (2)$$

mit

$D$  = Pilotbohrlochdurchmesser (46 mm),

$E$  = Elastizitätsmodul (MPa),

$\nu$  = Querdehnungszahl (-).

Die Orientierung der maximalen Spannung  $S_1$  wird ebenfalls aus der o. g. Verformungsellipse ermittelt, bei Horizontalbohrungen als Winkel zwischen der Vertikalachse und  $S_1$  und bei Vertikalbohrungen als Winkel zwischen Nord und  $S_1$  angegeben. Ferner wird die Spannungsanisotropie als Verhältnis der ermittelten Spannungsbeträge für  $S_1$  und  $S_2$  mit

$$a = S_1/S_2 \quad (3)$$

berechnet.

Die in Gl. (1) und (2) enthaltenen elastischen Kenngrößen  $E$  und  $\nu$  werden folgendermaßen gewählt bzw. ermittelt:

- Die Querdehnungszahl wird einheitlich mit  $\nu = 0,27$  angenommen,
- Der Elastizitätsmodul wird nach Möglichkeit direkt an dem Hohlkern bestimmt, der im Überbohrversuch erbohrt worden ist, d. h. jedem Überbohrversuch wird ein individueller Elastizitätsmodul zugrundegelegt. Ist kein Kern aus dem Überbohrversuch (z. B. wegen Kernbruchs) verfügbar, so wird für die Auswertung entweder ein mittlerer E-Modul ver-

wendet, indem die an allen verfügbaren Hohlkernen einer Messbohrung bestimmten Werte gemittelt werden, oder es werden die an benachbarten Hohlkernen ermittelten Werte herangezogen.

### Inelastisches Gesteinsverhalten:

Neben den o. g. elastischen Eigenschaften sind bei Überbohrversuchen im Salzgestein auch die inelastischen Eigenschaften zu berücksichtigen. Analytische und numerische Untersuchungen zeigen, dass die Ergebnisse von Überbohrversuchen im Salz aufgrund der im Bereich der Pilotbohrung durch Kriechen verursachten Spannungsrelaxation und der damit verbundenen zeitabhängigen Abnahme der Radialspannung erheblich beeinflusst werden (HEUSERMANN 1984). Wird diese Abnahme nicht berücksichtigt und erfolgt die Auswertung lediglich mit den o. a. für elastisches Verhalten geltenden Beziehungen, so wird der Gebirgsspannungszustand grundsätzlich zu niedrig ermittelt.

Die Standzeit der Pilotbohrung (ca. ½ bis 1 Std.) und die damit verbundene Spannungsrelaxation wird mittels numerischer Berechnungen berücksichtigt, mit denen der Überbohrvorgang simuliert wird (HEUSERMANN 1995). Aufgrund der kurzen Standzeit wird das Kriechverhalten von Steinsalz mit einem Ansatz für transientes Kriechen beschrieben (MENZEL & SCHREINER 1977):

$$\dot{\varepsilon}^c = A \cdot \sigma^\beta \cdot (\varepsilon^c)^{-\mu} \quad (4)$$

mit

$\dot{\varepsilon}^c$  = Kriechrate ( $d^{-1}$ ),

A = Skalierungsfaktor ( $7,4 \cdot 10^{-36} \text{ MPa}^{-20} \text{ d}^{-1}$ ),

$\beta$  = Spannungsexponent (20,0),

$\varepsilon^c$  = Kriechverzerrung,

$\mu$  = Verzerrungsexponent (4,0).

Aus den errechneten zeitabhängigen Spannungsumlagerungen lässt sich für die Radialspannung  $\sigma_R$  ein Korrekturfaktor c mit

$$c = \frac{\sigma_R(\text{inelastisch})}{\sigma_R(\text{elastisch})} \quad (5)$$

bestimmen. Grundsätzlich ist c keine konstante Größe, sondern auch von der gesuchten Primärspannung abhängig. Ausgehend von Untersuchungen an anderen Standorten kann

für die vorliegenden Bedingungen (z. B. Bohrlochdurchmesser, Bohrlochstandzeit, Kriechvermögen, Teufenlage der Messlokationen)  $c$  in guter Näherung mit  $c = 0,82$  festgelegt werden. Die nach der Elastizitätstheorie mit Gl. (1) und (2) ermittelten Spannungen sind um den Faktor  $1/c$  zu erhöhen.

#### 4.2 Spannungsmessungen nach der Hydrofrac-Methode

Die mit der Durchführung der Hydrofrac-Versuche beauftragte Fa. K-UTEC, Sondershausen, setzte folgende firmenintern entwickelte und erprobte Mess- und Versuchsapparatur ein (Anlage 4.3):

- Zweifach-Linien-Bandschreiber mit mechanischem Antrieb, Messbereich von 0 bis 60 MPa, Papiervorschub 120 mm/h,
- Hochleistungssensorik für Druck-, Volumenstrom- und Temperaturmessung mit angeschlossenem Handmessgerät (Datenlogger), PC und dazugehöriger Auswerte-Software,
- Handkolbenpumpe B 2-63/630, Betriebsdruck 63/630 bar, Verdrängungsvolumen in der Vorfüllstufe 63 cm<sup>3</sup> je Hub, in der Hochdruckstufe 4 cm<sup>3</sup> je Hub,
- Ölbehälter mit 6,3 bis 10,0 dm<sup>3</sup> Inhalt,
- Gestell, Absperrventile, getrennte Schlauchleitungen für Packer und Frac-Intervall bis zur Pumpe am Bohrlochmund,
- getrennte Doppelleitung (Einzellängen 1,5 m) für Packer und Frac-Intervall mit Endstück,
- Frac-Doppelpackersonde für zugelassene Nenndrücke von 40 MPa, Gummipacker aus eigener Herstellung.

Die Frac-Sonde der Fa. K-UTEC hat eine Gesamtlänge von 690 mm, die Packerlänge beträgt 120 mm. Das Frac-Intervall, also der zwischen Packern bzw. Stahlpassringen liegende Sondenabschnitt, hat eine Länge von 230 mm. Der für einen ordnungsgemässen Standard-Frac-Versuch erforderliche Bohrlochdurchmesser beträgt  $47 \pm 1$  mm. Die Bohrlochwandung muss glatt und eben sein.

Parallel zur mechanischen Aufzeichnung der Packer- und Frac-Drücke mittels Doppel-Linien-Bandschreiber erfolgte eine digitale Erfassung, Speicherung und Verarbeitung der Packer- und Frac-Drücke sowie wahlweise der Temperatur bzw. des Volumenstroms im Frac-Intervall. Dazu wurde von der Fa. K-UTEC eine entsprechende Anpassung vorhandener Produkt-Bausteine an die speziellen Anforderungen bei Spannungsmessungen nach der Hydrofrac-Methode vorgenommen. Folgende Komponenten wurden eingesetzt:

- Handmessgerät Multi-System 5000 in Sonderausführung für Volumenzählung (GFM, 0,005...1,0 l/min.),
- Drucksensoren PR15 mit Direktanschluss über MINIMESS-Schraubkupplungen an den Hydrofrac-Messkomplex,
- Temperatursensor PT100 mit MINIMESS-Direktanschluss,
- Zahnrad-Durchflussmengenmesser GFM für Volumenstrom,
- HYDROcomsys-Softwarepaket zur Datenspeicherung, Darstellung und Auswertung der Messwerte auf PC.

Die Bohrlochkamera- und Bohrlochkaliberuntersuchungen wurden mit einer Bohrloch-Fernsehsonde (FS 3760 Mini RICO GmbH) ausgeführt, die in einem Schutzrohr ( $\varnothing$  44 mm) zentriert gelagert ist. An diesem Schutzrohr befindet sich eine Lichtquelle sowie als Zusatzausrüstung der Lichtschnitt-Vorsatz mit austauschbarem Pendel oder Kompass. Der Pendelvorsatz dient zur Orientierung in Horizontalbohrungen, der Kompassvorsatz wird zur Bohrlochorientierung und Rissdetektion in Vertikalbohrungen benötigt. Die Fernsehsonde wird manuell durch steckbare Glasfibergestänge im Bohrloch bewegt. Die Kabellänge der Sonde beträgt 60 m. Die Feststellung der Rissorientierung geschieht mittels eines aufgesetzten Lichtschnitttringes, dazu wird das Kamerabild abgedunkelt.

Die Kontrolle der Bohrlochdurchmesser wurde mit Stahlkalibrierringen von 46,0, 47,0 und 48,0 mm Durchmesser durchgeführt. Nur in diesen Bohrlochdurchmesserbereichen ist die Apparatur einsetzbar.

Ein Standard-Hydrofrac-Versuch war gemäß Vorgabe durch die BGR wie folgt auszuführen:

- Primärer Dichtheitstest bei 5 MPa Injektionsdruck und 7 MPa Packerdruck über einen Messzeitraum  $\geq 30$  Minuten,
- primäres Aufreißen (Frac-Test), Verpressen von ca. 20...30 cm<sup>3</sup>,
- Erfassung der sich einstellenden Druckkonstanz über  $\geq 180$  bzw.  $\geq 60$  Minuten (3- bzw. 1-Stunden-Ruhedruck = „Standardversuch“),
- zweimaliges sekundäres Aufreißen (1. und 2. Refrac-Test) mit ca. 10...15 cm<sup>3</sup> und Erfassung der sich einstellenden Druckkonstanz über  $\geq 60$  Minuten,
- Nachweis der sekundären Dichtheit des Salzgesteins und der technischen Systemdichtheit durch Fortführung einiger Versuche bis zum nächsten Morgen (Dauerstandstest).

Es wurden i. a. 15 Standardmessungen je Bohrloch durchgeführt, die nach Möglichkeit gleichmäßig über die Bohrlochlänge verteilt wurden. Zusätzlich erfolgten nach Bedarf weitere Frac-Tests mit einer reduzierten Messdauer von 60 Minuten. Messtechnisch erfasst wurden Packer- und Frac-Druck, Injektionsmenge und -rate sowie die Temperatur im Frac-Intervall. Der Ablauf der Messungen wurde in täglichen Arbeitsberichten dokumentiert.

### 4.3 Dilatometermessungen

#### 4.3.1 Messmethodik und Messgeräte

Für Dilatometermessungen nach der BGR-Methode ist folgender Arbeitsablauf erforderlich (Anlage 4.4):

- Erstellung einer Kernbohrung mit  $\varnothing = 148$  mm,
- Erstellung einer Pilotbohrung im Bohrlochtiefsten mit  $\varnothing = 86$  mm, Länge ca. 2,0 m,
- gründliche Reinigung der Haupt- und der Pilotbohrung,
- richtungs- und teufenorientierter Einbau des BGR-Dilatometers mit Hydraulikschlauch und Messkabel an einem Setz- und Orientierungsgestänge,
- Erzeugung eines hydraulischen Initialdrucks von 2 MPa, um ein gleichmäßiges Anliegen des Dilatometers an der Bohrlochwand zu gewährleisten,
- Durchführung der Nullmessung sowie Registrierung der Änderung des Bohrllochdurchmessers während der nachfolgenden Be- und Entlastungszyklen mit 2/5/2 MPa, 2/10/2 MPa und 2/15/2 MPa,
- Entlasten und Ausbau des Dilatometers sowie Überbohren des Untersuchungsabschnitts und Weiter-teufen der Kernbohrung mit  $\varnothing = 148$  mm.

Für den Bohrllochaufweitungsversuch wurde ein BGR-Dilatometer, Typ MkIII, eingesetzt. Es besteht aus einem Grundkörper mit drei um jeweils  $60^\circ$  versetzt angeordneten induktiven Wegaufnehmern, die in Radialrichtung die Durchmesseränderung des Bohrlochs messen. Über den Grundkörper ist ein Hochdruckformschlauch gezogen. Die Wegaufnehmer liegen auf speziellen, in der Schlauchwand einvulkanisierten Stahlplatten, so dass die Messwerte von der Schlauchverformung weitgehend unbeeinflusst sind.

Die Erfassung der Messdaten während des Versuchs erfolgte mittels eines Messkabels, das von der Dilatometersonde durch das Bohrloch zum Messverstärker geführt wurde. Neben der manuellen Datenerfassung auf speziellen Versuchsprotokollen wurden alle Messdaten digital über einen A/D-Wandler auf einem PC gespeichert und dargestellt, so dass eine unmittelbare Kontrolle des Versuchsablaufs möglich war.

#### 4.3.2 Auswertung von Dilatometermessungen

Auf der Grundlage der im Dilatometerversuch ermittelten Last-Deformationskurven wird der Elastizitätsmodul aus der Steigung der Sekanten in den Drittelpunkten der Entlastungsäste bestimmt. Die Auswertung erfolgt mit dem Modell einer unendlich ausgedehnten Scheibe mit Loch im ebenen Verzerrungszustand unter Innenbelastung. Bei Annahme eines isotropen Gebirgsverformungsverhaltens kann dann der Elastizitätsmodul nach WORCH (1967) ermittelt werden:

$$E = (1 + \nu) \cdot \frac{D}{\Delta D} \cdot \Delta p_i \quad (6)$$

mit

- E = Elastizitätsmodul aus Sekante im mittleren Drittel des Entlastungsastes (MPa),
- $\nu$  = Querdehnungszahl (-),
- D = Bohrlochdurchmesser (86 mm),
- $\Delta D$  = Änderung des Bohrlochdurchmessers (mm),
- $\Delta p_i$  = Änderung des Dilatometerdrucks (MPa).

#### 4.4 Begleitende Laborversuche

##### 4.4.1 Laborversuchseinrichtung

Zur Durchführung felsmechanischer Be- und Entlastungsversuche (Ermittlung der Gesteinssteifigkeit) wird von der BGR eine Laborprüfeinrichtung für Biaxialversuche an hohlzylindrischen Prüfkörpern verwendet (Anlage 4.5). Diese Einrichtung umfasst folgende Komponenten:

- Biaxialzelle (Typ Robertson),
- Hydraulisches Druckaggregat zur Regelung des Manteldrucks in der Biaxialzelle,
- Data-Logger für Versuchsregelung und Datenerfassung,
- Druckaufnehmer,
- BGR-4-Komponenten-Weggeber zur Messung der radialen Hohlzylinderverformungen (Durchmesseränderungen der Innenbohrung) mit Messverstärker,
- vier x-y-Schreiber zur kontinuierlichen analogen Datenaufzeichnung,
- Computer mit Peripherie zur Speicherung und Darstellung der Messwerte.

#### 4.4.2 Auswertung von Biaxialversuchen an Hohlkernen

An den beim Überbohren gewonnenen hohlzylindrischen Prüfkörpern wurden im Labor Be- und Entlastungsversuche durchgeführt, um die für die Auswertung der Überbohrversuche erforderlichen Elastizitätsmoduli zu ermitteln (s. Kap. 4.1.3). Die Belastung der Prüfkörper betrug im Regelfall 5,0; 7,5 und 10,0 MPa. Gewählt wurde ein biaxialer Beanspruchungszustand, d. h. die Prüfkörper wurden nur durch Manteldruck ohne axiale Last beansprucht.

Auf der Grundlage der im Labor an den Hohlkernen ermittelten Last-Deformationsdiagramme erfolgt die Auswertung derart, dass der Elastizitätsmodul aus der Sekante, d. h. aus der Verbindungslinie zwischen Anfangs- und Endpunkt eines Entlastungsastes ermittelt wird. Diese Vorgehensweise weicht von der üblichen Methode ab, den Elastizitätsmodul aus der Sekante der Drittelpunkte eines Entlastungsastes zu bestimmen, ist aber im Hinblick auf die im Überbohrversuch stattfindende vollständige Entlastung des überbohrten Kerns und die spezielle Verwendung der so ermittelten Elastizitätsmoduli für die Auswertung der Überbohrversuche sinnvoll.

Der Elastizitätsmodul wird aus den im Laborversuch gemessenen Deformationen des Prüfkörpers (Änderungen des Innendurchmessers) mit dem Modell eines Hohlzylinders im ebenen Spannungszustand (axiale Spannung  $\sigma_z = 0$ ) unter äußerer Radiallast berechnet (WORCH 1967):

$$E_S = 2 \cdot \frac{D_a^2 \cdot D_i}{D_a^2 - D_i^2} \cdot \frac{P_R}{\Delta D} \quad (7)$$

mit

- $E_S$  = Elastizitätsmodul aus Sekante des Entlastungsastes (MPa),
- $D_a$  = äußerer Bohrerndurchmesser (123 mm),
- $D_i$  = Bohrlochdurchmesser (46 mm),
- $P_R$  = Manteldruck (MPa),
- $\Delta D$  = Änderung des Bohrlochdurchmessers (mm).

Es ist anzumerken, dass die Querdehnungszahl aufgrund der hier gewählten biaxialen Prüfkörperbeanspruchung nicht in die Ermittlung von E eingeht.

## 5 Darstellung der Untersuchungsergebnisse

### 5.1 Lokation 1 (Bohrbereich 3.05)

Lokation 1 (Bohrbereich 3.05) liegt auf der 4. Sohle (-372 m NN) am Ostquerschlag im Bereich des Ortes 17YER42 in etwa 750 m Entfernung ostnordöstlich vom Hauptschacht der Grube Bartensleben (Anlage 2.1) und weist als kleiner Querschlag einen kreuzförmigen Grundriss auf (Anlage 5.1). Die Auffahrung erfolgte im Jahr 1985.

An dieser Lokation sind für Spannungsmessungen die folgenden Untersuchungsbohrungen gestoßen worden, deren Daten in Anlage 5.1 zusammengestellt sind:

- Horizontalbohrung RB402 für Hydrofrac-Versuche,
- Horizontalbohrung RB466 für Hydrofrac-Versuche,
- Vertikalbohrung (Hochbohrung) RB403 für Hydrofrac-Versuche,
- Horizontalbohrung RB408 (B2) für Überbohrversuche und anschließend für Langzeitspannungsmessungen,
- Horizontalbohrung RB409 (B1) für Überbohrversuche und anschließend für Langzeitspannungsmessungen,
- nach unten gerichtete Vertikalbohrung RB410 (B3) für Überbohrversuche und anschließend für Langzeitspannungsmessungen,
- Schrägbohrungen RB411 und RB412 für Langzeitspannungsmessungen.

#### 5.1.1 Ingenieurgeologische Untersuchungsergebnisse

Strukturell befindet sich der Bohrbereich 3.05 im Bereich des sogenannten Ostsattels. Der Kern des Sattels wird ausschließlich vom Staßfurt-Hauptsalz (z2HS2) gebildet. Beim Ostsattel handelt es sich um eine weit aufragende Sattelstruktur, deren Achse in nordnordwestlicher Richtung streicht und den Ost-Querschlag etwa 30 m westlich des Ortes 17YER42 schneidet. Die Lokation liegt knapp östlich dieser Sattelachse innerhalb der Ostflanke des Sattels. Das Staßfurt-Hauptsalz fällt im Bereich der untersuchten Bohrungen gleichmäßig mit 50° bis 65° nach Osten bis Nordosten ein.

Das Hauptsalz (z2HS2) der Staßfurt-Folge besteht im Untersuchungsbereich aus einer monotonen Abfolge von weißlich-hellgrauem Steinsalz sowie dünnen Schnüren und Bändern von zerrissenem Anhydrit, die bis zu Schmitzen und Flocken zerrieben sein können. Das Salz ist überwiegend feinkristallin (Anlagen 5.2 bis 5.4).

## 5.1.2 Ergebnisse der Spannungsmessungen

### Überbohrversuche:

Die Daten der Überbohrversuche, die in den drei Untersuchungsbohrungen B1 (RB409), B2 (RB408) und B3 (RB410) durchgeführt wurden, sind tabellarisch in Anlage 5.5 zusammengestellt. Neben der Versuchsbezeichnung ist jeweils die untersuchte stratigraphische Einheit, das Versuchsdatum, die Versuchstiefe bezüglich des Bohrlochs sowie eine Beurteilung des Kerngewinns und der Versuchsqualität angegeben. Außerdem sind die der Auswertung zugrundeliegenden Werte für den Elastizitätsmodul aufgeführt (s. dazu Kapitel 5.1.3).

Die Anlagen 5.6 bis 5.8 zeigen exemplarisch die in Überbohrversuchen im Hauptsalz (z2HS2) gemessenen Entspannungsdeformationen, deren Verlauf für Messungen im Salzgebirge charakteristisch ist. So stellen sich zu Beginn des Überbohrvorgangs erhebliche Bohrlochkonvergenzen infolge temporärer Spannungskonzentrationen ein, die zu einer Verschiebung des Nullzustandes führen. Dieser Effekt muss bei der Auswertung unbedingt berücksichtigt werden und erfordert eine kontinuierliche Messung der Bohrlochdeformationen während des gesamten Überbohrvorgangs.

Die Ergebnisse der Überbohrversuche sind in den Anlagen 5.9 bis 5.11 zusammenfassend für jede Bohrung dargestellt. Für die Horizontalbohrung RB409 (B1) ergeben sich folgende Resultate (Anlage 5.9):

- Gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 12,5$  MPa,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 10,2$  MPa,
- Orientierung von  $S_1$  vorwiegend vertikal bis subvertikal,
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,20$ .

Für die Horizontalbohrung RB408 (B2) ergeben sich folgende Resultate (Anlage 5.10):

- Gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 11,4$  MPa,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 10,5$  MPa,
- Orientierung von  $S_1$  vorwiegend vertikal bis subvertikal,
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,09$ .

Für die Vertikalbohrung RB410 (B3) ergeben sich folgende Resultate (Anlage 5.11):

- Gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 12,1$  MPa,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 10,3$  MPa,
- Azimut von  $S_1$  vorwiegend zwischen ca. 0 und 40° (bezogen auf Nord),
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,18$ .

**Hydrofrac-Versuche:**

Die wesentlichen Resultate der Hydrofrac-Versuche, insbesondere die gemessenen Ruhedruckwerte und die Zugfestigkeit als hydraulische Aufreißfestigkeit des Salzgesteins sind in den Anlagen 5.12 bis 5.14 zusammengestellt.

Für Bohrung RB402 ergeben sich nach Anlage 5.12 aus der Frac-Phase nach einer Messdauer von einer Stunde Ruhedruckwerte zwischen ca. 11,3 und 14,1 MPa (im Mittel 13,2 MPa). Die in den anschließenden 1. und 2. Refrac-Phasen ebenfalls nach einer Stunde ermittelten Ruhedrücke weisen Werte zwischen 9,0 und 13,5 MPa (im Mittel 11,3 MPa) auf. Dabei wird deutlich, dass die Ruhedrücke der Refrac-Phasen zu einem großen Teil erheblich unter den aus der Frac-Phase ermittelten Werten liegen. Für die hydraulische Zugfestigkeit, die aus der Differenz des Frac-Drucks und des 1. oder 2. Refrac-Drucks ermittelt werden kann, ergeben sich Werte zwischen 2,4 und 6,8 MPa (im Mittel 4,7 MPa).

Für Bohrung RB466 ergeben sich aus der Frac-Phase nach einer Messdauer von einer Stunde vergleichsweise hohe Ruhedruckwerte zwischen ca. 12,5 und 15,3 MPa, im Mittel 14,2 MPa (Anlage 5.13). Die in der 1. und 2. Refrac-Phase ebenfalls nach einer Stunde ermittelten Ruhedrücke weisen Werte zwischen 11,4 und 14,8 MPa (im Mittel 12,6 MPa) auf. Dabei wird auch hier deutlich, dass in den Refrac-Phasen z. T. geringere Ruhedrücke als in den Frac-Phasen gemessen wurden. Für die hydraulische Zugfestigkeit des Salzgesteins ergeben sich Werte zwischen 0,6 und 5,6 MPa (im Mittel 4,1 MPa).

Für die Vertikalbohrung RB403 ergeben sich aus der Frac-Phase nach einer Stunde Ruhedruckwerte zwischen ca. 9,4 und 12,4 MPa, im Mittel 10,9 MPa (Anlage 5.14): Die in der 1. und 2. Refrac-Phase ebenfalls nach einer Stunde ermittelten Werte liegen zwischen 8,6 und 11,3 MPa (im Mittel 10,0 MPa). Es zeigt sich, dass die Ruhedrücke der Refrac-Phasen i. a. geringer sind als in der Frac-Phase. Für die hydraulische Zugfestigkeit des Salzgesteins lassen sich Werte zwischen 2,9 und 6,2 MPa ermitteln.

Die in allen Untersuchungsbohrungen zu beobachtende Tendenz, dass die Ruhedrücke der Refrac-Phasen z. T. erheblich geringer sind als in der Frac-Phase, wird darauf zurückgeführt, dass der Riss in der Frac-Phase eine andere Orientierung als in den Refrac-Phasen aufweist. Da mit fortschreitender Rissausbreitung die Rissorientierung immer weniger durch den Spannungszustand im Bohrlochnahbereich beeinflusst wird und sich immer mehr entsprechend der Orientierung der minimalen Gebirgsspannung ausrichtet, wird für die weitere Interpretation der Messungen insbesondere der in den Refrac-Phasen ermittelte Ruhedruck herangezogen (s. Kapitel 6.1).

Die in den Frac-Versuchen ermittelten Resultate lassen sich folgendermaßen zusammenfassen (angegeben sind die Mittelwerte der in den Refrac-Phasen nach einer Stunde gemessenen Ruhedrucke, die annähernd der minimalen Hauptspannung entsprechen):

- a) Horizontalbohrung RB402: Ruhedruck  $p_R = 11,3$  MPa,
- b) Horizontalbohrung RB466: Ruhedruck  $p_R = 12,6$  MPa,
- c) Vertikalbohrung RB403: Ruhedruck  $p_R = 10,0$  MPa.

### 5.1.3 Ergebnisse der Laborversuche

Für die Auswertung der Überbohrversuche wurden im Labor an den beim Überbohren gewonnenen hohlzylindrischen Prüfkörpern Be- und Entlastungsversuche durchgeführt. Die Versuchs- und Prüfkörperdaten (Kernbezeichnung, stratigraphische Einheit und Entnahmetiefe) sind in Anlage 5.16 zusammengestellt.

Exemplarisch sind die am Prüfkörper M1B1UB06 ermittelten Last-Deformationsdiagramme in Anlage 5.15 dargestellt. Für jede der vier radialen Messrichtungen ist die Prüfkörperbelastung als radial wirkender Manteldruck über der Prüfkörperverformung (Durchmesseränderung der Pilotbohrung) aufgetragen.

Die jeweils für vier Messrichtungen aus jeder einzelnen Laststufe ermittelten E-Moduli sind für die drei Bohrungen RB409 (B1), RB408 (B2) und RB410 (B3) in Anlage 5.16 tabellarisch zusammengestellt. Darüber hinaus ist für jeden Prüfkörper ein mittlerer E-Modul angegeben. Für jede Bohrung ergeben sich daraus folgende Gesamtmittelwerte:

- Bohrung RB409 (B1):  $E = 31,5$  GPa,
- Bohrung RB408 (B2):  $E = 31,7$  GPa,
- Bohrung RB410 (B3):  $E = 33,3$  GPa.

Diese Werte zeigen eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit Ergebnissen von Laborversuchen an zylindrischen Steinsalzprüfkörpern (BGR 1996).

Für die Auswertung der Überbohrversuche (Kapitel 5.1.2) wurde nach Möglichkeit der spezielle, an dem zugehörigen Bohrkern ermittelte E-Modul verwendet. War dieser Bohrkern nicht verfügbar, so wurde entweder der o. a. Mittelwert einer Bohrung oder der an benachbarten Prüfkörpern bestimmte Wert zugrundegelegt.

## 5.2 Lokation 2 (Bohrbereich 3.07)

Die Lokation 2 (Bohrbereich 3.07) liegt im 3. Querschlag der südlichen Richtstrecke im Südostfeld der Grube Bartensleben auf der 4. Sohle (Ort 17YEQ53, Anlage 2.1) in etwa 1,4 km Entfernung südöstlich des Schachtes Bartensleben, relativ isoliert vom übrigen Grubengebäude. Der 3. Querschlag wurde im Bereich des Messortes zwischen 1950 und 1955 aufgefahen und diente als Zufahrt zu verschiedenen Roll- und Fahrlochsystemen der darüber liegenden Abbaukammern.

Für die Spannungsmessungen wurden Bereiche ausgewählt, die sich einerseits möglichst in lithologisch homogenen Bereichen und andererseits möglichst weit von größeren Abbauen befinden. Bohrbereich 3.07 liegt vollständig innerhalb der Salzfolge z3OS-BK/BD und mindestens 50 m von größeren Abbaukammern entfernt.

Wegen möglicher Gasführung wurde vor den Kernbohrungen für Überbohrversuche jeweils eine ungekernte Vorbohrung abgeteuft, die auch der Durchführung von Hydrofrac-Versuchen diente.

Für die Spannungsmessungen wurden die folgenden Untersuchungsbohrungen gestoßen, deren Daten in Anlage 5.17 zusammengestellt sind:

- Horizontalbohrung RB414 für Hydrofrac-Versuche (ab 4,5 Meter wegen starker Konvergenz verworfen),
- Vertikalbohrung RB415 für Hydrofrac-Versuche (ab 7,0 Meter wegen starker Konvergenz verworfen),
- Horizontalbohrung RB416 für Hydrofrac-Versuche (wegen mangelnder Qualität verworfen),
- Horizontalbohrung RB475 für Hydrofrac-Versuche, (Ersatzbohrung für RB414),
- Vertikalbohrung RB476 für Hydrofrac-Versuche, (Ersatzbohrung für RB415).
- Horizontalbohrung RB468 für Hydrofrac-Versuche, (Ersatzbohrung für RB416),
- Horizontalbohrung RB421 (B1) für Überbohrversuche, Dilatometerversuche und anschließend für Langzeitspannungsmessungen,
- nach unten gerichtete Vertikalbohrung RB422 (B2) für Überbohrversuche, Dilatometerversuche und anschließend für Langzeitspannungsmessungen,
- Horizontalbohrung RB423 (B3) für Überbohrversuche, Dilatometerversuche und anschließend für Langzeitspannungsmessungen,
- Horizontalbohrung RB424 für Langzeitspannungsmessungen.

### 5.2.1 Ingenieurgeologische Untersuchungsergebnisse

Die Bohrungen des Bohrbereichs 3.07 befinden sich stratigraphisch innerhalb des Orangesalzes z3OS und des Bank- und Bändersalzes z3BK/BD. Die Schichten fallen einheitlich mit  $40^\circ$  bis  $60^\circ$  nach Westen ein. Strukturell liegen sie an der Ostflanke der sogenannten Ostmulde, die im Bereich des Südost-Feldes jedoch nur schwach ausgeprägt ist. Ihre Achse kreuzt den 3. Querschlag bei Station 190, d. h. etwa 650 m westlich des Bohrbereichs 3.07.

Echte Trennflächen liegen im behandelten Abschnitt des Liniensalzes nur in Form von Kristalltrennflächen großer Einkristalle vor (Anlagen 5.18 bis 5.20). Diese wurden mit bis über 10 cm Durchmesser angetroffen. Insgesamt handelt es sich um anhydritisch schwach verunreinigtes Salz von mittlerer Kristallgröße.

### 5.2.2 Ergebnisse der Spannungsmessungen

#### **Überbohrversuche:**

Die Daten der Überbohrversuche, die in den drei Untersuchungsbohrungen RB421 (B1), RB422 (B2) und RB423 (B3) durchgeführt wurden, sind tabellarisch in Anlage 5.21 zusammengestellt. Neben der Versuchsbezeichnung sind die stratigraphische Einheit, das Versuchsdatum, die Bohrlochtiefe sowie eine Beurteilung des Kerngewinns und der Versuchsqualität angegeben. Ferner sind die der Auswertung zugrundeliegenden Werte für den Elastizitätsmodul aufgeführt (s. dazu Kapitel 5.2.4).

Anlage 5.22 zeigt exemplarisch die in einem Überbohrversuch im Leinsteinsalz gemessenen Entspannungsdeformationen. Die Ergebnisse der Überbohrversuche sind in den Anlagen 5.23 bis 5.25 zusammenfassend dargestellt. Für jede Messbohrung sind die maximalen und minimalen Spannungen  $S_1$  und  $S_2$ , die Orientierung von  $S_1$  und die Spannungsanisotropie nach Gl. (3) angegeben.

Für die Horizontalbohrung RB421 (B1) ergeben sich nach Anlage 5.23 folgende Resultate:

- gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 11,9$  MPa,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 11,0$  MPa,
- Orientierung von  $S_1$ : vorwiegend subvertikal (bis  $\pm 45^\circ$  gegenüber der Vertikalen),
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,08$ .

Für die Vertikalbohrung RB422 (B2) ergeben sich nach Anlage 5.24 folgende Resultate:

- gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 12,5$  MPa,

- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 11,0 \text{ MPa}$ ,
- Orientierung von  $S_1$ : uneinheitlich,
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,14$ .

Für die Horizontalbohrung RB423 (B3) ergeben sich nach Anlage 5.25 folgende Resultate:

- gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 10,2 \text{ MPa}$ ,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 9,5 \text{ MPa}$ ,
- Orientierung von  $S_1$ : vorwiegend subvertikal (bis  $\pm 45^\circ$  gegenüber der Vertikalen),
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,07$ .

Die Angabe der Orientierung von  $S_1$  ist hier von untergeordneter Bedeutung, da sich nur geringe Spannungsanisotropien ergeben. Dieser Befund ist aufgrund des geringen Durchbauungsgrades im Bereich der Lokation 2 plausibel.

#### **Hydrofrac-Versuche:**

Die wesentlichen Resultate der Hydrofrac-Versuche, insbesondere die gemessenen Ruhedruckwerte und die Zugfestigkeit als hydraulische Aufreißfestigkeit des Salzgesteins sind in den Anlagen 5.26 bis 5.28 zusammengestellt.

Für die Horizontalbohrung RB475 ergeben sich aus der Frac-Phase nach einer Messdauer von einer Stunde Ruhedruckwerte zwischen ca. 7,6 und 14,3 MPa, im Mittel 11,5 MPa (Anlage 5.26). Die in den anschließenden 1. und 2. Refrac-Phasen ebenfalls nach einer Stunde ermittelten Ruhedrücke weisen Werte zwischen 7,7 und 13,8 MPa (im Mittel 11,5 MPa) auf. Dabei wird deutlich, dass die Ruhedrücke der Refrac-Phasen größtenteils sehr gut mit den aus der Frac-Phase ermittelten Werten übereinstimmen. Für die hydraulische Zugfestigkeit, die aus der Differenz des Frac-Drucks und des 1. oder 2. Refrac-Drucks ermittelt werden kann, ergeben sich Werte zwischen 0,8 und 5,2 MPa, im Mittel 3,0 MPa.

Für die Vertikalbohrung RB476 ergeben sich aus der Frac-Phase nach einer Messdauer von einer Stunde Ruhedruckwerte zwischen ca. 3,5 und 14,2 MPa, im Mittel 11,2 MPa (Anlage 5.27). Die in der 1. und 2. Refrac-Phase ebenfalls nach einer Stunde ermittelten Ruhedrücke weisen Werte zwischen 3,5 und 13,8 MPa (im Mittel 11,1 MPa) auf. Dabei wird auch hier deutlich, dass in den Refrac-Phasen vorwiegend die gleichen Ruhedruckwerte wie in den Frac-Phasen gemessen wurden. Für die hydraulische Zugfestigkeit des Salzgesteins ergeben sich Werte zwischen 2,0 und 7,2 MPa, im Mittel 3,4 MPa.

Für die Horizontalbohrung RB468 ergeben sich aus der Frac-Phase nach einer Stunde Ruhedruckwerte zwischen ca. 5,2 und 12,6 MPa, im Mittel 11,0 MPa (Anlage 5.28). Die in der 1. und 2. Refrac-Phase ebenfalls nach einer Stunde ermittelten Werte liegen zwischen 5,0 und 12,7 MPa (im Mittel 11,0 MPa). Dabei zeigt sich, dass die Ruhedruckwerte der Refrac-Phasen i. a. mit denen der Frac-Phase sehr gut übereinstimmen. Für die hydraulische Zugfestigkeit des Salzgesteins lassen sich Werte zwischen 1,8 und 5,1 MPa, im Mittel 3,3 MPa, angeben.

Bei der Bestimmung der gemittelten Ruhedruckwerte ist zu berücksichtigen, dass einige Versuche im Nahbereich der Versuchsstrecke (Querschlag 17YEQ53) durchgeführt wurden und mit zunehmender Nähe zur Strecke zwangsläufig abnehmende Ruhedruckwerte ergaben. Bleiben diese Versuche bei der Gesamtbetrachtung unberücksichtigt, so weisen die Mittelwerte der jeweils ab 6,0 m Bohrlochteufe nach einer Stunde gemessenen Ruhedrucke die folgenden, etwas höheren Beträge auf:

- a) Horizontalbohrung RB475: Mittlerer Ruhedruck  $p_R = 11,9$  MPa,
- b) Vertikalbohrung RB476: Mittlerer Ruhedruck  $p_R = 12,3$  MPa,
- c) Horizontalbohrung RB468: Mittlerer Ruhedruck  $p_R = 11,5$  MPa.

### 5.2.3 Ergebnisse der Dilatometermessungen

Die in den Dilatometerversuchen ermittelten Last-Deformationsdiagramme (Belastung = Dilatometerdruck, Deformation = Änderung des Bohrlochdurchmessers) sind exemplarisch für den Versuch M2B1DI01 in Anlage 5.29 für jede Messrichtung dargestellt.

Die Ergebnisse der an Lokation 2 durchgeführten Dilatometerversuche M2B1DI01, M2B2DI01 und M2B3DI01 sind tabellarisch in Anlage 5.30 zusammengestellt. Im Mittel ergibt sich für Bohrung RB421 (B1)  $E = 21,6$  GPa, für Bohrung RB422 (B2)  $E = 24,5$  GPa und für Bohrung RB423 (B3)  $E = 24,4$  GPa. Im Gesamtmittel ergibt sich  $E = 23,5$  GPa. Dieser Wert stimmt zufriedenstellend überein mit dem in geomechanischen Modellberechnungen verwendeten Wert von 25 GPa (BGR 2000).

### 5.2.4 Ergebnisse der Laborversuche

Für die Auswertung der Überbohrversuche wurden im Labor an den beim Überbohren gewonnenen hohlzylindrischen Prüfkörpern Be- und Entlastungsversuche durchgeführt. Die

Versuchs- und Prüfkörperdaten (Kernbezeichnung, stratigraphische Einheit und Entnahmetiefe) sind in Anlage 5.32 zusammengestellt.

Exemplarisch sind für den Versuch M2B1UB04 die ermittelten Last-Deformationsdiagramme in Anlage 5.31 dargestellt. Für jede der vier radialen Messrichtungen ist die Prüfkörperbelastung als radial wirkender Manteldruck über der Prüfkörperverformung (Durchmesseränderung der Pilotbohrung) aufgetragen.

Die jeweils für vier Messrichtungen aus jeder einzelnen Laststufe ermittelten E-Moduli sind für die drei Bohrungen RB421 (B1), RB422 (B2) und RB423 (B3) in Anlage 5.32 tabellarisch zusammengestellt. Darüber hinaus ist i. a. für jeden Prüfkörper ein mittlerer E-Modul angegeben. Für jede Bohrung ergeben sich daraus folgende Gesamtmittelwerte:

Bohrung RB421 (B1):  $E = 31,0 \text{ GPa}$ ,

Bohrung RB422 (B2):  $E = 30,0 \text{ GPa}$ ,

Bohrung RB423 (B3):  $E = 30,6 \text{ GPa}$  (ohne Berücksichtigung von M2B3UB13).

Diese Werte stimmen gut überein mit Ergebnissen von Laborversuchen an zylindrischen Steinsalzprüfkörpern (BGR, 1996a).

### 5.3 Lokation 3 (Bohrbereich 3.02)

Die Lokation 3 (Bohrbereich 3.02) liegt westlich des Zentralbereichs der Grube Bartensleben auf der 2. Sohle ca. 50 bis 70 m östlich des Kalilagers B im Bereich der Abzweigung der 1. Südlichen Richtstrecke (12YER51 R001) vom Ostquerschlag (127YEQ01 R001). Diese Lokation wurde gewählt, um Daten über den Gebirgsspannungszustand aus einem relativ schwach durchbauten Grubenbereich in vergleichsweise geringer Teufe zu erhalten (Anlage 2.1). Die Lokation bei der Abzweigung der 1. Südlichen Richtstrecke bot sich zudem an, um die erforderliche dreidimensionale Auslage der Bohrungen RB435, RB437 und RB439 zu erhalten (Anlage 5.33).

Wegen möglicher Gasführung wurde vor den für Überbohrversuche erforderlichen Kernbohrungen jeweils eine ungekehrte Vorbohrung mit Präventer abgeteuft, die auch der Durchführung von Hydrofrac-Versuchen diene.

Für die Spannungsmessungen wurden die folgenden Untersuchungsbohrungen gestoßen, deren Daten in Anlage 5.33 zusammengestellt sind:

- Horizontalbohrung RB427 (5,5<sup>gon</sup> steigend, Länge 40 m) für Hydrofrac-Versuche,
- Vertikalbohrung RB428 (100<sup>gon</sup>, Hochbohrung, Länge 30 m) für Hydrofrac-Versuche,
- Horizontalbohrung RB429 (5,5<sup>gon</sup> steigend, Länge 40) m für Hydrofrac-Versuche,
- Horizontalbohrung RB434 (B1) (-5,5<sup>gon</sup>, Länge 33,3 m) für Überbohrversuche und anschließend für Langzeitspannungsmessungen,
- Vertikalbohrung RB435 (B2) (-100<sup>gon</sup>, Länge 30 m) für Überbohrversuche und anschließend für Langzeitspannungsmessungen,
- Horizontalbohrung RB436 (B3) (-5,5<sup>gon</sup>, Länge 39,9 m) für Überbohrversuche und anschließend für Langzeitspannungsmessungen,
- Schrägbohrung RB437 (-50<sup>gon</sup>, Länge 32,5 m) für Langzeitspannungsmessungen,
- Schrägbohrung RB439 (-50<sup>gon</sup>, Länge 32,5 m) für Langzeitspannungsmessungen.

### 5.3.1 Ingenieurgeologische Untersuchungsergebnisse

Der Bohrbereich 3.02 befindet sich stratigraphisch innerhalb des Hauptsalzes (z2HS) der Staßfurt-Folge. Strukturell liegt er im Zentrum des Östlichen Schachtsattels 1. Die Sattelachse kreuzt den Hauptquerschlag direkt im Bereich der Abzweigung der 1. Südlichen Richtstrecke. Die Achse streicht etwa N-S; die Achsenebene ist 20° bis 25° ostvergent.

Das Salz der Folge z2HS ist überwiegend fein- bis mittelkörnig, weist aber lokal Großkristalle bis zu 10 cm Durchmesser auf (Anlagen 5.34 bis 5.36). Es ist milchig-farblos und von zahlreichen feinen Anhydrit-Linien durchzogen. Diese können stark verbogen, zerrissen und zu Anhydritflocken oder -schlieren aufgearbeitet sein.

### 5.3.2 Ergebnisse der Spannungsmessungen

#### **Überbohrversuche:**

Die Daten der Überbohrversuche, die in den drei Untersuchungsbohrungen RB434 (B1), RB435 (B2) und RB436 (B3) durchgeführt wurden, sind tabellarisch in Anlage 5.37 zusammengestellt. Neben der Versuchsbezeichnung sind die jeweilige stratigraphische Einheit, das Versuchsdatum und die Bohrlochtiefe sowie eine Beurteilung des Kerngewinns und der Versuchsqualität angegeben. Ferner sind die der Auswertung zugrundeliegenden Werte für den Elastizitätsmodul aufgeführt (s. dazu Kapitel 5.3.4).

Anlage 5.38 zeigt exemplarisch die in einem Überbohrversuch im Steinsalz an Lokation 3 gemessenen Entspannungsdeformationen.

Die Ergebnisse der Überbohrversuche sind in den Anlagen 5.39 bis 5.41 zusammenfassend dargestellt. Für jede Messbohrung sind die maximalen und minimalen Spannungen  $S_1$  und  $S_2$ , die Orientierung von  $S_1$  und die Spannungsanisotropie nach Gl. (3) angegeben.

Für die Horizontalbohrung RB434 (B1) ergeben sich folgende Resultate (Anlage 5.39):

- gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 8,0$  MPa,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 6,8$  MPa,
- Orientierung von  $S_1$ : uneinheitlich; im vorderen Bohrlochbereich vorwiegend subvertikal (Azimut beträgt im Mittel  $37^\circ$ ), im hinteren Bohrlochbereich ca.  $133^\circ$ ,
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,17$  (Tendenz:  $a$  nimmt mit zunehmender Bohrlochtiefe von ca. 1,3 auf ca. 1,1 ab).

Für die Vertikalbohrung RB435 (B2) ergeben sich folgende Resultate (Anlage 5.40):

- gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 8,4$  MPa,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 6,6$  MPa,
- Orientierung von  $S_1$ : Azimut (bezogen auf N) ist uneinheitlich; im tieferen Bohrbereich ab 16 m beträgt das Azimut im Mittel ca.  $143^\circ$ ,
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,27$ .

Für die Horizontalbohrung RB436 (B3) ergeben sich folgende Resultate (Anlage 5.41):

- gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 8,5$  MPa (Tendenz:  $S_1$  nimmt mit zunehmender Bohrlochtiefe ab),
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 7,4$  MPa (Tendenz:  $S_2$  nimmt mit zunehmender Bohrlochtiefe ab),
- Orientierung von  $S_1$ : nicht einheitlich.
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,15$ .

### **Hydrofrac-Versuche:**

Die wesentlichen Resultate der Hydrofrac-Versuche, insbesondere die gemessenen Ruhedruckwerte und die Zugfestigkeit als hydraulische Aufreißfestigkeit des Salzgesteins sind in den Anlagen 5.42 bis 5.44 zusammengestellt.

Für die Horizontalbohrung RB427 ergeben sich aus der Frac-Phase nach einer Messdauer von einer Stunde Ruhedruckwerte zwischen 5,4 und 7,7 MPa, im Mittel 6,8 MPa (Anlage 5.42). Die in der 1. und 2. Refrac-Phase ebenfalls nach einer Stunde ermittelten Werte liegen zwischen 5,6 und 7,7 MPa (im Mittel 6,8 MPa). Es zeigt sich, dass die Ruhedruckwerte der Refrac-Phasen i. a. mit denen der Frac-Phase sehr gut übereinstimmen. Für die hydraulischen

sche Zugfestigkeit des Salzgesteins lassen sich Werte zwischen 2,0 und 5,2 MPa, im Mittel 3,6 MPa, angeben.

Für die Vertikalbohrung RB428 ergeben sich aus der Frac-Phase nach einer Messdauer von einer Stunde Ruhedruckwerte zwischen ca. 2,6 und 6,2 MPa, im Mittel 4,8 MPa (Anlage 5.43). Die in der 1. und 2. Refrac-Phase ebenfalls nach einer Stunde ermittelten Ruhedrucke weisen Werte zwischen 2,8 und 6,2 MPa (im Mittel 4,9 MPa) auf. Auch hier wird deutlich, dass in den Refrac-Phasen vorwiegend die gleichen Ruhedruckwerte wie in den Frac-Phasen gemessen wurden. Für die hydraulische Zugfestigkeit des Salzgesteins ergeben sich Werte zwischen 0,8 und 5,1 MPa, im Mittel 3,1 MPa.

Für die Horizontalbohrung RB429 ergeben sich aus der Frac-Phase nach einer Stunde Ruhedruckwerte zwischen ca. 1,1 und 8,8 MPa, im Mittel 7,0 MPa (Anlage 5.44). Die in der 1. und 2. Refrac-Phase ebenfalls nach einer Stunde ermittelten Werte liegen zwischen 1,1 und 8,9 MPa (im Mittel 7,2 MPa). Es zeigt sich, dass die Ruhedruckwerte der Refrac-Phasen i. a. mit denen der Frac-Phase sehr gut übereinstimmen. Für die hydraulische Zugfestigkeit des Salzgesteins lassen sich Werte zwischen 1,0 und 4,9 MPa, im Mittel 2,9 MPa, angeben.

Die in den Frac-Versuchen ermittelten Resultate lassen sich folgendermaßen zusammenfassen (angegeben sind die Mittelwerte der in den Frac- und Refrac-Phasen nach einer Stunde gemessenen Ruhedruckwerte):

- a) Horizontalbohrung RB427: Ruhedruck  $p_R = 6,8$  MPa,
- b) Vertikalbohrung RB428: Ruhedruck  $p_R = 4,9$  MPa,
- c) Horizontalbohrung RB429: Ruhedruck  $p_R = 7,1$  MPa.

### 5.3.3 Ergebnisse der Dilatometermessungen

An der Lokation 3 (Bohrbereich 3.02) wurde ein Dilatometerversuch in der Vertikalbohrung RB436 (B3) durchgeführt. Die ermittelten Last-Deformationsdiagramme (Belastung = Dilatometerdruck, Deformation = Änderung des Bohrlochdurchmessers) sind in Anlage 5.45 für jede Messrichtung dargestellt.

Die Ergebnisse des Dilatometerversuchs M3B3DI01 sind tabellarisch in Anlage 5.46 zusammengestellt. Im Mittel ergibt sich bei Annahme einer Querdehnungszahl  $\nu = 0,27$  der Elastizitätsmodul zu  $E = 23,2$  GPa. Dieser Wert stimmt zufriedenstellend mit dem in geomechanischen Modellberechnungen verwendeten Wert von 25 GPa (BGR 2000) überein.

### 5.3.4 Ergebnisse der Laborversuche

Für die Auswertung der Überbohrversuche wurden im Labor an den beim Überbohren gewonnenen hohlzylindrischen Prüfkörpern Be- und Entlastungsversuche durchgeführt. Die Versuchs- und Prüfkörperdaten (Kernbezeichnung, stratigraphische Einheit und Entnahmetiefe) sind in Anlage 5.48 zusammengestellt.

Exemplarisch sind für den Versuch M3B1UB04 die ermittelten Last-Deformationsdiagramme in Anlage 5.47 dargestellt. Für jede der vier radialen Messrichtungen ist die Prüfkörperbelastung als radial wirkender Manteldruck über der Prüfkörperverformung (Durchmesseränderung der Pilotbohrung) aufgetragen.

Die jeweils für vier Messrichtungen aus jeder einzelnen Laststufe ermittelten E-Moduli sind für die drei Bohrungen RB434 (B1), RB435 (B2) und RB436 (B3) in Anlage 5.48 tabellarisch zusammengestellt. Darüber hinaus ist für jeden Prüfkörper ein mittlerer E-Modul angegeben. Für jede Bohrung ergeben sich daraus folgende Gesamtmittelwerte:

Bohrung RB434 (B1):	$E = 33,2 \text{ GPa}$ ,
Bohrung RB435 (B2):	$E = 33,7 \text{ GPa}$ ,
Bohrung RB436 (B3):	$E = 34,8 \text{ GPa}$ .

Diese Werte stimmen gut mit Ergebnissen von Laborversuchen an zylindrischen Steinsalzprüfkörpern überein (BGR 1996).

### 5.4 Lokation 4 (Bohrbereich 3.04)

Die Lokation 4 (Bohrbereich 3.04) befindet sich im Ostfeld der Grube Bartensleben auf der 4. Sohle (Anlage 2.1). Diese Lokation wurde gewählt, weil das Ostfeld als Einlagerungsbereich ausgewählt wurde und um Messdaten über den Gebirgsspannungszustand insbesondere im Hauptanhydrit des Ostfeldes zu erhalten.

Wegen möglicher Gasführung wurde vor den für die Überbohrversuche erforderlichen Kernbohrungen jeweils eine ungekernte Vorbohrung mit Präventer abgeteuft, die auch der Durchführung von Hydrofrac-Versuchen diene.

Für die Spannungsmessungen wurden vom Ostquerschlag (17YEQ01 R001) aus die folgenden Untersuchungsbohrungen gestoßen, deren Daten in Anlage 5.49 zusammengestellt sind:

- Horizontalbohrung RB440 (Neigung  $5,5^{\text{gon}}$  steigend, Länge 40,0 m) für Hydrofrac-Versuche im Hauptanhydrit,
- Horizontalbohrung RB441 (Neigung  $5,5^{\text{gon}}$  steigend, Länge 56,0 m) für Hydrofrac-Versuche im Hauptanhydrit,
- Horizontalbohrung RB442 (Neigung  $5,5^{\text{gon}}$  steigend, Länge 40,2 m) für Hydrofrac-Versuche im Hauptanhydrit,
- Horizontalbohrung RB447 (B1) ( Neigung  $-5,5^{\text{gon}}$  , Länge 27,9 m) für Überbohrversuche im Hauptanhydrit,
- Horizontalbohrung RB448 (B2) (Neigung  $-5,5^{\text{gon}}$  , Länge 40,4 m) für Überbohrversuche im Hauptanhydrit und anschließend für Langzeitspannungsmessungen mit stationären Spannungsgebern,
- Horizontalbohrung RB449 (B3) (Neigung  $-5,5^{\text{gon}}$  , Länge 29,1 m) für Überbohrversuche im Hauptanhydrit,
- Horizontalbohrung RB467 (B4) (Neigung  $0^{\text{gon}}$  , Länge 25,1 m) für Überbohrversuche im Steinsalz.

Die Ansatzpunkte für die Bohrungen RB440, RB441, RB447 und RB448 liegen an der östlichen Flanke der Ostmulde in der Ortsbrust des Ostquerschlages, ca. 30 m östlich der Grenze Leinsteinsalz / Hauptanhydrit. Die Ansatzpunkte der Bohrungen RB442 und RB449 befinden sich an der westlichen Flanke der Ostmulde am nördlichen Stoß des Ostquerschlages, ca. 40 m östlich der Grenze Grauer Salztou / Hauptanhydrit. Der Ansatzpunkt der Bohrung RB467 liegt am nördlichen Stoß des Ostquerschlages, ca. 40 m von der Ortsbrust entfernt bzw. ca. 10 m westlich der an der östlichen Flanke der Ostmulde anzutreffenden Grenze Leinsteinsalz / Hauptanhydrit.

#### 5.4.1 Ingenieurgeologische Untersuchungsergebnisse

Das Ostfeld der Grube Bartensleben befindet sich strukturell in der Ostmulde (BGR 1999b). Es handelt sich um eine Großmulde mit flachen B-Achsen ohne signifikante Vergenz. Sie streicht mit NE - SE annähernd parallel zum Streichen der Allertalzone. Die Muldenflanken werden von mächtigen Großklippen des Hauptanhydrits (z3HA) bestimmt. Der Muldenkern wird im Bereich des Grubengebäudes von Schichten der Leine-Folge (z3) und gegen das Hangende von Einheiten der Aller-Folge (z4) gebildet. Die Ostmulde wird im W durch den Ostsattel und im E durch den Randsattel I tektonisch begrenzt. Diese Großsättel bestehen

aus Einheiten der Staßfurt-Folge (z2). Gegen das Liegende bilden ebenfalls Einheiten der Staßfurt-Folge (z2) den Abschluss. Insgesamt bilden die Schichten im Ostfeld eine normale stratigraphische Abfolge.

Die Grubenbaue des Ostfelds liegen in Einheiten der Leine-Folge (z3). Durch Steinsalzabbau entstanden mehrere große Abbaue, die durch Strecken und Rolllöcher untereinander in Verbindung stehen. Die Abbaue sind nur über zwei Strecken (Ostquerschläge 2. und 4. Sohle) mit dem übrigen Grubengebäude Bartensleben verbunden. Ziel des Abbaus waren die Schichten des Anhydritmittel- (z3AM), des Bank-/Bänder- (z3Bk/BD) und des Orangesalzes (z3OS) sowie randlich des Liniensalzes (z3LS).

Der Bohrbereich 3.04 liegt vollständig in den Schichten des Hauptanhydrits (z3HA) und des Liniensalzes (z3LS) der Leine-Folge (z3). Der Hauptanhydrit besteht aus einem recht reinen Anhydritgestein, das sich nur im Magnesitgehalt unterscheidet. Er wird in dreizehn Zonen untergliedert. Die Zonen 1 bis 7 sind dunkel- bis schwarzgrau gefärbt und besitzen einen relativ hohen Magnesitanteil, der z. T. in größeren Aggregaten vorkommt. Die Basis des Hauptanhydrits lagert der liegenden Schichtenfolge des Gebänderten Deckanhydrits (z2DA) bis Leine-Karbonat (z3LK) konkordant auf und zeichnet sich durch eine relativ gleichmäßige Gesamtschichtmächtigkeit aus. Die Zonen 8 bis 11 sind hellgrau gefärbt und variieren in der Mächtigkeit. Der Kontakt zum hangenden Liniensalz ist nur bei normal entwickeltem Hauptanhydrit konkordant. In Klippenfazies kann der Hauptanhydrit bis in das Anhydritmittelsalz (z3AM) aufragen. Hier nimmt die Mächtigkeit der Zonen 8 bis 11 von ca. 40 bis 50 m auf bis ca. 110 m zu. Der Kontakt zum Linien- bis Bank-/Bändersalz ist in diesem Fall diskordant.

Die häufig auftretenden Klüfte sind mit Sylvin, Steinsalz und Carnallit, selten mit Ton gefüllt. Vereinzelt ist die Kluffüllung nicht vollständig ausgebildet, so dass partiell offene Bereiche auftreten.

Das Liniensalz (z3LS) besteht hier aus einem Steinsalz mit Kristallgrößen von 2 bis 10 mm, vereinzelt bis 30 mm. Es ist klar, bereichsweise hellgrau bis milchig-trüb ausgebildet, und anhydritische Linienpakete wechsellagern mit reineren Salzpartien. Die Linienpakete sind in der Regel 25 bis 60 cm, im Durchschnitt 30 cm mächtig. Sie bestehen aus 10 bis 20 Linien, die oft zu mehreren Bündeln zusammengefasst werden können. Im Bereich der Bündel ist das Steinsalz diffus grau und nur schwach durchscheinend. Die lagige Anordnung der Bündel gibt die Schichtung an.

Im Gegensatz zum Liniensalz sind durchgehende Anhydrit-Lagen im Orangesalz die Ausnahme. Die wenigen Linien bestehen aus Anhydrit-Flocken, die lagig angeordnet sind. Das Salz ist meist feinkörnig, bereichsweise aber auch mittelkörnig oder mit einzelnen Großkristallen bis über 10 cm Länge durchsetzt.

Die Ergebnisse der ingenieurgeologischen Bohrkernaufnahmen sind in den Anlagen 5.50 bis 5.53 dargestellt.

#### 5.4.2 Ergebnisse der Spannungsmessungen

##### **Überbohrversuche:**

Die Daten der Überbohrversuche, die in den vier Untersuchungsbohrungen RB447 (B1), RB448 (B2), RB449 (B3) und RB467 (B4) durchgeführt wurden, sind tabellarisch in Anlage 5.54 zusammengestellt. Neben der Versuchsbezeichnung sind die stratigraphische Einheit, das Versuchsdatum und die Bohrlochtiefe sowie eine Beurteilung des Kerngewinns und der Versuchsqualität angegeben. Ferner sind die der Auswertung zugrundeliegenden Werte für den Elastizitätsmodul aufgeführt (s. dazu Kapitel 5.4.4).

Anlage 5.55 zeigt exemplarisch die in einem Überbohrversuch im Anhydrit gemessenen Entspannungsdeformationen, deren Verlauf für Messungen in einem Gebirge mit vorwiegend elastischen Verformungseigenschaften charakteristisch ist.

Die Ergebnisse der Überbohrversuche sind in den Anlagen 5.56 bis 5.59 zusammenfassend dargestellt. Für jede Messbohrung sind die maximalen und minimalen Spannungen  $S_1$  und  $S_2$ , die Orientierung von  $S_1$  (Azimut) und die Spannungsanisotropie nach Gl. (3) angegeben.

Für die Bohrung RB447 (B1) im Hauptanhydrit ergeben sich folgende Resultate (Anlage 5.56):

- gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 16,9$  MPa,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 12,5$  MPa,
- Orientierung von  $S_1$ : annähernd vertikal (Azimut beträgt im Mittel  $19^\circ$ ),
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,35$ .

Für die Bohrung RB448 (B2) im Hauptanhydrit ergeben sich folgende Resultate (Anlage 5.57):

- gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 26,5$  MPa,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 22,0$  MPa,

- Orientierung von  $S_1$ : subvertikal bis horizontal (Azimut beträgt im Mittel ca.  $125^\circ$ ),
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,20$ .

Für die Bohrung RB449 (B3) im Hauptanhydrit ergeben sich folgende Resultate (Anlage 5.58):

- gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 10,9$  MPa,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 7,4$  MPa,
- Orientierung von  $S_1$ : annähernd vertikal (Azimut beträgt im Mittel  $20^\circ$ ),
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,47$ .

Für die Bohrung RB467 (B4) im Steinsalz ergeben sich ohne Berücksichtigung der im Nahbereich des Ostquerschlages durchgeführten Versuche M4B4UB01 bis M4B4UB03 folgende Resultate (Anlage 5.59):

- gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 8,3$  MPa,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 7,5$  MPa,
- Orientierung von  $S_1$ : annähernd vertikal bis subvertikal (Azimut beträgt im Mittel  $19^\circ$ ),
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,10$ .

#### **Hydrofrac-Versuche:**

Die wesentlichen Resultate der Hydrofrac-Versuche, insbesondere die gemessenen Ruhedruckwerte und die Zugfestigkeit als hydraulische Aufreißfestigkeit des Salzgesteins sind in den Anlagen 5.60 bis 5.62 zusammengestellt.

Für die Bohrung RB440 ergeben sich aus der Frac-Phase nach einer Messdauer von einer Stunde Ruhedruckwerte zwischen 5,9 und 12,4 MPa, im Mittel 10,4 MPa (Anlage 5.60). Die in der 1. und 2. Refrac-Phase ebenfalls nach einer Stunde ermittelten Werte liegen zwischen 5,6 und 13,5 MPa (im Mittel 10,6 MPa). Das Gesamtmittel aller Ruhedruckwerte beträgt 10,5 MPa. Es zeigt sich, dass die Ruhedruckwerte der Refrac-Phasen i. a. mit denen der Frac-Phase sehr gut übereinstimmen. Für die hydraulische Zugfestigkeit des Salzgesteins ergeben sich Werte zwischen 4,0 und 11,6 MPa, im Mittel 8,6 MPa.

Für die Bohrung RB441 ergeben sich aus der Frac-Phase nach einer Messdauer von einer Stunde Ruhedruckwerte zwischen ca. 7,5 und 13,0 MPa, im Mittel 10,5 MPa (Anlage 5.61). Die in der 1. und 2. Refrac-Phase ebenfalls nach einer Stunde ermittelten Ruhedrucke weisen Werte zwischen 7,5 und 14,1 MPa (im Mittel 10,9 MPa) auf. Das Gesamtmittel aller Ruhedruckwerte beträgt 10,8 MPa. Es wird auch hier deutlich, dass in den Refrac-Phasen vorwiegend die gleichen Ruhedruckwerte wie in den Frac-Phasen gemessen wurden. Für die

hydraulische Zugfestigkeit des Salzgesteins ergeben sich Werte zwischen 7,6 und 12,4 MPa, im Mittel 10,2 MPa.

Für die Bohrung RB442 ergeben sich aus der Frac-Phase nach einer Stunde Ruhedruckwerte zwischen ca. 2,1 und 7,6 MPa, im Mittel 5,6 MPa (Anlage 5.62). Die in der 1. und 2. Refrac-Phase ebenfalls nach einer Stunde ermittelten Werte liegen zwischen 3,4 und 9,3 MPa (im Mittel 6,7 MPa). Das Gesamtmittel aller Ruhedruckwerte beträgt 6,3 MPa. Es zeigt sich, dass die Ruhedruckwerte der Refrac-Phasen i. a. mit denen der Frac-Phase sehr gut übereinstimmen. Für die hydraulische Zugfestigkeit des Salzgesteins ergeben sich Werte zwischen 4,2 und 22,1 MPa, im Mittel 12,4 MPa.

Die in den Frac-Versuchen ermittelten Resultate lassen sich folgendermaßen zusammenfassen (angegeben sind die Mittelwerte der in den Frac- und Refrac-Phasen nach einer Stunde gemessenen Ruhedruckwerte, die annähernd der minimalen Hauptspannung entsprechen):

- a) Horizontalbohrung RB440: Ruhedruck  $p_R = 10,5$  MPa,
- b) Horizontalbohrung RB441: Ruhedruck  $p_R = 10,8$  MPa,
- c) Horizontalbohrung RB442: Ruhedruck  $p_R = 6,3$  MPa.

#### 5.4.3 Ergebnisse der Dilatometermessungen

An der Lokation 4 (Bohrbereich 3.04) wurden Dilatometerversuche in den Bohrungen RB448 (B2), RB449 (B3) und RB467 (B4) durchgeführt.

Die im Hauptanhydrit durchgeführten Dilatometermessungen weisen in den verschiedenen Messrichtungen teilweise deutlich unterschiedliche Last-Verformungskurven auf. So zeigen die in Anlage 5.63 exemplarisch für den Versuch M4B3DI01 dargestellten Messergebnisse, dass sich in den Messrichtungen 1 und 2 insbesondere im unteren Belastungs- und Entlastungsbereich bis ca. 8 MPa ein nichtlinearer Kurvenverlauf mit zunehmender Steigung ergibt, während Messrichtung 3 über den gesamten Belastungsbereich einen annähernd linearen Messwertverlauf zeigt. Dieser messtechnische Befund deutet auf ein anisotropes Verformungsverhalten des Anhydrits hin und kann auf den Einfluss von Klüften zurückgeführt werden. Im Belastungsbereich oberhalb von ca. 8 MPa weisen die Last-Verformungskurven aller Messrichtungen annähernd die gleiche Steigung auf. Für die weitere Auswertung wurden die oberen Entlastungsstufen (15 – 2 MPa und 20 – 2 MPa) herangezogen und die in den verschiedenen Messrichtungen ermittelten Steifigkeitswerte gemittelt.

Der im Steinsalz durchgeführte Dilatometerversuch M4B4DI01 zeigt bezüglich der Messrichtungen keine signifikanten Unterschiede und belegt das isotrope Verformungsverhalten von Steinsalz. Für die weitere Auswertung wurden die oberen Entlastungsstufen (10 – 2 MPa und 15 – 2 MPa) herangezogen und die in den verschiedenen Messrichtungen ermittelten Steifigkeitswerte gemittelt.

Die Ergebnisse der Dilatometerversuche sind tabellarisch in Anlage 5.64 zusammengestellt. Für den Hauptanhydrit ergeben sich bei Annahme einer Querdehnungszahl  $\nu = 0,27$  Elastizitätsmoduli zwischen 21,3 und 33,2 GPa. Diese Werte sind deutlich geringer als die an kompakten ungeklüfteten Prüfkörpern im Labor ermittelten Werte und belegen die gegenüber der Gesteinssteifigkeit geringere Gebirgssteifigkeit. Die in Dilatometermessungen ermittelten Gebirgssteifigkeiten entsprechen annähernd den in geomechanischen Modellberechnungen verwendeten Werten von 30 GPa (BGR 2000). Für das Steinsalzgebirge ergibt sich im Mittel ein Elastizitätsmodul von 25,2 GPa, der etwas geringer als die im Labor ermittelten Moduli ist. Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem in Modellberechnungen verwendeten Wert von 25 GPa überein (BGR 2000).

#### 5.4.4 Ergebnisse der Laborversuche

Für die Auswertung der Überbohrversuche (s. Kapitel 5.4.2) wurden an den beim Überbohren gewonnenen hohlzylindrischen Prüfkörpern im Labor Be- und Entlastungsversuche durchgeführt. Die Versuchs- und Prüfkörperdaten (Kernbezeichnung, stratigraphische Einheit und Entnahmetiefe) sind in Anlage 5.66 tabellarisch zusammengestellt.

Exemplarisch sind für den Versuch M4B1UB03 die ermittelten Last-Deformationsdiagramme in Anlage 5.65 dargestellt. Für jede der vier radialen Messrichtungen ist die Prüfkörperbelastung als radial wirkender Manteldruck über der Prüfkörperverformung (Durchmesseränderung der Pilotbohrung) aufgetragen.

Die jeweils für vier Messrichtungen aus jeder einzelnen Laststufe ermittelten E-Moduli sind für die Bohrungen RB447 (B1), RB448 (B2), RB449 (B3) und RB467 (B4) in Anlage 5.66 tabellarisch zusammengestellt. Darüber hinaus ist für jeden Prüfkörper ein mittlerer E-Modul angegeben. Für jede Bohrung ergeben sich daraus folgende Mittelwerte:

Bohrung RB447 (B1), Anhydrit:	E = 62,3 GPa,
Bohrung RB448 (B2), Anhydrit:	E = 60,5 GPa,
Bohrung RB449 (B3), Anhydrit:	E = 58,7 GPa,

Bohrung RB449 (B3), nur tieferer Bereich ab 20,36 m:  $E = 63,0 \text{ GPa}$ ,  
 Bohrung RB467 (B4), Steinsalz:  $E = 29,0 \text{ GPa}$ .

Diese Werte stimmen gut mit Ergebnissen von Laborversuchen an zylindrischen Steinsalz- und Anhydritprüfkörpern überein (BGR 1996).

## 5.5 Lokation 5 (Bohrbereich 3.06)

Die Lokation 5 (Bohrbereich 3.06) liegt im Nordfeld der Schachanlage Bartensleben auf der 4. Sohle an der Nordstrecke 17YER21 etwa 600 m nördlich des Schachtes Bartensleben (Anlage 2.1). Für die Spannungsmessungen wurden von einer Bohr- und Messnische, die querschlägig zur Nordstrecke angeordnet wurde, die folgenden Untersuchungsbohrungen gestoßen, deren Daten in Anlage 5.67 angegeben sind:

- Horizontalbohrung RB453 (Richtung  $315^{\text{gon}}$ , Neigung  $5,5^{\text{gon}}$ , steigend, Länge 40,0 m) für Hydrofrac-Versuche,
- Horizontalbohrung RB454 (Richtung  $215^{\text{gon}}$ , Neigung  $5,5^{\text{gon}}$ , steigend, Länge 40,4 m) für Hydrofrac-Versuche,
- Vertikalbohrung RB455 (Neigung  $-100^{\text{gon}}$ , Länge 22,6 m) für Hydrofrac-Versuche,
- Horizontalbohrung RB460 (B1) (Richtung  $315^{\text{gon}}$ , Neigung  $-5,5^{\text{gon}}$ , Länge 40,0 m) für Überbohrversuche und anschließend für Langzeitspannungsmessungen mit stationären Spannungsgebern,
- Horizontalbohrung RB461 (B2) (Richtung  $215^{\text{gon}}$ , Neigung  $-5,5^{\text{gon}}$ , Länge 40,1 m) für Überbohrversuche und anschließend für Langzeitspannungsmessungen mit stationären Spannungsgebern,
- Vertikalbohrung RB462 (B3) (Neigung  $-100^{\text{gon}}$ , Länge 24,8 m) für Überbohrversuche und anschließend für Langzeitspannungsmessungen mit stationären Spannungsgebern,
- Schrägbohrung RB464 (Richtung  $215^{\text{gon}}$ , Neigung  $-45^{\text{gon}}$ , Länge 28,3 m) für Langzeitspannungsmessungen mit stationären Spannungsgebern,
- Schrägbohrung RB465 (Richtung  $315^{\text{gon}}$ , Neigung  $-45^{\text{gon}}$ , Länge 28,3 m) für Langzeitspannungsmessungen mit stationären Spannungsgebern.

### 5.5.1 Ingenieurgeologische Untersuchungsergebnisse

Nordfeld und Nordstrecke der Grube Bartensleben befinden sich strukturell in der Hauptmulde (BGR 1997c). Die Hauptmulde ist durchgehend im Bereich der Grubenfelder Bartensleben und Marie anzutreffen. In ihr liegt der größte Teil des Grubengebäudes. Aufgeschlossen sind die Schichten vom Grauen Salzton bis in die hohe Leine-Folge. Der Hauptanhydrit ist in

Schollen zerlegt und als Muldenauskleidung bis zur Ostflanke verbreitet. Nördlich der Ostquerschläge Bartensleben wird die Hauptmulde nach Osten hin breiter und bietet so Raum für die auflagernden Schichten der Aller-Folge.

An der gesamten Westflanke der Hauptmulde steht der Hauptanhydrit bis zum Salzspiegel an. Er ist durch stark verstellte und z. T. gestaffelt stehende Schollen charakterisiert. Im Nordfeld Bartensleben ist die Hauptmulde durch Aufsattelungen von Schichten der Staßfurt-Folge spezialgefaltet. Dadurch sind Hauptanhydritschollen bis auf die Höhe der 4. Sohle geschleppt worden.

#### **Stratigraphie der Lokation 5 (Bohrbereich 3.06):**

Die Lokation (Bohrbereich 3.06) liegt stratigraphisch innerhalb des Hauptanhydrits (z3HA), des Bank- und Bändersalzes z3BK/BD und des Anhydritmittelsalzes (z3AM1-2).

#### **Bohrkernbeschreibung:**

Das Salz der Folge z3BK/BD ist überwiegend feinkörnig, weist aber lokal Großkristalle bis zu 10 cm Durchmesser auf. Es ist von Anhydrit-Linien durchzogen und bereichsweise mittel bis stark durch fein verteilten Anhydrit verunreinigt (Anlagen 5.68 bis 5.70). In den Bohrungen RB460 und RB462 wurde im Endbereich Anhydrit (z3HA11-12) angefahren, der von dünnen Tonbändern durchzogen ist und Klüfte aufweist, die überwiegend mit Carnallit gefüllt sind.

#### 5.5.2 Ergebnisse der Spannungsmessungen

##### **Überbohrversuche:**

Die Daten der Überbohrversuche, die in den drei Untersuchungsbohrungen RB460 (B1), RB461 (B2) und RB462 (B3) durchgeführt wurden, sind tabellarisch in Anlage 5.71 zusammengestellt. Neben der Versuchsbezeichnung sind die stratigraphische Einheit, das Versuchsdatum, die Bohrlochtiefe sowie eine Beurteilung des Kerngewinns und der Versuchsqualität angegeben. Ferner sind die der Auswertung zugrundeliegenden Werte für den Elastizitätsmodul aufgeführt (s. dazu Kap. 5.5.4).

Anlage 5.72 zeigt exemplarisch die in einem Überbohrversuch im Steinsalz gemessenen Entspannungsdeformationen, deren Verlauf für Messungen in einem Gebirge mit vorwiegend inelastischen Verformungseigenschaften charakteristisch ist.

Die Ergebnisse der Überbohrversuche sind in den Anlagen 5.73 bis 5.75 zusammenfassend dargestellt. Für jede Messbohrung sind die maximalen und minimalen Spannungen  $S_1$  und  $S_2$ , die Orientierung von  $S_1$  (Azimut) und die Spannungsanisotropie nach Gl. (3) angegeben.

Für die Bohrung RB460 (B1) ergeben sich im Steinsalz bis ca. 28 m Teufe folgende Resultate (Anlage 5.73):

- gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 11,7$  MPa,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 10,2$  MPa,
- Orientierung von  $S_1$ : annähernd horizontal (Azimut beträgt im Mittel  $74^\circ$ ),
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,14$ .

Für die Bohrung RB460 (B1) ergeben sich im Hauptanhydrit ab ca. 28 m Teufe folgende Resultate (Anlage 5.73):

- gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 14,7$  MPa,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 7,4$  MPa,
- Orientierung von  $S_1$ : annähernd horizontal (Azimut beträgt im Mittel  $83^\circ$ ),
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 2,00$ .

Für die Bohrung RB461 (B2) ergeben sich im Steinsalz folgende Resultate (Anlage 5.74):

- gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 11,5$  MPa,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 10,1$  MPa,
- Orientierung von  $S_1$ : subvertikal (Azimut beträgt im Mittel ca.  $29^\circ$ ),
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,15$ .

Für die Bohrung RB462 (B3) ergeben sich im Steinsalz bis ca. 23 m Teufe folgende Resultate (Anlage 5.75):

- gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 16,3$  MPa,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 13,5$  MPa,
- Orientierung von  $S_1$ : annähernd NE (Azimut beträgt im Mittel  $40^\circ$ ),
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,22$ .

Für die Bohrung RB462 (B3) ergibt sich im Hauptanhydrit ab ca. 23 m Teufe (Anlage 5.75):

- gemittelte maximale Spannung  $S_1 \approx 28,6$  MPa,
- gemittelte minimale Spannung  $S_2 \approx 23,2$  MPa,
- Orientierung von  $S_1$ : annähernd E (Azimut beträgt im Mittel  $76^\circ$ ),
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,24$ .

**Hydrofrac-Versuche:**

Die wesentlichen Resultate der Hydrofrac-Versuche, insbesondere die gemessenen Ruhedruckwerte und die Zugfestigkeit als hydraulische Aufreißfestigkeit des Salzgesteins sind in den Anlagen 5.76 bis 5.78 zusammengestellt.

In Bohrung RB453 ergeben sich über die Bohrlochlänge sehr unterschiedliche Messergebnisse (Anlage 5.76). Da in der Bohrung RB460, die annähernd die gleiche Orientierung wie RB453 aufweist, ab ca. 28 m Anhydrit erbohrt wurde (Anlage 5.68), ist auch für RB453 in diesem Bereich der Übergang von Steinsalz zu Anhydrit zu erwarten. Aufgrund des Messwertverlaufs, insbesondere hinsichtlich der ermittelten hydraulischen Zugfestigkeiten, kann dieser Übergang für eine Bohrlochteufe von 25 m angenommen werden. Für den vorderen Bohrlochbereich bis 25 m (Steinsalz) ergeben sich dann für das Mittel der Ruhedruckwerte aus Frac-, 1. Refrac- und 2. Refrac-Phase Werte zwischen 7,7 und 12,6 MPa (Gesamtmittel 10,4 MPa). Die hydraulische Zugfestigkeit des Salzgesteins weist Werte zwischen 1,6 und 5,4 MPa bei einem Mittel von 3,2 MPa auf. Für den tieferen Bohrlochbereich ab 25 m (Anhydrit) ergeben sich für das Mittel der verschiedenen Frac-Phasen Werte zwischen 1,7 und 5,0 MPa (Gesamtmittel 3,5 MPa). Die hydraulische Zugfestigkeit des Anhydrits liegt zwischen 4,1 und 8,3 MPa bei einem Mittel von 7,1 MPa.

Für die Bohrung RB454 ergeben sich aus der Frac-Phase nach einer Messdauer von einer Stunde Ruhedruckwerte zwischen ca. 8,3 und 14,6 MPa, im Mittel 11,2 MPa (Anlage 5.77). Die in der 1. und 2. Refrac-Phase ebenfalls nach einer Stunde ermittelten Ruhedrucke weisen Werte zwischen 8,9 und 13,9 MPa (im Mittel 11,6 MPa) auf. Das Gesamtmittel aller Ruhedruckwerte beträgt 11,5 MPa. Es wird auch hier deutlich, dass in den Refrac-Phasen vorwiegend die gleichen Ruhedruckwerte wie in den Frac-Phasen gemessen wurden. Für die hydraulische Zugfestigkeit des Salzgesteins ergeben sich Werte zwischen 1,5 und 6,1 MPa, im Mittel 3,4 MPa.

Für die Bohrung RB455 ergeben sich aus der Frac-Phase nach einer Stunde Ruhedruckwerte zwischen ca. 5,1 und 16,6 MPa, im Mittel 12,8 MPa (Anlage 5.78). Die in der 1. und 2. Refrac-Phase ebenfalls nach einer Stunde ermittelten Werte liegen zwischen 5,7 und 16,6 MPa (im Mittel 13,0 MPa). Das Gesamtmittel aller Ruhedruckwerte beträgt 12,9 MPa. Es zeigt sich, dass die Ruhedruckwerte der Refrac-Phasen i. a. mit denen der Frac-Phase sehr gut übereinstimmen. Für die hydraulische Zugfestigkeit des Salzgesteins ergeben sich Werte zwischen 1,5 und 7,3 MPa, im Mittel 4,2 MPa.

Die in den Frac-Versuchen ermittelten Resultate lassen sich folgendermaßen zusammenfassen (angegeben sind die Mittelwerte der in den Frac- und Refrac-Phasen nach einer Stunde gemessenen Ruhedruckwerte, die annähernd der minimalen Gebirgshauptspannung entsprechen):

- |  |                             |
|--|-----------------------------|
| a) Horizontalbohrung RB453 bis 25 m Teufe (Steinsalz): | Ruhedruck $p_R = 10,4$ MPa, |
| b) Horizontalbohrung RB453 ab 25 m Teufe (Anhydrit):   | Ruhedruck $p_R = 3,5$ MPa,  |
| c) Horizontalbohrung RB454 (Steinsalz):                | Ruhedruck $p_R = 11,5$ MPa, |
| d) Vertikalbohrung RB455 (Steinsalz):                  | Ruhedruck $p_R = 12,9$ MPa. |

### 5.5.3 Ergebnisse der Dilatometermessungen

An der Lokation 5 (Bohrbereich 3.06) wurden Dilatometerversuche in den Bohrungen RB460 (B1), RB461 (B2) und RB462 (B3) durchgeführt. In Anlage 5.79 sind dazu exemplarisch die im Versuch M5B1DI03 in den drei Messrichtungen ermittelten Last-Deformationskurven dargestellt.

Die im Steinsalz durchgeführten Dilatometerversuche zeigen bezüglich der Messrichtungen i. a. keine signifikanten Unterschiede und belegen das isotrope Verformungsverhalten von Steinsalz. Für die weitere Auswertung wurden die oberen Entlastungsstufen (10 – 2 MPa und 15 – 2 MPa) herangezogen und die in den verschiedenen Messrichtungen ermittelten Steifigkeitswerte gemittelt.

Die Ergebnisse der Dilatometerversuche sind tabellarisch in Anlage 5.80 zusammengestellt. Danach ergeben sich in den Bohrungen RB460 (B1) und RB462 (B3) Werte zwischen 21,7 und 29,6 GPa. Das Gesamtmittel für den Elastizitätsmodul beträgt 25,8 GPa und stimmt sehr gut mit dem in Modellberechnungen verwendeten Wert von 25 GPa überein. Die in Bohrung RB461 (B2) ermittelten Last-Deformationskurven weisen in den Entlastungsstäben über große Bereiche nahezu vertikale Steigungen auf und konnten daher nicht ausgewertet werden.

### 5.5.4 Ergebnisse der Laborversuche

An den beim Überbohren gewonnenen hohlzylindrischen Prüfkörpern wurden im Labor Be- und Entlastungsversuche durchgeführt, um die für die Auswertung der Überbohrversuche erforderlichen Elastizitätsmoduli zu ermitteln (s. Kap. 5.5.2). Die Versuchs- und Prüfkörperdaten (Kernbezeichnung, stratigraphische Einheit und Entnahmetiefe) sind in Anlage 5.82 tabellarisch zusammengestellt.

Exemplarisch sind für den Versuch M5B1UB08 die ermittelten Last-Deformationsdiagramme in Anlage 5.81 dargestellt. Für jede der vier radialen Messrichtungen ist die Prüfkörperbelastung als radial wirkender Manteldruck über der Prüfkörperverformung (Durchmesseränderung der Pilotbohrung) aufgetragen.

Die jeweils für vier Messrichtungen aus jeder einzelnen Laststufe ermittelten E-Moduli sind für die Bohrungen RB460 (B1), RB461 (B2) und RB462 (B3) in Anlage 5.82 tabellarisch zusammengestellt. Darüber hinaus ist für jeden Prüfkörper ein mittlerer E-Modul angegeben. Für jede Bohrung und für die verschiedenen stratigraphischen Einheiten ergeben sich daraus folgende Mittelwerte:

Bohrung RB460 (B1), Steinsalz (z3BK/BD):	E = 33,5 GPa,
Bohrung RB460 (B1), Anhydrit (z3HA):	E = 82,1 GPa,
Bohrung RB461 (B2), Steinsalz (z3BK/BD):	E = 32,8 GPa,
Bohrung RB462 (B3), Steinsalz (z3BK/BD):	E = 36,1 GPa,
Bohrung RB462 (B3), Anhydrit (z3HA):	E = 81,9 GPa.

Diese Werte stimmen gut mit Ergebnissen aus Laborversuchen an zylindrischen Steinsalz- und Anhydritprüfkörpern überein (BGR 1996).

## 5.6 Lokation 6 (Zentralbereich Bartensleben)

Die Lokation 6 im Zentralbereich der Grube Bartensleben (Anlage 2.1) umfasst folgende Messbohrungen (Anlagen 5.83 und 5.84):

- Bohrung RB485 (B1), Neigung  $-4,9^{\text{gon}}$ , Richtung  $352^{\text{gon}}$ , Länge 44,25 m, auf der 3. Sohle, Hauptquerschlag nach Osten, ca. 360 m hinter dem Füllort,
- Bohrung RB486 (B2), Neigung  $0,4^{\text{gon}}$ , Richtung  $357,1^{\text{gon}}$ , Länge 39,50 m, auf der 2. Sohle, 2. nördliche Richtstrecke, vom Abbau 1a aus.

Beide Bohrungen verlaufen annähernd in Streichrichtung der Anhydritschollen.

### 5.6.1 Ingenieurgeologische Untersuchungsergebnisse

In den Anlagen 5.85 und 5.86 sind die Ergebnisse der Bohrkernbeschreibung mit Standarddaten wie Kernmarsch, Kerngewinn und RQD wiedergeben. Weiterhin sind die Bereiche der Überbohrversuche teufengerecht dargestellt.

## 5.6.2 Ergebnisse der Spannungsmessungen

Die Daten der Überbohrversuche, die in den beiden Untersuchungsbohrungen RB485 (B1) und RB486 (B2) durchgeführt wurden, sind tabellarisch in Anlage 5.87 zusammengestellt. Neben der Versuchsbezeichnung sind die stratigraphische Einheit, das Versuchsdatum und die Bohrlochtiefe sowie eine Beurteilung des Kerngewinns und der Versuchsqualität angegeben. Ferner sind die der Auswertung zugrundeliegenden Werte für den Elastizitätsmodul aufgeführt (s. dazu Kapitel 5.6.3).

Anlage 5.88 zeigt exemplarisch die in einem Überbohrversuch im Anhydrit gemessenen Entspannungsdeformationen. Die Ergebnisse der Überbohrversuche sind in den Anlagen 5.89 und 5.90 zusammenfassend dargestellt. Für jede Messbohrung sind die maximalen und minimalen Spannungen  $S_1$  und  $S_2$ , die Orientierung von  $S_1$  und die Spannungsanisotropie nach Gl. (3) angegeben.

Für die Horizontalbohrung RB485 (B1) ergeben sich bis zu einer Bohrtiefe von ca. 32 m ohne Berücksichtigung der im Bohrlochtiefsten durchgeführten Versuche M6B1UB09 und M6B1UB10 folgende Resultate (Anlage 5.89):

- maximale Spannung  $S_1 = 16,5 - 26,2$  MPa (im Mittel  $S_1 \approx 22,6$  MPa),
- minimale Spannung  $S_2 = 3,7 - 13,4$  MPa (im Mittel  $S_2 \approx 8,0$  MPa),
- mittlere Orientierung von  $S_1$ :  $170^\circ$ ,
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 2,8$ .

Die beiden im Bohrlochtiefsten durchgeführten Versuche M6B1UB09 und M6B1UB10 ergeben mit  $S_1 \approx 35$  MPa bzw.  $60$  MPa und mit  $S_2 \approx 15$  MPa bzw.  $35$  MPa vergleichsweise hohe Spannungsbeträge. Dieser Befund korreliert mit dem in dieser Bohrtiefe aufgetretenen „core discing“ (Anlage 5.85).

Für die Horizontalbohrung RB486 (B2) ergeben sich im Anhydrit (Bohrteufe bis ca. 30 m) folgende Resultate (Anlage 5.90):

- maximale Spannung  $S_1 = 15,1 - 16,8$  MPa (im Mittel  $S_1 \approx 15,8$  MPa),
- minimale Spannung  $S_2 = 6,7 - 12,3$  MPa (im Mittel  $S_2 \approx 8,5$  MPa),
- mittlere Orientierung von  $S_1$ :  $131$  Grad,
- mittlere Spannungsanisotropie  $a = 1,86$ .

Im tieferen Bereich ab ca. 30 m verläuft diese Bohrung im Steinsalz. Hier ergeben sich folgende Resultate (Anlage 5.90):

- maximale Spannung  $S_1 = 8,2 - 11,0$  MPa (im Mittel  $S_1 \approx 9,4$  MPa),
- minimale Spannung  $S_2 = 4,6 - 9,2$  MPa (im Mittel  $S_2 \approx 7,1$  MPa),
- Orientierung von  $S_1$ : uneinheitlich,
- mittlerer Anisotropiegrad  $a = 1,32$ .

### 5.6.3 Ergebnisse der Laborversuche

Für die Auswertung der Überbohrversuche (s. Kapitel 5.6.2) wurden an den beim Überbohren gewonnenen hohlzylindrischen Prüfkörpern im Labor Be- und Entlastungsversuche durchgeführt. Die Versuchs- und Prüfkörperdaten (Kernbezeichnung, stratigraphische Einheit und Entnahmetiefe) sind in Anlage 5.92 tabellarisch zusammengestellt.

Exemplarisch sind für den Versuch M6B1UB01 die ermittelten Last-Deformationsdiagramme in Anlage 5.91 dargestellt. Für jede der vier radialen Messrichtungen ist die Prüfkörperbelastung als radial wirkender Manteldruck über der Prüfkörperverformung (Durchmesseränderung der Pilotbohrung) aufgetragen.

Die jeweils für vier Messrichtungen aus jeder einzelnen Laststufe ermittelten E-Moduli sind für die beiden Bohrungen in Anlage 5.92 zusammengestellt. Darüber hinaus ist für jeden Prüfkörper ein mittlerer E-Modul angegeben. Dieser wurde im Hinblick auf die im Anhydrit auftretenden höheren Spannungen aus den Entlastungsphasen mit  $p = 10, 15$  und  $20$  MPa ermittelt. Für jede Bohrung ergeben sich daraus folgende Mittelwerte:

- Bohrung RB485 (B1):  $E = 61,7$  GPa,
- Bohrung RB486 (B2):  $E = 60,2$  GPa.

Diese Werte stimmen gut mit Ergebnissen von Laborversuchen an zylindrischen Anhydritprüfkörpern überein (BGR 1996).

## 6 Bewertung der Spannungsmessungen

Die Bewertung der Spannungsmessungen zur Ermittlung des Spannungszustands im unverritzten Gebirge erfolgt, sofern möglich, durch den Vergleich der in Überbohr- und in Hydrofrac-Versuchen erzielten Ergebnisse. Ggf. werden zur Bewertung auch die Ergebnisse numerischer Modellberechnungen (BGR 2000) herangezogen.

### 6.1 Lokation 1 (Bohrbereich 3.05)

Die in den Überbohr- und Hydrofrac-Versuchen ermittelten Spannungsbeträge sind jeweils für Messbohrungen mit annähernd gleicher Orientierung in Anlage 6.1 zusammengefasst. In Diagramm a (Anlage 6.1) sind die in den Horizontalbohrungen RB409 und RB402 ermittelten minimalen Spannungen dargestellt. Danach sind die in Überbohrversuchen gemessenen Beträge i. a. geringer als die in Hydrofrac-Versuchen gemessenen Beträge, die im Mittel etwa dem theoretischen Überlagerungsdruck von ca. 11,6 MPa entsprechen.

Diagramm b (Anlage 6.1) zeigt die in den Horizontalbohrungen RB408 und RB466 gemessenen Minimalspannungen. Auch hier sind die in Überbohrversuchen ermittelten Beträge deutlich geringer als die in Hydrofrac-Versuchen ermittelten Beträge, die im Mittel sogar oberhalb des theoretischen Überlagerungsdrucks liegen.

Für die vertikalen Messbohrungen RB410 und RB403 ergibt sich nach Diagramm c (Anlage 6.1) eine gute Übereinstimmung zwischen den nach der Überbohr- und der Hydrofrac-Methode gemessenen Minimalspannungen. Im Mittel liegen die dargestellten Spannungsbeträge deutlich unterhalb des theoretischen Überlagerungsdrucks.

Die in den Horizontalbohrungen auftretenden Unterschiede zwischen den im Überbohr- und in Hydrofrac-Versuchen gemessenen Gebirgsspannungen werden folgendermaßen beurteilt:

- Eine systematische Unterschätzung der minimalen Spannung bei der Auswertung von Überbohrversuchen müsste generell, also auch in der Vertikalbohrung RB410, zu Abweichungen gegenüber den in Hydrofrac-Versuchen ermittelten Beträgen führen. Dies ist jedoch nicht der Fall. Die Ergebnisse der Überbohrversuche werden daher als zutreffend beurteilt.
- Die Bestimmung der minimalen Hauptspannung in Hydrofrac-Versuchen in einem Gebirgsbereich mit annähernd homogenen Spannungsverhältnissen muss nach der Theorie unabhängig von der Bohrlochorientierung zu gleichen Ergebnissen führen, da sich der im

Versuch erzeugte Riss mit zunehmender Entfernung vom Messbohrloch so einstellt, dass seine Fläche senkrecht zur Richtung der minimalen Hauptspannung liegt. Aufgrund der nicht unerheblichen Unterschiede der Resultate in den drei Messbohrungen RB402, RB466 und RB403 ist anzunehmen, dass insbesondere in den Horizontalbohrungen die Rissflächen noch nicht ihre endgültige Orientierung aufweisen. Dies wird messtechnisch dadurch belegt, dass die in der Frac-Phase und den anschließenden Refrac-Phasen ermittelten Ruhedrucke z. T. deutliche Unterschiede aufweisen (Anlagen 5.12 und 5.13). Für die vertikale Messbohrung RB403 zeigt sich dagegen, dass die in den Refrac-Phasen ermittelten Ruhedrucke sich gegenüber der Frac-Phase i. a. nur noch wenig ändern (Anlage 5.14). Dies ist ein Indiz dafür, dass der erzeugte Riss bereits seine endgültige, dem räumlichen Spannungszustand entsprechende Orientierung eingenommen hat. Die in den Horizontalbohrungen nach der Hydrofrac-Methode ermittelten Minimalspannungsbeträge werden als etwas zu hoch bewertet.

Der derzeitige Spannungszustand an Lokation 1 (Bohrbereich 3.05) auf der 4. Sohle des Ostsattels lässt sich folgendermaßen charakterisieren:

- Vertikalspannung: ca. 11,5 - 12,5 MPa,
- größte Horizontalspannung: ca. 12,0 MPa, (Orientierung: ca. zwischen N und NO),
- kleinste Horizontalspannung: ca. 10,0 MPa.

## 6.2 Lokation 2 (Bohrbereich 3.07)

Die in den Überbohr- und Hydrofrac-Versuchen ermittelten Spannungsbeträge sind jeweils für Messbohrungen mit annähernd gleicher Orientierung in Anlage 6.2 zusammengefasst.

Diagramm a (Anlage 6.2) zeigt die in den Horizontalbohrungen RB421 und RB475 ermittelten Gebirgsspannungen. Danach sind die in Überbohrversuchen gemessenen Beträge in der Mehrzahl etwas geringer als die in Hydrofrac-Versuchen gemessenen Beträge. Der aus der Teufe der Versuchslokation (ca. 488 m) resultierende theoretische Überlagerungsdruck von ca. 10,7 MPa liegt etwas niedriger als die o. a. Mittelwerte für die minimale Spannung  $S_1 = 11,0$  MPa (aus Überbohrversuchen) bzw. für den Ruhedruckwert  $p_R = 11,9$  MPa (aus Frac-Versuchen).

In Diagramm b (Anlage 6.2) sind die in den vertikalen Messbohrungen RB422 und RB476 ermittelten Spannungsbeträge dargestellt. In der für den Vergleich maßgeblichen Messteufe zwischen ca. 10 und ca. 25 m weisen die nach der Überbohrmethode ermittelten Spannungen in der Mehrzahl geringere Werte auf als die in Frac-Versuchen gemessenen Ruhe-

drücke. Der aus dem theoretischen Überlagerungsdruck resultierende Gebirgsdruckgradient stimmt ausreichend genau mit den gemessenen Spannungswerten überein.

Diagramm c (Anlage 6.2) zeigt die in den Horizontalbohrungen RB423 und RB468 ermittelten Spannungsbeträge. In dem für einen Vergleich relevanten Teufenbereich zwischen ca. 10 und ca. 26 m liegen die in Frac-Versuchen gemessenen Ruhedrucke i. a. über den in Überbohrversuchen ermittelten Spannungswerten. Die Ruhedrucke sind i. a. etwas größer als der theoretische Gebirgsdruck von ca. 10,7 MPa. Die Spannungsbeträge aus Überbohrversuchen sind vorwiegend etwas geringer als der theoretische Gebirgsdruck.

Aufgrund der vorliegenden Messergebnisse lässt sich der derzeitige Spannungszustand an Lokation 2 (Bohrbereich 3.07) auf der 4. Sohle des Südostfeldes folgendermaßen charakterisieren:

- der Gebirgsspannungszustand ist annähernd isotrop,
- die Gebirgsspannung beträgt ca. 11,0 ( $\pm 1,0$ ) MPa.

### 6.3 Lokation 3 (Bohrbereich 3.02)

Die in den Überbohr- und Hydrofrac-Versuchen ermittelten minimalen Spannungsbeträge sind jeweils für Messbohrungen mit annähernd gleicher Orientierung in Anlage 6.3 zusammengefasst.

Diagramm a (Anlage 6.3) zeigt die in den Horizontalbohrungen RB434 und RB427 ermittelten minimalen Gebirgsspannungen. Danach entsprechen die in Überbohrversuchen gemessenen Beträge im Mittel mit 6,8 MPa den in Hydrofrac-Versuchen gemessenen Beträgen (im Mittel 6,8 MPa). Alle Messwerte liegen deutlich unterhalb des theoretischen Überlagerungsdrucks, der aus der Teufe der Versuchslokation (ca. 421 m) resultiert und etwa 9,3 MPa beträgt.

In Diagramm b (Anlage 6.3) sind die in den vertikalen Messbohrungen RB435 (Tiefbohrung für Überbohrversuche) und RB428 (Hochbohrung für Frac-Versuche) ermittelten minimalen Spannungsbeträge dargestellt. Der obere Teil des Diagramms zeigt die aus Frac-Versuchen in der Hochbohrung resultierenden Messwerte (Bohrbereich zwischen 0 und -30 m). Der untere Teil des Diagramms weist die aus Überbohrversuchen in der Tiefbohrung ermittelten Spannungsbeträge aus (Bohrbereich zwischen 0 und +30 m). Das Diagramm zeigt außerdem den Gradienten des theoretischen Überlagerungsdrucks. Sämtliche ermittelten Span-

nungsbeträge liegen, ähnlich wie in den Horizontalbohrungen RB434 und RB427, deutlich unterhalb des theoretischen Überlagerungsdrucks.

Diagramm c (Anlage 6.3) zeigt die in den Horizontalbohrungen RB436 und RB429 ermittelten minimalen Spannungsbeträge. Die in Überbohrversuchen gemessenen Beträge sind im Mittel mit 7,4 MPa geringfügig höher als die in Hydrofrac-Versuchen gemessenen Beträge (im Mittel 7,1 MPa). Die Spannungsbeträge liegen dabei z. T. deutlich unterhalb des theoretischen Überlagerungsdrucks von ca. 9,3 MPa.

Aufgrund der vorliegenden Messergebnisse lässt sich der derzeitige Spannungszustand an Lokation 3 (Bohrbereich 3.02) auf der 2. Sohle westlich des Zentralbereichs folgendermaßen charakterisieren:

- Der Gebirgsspannungszustand weist eine leichte Anisotropie auf.
- Die nach verschiedenen Verfahren ermittelten minimalen Gebirgsspannungsbeträge liegen i. a. deutlich unterhalb des theoretischen Überlagerungsdrucks von ca. 9,3 MPa. So betragen die in Frac-Versuchen in der Vertikalbohrung RB428 ermittelten minimalen Spannungen im Mittel lediglich 4,9 MPa. Großräumige geomechanische Modellberechnungen (BGR 2000) zeigen, dass dieser Befund auf den Einfluss der Abbaue im Kalilager B zurückgeführt werden kann, das ca. 50 bis 70 m westlich der Messlokation ansteht. Infolge großräumiger abbaubedingter Spannungsumlagerungen treten im Bereich der Messlokation 3 rechnerisch Spannungsreduzierungen bis ca. 4 MPa auf. Damit ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den messtechnischen Befunden und den Ergebnissen theoretischer Berechnungen.

#### 6.4 Lokation 4 (Bohrbereich 3.04)

Die in den Überbohr- und Hydrofrac-Versuchen ermittelten minimalen Spannungsbeträge sind jeweils für Messbohrungen mit annähernd gleicher Orientierung in Anlage 6.4 zusammengefasst.

Diagramm a (Anlage 6.4) zeigt die in den Horizontalbohrungen RB447 und RB440 in der östlichen Anhydritklippe der Ostmulde ermittelten minimalen Gebirgsspannungen. Danach liegen die in Überbohrversuchen gemessenen Beträge im Mittel mit 12,5 MPa oberhalb des theoretischen Überlagerungsdrucks, der aus der Teufe der Versuchslokation (ca. 502 m) resultiert und etwa 11,0 MPa beträgt). Aus den Hydrofrac-Versuchen ergibt sich im Mittel ein Betrag von 10,5 MPa, der etwas geringer als der Überlagerungsdruck ist. Im Bohrlochbereich zwischen ca. 16 und 23 m lassen sich die mit verschiedenen Messverfahren ermittelten Spannungen direkt vergleichen. I. a. stimmen die Werte in diesem Bereich gut überein und

belegen, dass mit der gewählten Orientierung der für Überbohrversuche verwendeten Bohrung RB447 und der daraus resultierenden räumlichen Lage der Messebene (senkrecht zur Bohrachse) die kleinste Hauptspannung aus Überbohrversuchen ermittelt werden konnte.

In Diagramm b (Anlage 6.4) sind die in den Horizontalbohrungen RB448 und RB441 in der östlichen Anhydritklippe der Ostmulde ermittelten minimalen Spannungsbeträge dargestellt. Der obere Teil des Diagramms zeigt die aus Frac-Versuchen in einer Bohrlochtiefe zwischen ca. 27 und 50 m resultierenden Messwerte, die im Mittel 10,8 MPa betragen und damit etwa dem Überlagerungsdruck von ca. 11,0 MPa entsprechen. Die in einer Bohrlochtiefe zwischen ca. 10 und 33 m aus Überbohrversuchen ermittelten Spannungen sind deutlich höher und betragen im Mittel 22,0 MPa. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Orientierung der für Überbohrversuche verwendeten Bohrung RB448 und der daraus resultierenden Normalen der Messebene näherungsweise der Richtung der kleinsten Hauptspannung entspricht, so dass diese mit der hier verwendeten zweidimensionalen Überbohrsonde nicht erfasst werden kann.

Diagramm c (Anlage 6.4) zeigt die in den Horizontalbohrungen RB449 und RB442 in der westlichen Anhydritklippe der Ostmulde ermittelten minimalen Spannungsbeträge. Die in einer Bohrlochtiefe zwischen ca. 25 und 42 m durchgeführten Frac-Versuche ergeben im Mittel eine minimale Spannung von nur 6,3 MPa. Die in Überbohrversuchen in einer Bohrlochtiefe zwischen ca. 12 und 24 m ermittelten Spannungen betragen im Mittel 7,4 MPa und sind damit etwas höher als die in Hydrofrac-Versuchen gemessenen Beträge, belegen aber, dass mit der gewählten Orientierung der für Überbohrversuche verwendeten Bohrung RB449 die kleinste Hauptspannung näherungsweise ermittelt werden konnte. Die aus beiden Messverfahren resultierenden Spannungen liegen generell deutlich unterhalb des theoretischen Überlagerungsdrucks von ca. 11,0 MPa.

Aufgrund der vorliegenden Messergebnisse lässt sich der derzeitige Spannungszustand an Lokation 4 (Bohrbereich 3.04) auf der 4. Sohle des Ostfeldes folgendermaßen charakterisieren:

- Der Gebirgsspannungszustand im Hauptanhydrit der Ostmulde weist eine deutliche Anisotropie auf.
- In der östlichen Anhydritklippe der Ostmulde sind vergleichsweise hohe Gebirgsspannungen zu verzeichnen, deren maximale Werte im Mittel mit ca. 26,5 MPa erheblich über dem theoretischen Überlagerungsdruck von ca. 11,0 MPa liegen. Die minimalen Hauptspannungen liegen in der Größenordnung des theoretischen Überlagerungsdrucks. Aus den Messungen lässt sich näherungsweise ein Spannungsellipsoid ableiten, dessen große

Hauptachse subvertikal bis horizontal, in grober Schätzung in Richtung der Bohrung RB447, orientiert ist.

- In der westlichen Anhydritklippe werden deutlich geringere Gebirgsspannungen gemessen. Dabei liegt die minimale Hauptspannung, die annähernd horizontal orientiert ist, unterhalb des theoretischen Überlagerungsdrucks, während die Vertikalspannung etwa diesem Überlagerungsdruck entspricht. Weitergehende Aussagen über Betrag und räumliche Orientierung der maximalen Hauptspannungen sind hier nicht möglich, da für die Überbohrversuche unter Verwendung einer zweidimensional messenden Sonde nur eine Bohrung herangezogen wurde.
- Der Gebirgsspannungszustand im Steinsalz weist eine nur geringe, vernachlässigbare Anisotropie auf. Die Spannungsbeträge liegen im Mittel bei 8,3 MPa (maximale Spannung) bzw. bei 7,5 MPa (minimale Spannung) und damit unterhalb des theoretischen Überlagerungsdrucks von ca. 11,0 MPa. Dies ist möglicherweise auf den großräumigen Einfluss der Abbaukammer 3 auf der 4. Sohle zurückzuführen, in deren Nähe die entsprechende Messbohrung verläuft.

#### 6.5 Lokation 5 (Bohrbereich 3.06)

Aus den Überbohrversuchen ergeben sich im Steinsalz nur gering anisotrope Spannungszustände, deren Beträge etwa dem theoretischen Überlagerungsdruck von ca. 11 MPa entsprechen (Bohrungen RB460 und RB461) oder darüber liegen (Vertikalbohrung RB462). Im Anhydrit sind entweder deutlich anisotrope Spannungen (Bohrung RB460) oder vergleichsweise hohe Spannungsbeträge (Bohrung RB462) zu verzeichnen.

In den Hydrofrac-Versuchen sind bereichsweise sehr unterschiedliche, stark streuende Ruhedrucke zu verzeichnen. Dies kann auf markante Materialwechsel, belegt durch entsprechende Bohrlochkamerabefunde, oder auf engräumig wechselnde Materialeigenschaften zurückgeführt werden.

Die in den Überbohr- und Hydrofrac-Versuchen ermittelten minimalen Spannungsbeträge sind jeweils für Messbohrungen mit annähernd gleicher Position und Orientierung in Anlage 6.5 zusammengefasst.

Diagramm a (Anlage 6.5) zeigt die in den Horizontalbohrungen RB460 und RB453 im Steinsalz und im Anhydrit gemessenen minimalen Gebirgsspannungen. Für das Steinsalzgebirge stimmen die in Überbohrversuchen ermittelten Beträge (im Mittel 10,2 MPa) sehr gut mit den in Frac-Versuchen ermittelten Spannungen (im Mittel 10,4 MPa) überein. Für den Anhydrit

liegen die in Frac-Versuchen gemessenen minimalen Spannungen mit im Mittel 3,5 MPa deutlich unter den minimalen Spannungen, die in Überbohrversuchen ermittelt wurden und im Mittel 7,4 MPa betragen. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Orientierung der minimalen Gebirghauptspannung nicht der Orientierung der für die Überbohrversuche in Bohrung RB460 vorgegebenen Messebene entspricht.

In Diagramm b (Anlage 6.5) sind die in den Horizontalbohrungen RB461 und RB454 ermittelten minimalen Spannungsbeträge dargestellt. Die Ergebnisse der Frac-Versuche weisen auch in benachbarten Versuchsteufen z. T. erhebliche Streuungen auf. Im Mittel liegen die gemessenen Ruhedrucke mit 11,5 MPa etwas über den in Überbohrversuchen ermittelten minimalen Spannungsbeträgen von 10,1 MPa.

Diagramm c (Anlage 6.5) zeigt die in den Vertikalbohrungen RB462 und RB455 ermittelten minimalen Spannungsbeträge. Die bereichsweise stark streuenden Ruhedrucke liegen im Mittel mit 12,9 MPa nur geringfügig unterhalb der in Überbohrversuchen ermittelten minimalen Gebirgsspannung von 13,5 MPa. Aus beiden Messverfahren ergeben sich im Mittel Minimalspannungen, die über dem theoretischen Überlagerungsdruck von ca. 11 MPa liegen.

Aufgrund der vorliegenden Messergebnisse lässt sich der derzeitige Spannungszustand an Lokation 5 (Bohrbereich 3.06) auf der 4. Sohle des Nordfeldes folgendermaßen charakterisieren:

- Der Gebirgsspannungszustand im Steinsalzgebirge ist durch eine nur geringfügige Spannungsanisotropie gekennzeichnet. Die sowohl aus Überbohrversuchen wie auch aus Frac-Versuchen ermittelten Spannungsbeträge entsprechen i. a. dem theoretischen Überlagerungsdruck von ca. 11 MPa. Abweichungen davon ergeben sich bereichsweise insbesondere aus einigen Frac-Versuchen, vermutlich bedingt durch markante Materialwechsel innerhalb einer stratigraphischen Einheit, sowie in den vertikalen Messbohrungen als Indiz für etwas höhere Horizontalspannungen, vermutlich bedingt durch die Nähe einer Anhydritscholle.
- Der Gebirgsspannungszustand in den untersuchten Hauptanhydritschollen ist in einer Scholle durch eine deutliche Spannungsanisotropie bei gleichzeitig moderaten Spannungsbeträgen, in der anderen Scholle durch vergleichsweise hohe Spannungsbeträge bei gleichzeitig geringerer Spannungsanisotropie gekennzeichnet. Dies kann als Hinweis dafür gelten, dass die in den einzelnen Anhydritschollen vorhandenen Spannungszustände sowohl vom theoretischen Überlagerungsdruck wie auch untereinander stark abweichen können.

## 6.6 Lokation 6 (Zentralbereich Bartensleben)

Aufgrund der vorliegenden Messergebnisse lässt sich der gegenwärtige Spannungszustand im Hauptanhydrit des Zentralbereichs auf der 2. und 3. Sohle westlich der Abbaue des Zentralbereichs folgendermaßen charakterisieren:

- Der Gebirgsspannungszustand weist eine erhebliche Anisotropie auf.
- Die ermittelten maximalen Gebirgsspannungsbeträge liegen im Anhydrit zwischen ca. 15 und 26 MPa, lokal auch höher (bis ca. 60 MPa). Die minimalen Gebirgsspannungsbeträge liegen zwischen 4 und 13 MPa, lokal auch höher (bis ca. 35 MPa). Die Orientierung der maximalen Spannungen ist i. a. vertikal bis subvertikal.
- Großräumige geomechanische Modellberechnungen zum Zentralbereich (BGR 2000) zeigen, dass die o. g. experimentellen Befunde hinsichtlich Größe und Orientierung der Spannungen im Anhydrit vorrangig auf den Einfluss der Abbaue im Zentralbereich zurückgeführt werden können.

## 7 Zusammenfassung

An insgesamt sechs Messlokationen, die im Hinblick auf die Nutzung von Abbaufeldern für die Einlagerung, auf Bereiche mit hohem Durchbauungsgrad, auf unterschiedliche geologische Schichten und auf Bereiche in unterschiedlicher Teufe ausgewählt wurden und über die Schachanlage Bartensleben verteilt sind, wurden In-situ-Messungen nach der Überbohrmethode und größtenteils auch nach der Hydrofrac-Methode zur Ermittlung des Spannungszustands im unverritzten Gebirge durchgeführt. An den einzelnen Lokationen wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Lokation 1 (Bohrbereich 3.05) auf der 4. Sohle, Ostsattel (nördlich des UMF-Feldes):  
Die im Steinsalz durchgeführten Spannungsmessungen weisen auf eine geringe Anisotropie der Gebirgsspannungen hin. Die Vertikalspannung liegt i. a. zwischen ca. 11,5 und 12,5 MPa, die größte Horizontalspannung beträgt ca. 12,0 MPa bei einer Orientierung zwischen N und NO. Die kleinste Horizontalspannung ist ca. 10,0 MPa. Diese Werte entsprechen annähernd dem teufenbezogenen lithostatischen Gebirgsdruck von ca. 11,6 MPa.
- Lokation 2 (Bohrbereich 3.07) auf der 4. Sohle, Südostfeld:  
Die im Steinsalzgebirge ermittelten Gebirgsspannungen betragen i. a. ca. 10,0 – 12,5 MPa und entsprechen näherungsweise dem lithostatischen Überlagerungsdruck von ca. 10,7 MPa. Die Vertikalspannungen liegen i. a. zwischen ca. 10,0 und 11,5 MPa, die größte Horizontalspannung beträgt ca. 12,5 MPa. Die Spannungsanisotropie ist gering. Dies ist aufgrund des geringen Durchbauungsgrads im Bereich der Messlokation plausibel.
- Lokation 3 (Bohrbereich 3.02) auf der 2. Sohle, Ostquerschlag / Abzweigung 1. Südliche Richtstrecke:  
Die ermittelten Vertikalspannungen liegen i. a. zwischen ca. 8,0 und 8,5 MPa, die Horizontalspannungen betragen i. a. ca. 6,5 – 8,0 MPa. Damit sind die Spannungsbeträge, insbesondere die Beträge der minimalen Gebirgsspannungen deutlich geringer als der lithostatische Teufendruck von ca. 9,5 MPa. Der im Steinsalz ermittelte Gebirgsspannungszustand weist eine leichte Anisotropie auf. Diese Befunde, die durch die Ergebnisse großräumiger Modellberechnungen (BGR 2000) gestützt sind, werden auf den Einfluss der Abbaue und die damit verbundenen weitreichenden Spannungsumlagerungen im Bereich des Kalilagers B zurückgeführt, das ca. 50 bis 70 m westlich der Messlokation ansteht.

- Lokation 4 (Bohrbereich 3.04) auf der 4. Sohle, Ostfeld:  
Die in verschiedenen Klippen des Hauptanhydrits der Ostmulde ermittelten Gebirgsspannungen weisen sehr unterschiedliche Spannungsbeträge auf, die in Vertikalrichtung i. a. zwischen ca. 11,0 und 22,0 MPa und in Horizontalrichtung zwischen ca. 7,5 und 27,0 MPa liegen. Dabei sind die maximalen Gebirgsspannungen z. T. erheblich höher als der lithostatische Gebirgsdruck (ca. 11,0 MPa), während die minimalen Spannungen diesem Gebirgsdruck entweder entsprechen (östliche Klippe) oder geringer sind (westliche Klippe). Die Spannungsanisotropie im Hauptanhydrit ist deutlich ausgeprägt. Im Steinsalz der Ostmulde ergeben sich dagegen nur sehr geringe Spannungsanisotropien. Die Spannungen liegen dort, vermutlich bedingt durch die Nähe großer Abbaue, unterhalb des lithostatischen Gebirgsdrucks und betragen in Vertikalrichtung i. a. ca. 7,5 – 9,0 MPa und in Horizontalrichtung ca. 6,0 bis 8,0 MPa.
- Lokation 5 (Bohrbereich 3.06) auf der 4. Sohle, Nordfeld:  
Der im Salzgebirge ermittelte Spannungszustand weist nur eine geringe Spannungsanisotropie auf und entspricht annähernd dem lithostatischen Gebirgsdruck von ca. 11,1 MPa oder ist bereichsweise höher. Die ermittelten Vertikalspannungen liegen i. a. zwischen ca. 10,5 und 11,5 MPa, die Horizontalspannungen i.a. zwischen ca. 10,5 und 12,0 MPa, bereichsweise auch bei 16 MPa. Der Spannungszustand in den untersuchten Hauptanhydritschollen ist in einer Scholle durch eine deutliche Anisotropie bei relativ geringen Beträgen (minimale Spannungen zwischen ca. 7,0 und 7,5 MPa, maximale Spannungen zwischen ca. 13 und 17 MPa), in der anderen Scholle durch vergleichsweise hohe Spannungsbeträge (minimale Spannungen zwischen ca. 20 und 27 MPa, maximale Spannungen zwischen ca. 25 und 32 MPa) bei nur geringer Anisotropie gekennzeichnet. Dies kann als Hinweis dafür gelten, dass die in den einzelnen Anhydritschollen vorhandenen Spannungszustände sowohl vom lithostatischen Gebirgsdruck wie auch untereinander stark abweichen können.
- Lokation 6 auf der 2. und 3. Sohle des Zentralbereichs:  
Die Ergebnisse der Spannungsmessungen zeigen, dass im Hauptanhydrit Spannungszustände mit ausgeprägter Anisotropie vorliegen. Dabei betragen die maximalen Gebirgsspannungen ca. 15 bis 26 MPa, im Einzelfall auch bis zu ca. 60 MPa, bei annähernd vertikaler bis subvertikaler Orientierung und liegen damit deutlich, z. T. erheblich über dem lithostatischen Gebirgsdruck. Die minimalen Gebirgsspannungen liegen i. a. zwischen ca. 4 und 13 MPa, im Einzelfall auch bei ca. 35 MPa. Großräumige geomechanische Modellberechnungen zum Zentralbereich Bartensleben (BGR 2000) zeigen, dass diese experimentellen Befunde hinsichtlich Größe und Orientierung der Spannungen vorrangig auf

den langfristigen Einfluss alter Abbaue im Zentralbereich der Schachanlage Bartensleben zurückgeführt werden können.

**BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE  
HANNOVER**

.2000

Im Auftrage:

(Dr. H. Raschka)  
- Dir. u. Prof. -  
- Abteilungsleiter B2 -

(Dr.-Ing. M. Wallner)  
- Wiss. Direktor -  
- Projektleiter Endlagerung -

Autoren:

(Dr.-Ing. S. Heusermann)  
- Wiss. Direktor -  
- Arbeitspaketleiter -

(Dr. J. Hanisch)  
- Wiss. Angest. -

(Dipl.-Ing. K.-H. Sprado)  
- Techn. Angest. -

(H. Kunz)  
- ADV -

*gez. Hoppe*  
(F.-J. Hoppe)  
- Techn. Angest. -

*gez. Küchemann*  
(W. Küchemann)  
- Techn. Angest. -

## Literaturverzeichnis

- BGR (1991): Ingenieurgeologische Methoden zur Erkundung des TSS-Versuchsfeldes in der Asse. Bericht zum BMFT-FV KWA 3603A (Autor: J. HANISCH), Archiv-Nr. 108638, Hannover.
- BGR (1996): ERA Morsleben - Festigkeitsmechanische Untersuchungen an Bohrkernen. Bericht zum AP 9M21310016 (Autoren: H. SCHNIER & W. BLEICH), Archiv-Nr. 114941, Hannover.
- BGR (1997): ERA Morsleben - Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells Morsleben. Abschlussbericht zum AP 9M2124601100 (Autoren: J. BEHLAU, G. MINGERZAHN & O. BORNEMANN), Archiv-Nr. 116872, Hannover.
- BGR (2000): ERA Morsleben - Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere in der Schachanlage Bartensleben. Abschlussbericht zum AP 9M23241011 (Autoren: S. HEUSERMANN & H.-K. NIPP), Archiv-Nr. 0120259, Hannover.
- DBE (1996): Sohlenriss, 4. Sohle, Bartensleben. Stand 1996.
- HEUSERMANN, S. (1984): Aspects of Overcoring Stress Measurements in Rock Salt. Proc. 2nd Conf. Mech. Behavior of Salt, p. 272-289, Trans Tech Publ., Clausthal-Zellerfeld.
- HEUSERMANN, S. (1995): Analysis of Initial Rock Stress Measurements in Salt. Proc. 5th Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, p. 669-674, Balkema, Rotterdam.
- MENZEL, W. & SCHREINER, W. (1997): Zum geomechanischen Verhalten von Steinsalz verschiedener Lagerstätten der DDR. Neue Bergbautechnik, Vol. 7, Teil II, S. 565-571.
- WORCH, G. (1967): Elastische Scheiben. In: Betonkalender 1967, 2. Teil, S. 1-128, W. Ernst & Sohn, Berlin.

**Abkürzungsverzeichnis**

BfS:	Bundesamt für Strahlenschutz
BGR:	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
DBE:	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH
ERA:	Endlager für radioaktive Abfälle
K-UTEC:	Kali-Umwelttechnik GmbH
RQD:	Rock quality designation
UMF:	Untertagemessfeld

Die im Bericht verwendeten Formelzeichen sind im Text erläutert.

ERA  
Morsleben

## Anlagenverzeichnis

(Die Anlagen sind kapitelweise numeriert; die erste Ziffer bezieht sich auf das betreffende Hauptkapitel, die folgenden Ziffern geben die fortlaufende Numerierung der Anlagen in dem betreffenden Hauptkapitel wieder.)

- Anlage 2.1: Ost-West-Profil durch die Schachanlage Bartensleben (BGR 1997) mit Angabe der Lokationen für Gebirgsspannungsuntersuchungen
- Anlage 4.1: Prinzip der BGR-Überbohrmethode
- Anlage 4.2: BGR-2D-Überbohrsonde und Messwerterfassung
- Anlage 4.3: Messausrüstung der Fa. K-UTEC, Sondershausen, für Hydrofrac-Messungen
- Anlage 4.4: Prinzip von BGR-Dilatometermessungen
- Anlage 4.5: Laborprüfeinrichtung für Last-Deformationsversuche an hohlzylindrischen Prüfkörpern
- Anlage 5.1: Anordnung der Spannungsmessbohrungen in Lokation 1 (Bohrbereich 3.05)
- Anlage 5.2: Bohrprofil der Bohrung RB409 (B1) in Lokation 1
- Anlage 5.3: Bohrprofil der Bohrung RB408 (B2) in Lokation 1
- Anlage 5.4: Bohrprofil der Bohrung RB410 (B3) in Lokation 1
- Anlage 5.5: Zusammenstellung der Überbohrversuchsdaten für Lokation 1 (Bohrbereich 3.05)
- Anlage 5.6: Exemplarische Darstellung von Messdaten aus einem Überbohrversuch in Bohrung RB409 (B1)
- Anlage 5.7: Exemplarische Darstellung von Messdaten aus einem Überbohrversuch in Bohrung RB408 (B2)
- Anlage 5.8: Exemplarische Darstellung von Messdaten aus einem Überbohrversuch in Bohrung RB410 (B3)
- Anlage 5.9: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB409 (B1)
- Anlage 5.10: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB408 (B2)
- Anlage 5.11: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB410 (B3)
- Anlage 5.12: Ergebnisse der Hydrofrac-Versuche in Bohrung RB402
- Anlage 5.13: Ergebnisse der Hydrofrac-Versuche in Bohrung RB466
- Anlage 5.14: Ergebnisse der Hydrofrac-Versuche in Bohrung RB403
- Anlage 5.15: Last-Deformationsdiagramme für Prüfkörper aus Überbohrversuch M1B1UB06

- Anlage 5.16: Zusammenstellung der im Labor ermittelten E-Moduli (Lokation 1)
- Anlage 5.17: Anordnung der Spannungsmessbohrungen in Lokation 2 (Bohrbereich 3.07)
- Anlage 5.18: Bohrprofil der Bohrung RB421 (B1) in Lokation 2
- Anlage 5.19: Bohrprofil der Bohrung RB422 (B2) in Lokation 2
- Anlage 5.20: Bohrprofil der Bohrung RB423 (B3) in Lokation 2
- Anlage 5.21: Zusammenstellung der Überbohrversuchsdaten für Lokation 2 (Bohrbereich 3.07)
- Anlage 5.22: Exemplarische Darstellung von Messdaten aus einem Überbohrversuch in Lokation 2
- Anlage 5.23: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB421 (B1)
- Anlage 5.24: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB422 (B2)
- Anlage 5.25: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB423 (B3)
- Anlage 5.26: Ergebnisse der Hydrofrac-Versuche in Bohrung RB475
- Anlage 5.27: Ergebnisse der Hydrofrac-Versuche in Bohrung RB476
- Anlage 5.28: Ergebnisse der Hydrofrac-Versuche in Bohrung RB468
- Anlage 5.29: Last-Deformationsdiagramme aus Dilatometerversuch M2B3DI01
- Anlage 5.30: Zusammenstellung der in Dilatometerversuchen ermittelten Gebirgssteifigkeitswerte (Lokation 2)
- Anlage 5.31: Last-Deformationsdiagramme für Prüfkörper aus Überbohrversuch M2B1UB04
- Anlage 5.32: Zusammenstellung der im Labor ermittelten E-Moduli (Lokation 2)
- Anlage 5.33: Anordnung der Spannungsmessbohrungen in Lokation 3 (Bohrbereich 3.02)
- Anlage 5.34: Bohrprofil der Bohrung RB434 (B1) in Lokation 3
- Anlage 5.35: Bohrprofil der Bohrung RB435 (B2) in Lokation 3
- Anlage 5.36: Bohrprofil der Bohrung RB436 (B3) in Lokation 3
- Anlage 5.37: Zusammenstellung der Überbohrversuchsdaten für Lokation 3 (Bohrbereich 3.02)
- Anlage 5.38: Exemplarische Darstellung von Messdaten aus einem Überbohrversuch in Lokation 3
- Anlage 5.39: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB434 (B1)
- Anlage 5.40: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB435 (B2)
- Anlage 5.41: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB436 (B3)
- Anlage 5.42: Ergebnisse der Hydrofrac-Versuche in Bohrung RB427
- Anlage 5.43: Ergebnisse der Hydrofrac-Versuche in Bohrung RB428

- Anlage 5.44: Ergebnisse der Hydrofrac-Versuche in Bohrung RB429
- Anlage 5.45: Last-Deformationsdiagramme aus Dilatometerversuch M3B3DI01
- Anlage 5.46: Zusammenstellung der in Dilatometerversuchen ermittelten Gebirgssteifigkeitswerte (Lokation 3)
- Anlage 5.47: Last-Deformationsdiagramme für Prüfkörper aus Überbohrversuch M3B1UB04
- Anlage 5.48: Zusammenstellung der im Labor ermittelten E-Moduli (Lokation 3)
- Anlage 5.49: Anordnung der Spannungsmessbohrungen in Lokation 4 (Bohrbereich 3.04)
- Anlage 5.50: Bohrprofil der Bohrung RB447 (B1) in Lokation 4
- Anlage 5.51: Bohrprofil der Bohrung RB448 (B2) in Lokation 4
- Anlage 5.52: Bohrprofil der Bohrung RB449 (B3) in Lokation 4
- Anlage 5.53: Bohrprofil der Bohrung RB467 (B4) in Lokation 4
- Anlage 5.54: Zusammenstellung der Überbohrversuchsdaten für Lokation 4 (Bohrbereich 3.04)
- Anlage 5.55: Exemplarische Darstellung von Messdaten aus einem Überbohrversuch in Lokation 4
- Anlage 5.56: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB447 (B1)
- Anlage 5.57: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB448 (B2)
- Anlage 5.58: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB449 (B3)
- Anlage 5.59: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB467 (B4)
- Anlage 5.60: Ergebnisse der Hydrofrac-Versuche in Bohrung RB440
- Anlage 5.61: Ergebnisse der Hydrofrac-Versuche in Bohrung RB441
- Anlage 5.62: Ergebnisse der Hydrofrac-Versuche in Bohrung RB442
- Anlage 5.63: Last-Deformationsdiagramme aus Dilatometerversuch M4B3DI01
- Anlage 5.64: Zusammenstellung der in Dilatometerversuchen ermittelten Gebirgssteifigkeitswerte (Lokation 4)
- Anlage 5.65: Last-Deformationsdiagramme für Prüfkörper aus Überbohrversuch M4B1UB03
- Anlage 5.66: Zusammenstellung der im Labor ermittelten E-Moduli (Lokation 4)
- Anlage 5.67: Anordnung der Spannungsmessbohrungen in Lokation 5 (Bohrbereich 3.06)
- Anlage 5.68: Bohrprofil der Bohrung RB460 (B1) in Lokation 5
- Anlage 5.69: Bohrprofil der Bohrung RB461 (B2) in Lokation 5 (2 Blatt)
- Anlage 5.70: Bohrprofil der Bohrung RB462 (B3) in Lokation 5

- Anlage 5.71: Zusammenstellung der Überbohrversuchsdaten für Lokation 5 (Bohrbereich 3.06)
- Anlage 5.72: Exemplarische Darstellung von Messdaten aus einem Überbohrversuch in Lokation 5
- Anlage 5.73: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB460 (B1)
- Anlage 5.74: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB461 (B2)
- Anlage 5.75: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB462 (B3)
- Anlage 5.76: Ergebnisse der Hydrofrac-Versuche in Bohrung RB453
- Anlage 5.77: Ergebnisse der Hydrofrac-Versuche in Bohrung RB454
- Anlage 5.78: Ergebnisse der Hydrofrac-Versuche in Bohrung RB455
- Anlage 5.79: Last-Deformationsdiagramme aus Dilatometerversuch M5B1DI03
- Anlage 5.80: Zusammenstellung der in Dilatometerversuchen ermittelten Gebirgssteifigkeitswerte (Lokation 5)
- Anlage 5.81: Last-Deformationsdiagramme für Prüfkörper aus Überbohrversuch M5B1UB08
- Anlage 5.82: Zusammenstellung der im Labor ermittelten E-Moduli (Lokation 5)
- Anlage 5.83: Sohlenriss 3. Sohle Bartensleben mit Bohrung RB485 (DBE 1993)
- Anlage 5.84: Sohlenriss 2. Sohle Bartensleben mit Bohrung RB486 (DBE 1993)
- Anlage 5.85: Bohrprofil der Bohrung RB485 (B1) in Lokation 6
- Anlage 5.86: Bohrprofil der Bohrung RB486 (B2) in Lokation 6
- Anlage 5.87: Zusammenstellung der Überbohrversuchsdaten für Lokation 6 (Zentralbereich)
- Anlage 5.88: Exemplarische Darstellung von Messdaten aus einem Überbohrversuch in Lokation 6
- Anlage 5.89: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB485 (B1)
- Anlage 5.90: Ergebnisse der Überbohrversuche in Bohrung RB486 (B2)
- Anlage 5.91: Last-Deformationsdiagramme für Prüfkörper aus Überbohrversuch M6B1UB01
- Anlage 5.92: Zusammenstellung der im Labor ermittelten E-Moduli (Lokation 6)
- Anlage 6.1: Vergleich der in Lokation 1 (Bohrbereich 3.05) ermittelten Gebirgs-  
spannungen
- Anlage 6.2: Vergleich der in Lokation 2 (Bohrbereich 3.07) ermittelten Gebirgs-  
spannungen
- Anlage 6.3: Vergleich der in Lokation 3 (Bohrbereich 3.02) ermittelten Gebirgs-  
spannungen

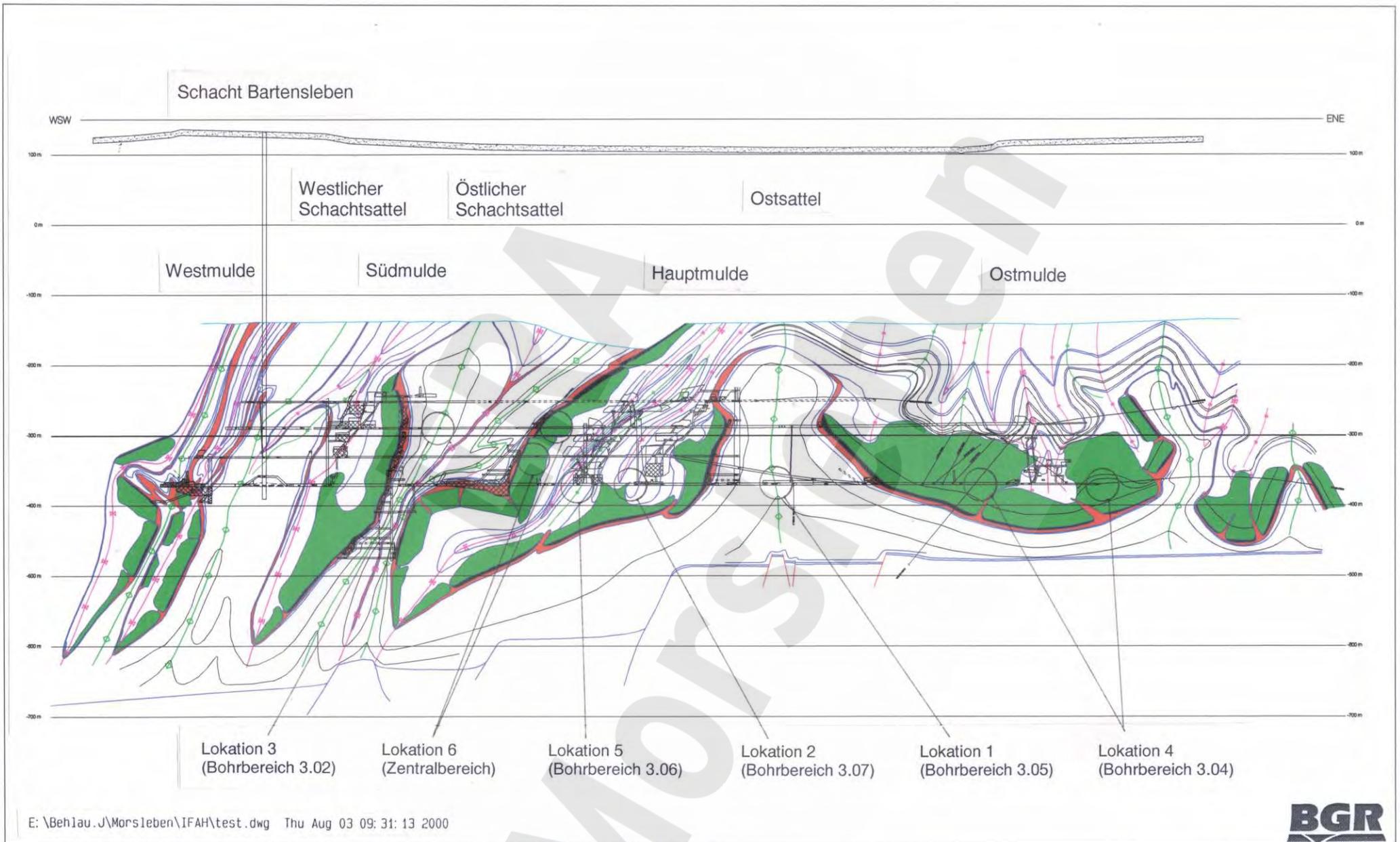
Anlage 6.4: Vergleich der in Lokation 4 (Bohrbereich 3.04) ermittelten Gebirgs-  
spannungen

Anlage 6.5: Vergleich der in Lokation 5 (Bohrbereich 3.06) ermittelten Gebirgs-  
spannungen

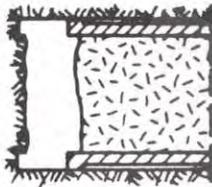
ERA  
Morsleben

**ERA**  
**Morsleben**

ANLAGEN



Ost-West-Profil durch die Schachtanlage Bartensleben (BGR 1997)  
mit Angabe der Lokationen für Gebirgsspannungsuntersuchungen



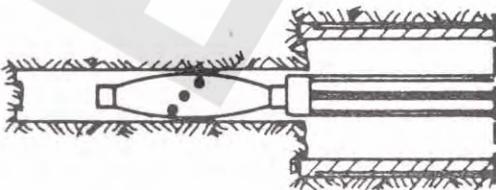
Kernbohrung  $\varnothing$  148 mm



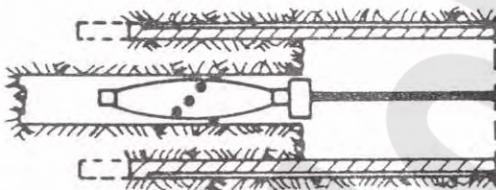
Pilotbohrloch  $\varnothing$  46 mm



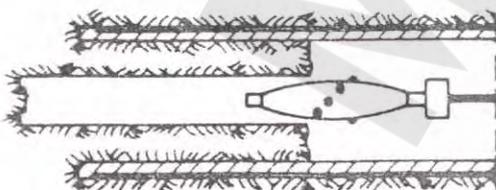
Einbau des Doppelkernrohrs  
mit Zentrierung



Einbau der BGR-Überbohrsonde

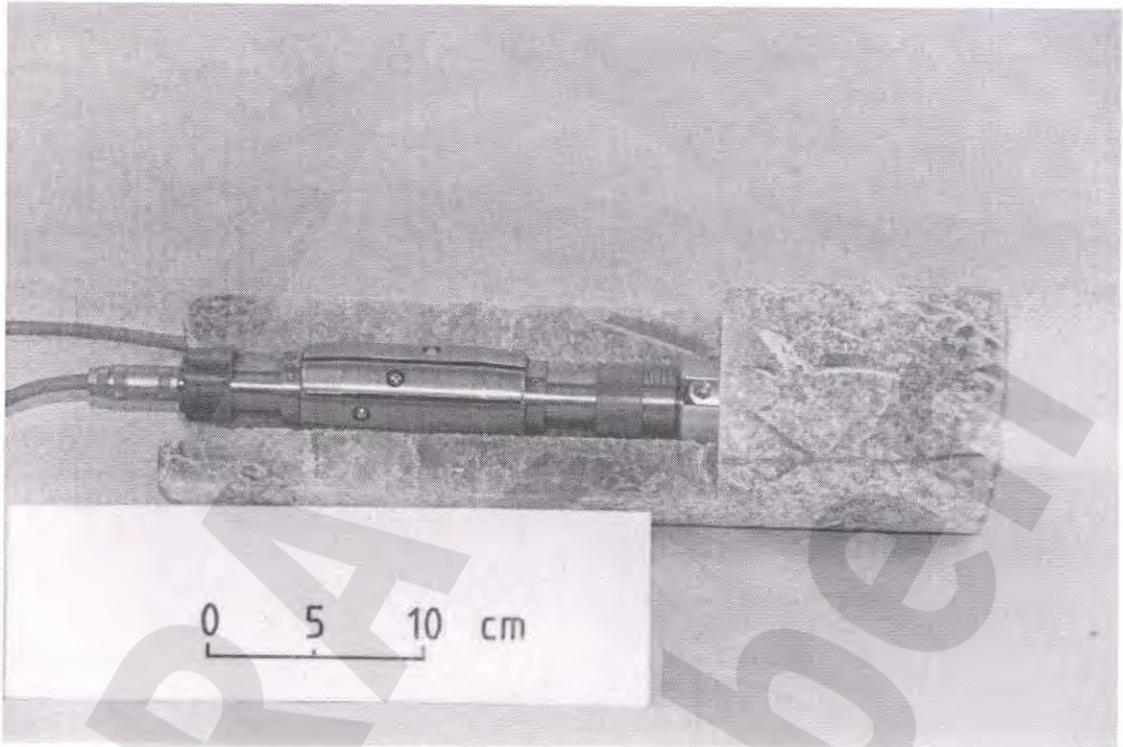


Überbohrvorgang

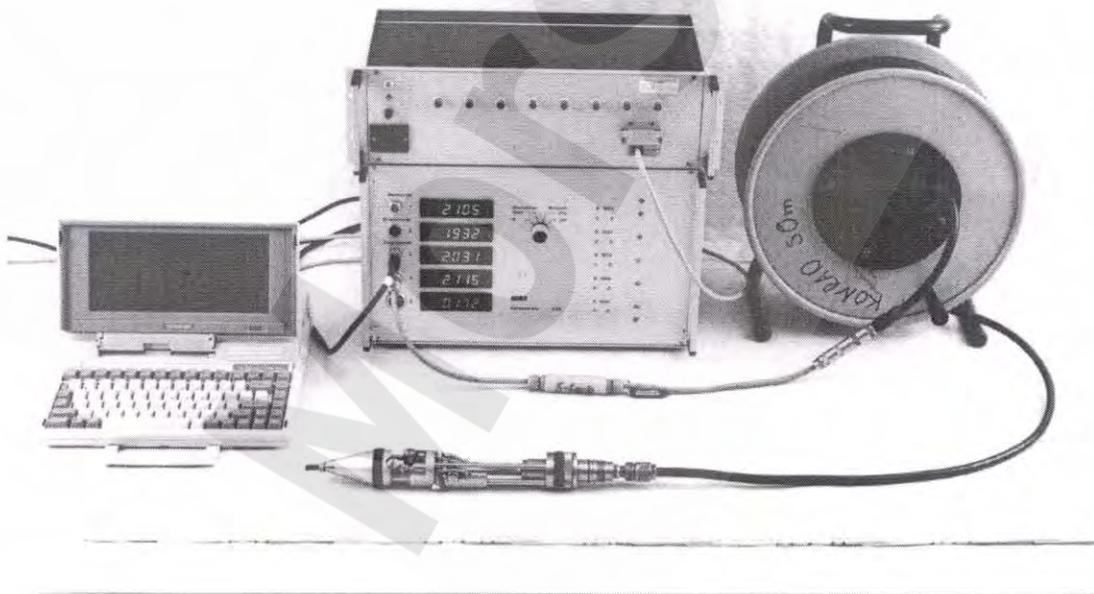


Ausbau der Überbohrsonde  
und des Kernrohrs

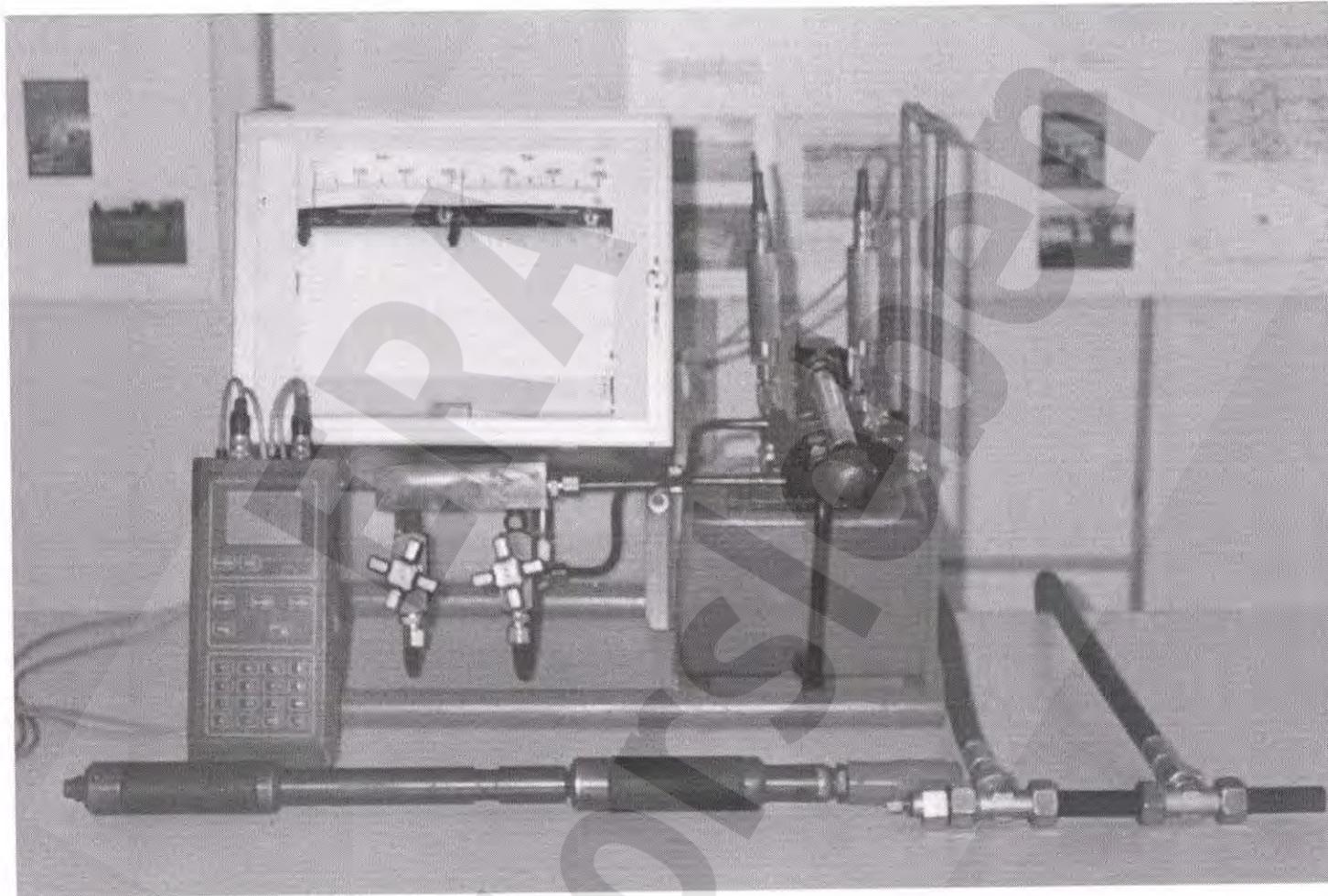




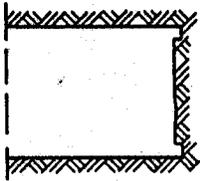
a) BGR-2D-Überbohrsonde (MkIV) in aufgesägtem Bohrkern



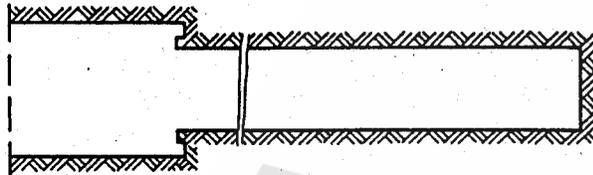
b) Datenerfassung mit Messverstärker, Datalogger und PC



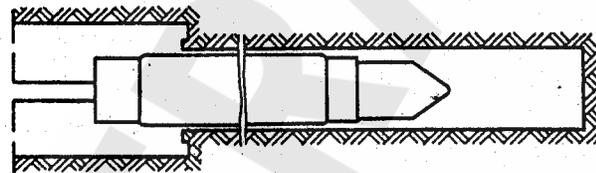
Messausrüstung der Fa. K-UTEC, Sondershausen, für Hydrofrac-Messungen



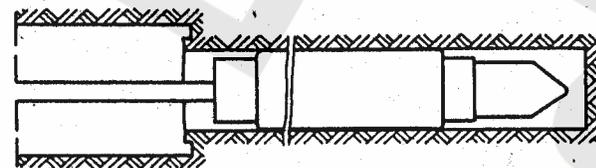
Kernbohrung  $\varnothing$  148 mm



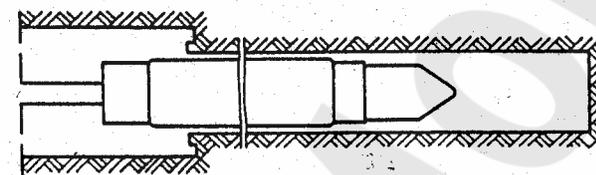
zentrische Pilotbohrung  $\varnothing$  86 mm



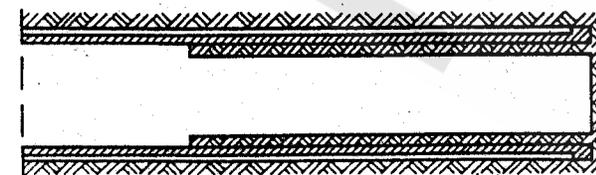
Einbau des Dilatometers mit Setzgestänge, Meß- und Hydraulikkabel



Versuchsdurchführung

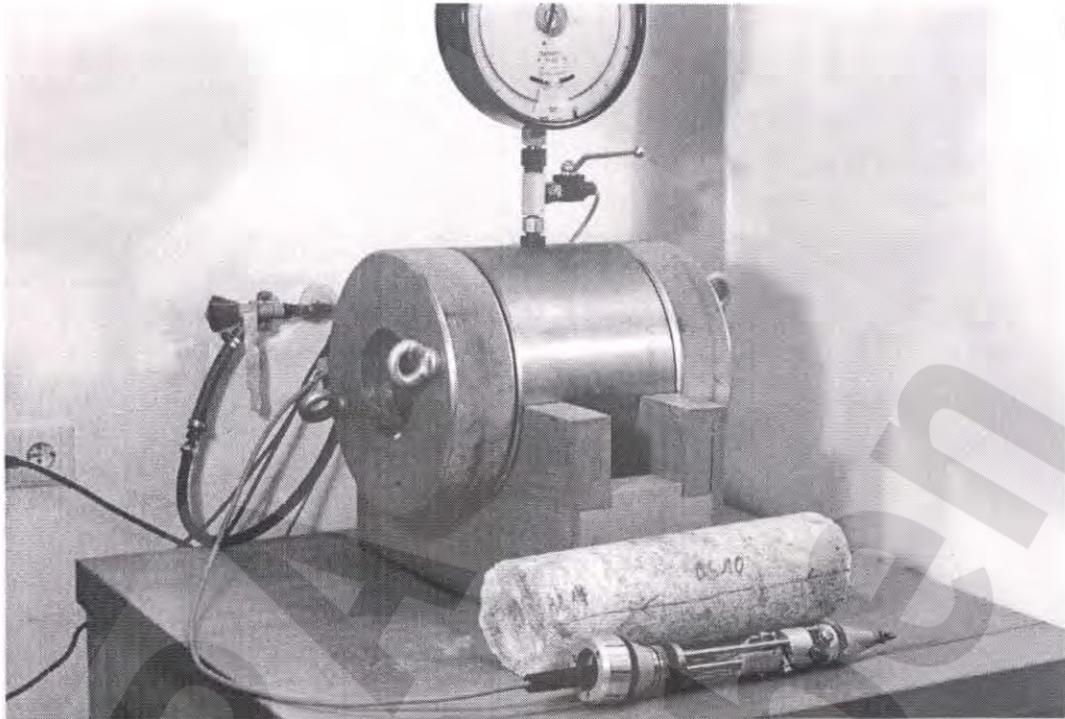


Ausbau der Sonde



Überbohren der 86-mm-Bohrung mit  $\varnothing$  146 mm

**BGR**



a) Robertson-Biaxialzelle mit Salzprüfkörper und Verformungsmesseinrichtung



b) Messwerterfassung mit Messverstärker, Datalogger, x-y-Schreibern, PC

## Lokation 1 :

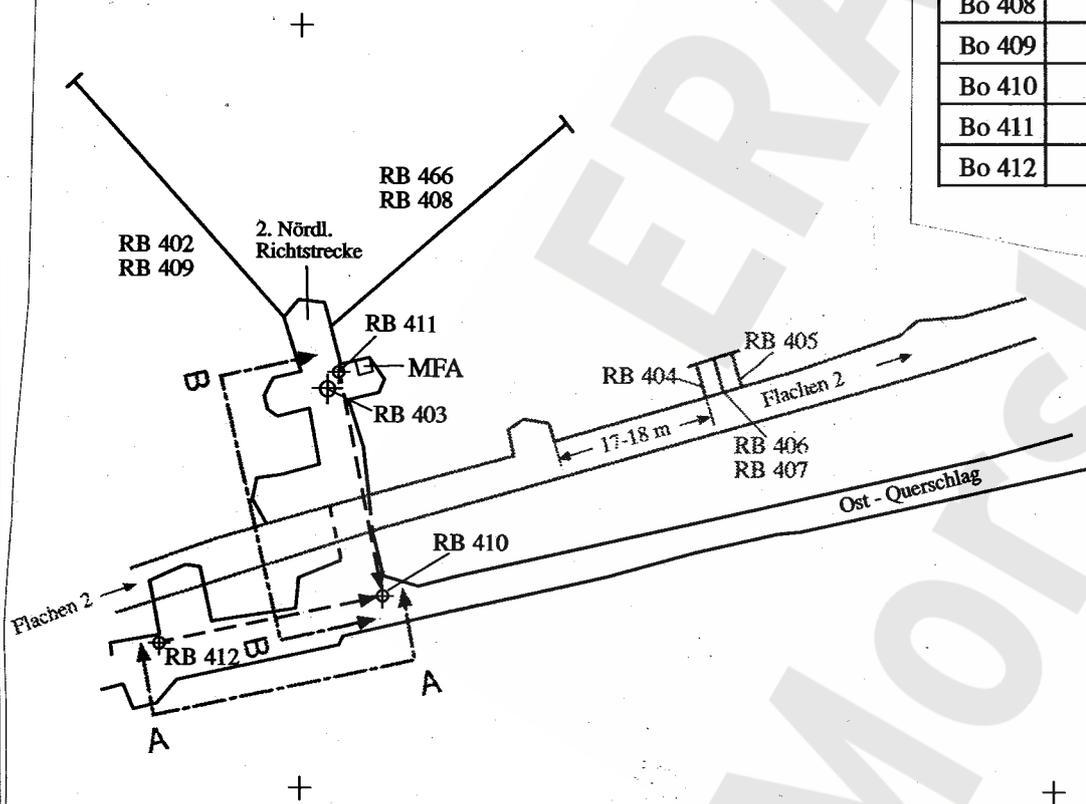
### 4. Sohle, Ostsattel Bohrbereich 3.05



Bo-Nr.	gepl. Länge [m]	Länge [m]	Einbaut. [m]	Durchm. [mm]	Richtung [gon]	Neigung [gon]	Untersuchungs- methoden
Bo 466	-	40	-	46 x	55	+5,5	HY
Bo 402	-	40	-	46 x	355	+5,5	HY
Bo 403	-	30	-	46 x	vert.	+100	HY
Bo 404	7	7	-	180 x	-	0	Führungsbohr. SE
Bo 405	7	7	-	180 x	-	0	Führungsbohr. SE
Bo 406	7	7	-	46	-	0	Meßbohrung SE
Bo 407	7	7	-	46	-	0	Meßbohrung SE
Bo 408	40	40	38,5	46/148	55	-5,5	ÜB/LSP
Bo 409	40	42,1	38,5	46/148	355	-5,5	ÜB/LSP
Bo 410	30	30,2	25,5	46/148	vert.	-100	ÜB/LSP
Bo 411	40	40,3	38,5	146 x	auf Bo 410	-49,5	LSP
Bo 412	40	40,35	38,5	146 x	auf Bo 410	-49,5	LSP

Bo 401 verworfen, dafür Bo 466 neu gebohrt !  
x = Vollbohrung

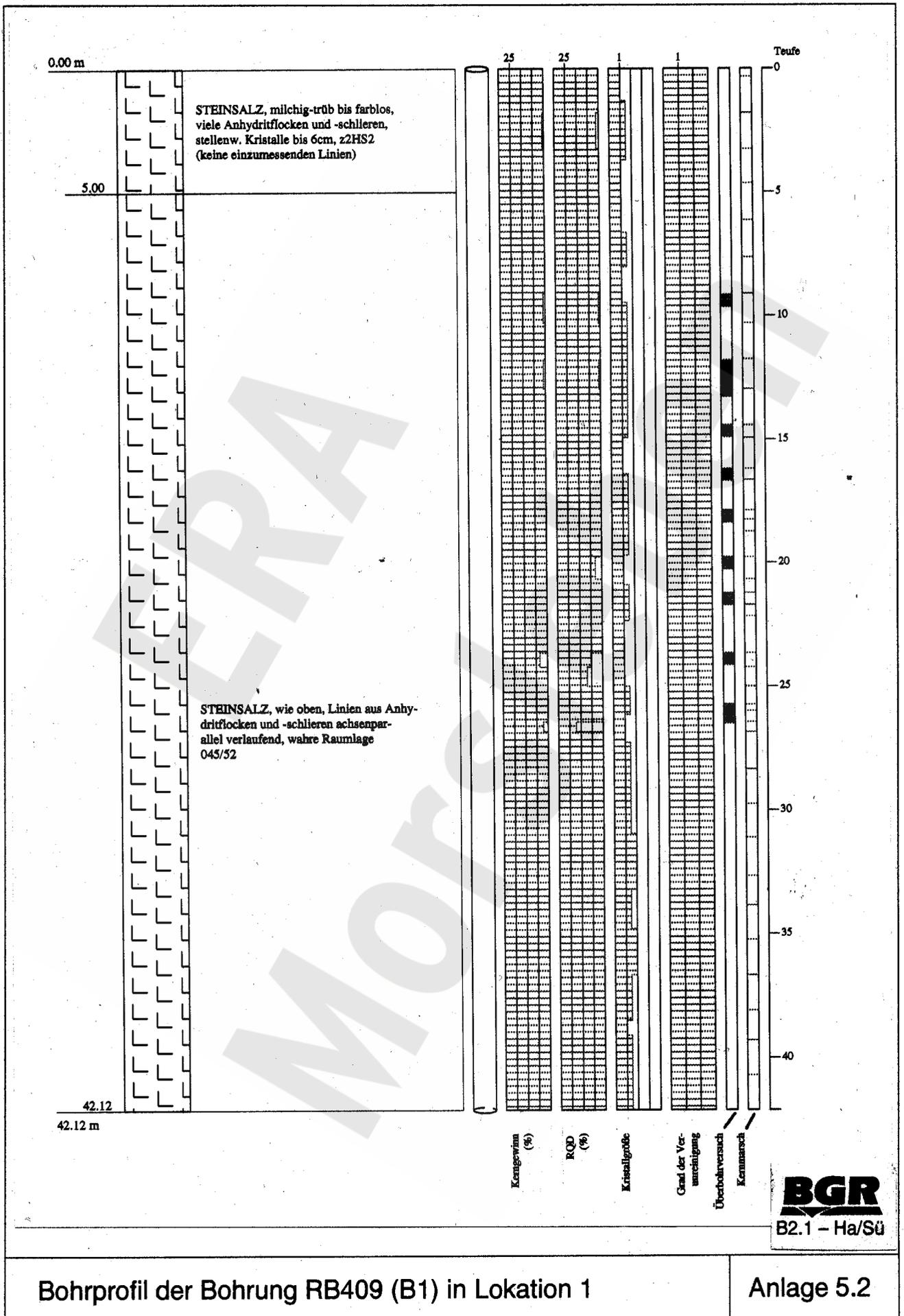
ÜB = Überbohrversuche  
HY = Hydrofrac-Versuche  
SE = Schlitzentlastungsversuch  
LSP = Langzeitspannungsmessungen mit Monitorstationen



**BGR**  
B2.6/B2.1 - Spr/Sch

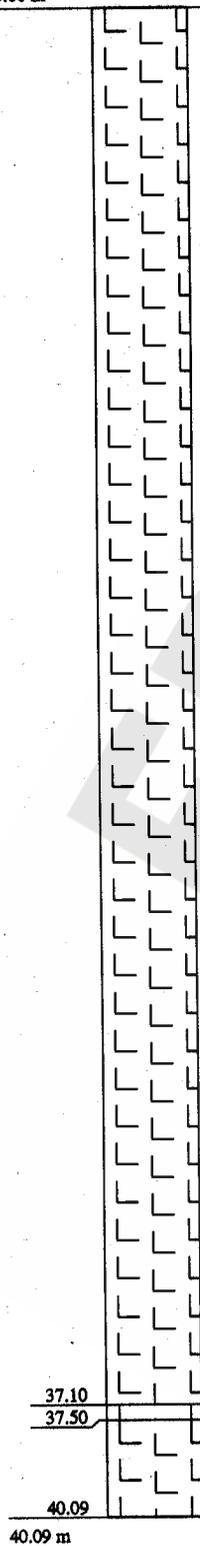
Anordnung der Spannungsmessbohrungen in Lokation 1 (Bohrbereich 3.05)

Anlage 5.1



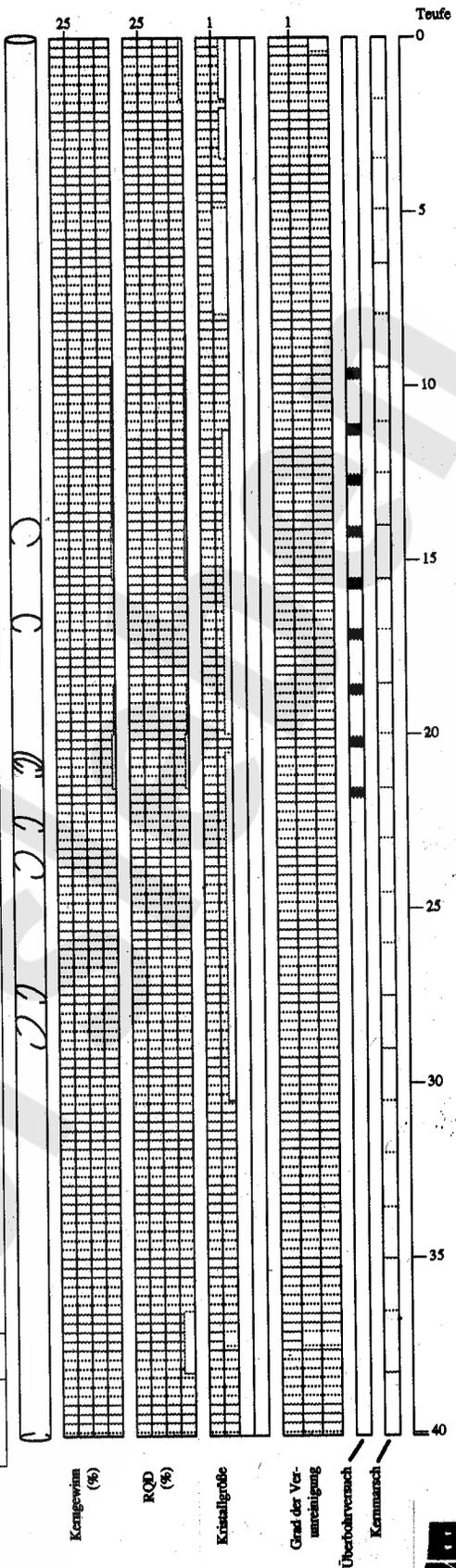
Bohrprofil der Bohrung RB409 (B1) in Lokation 1

0.00 m



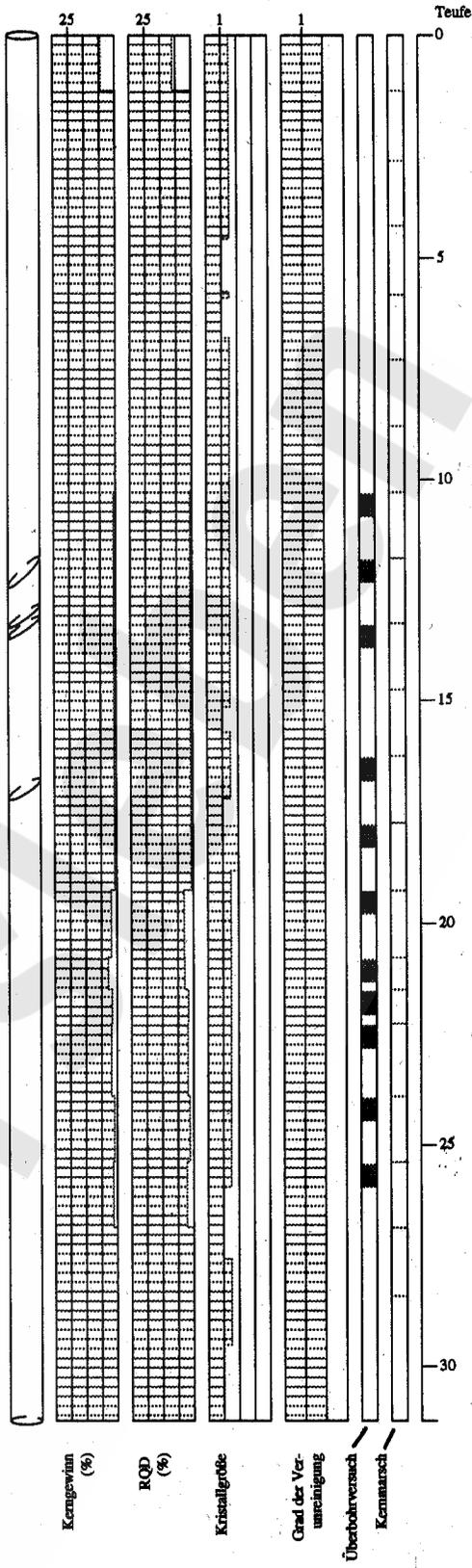
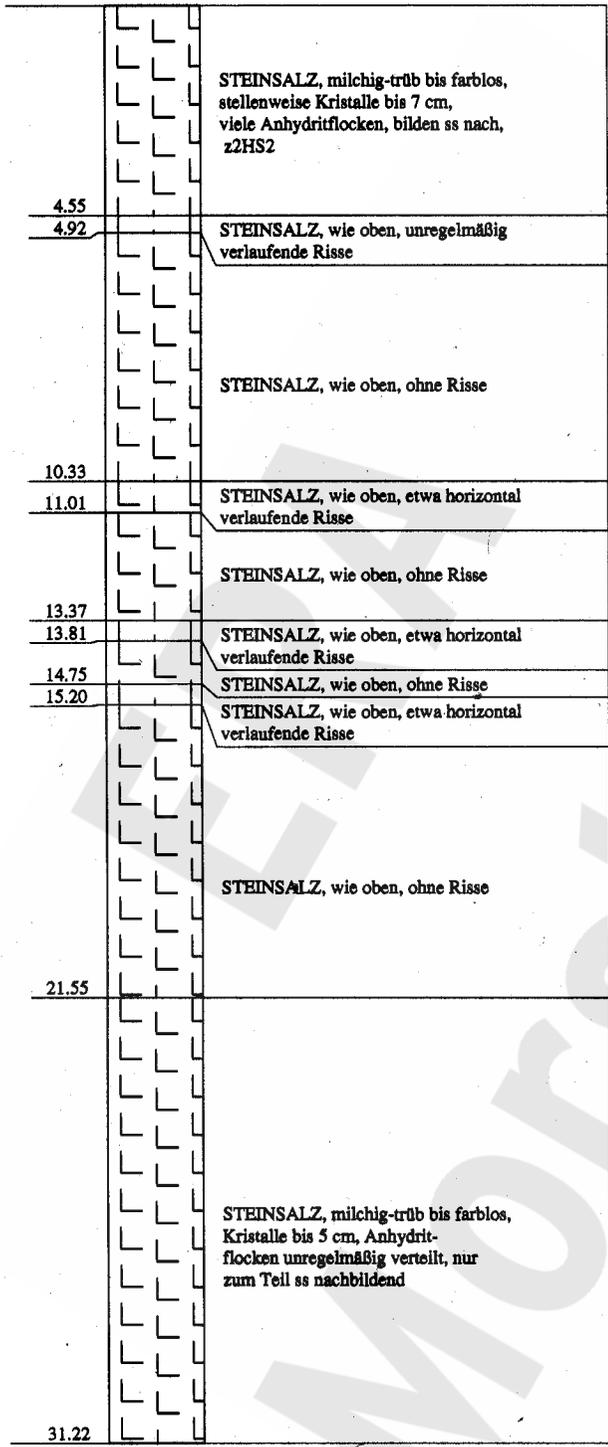
STEINSALZ, z3HS2, milchig bis farblos, viele Anhydritfasern und -flocken, bilden ss nach, einige Anhydritlinien, stellenweise Kristallbrocken bis 8 cm

STEINSALZ, weislich-farblos, vereinzelte Anhydritflocken  
STEINSALZ, milchig-trüb bis farblos, viele Anhydritfasern und -flocken, bilden ss nach, stellenweise zerrissene Anhydritlinien



**BGR**  
B2.1 - Ha/Sü

0.00 m



**BGR**  
B2.1 - Ha/Sü

Versuchs- bezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Versuchs- datum	Bohrloch- tiefe (m) <sup>2)</sup>	Bohrkern- gewinn <sup>3)</sup>	Versuchs- qualität <sup>4)</sup>	E-Modul (GPa) <sup>5)</sup>
M1B1UB01	z2HS2	26.08.94	9,10	ja	ausreichend	32,2
M1B1UB02	z2HS2	29.08.94	11,78	nein	mangelhaft	---
M1B1UB03	z2HS2	30.08.94	14,41	nein	mangelhaft	---
M1B1UB04	z2HS2	31.08.94	16,20	ja	ausreichend	30,9
M1B1UB05	z2HS2	01.09.94	17,88	nein	mangelhaft	---
M1B1UB06	z2HS2	01.09.94	18,28	ja	mangelhaft	32,8
M1B1UB07	z2HS2	02.09.94	19,78	nein	mangelhaft	---
M1B1UB08	z2HS2	05.09.94	20,16	ja	mangelhaft	31,4
M1B1UB09	z2HS2	06.09.94	21,23	nein	ausreichend	(31,5)
M1B1UB10	z2HS2	06.09.94	21,71	nein	mangelhaft	---
M1B1UB11	z2HS2	07.09.94	23,66	nein	mangelhaft	---
M1B1UB12	z2HS2	08.09.94	23,98	nein	ausreichend	(31,5)
M1B1UB13	z2HS2	08.09.94	25,73	nein	mangelhaft	(31,5)
M1B1UB14	z2HS2	09.09.94	26,00	nein	ausreichend	(31,5)
M1B1UB15	z2HS2	09.09.94	26,30	nein	ausreichend	(31,5)
M1B2UB01	z2HS2	21.09.94	9,50	ja	ausreichend	30,3
M1B2UB02	z2HS2	23.09.94	11,10	ja	ausreichend	31,3
M1B2UB03	z2HS2	26.09.94	12,55	ja	mangelhaft	35,7
M1B2UB04	z2HS2	26.09.94	14,04	ja	ausreichend	32,5
M1B2UB05	z2HS2	26.09.94	15,53	ja	gut	30,9
M1B2UB06	z2HS2	27.09.94	16,99	ja	ausreichend	31,1
M1B2UB07	z2HS2	27.09.94	18,57	ja	ausreichend	31,5
M1B2UB08	z2HS2	28.09.94	20,07	ja	ausreichend	31,5
M1B2UB09	z2HS2	28.09.94	21,53	ja	ausreichend	31,0
M1B3UB01	z2HS2	22.11.94	10,33	nein	ausreichend	(33,3)
M1B3UB02	z2HS2	23.11.94	11,83	ja	gut	35,1
M1B3UB03	z2HS2	23.11.94	13,31	nein	ausreichend	(33,3)
M1B3UB04	z2HS2	24.11.94	16,30	nein	ausreichend	(33,3)
M1B3UB05	z2HS2	25.11.94	17,80	ja	gut	33,5
M1B3UB06	z2HS2	25.11.94	19,30	nein	ausreichend	(33,3)
M1B3UB07	z2HS2	28.11.94	20,81	nein	mangelhaft	---
M1B3UB08	z2HS2	29.11.94	21,55	nein	ausreichend	(33,3)
M1B3UB09	z2HS2	29.11.94	22,31	nein	ausreichend	(33,3)
M1B3UB10	z2HS2	30.11.94	23,95	ja	gut	31,3
M1B3UB11	z2HS2	01.12.94	25,45	nein	ausreichend	(33,3)

1) z.B. bedeutet M1B3UB11:  
M = Morsleben  
1 = Lokation 1  
B3 = Bohrung 3 (interne Bezeichnung)  
UB11 = Überbohrversuch Nr. 11

2) Tiefe des Pilotbohrlochmundes  
3) Bohrkerngewinn ausreichend?:  
ja: Kernlänge  $\geq$  37 cm  
nein: Kernlänge  $<$  37 cm  
4) Kriterien nach Kap. 4.1.2

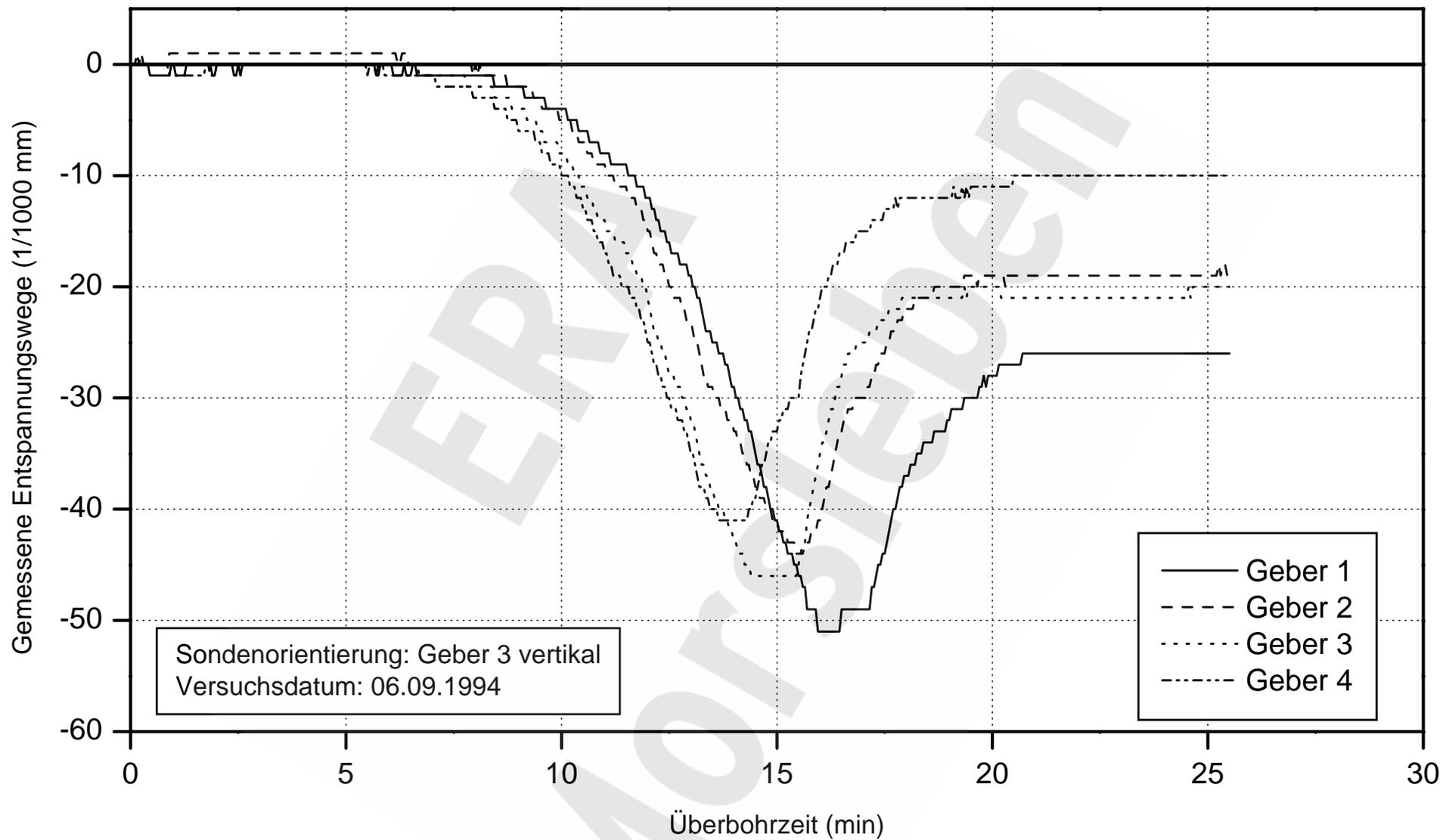
5) Für die Auswertung der Überbohrversuche  
ermittelter oder gewählter E-Modul  
(Werte in Klammern sind geschätzt)

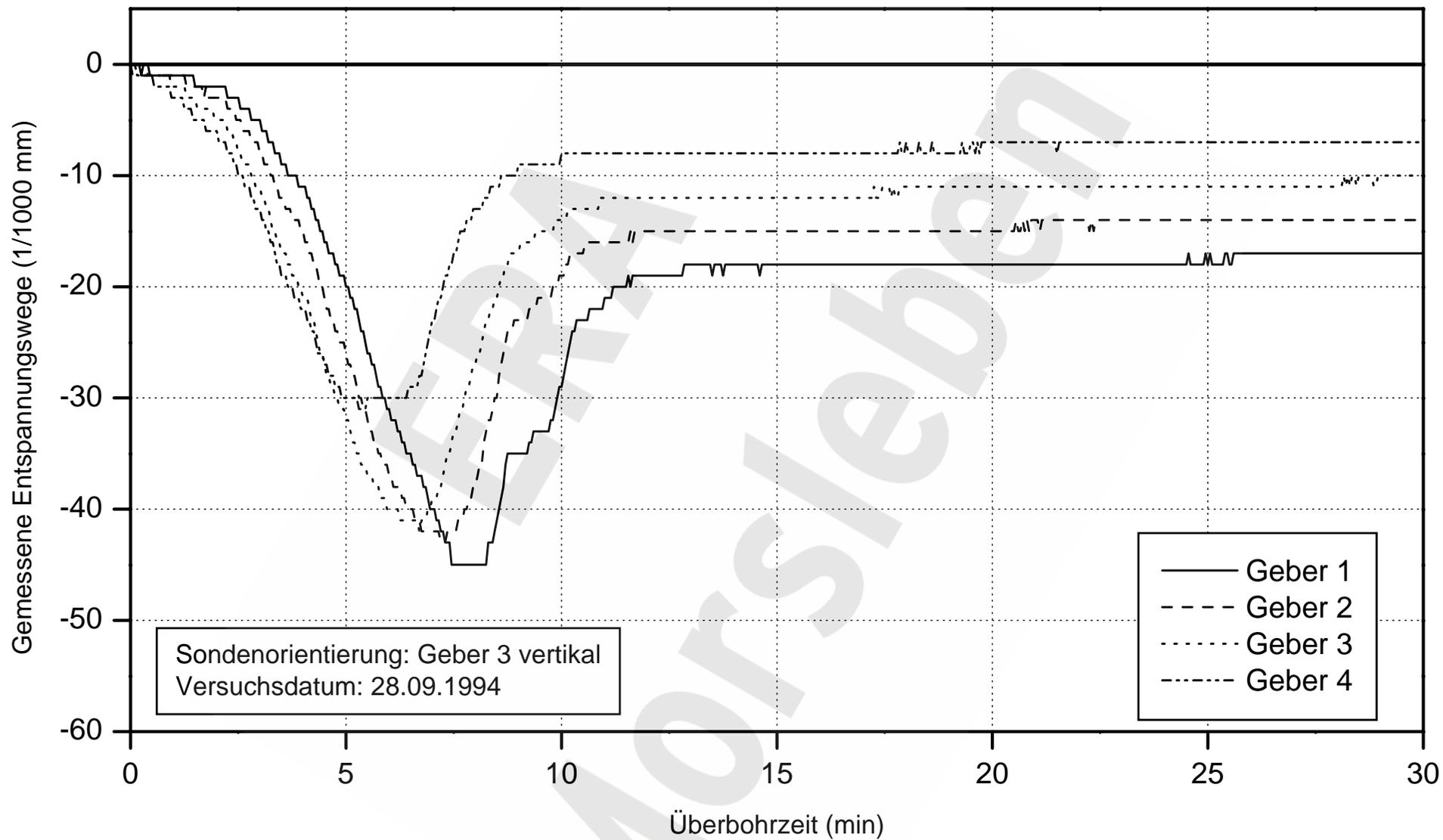
**BGR**

B2.6/B2.1 - Heu

Zusammenstellung der Überbohrversuchsdaten  
für Lokation 1 (Bohrbereich 3.05)

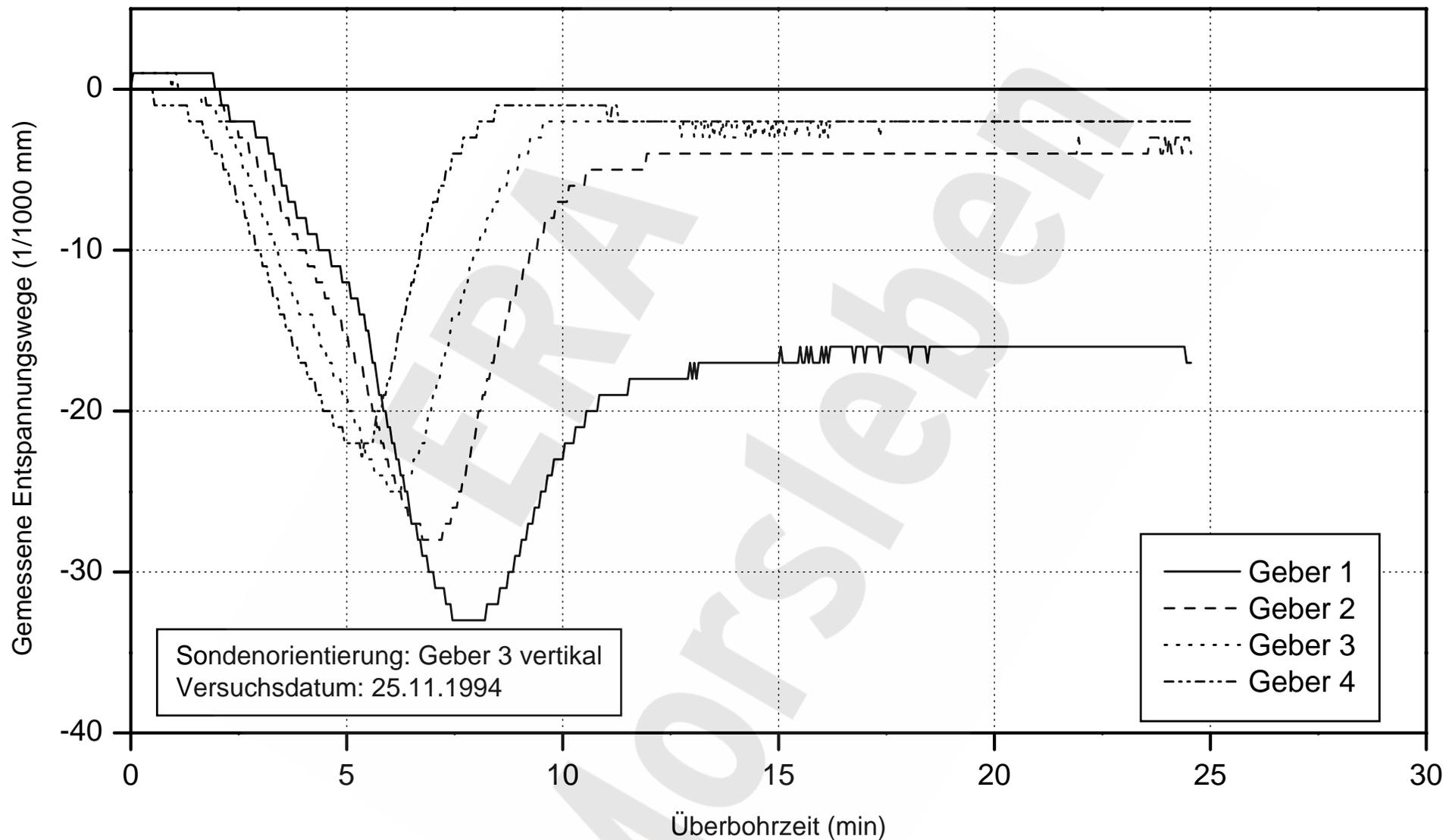
Anlage 5.5

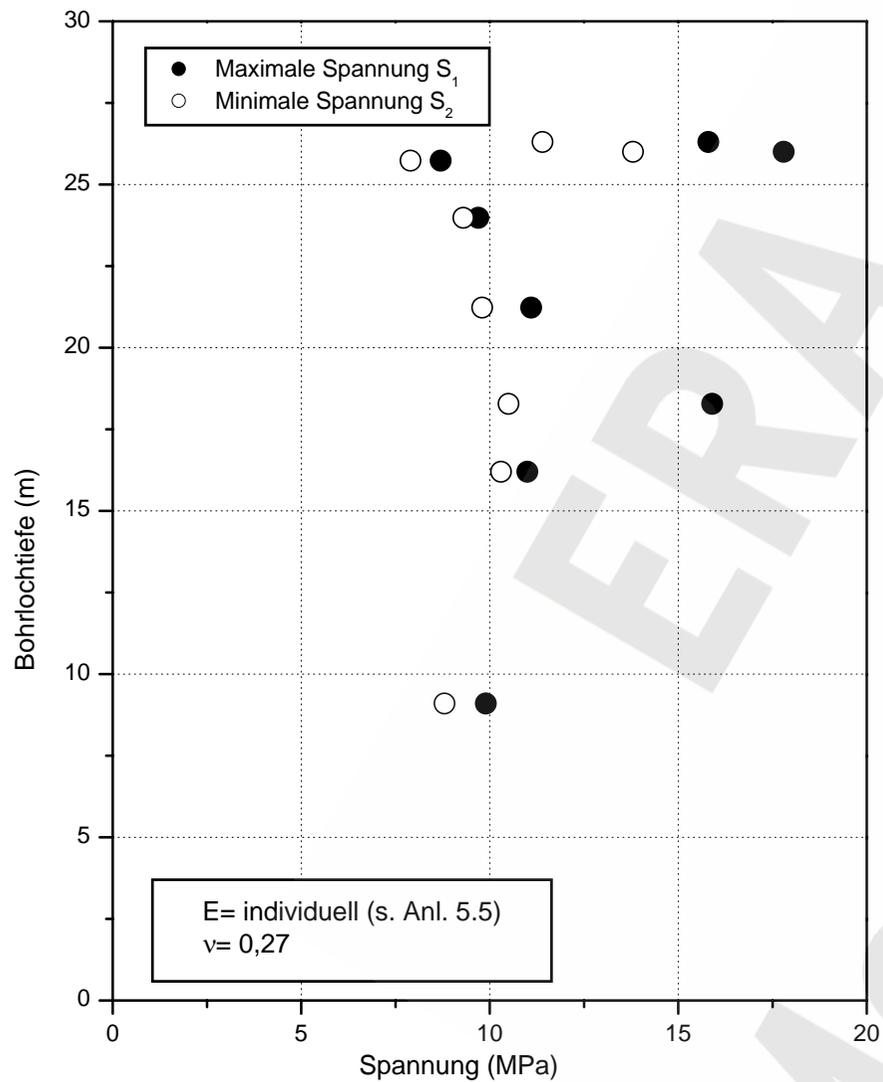




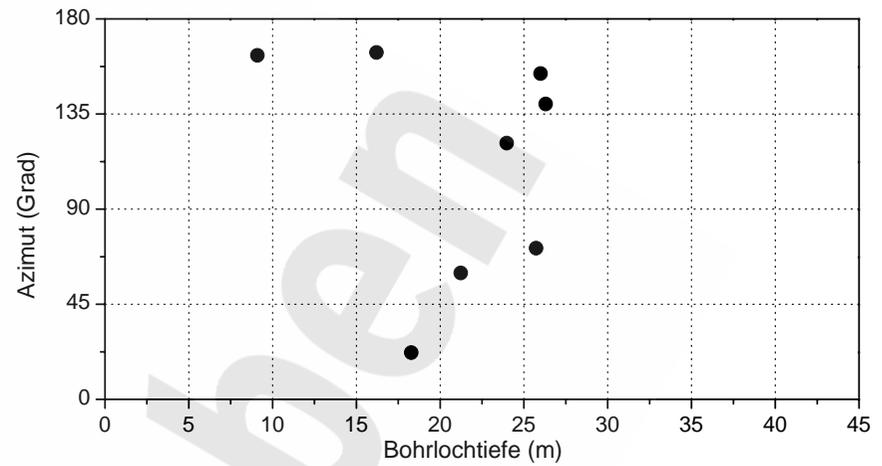
Exemplarische Darstellung von Messdaten aus einem Überbohrversuch in Bohrung RB 408 (B2)

Anlage 5.7

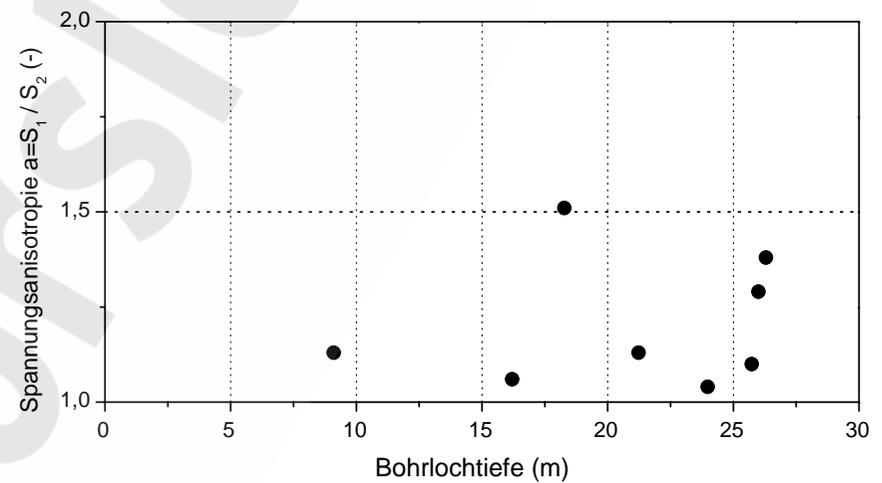




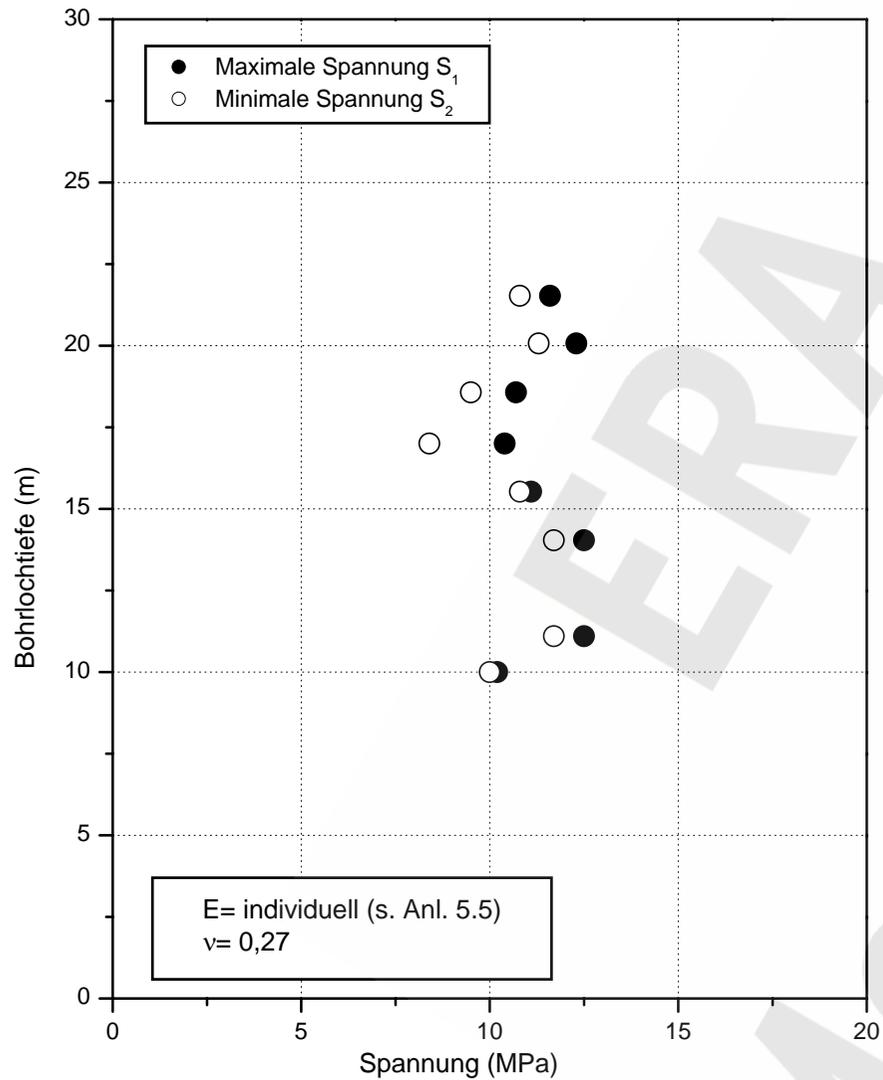
a) Spannungsbeträge



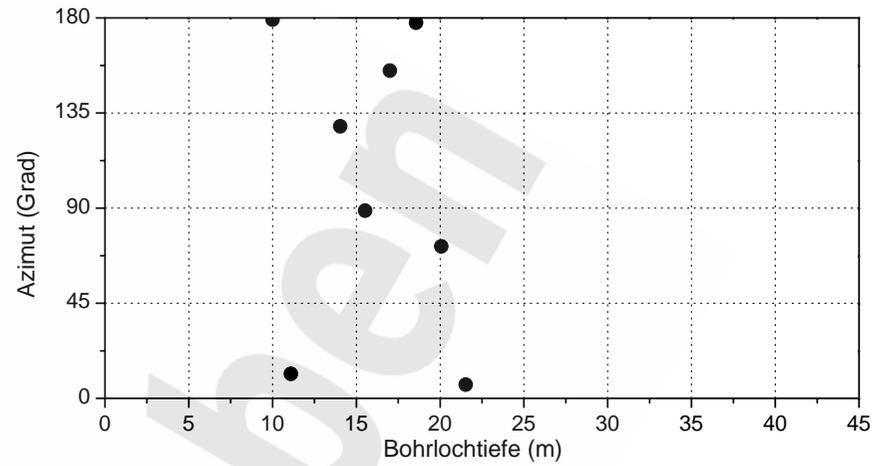
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$



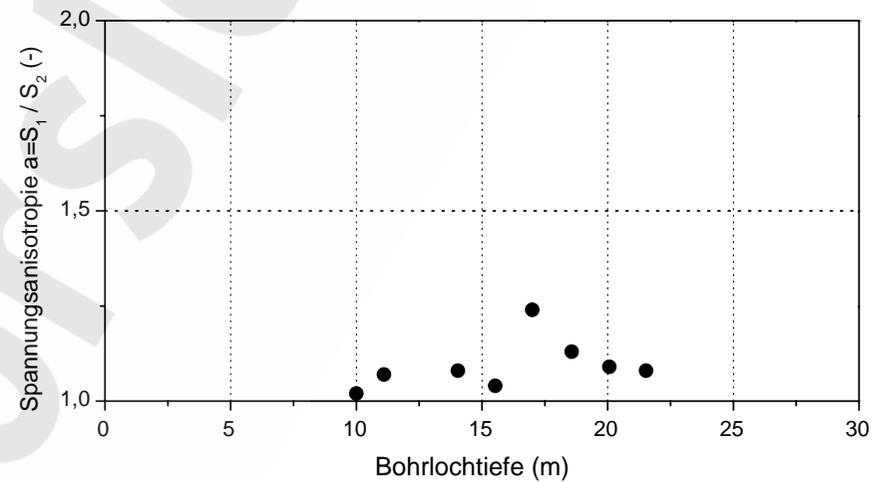
c) Grad der Spannungsanisotropie



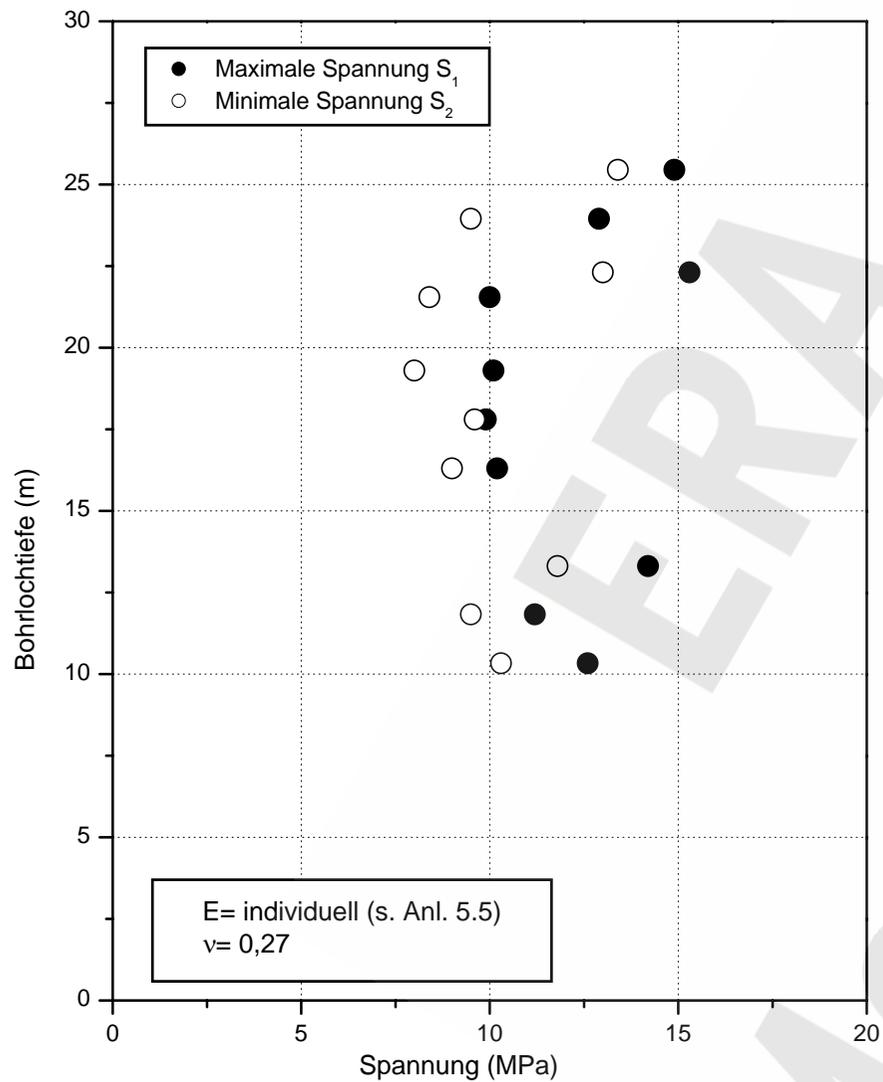
a) Spannungsbeträge



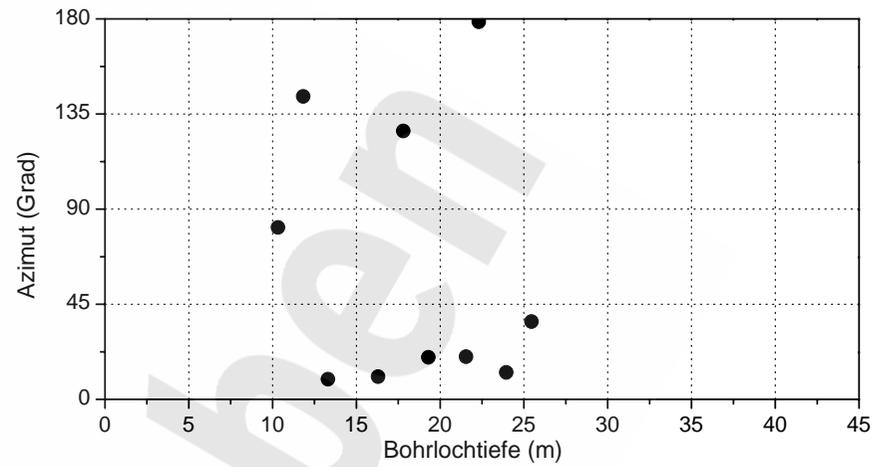
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$



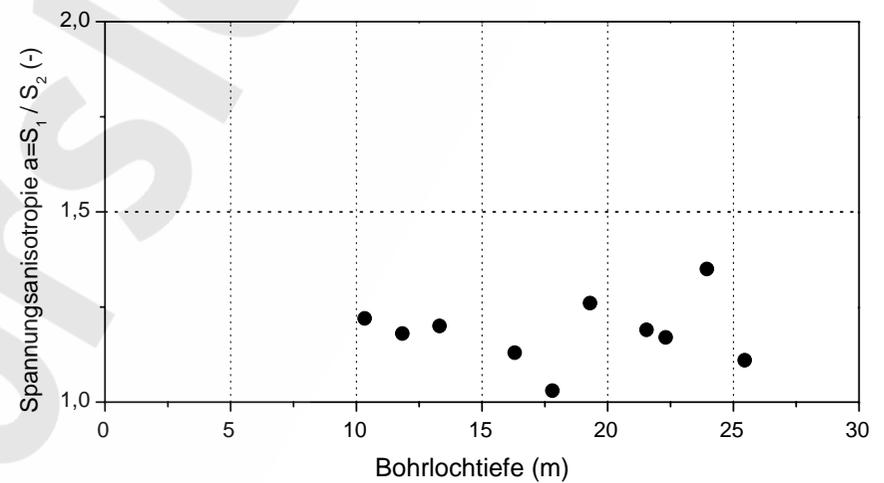
c) Grad der Spannungsanisotropie



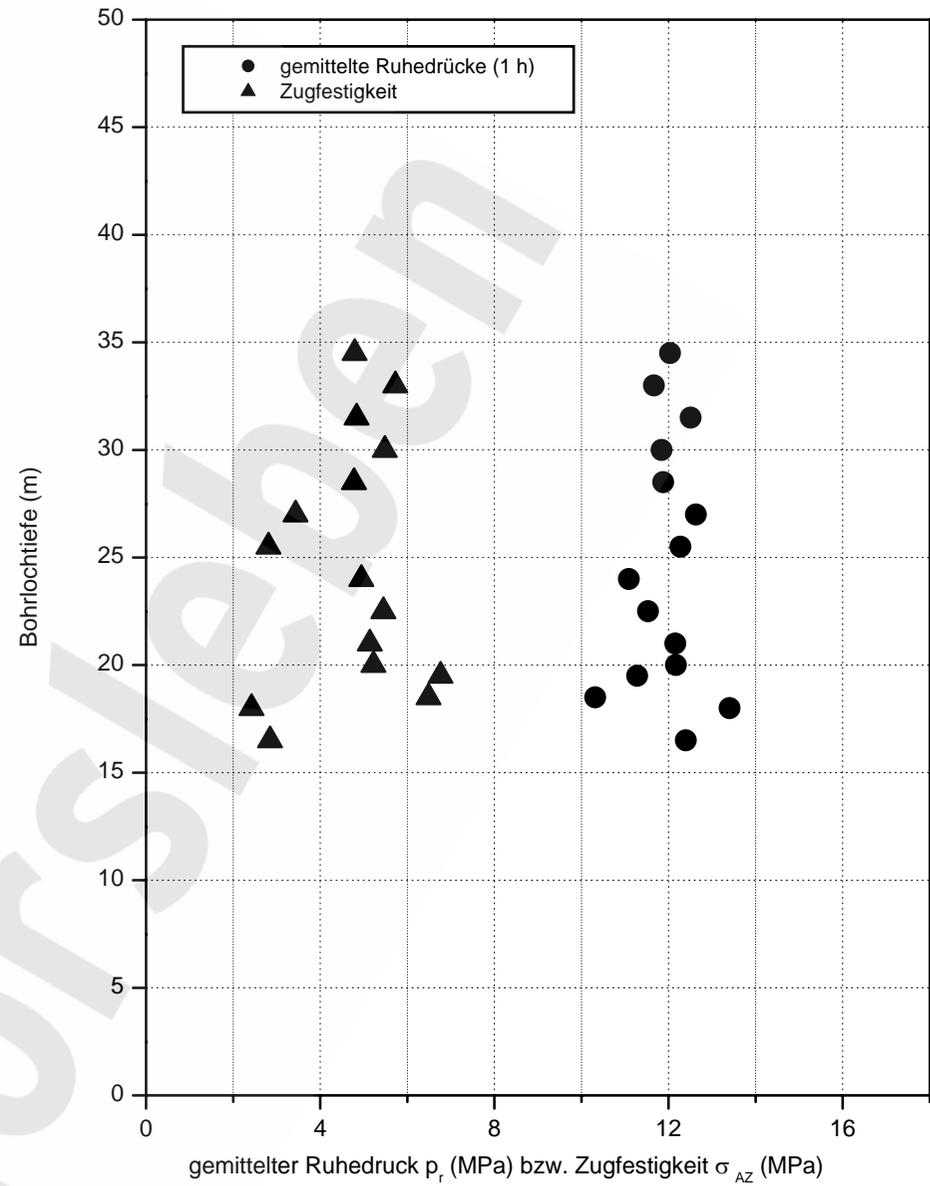
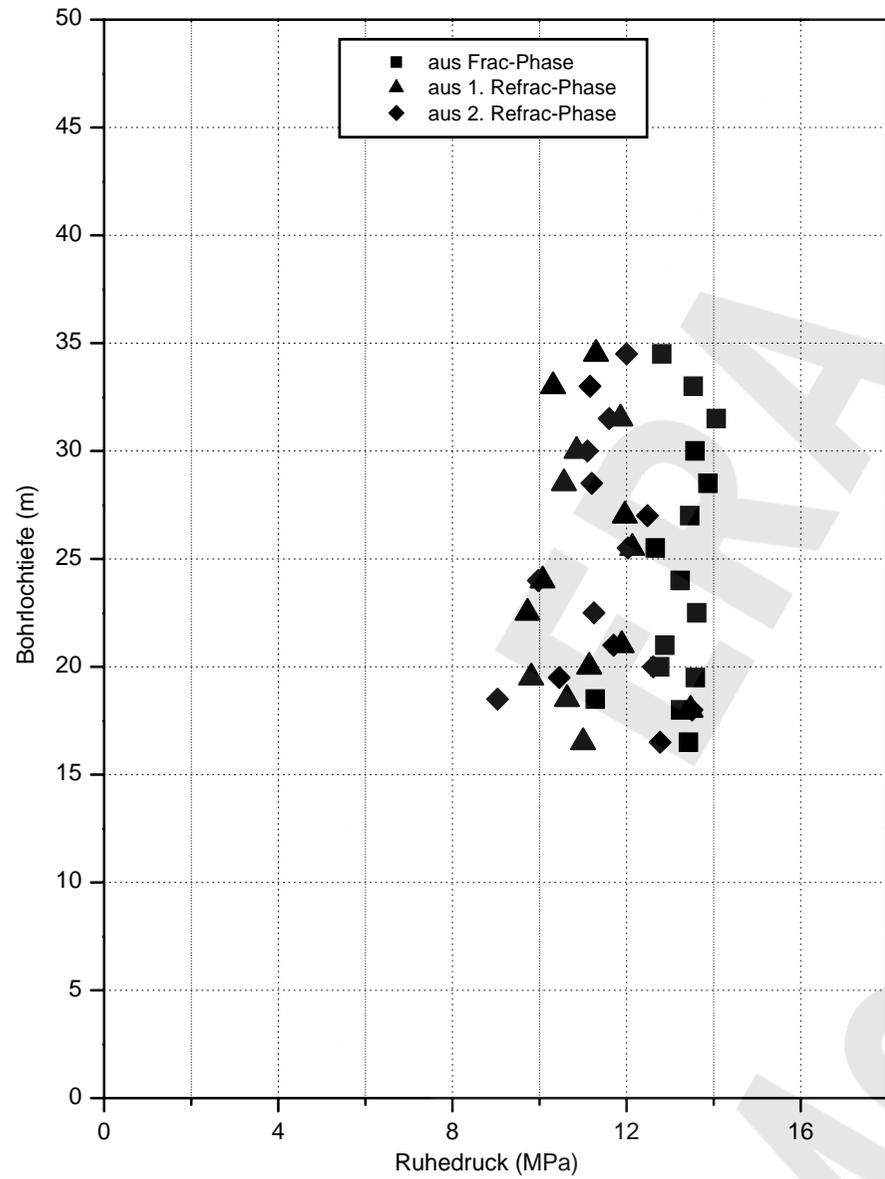
a) Spannungsbeträge

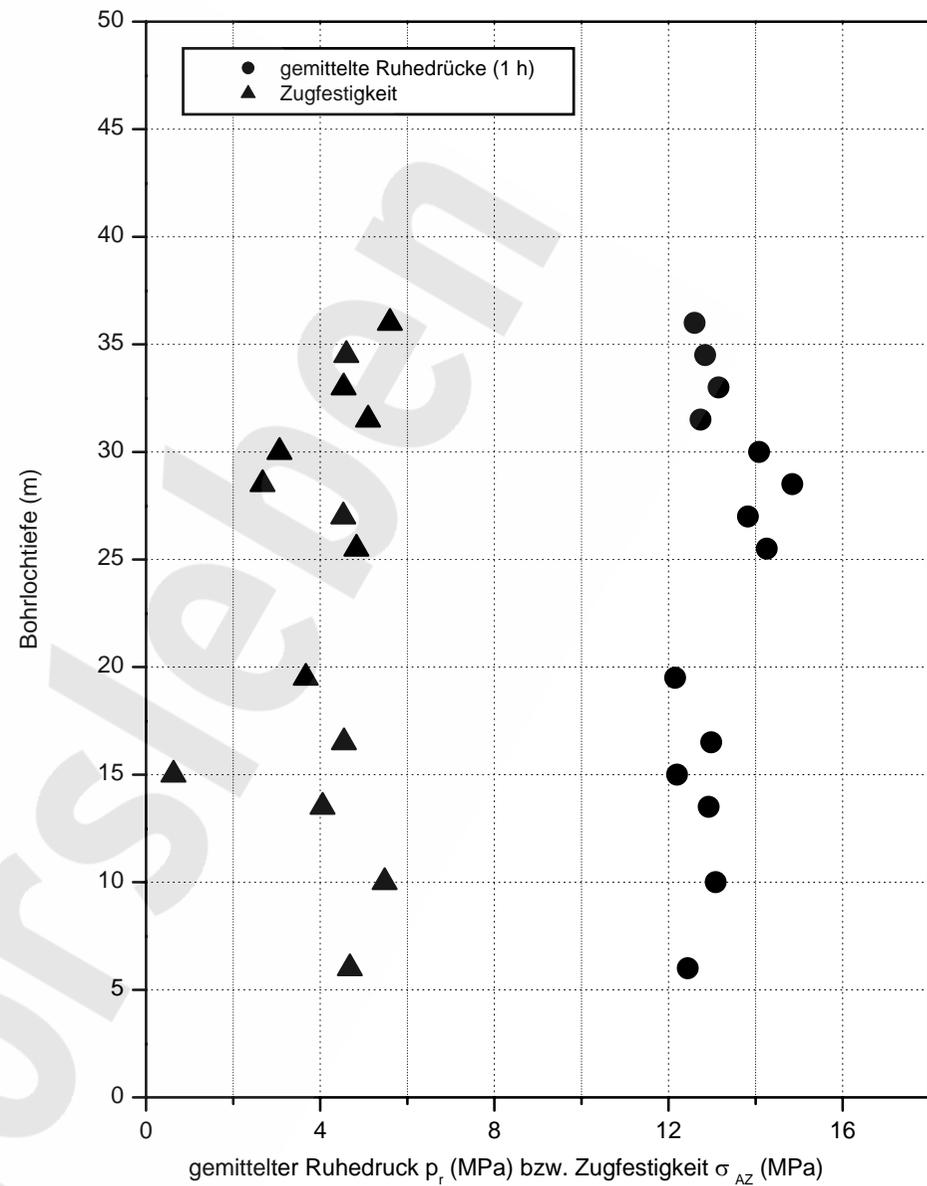
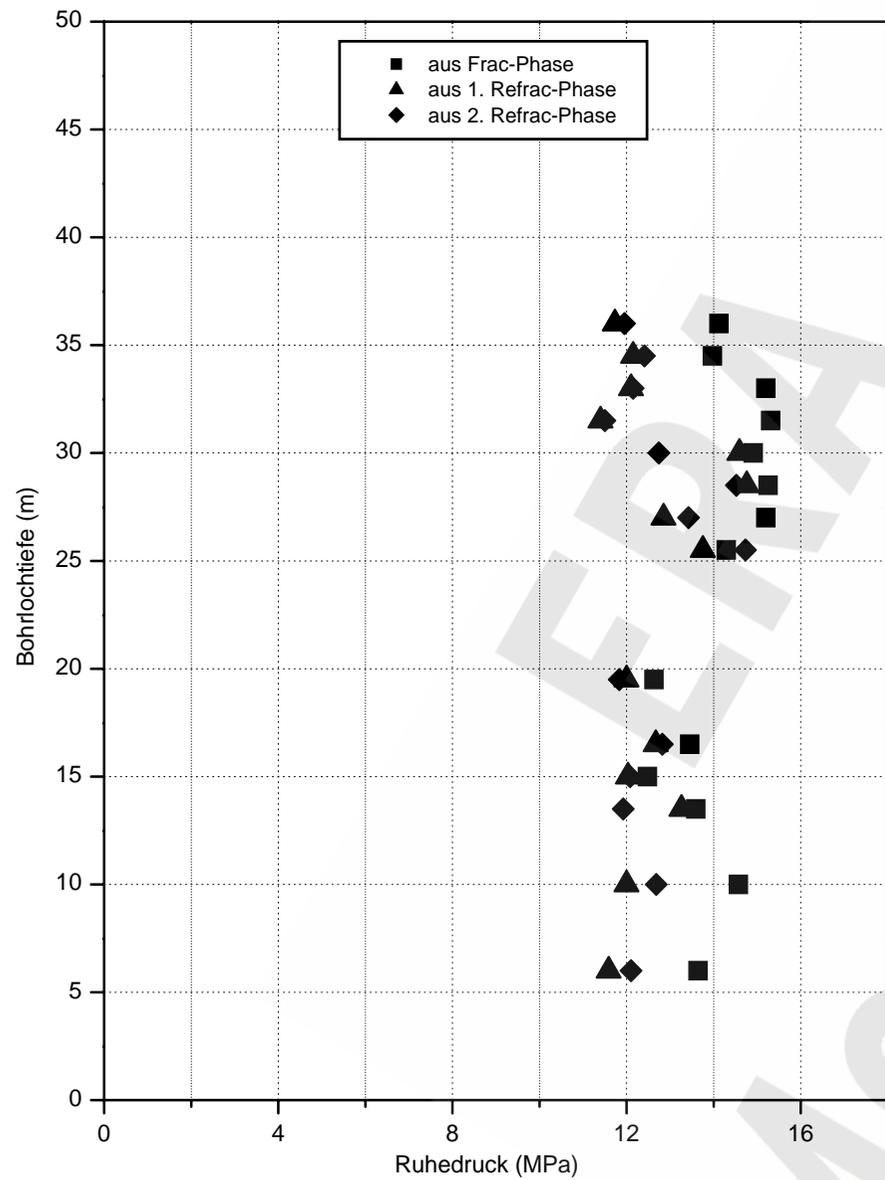


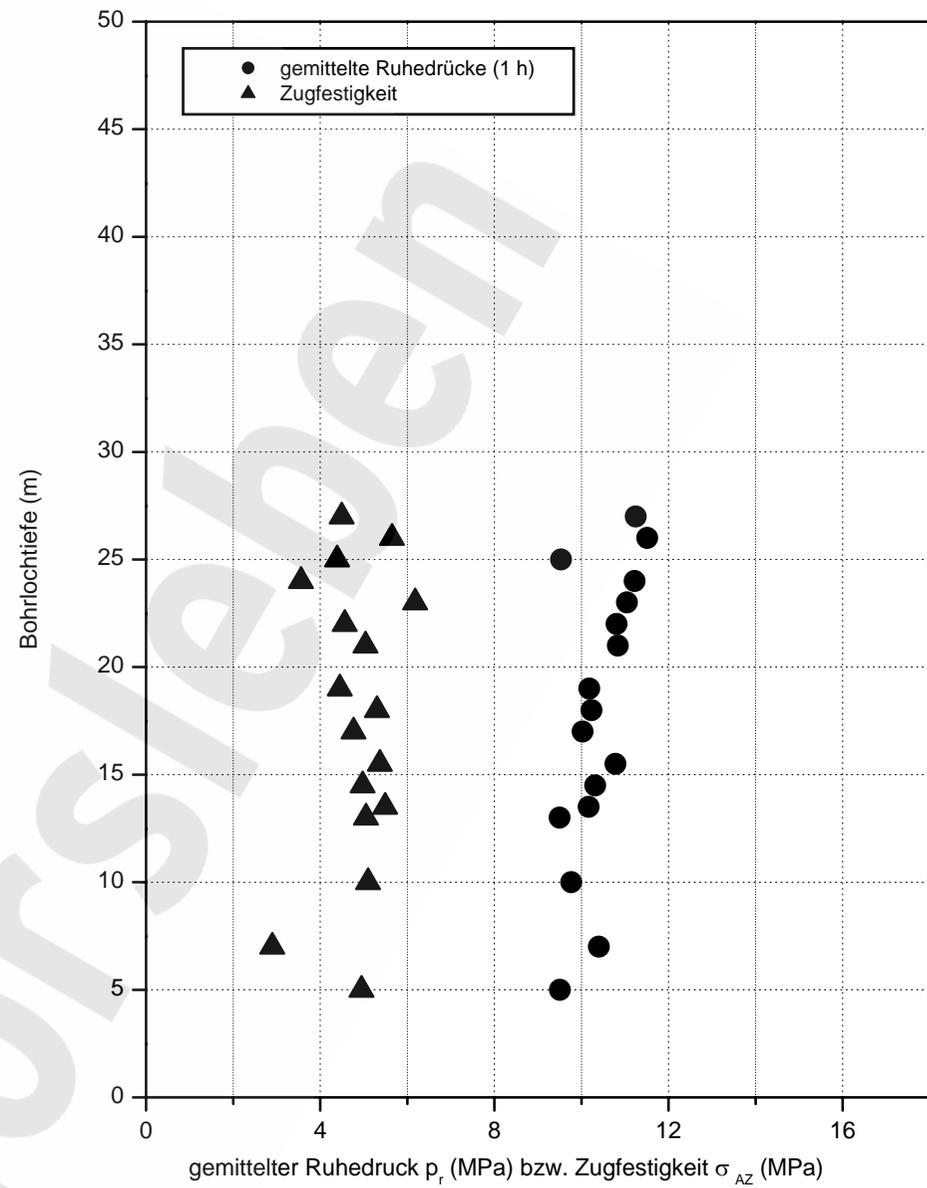
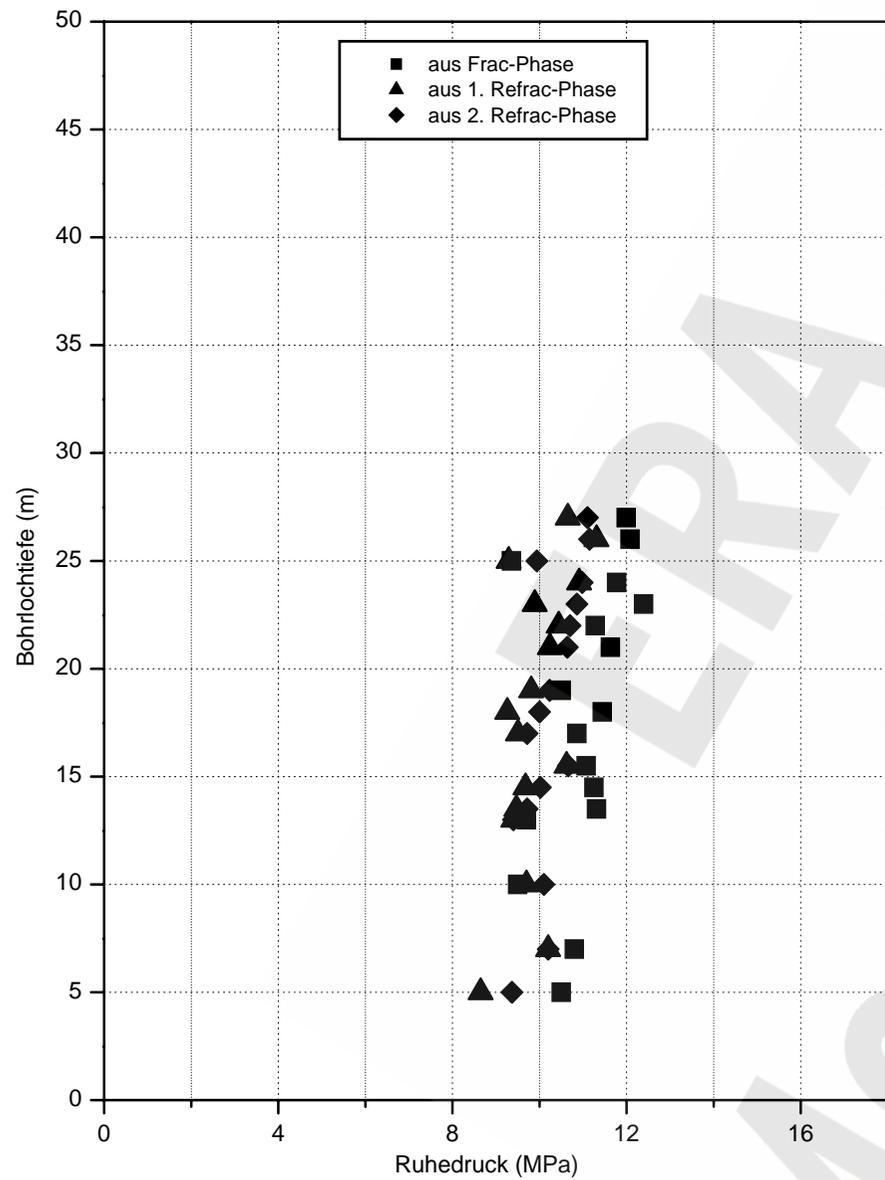
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$

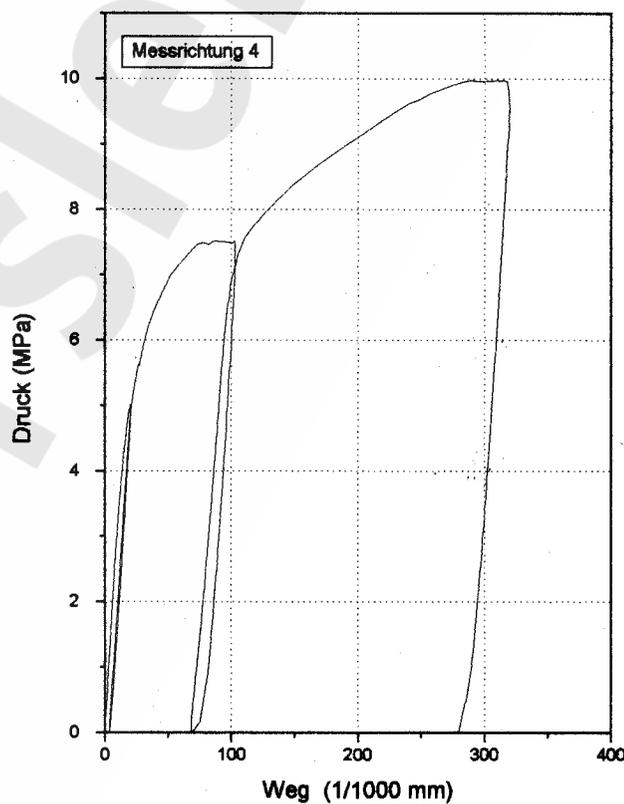
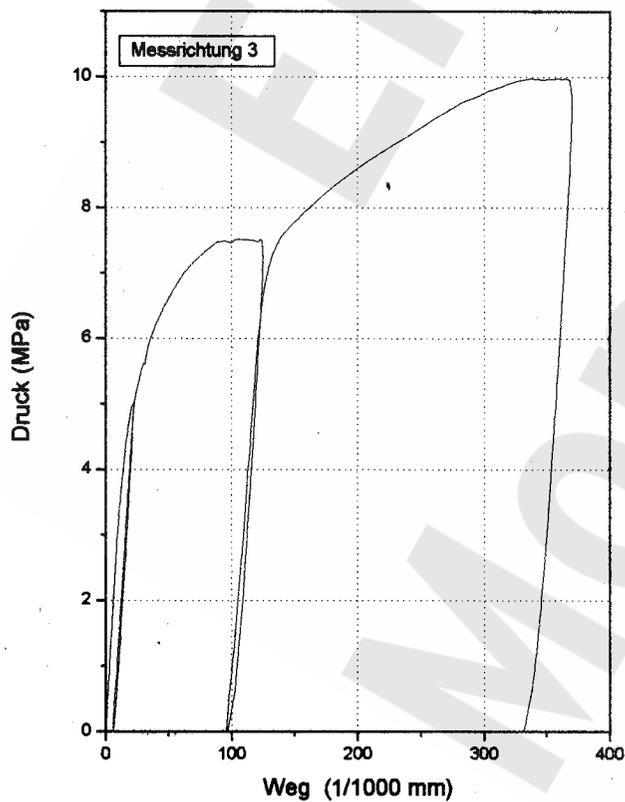
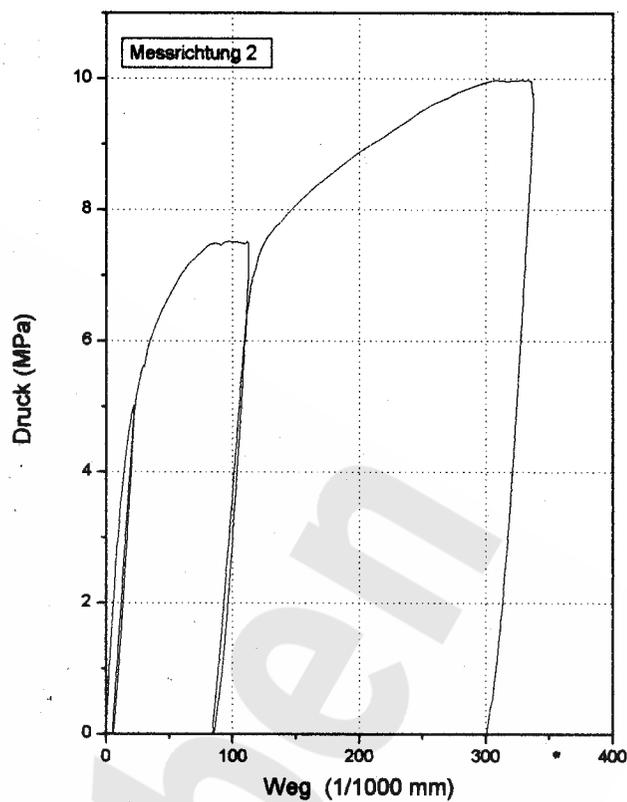
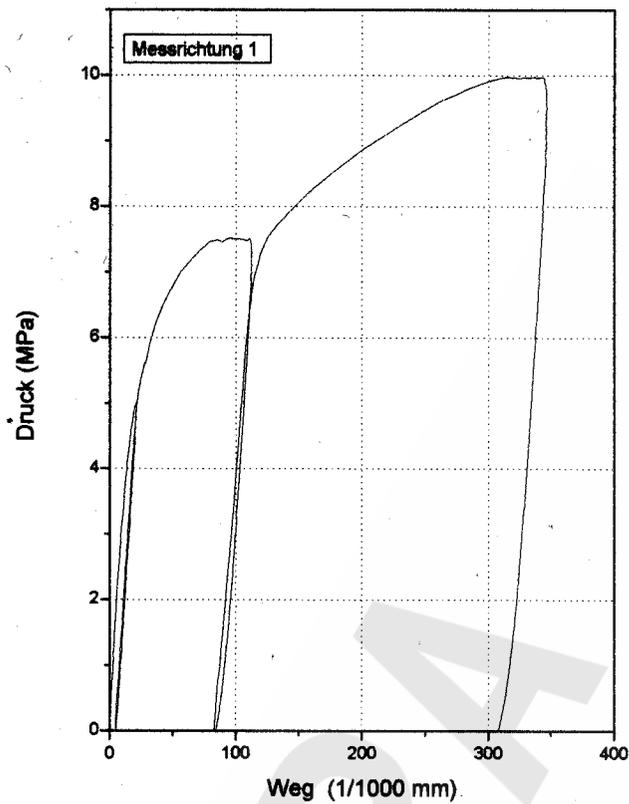


c) Grad der Spannungsanisotropie









Projekt : MORSLEBEN LOKATION 1  
 Versuchsbezeichnung : M1B1UB06  
 Material : STEINSALZ  
 Belastung : 5/ 7,5/ 10 MPa  
 Versuchsdatum : 11.05.95 14.15'

**BGR**  
 B2.6/B2.1-08/00-Heu/Kü

Anlage 5.15

Kernbezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Entnahmetiefe (m)	E-Modul (GPa)			Mittelwert (GPa)
			bei Entlastung von (MPa)			
			5	7,5	10	
M1B1UB01	z2HS2	9,15- 9,71	32,1	32,3	32,2	32,2
M1B1UB04	z2HS2	16,19-16,64	30,9	---	---	30,9
M1B1HZ01	z2HS2	16,64-17,36	32,3	31,4	31,4	31,1
M1B1UB06	z2HS2	18,28-18,74	32,8	---	---	32,8
M1B1HZ02	z2HS2	18,75-19,19	31,2	29,1	29,1	30,0
M1B1UB08	z2HS2	20,16-20,68	31,4	---	---	31,4
M1B2UB01	z2HS2	9,50	30,3	---	---	30,3
M1B2UB02	z2HS2	11,05-11,80	31,8	30,8	31,1	31,3
M1B2UB03	z2HS2	12,52-13,35	37,6	33,8	---	35,7
M1B2UB04	z2HS2	14,05-14,90	32,5	30,6	33,9	32,5
M1B2UB05	z2HS2	15,53-16,16	32,5	30,0	30,3	30,9
M1B2UB06	z2HS2	16,99-17,86	31,0	---	---	31,0
M1B2UB07	z2HS2	18,57-19,44	32,4	30,3	31,8	31,5
M1B2UB08	z2HS2	20,07-20,97	33,1	31,5	29,9	31,5
M1B2UB09	z2HS2	21,53-22,42	33,0	29,7	30,1	31,0
M1B3UB02	z2HS2	11,83-12,46	33,9	35,2	36,1	35,1
M1B3UB05	z2HS2	17,80-18,19	33,4	33,0	34,2	33,5
M1B3UB10	z2HS2	23,99-24,36	32,6	31,3	29,4	31,3

<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M1B3UB10:

- M = Morsleben
- 1 = Lokation 1
- B3 = Bohrung 3 (interne Bezeichnung)
- UB10 = Hohlkern aus Überbohrversuch Nr. 10

<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M1B1HZ01:

- M = Morsleben
- 1 = Lokation 1
- B1 = Bohrung 1 (interne Bezeichnung)
- HZ01 = Hohlkern mit lfd. Nr., der nicht direkt aus einem Überbohrversuch stammt

Gesamtmittel Bohrung B1 (z2HS2): 31,5 GPa  
Gesamtmittel Bohrung B2 (z2HS2): 31,7 GPa  
Gesamtmittel Bohrung B3 (z2HS2): 33,3 GPa

**BGR**

B2.6/B2.1 - Heu

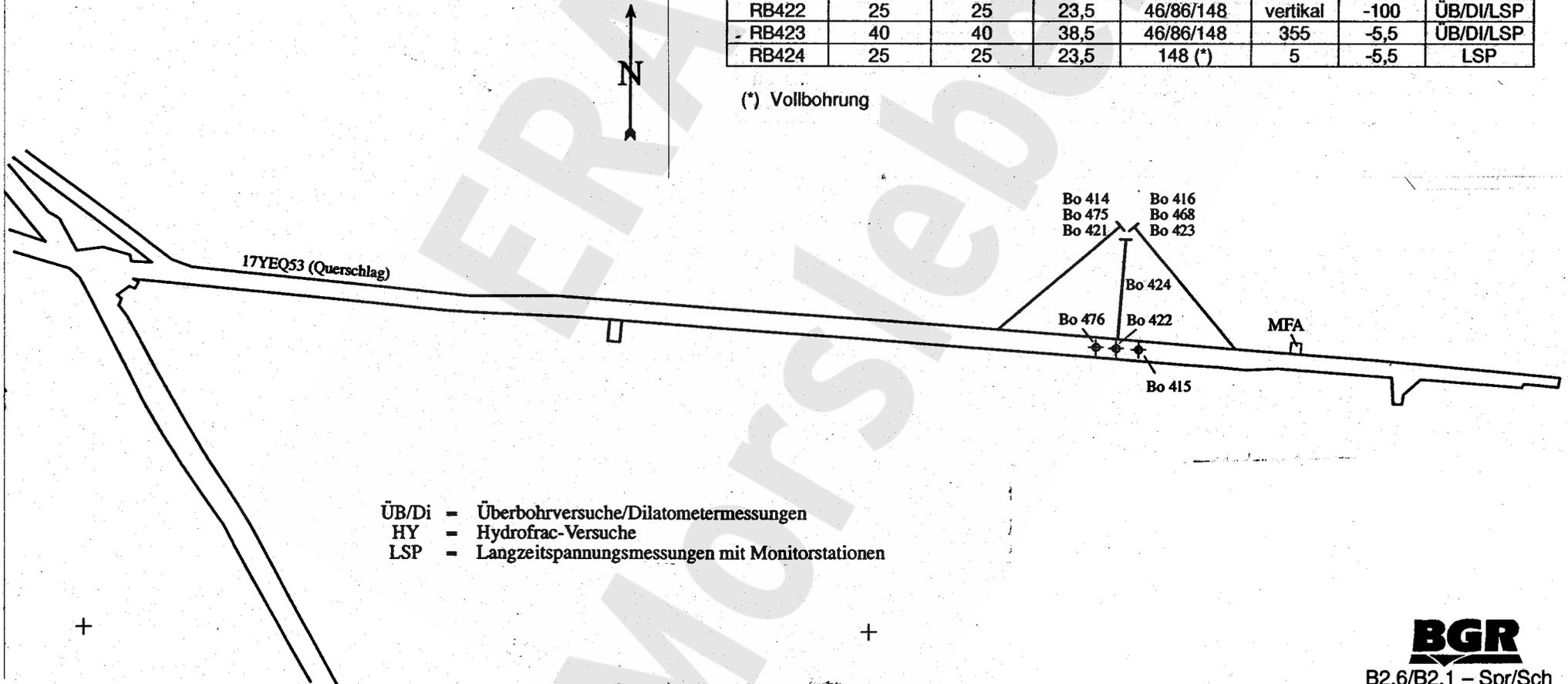
Zusammenstellung der im Labor  
ermittelten E-Moduli (Lokation 1)

Anlage 5.16

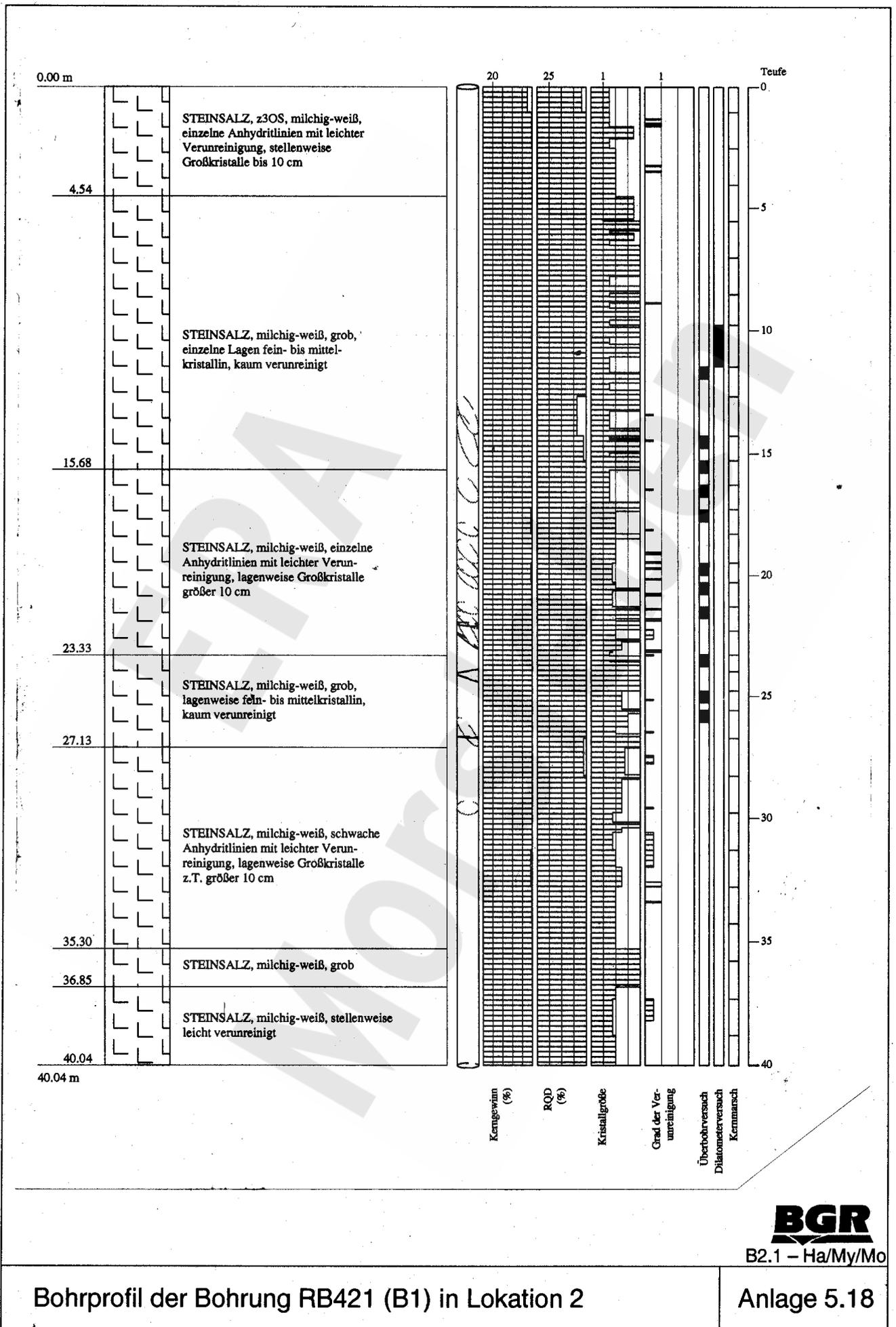
**Lokation 2:**  
4. Sohle, Südostfeld  
Bohrbereich 3.07

Bo-Nr.	geplante Länge (m)	Länge (m)	Einbautiefe (m)	Durchmesser (mm)	Richtung (gon)	Neigung (gon)	Messmethoden
RB414	40	39,9	-	46 (*)	55	+5,5	HY
RB415	20	25,0	-	46 (*)	vertikal	-100	HY
RB416	40	40,1	-	46 (*)	355	+5,5	-
RB475	40	40,5	-	46 (*)	55	+5,5	HY
RB476	20	26	-	46 (*)	vertikal	-100	HY
RB468	40	40	-	46 (*)	355	+5,5	HY
RB421	40	40	38,5	46/86/148	55	-5,5	ÜB/DI/LSP
RB422	25	25	23,5	46/86/148	vertikal	-100	ÜB/DI/LSP
RB423	40	40	38,5	46/86/148	355	-5,5	ÜB/DI/LSP
RB424	25	25	23,5	148 (*)	5	-5,5	LSP

(\*) Vollbohrung



Anordnung der Spannungsmessbohrungen in Lokation 2 (Bohrbereich 3.07)



B2.1 - Ha/My/Mo

0.00 m

2.25  
2.40

9.71

12.83

15.02

17.30

19.38

20.10

21.09

23.33

25.02 m

STEINSALZ, z3OS, milchig-weiß, Anhydritlinien mit leichter Verunreinigung, einzelne Großkristalle bis 7 cm

STEINSALZ, leicht verunreinigt durch Anhydritflocken

STEINSALZ, milchig-weiß, einzelne Anhydritlinien mit leichter Verunreinigung, lagenweise Großkristalle bis 10 cm

STEINSALZ, milchig-trüb, Verunreinigung durch Anhydritlagen und -flocken, einzelne Großkristalle bis 5 cm

STEINSALZ, milchig-weiß, einzelne Anhydritlinien mit leichter Verunreinigung, lagenweise Großkristalle bis 10 cm

STEINSALZ, milchig-weiß, einzelne Anhydritlinien mit leichter Verunreinigung, stellenweise Discing

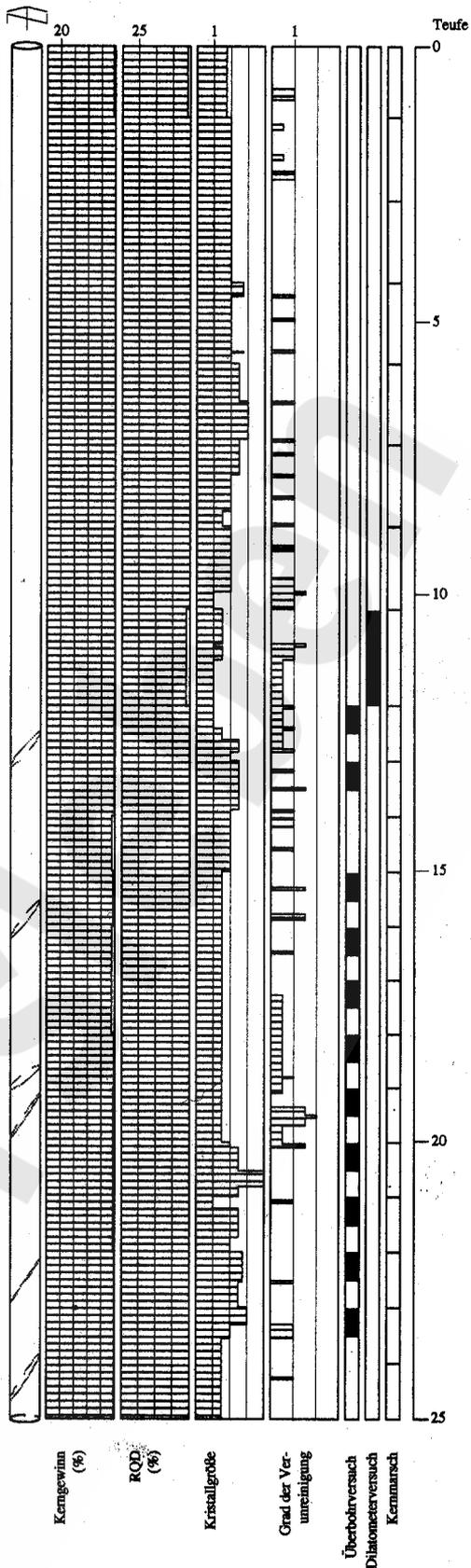
STEINSALZ, milchig-trüb, einzelne schwache Anhydritlinien

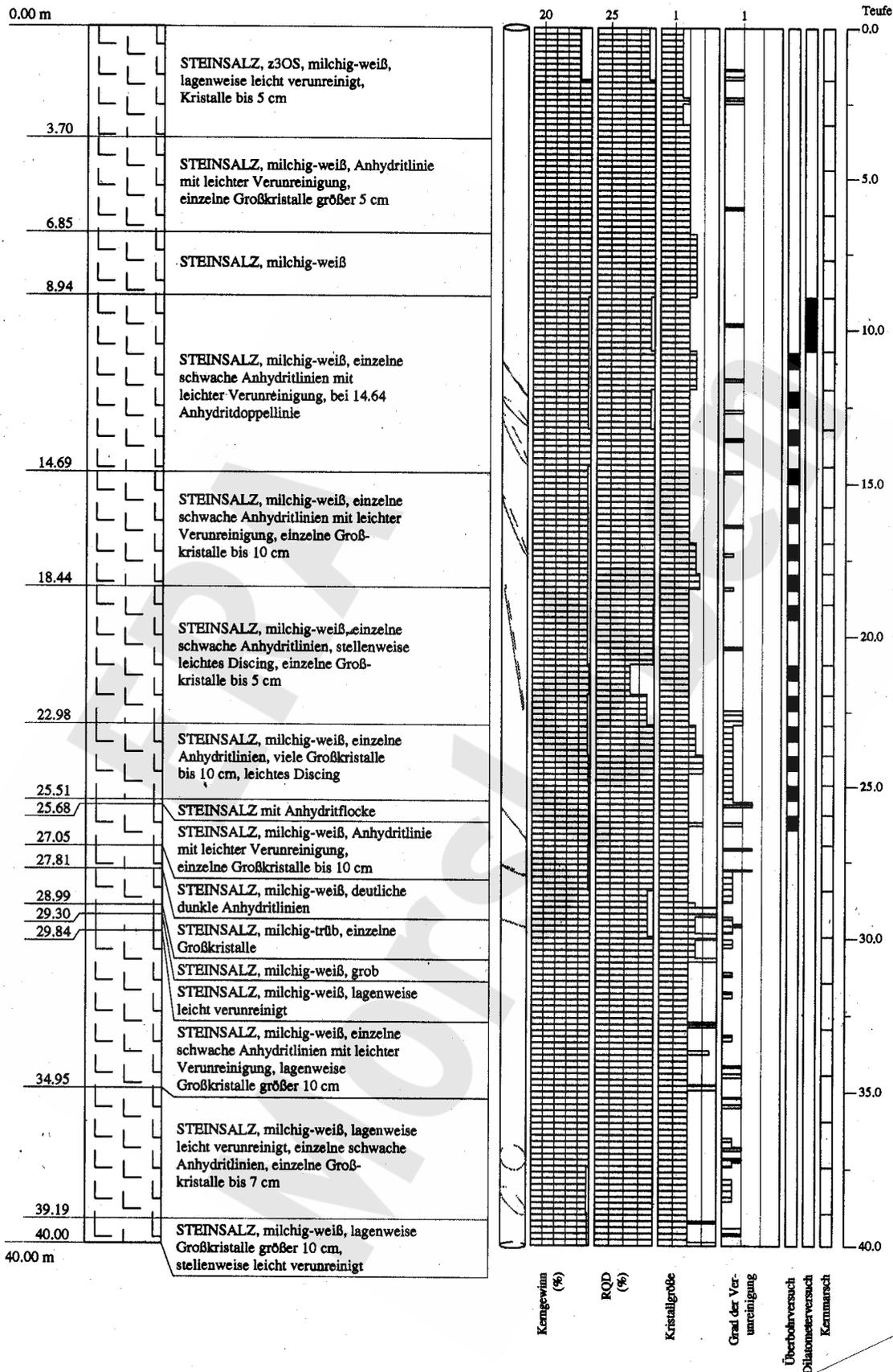
STEINSALZ, milchig weiß, einzelne Anhydritlinien mit mittlerer Verunreinigung

STEINSALZ, milchig-weiß, grob

STEINSALZ, milchig-weiß, einzelne Anhydritlinien mit leichter Verunreinigung, lagenweise Großkristalle bis 10 cm, stellenweise Discing

STEINSALZ, milchig-weiß, einzelne Anhydritlinien mit leichter Verunreinigung, Kristalle bis 5 cm





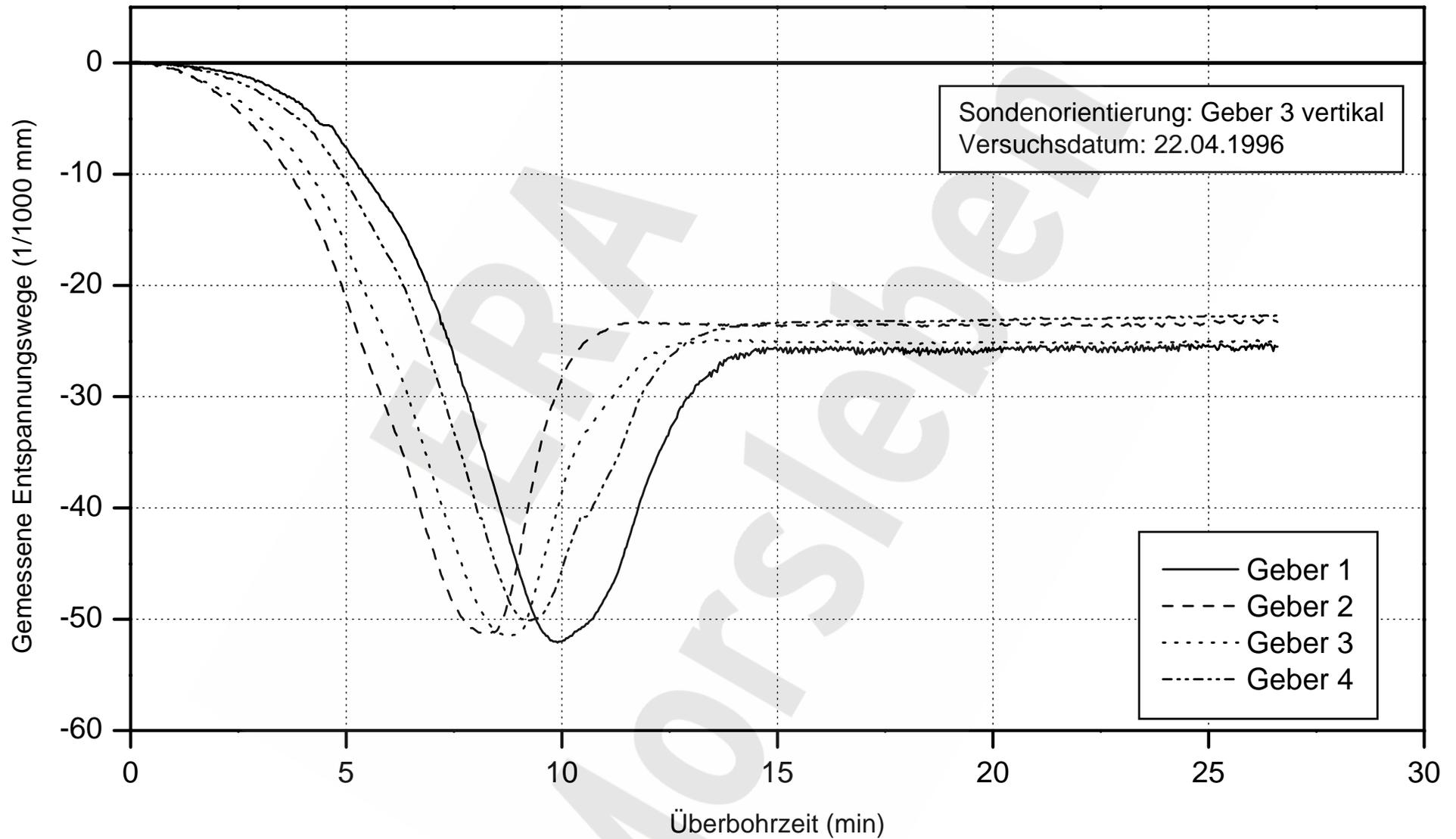
B2.1 - Ha/My/Mo

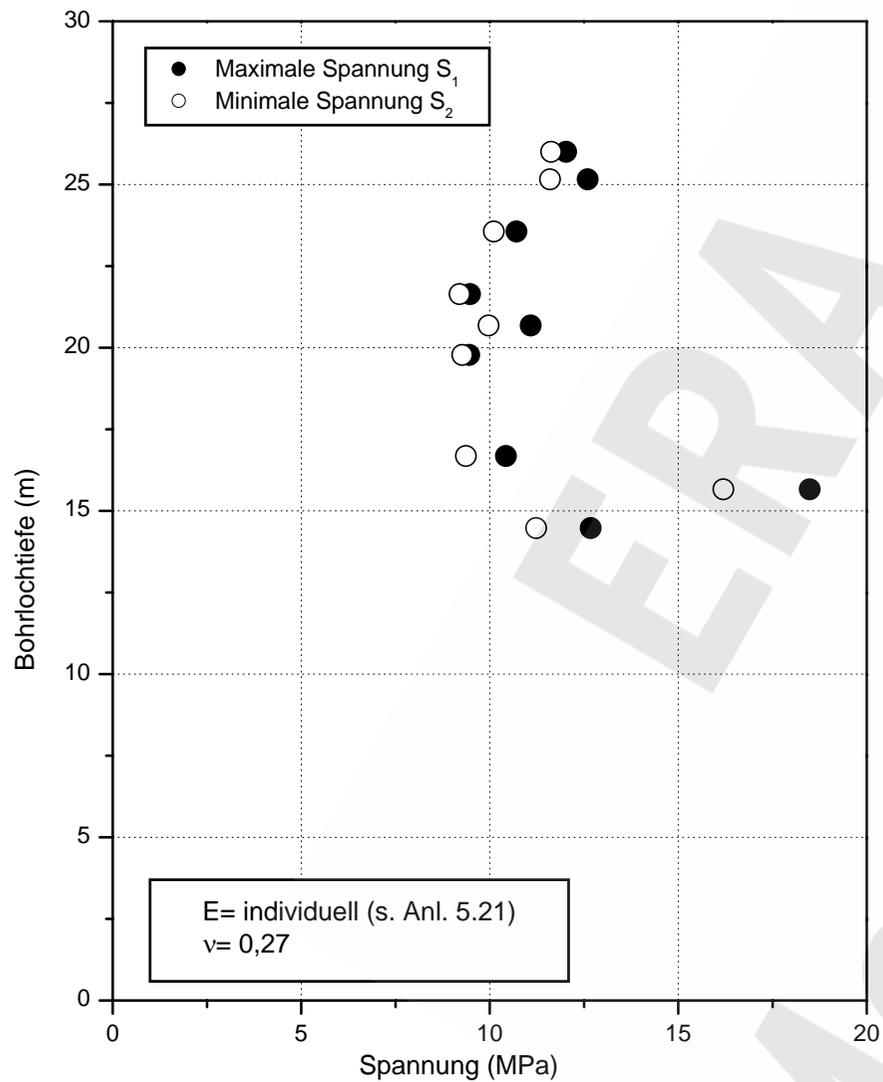
Versuchs- bezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Versuchs- datum	Bohrloch- tiefe (m) <sup>2)</sup>	Bohrkern- gewinn <sup>3)</sup>	Versuchs- qualität <sup>4)</sup>	E-Modul (GPa) <sup>5)</sup>
M2B1UB01	z3OS	18.04.96	11,45	ja	mangelhaft	31,9
M2B1UB02	z3OS	19.04.96	14,28	ja	gut	33,3
M2B1UB03	z3OS	19.04.96	15,28	nein	ausreichend	(31,0)
M2B1UB04	z3OS	22.04.96	16,28	ja	gut	34,4
M2B1UB05	z3OS	22.04.96	17,28	ja	gut	28,7
M2B1UB06	z3OS	23.04.96	19,49	ja	gut	32,6
M2B1UB07	z3OS	24.04.96	20,28	nein	ausreichend	(31,0)
M2B1UB08	z3OS	24.04.96	21,28	ja	gut	31,5
M2B1UB09	z3OS	25.04.96	23,28	nein	ausreichend	(31,0)
M2B1UB10	z3OS	26.04.96	24,78	nein	ausreichend	(27,3)
M2B1UB11	z3OS	26.04.96	25,58	ja	ausreichend	27,3
M2B2UB01	z3OS	21.05.96	12,02	ja	gut	34,1
M2B2UB02	z3OS	22.05.96	13,02	ja	gut	29,1
M2B2UB03	z3OS	23.05.96	15,02	ja	ausreichend	25,7
M2B2UB04	z3OS	24.05.96	16,02	nein	mangelhaft	(27,4)
M2B2UB05	z3OS	24.05.96	17,02	ja	ausreichend	29,1
M2B2UB06	z3OS	28.05.96	18,02	ja	gut	29,4
M2B2UB07	z3OS	29.05.96	19,02	ja	gut	31,1
M2B2UB08	z3OS	29.05.96	20,02	ja	gut	34,5
M2B2UB09	z3OS	30.05.96	21,02	ja	gut	31,5
M2B2UB10	z3OS	31.05.96	22,02	ja	gut	25,1
M2B2UB11	z3OS	31.05.96	23,02	nein	ausreichend	(25,1)
M2B3UB01	z3OS	19.03.96	10,69	ja	ausreichend	32,1
M2B3UB02	z3OS	20.03.96	11,94	nein	ausreichend	(30,6)
M2B3UB03	z3OS	20.03.96	13,24	nein	ausreichend	(30,6)
M2B3UB04	z3OS	21.03.96	14,44	ja	gut	33,4
M2B3UB05	z3OS	21.03.96	15,74	nein	ausreichend	(30,6)
M2B3UB06	z3OS	22.03.96	16,94	ja	gut	32,3
M2B3UB07	z3OS	22.03.96	17,94	ja	ausreichend	29,6
M2B3UB08	z3OS	25.03.96	18,94	ja	gut	27,7
M2B3UB09	z3OS	26.03.96	20,94	ja	mangelhaft	(30,6)
M2B3UB10	z3OS	27.03.96	21,94	nein	mangelhaft	(30,6)
M2B3UB11	z3OS	27.03.96	22,94	ja	gut	31,7
M2B3UB12	z3OS	28.03.96	23,94	ja	gut	26,4
M2B3UB13	z3OS	29.03.96	24,94	ja	gut	20,1
M2B3UB14	z3OS	29.03.96	25,94	ja	gut	31,7

<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M2B3UB14:  
M = Morsleben  
2 = Lokation 2  
B3 = Bohrung 3 (interne Bezeichnung)  
UB14 = Überbohrversuch Nr. 14

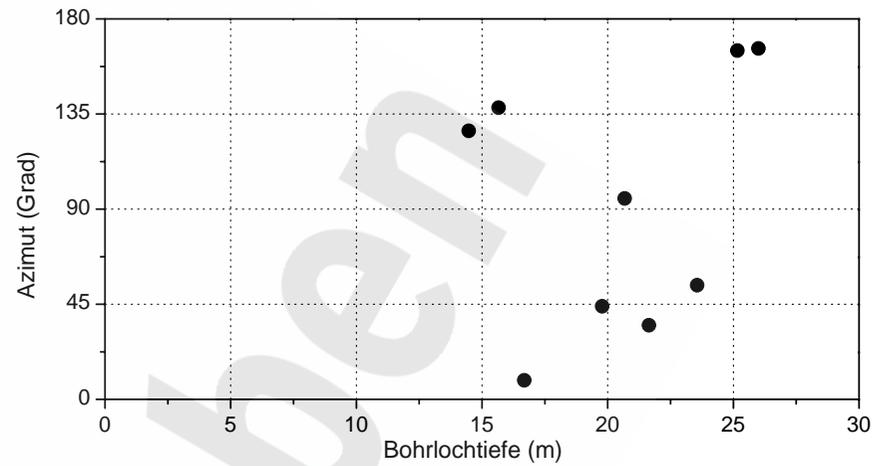
<sup>2)</sup> Tiefe des Pilotbohrlochmundes  
<sup>3)</sup> Bohrkerngewinn ausreichend?:  
ja: Kernlänge  $\geq$  37 cm  
nein: Kernlänge  $<$  37 cm  
<sup>4)</sup> Kriterien nach Kap. 4.1.2

<sup>5)</sup> Für die Auswertung der Überbohrversuche  
ermittelter oder gewählter E-Modul  
(Werte in Klammern sind geschätzt)

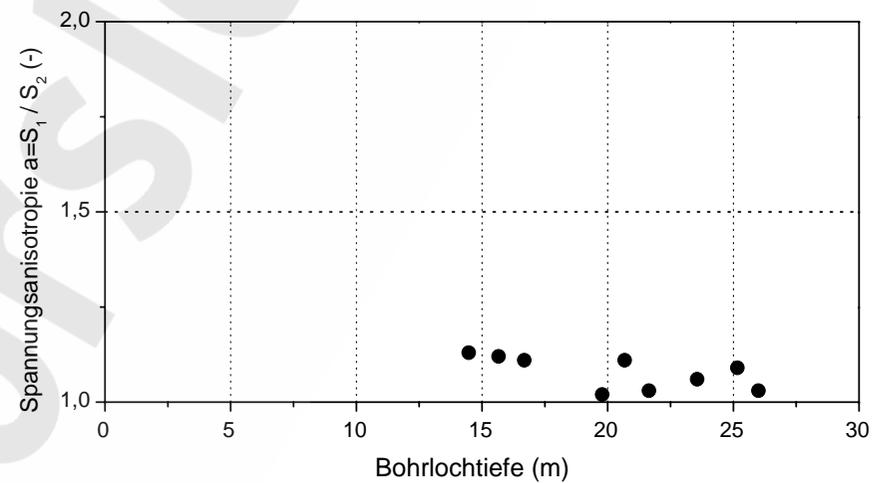




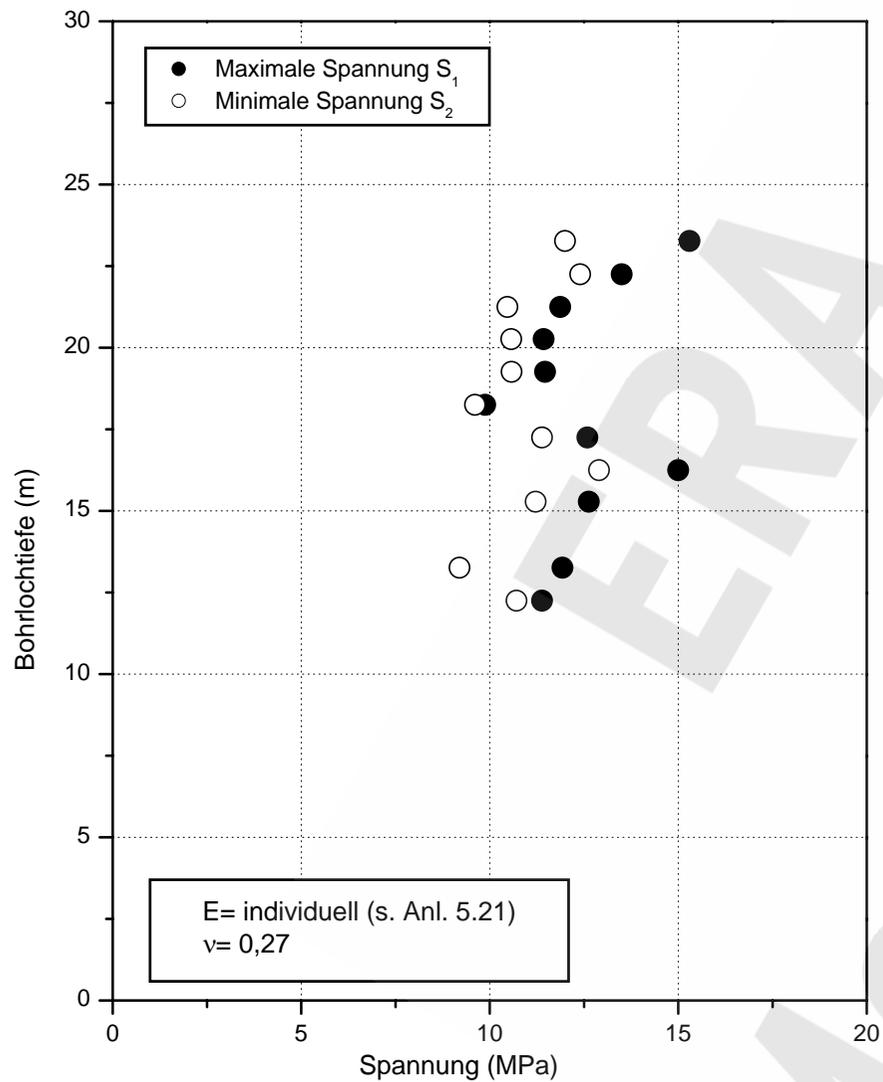
a) Spannungsbeträge



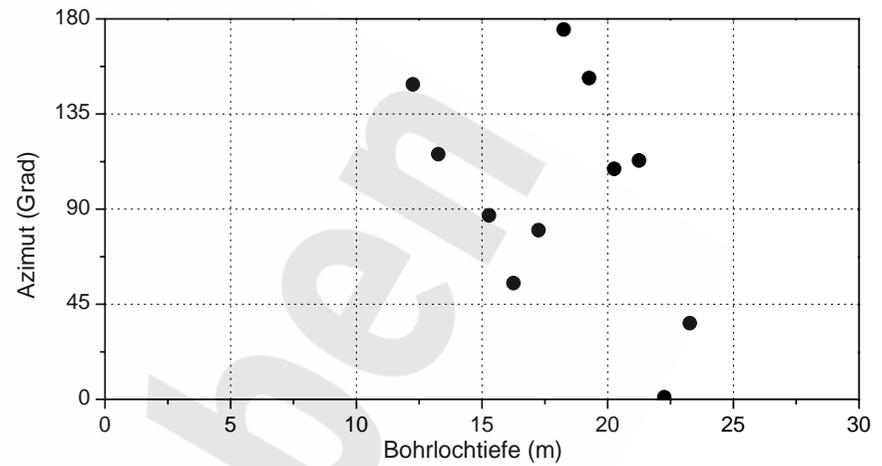
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$



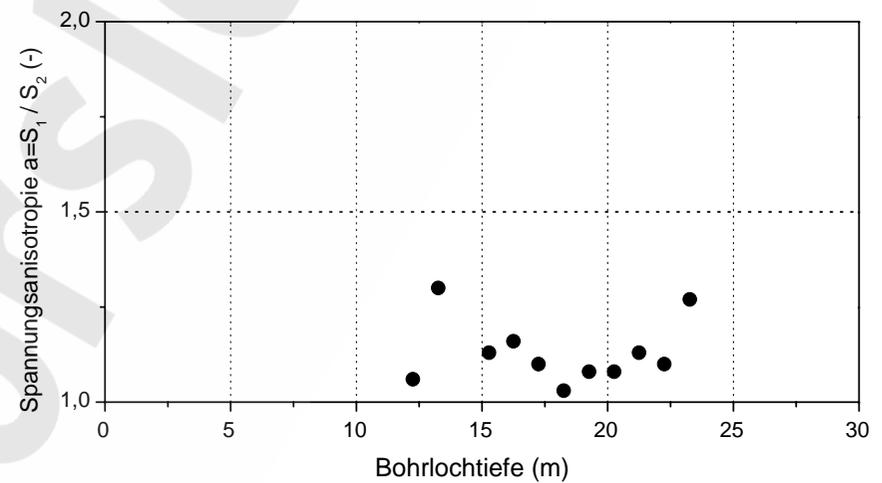
c) Grad der Spannungsanisotropie



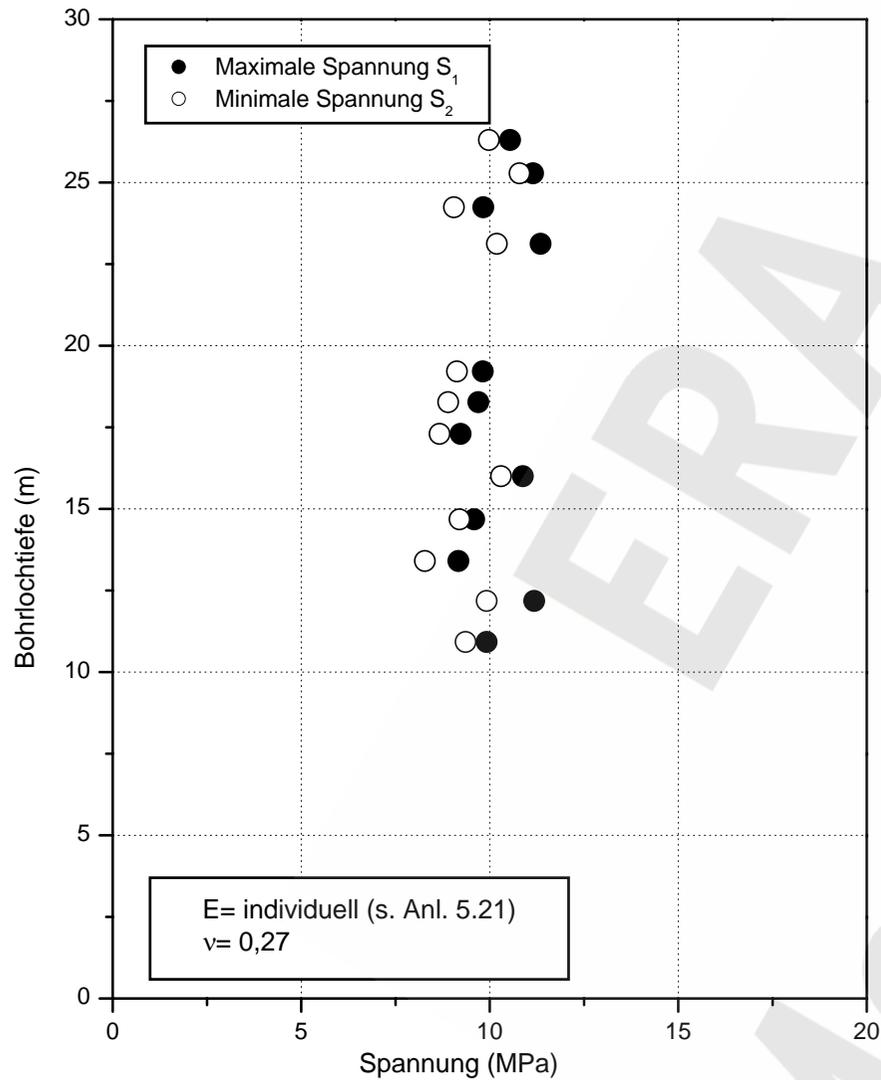
a) Spannungsbeträge



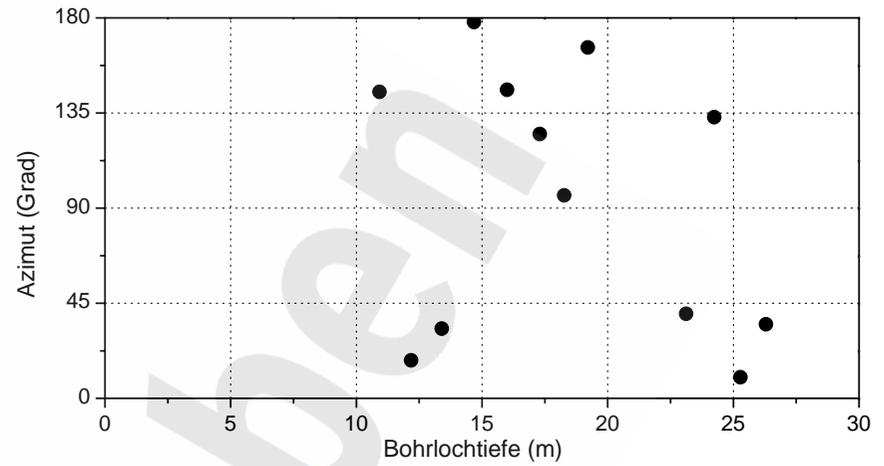
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$



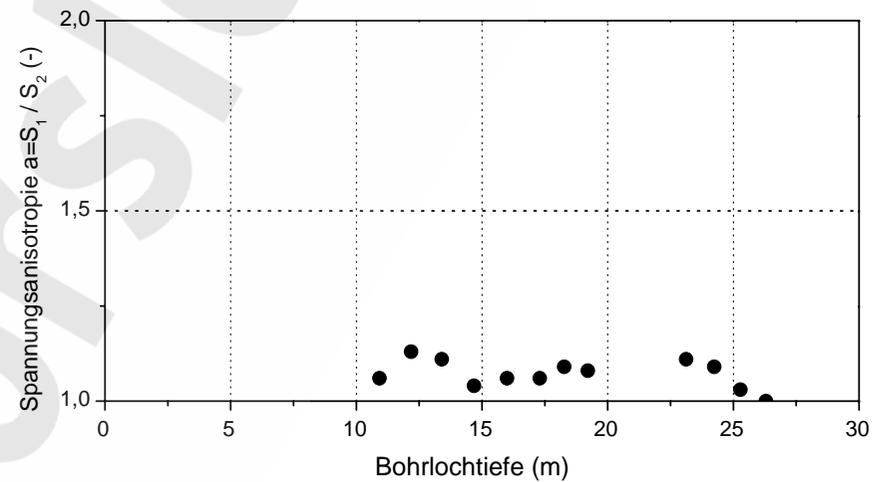
c) Grad der Spannungsanisotropie



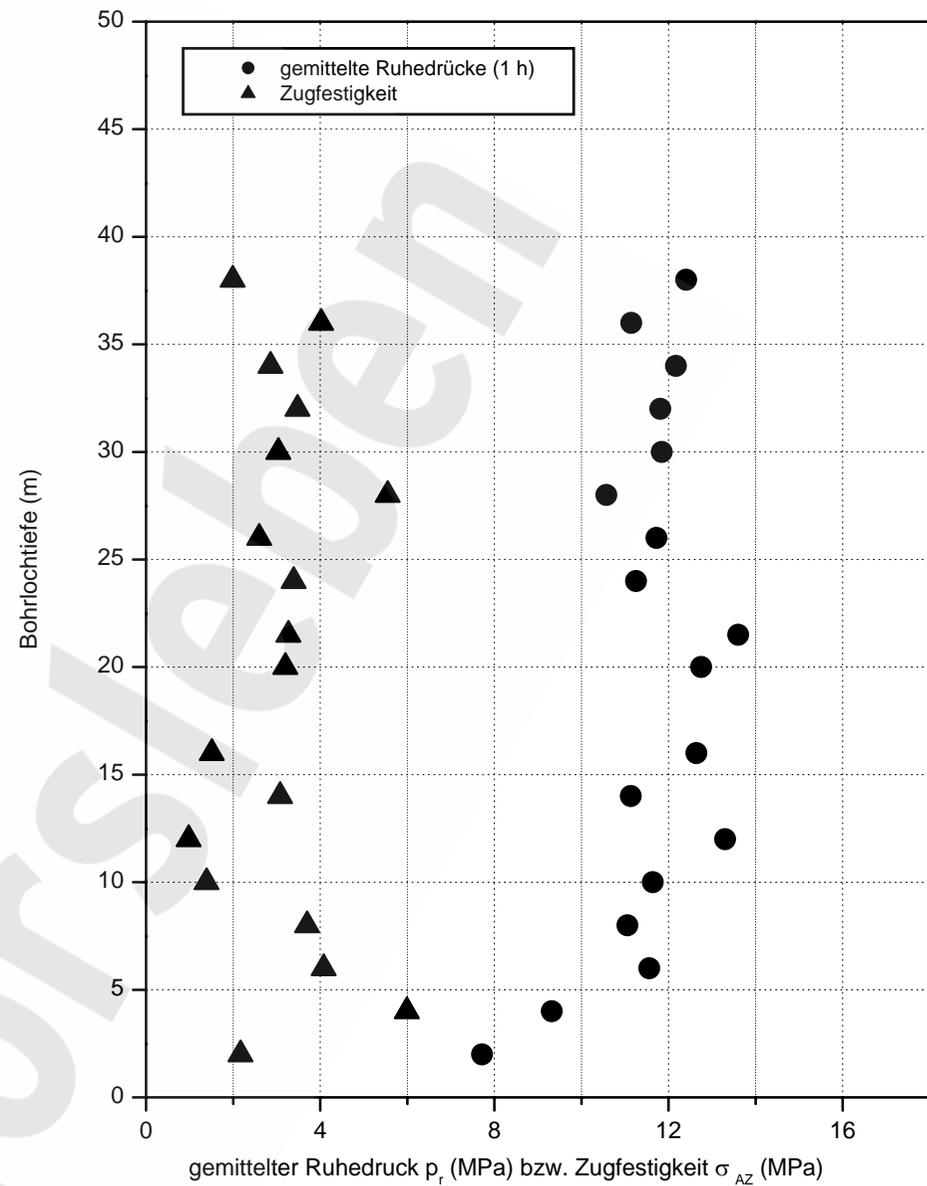
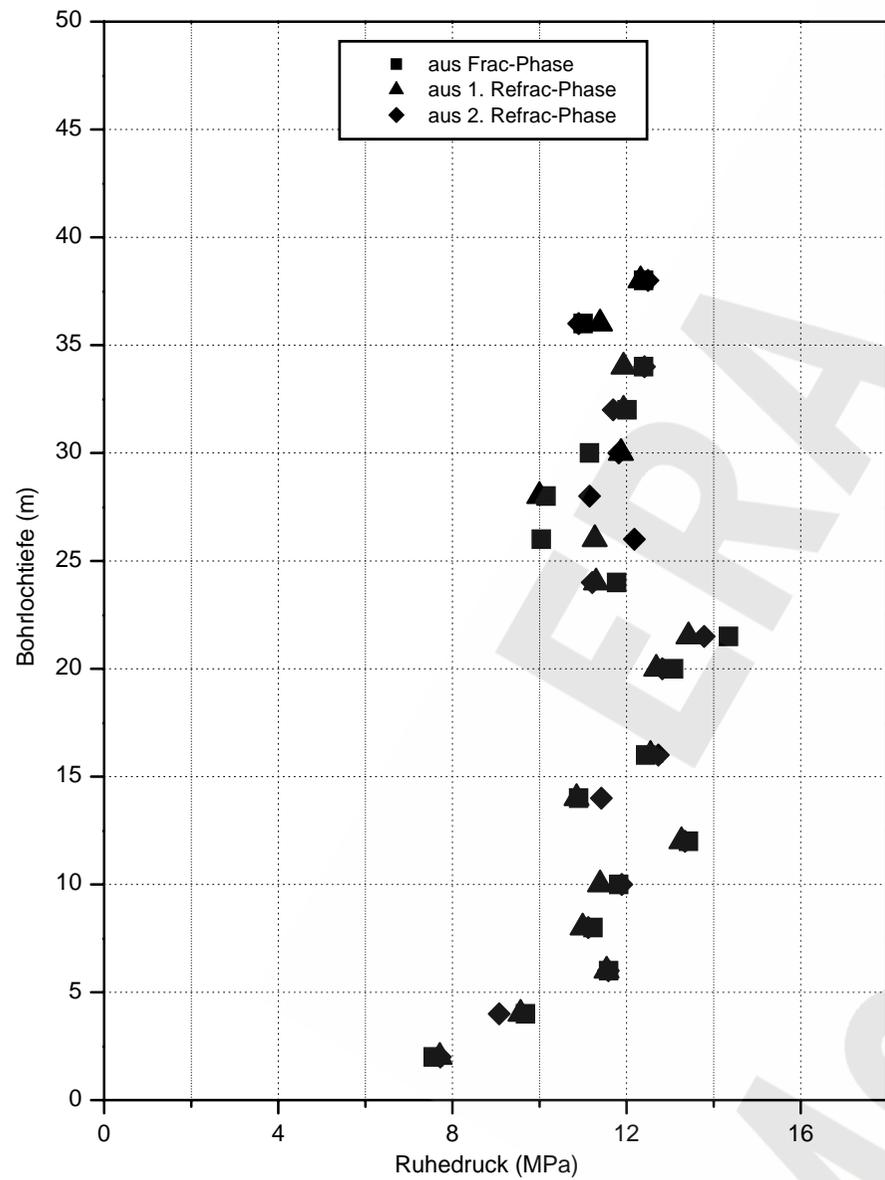
a) Spannungsbeträge

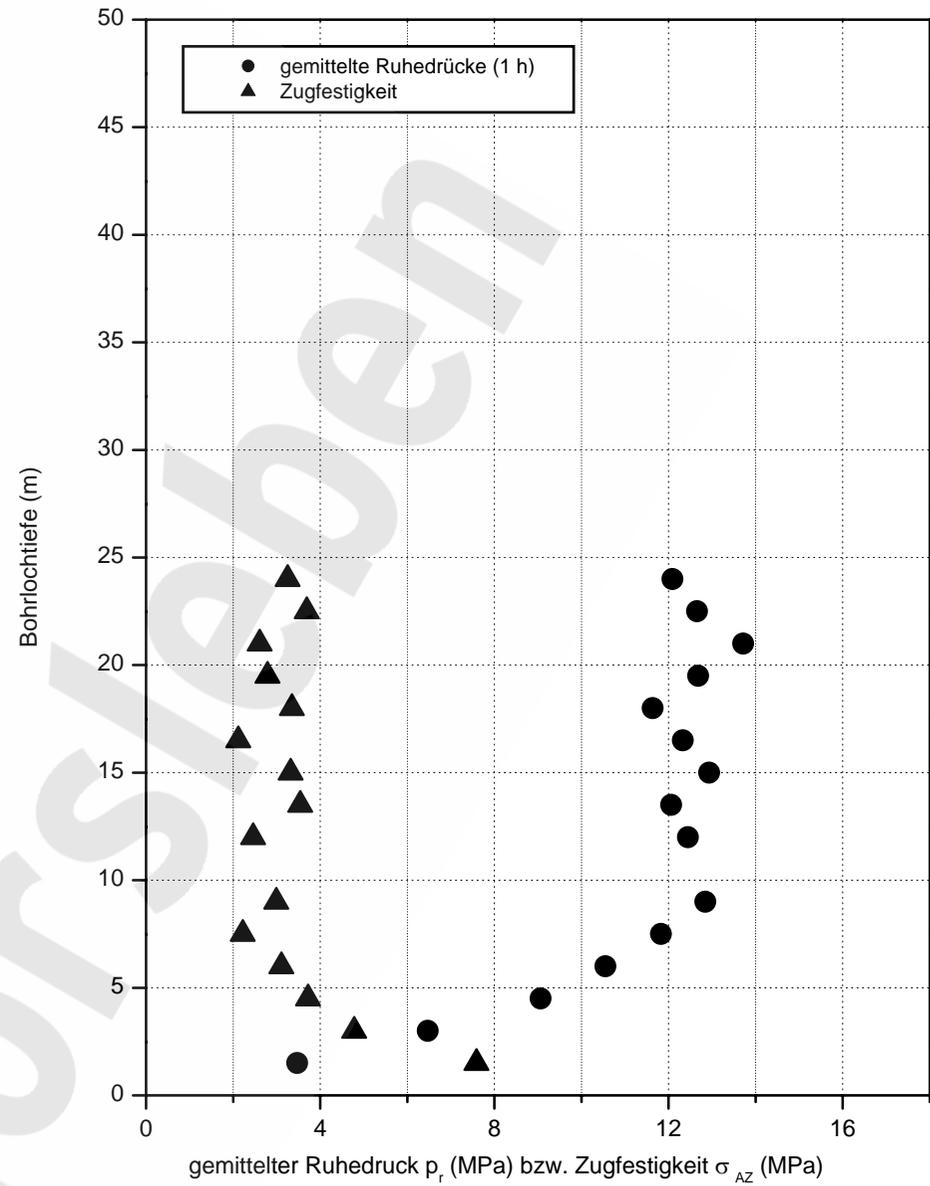
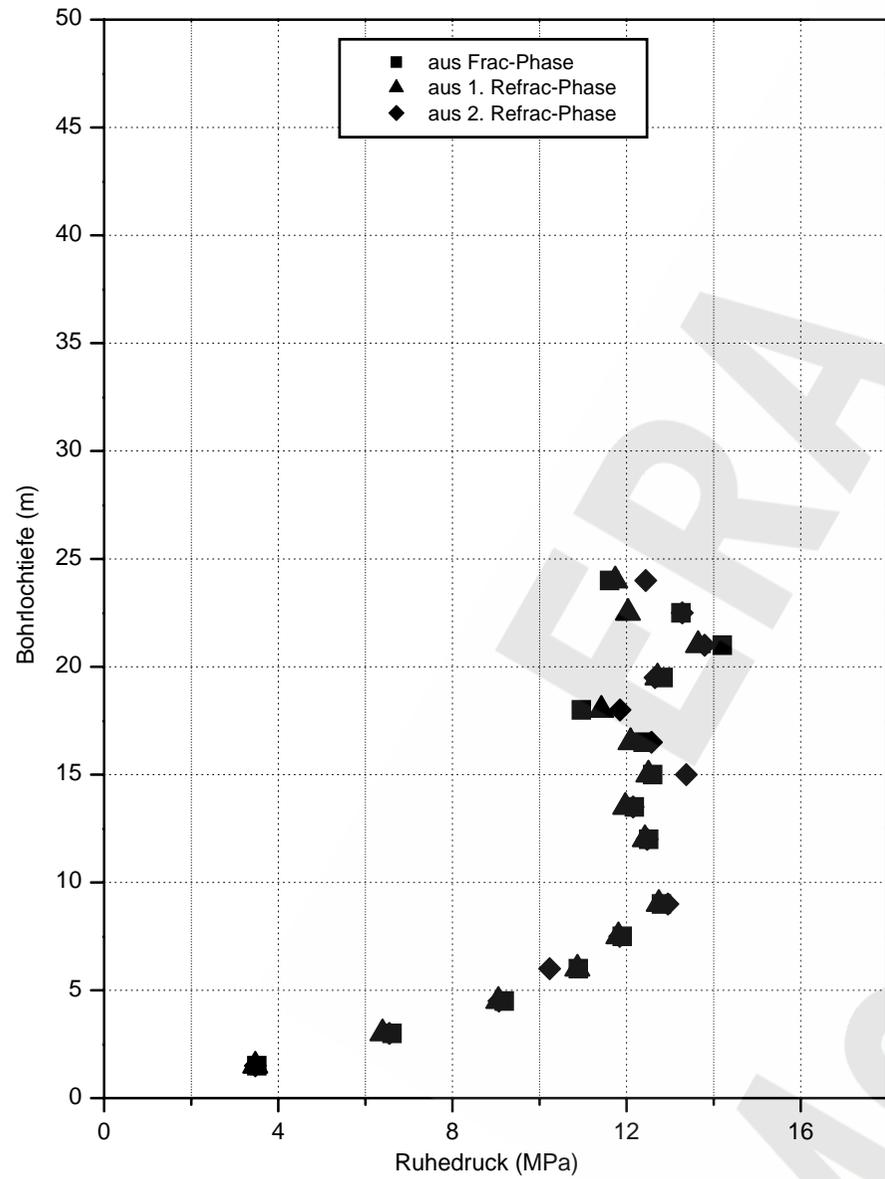


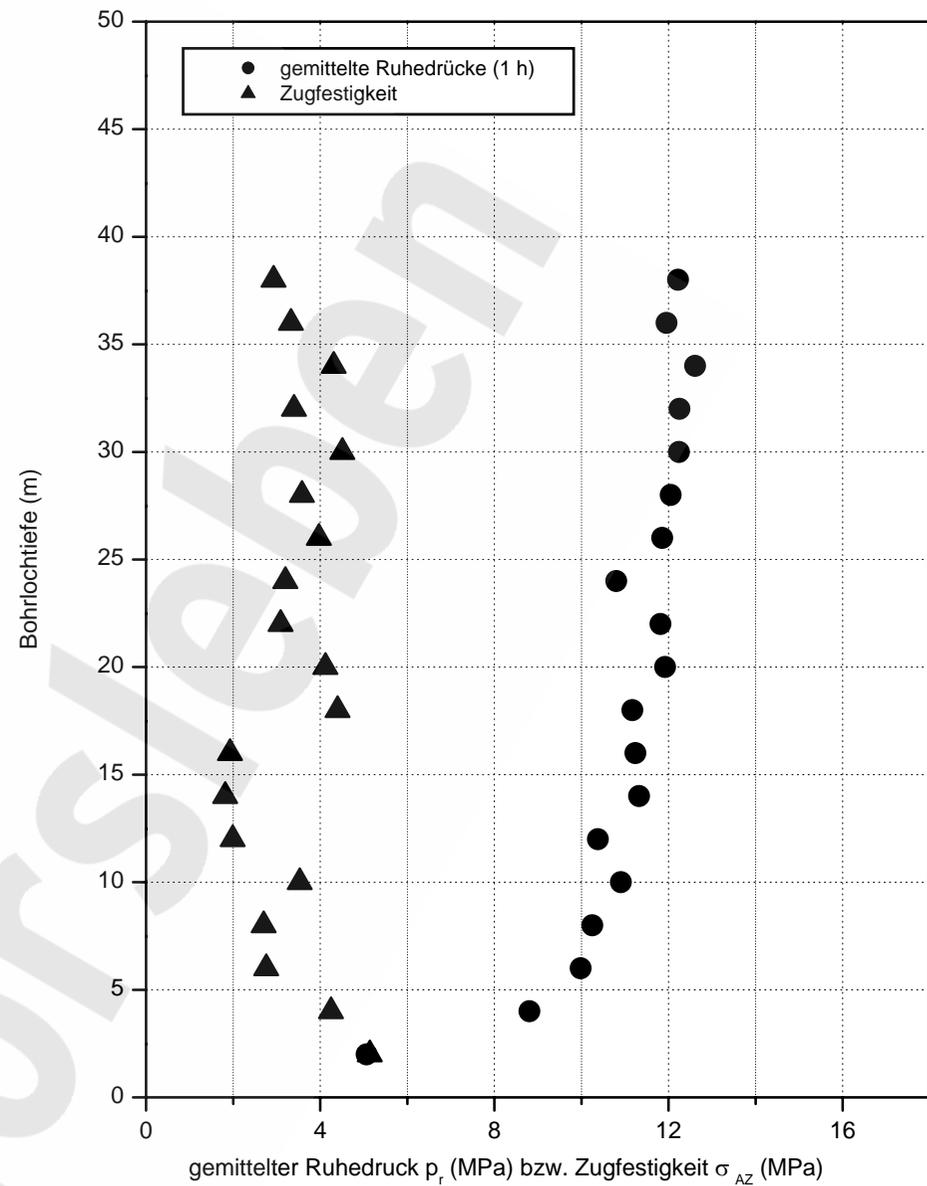
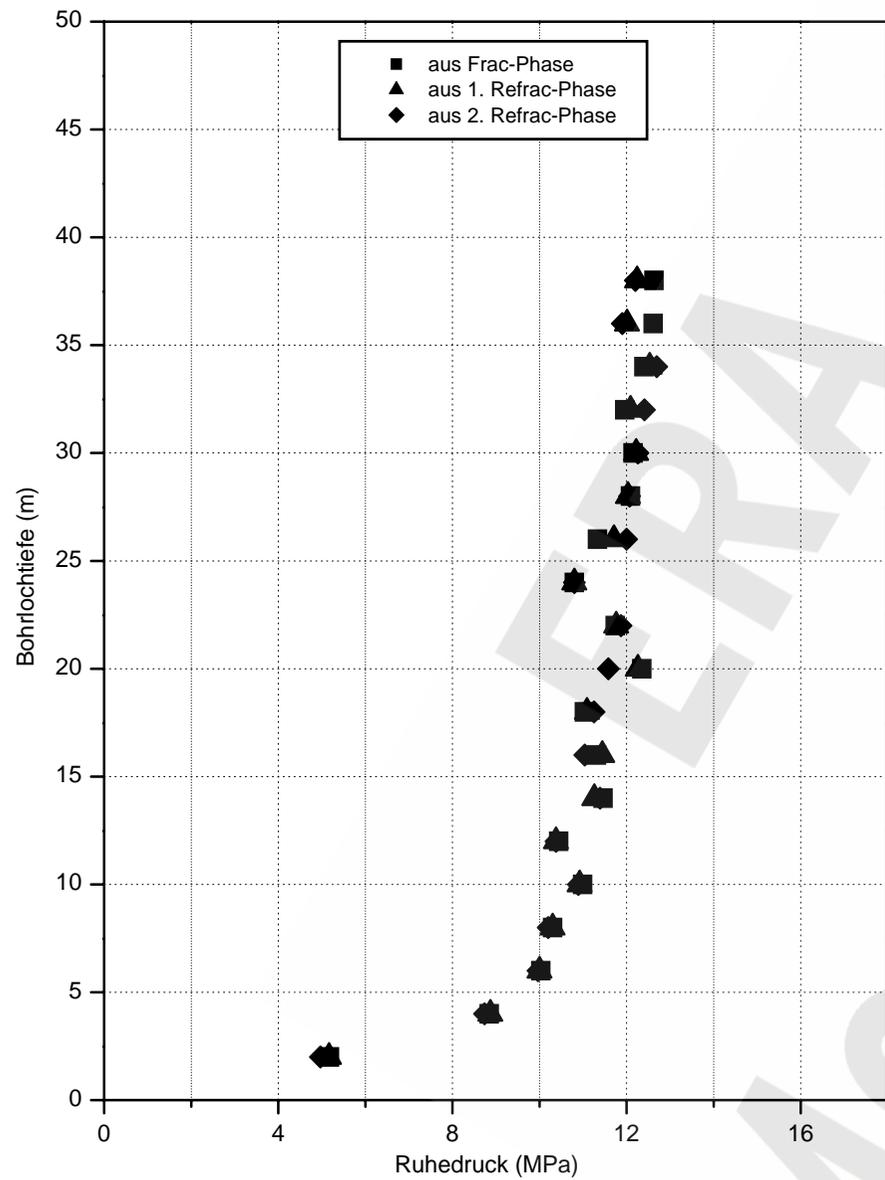
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$

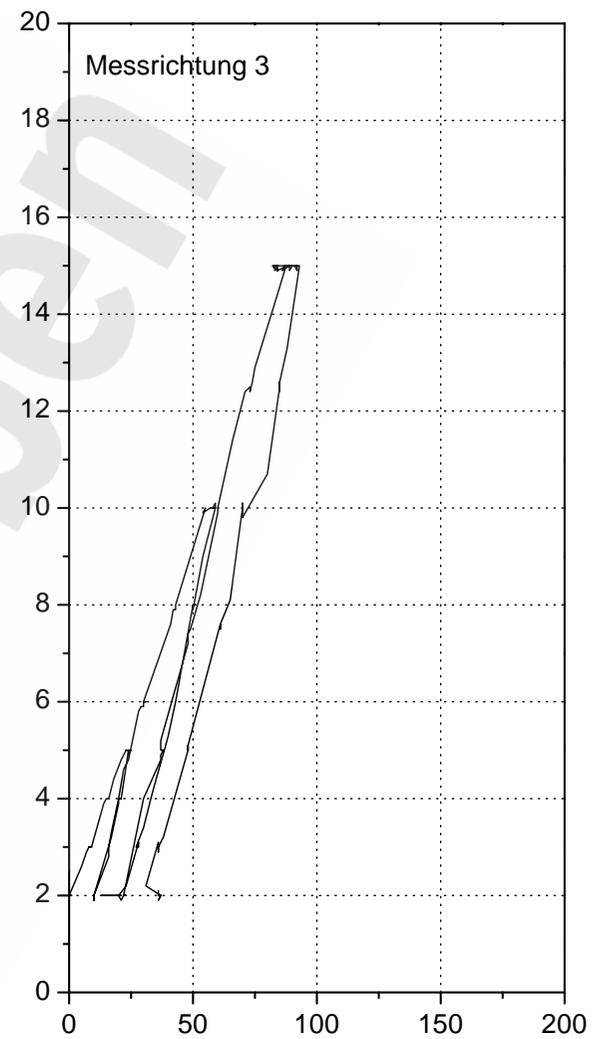
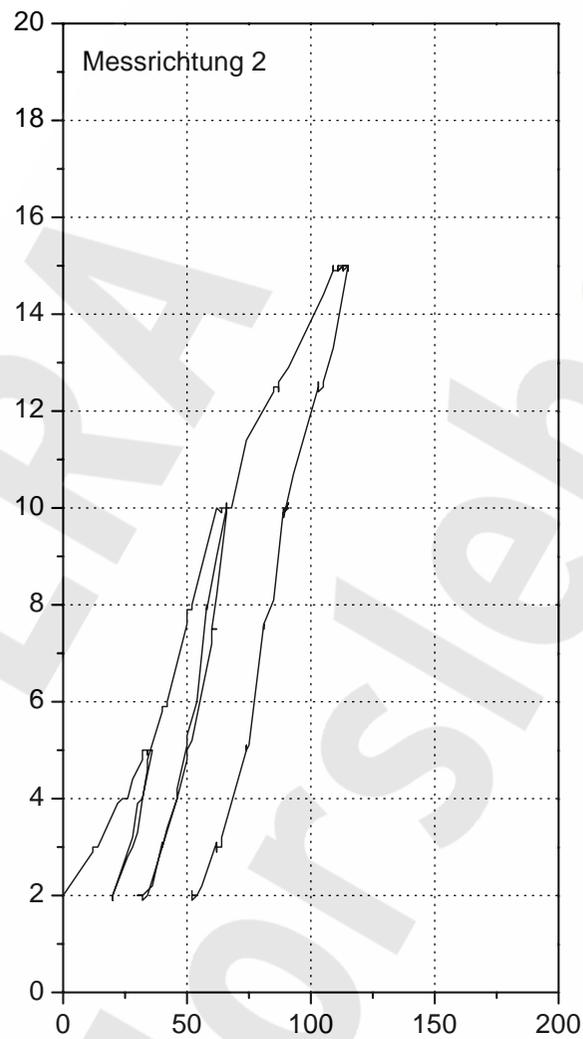
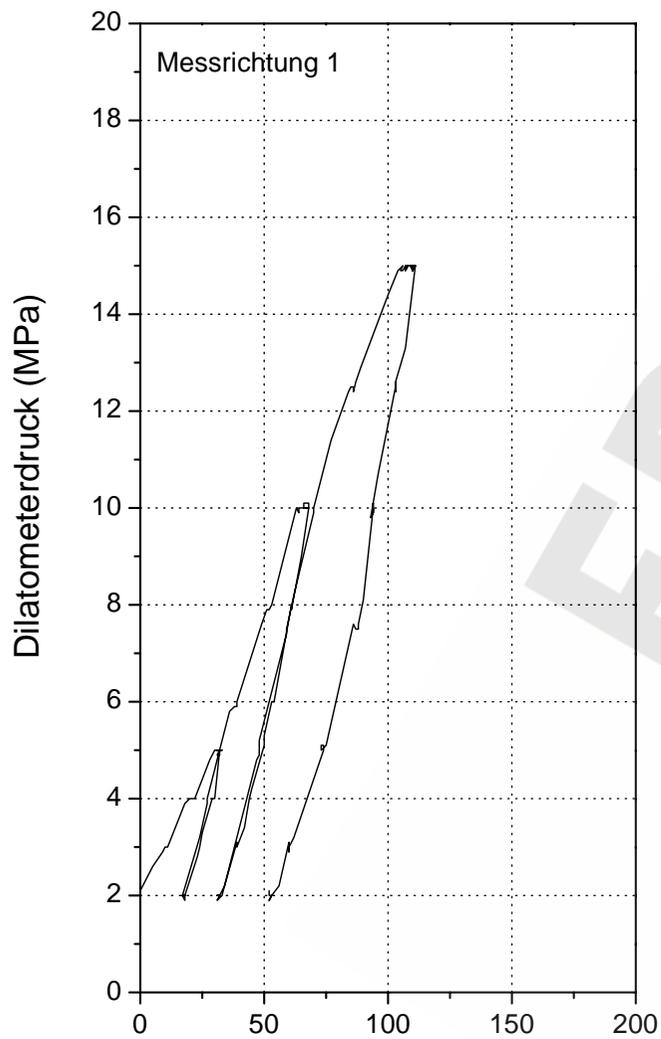


c) Grad der Spannungsanisotropie









Änderung des Bohrlochdurchmessers (1/1000 mm)

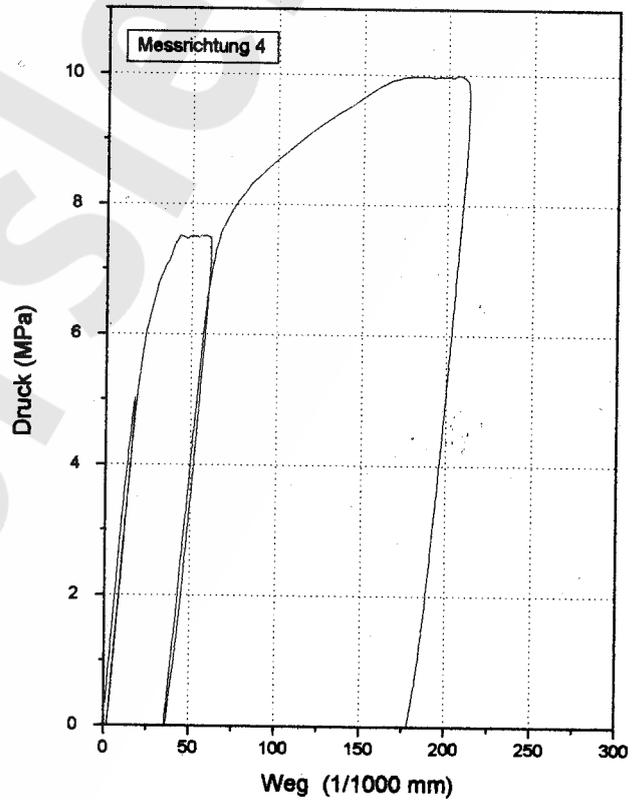
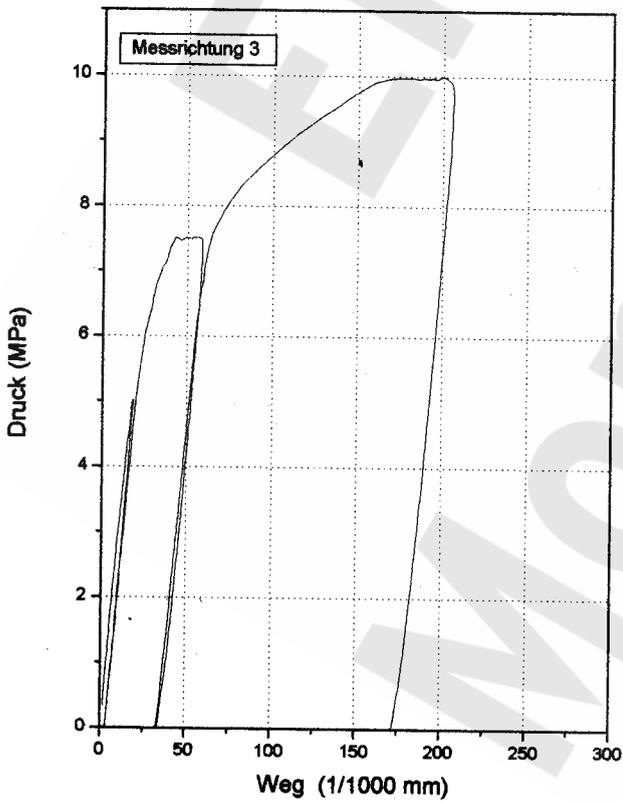
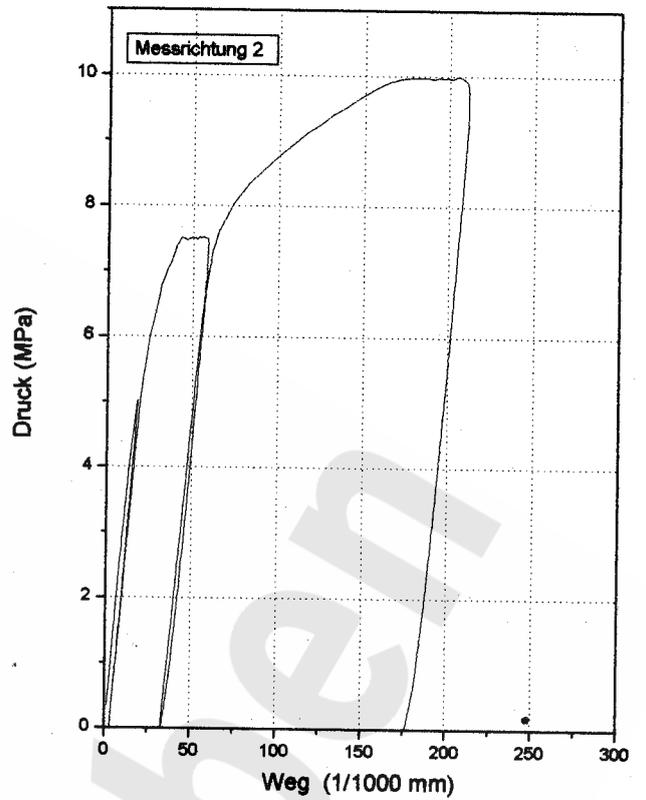
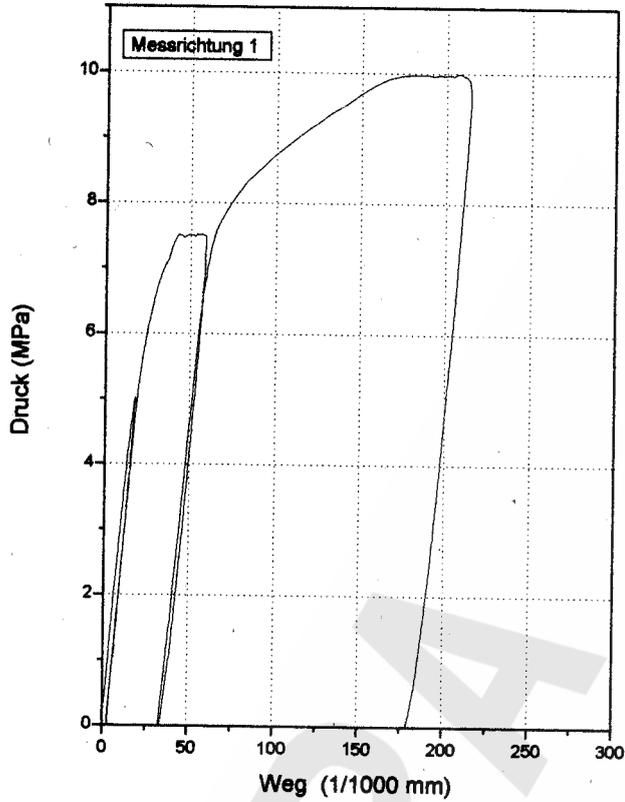


Versuchs- bezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Versuchs- datum	Versuchs- tiefe (m)	E-Modul (GPa)			Mittelwert (GPa)
				bei Entlastung von – bis (MPa)			
				5 - 2	10 - 2	15 - 2	
M2B1DI01	z3OS	17.04.96	10,21	—	18,9	22,0	20,5
M2B2DI01	z3OS	28.05.96	10,80	—	23,3	25,7	24,5
M2B3DI01	z3OS	18.03.96	9,44	24,0	25,2	24,0	24,4

<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M2B3DI01:

- M = Morsleben
- 2 = Lokation 2
- B3 = Bohrung 3 (interne Bezeichnung)
- DI01 = Dilatometerversuch Nr. 01

Gesamtmittel: 23,1 GPa



Projekt : MORSLIBEN LOKATION 2  
 Versuchsbezeichnung : M2B1UB04  
 Material : STEINSALZ  
 Belastung : 5/ 7,5/ 10 MPa  
 Versuchsdatum : 06.11.96 13.30

**BGR**  
 B2.6/B2.1-08/00-Heu/KÜ

Anlage 5.31

Last-Deformationsdiagramme für Prüfkörper aus Überbohrversuch M2B1UB04

Kernbezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Entnahmetiefe (m)	E-Modul (GPa)			Mittelwert (GPa)
			bei Entlastung von (MPa)			
			5	7,5	10	
M2B1UB01	z3OS	11,45 – 11,87	32,7	31,0	---	31,9
M2B1UB02	z3OS	14,28 – 14,66	33,8	32,7	---	33,3
M2B1UB04	z3OS	16,28 – 17,28	35,9	32,9	34,3	34,4
M2B1UB05	z3OS	17,28 – 17,82	29,2	28,0	28,9	28,7
M2B1UB06	z3OS	19,48 – 20,26	34,0	31,8	31,0	32,6
M2B1HZ01	z3OS	20,58 – 21,28	29,2	27,6	28,2	28,3
M2B1UB08	z3OS	21,28 – 21,62	31,3	31,0	32,2	31,5
M2B1UB11	z3OS	25,58 – 26,63	26,4	27,1	28,5	27,3
M2B2UB01	z3OS	12,02 – 12,46	34,4	33,2	34,6	34,1
M2B2UB02	z3OS	13,02 – 14,02	28,6	28,9	29,7	29,1
M2B2UB03	z3OS	15,02 – 15,38	24,2	25,3	27,5	25,7
M2B2UB05	z3OS	17,02 – 17,44	28,6	28,6	30,2	29,1
M2B2UB06	z3OS	18,02 – 18,57	32,0	28,8	27,3	29,4
M2B2UB07	z3OS	19,02 – 19,61	30,7	29,8	32,8	31,1
M2B2UB08	z3OS	20,02 – 20,57	35,2	33,4	34,8	34,5
M2B2UB09	z3OS	21,02 – 21,57	31,4	30,7	31,4	31,5
M2B2UB10	z3OS	22,22 – 23,03	23,2	24,8	27,3	25,1
M2B3UB01	z3OS	10,69 – 11,09	31,1	32,4	32,9	32,1
M2B3UB04	z3OS	14,44 – 15,31	33,4	33,2	33,6	33,4
M2B3UB06	z3OS	16,94 – 17,55	33,3	31,8	31,8	32,3
M2B3UB07	z3OS	17,94 – 18,40	29,1	30,7	20,0	29,6
M2B3UB08	z3OS	18,94 – 19,40	25,3	29,5	28,3	27,7
M2B3UB11	z3OS	22,94 – 23,31	31,7	30,6	32,7	31,7
M2B3UB12	z3OS	24,12 – 24,48	25,1	26,7	27,5	26,4
M2B3UB13	z3OS	24,94 – 25,35	19,1	19,8	21,5	20,1
M2B3UB14	z3OS	25,94 – 26,51	32,6	30,9	31,5	31,7

<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M2B3UB14:

M = Morsleben  
2 = Lokation 2  
B3 = Bohrung 3 (interne Bezeichnung)  
UB14 = Hohlkern aus Überbohrversuch Nr. 14

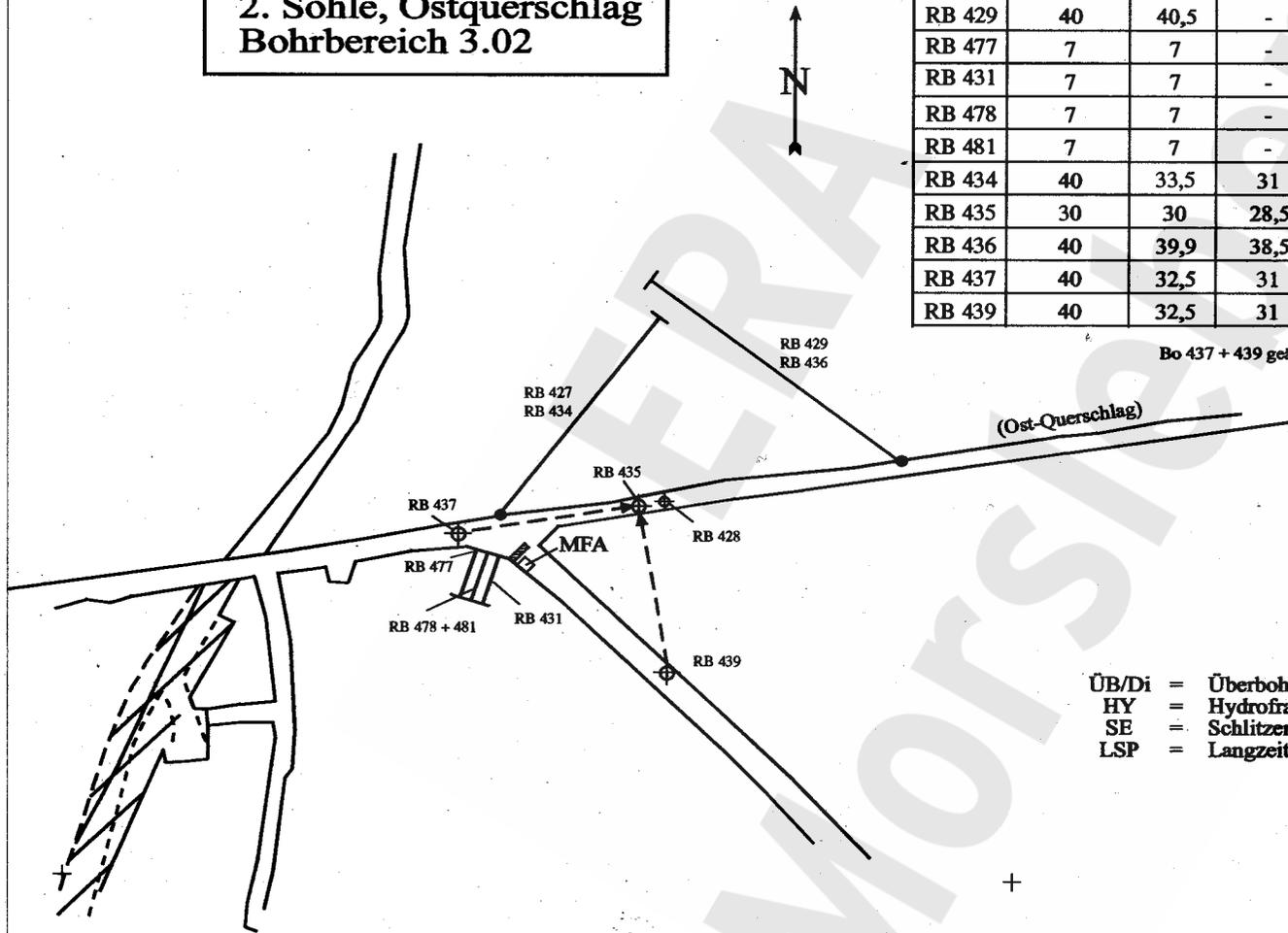
<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M2B1HZ01:

M = Morsleben  
2 = Lokation 2  
B1 = Bohrung 1 (interne Bezeichnung)  
HZ01 = Hohlkern mit lfd. Nr., der nicht direkt aus einem Überbohrversuch stammt

Gesamtmittel Bohrung B1 (z3OS): 31,0 GPa  
Gesamtmittel Bohrung B2 (z3OS): 30,0 GPa  
Gesamtmittel Bohrung B3 (z3OS): 30,6 GPa (ohne M2B3UB13)

### Lokation 3 :

### 2. Sohle, Ostquerschlag Bohrbereich 3.02



Bo-Nr.	gepl. Länge [m]	Länge [m]	Einbaut. [m]	Durchm. [mm]	Richtung [gon]	Neigung [gon]	Untersuchungsmethoden
RB 427	40	40	-	46 x	40	+5,5	HY
RB 428	30	30	-	46 x	vert.	+100	HY
RB 429	40	40,5	-	46 x	340	+5,5	HY
RB 477	7	7	-	180 x	220	0	SE
RB 431	7	7	-	180 x	220	0	SE
RB 478	7	7	-	46	220	0	SE
RB 481	7	7	-	46	220	0	SE
RB 434	40	33,5	31	46,86,148	40	-5,5	ÜB/LSP
RB 435	30	30	28,5	46,86,148	vert.	-100	ÜB/LSP
RB 436	40	39,9	38,5	46,68,148	340	-5,5	ÜB/LSP
RB 437	40	32,5	31	148 x	90	-50	LSP
RB 439	40	32,5	31	148 x	390	-50	LSP

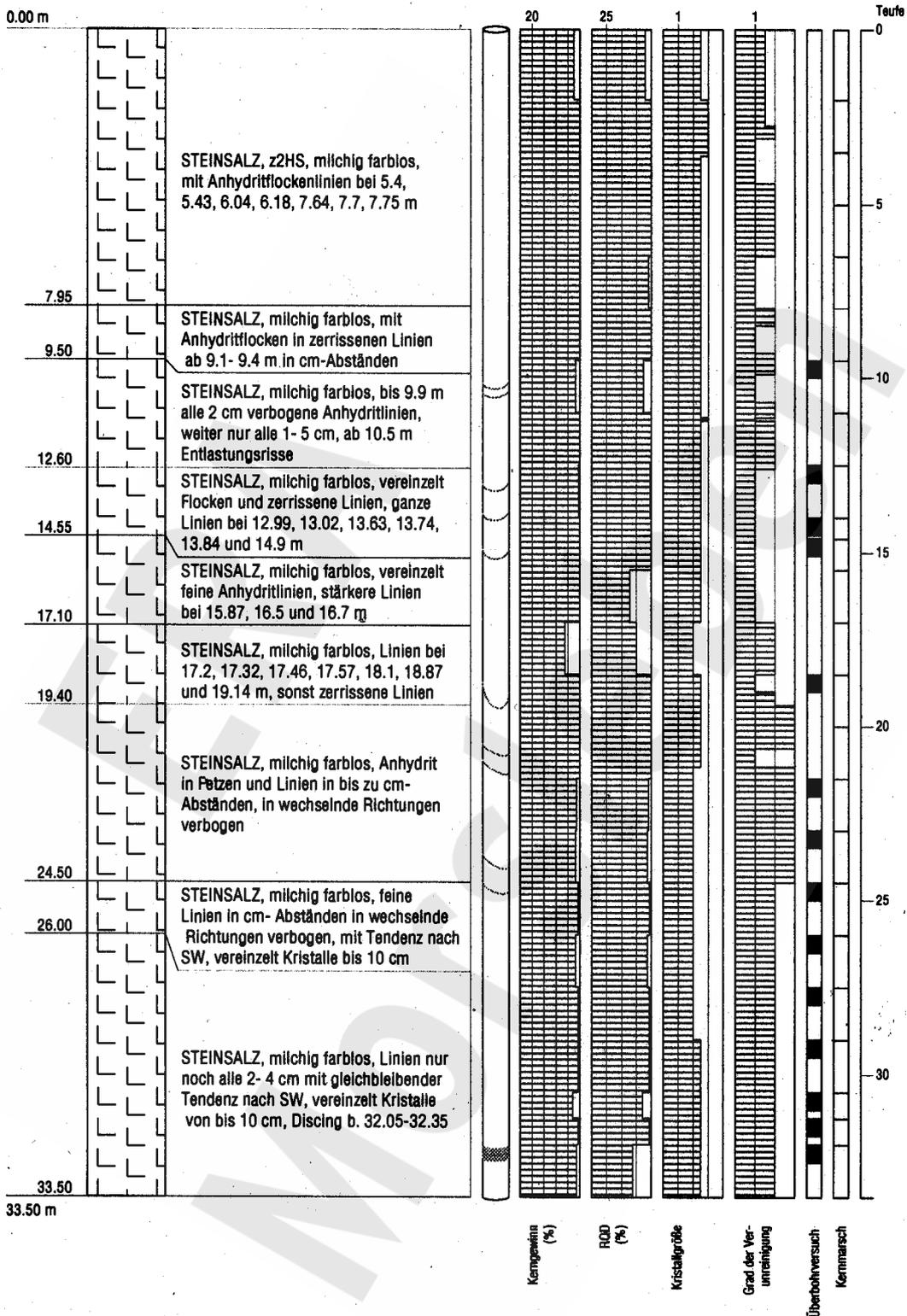
Bo 437 + 439 geändert am 21.11.95 !

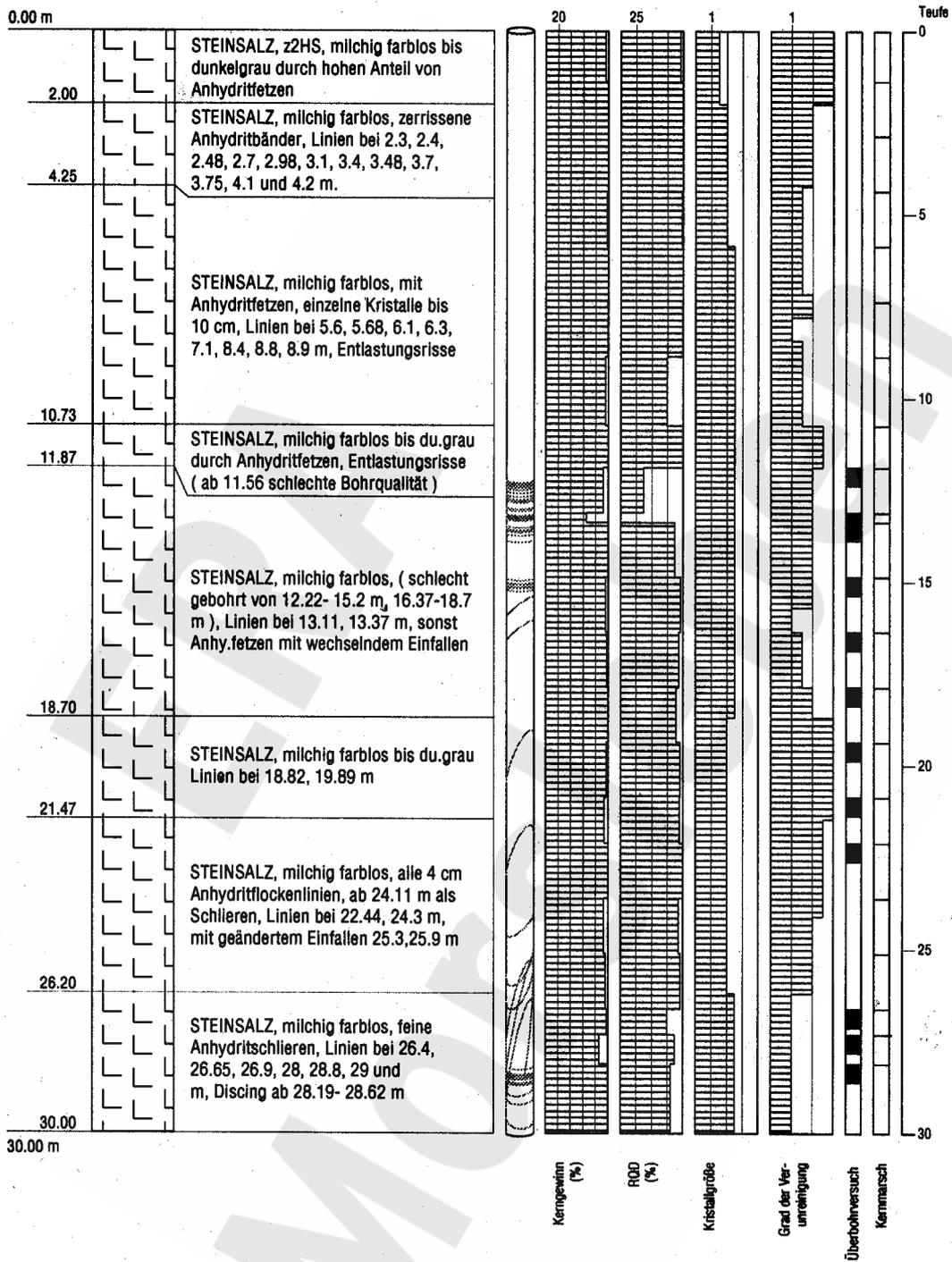
Bo 438 entfällt !  
x = Vollbohrung

- ÜB/Di = Überbohrversuche/Dilatometermessungen
- HY = Hydrofrac-Versuche
- SE = Schlitzentlastungsversuch
- LSP = Langzeitspannungsmessungen mit Monitorstationen

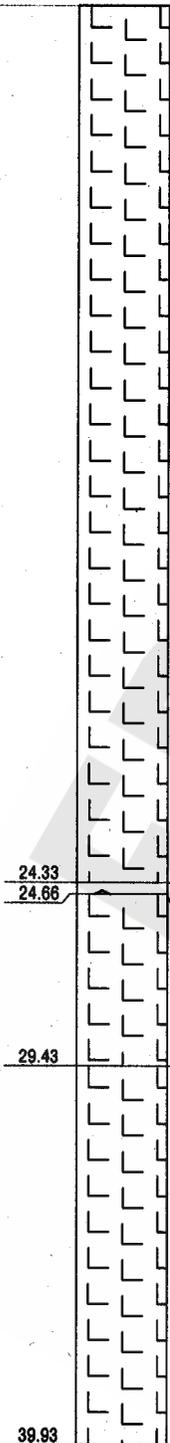
**BGR**

B2.6/B2.1 – Spr/Sch/Ku





0.00 m



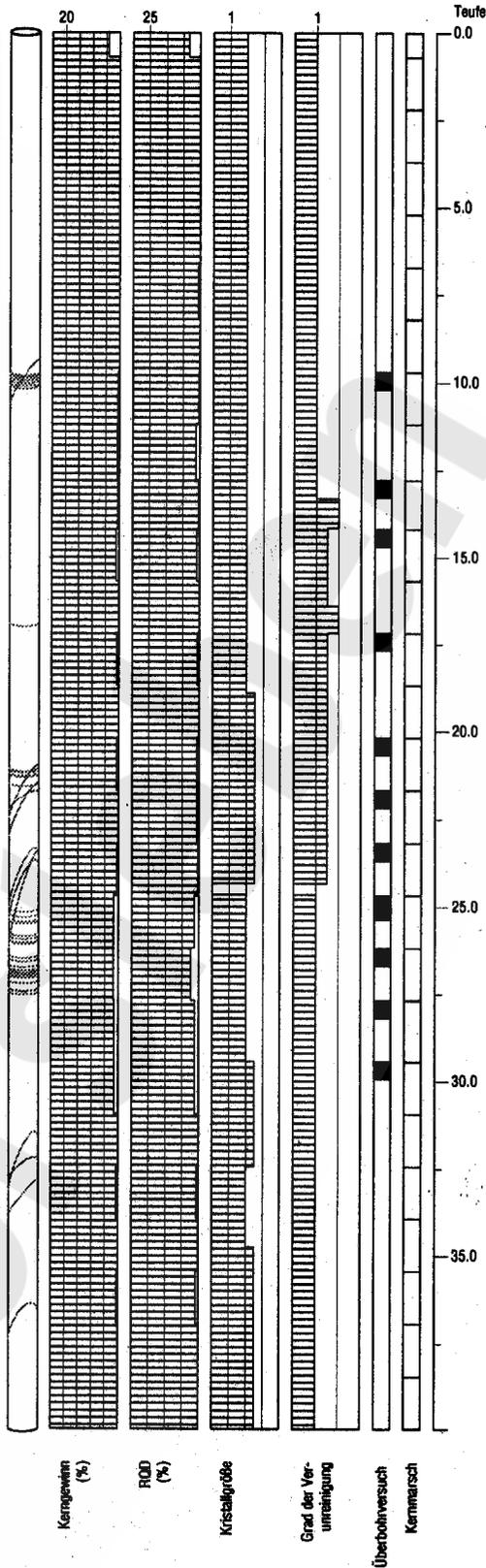
STEINSALZ, milchig farblos, z2HS,  
Anhydritschlieren, einzeln Kristalle  
bis 10 cm, ab 9.7 m Entlastungsrisse,  
( bis 0.7 m schlechte Bohrqualität )

ANHYDRIT, grau, feinkörnig,  
mit 3 dunkelgrauen Schichten

STEINSALZ, milchig farblos, z3HS,  
feine Anhydritbänder, Discing und  
Entlastungsrisse, ( 24.66- 27.68 m  
schlechte Bohrqualität )

STEINSALZ, milchig farblos, verbogene  
und zerrissene Anhydritflockenlinien,  
Entlastungsrisse

39.93  
39.93 m



Kerngewicht (%)

ROD (%)

Kristallgröße

Grad der Verunreinigung

Überbohrversuch

Kammarsch

Tiefe  
0.0  
5.0  
10.0  
15.0  
20.0  
25.0  
30.0  
35.0

Versuchs- bezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Versuchs- datum	Bohrloch- tiefe (m) <sup>2)</sup>	Bohrkern- gewinn <sup>3)</sup>	Versuchs- qualität <sup>4)</sup>	E-Modul (GPa) <sup>5)</sup>
M3B1UB01	z2HS	28.08.95	9,61	ja	gut	33,3
M3B1UB02	z2HS	29.08.95	12,51	nein	ausreichend	(33,2)
M3B1UB03	z2HS	29.08.95	13,97	ja	mangelhaft	31,0
M3B1UB04	z2HS	30.08.95	14,61	ja	ausreichend	32,6
M3B1UB05	z2HS	31.08.95	18,55	ja	ausreichend	30,7
M3B1UB06	z2HS	01.09.95	21,50	ja	gut	31,2
M3B1UB07	z2HS	04.09.95	23,06	ja	gut	34,1
M3B1UB08	z2HS	04.09.95	24,53	ja	gut	34,2
M3B1UB09	z2HS	05.09.95	26,03	ja	gut	35,4
M3B1UB10	z2HS	05.09.95	27,53	ja	gut	35,0
M3B1UB11	z2HS	06.09.95	29,01	nein	ausreichend	(33,2)
M3B1UB12	z2HS	06.09.95	30,55	nein	mangelhaft	-
M3B1UB13	z2HS	07.09.95	31,25	ja	ausreichend	34,1
M3B2UB01	z2HS	01.11.95	11,92	nein	ausreichend	(33,7)
M3B2UB02	z2HS	02.11.95	13,39	nein	mangelhaft	-
M3B2UB03	z2HS	03.11.95	14,93	nein	ausreichend	(33,7)
M3B2UB04	z2HS	06.11.95	16,40	ja	gut	35,6
M3B2UB05	z2HS	06.11.95	17,90	ja	ausreichend	32,9
M3B2UB06	z2HS	07.11.95	19,40	ja	gut	34,9
M3B2UB07	z2HS	08.11.95	22,13	ja	gut	32,8
M3B2UB08	z2HS	09.11.95	23,71	ja	gut	32,3
M3B2UB09	z2HS	10.11.95	25,16	nein	mangelhaft	-
M3B2UB10	z2HS	10.11.95	26,67	nein	ausreichend	(32,3)
M3B2UB11	z2HS	13.11.95	27,42	nein	mangelhaft	-
M3B2UB12	z2HS	14.11.95	28,17	nein	mangelhaft	-
M3B3UB01	z2HS	21.09.95	9,73	ja	ausreichend	34,0
M3B3UB02	z2HS	25.09.95	12,82	ja	ausreichend	32,9
M3B3UB03	z2HS	25.09.95	14,24	ja	ausreichend	35,5
M3B3UB04	z2HS	26.09.95	17,23	ja	ausreichend	34,7
M3B3UB05	z2HS	27.09.95	20,22	ja	gut	35,0
M3B3UB06	z2HS	27.09.95	21,77	ja	gut	33,3
M3B3UB07	z2HS	28.09.95	23,24	ja	gut	35,9
M3B3UB08	z2HS	29.09.95	24,77	ja	ausreichend	37,8
M3B3UB09	z2HS	04.10.95	26,27	nein	ausreichend	(34,8)
M3B3UB10	z2HS	04.10.95	27,26	ja	gut	34,9
M3B3UB11	z2HS	05.10.95	29,51	nein	gut	34,5

<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M3B3UB11:

M = Morsleben  
3 = Lokation 3  
B3 = Bohrung 3 (interne Bezeichnung)  
UB11 = Überbohrversuch Nr. 11

<sup>2)</sup> Tiefe des Pilotbohrlochmundes

<sup>3)</sup> Bohrkerngewinn ausreichend?:

ja: Kernlänge  $\geq$  37 cm  
nein: Kernlänge  $<$  37 cm

<sup>4)</sup> Kriterien nach Kap. 4.1.2

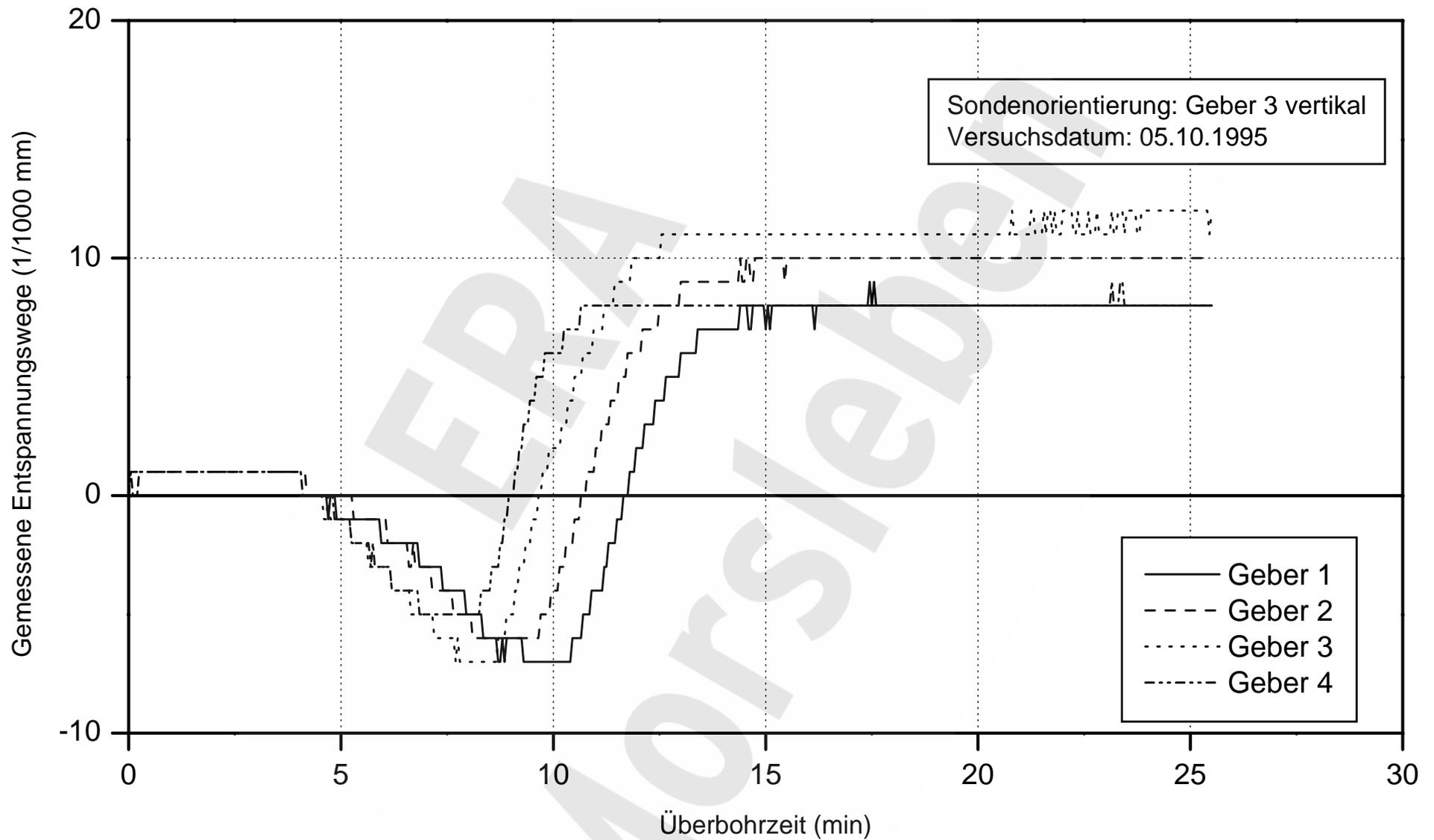
<sup>5)</sup> Für die Auswertung der Überbohrversuche  
ermittelter oder gewählter E-Modul  
(Werte in Klammern sind geschätzt)

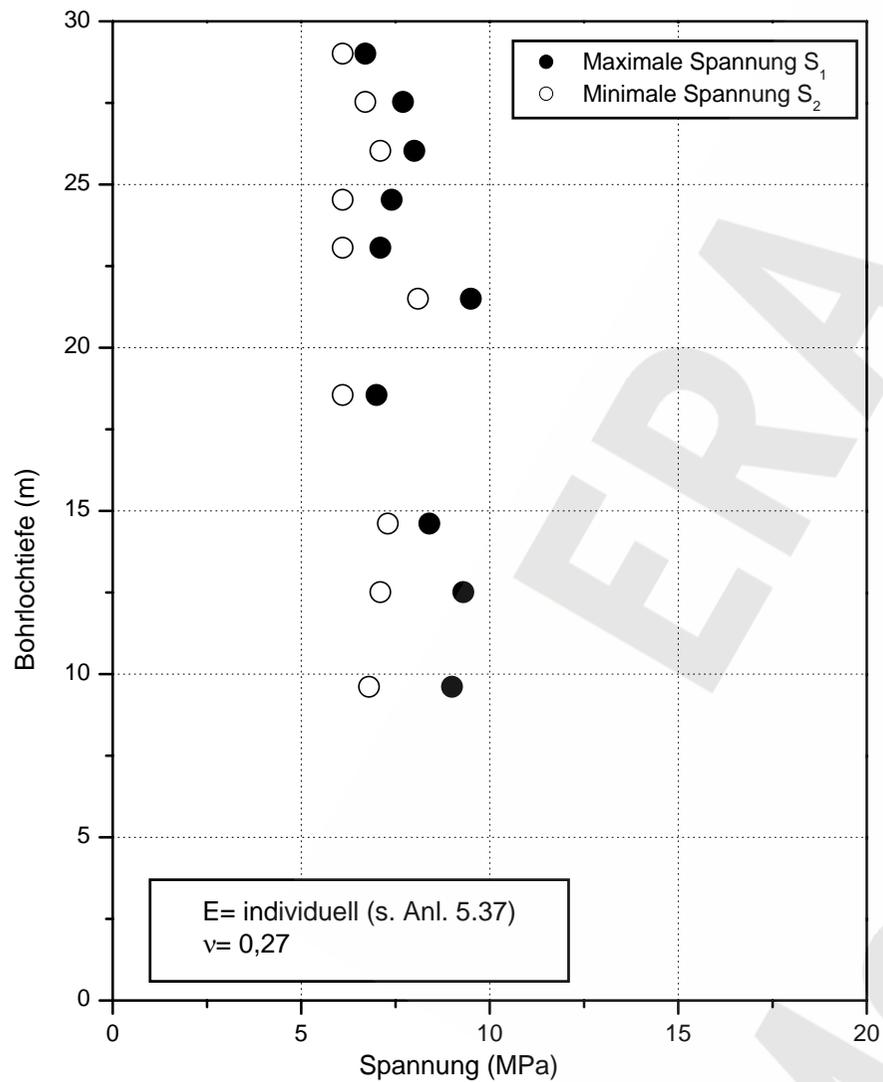
**BGR**

B2.6/B2.1 - Heu

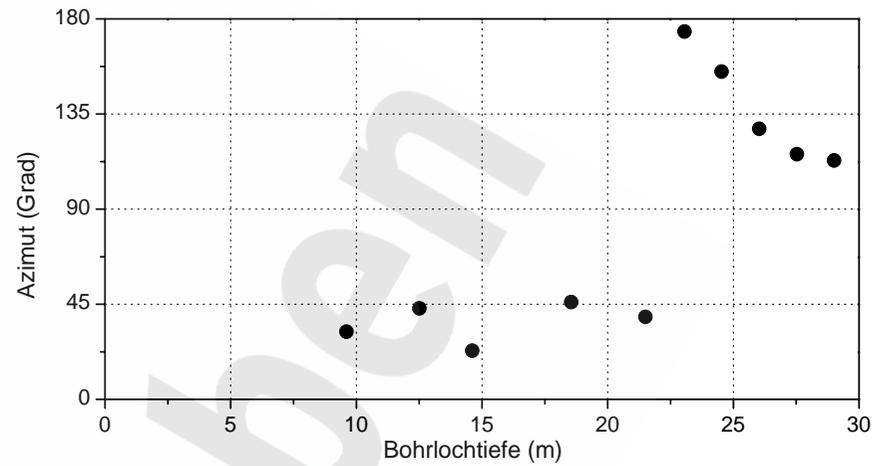
Zusammenstellung der Überbohrversuchsdaten  
für Lokation 3 (Bohrbereich 3.02)

Anlage 5.37

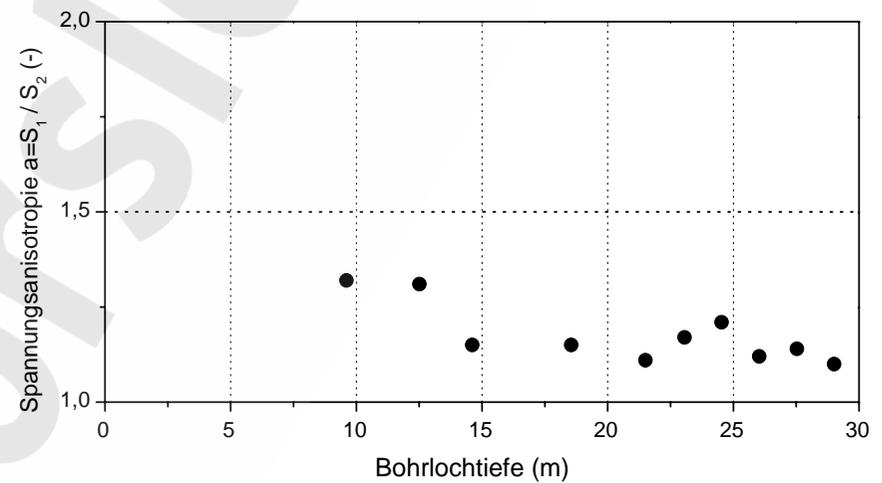




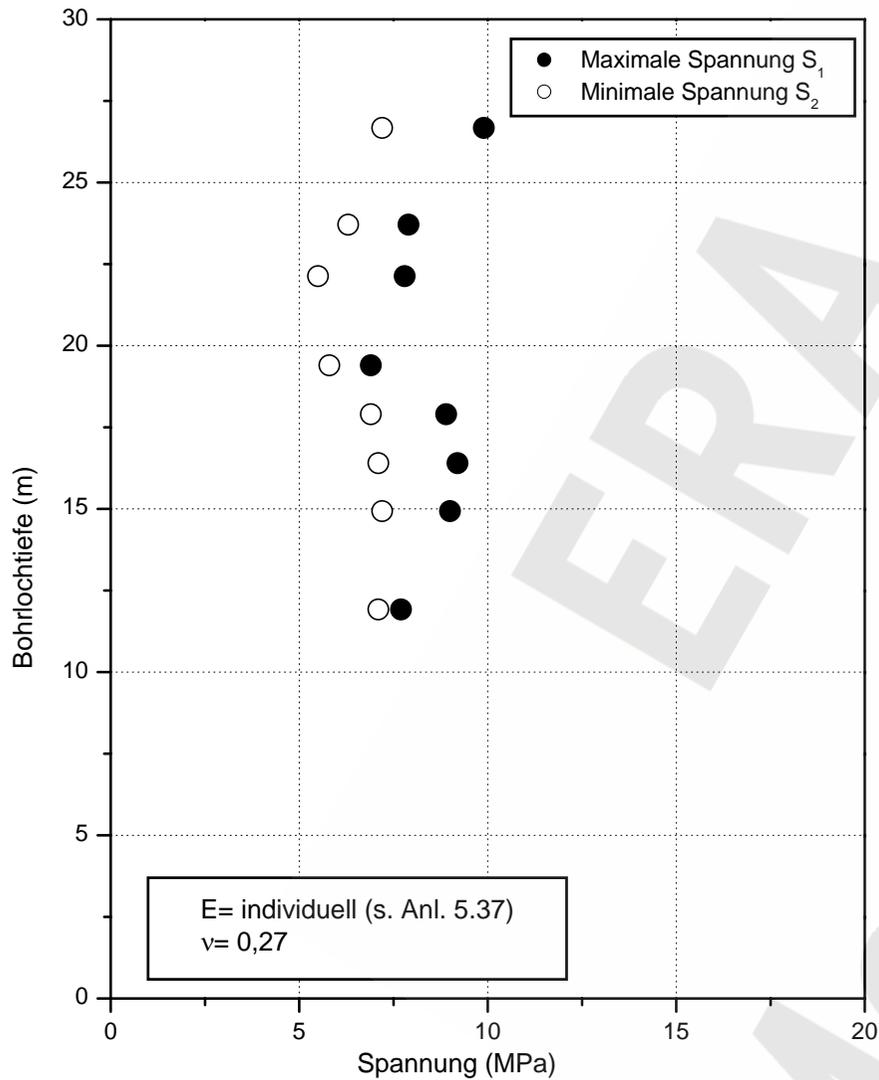
a) Spannungsbeträge



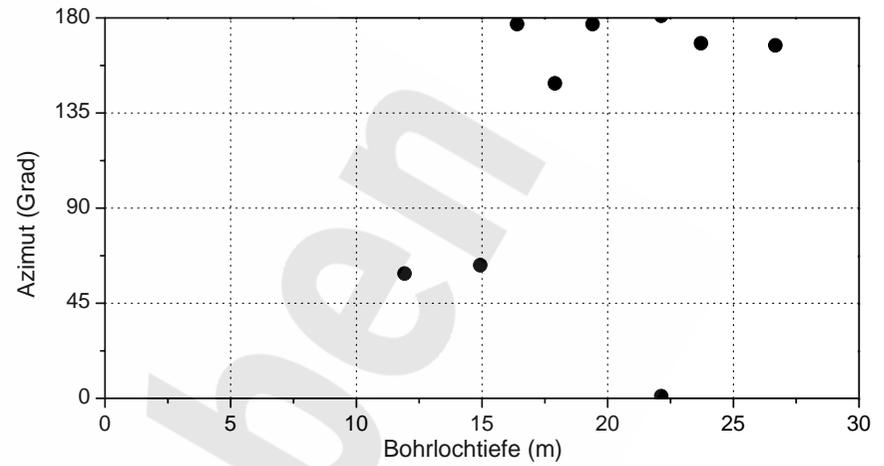
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$



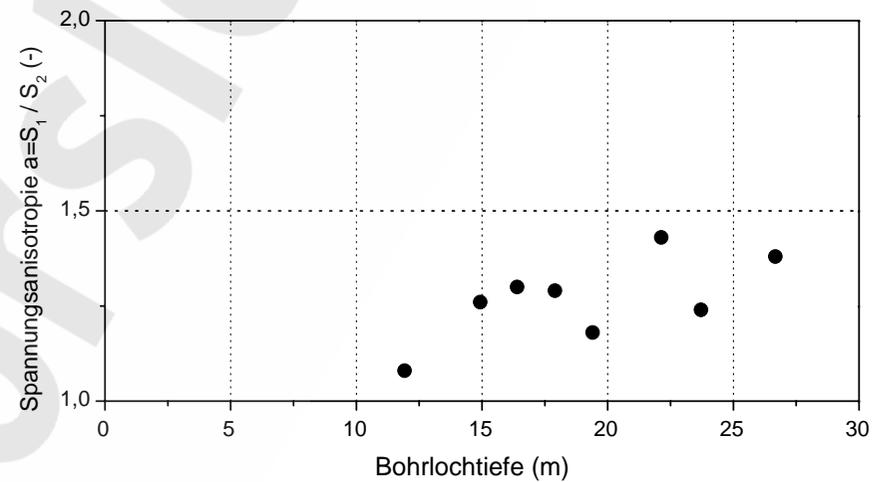
c) Grad der Spannungsanisotropie



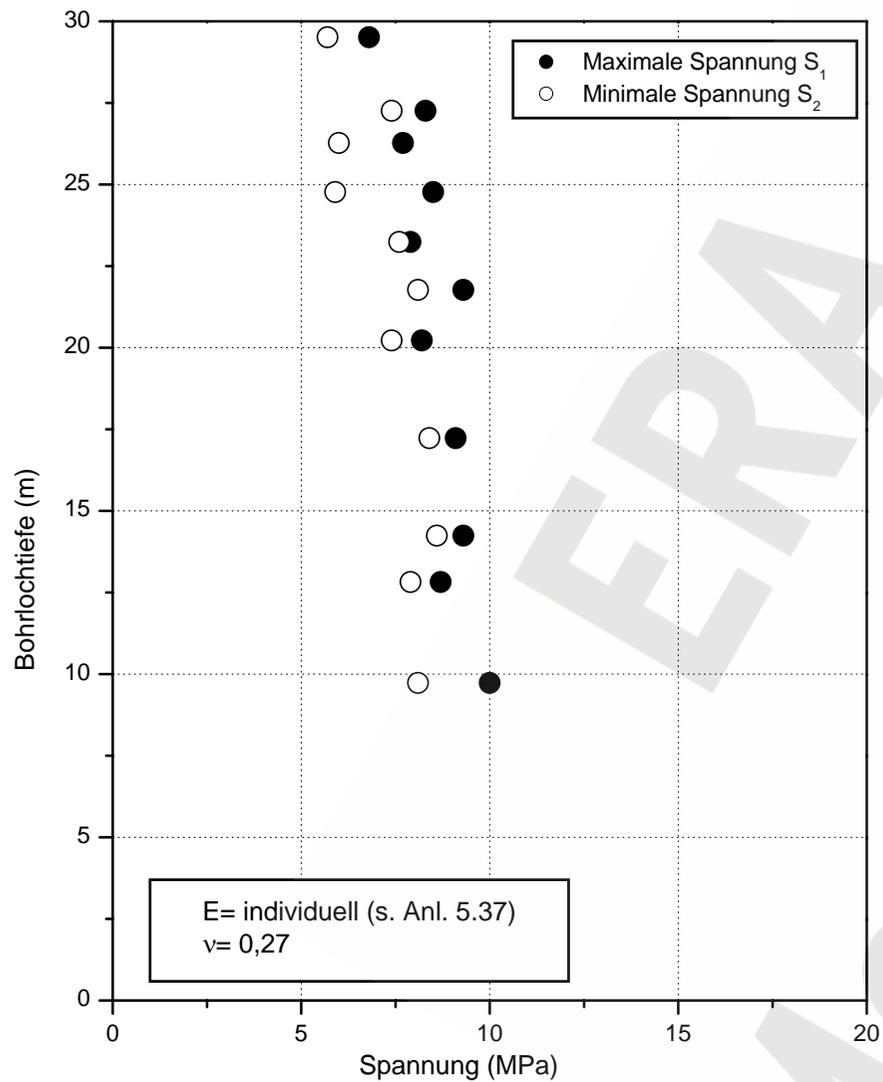
a) Spannungsbeträge



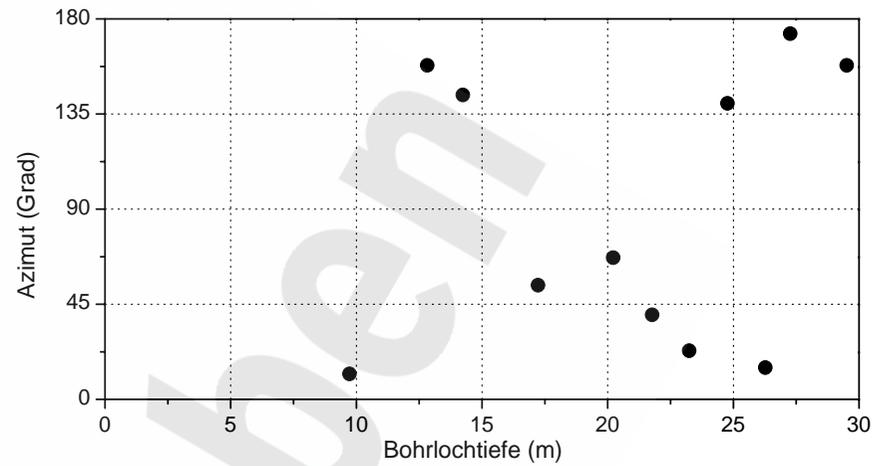
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$



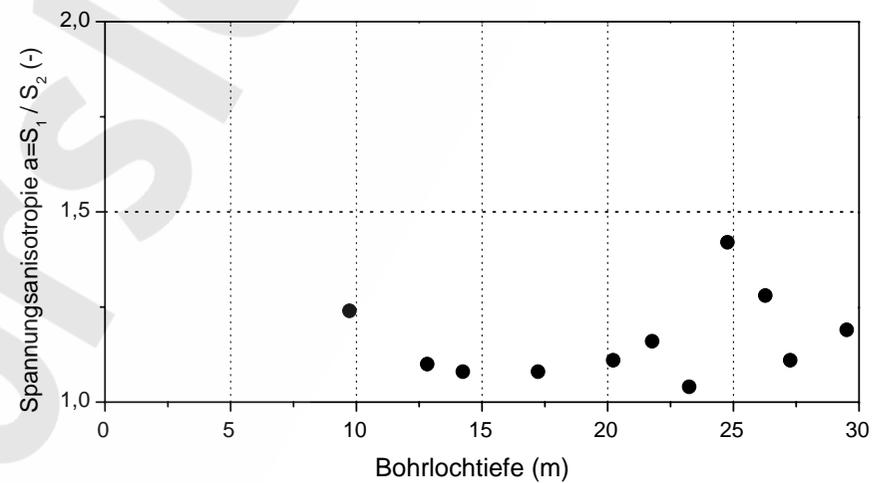
c) Grad der Spannungsanisotropie



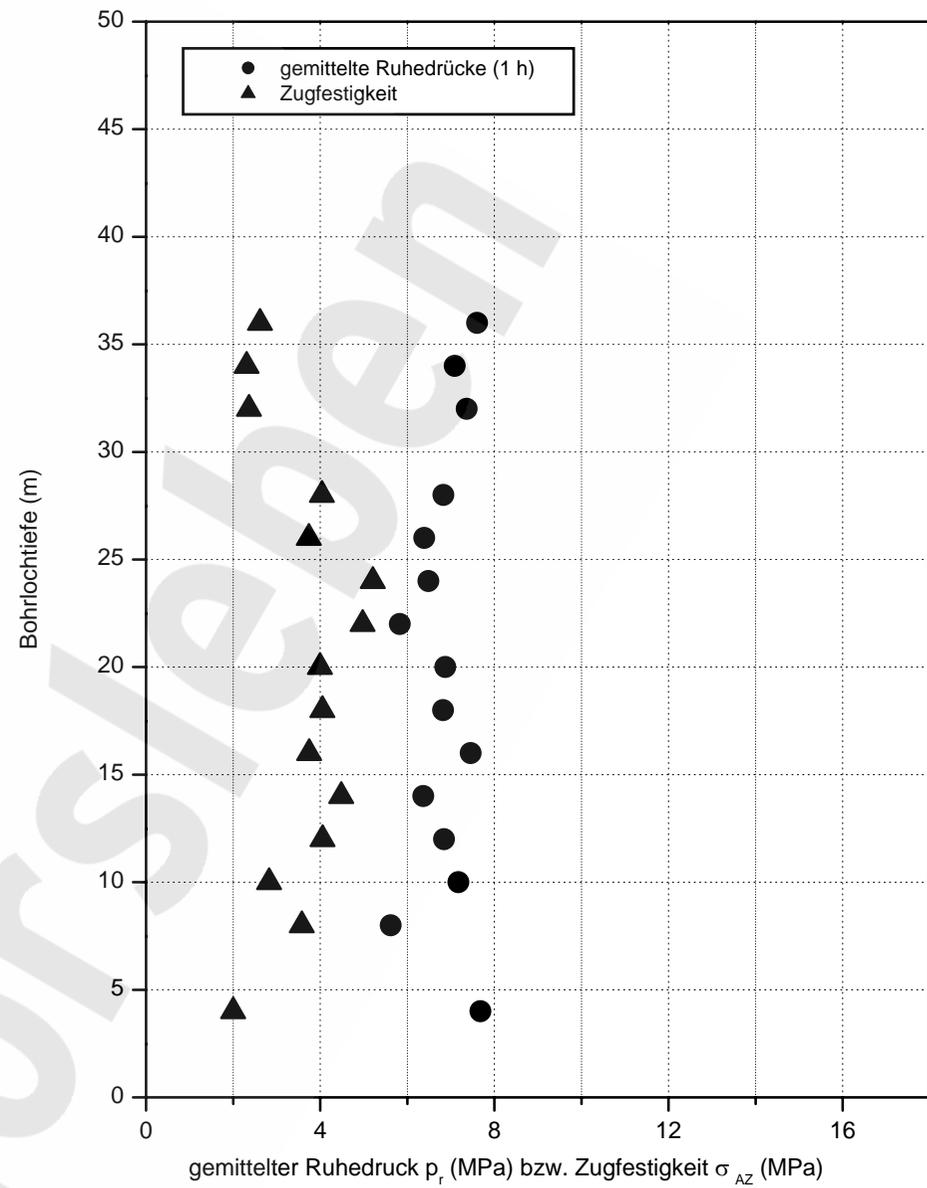
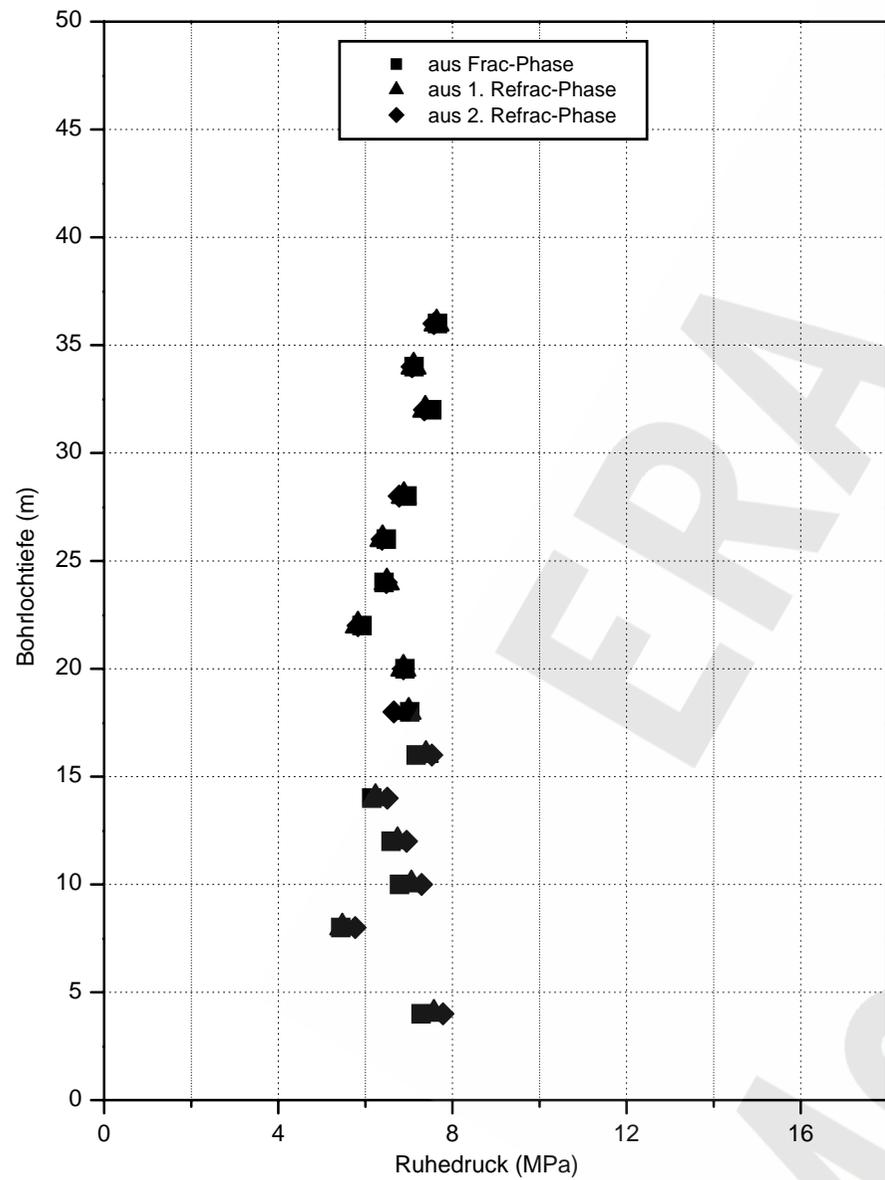
a) Spannungsbeträge

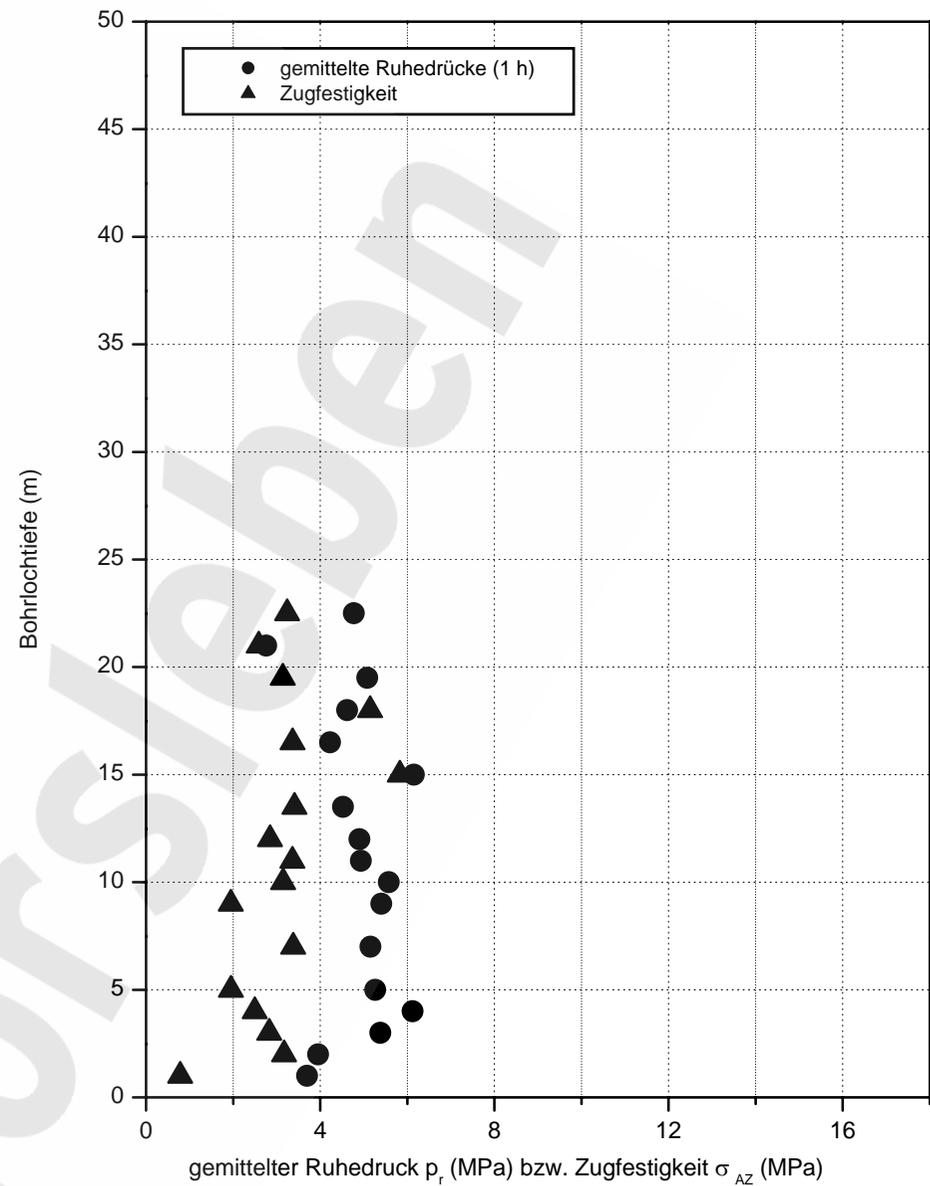
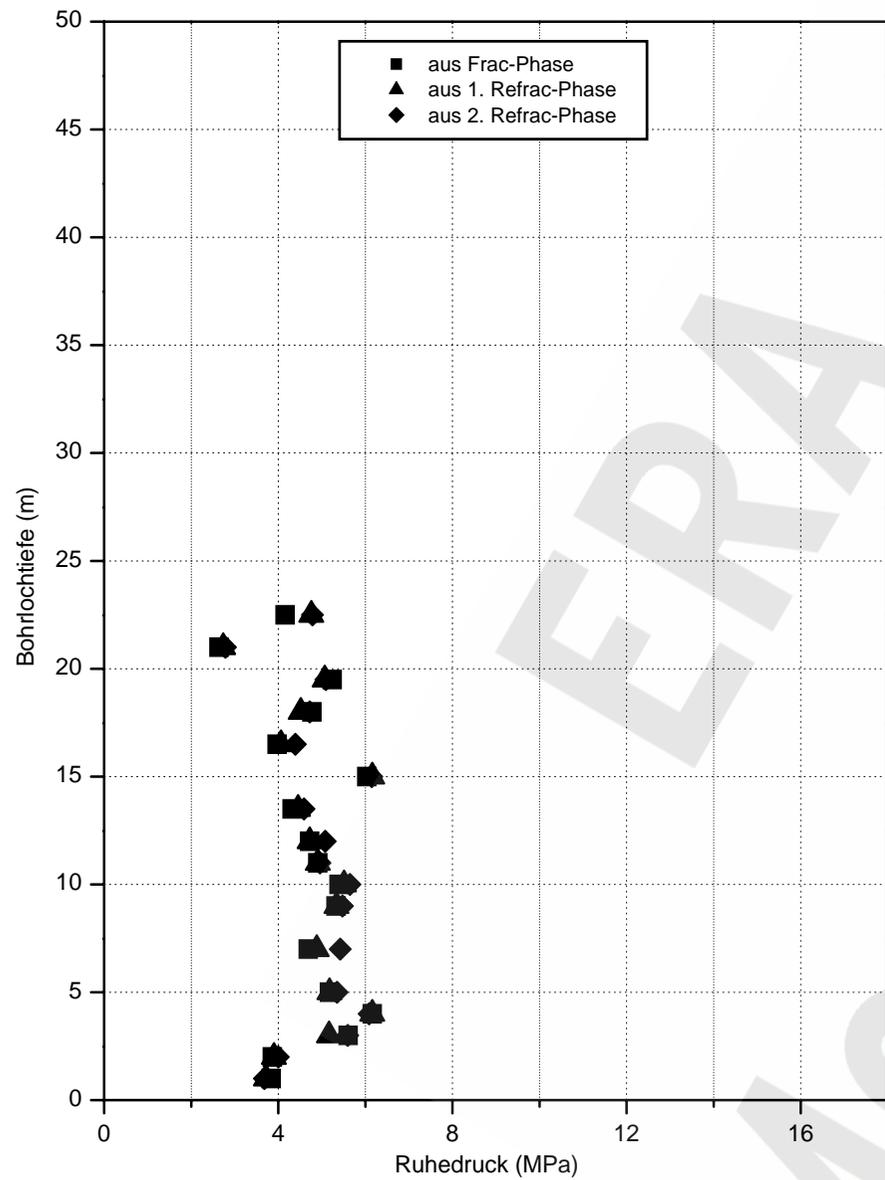


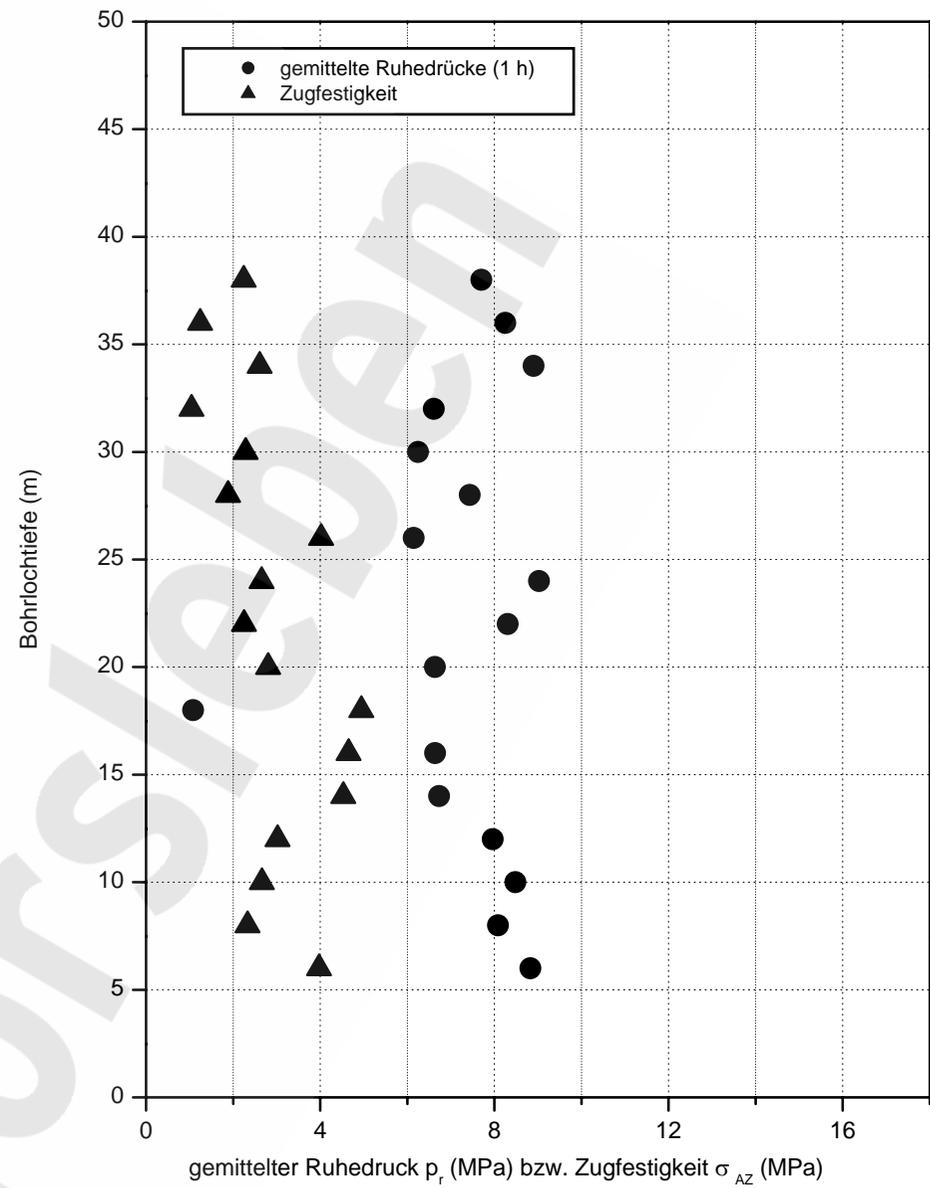
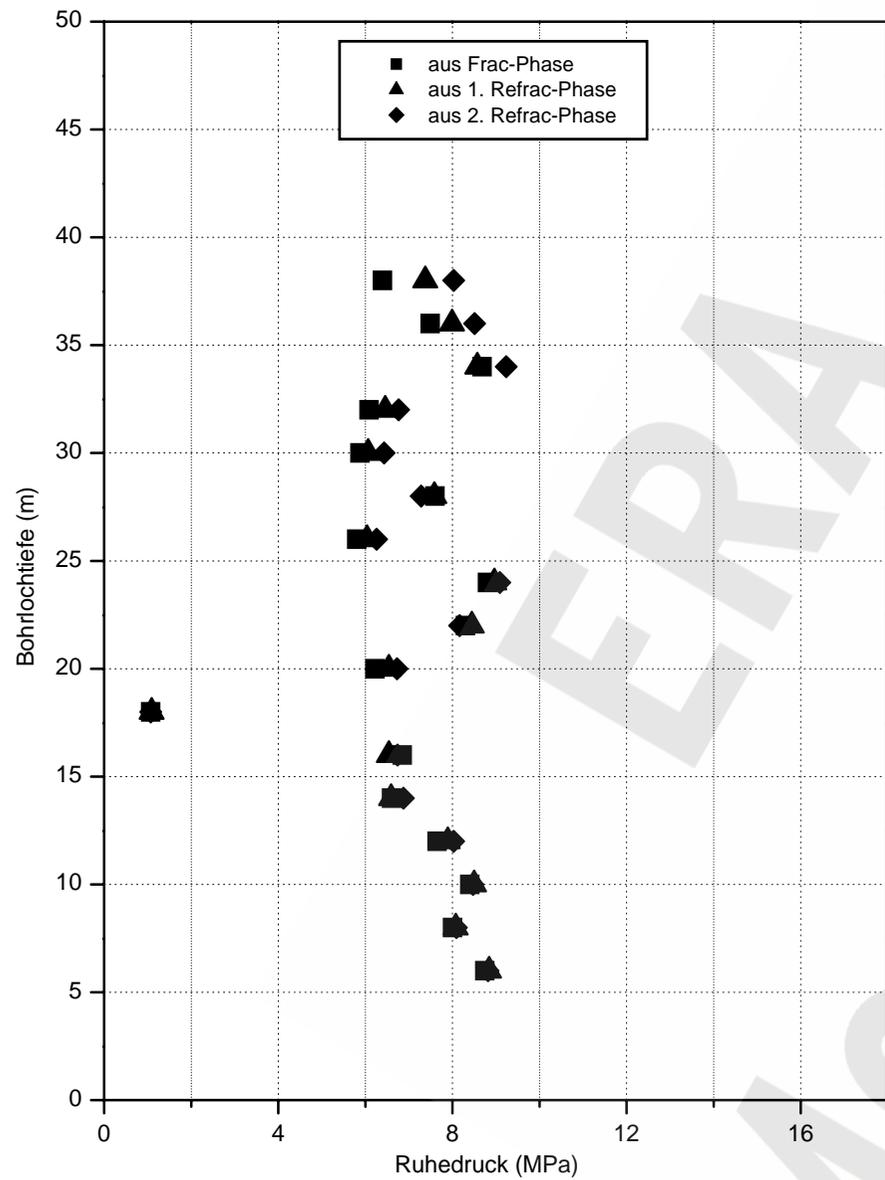
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$

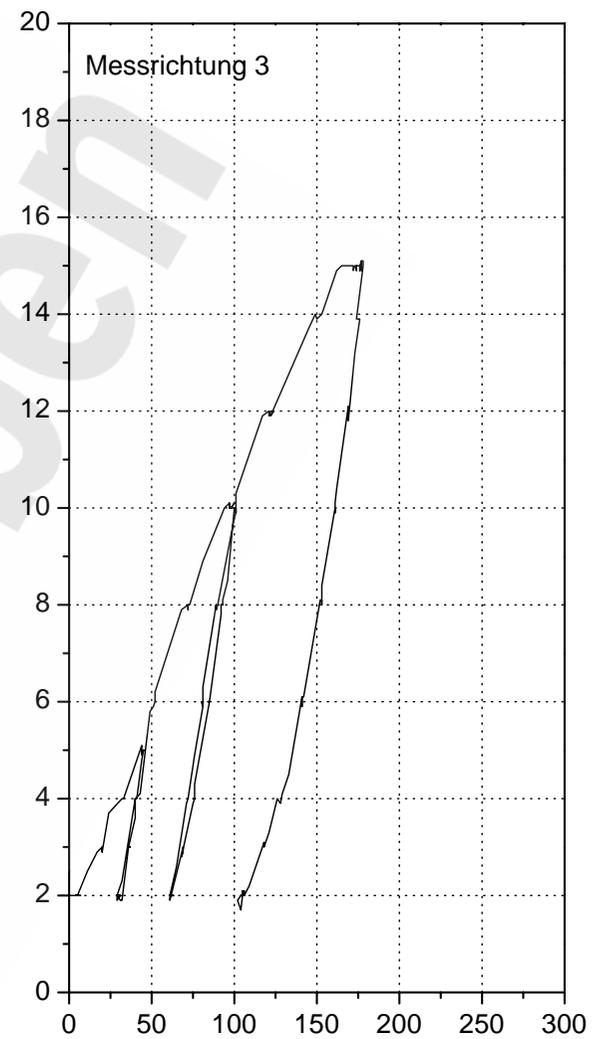
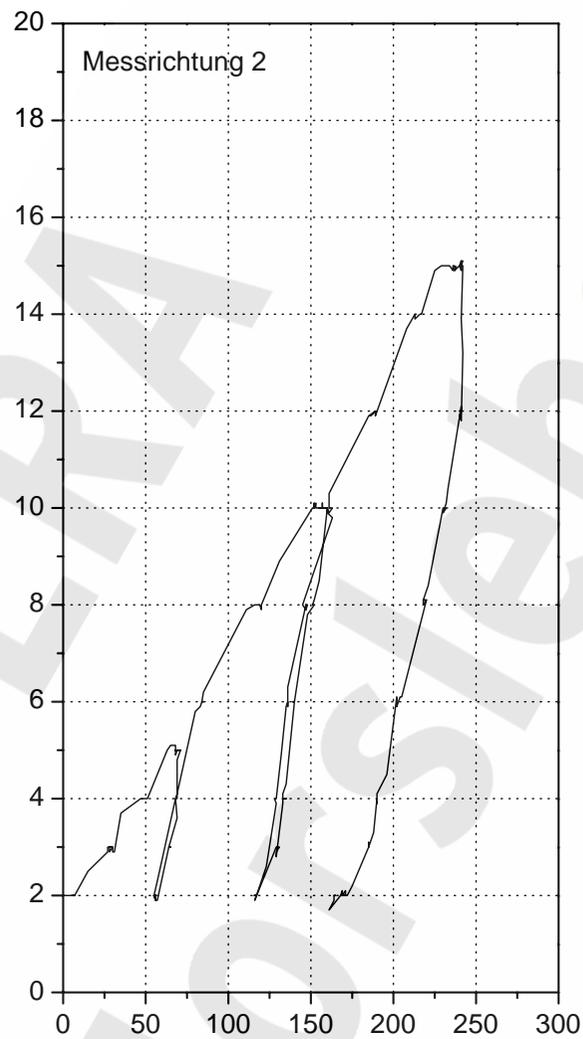
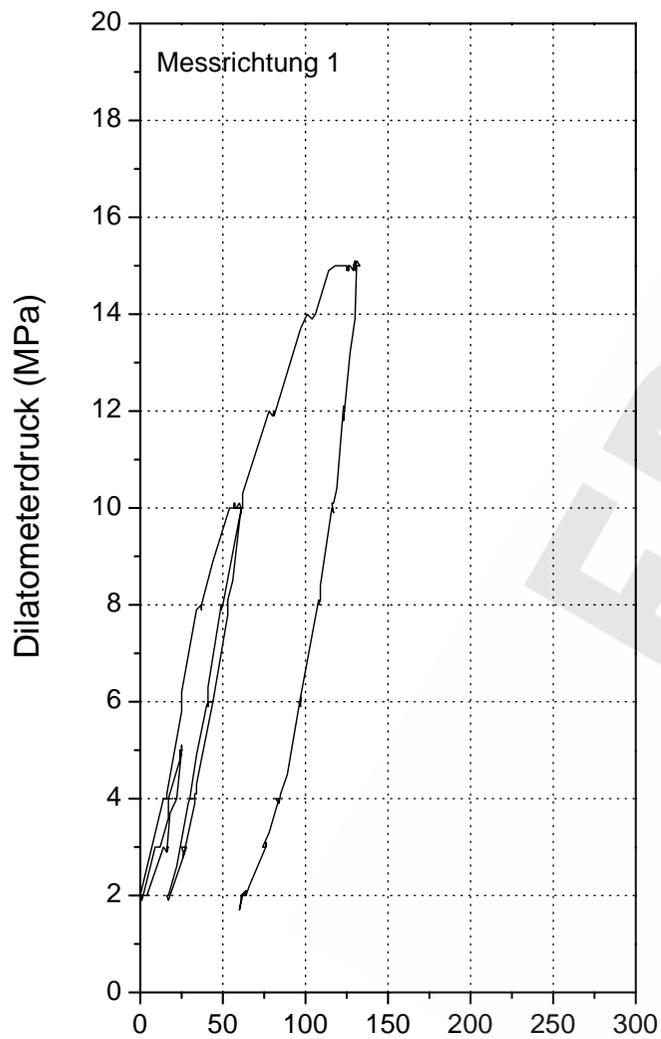


c) Grad der Spannungsanisotropie









Änderung des Bohrlochdurchmessers (1/1000 mm)

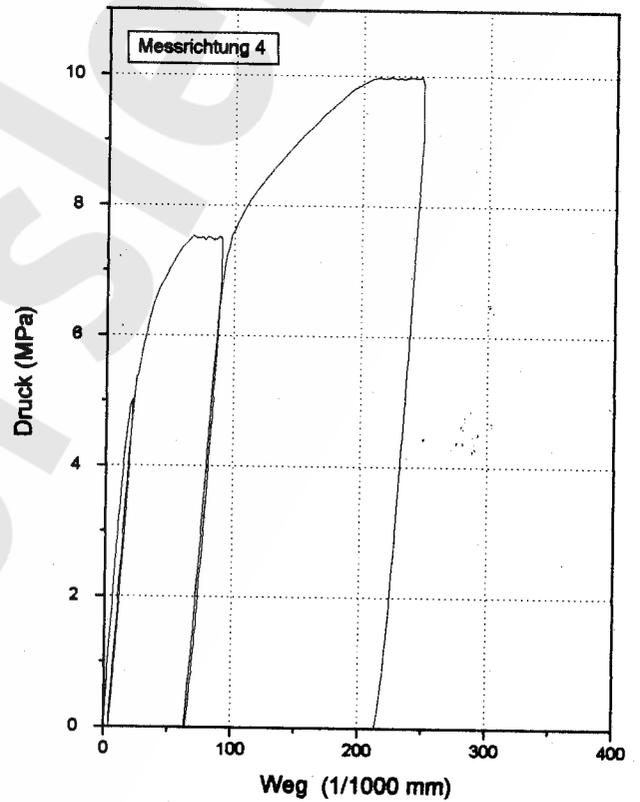
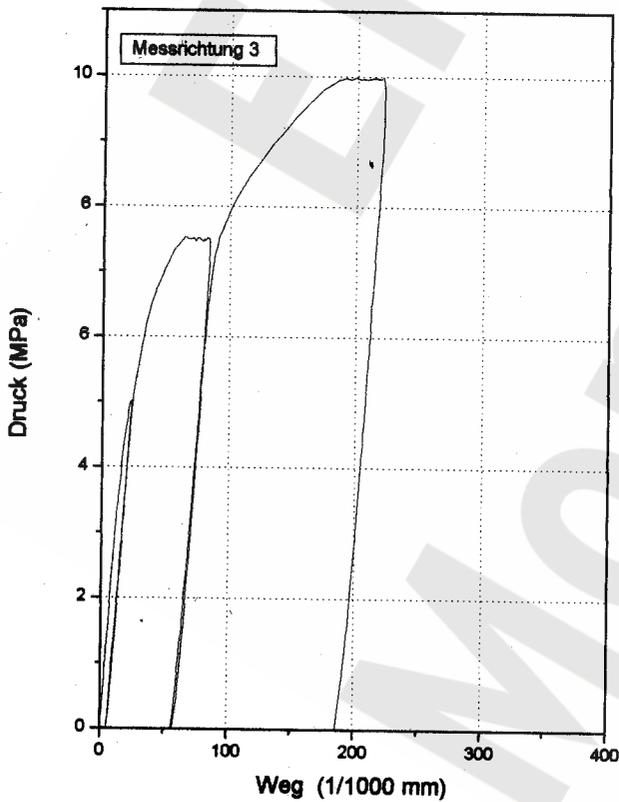
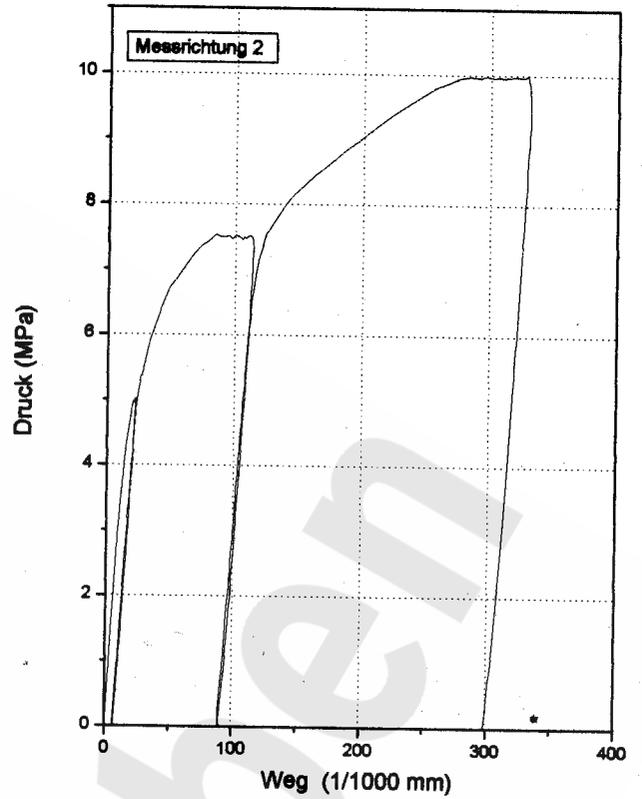
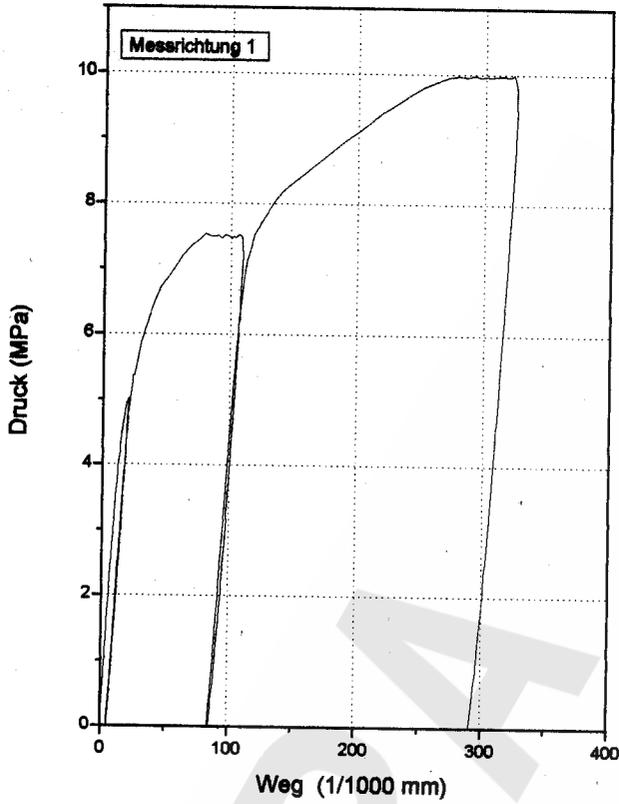


Versuchs- bezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Versuchs- datum	Versuchs- tiefe (m)	E-Modul (GPa)			Mittelwert (GPa)
				bei Entlastung von - bis (MPa)			
				5 - 2	10 - 2	15 - 2	
M3B3DI01	z2HS	22.09.95	11,71	23,0	24,9	21,8	23,2

<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M3B3DI01:

- M = Morsleben
- 3 = Lokation 3
- B3 = Bohrung 3 (interne Bezeichnung)
- DI01 = Dilatometerversuch Nr. 01

ERA Morsleben



Projekt : MORSLER LOKATION 3  
 Versuchsbezeichnung : M3B1UB04  
 Material : STEINSALZ  
 Belastung : 5/ 7,5/ 10 MPa  
 Versuchsdatum : 16.02.96 09.10'

**BGR**  
 B2.6/B2.1-06/00-Hau/KO

Anlage 5.47

Last-Deformationsdiagramme für Prüfkörper aus Überbohrversuch M3B1UB04

Kernbezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Entnahmetiefe (m)	E-Modul (GPa)			Mittelwert (GPa)
			bei Entlastung (MPa) von			
			5	7,5	10	
M3B1UB01	z2HS	9,61 - 10,14	31,8	32,5	35,4	33,3
M3B1HZ01	z2HS	12,81 - 13,54	33,0	31,8	36,4	33,8
M3B1UB03	z2HS	13,97 - 14,59	30,2	29,0	33,8	31,0
M3B1UB04	z2HS	14,61 - 15,23	32,0	33,1	32,7	32,6
M3B1UB05	z2HS	18,55 - 19,04	31,9	30,7	29,5	30,7
M3B1UB06	z2HS	21,50 - 22,32	32,4	30,6	30,5	31,2
M3B1UB07	z2HS	23,06 - 23,90	31,3	34,0	37,1	34,1
M3B1UB08	z2HS	24,53 - 25,26	33,3	33,0	36,1	34,2
M3B1UB09	z2HS	26,03 - 26,91	34,2	34,4	37,6	35,4
M3B1UB10	z2HS	27,53 - 28,03	35,7	34,9	34,4	35,0
M3B1UB13	z2HS	31,25 - 31,64	32,7	34,9	34,8	34,1
M3B2UB04	z2HS	16,40 - 17,06	34,7	34,4	37,6	35,6
M3B2UB05	z2HS	17,90 - 18,28	33,7	31,6	33,5	32,9
M3B2UB06	z2HS	19,40 - 20,27	33,0	33,5	38,1	34,9
M3B2UB07	z2HS	22,13 - 23,05	31,5	32,5	34,3	32,8
M3B2UB08	z2HS	23,71 - 24,12	31,7	31,1	34,0	32,3
M3B3UB01	z2HS	9,73 - 10,28	33,1	32,7	36,1	34,0
M3B3UB02	z2HS	12,82 - 13,88	33,2	32,6	32,8	32,9
M3B3UB03	z2HS	14,24 - 14,74	34,3	36,2	36,1	35,5
M3B3UB04	z2HS	17,23 - 18,27	31,7	35,1	37,3	34,7
M3B3UB05	z2HS	20,22 - 20,67	33,7	35,5	35,8	35,0
M3B3UB06	z2HS	21,77 - 22,17	33,5	32,9	33,5	33,3
M3B3UB07	z2HS	23,24 - 23,72	35,7	35,1	36,9	35,9
M3B3UB08	z2HS	24,77 - 25,25	39,5	37,5	36,5	37,8
M3B3UB10	z2HS	27,76 - 28,64	34,6	34,8	35,2	34,9
M3B3UB11	z2HS	29,51 - 30,00	34,7	34,3	-	34,5

<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M3B3UB11:

M = Morsleben  
3 = Lokation 3  
B3 = Bohrung 3 (interne Bezeichnung)  
UB11 = Hohlkern aus Überbohrversuch Nr. 11

<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M3B1HZ01:

M = Morsleben  
3 = Lokation 3  
B1 = Bohrung 1 (interne Bezeichnung)  
HZ01 = Hohlkern mit ffd. Nr., der nicht direkt aus einem Überbohrversuch stammt

Gesamtmittel Bohrung B1 (z2HS): 33,2 GPa  
Gesamtmittel Bohrung B2 (z2HS): 33,7 GPa  
Gesamtmittel Bohrung B3 (z2HS): 34,8 GPa

**BGR**

B2.6/B2.1 - Heu

Zusammenstellung der im Labor  
ermittelten E-Moduli (Lokation 3)

Anlage 5.48

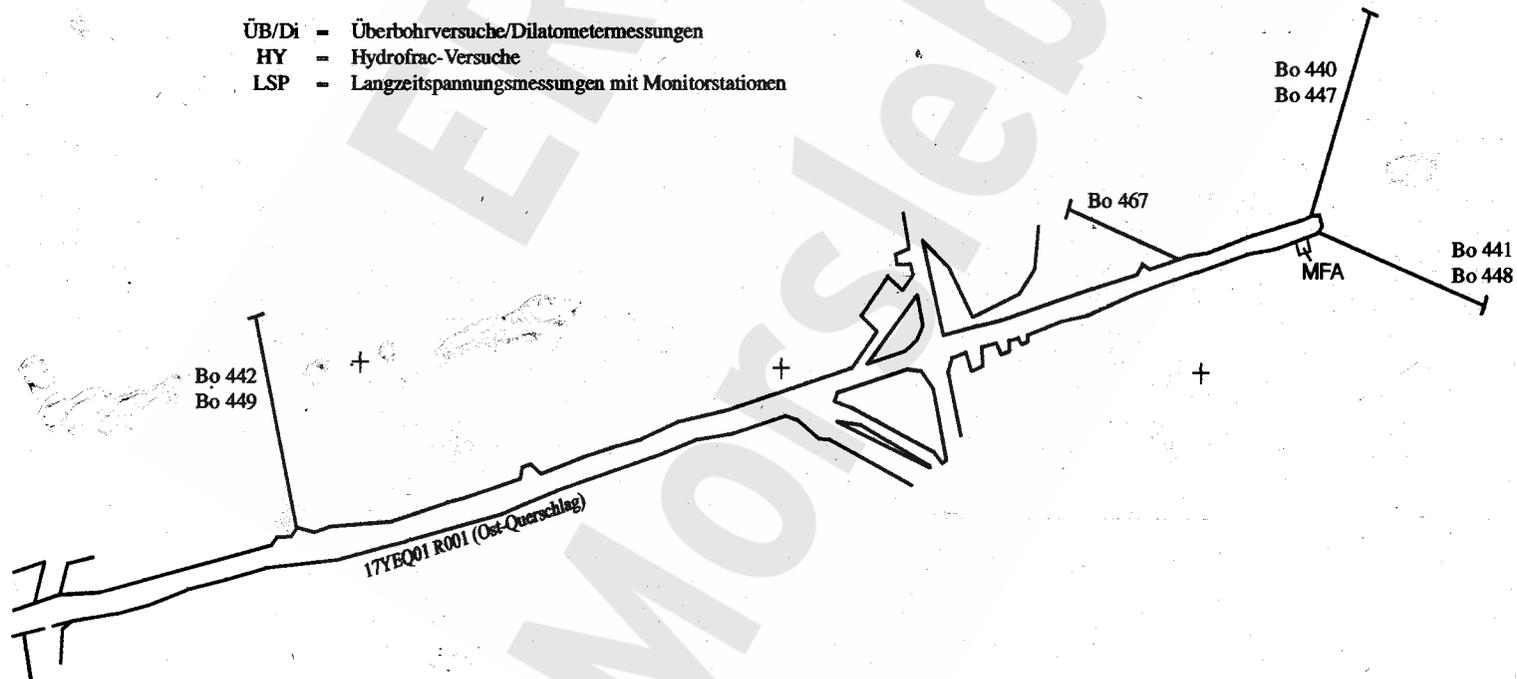
### Lokation 4 :

4. Sohle, Ostfeld  
Bohrbereich 3.04

Bo-Nr.	gepl. Länge [m]	Länge [m]	Einbaut.	Durchm. [mm]	Richtung [gon]	Neigung [gon]	Untersuchungs- methoden
Bo 440	40	40	-	46 x	15	+5,5	HY
Bo 441	55	56	-	46 x	115	+5,5	HY
Bo 442	40	40,2	-	46 x	385	+5,5	HY
Bo 447	40	27,9	-	46/86/148	15	-5,5	ÜB/Di
Bo 448	55	40,4	38,5	46/86/148	115	-5,5	ÜB/Di/LSP
Bo 449	40	29,1	-	46/86/148	385	-5,5	ÜB/Di
Bo 467	30	25,1	-	46/86/148	361	0	ÜB/Di

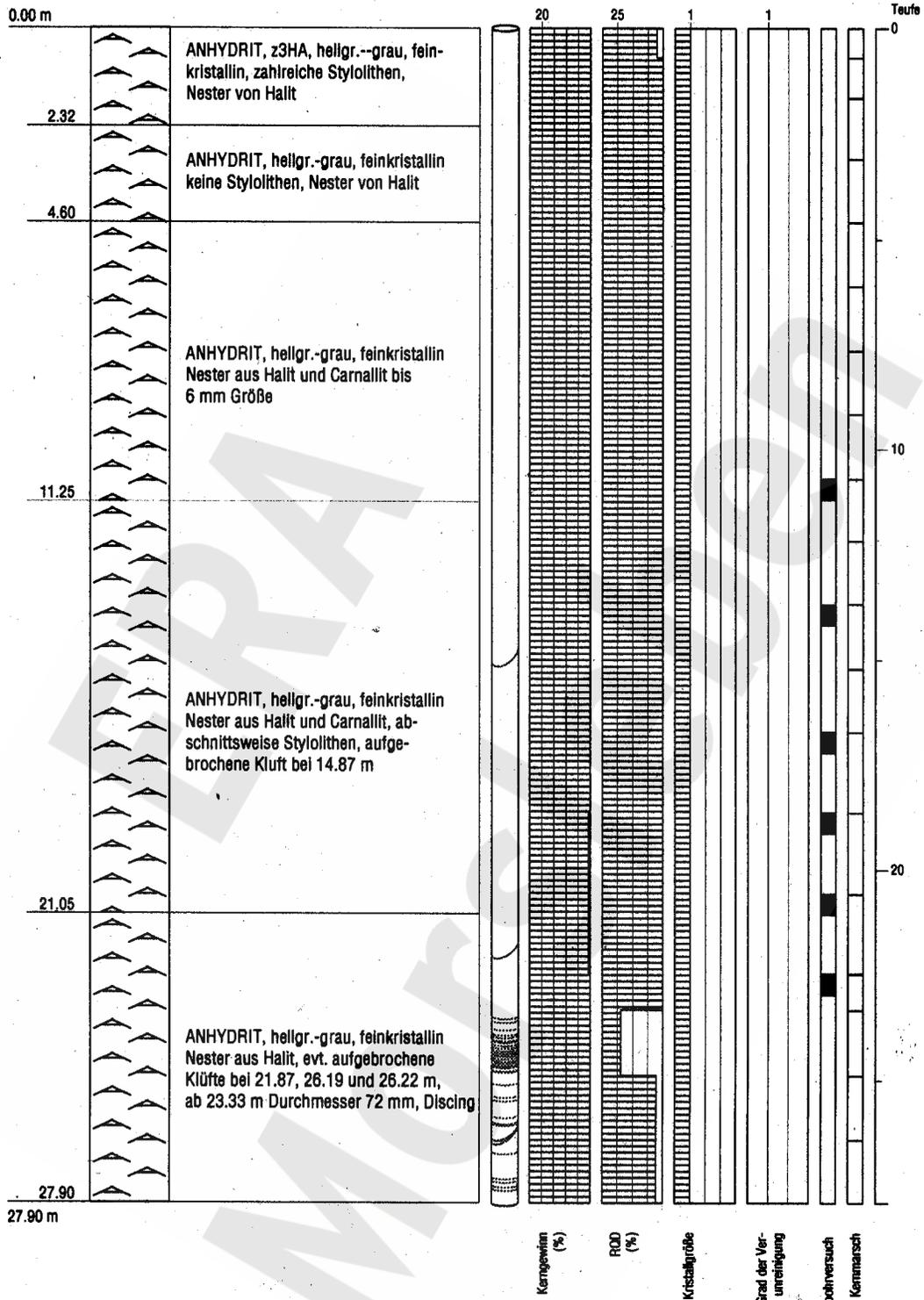
x - Vollbohrung

- ÜB/Di - Überbohrversuche/Dilatometermessungen
- HY - Hydrofrac-Versuche
- LSP - Langzeitspannungsmessungen mit Monitorstationen



**BGR**

B2.6/B2.1 - Spr/Ku



0.00 m

10.25

17.95

25.14

27.37

32.42

34.00

40.44

40.44 m

ANHYDRIT, z3Ha, hellgr.-grau, feinkristallin, dünne Fasern aus Halit, Nester v. Halit und vereinz. Carnallit, 0.62, 1.0, 1.19 u.6.22 m Klüfte

ANHYDRIT, hellgr.-grau, feinkristallin Fasern aus Halit, Nester aus Halit und verstärkt Carnallit, Stylolithen von 12.2-12.8 m und von 14.3-17.85 m

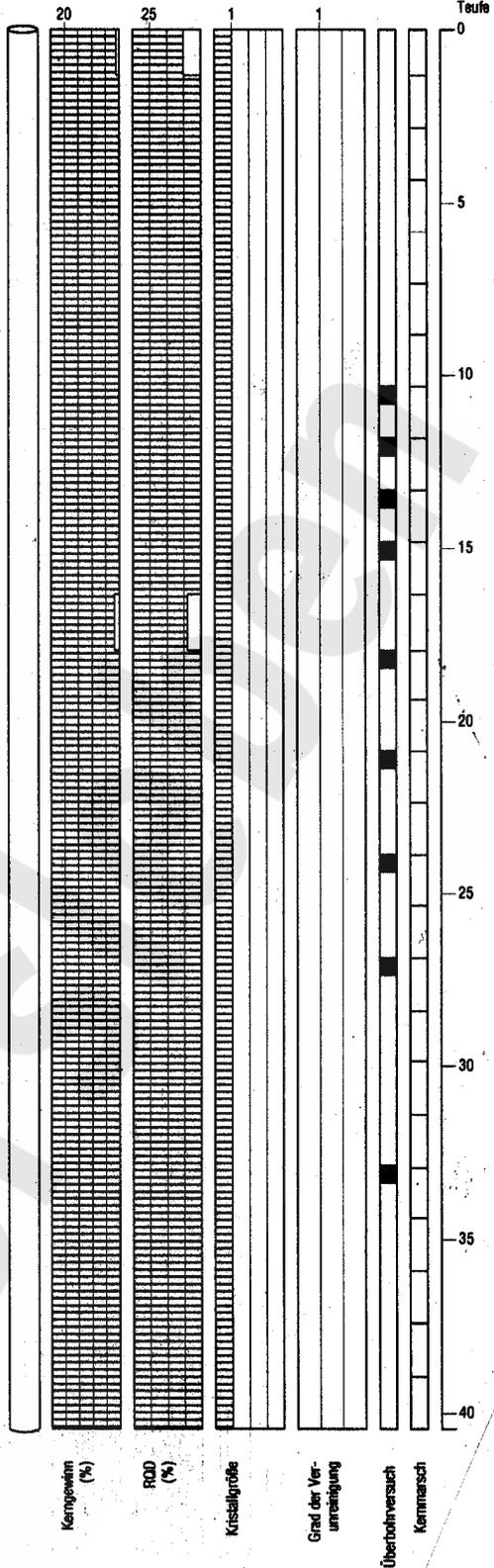
ANHYDRIT, hellgr.-grau, feinkristallin Nester aus Halit und Carnallit, Stylolithen von 19.35-19.85 m und von 23.86-25.14 m

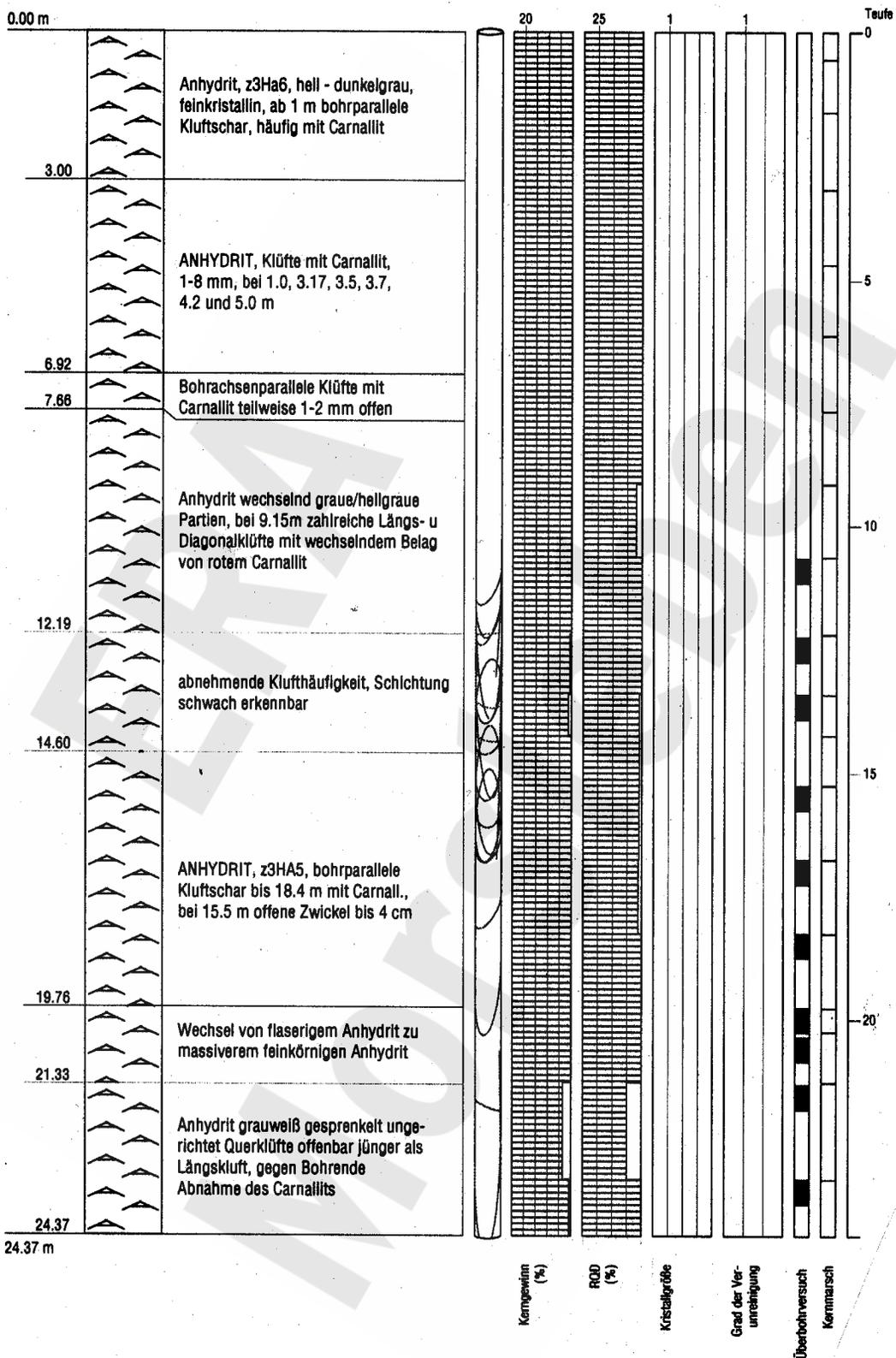
ANHYDRIT, hellgr.-grau, feinkristallin zahlreiche Stylolithen, Nester von Carnallit und Halit

ANHYDRIT, hellgr.-grau, feinkristallin Nester von Carnallit und Halit, Stylolithen von 31.16-32.42 m

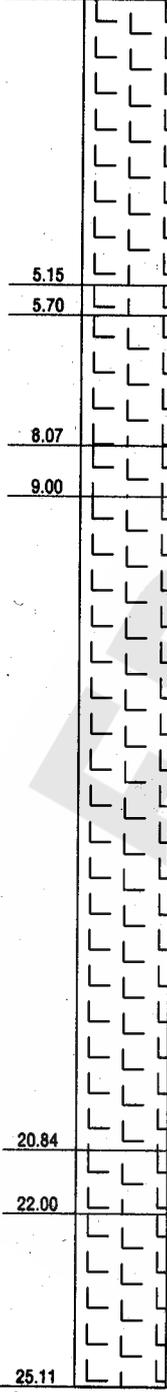
ANHYDRIT, hellgr.-grau, feinkristallin nur vereinzelt Nester von Halit und Carnallit

ANHYDRIT, hellgr.-grau, feinkristallin Nester aus Carnallit, ausgeprägte Stylolithen bei 35.34-35.67 m in Abständen von 3-4 cm und bei 38.31 m





0.00 m



STEINSALZ, z3LS, weißl. bis hellgr.,  
fein verteilte Anhydrit-Partikel,  
einzelne Anhydrit-Flatschen,  
Linien bei 0.3 u. 2.3 m

STEINSALZ, Bruchstück von Salz/  
Anhydrit-Wechselagerung in  
feinkörniger Matrix

STEINSALZ, weißlich

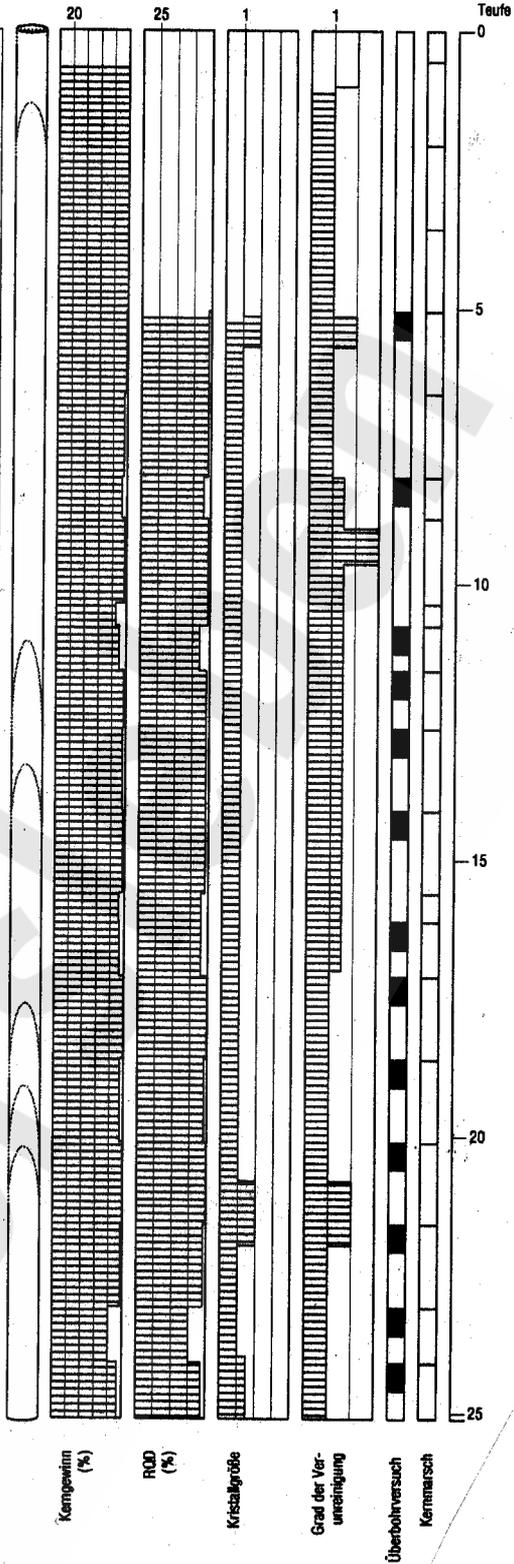
STEINSALZ, einzelne Anhydrit-Flatschen  
bis 26 cm Länge

STEINSALZ, weißlich bis hellgrau,  
Linien bei 12.80, 14.50, 18.95,  
20.45 und 21.30 m

STEINSALZ, eingelagertes Paket von  
Salz/Anhydrit-Wechselagerung, 12 cm

STEINSALZ, weißlich, weitgehend  
strukturlos

25.11 m



Teufe

0

5

10

15

20

25

Kompensinn (%)

RUD (%)

Kristallgröße

Grad der Verunreinigung

Überbohrversuch Kernmarsch



B2.1 - Ha

Versuchs- bezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Versuchs- datum	Bohrloch- tiefe (m) <sup>2)</sup>	Bohrkern- gewinn <sup>3)</sup>	Versuchs- qualität <sup>4)</sup>	E-Modul (GPa) <sup>5)</sup>
M4B1UB01	z3HA	25.04.95	10,70	ja	ausreichend	63,7
M4B1UB02	z3HA	26.04.95	13,71	ja	ausreichend	62,2
M4B1UB03	z3HA	26.04.95	16,70	ja	gut	62,8
M4B1UB04	z3HA	27.04.95	18,62	ja	gut	63,7
M4B1UB05	z3HA	27.04.95	20,58	ja	ausreichend	59,5
M4B1UB06	z3HA	28.04.95	22,47	ja	gut	61,7
M4B2UB01	z3HA	06.04.95	10,32	ja	ausreichend	53,4
M4B2UB02	z3HA	07.04.95	11,84	ja	gut	55,9
M4B2UB03	z3HA	10.04.95	13,33	ja	ausreichend	58,5
M4B2UB04	z3HA	10.04.95	14,81	ja	gut	60,7
M4B2UB05	z3HA	12.04.95	17,95	ja	gut	59,5
M4B2UB06	z3HA	12.04.95	20,85	ja	ausreichend	59,2
M4B2UB07	z3HA	13.04.95	23,86	ja	ausreichend	61,3
M4B2UB08	z3HA	18.04.95	26,87	ja	ausreichend	67,3
M4B2UB09	z3HA	19.04.95	32,85	ja	ausreichend	68,3
M4B3UB01	z3HA	16.01.95	10,68	nein	mangelhaft	-
M4B3UB02	z3HA	16.01.95	12,25	ja	ausreichend	(63,0)
M4B3UB03	z3HA	16.01.95	13,41	ja	ausreichend	(63,0)
M4B3UB04	z3HA	17.01.95	15,25	ja	ausreichend	(63,0)
M4B3UB05	z3HA	17.01.95	16,75	ja	ausreichend	(63,0)
M4B3UB06	z3HA	18.01.95	18,26	ja	ausreichend	(63,0)
M4B3UB07	z3HA	18.01.95	20,36	ja	gut	66,7
M4B3UB08	z3HA	19.01.95	21,33	ja	ausreichend	58,8
M4B3UB09	z3HA	19.01.95	23,24	ja	gut	63,5
M4B4UB01	z3LS	07.08.95	05,05	ja	ausreichend	32,5
M4B4UB02	z3LS	08.08.95	08,07	ja	ausreichend	29,9
M4B4UB03	z3LS	10.08.95	10,77	ja	ausreichend	(29,0)
M4B4UB04	z3LS	11.08.95	11,58	ja	gut	27,7
M4B4UB05	z3LS	11.08.95	12,63	ja	ausreichend	29,4
M4B4UB06	z3LS	14.08.95	14,11	ja	gut	27,4
M4B4UB07	z3LS	15.08.95	16,11	ja	gut	27,4
M4B4UB08	z3LS	15.08.95	17,11	ja	gut	32,7
M4B4UB09	z3LS	16.08.95	18,61	ja	gut	29,4
M4B4UB10	z3LS	17.08.95	20,11	ja	gut	29,3
M4B4UB11	z3LS	18.08.95	21,61	ja	gut	29,7
M4B4UB12	z3LS	18.08.95	23,11	ja	ausreichend	26,0
M4B4UB13	z3LS	21.08.95	24,11	ja	gut	27,1

<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M4B4UB13:

M = Morsleben

4 = Lokation 4

B4 = Bohrung 4 (interne Bezeichnung)

UB13 = Überbohrversuch Nr. 13

<sup>2)</sup> Tiefe des Pilotbohrlochmundes

<sup>3)</sup> Bohrkerngewinn ausreichend?:

ja: Kernlänge  $\geq$  37 cm

nein: Kernlänge  $<$  37 cm

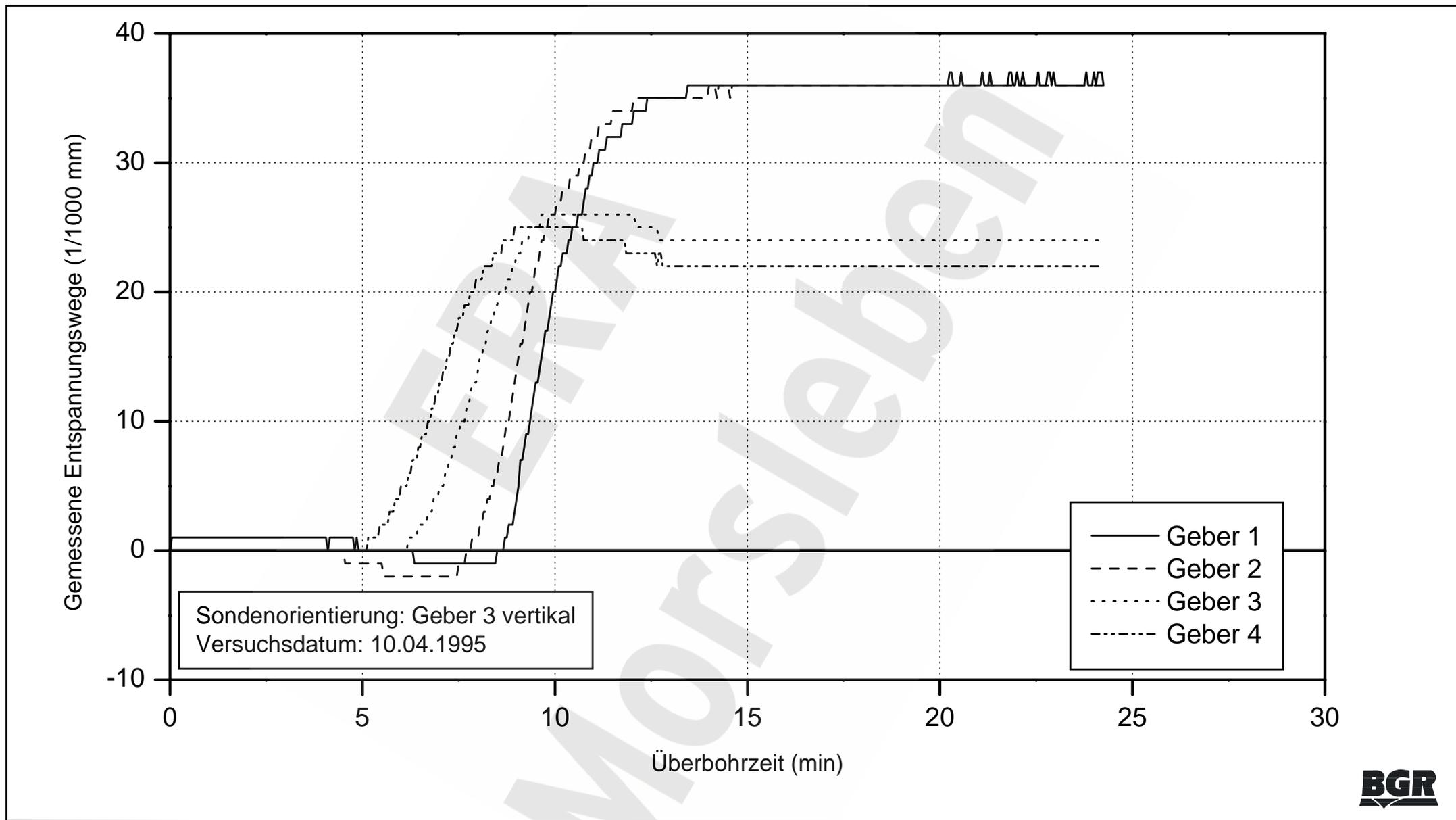
<sup>4)</sup> Kriterien nach Kap. 4.1.2

<sup>5)</sup> Für die Auswertung der Überbohrversuche  
ermittelter oder gewählter E-Modul  
(Werte in Klammern sind geschätzt)

**BGR**  
B2.6/B2.1 - Heu

Zusammenstellung der Überbohrversuchsdaten  
für Lokation 4 (Bohrbereich 3.04)

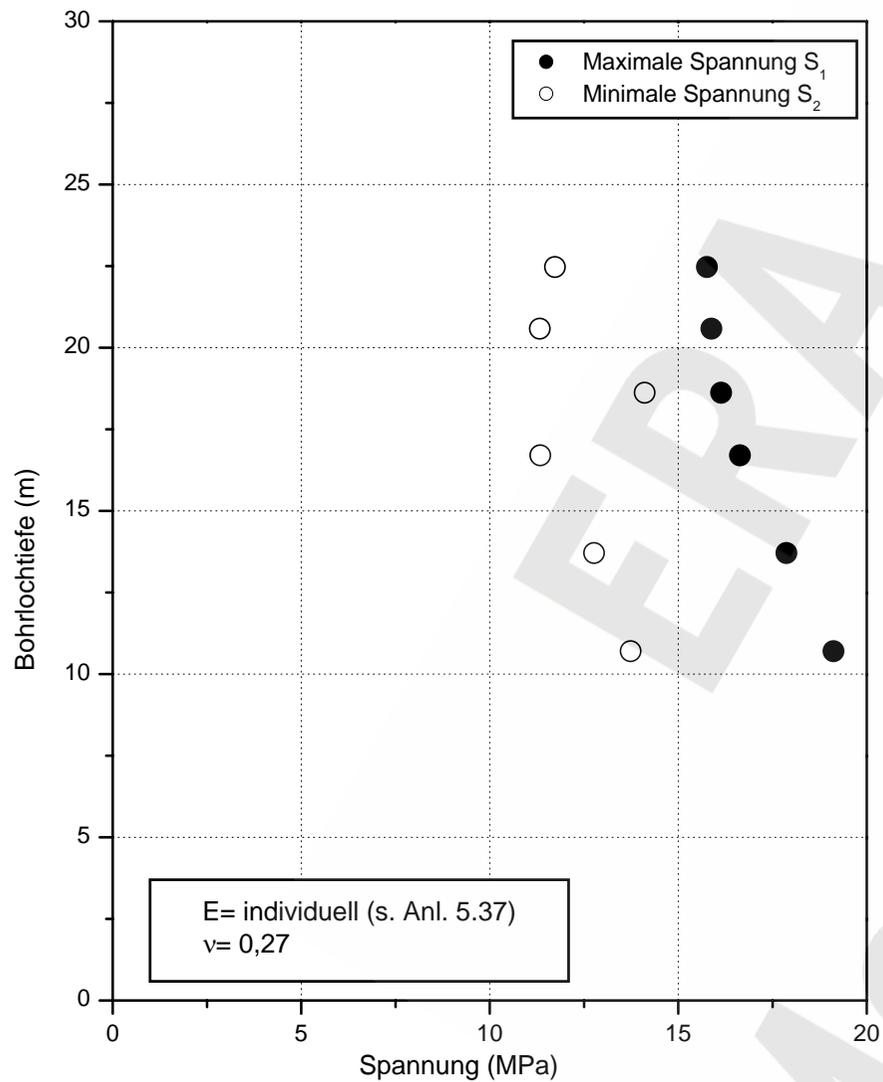
Anlage 5.54



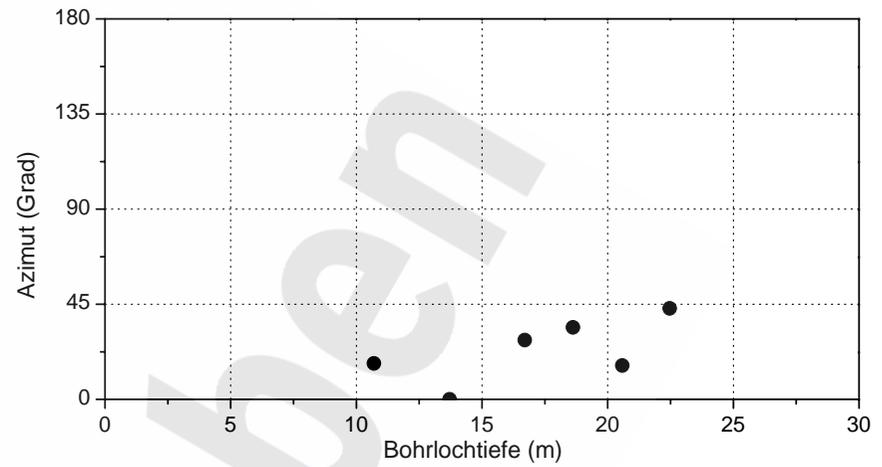
Exemplarische Darstellung von Messdaten aus einem Überbohrversuch in Lokation 4

Anlage 5.55

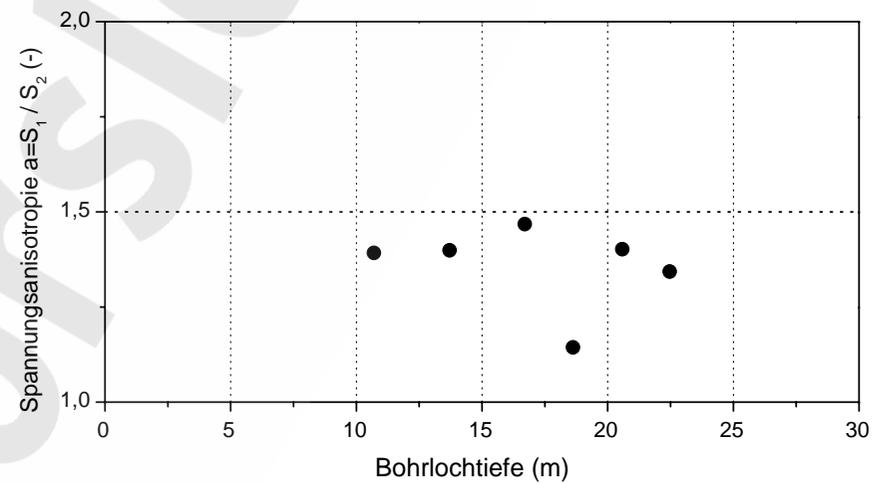




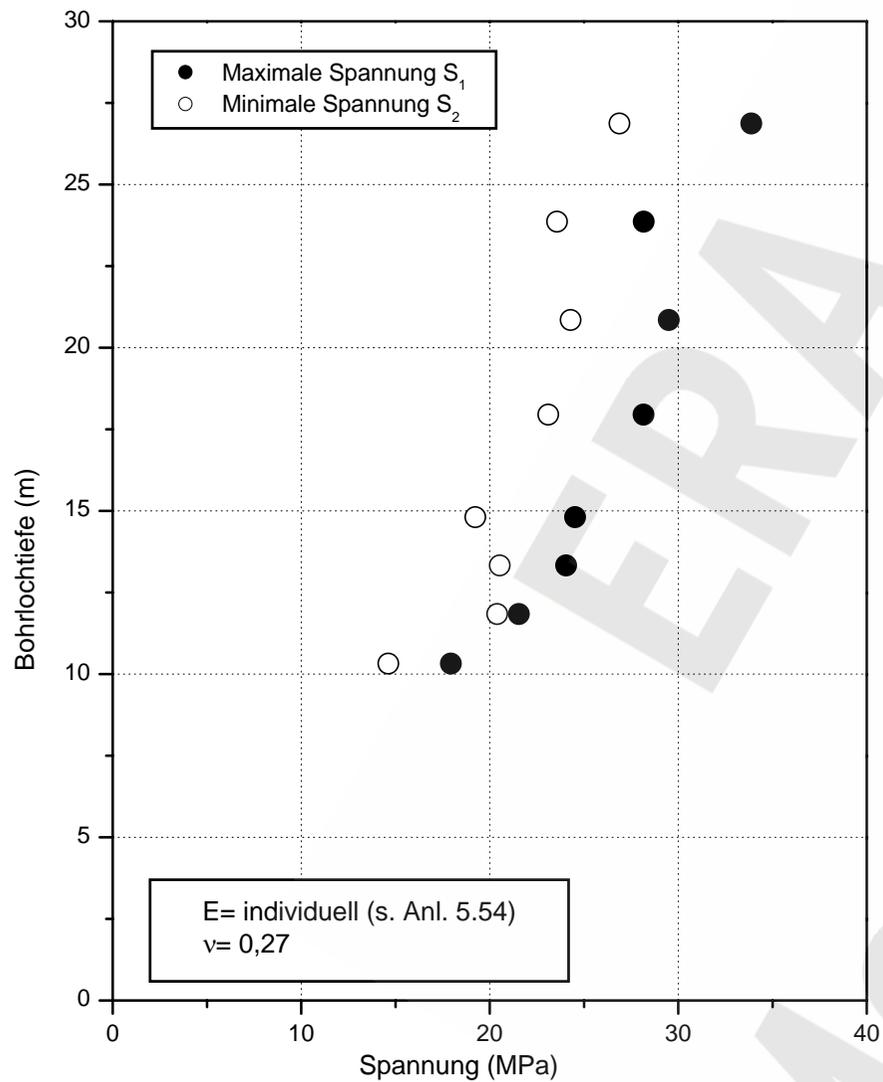
a) Spannungsbeträge



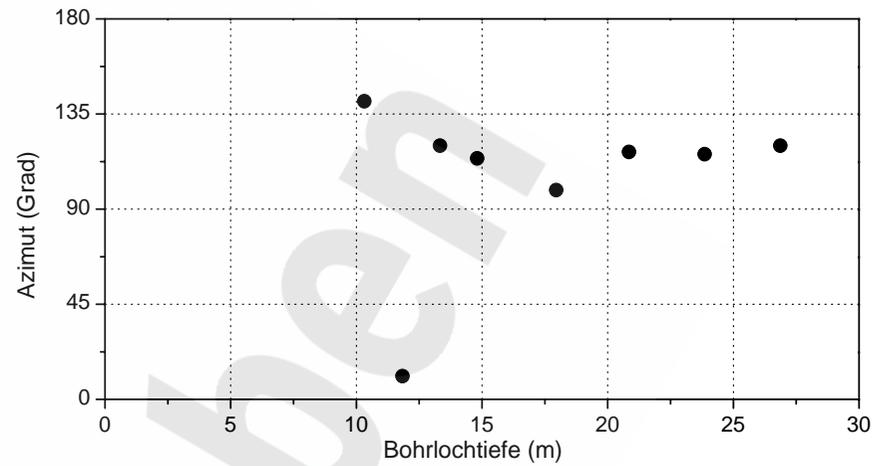
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$



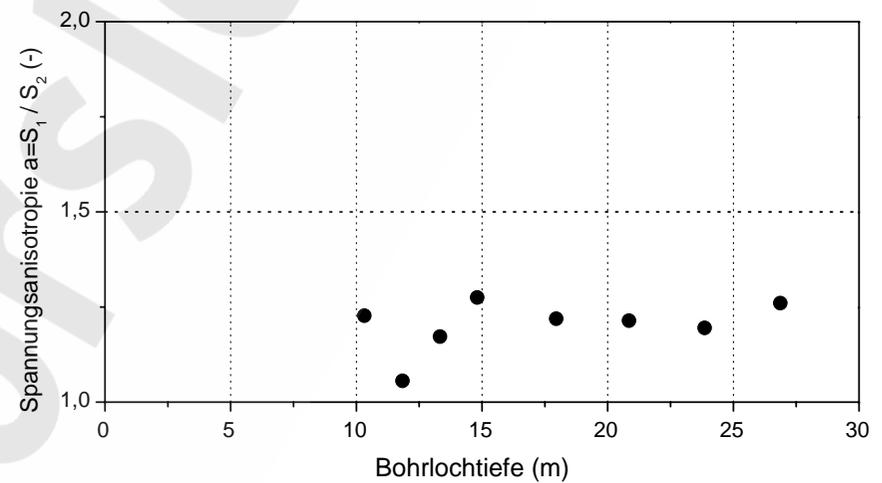
c) Grad der Spannungsanisotropie



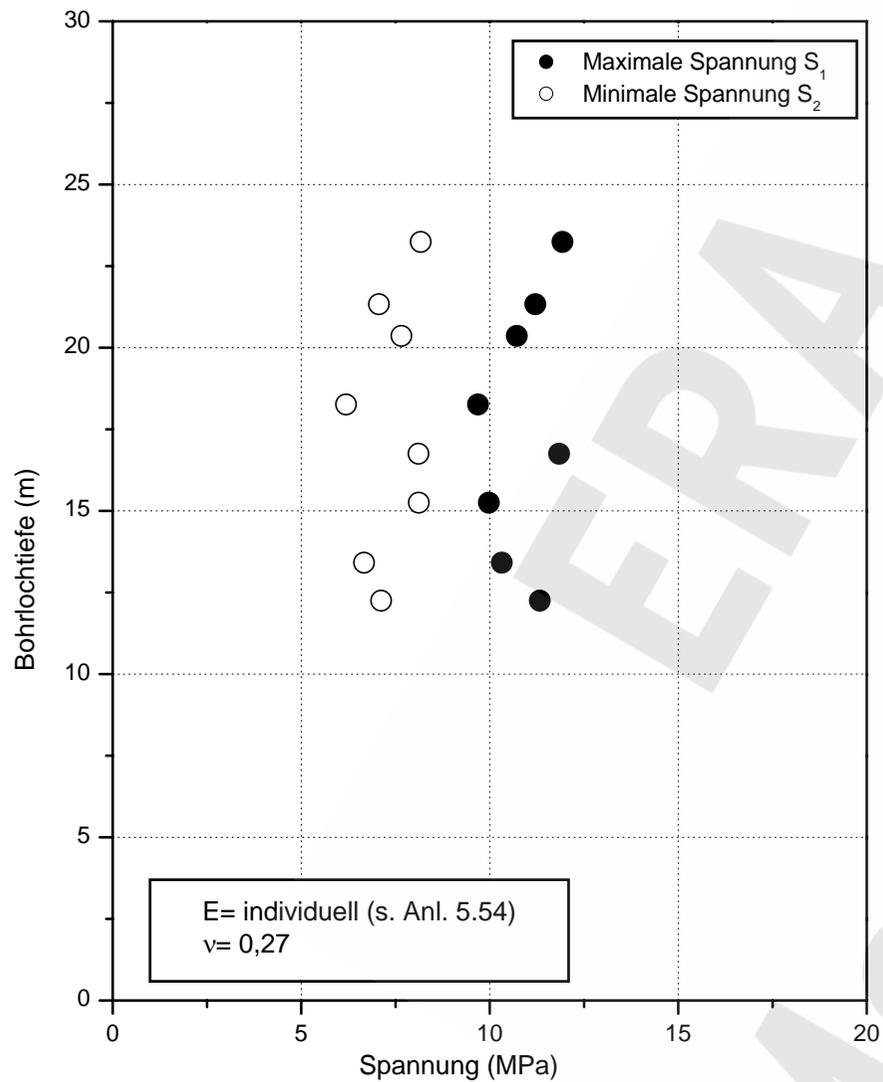
a) Spannungsbeträge



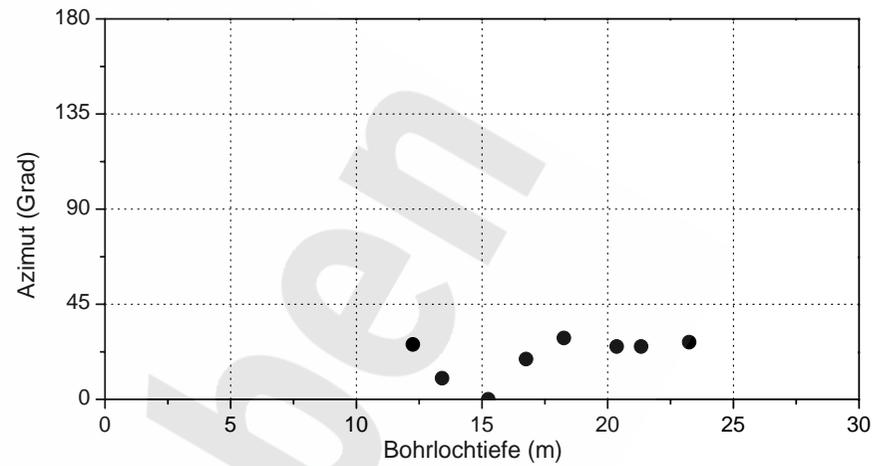
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$



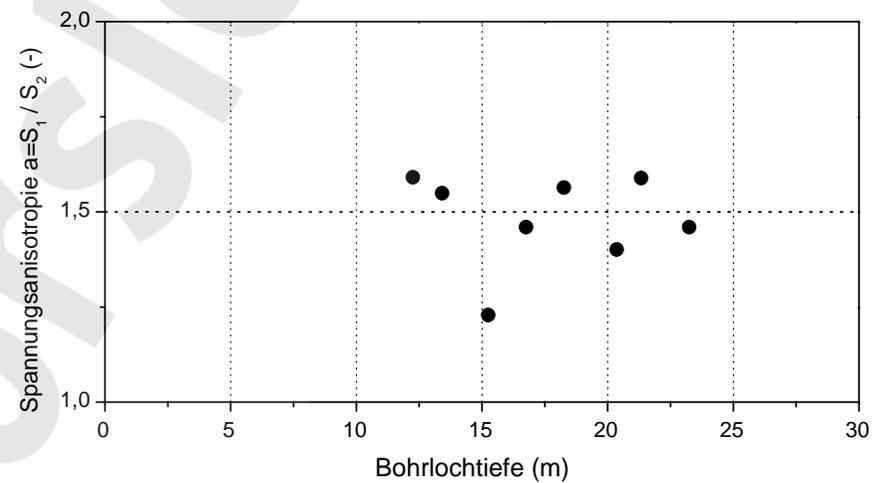
c) Grad der Spannungsanisotropie



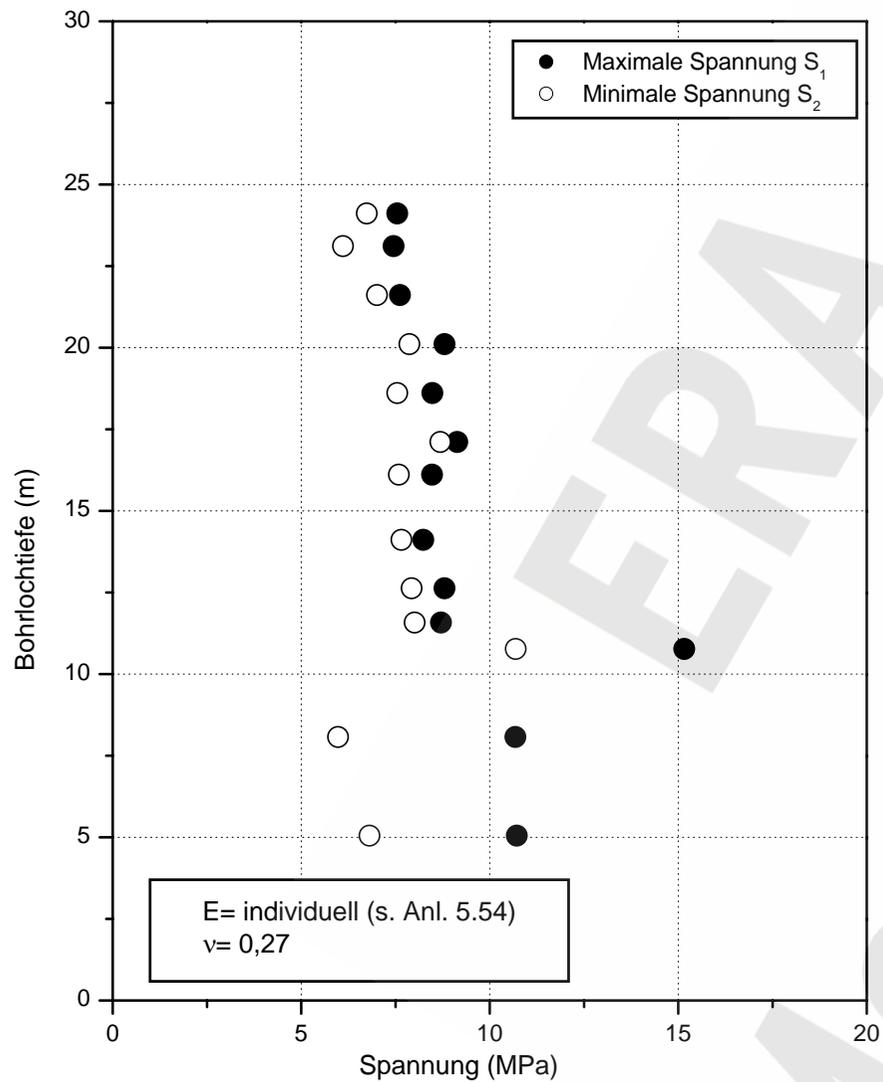
a) Spannungsbeträge



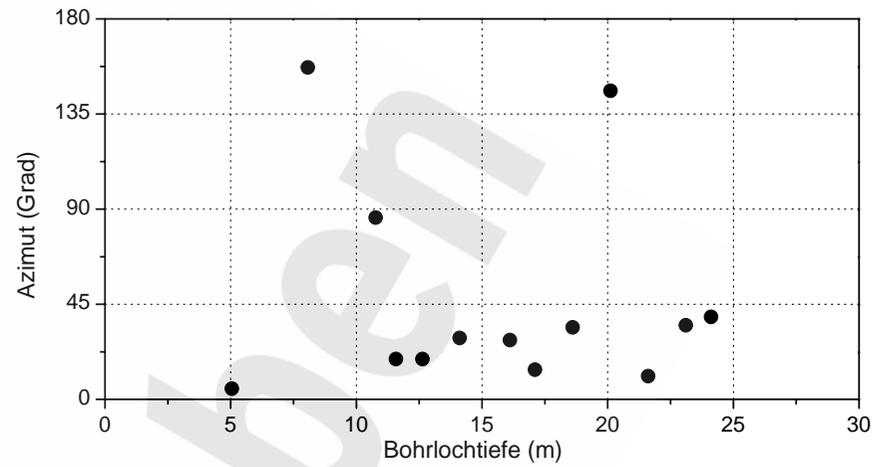
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$



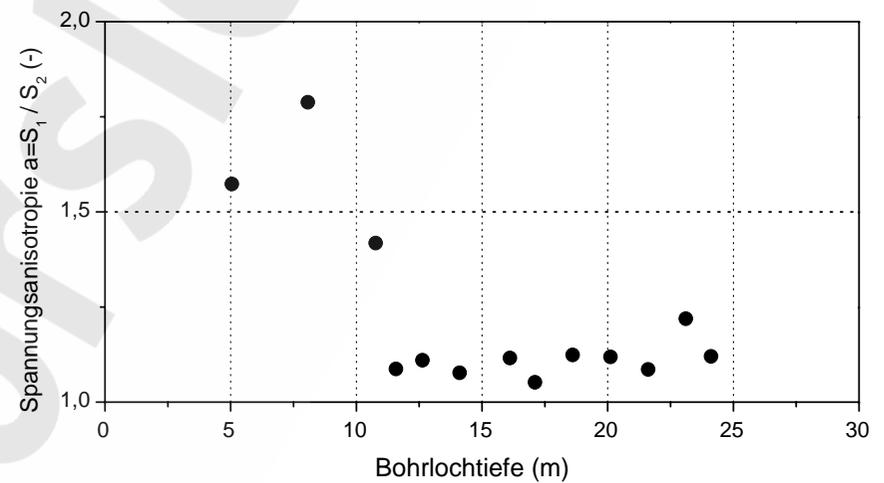
c) Grad der Spannungsanisotropie



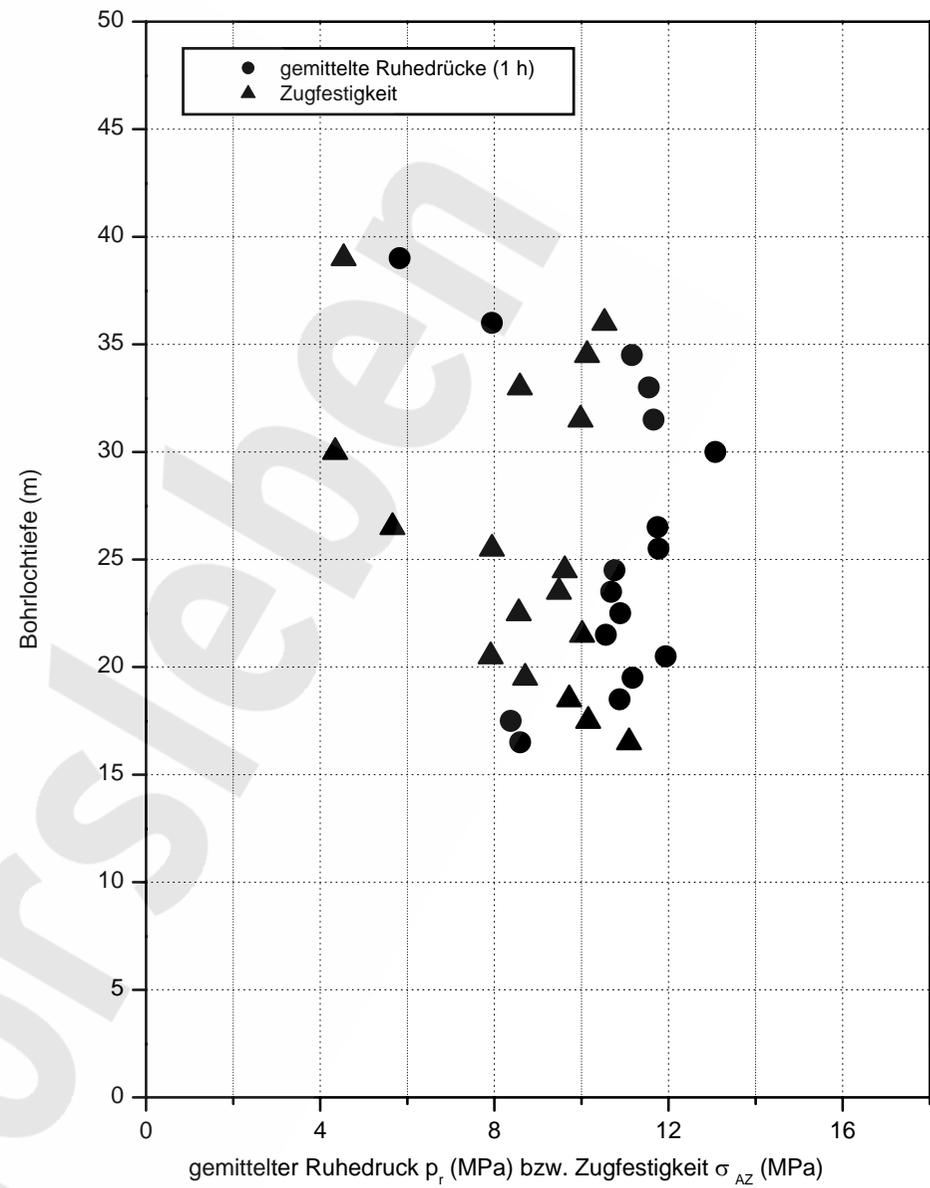
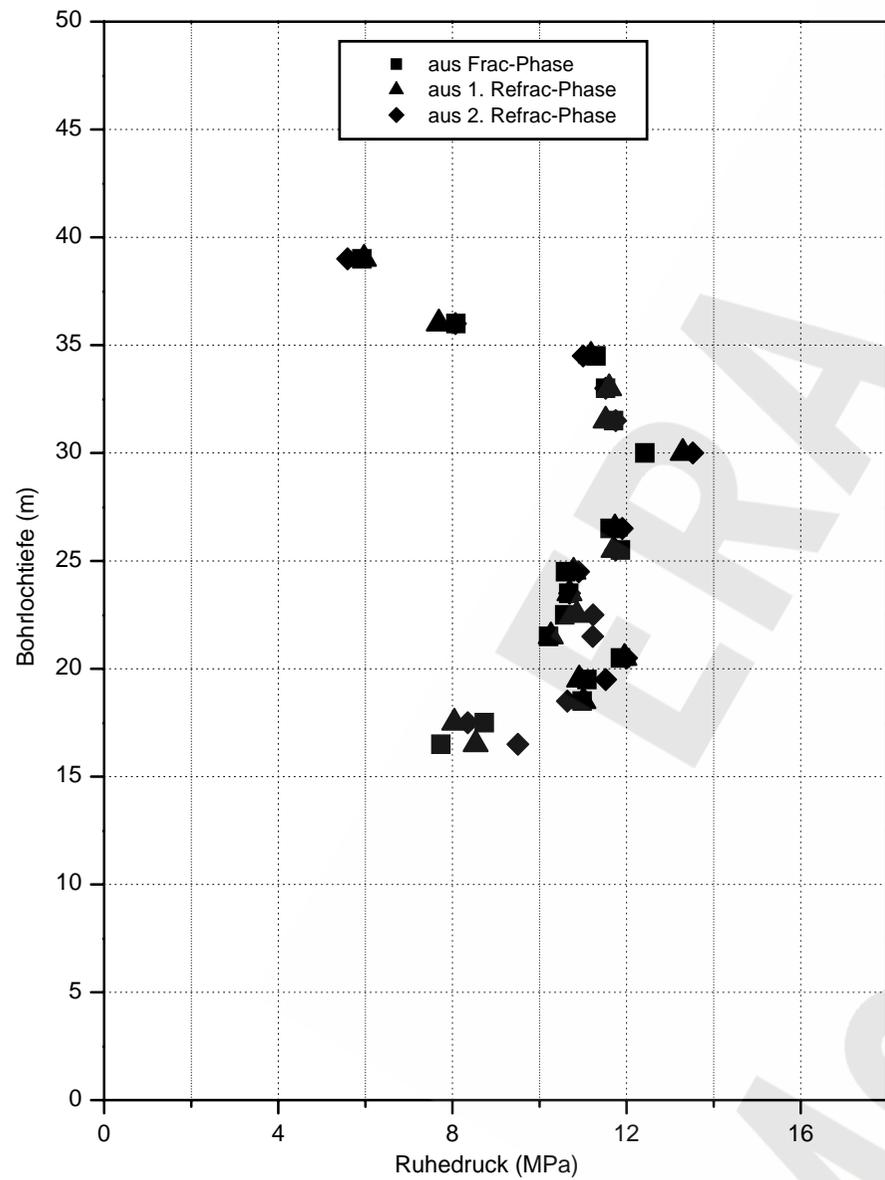
a) Spannungsbeträge

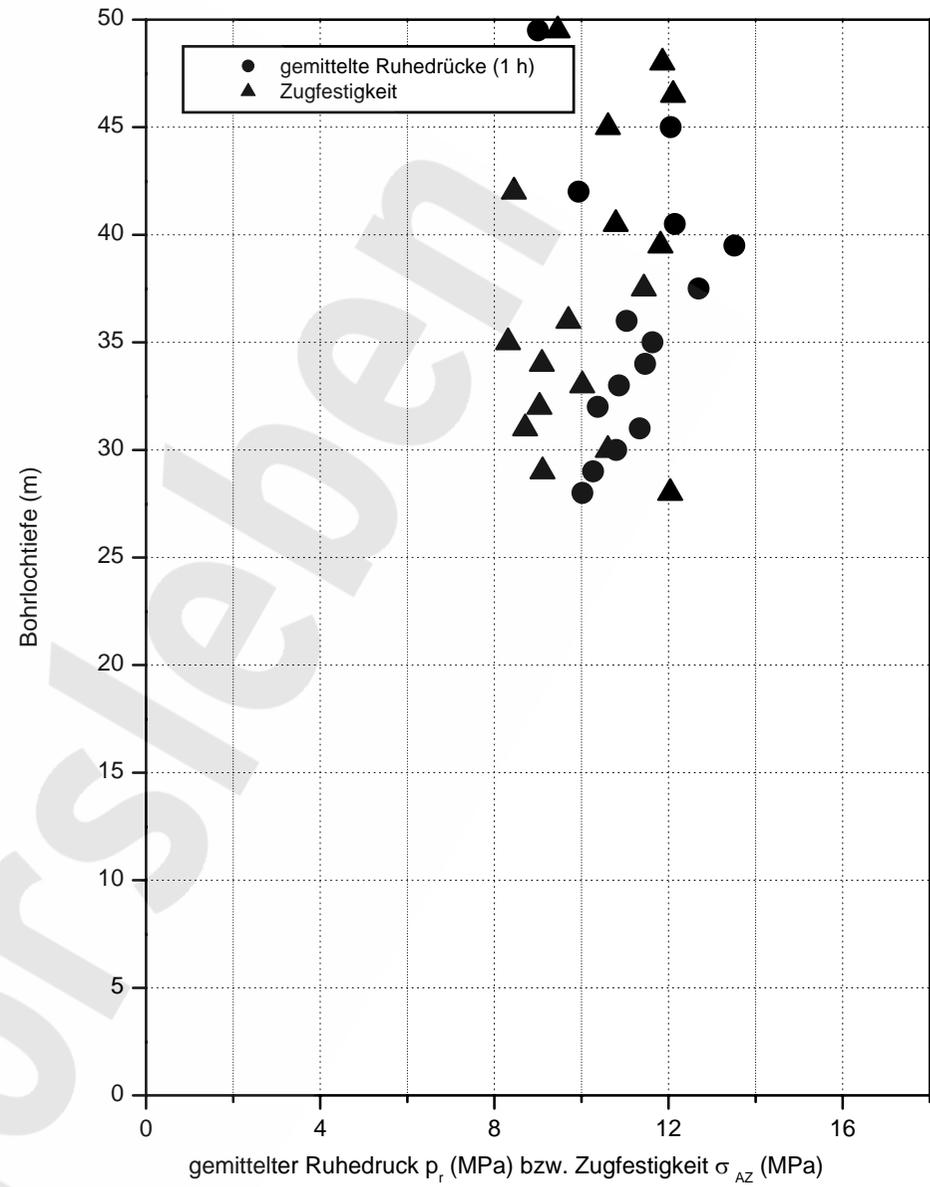
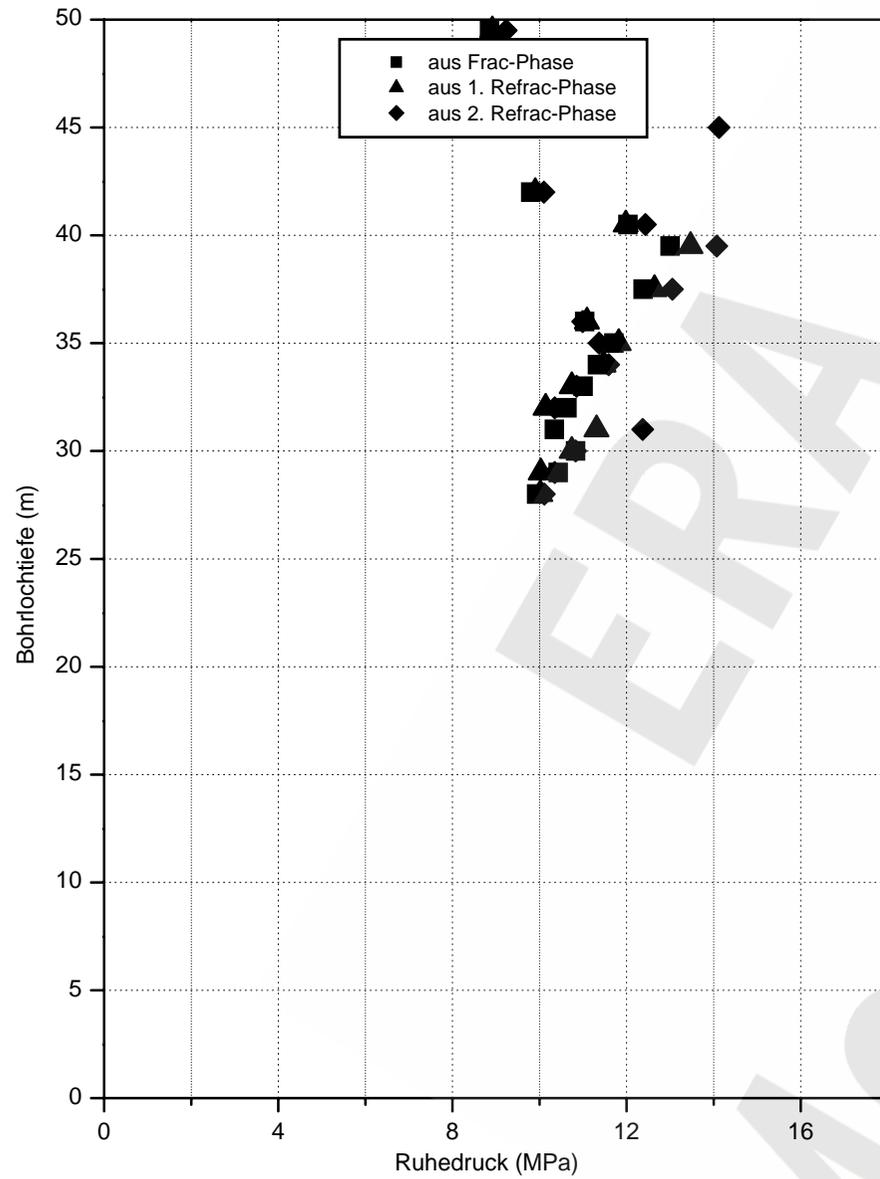


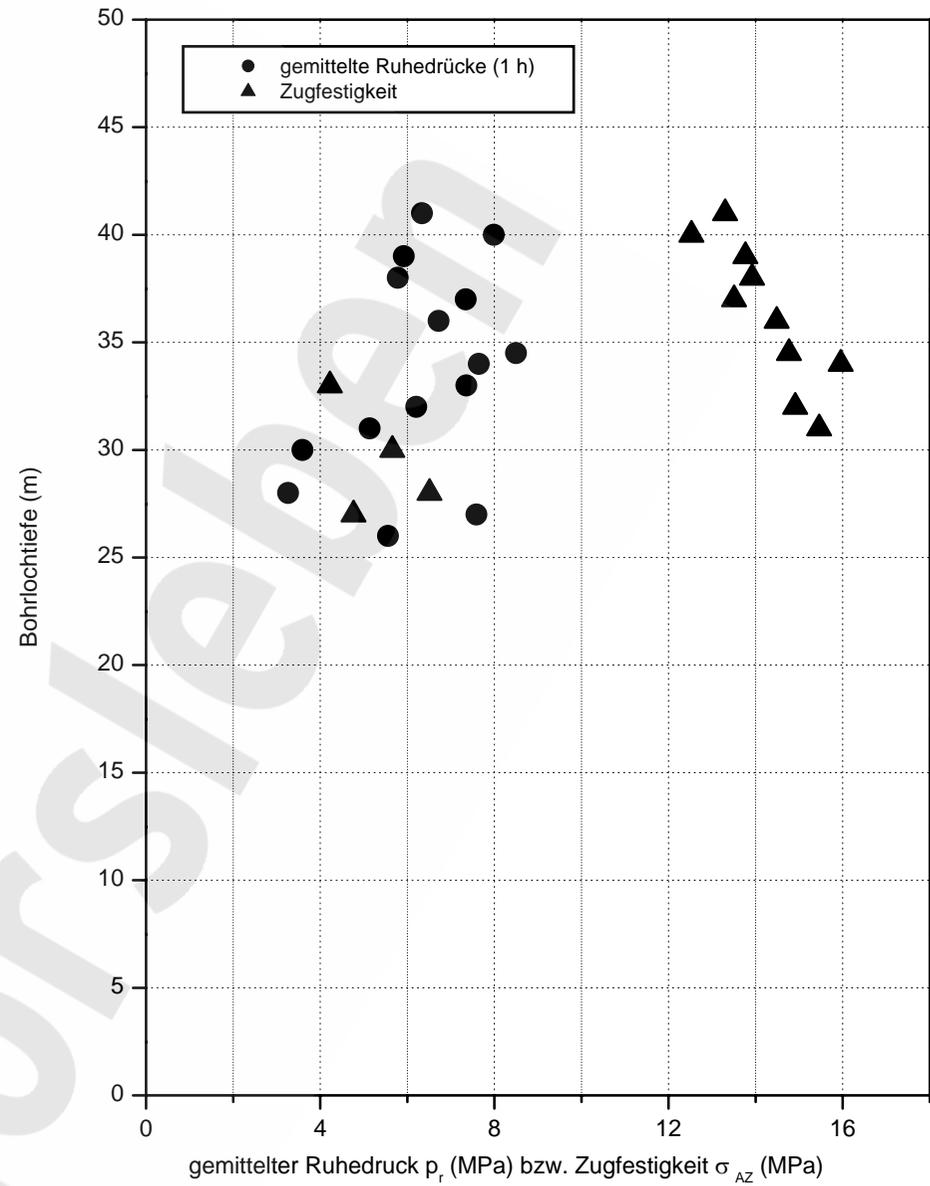
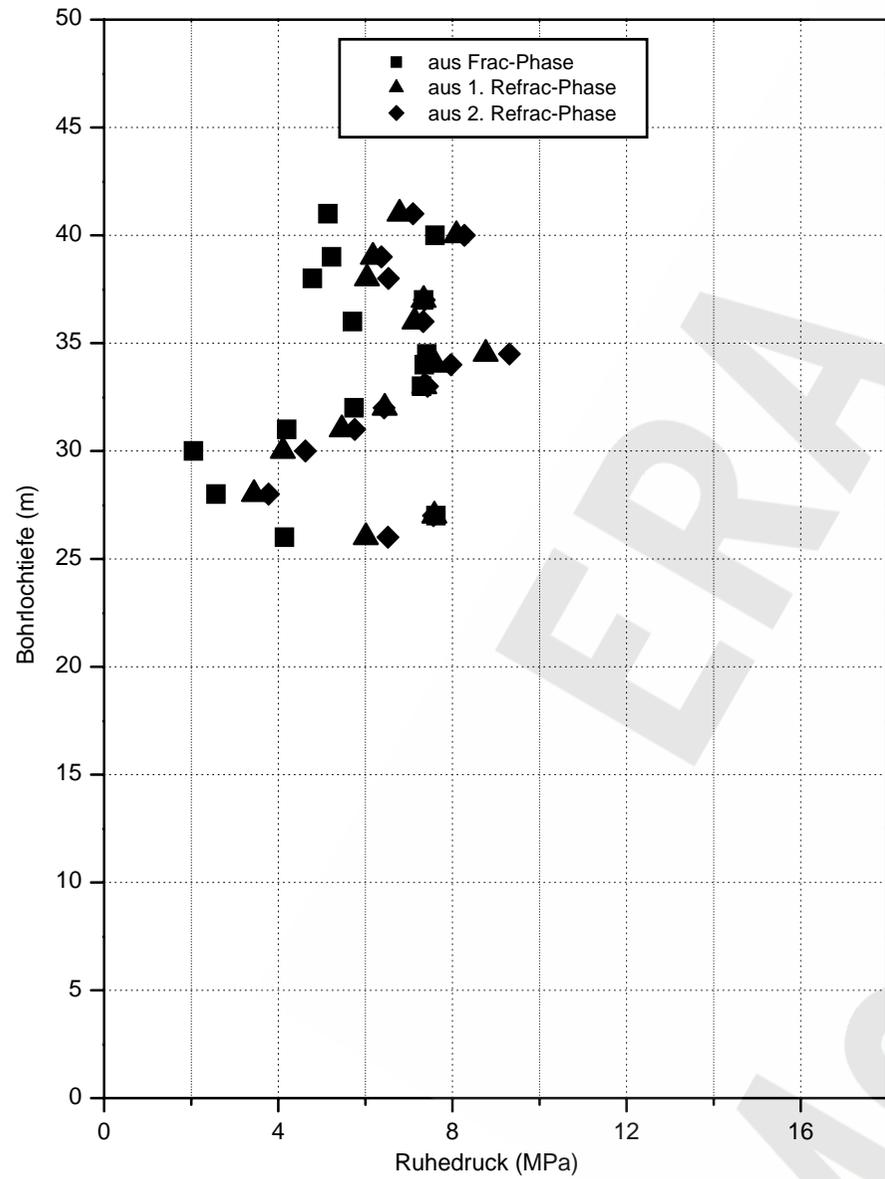
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$

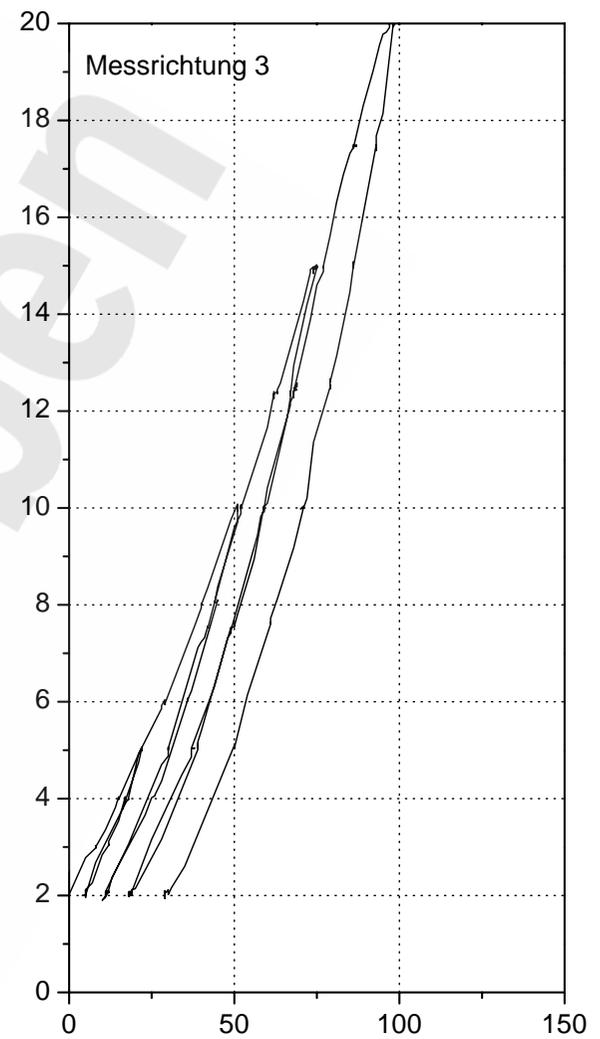
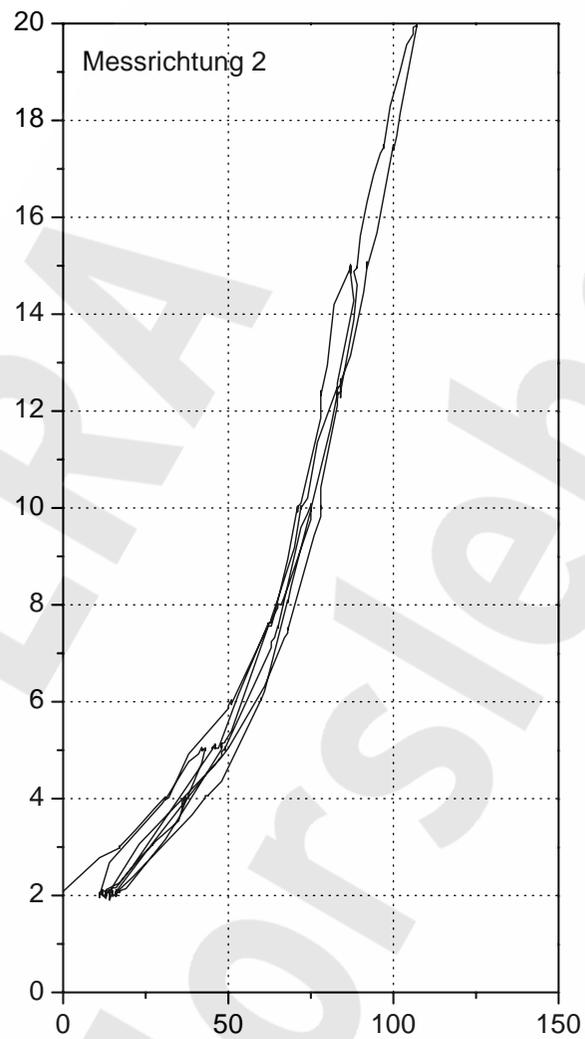
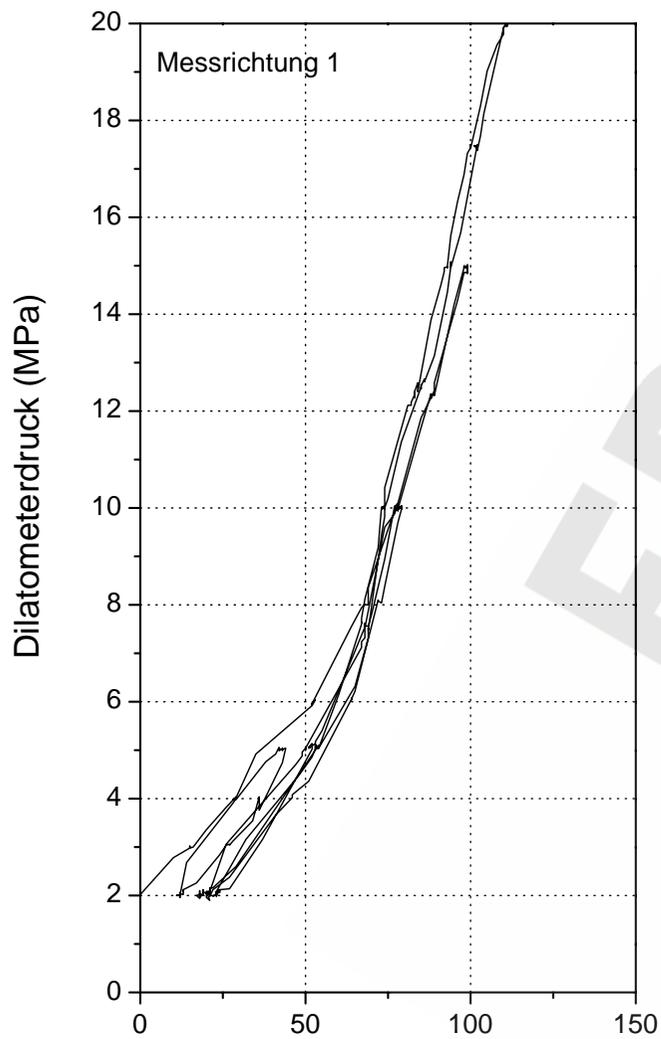


c) Grad der Spannungsanisotropie









Änderung des Bohrlochdurchmessers (1/1000 mm)



Versuchs- bezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Versuchs- datum	Versuchs- tiefe (m)	E-Modul (GPa) <sup>2)</sup>		Gemittelter E-Modul (GPa)	Bemerkungen
				Entlastung von – bis (MPa)			
				15 - 2	20 - 2		
M4B2DI01	z3HA	11.04.95	16,83	31,1	35,2	33,2	nur manuelle Datenerfassung
M4B3DI01	z3HA	22.03.95	27,96	24,1	28,6	26,4	
M4B3DI02	z3HA	22.03.95	27,26	20,5	22,1	21,3	
M4B3DI03	z3HA	23.03.95	26,56	25,5	28,8	27,1	Meßrichtung 1 defekt
M4B3DI04	z3HA	23.03.95	25,86	26,4	-	26,4	Meßricht. 1 defekt, Versuch abgebrochen
M4B3DI05	z3HA	24.03.95	25,86	27,1	25,5	26,3	Meßrichtung 1 defekt
M4B4DI01	z3LS	09.08.95	09,33	26,4 <sup>3)</sup>	24,0 <sup>4)</sup>	25,2	

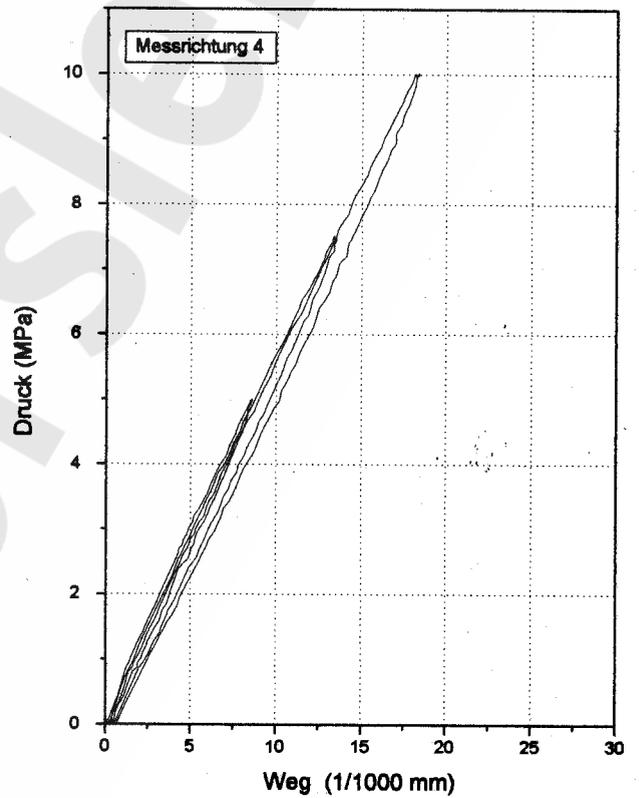
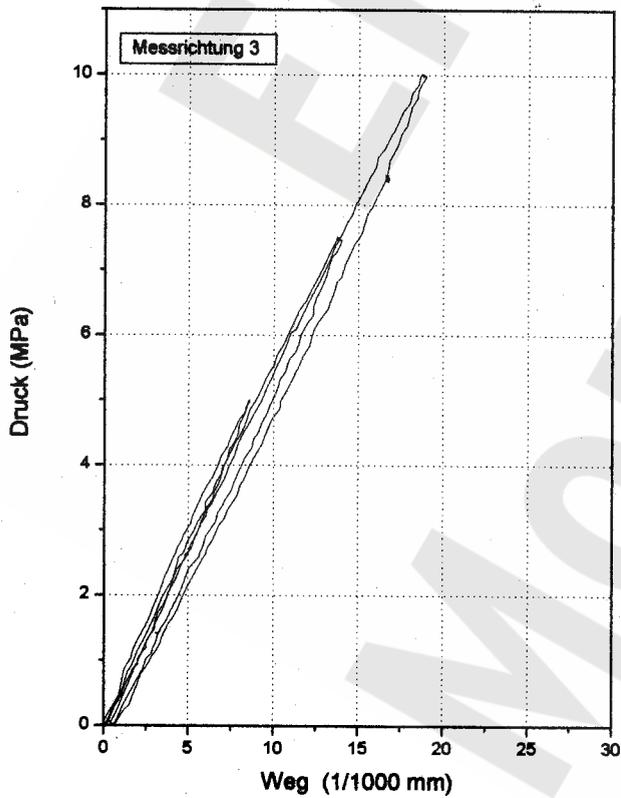
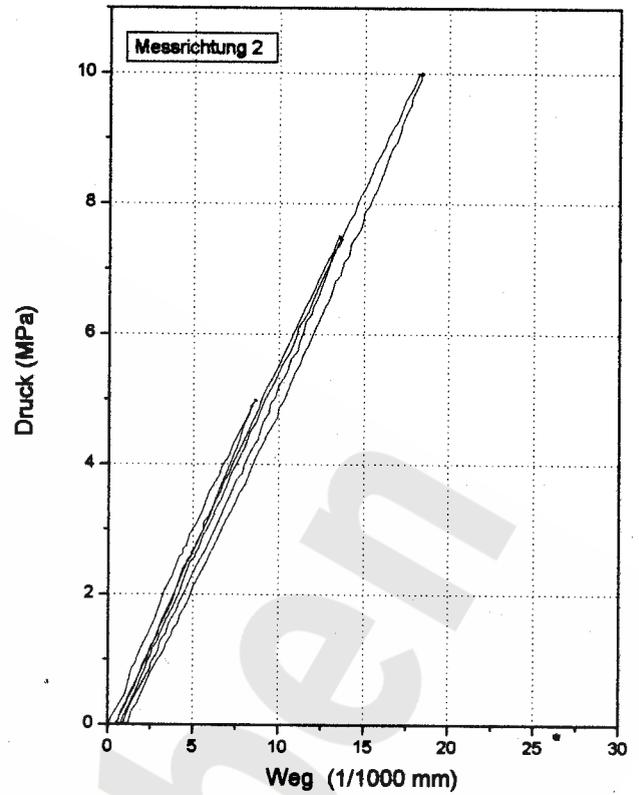
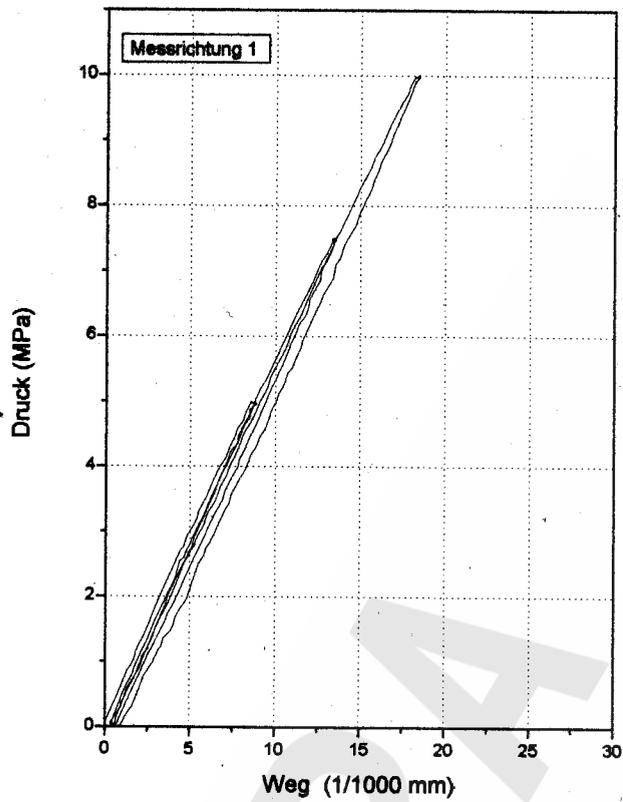
<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M4B4I01:  
M = Morsleben  
4 = Lokation 4  
B4 = Bohrung 4 (interne Bezeichnung)  
DI01 = Dilatometerversuch Nr. 01

<sup>2)</sup> ermittelt aus Sekante durch die Drittelpunkte des Entlastungsastes

<sup>3)</sup> Entlastung von 10 auf 2 MPa

<sup>4)</sup> Entlastung von 15 auf 2 MPa

Gesamtmittel Bohrung B3: 25,5 GPa



Projekt : MORSLEBEN LOKATION 4  
 Versuchsbezeichnung : M4B1UB03  
 Material : ANHYDRIT  
 Belastung : 5/ 7,5/ 10 MPa  
 Versuchsdatum : 21.09.95 14.45'

**BGR**  
 B2.6/B2.1-08/00-Heu/KU

Anlage 5.65

Last-Deformationsdiagramme für Prüfkörper aus Überbohrversuch M4B1UB03

Kernbezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Entnahmetiefe (m)	E-Modul (GPa)			Mittelwert (GPa)
			bei Entlastung von (MPa)			
			5	7,5	10	
M4B1UB01	z3HA	10,70 - 11,22	65,5	63,6	62,1	63,7
M4B1UB02	z3HA	13,68 - 14,18	64,2	61,7	60,6	62,2
M4B1UB03	z3HA	16,70 - 17,50	64,9	62,0	61,4	62,8
M4B1UB04	z3HA	18,62 - 19,12	65,5	63,6	62,1	63,7
M4B1UB05	z3HA	20,57 - 21,07	61,2	59,2	58,1	59,5
M4B1UB06	z3HA	22,47 - 23,33	63,7	61,9	59,4	61,7
M4B2UB01	z3HA	10,32 - 10,87	54,9	52,9	52,5	53,4
M4B2UB02	z3HA	11,84 - 12,31	57,8	55,5	54,3	55,9
M4B2UB03	z3HA	13,33 - 14,36	61,2	57,7	56,7	58,5
M4B2UB04	z3HA	14,81 - 15,32	62,2	60,2	59,8	60,7
M4B2UB05	z3HA	17,95 - 18,45	62,5	59,2	56,9	59,5
M4B2UB06	z3HA	20,85 - 21,37	61,7	58,4	57,6	59,2
M4B2UB07	z3HA	23,86 - 24,36	62,9	60,1	60,9	61,3
M4B2UB08	z3HA	26,87 - 27,40	69,1	67,4	65,4	67,3
M4B2UB09	z3HA	32,85 - 33,46	71,5	67,6	65,9	68,3
M4B3UB02	z3HA	12,25 - 13,24	45,6	46,0	48,9	46,8 <sup>2)</sup>
M4B3UB03	z3HA	13,59 - 14,23	41,0	35,7	35,2	37,3 <sup>2)</sup>
M4B3HZ01	z3HA	19,76 - 20,24	80,4	80,2	76,6	79,1
M4B3UB07	z3HA	20,36 - 20,88	59,1	69,4	71,6	66,7
M4B3UB08	z3HA	21,33 - 21,83	57,7	58,5	60,1	58,8
M4B3UB09	z3Ha	23,24 - 23,76	63,7	62,9	64,0	63,5
M4B4UB01	z3LS	5,05 - 5,51	34,5	31,3	31,7	32,5
M4B4UB02	z3LS	8,07 - 8,41	32,8	28,9	28,0	29,9
M4B4UB04	z3LS	11,58 - 12,59	31,6	26,2	25,3	27,7
M4B4UB05	z3LS	12,63 - 13,23	32,0	28,4	27,7	29,4
M4B4UB06	z3LS	14,11 - 14,71	29,5	26,5	26,2	27,4
M4B4UB07	z3LS	16,11 - 16,55	29,9	25,3	26,9	27,4
M4B4UB08	z3LS	17,11 - 17,59	35,4	31,0	31,8	32,7
M4B4UB09	z3LS	18,61 - 19,21	32,5	28,3	27,6	29,4
M4B4UB10	z3LS	20,11 - 21,08	29,8	26,4	31,8	29,3
M4B4UB11	z3LS	21,61 - 22,20	31,5	28,4	29,1	29,7
M4B4UB12	z3LS	23,11 - 23,61	28,2	24,4	25,4	26,0
M4B4UB13	z3LS	24,11 - 25,04	28,0	27,2	26,1	27,1

<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M4B3UB09:

M = Morsleben  
4 = Lokation 4  
B3 = Bohrung 3 (interne Bezeichnung)  
UB09 = Hohlkern aus Überbohrversuch Nr. 09

Gesamtmittel Bohrung B1 (z3HA): 62,3 GPa  
Gesamtmittel Bohrung B2 (z3HA): 60,5 GPa  
Mittel Bohrung B3 (z3HA)  
(nur Versuche UB07 bis UB09): 63,0 GPa  
Gesamtmittel Bohrung B4 (z3LS): 29,0 GPa

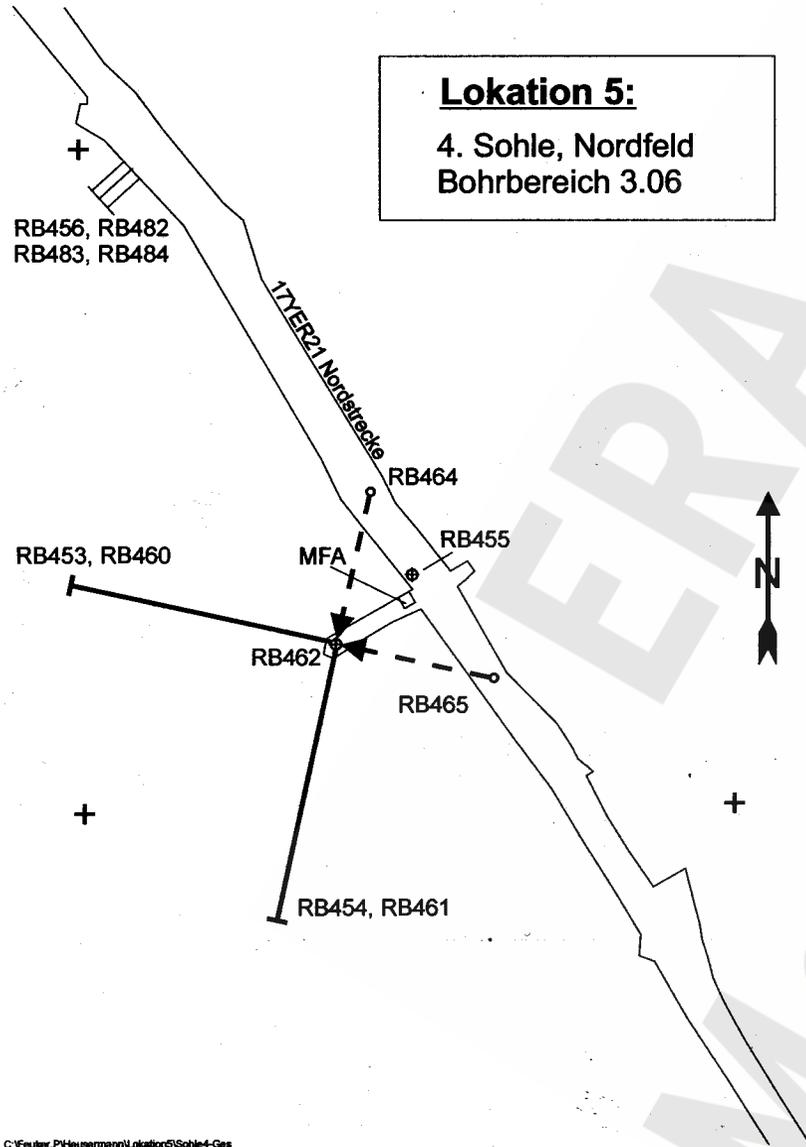
<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M4B3HZ01:

M = Morsleben  
4 = Lokation 4  
B3 = Bohrung 3 (interne Bezeichnung)  
HZ01 = Hohlkern mit lfd. Nr., der nicht  
direkt aus einem Überbohrversuch stammt

<sup>2)</sup> Prüfkörper weist bereits vor Versuchsbeginn deutliche Risse auf.

### Lokation 5:

#### 4. Sohle, Nordfeld Bohrbereich 3.06



Bo-Nr.	gepl. Länge [m]	Länge [m]	Durch- messer [mm]	Richtung [gon]	Neigung [gon]	Untersuchungs- methoden	Einbau- tiefe [m]
RB 453	40	40	46 x	315	+5,5	HY	-
RB 454	40	40,4	46 x	215	+5,5	HY	-
RB 455	20	22,6	46 x	vert.	-100	HY	-
RB 456	7	7	180 x	255	0	Führungsbo. SE	-
RB 482	7	7	180 x	255	0	Führungsbo. SE	-
RB 483	7	7	46	255	0	Meßbohrung SE	-
RB 484	7	7	46	255	0	Meßbohrung SE	-
RB 460	40	40	46/86/148	315	-5,5	ÜB/Di/LSP	26
RB 461	40	40,1	46/86/148	215	-5,5	ÜB/Di/LSP	38,5
RB 462	25	24,8	46/86/148	vert.	-100	ÜB/Di/LSP	23,5
RB 464	33	28,3	148 x	215	-50	LSP	27
RB 465	33	28,3	148 x	315	-50	LSP	27

X = Vollbohrung

Bo 460: bei 28,75 m Anhydrit angetroffen,  
deshalb LSP-Stationen auf 26 m verkürzt!  
Bo 463 entfällt!

ÜB = Überbohrversuche  
Di = Dilatometermessungen  
HY = Hydrofrac-Versuche  
SE = Schlizentlastungsversuch  
LSP = Langzeitspannungsmessungen mit Monitorstationen

C:\Feuter\_P\Heusermann\Lokation5\Sohle4-Ges

**BGR**  
B2.6/B2.1 – Heu/Fe

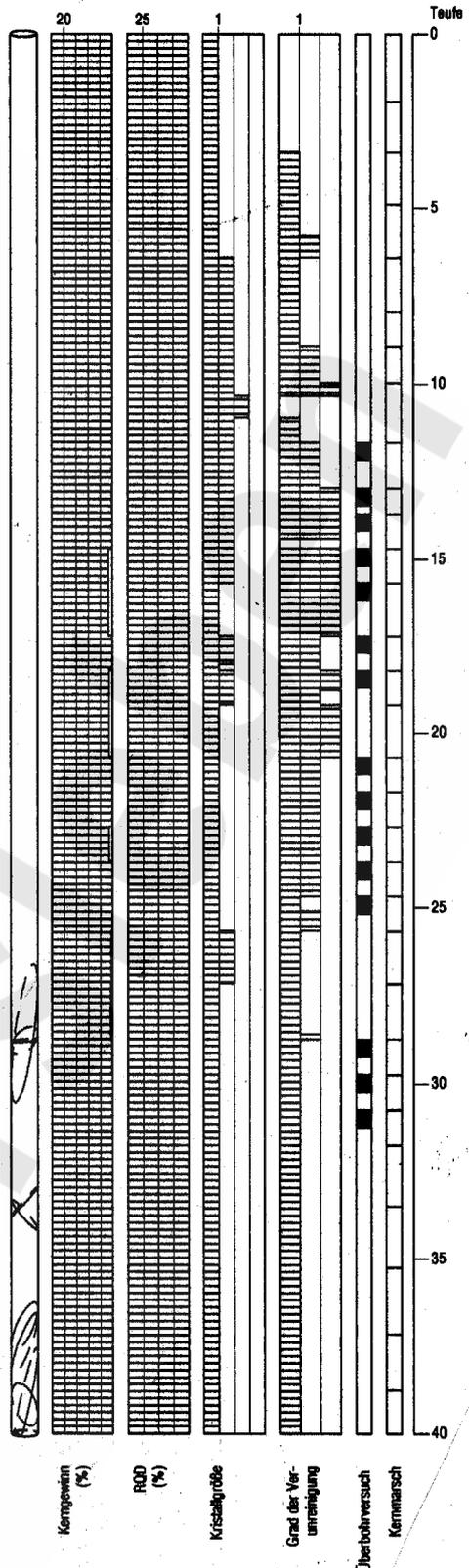
Anordnung der Spannungsmessbohrungen in Lokation 5 (Bohrbereich 3.06)

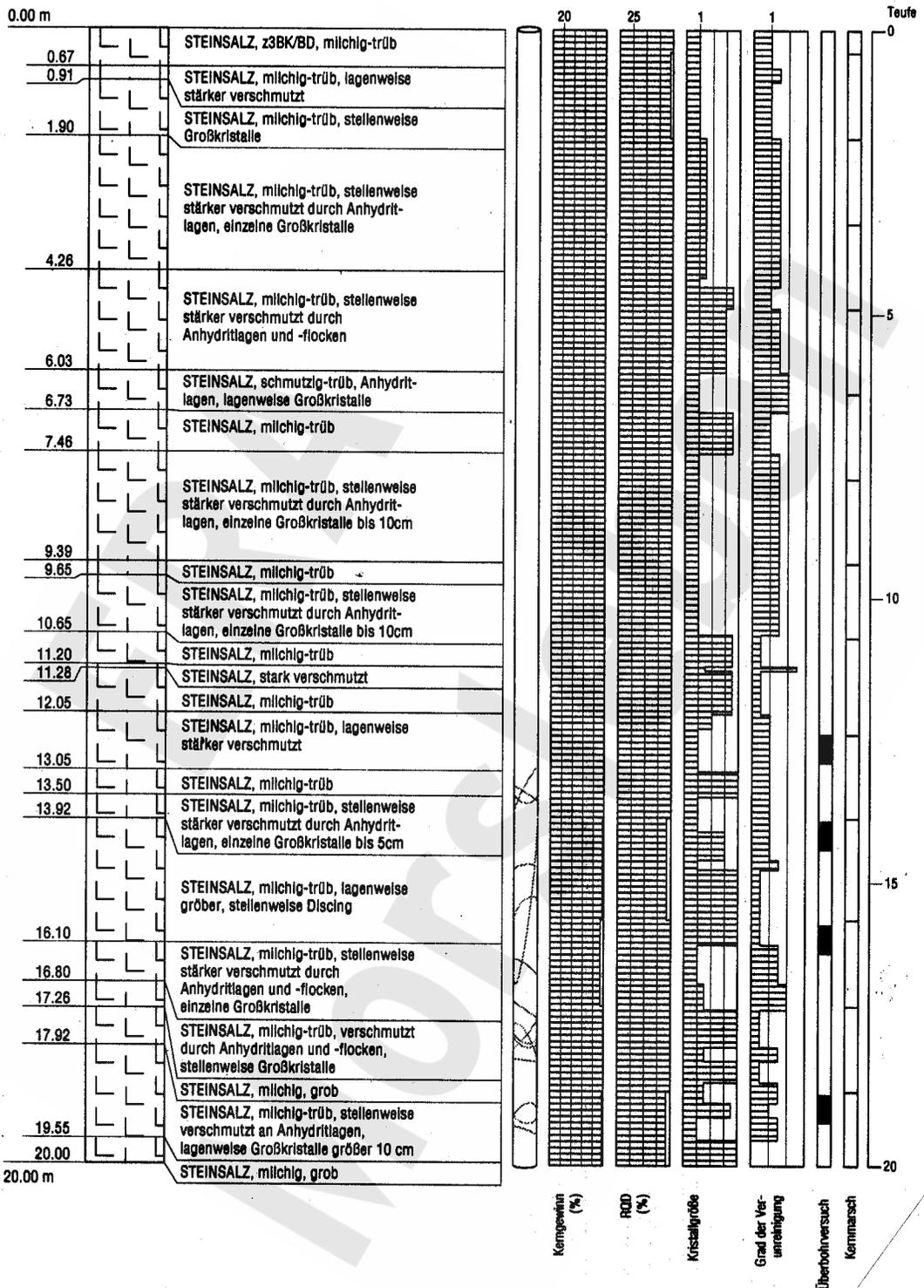
Anlage 5.67

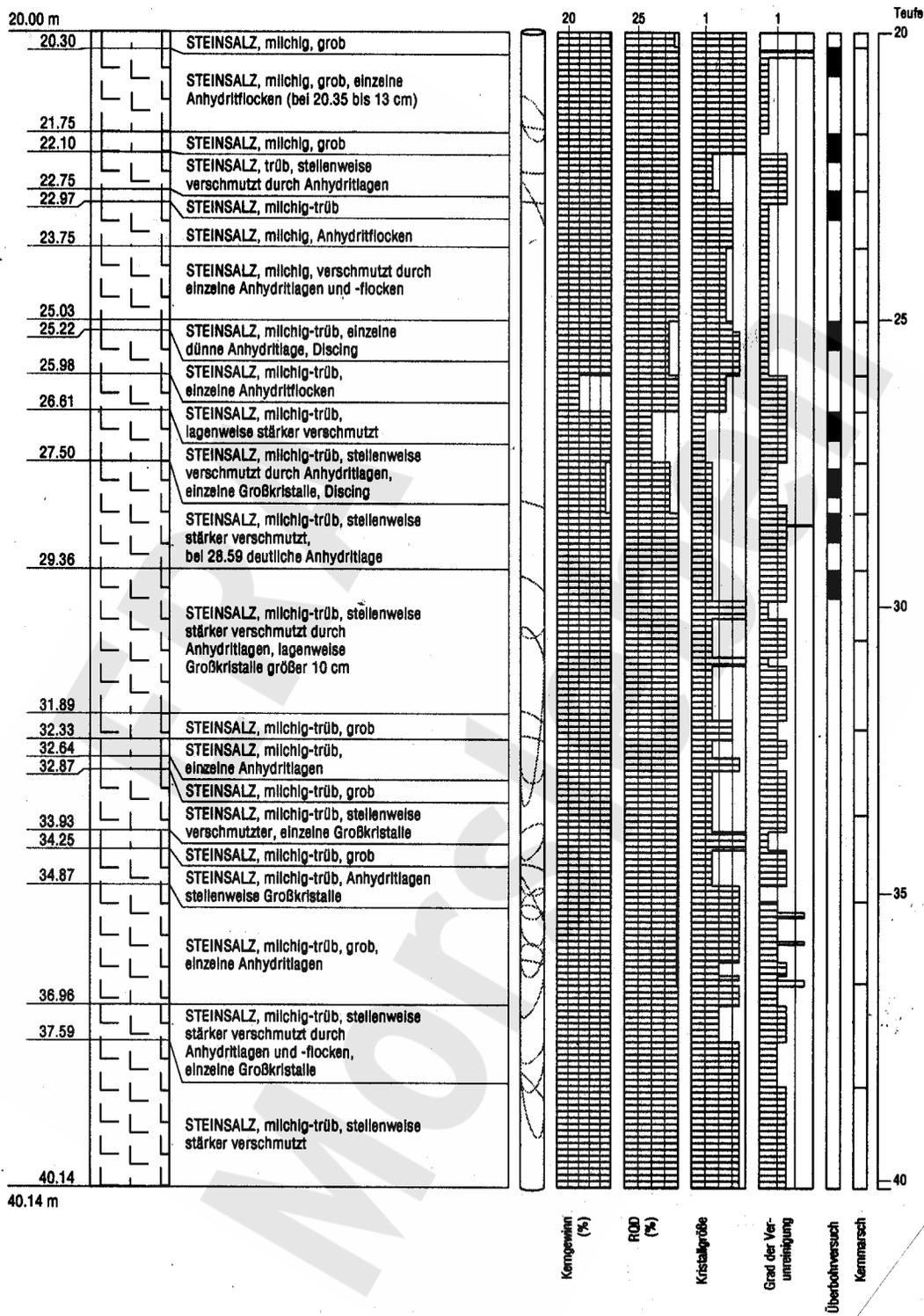
0.00 m

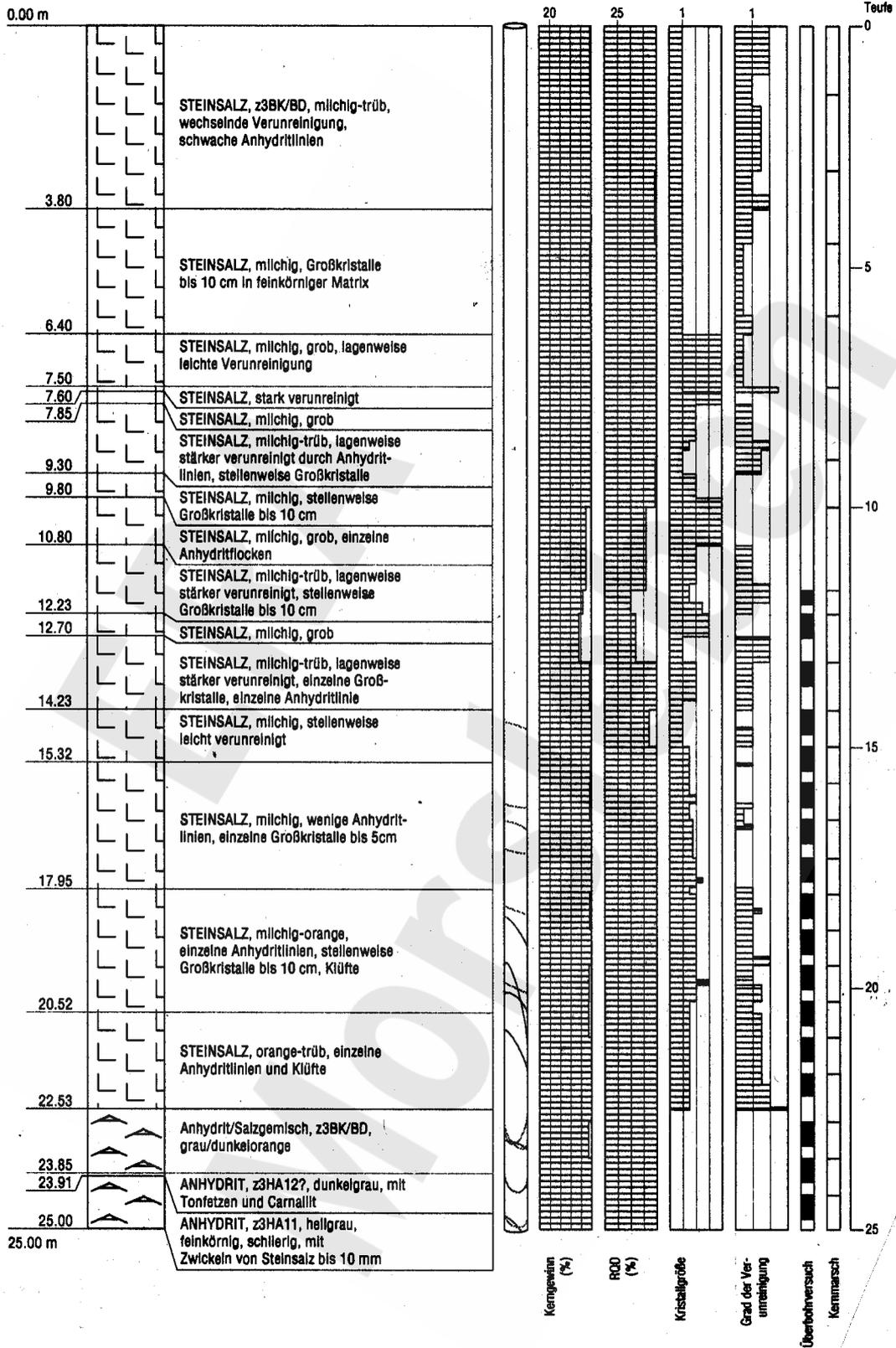
		Steinsalz, z3BK/BD, hellorange, weitgeh. rein, ab 3,4 m leicht wolkg.
2.89	2.96	7cm Anhydritband, grau feinkörnig 15 Grad Einfallen
		farblos, durch Anhydrit grau gefärbt
10.35		
13.20		Wechsel zwischen sauberen und verunreinigten Partien. Einzelne Anhydritbänder bis 2cm
		2 cm Anhydritband
16.50		
17.20		1-10 mm Anhydritband
17.90		2 mm Anhydritband
		2-5 mm Anhydritband
24.58		
25.45		welliges mm Anhydritband
25.83		mm Anhydritband
		cm Anhydritband, Schichtung Salz 45 Grad Fallen zur Bohrachse
28.55		
28.65	28.70	10 cm Anhydritband Salz bereichsweise leicht orange
		Anhydrit, z3HA11 grau, dicht, feinkörnig
33.57		
34.55		bis 4 cm breites dkgraues Tonband
35.35		vereinzelte cm Tonbutzen
35.42		3-7 cm Steinsalz, Kluffüllung
36.05		Anhydrit
36.26		20 cm breites Band aus grobkrist. Salz randlich 1mm Ton und bis 5mm roter Carnallit
		Anhydrit mit einigen Klüften, relativ sauber mit dünnen Tonbändern
40.01		

40.01 m









Versuchs- bezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Versuchs- datum	Bohrloch- tiefe (m) <sup>2)</sup>	Bohrkern- gewinn <sup>3)</sup>	Versuchs- qualität <sup>4)</sup>	E-Modul (GPa) <sup>5)</sup>
M5B1UB01	z3BK/BD	11.01.96	11,66	nein	mangelhaft	-
M5B1UB02	z3BK/BD	15.01.96	13,68	ja	gut	35,1
M5B1UB03	z3BK/BD	15.01.96	14,68	ja	gut	34,1
M5B1UB04	z3BK/BD	16.01.96	17,18	ja	gut	32,2
M5B1UB05	z3BK/BD	16.01.96	18,18	ja	gut	34,2
M5B1UB06	z3BK/BD	17.01.96	20,68	ja	gut	33,8
M5B1UB07	z3BK/BD	18.01.96	21,68	ja	gut	33,2
M5B1UB08	z3BK/BD	18.01.96	22,68	ja	ausreichend	33,3
M5B1UB09	z3BK/BD	19.01.96	23,68	ja	gut	34,2
M5B1UB10	z3BK/BD	19.01.96	24,68	ja	gut	30,6
M5B1UB11	z3HA	23.01.96	28,75	ja	ausreichend	81,2
M5B1UB12	z3HA	24.01.96	29,75	ja	ausreichend	85,1
M5B1UB13	z3HA	24.01.96	30,75	ja	ausreichend	80,0
M5B2UB01	z3BK/BD	05.12.95	12,40	ja	gut	34,2
M5B2UB02	z3BK/BD	05.12.95	13,92	nein	ausreichend	(32,8)
M5B2UB03	z3BK/BD	06.12.95	15,75	ja	gut	30,8
M5B2UB04	z3BK/BD	07.12.95	18,75	nein	ausreichend	(32,8)
M5B2UB05	z3BK/BD	07.12.95	20,25	nein	ausreichend	(32,8)
M5B2UB06	z3BK/BD	08.12.95	21,75	nein	ausreichend	(32,8)
M5B2UB07	z3BK/BD	08.12.95	22,75	ja	gut	32,8
M5B2UB08	z3BK/BD	12.12.95	25,03	nein	mangelhaft	-
M5B2UB09	z3BK/BD	13.12.95	26,63	nein	mangelhaft	-
M5B2UB10	z3BK/BD	14.12.95	27,60	nein	mangelhaft	-
M5B2UB11	z3BK/BD	15.12.95	28,39	ja	gut	32,7
M5B2UB12	z3BK/BD	15.12.95	29,36	ja	ausreichend	33,7
M5B3UB01	z3BK/BD	08.02.96	11,73	nein	mangelhaft	-
M5B3UB02	z3BK/BD	09.02.96	12,23	nein	mangelhaft	-
M5B3UB03	z3BK/BD	09.02.96	13,23	ja	gut	32,9
M5B3UB04	z3BK/BD	12.02.96	14,23	nein	mangelhaft	-
M5B3UB05	z3BK/BD	12.02.96	14,98	ja	mangelhaft	-
M5B3UB06	z3BK/BD	13.02.96	15,73	ja	ausreichend	35,0
M5B3UB07	z3BK/BD	14.02.96	16,48	ja	ausreichend	35,4
M5B3UB08	z3BK/BD	14.02.96	17,28	ja	gut	36,2
M5B3UB09	z3BK/BD	15.02.96	18,03	nein	ausreichend	(36,1)
M5B3UB10	z3BK/BD	15.02.96	18,78	ja	ausreichend	35,7
M5B3UB11	z3BK/BD	16.02.96	19,52	nein	ausreichend	(36,1)
M5B3UB12	z3BK/BD	16.02.96	20,27	nein	ausreichend	(36,1)
M5B3UB13	z3BK/BD	19.02.96	21,02	ja	mangelhaft	-
M5B3UB14	z3BK/BD	19.02.96	21,77	ja	mangelhaft	-
M5B3UB15	z3HA	20.02.96	22,77	ja	gut	81,7
M5B3UB16	z3HA	21.02.96	23,52	ja	mangelhaft	-
M5B3UB17	z3HA	21.02.96	24,28	ja	gut	84,5

<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M5B3UB17:

M = Morsleben  
5 = Lokation 5  
B3 = Bohrung 3 (interne Bezeichnung)  
UB17 = Überbohrversuch Nr. 17

<sup>2)</sup> Tiefe des Pilotbohrlochmundes

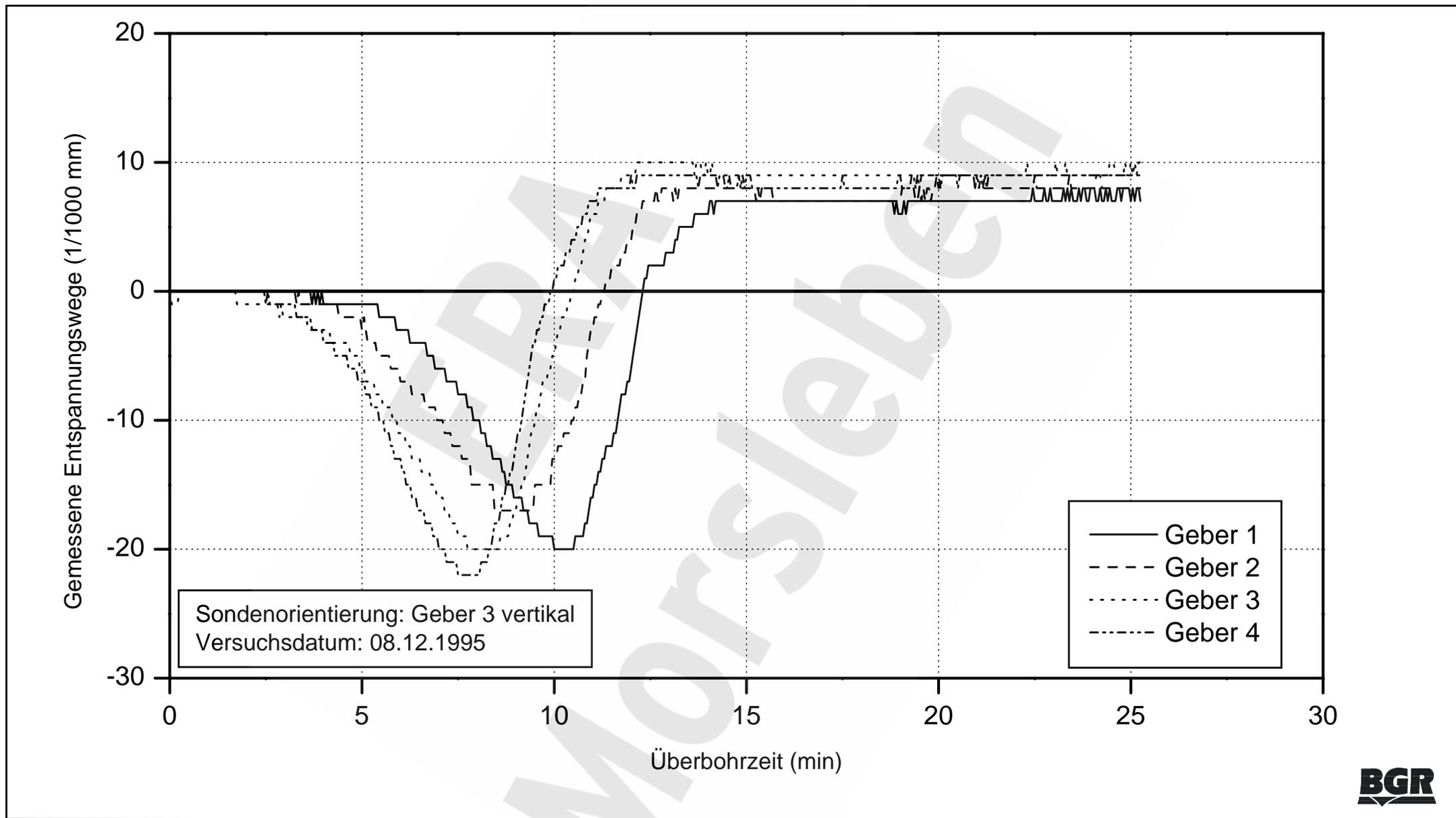
<sup>3)</sup> Bohrkerngewinn ausreichend?:

ja: Kernlänge  $\geq$  37 cm

nein: Kernlänge  $<$  37 cm

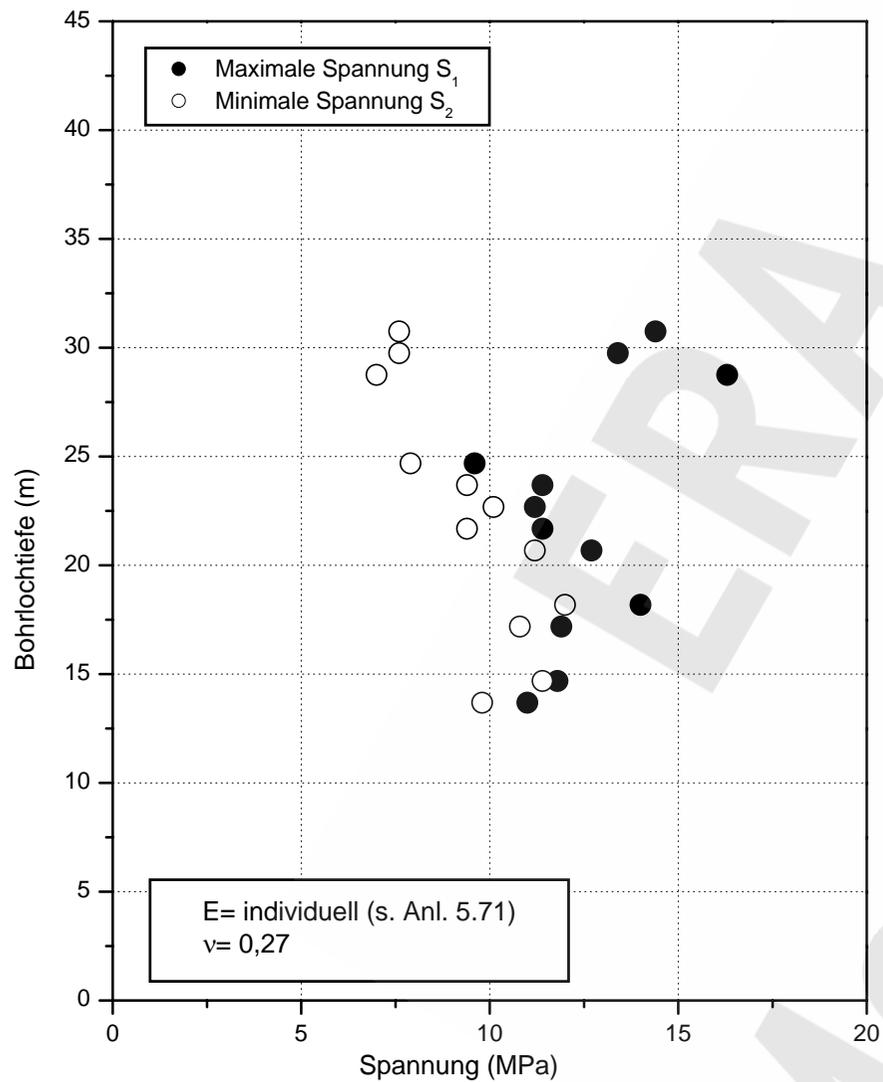
<sup>4)</sup> Kriterien nach Kap. 4.1.2

<sup>5)</sup> Für die Auswertung der Überbohrversuche  
ermittelter oder gewählter E-Modul  
(Werte in Klammern sind geschätzt)

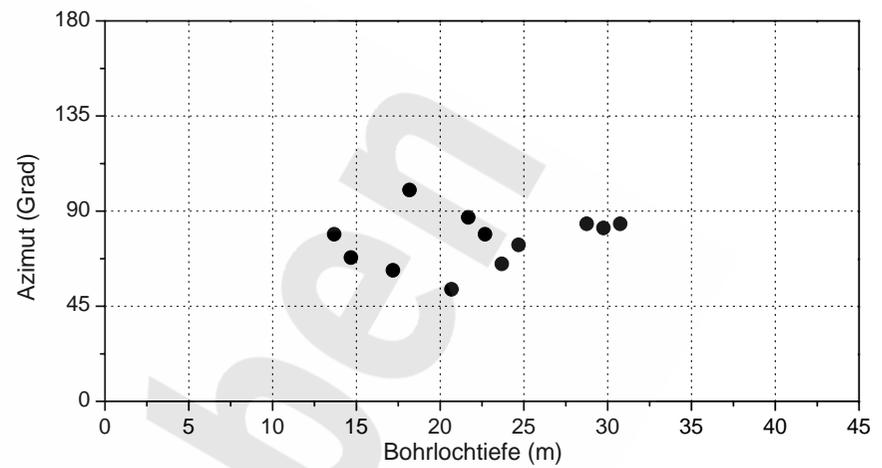


Exemplarische Darstellung von Messdaten aus einem Überbohrversuch in Lokation 5

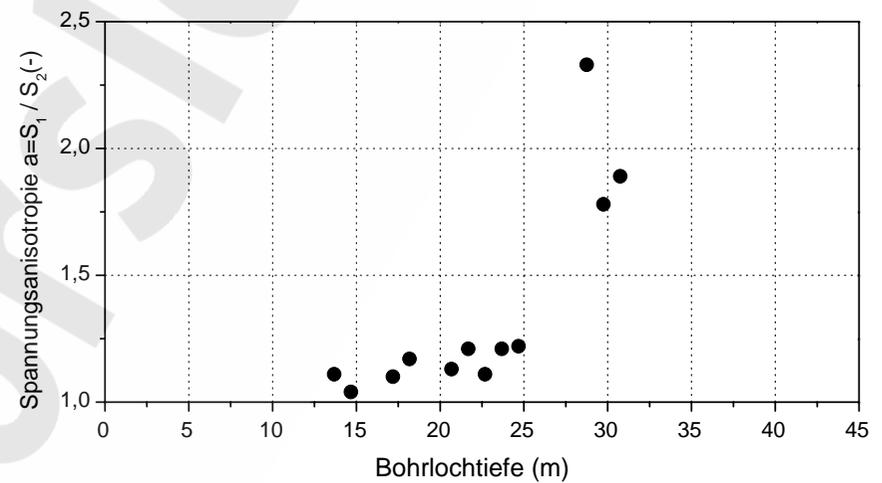
Anlage 5.72



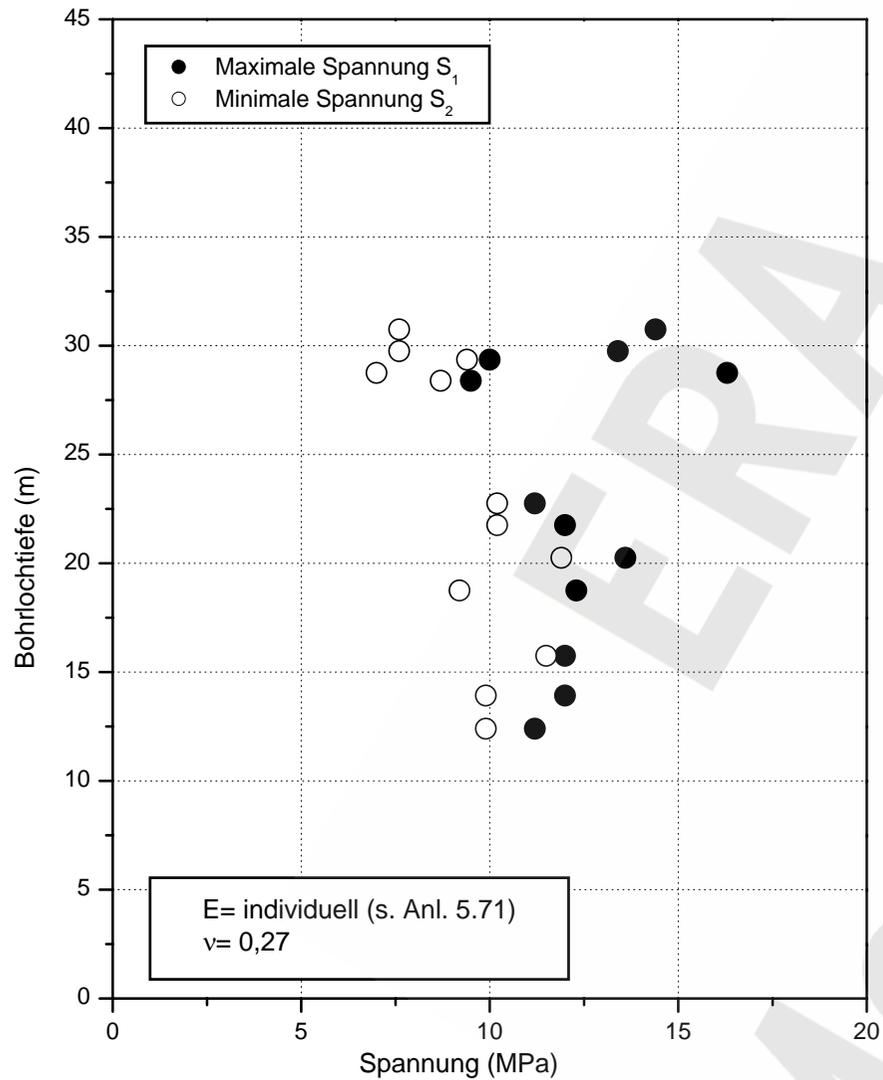
a) Spannungsbeträge



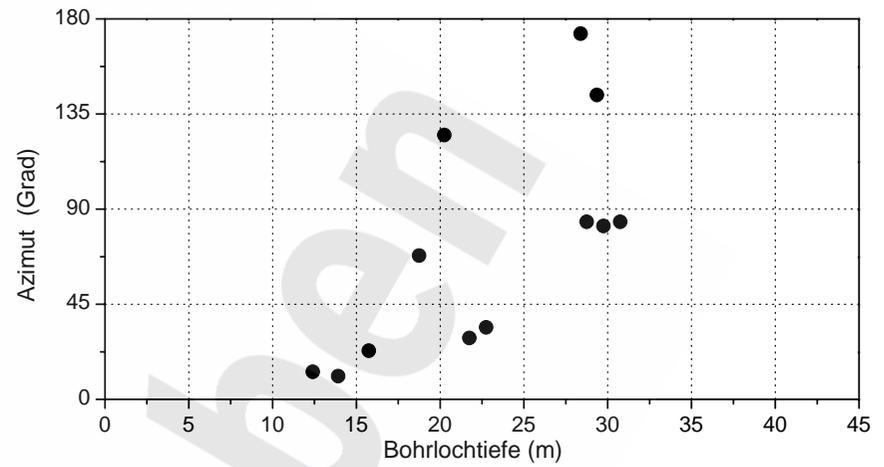
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$



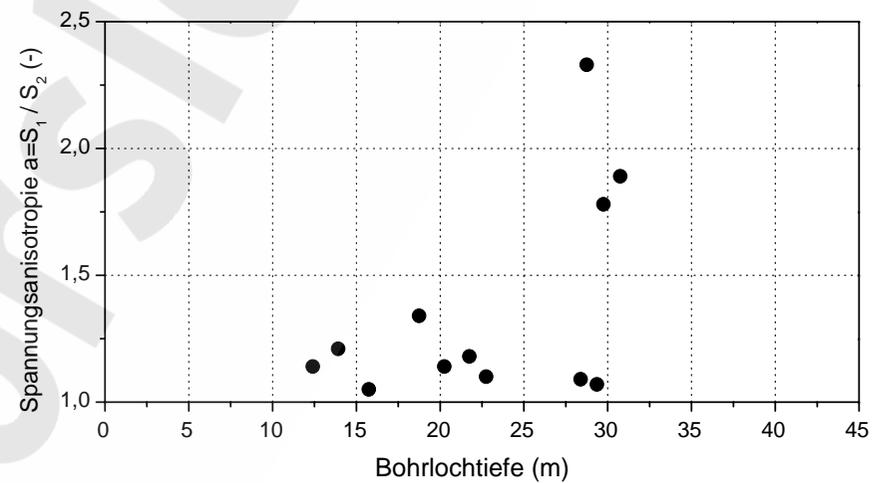
c) Grad der Spannungsanisotropie



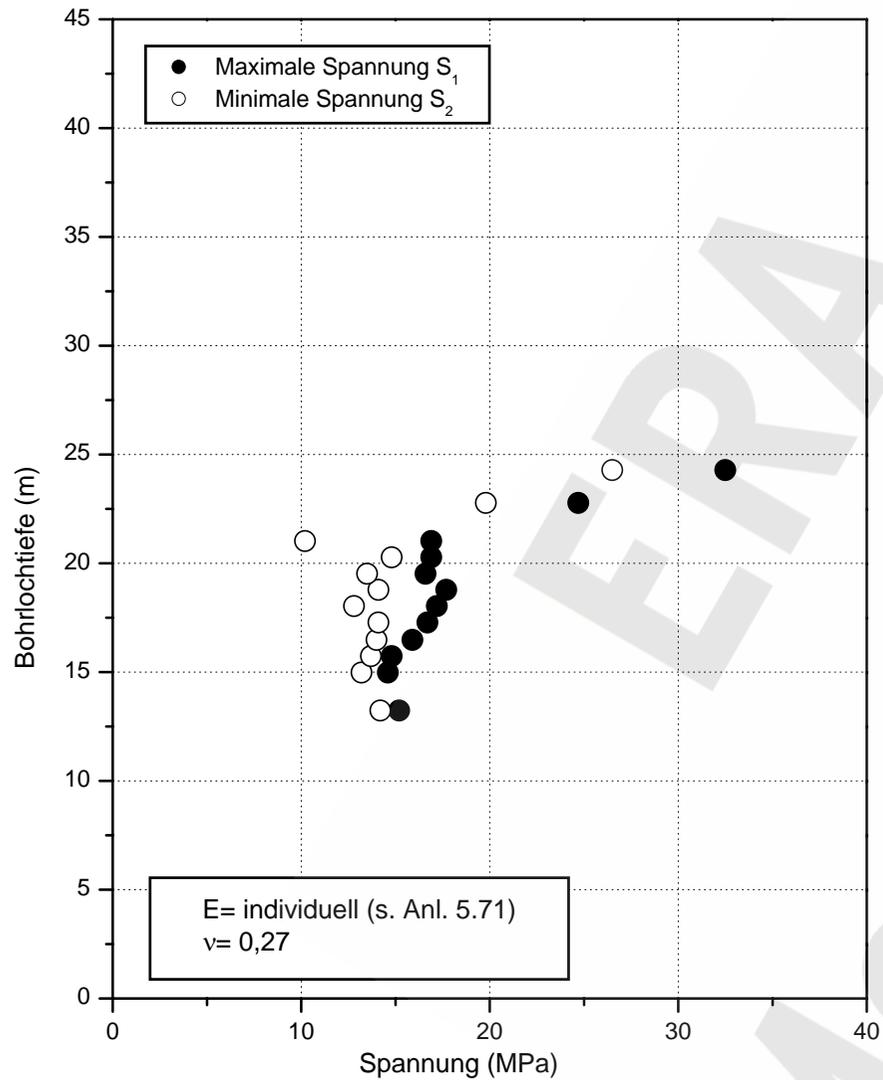
a) Spannungsbeträge



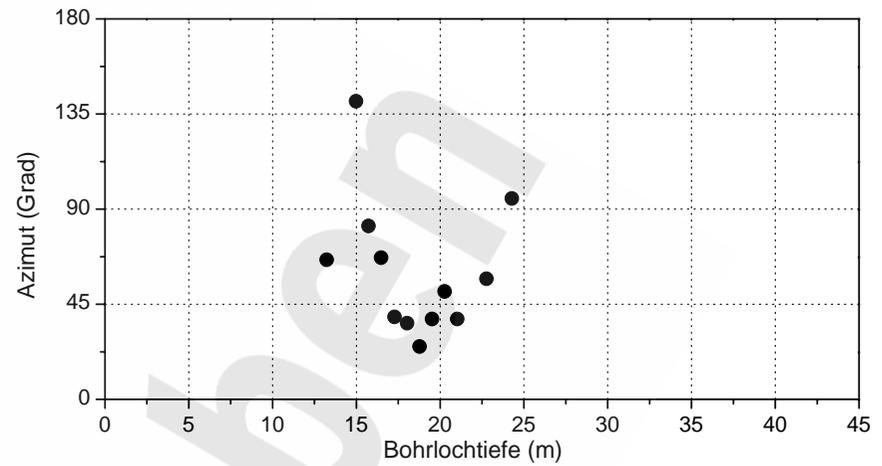
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$



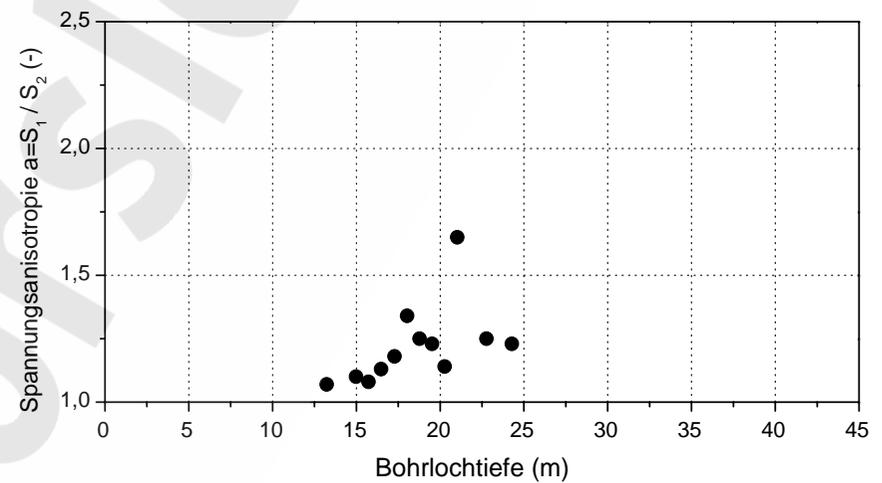
c) Grad der Spannungsanisotropie



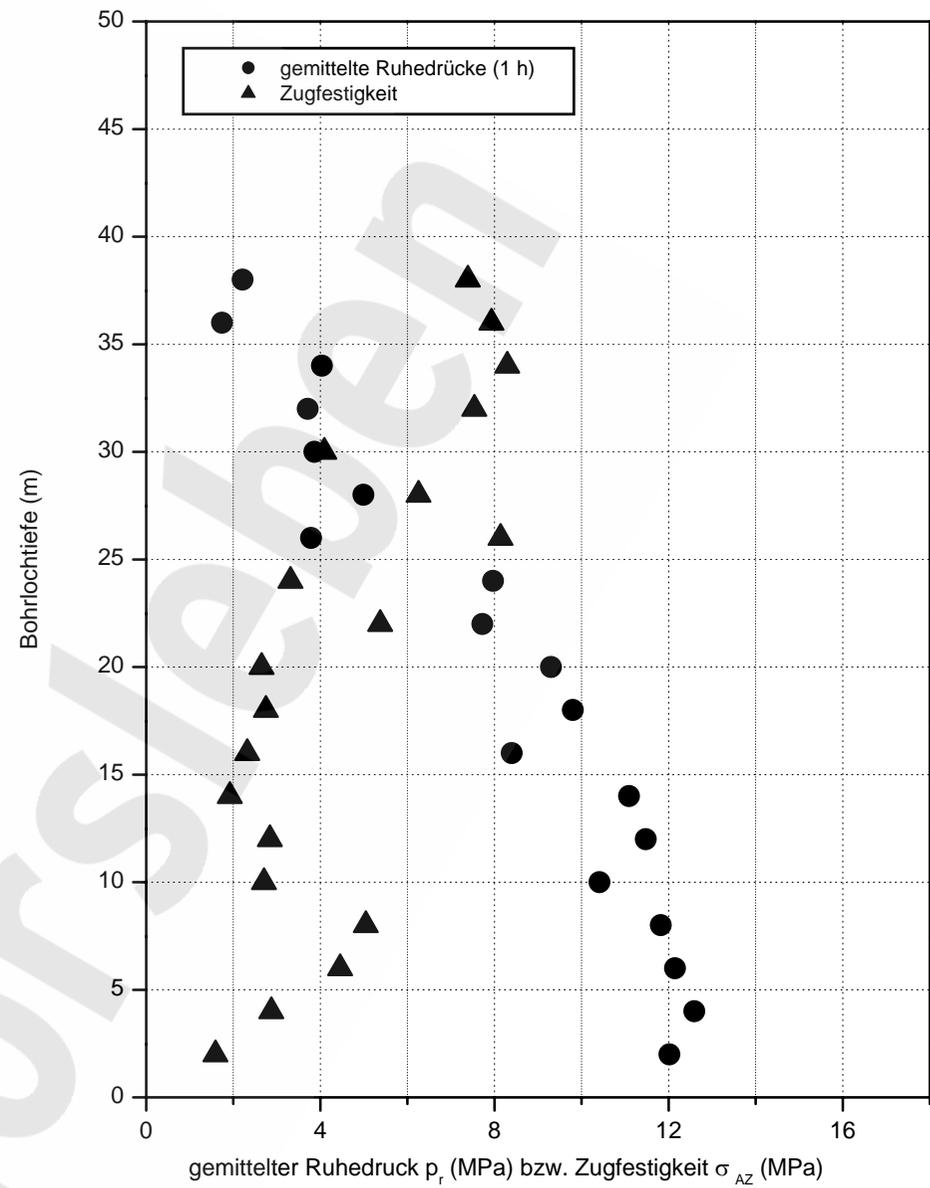
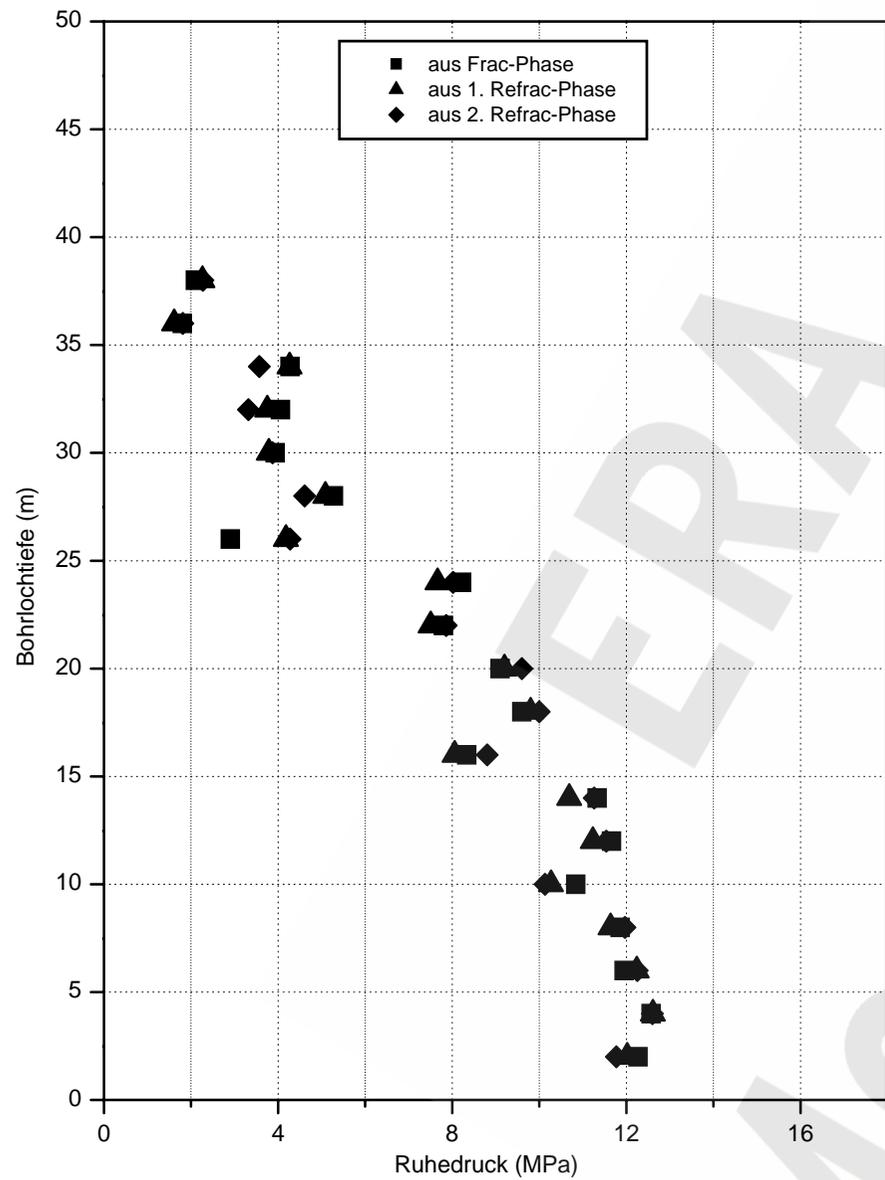
a) Spannungsbeträge

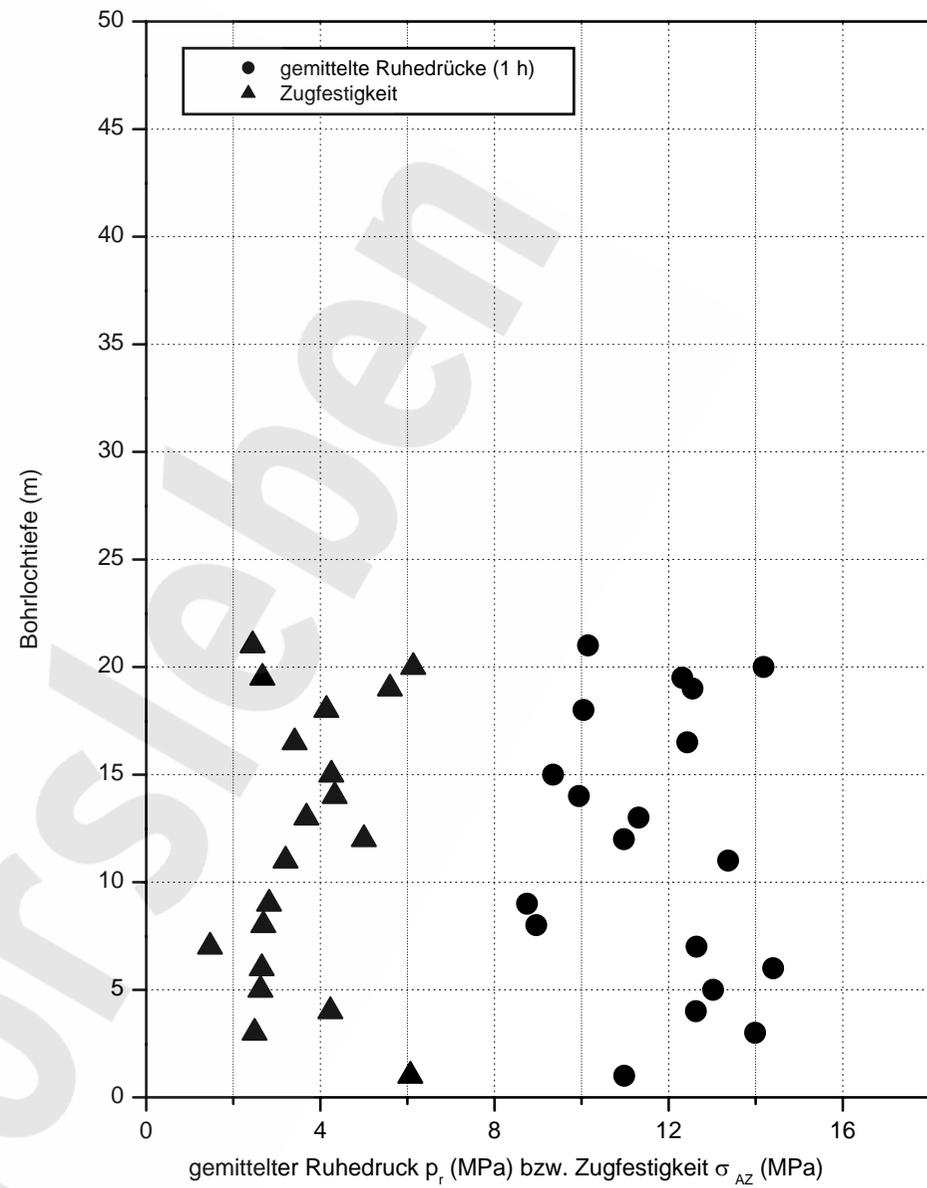
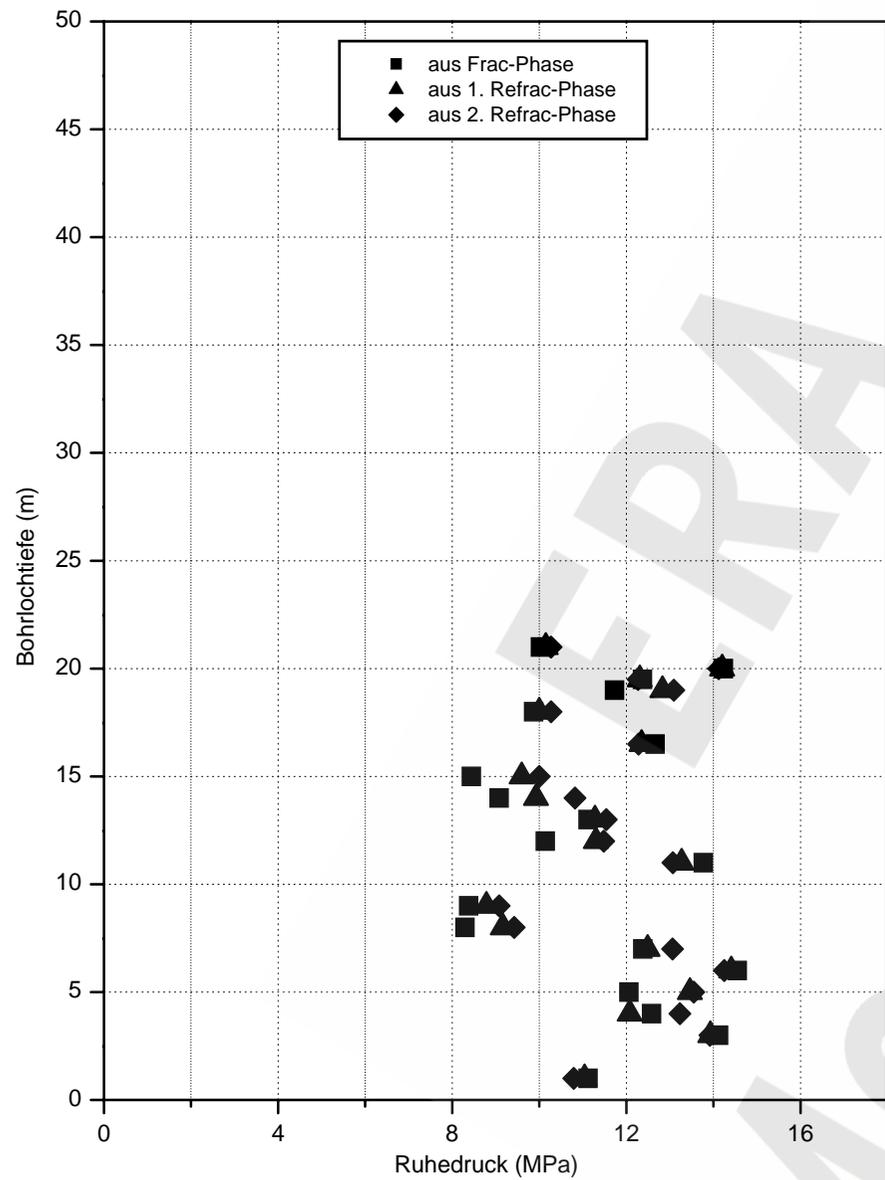


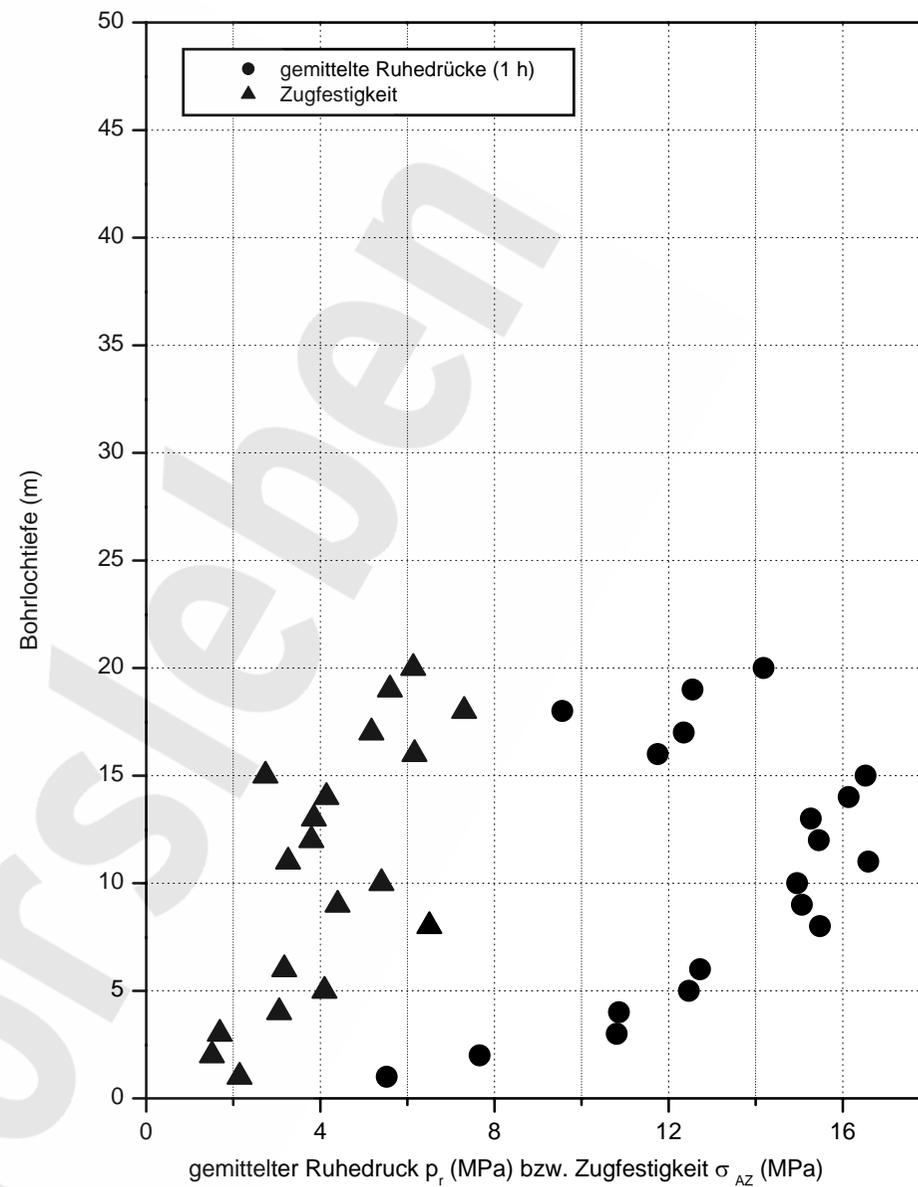
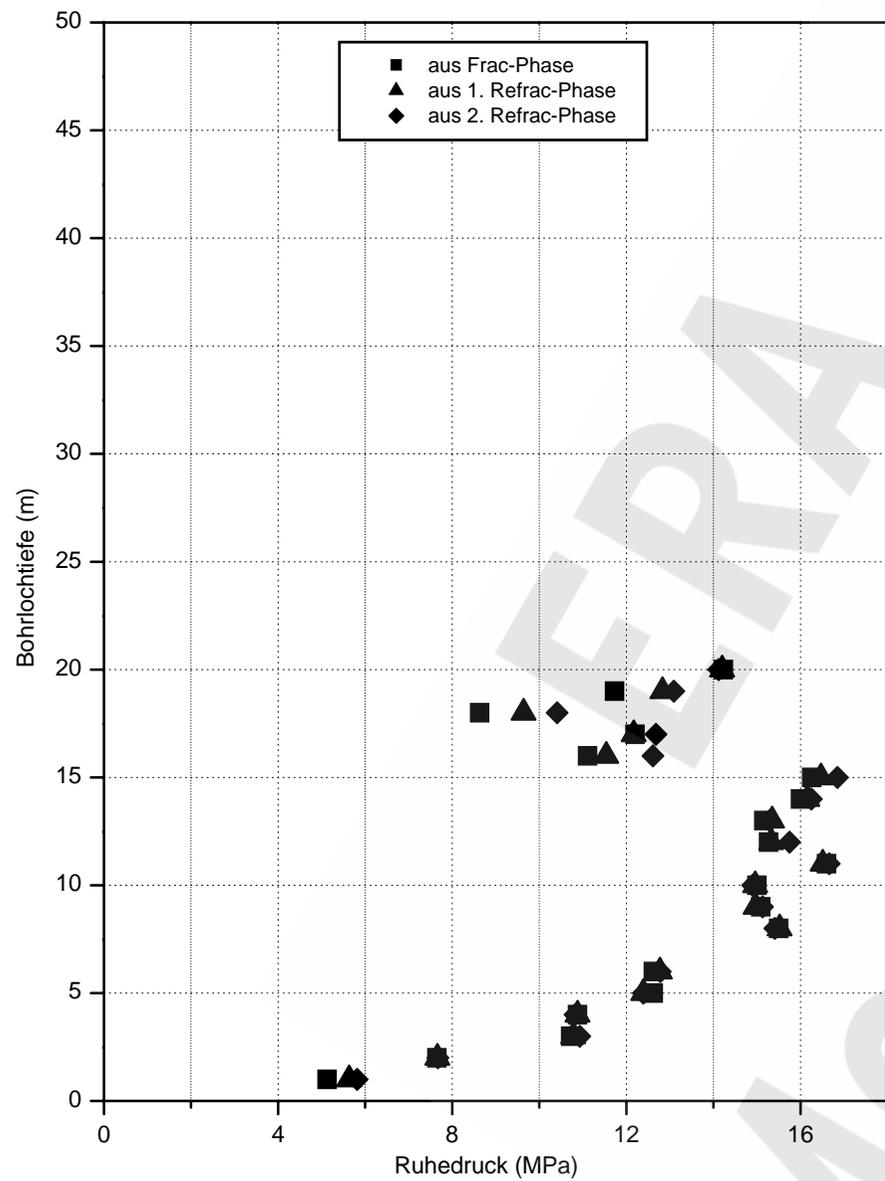
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$

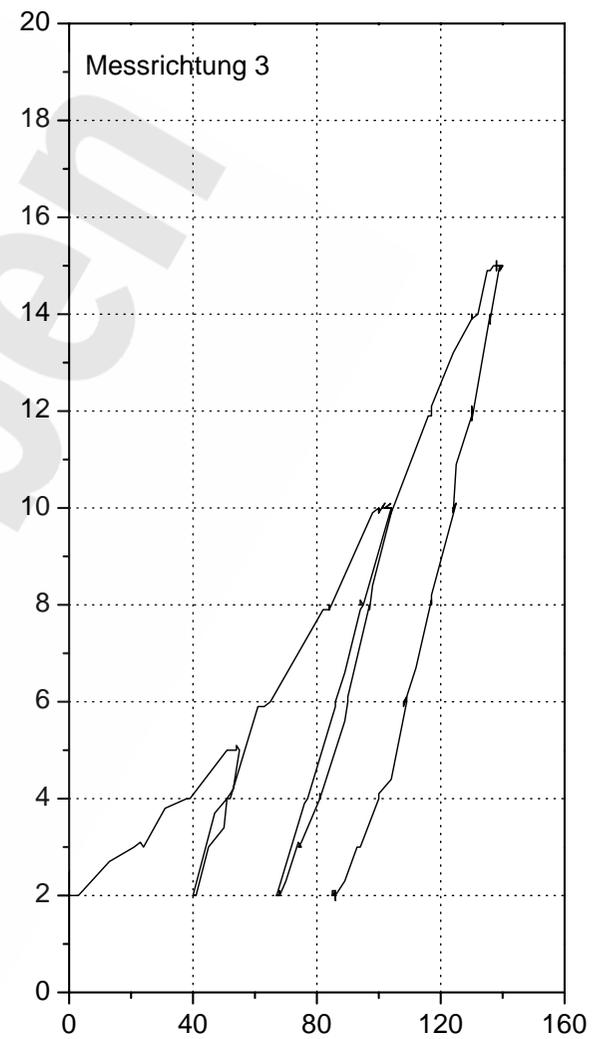
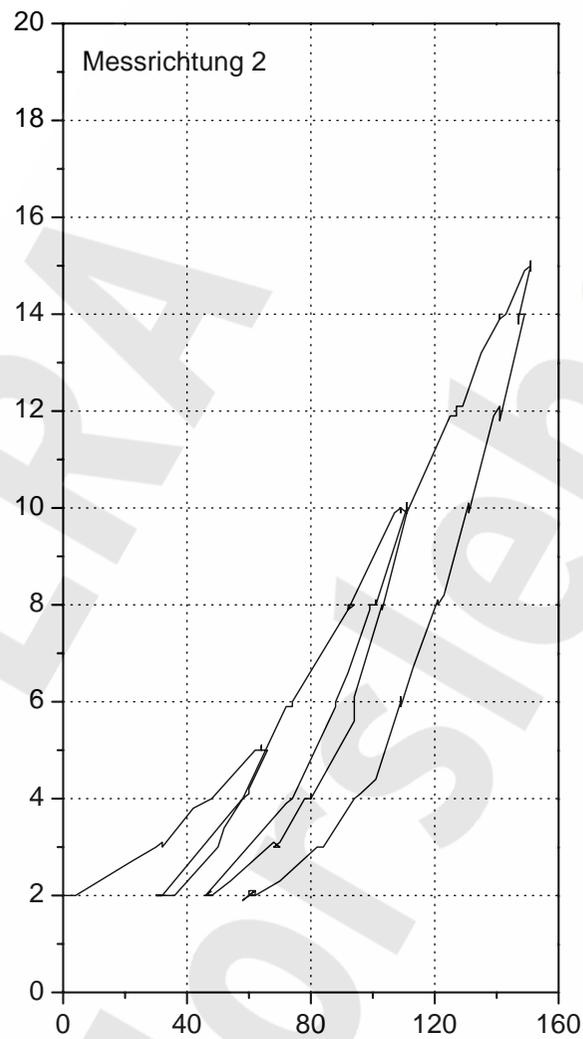
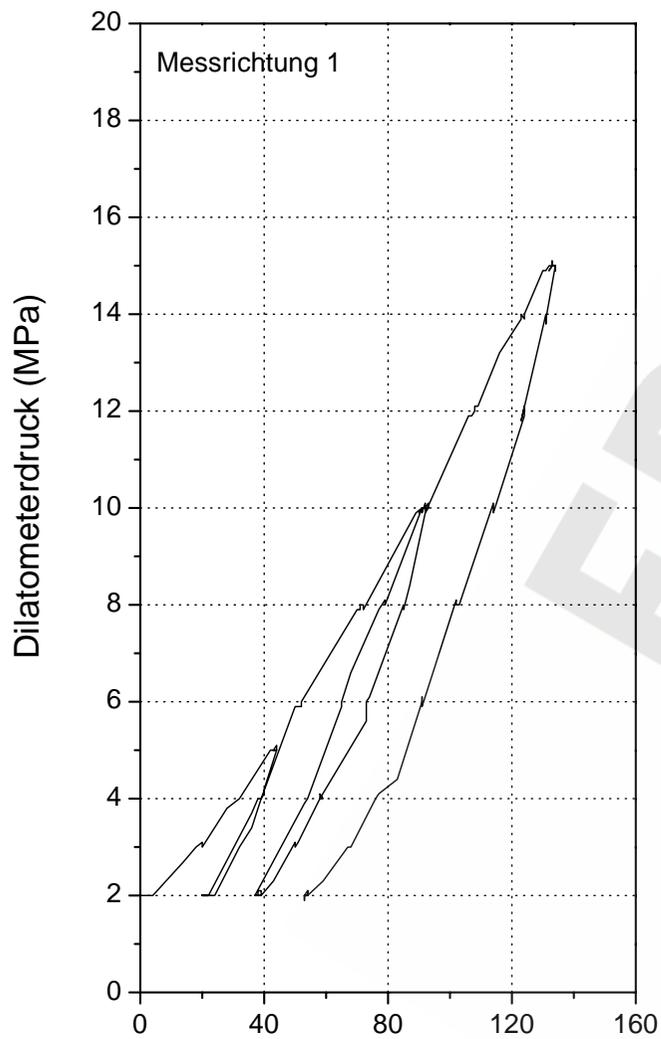


c) Grad der Spannungsanisotropie









Änderung des Bohrlochdurchmessers (1/1000 mm)



Versuchs- bezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Versuchs- datum	Versuchs- tiefe (m)	E-Modul (GPa) <sup>2)</sup>		Gemittelter E-Modul (GPa)	Bemerkungen
				Entlastung von – bis (MPa)			
				10 - 2	15 - 2		
M5B1DI01	z3BK/BD	10.01.96	10,59	28,2	31,0	29,6	
M5B1DI02	z3BK/BD	22.01.96	27,27	21,8	25,0	23,4	
M5B1DI03	z3BK/BD	22.01.96	26,42	20,2	23,2	21,7	
M5B2DI01	z3BK/BD	04.12.95	11,30	-	-	-	Auswertung nicht möglich <sup>3)</sup>
M5B2DI02	z3BK/BD	11.12.95	24,04	-	-	-	Auswertung nicht möglich <sup>3)</sup>
M5B3DI01	z3BK/BD	07.02.96	10,42	26,4	30,2	28,3	

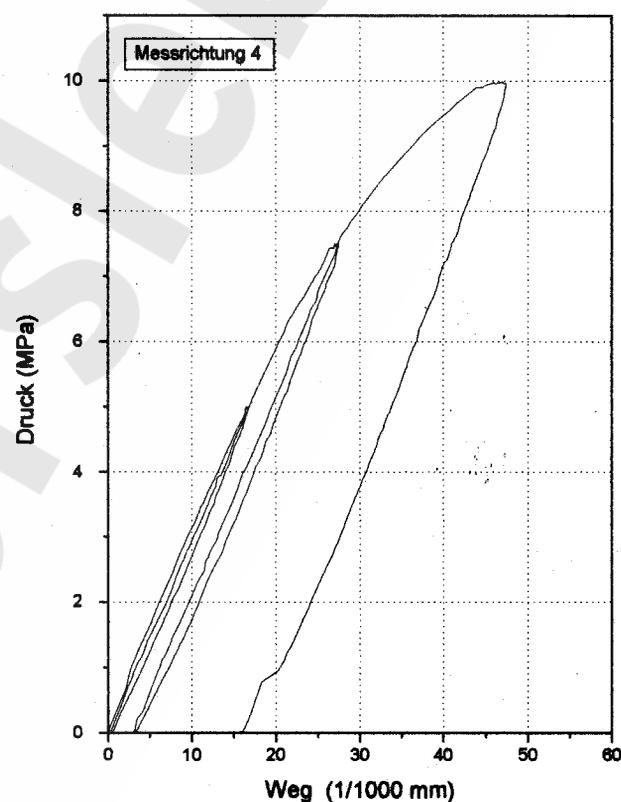
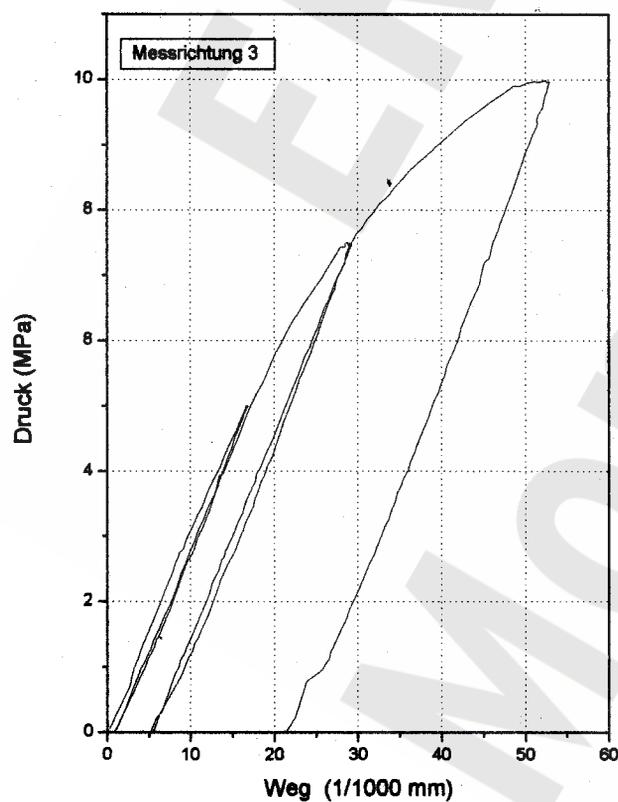
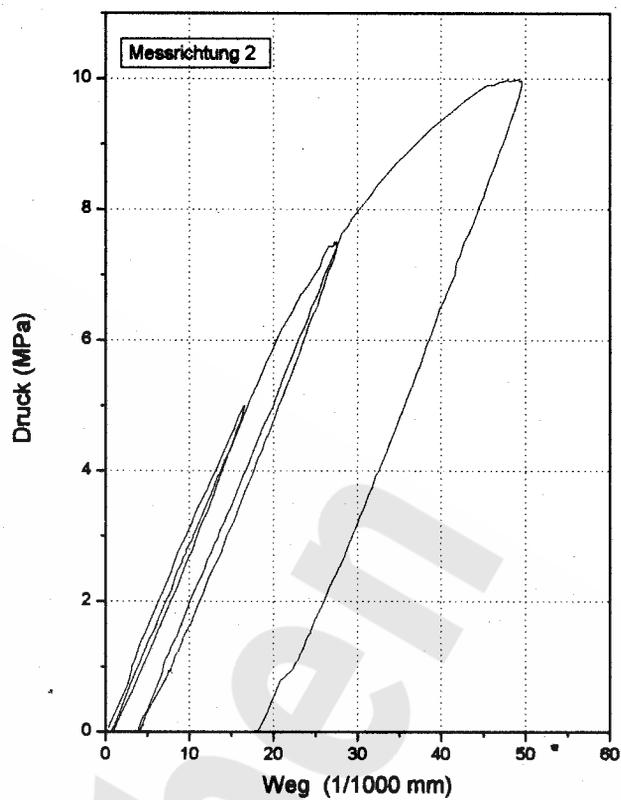
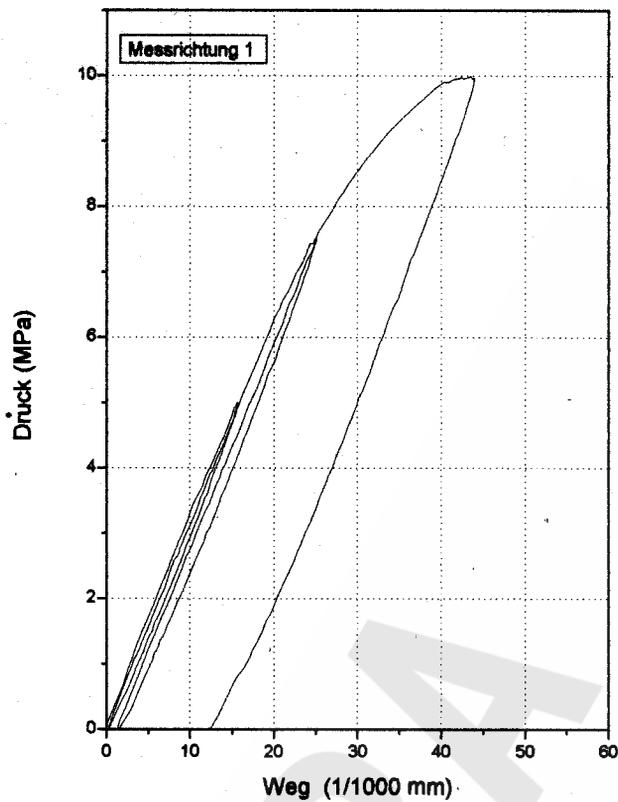
<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M5B3I01:

- M = Morsleben
- 5 = Lokation 5
- B3 = Bohrung 3 (interne Bezeichnung)
- DI01 = Dilatometerversuch Nr. 01

<sup>2)</sup> ermittelt aus Sekante durch die Drittelspunkte des Entlastungsastes

<sup>3)</sup> Entlastungsäste weisen über große Bereiche nahezu vertikale Steigungen auf, vermutlich bedingt durch sehr hohe Plastizität des Salzgesteins

Gesamtmittel Bohrung B1: 24,9 GPa



Projekt : MORSLIBEN LOKATION 5  
 Versuchsbezeichnung : M5B1UB08  
 Material : STEINSALZ  
 Belastung : 5/ 7,5/ 10 MPa  
 Versuchsdatum : 25.02.97 11.10'

**BGR**  
 B2.6/B2.1-08/00-Heu/KU

Anlage 5.81

Last-Deformationsdiagramme für Prüfkörper aus Überbohrversuch M5B1UB08

Kernbezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Entnahmetiefe (m)	E-Modul (GPa)			Mittelwert (GPa)
			bei Entlastung von (MPa)			
			5	7,5	10	
M5B1HZ01	z3BK/BD	12,95 – 13,68	34,7	34,3	32,9	34,0
M5B1UB02	z3BK/BD	13,68 – 14,15	35,6	35,1	34,6	35,1
M5B1UB03	z3BK/BD	14,68 – 15,61	35,2	33,7	33,6	34,1
M5B1UB04	z3BK/BD	17,41 – 18,12	32,2	31,9	32,5	32,2
M5B1UB05	z3BK/BD	18,37 – 19,12	34,5	34,2	33,7	34,2
M5B1UB06	z3BK/BD	20,68 – 21,14	34,3	33,8	33,4	33,8
M5B1UB07	z3BK/BD	21,68 – 22,14	33,3	33,0	33,4	33,2
M5B1UB08	z3BK/BD	22,68 – 23,14	33,5	33,3	33,2	33,3
M5B1UB09	z3BK/BD	23,68 – 24,04	34,2	34,3	34,0	34,2
M5B1UB10	z3BK/BD	24,68 – 25,19	29,9	30,1	31,9	30,6
M5B1UB11	z3HA	28,75 – 29,57	82,2	80,8	80,4	81,2
M5B1UB12	z3HA	29,75 – 30,75	88,8	84,7	81,9	85,1
M5B1UB13	z3HA	30,75 – 31,57	81,3	79,9	78,2	80,0
M5B2UB01	z3BK/BD	12,40 – 13,38	36,0	34,0	32,6	34,2
M5B2UB03	z3BK/BD	15,75 – 16,52	32,6	30,0	29,9	30,8
M5B2UB07	z3BK/BD	22,75 – 23,75	33,5	32,6	32,2	32,8
M5B2UB11	z3BK/BD	28,39 – 28,82	34,8	32,0	31,2	32,7
M5B2UB12	z3BK/BD	29,36 – 30,13	34,7	33,8	32,7	33,7
M5B3UB03	z3BK/BD	13,23 – 14,17	34,0	33,3	31,5	32,9
M5B3UB05	z3BK/BD	15,13 – 15,70	38,0	37,2	36,0	37,1
M5B3UB06	z3BK/BD	15,73 – 16,16	36,4	35,2	33,2	35,0
M5B3UB07	z3BK/BD	16,48 – 16,95	36,2	35,9	34,2	35,4
M5B3UB08	z3BK/BD	17,28 – 18,02	37,2	36,4	34,9	36,2
M5B3UB10	z3BK/BD	18,78 – 19,52	36,3	36,0	34,9	35,7
M5B3HZ01	z3BK/BD	19,81 – 20,24	36,9	36,8	36,2	36,6
M5B3HZ02	z3BK/BD	20,53 – 20,97	40,0	39,7	39,0	39,5
M5B3UB13	z3BK/BD	21,02 – 21,76	36,3	35,8	35,5	35,9
M5B3UB14	z3BK/BD	21,85 – 22,47	37,7	36,9	35,7	36,8
M5B3UB15	z3HA	22,77 – 23,48	84,4	81,3	79,4	81,7
M5B3UB16	z3HA	23,52 – 24,28	82,0	79,0	77,4	79,5
M5B3UB17	z3HA	24,28 – 25,03	86,7	83,2	83,5	84,5

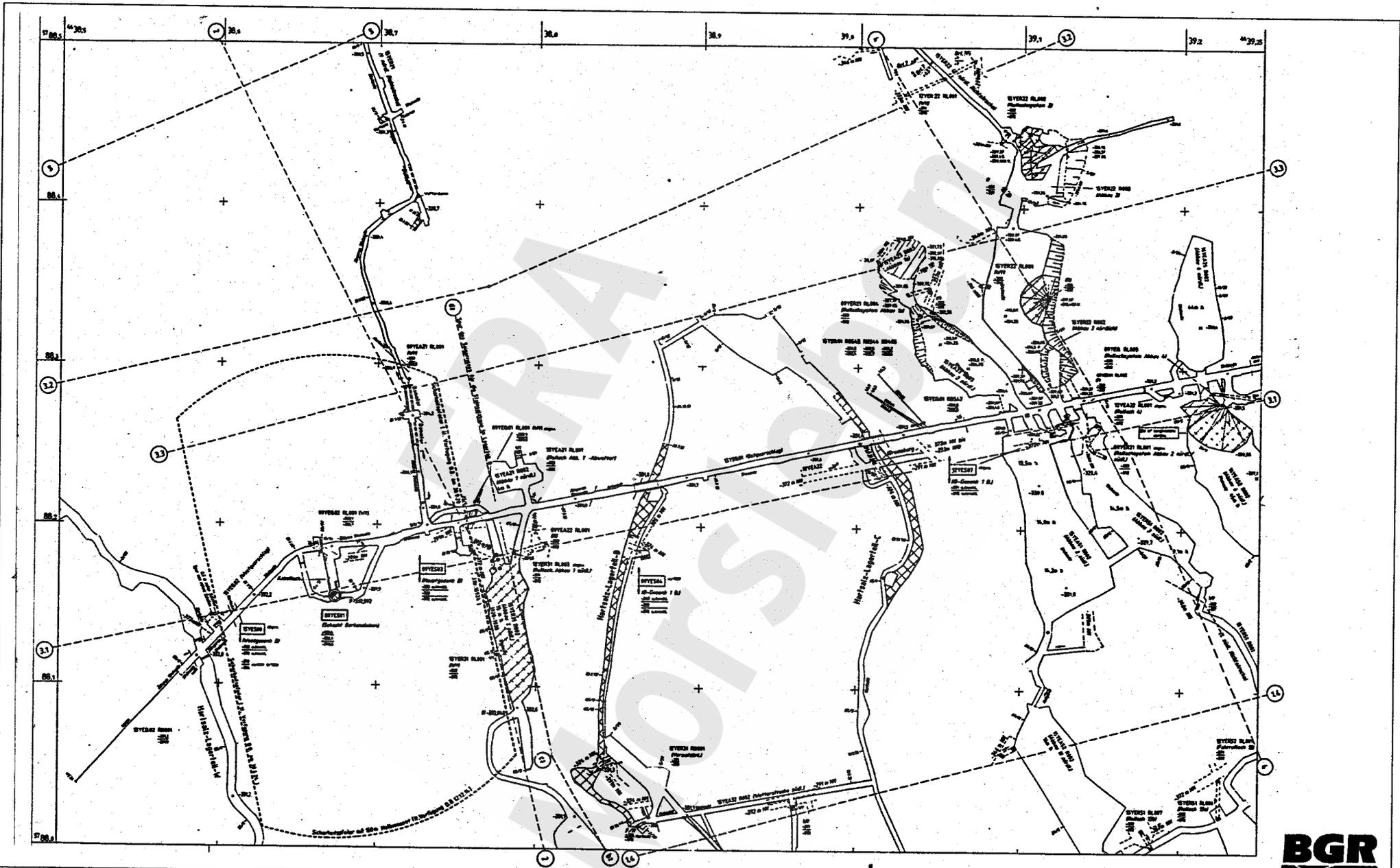
<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M5B3UB17:

M = Morsleben  
5 = Lokation 5  
B3 = Bohrung 3 (interne Bezeichn.)  
UB17 = Hohlkern aus Überbohrversuch Nr. 17

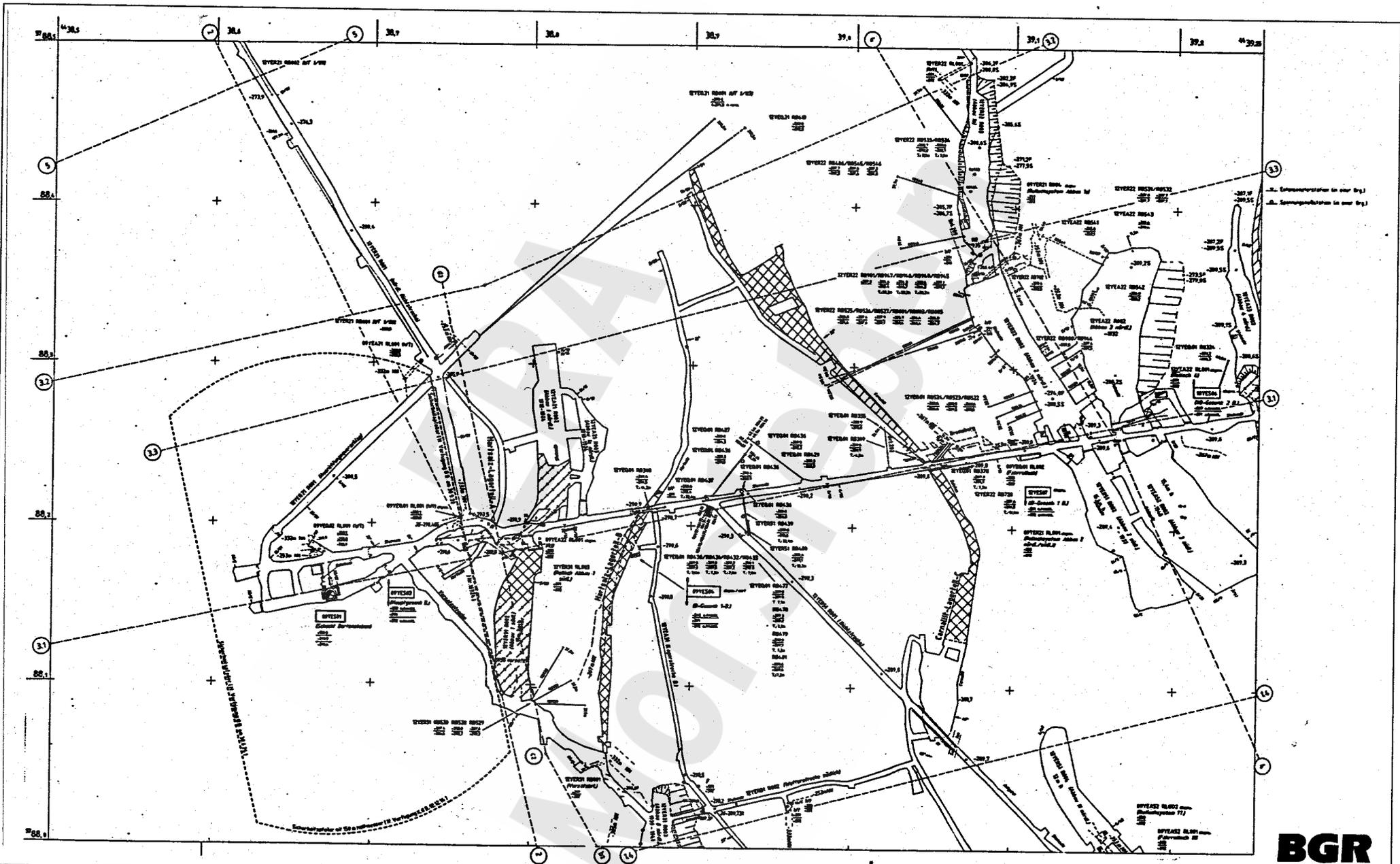
<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M5B3HZ01:

M = Morsleben  
5 = Lokation 5  
B3 = Bohrung 3 (interne Bezeichn.)  
HZ01 = Hohlkern mit lfd. Nr., der nicht direkt aus einem Überbohrversuch stammt

Gesamtmittel Bohrung B1 (z3BK/BD): 33,5 GPa  
Gesamtmittel Bohrung B1 (z3HA): 82,1 GPa  
Gesamtmittel Bohrung B2 (z3BK/BD): 32,8 GPa  
Gesamtmittel Bohrung B3 (z3BK/BD): 36,1 GPa  
Gesamtmittel Bohrung B3 (z3HA): 81,9 GPa

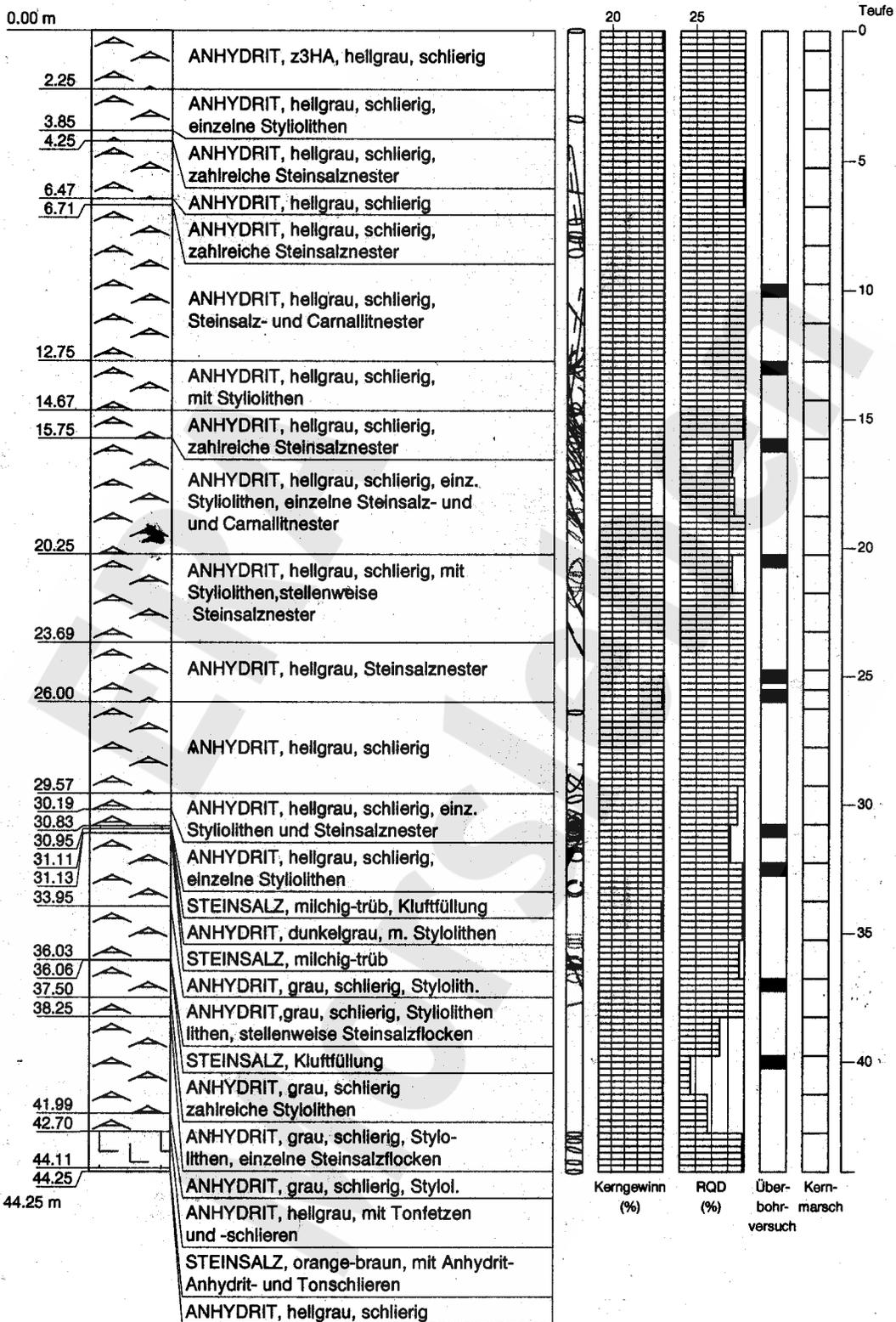


Sohlenriss 3. Sohle Bartensleben mit Bohrung RB485 (DBE, 1993)



Sohlenriss 2. Sohle Bartensleben mit Bohrung RB486 (DBE, 1993)



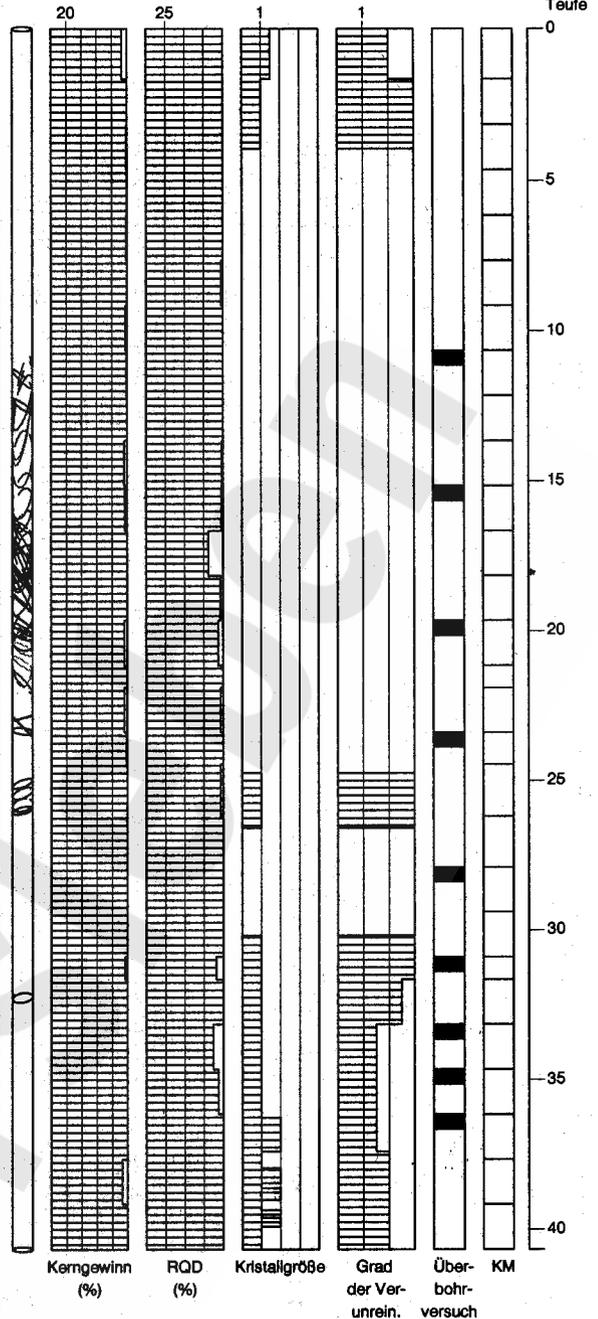


**BGR**

B2.1 - Ha/Mo

0.00 m

3.17	STEINSALZ, z3LS, milchig-trüb, fein- bis mittelkristallin, lagenweise Großkristalle, Anhydritlinien in 1-10cm Abstand
3.95	
4.35	STEINSALZ, orange-braun, feinkrist., Anhydritlinien in 1-5cm Abstand
5.67	ANHYDRIT, z3HA, hellgrau, zahlreiche Steinsalznester
8.75	ANHYDRIT, hellgrau, schlierig, einzelne Steinsalznester
9.50	
10.20	ANHYDRIT, grau mit dunklen Schlieren, Steinsalz- und Carnallitnester, Kern erscheint feucht
14.45	ANHYDRIT, grau, schlierig, einzelne Carnallitflocken
15.66	ANHYDRIT, grau mit dunklen Schlieren, Carnallit- und Steinsalznester, Kern erscheint feucht
16.65	
21.70	ANHYDRIT, hellgrau, schlierig, stellenweise Carnallit- und Steinsalznester
21.71	ANHYDRIT, hellgrau, schlierig, einzelne Carnallitnester
22.69	
23.39	ANHYDRIT, grau mit dunklen Schlieren, zahlreiche Steinsalz- und Carnallitnester, Kern erscheint z.T. feucht
24.76	
26.59	STEINSALZ und CARNALLIT, Klufffüllung
30.19	ANHYDRIT, grau mit dunklen Schlieren, zahlreiche Carnallit- und Steinsalznester, Kern erscheint feucht
33.15	ANHYDRIT, grau-grün, dunkle Schlieren, einz. Carnallit- und Steinsalznester
34.15	ANHYDRIT, hellgrau, schlierig, einzelne Steinsalznester
36.26	STEINSALZ, orange-braun, Anhydritlinien in 3-5cm Abstand
39.90	ANHYDRIT, hellgrau, schlierig, zahlreiche Steinsalznester, einzelne Carnallitnester, am Übergang große Salzkristalle im Anhydrit
40.65	STEINSALZ, orange-braun, Anhydritlinien in dichtem Abstand, bei 30.69 Großkristalle, bei 31.05 und 32.25 Umbiegen der Schichtung
40.65 m	STEINSALZ, hellorange, Anhydritlinien in ca. 5cm Abstand
	STEINSALZ, milchig-trüb, Anhydritlinien in 5cm Abstand, einzelne einzelne Großkristalle bis 5cm
	STEINSALZ, milchig-trüb, mittelkrist. mit diffusen Anhydritlinien, lagenweise feinkristallin mit deutlichen Anhydritlinien
	STEINSALZ, milchig-trüb, feinkrist., Anhydritlinien in 1-5cm Abstand, einzelne Großkristalle bis 5cm

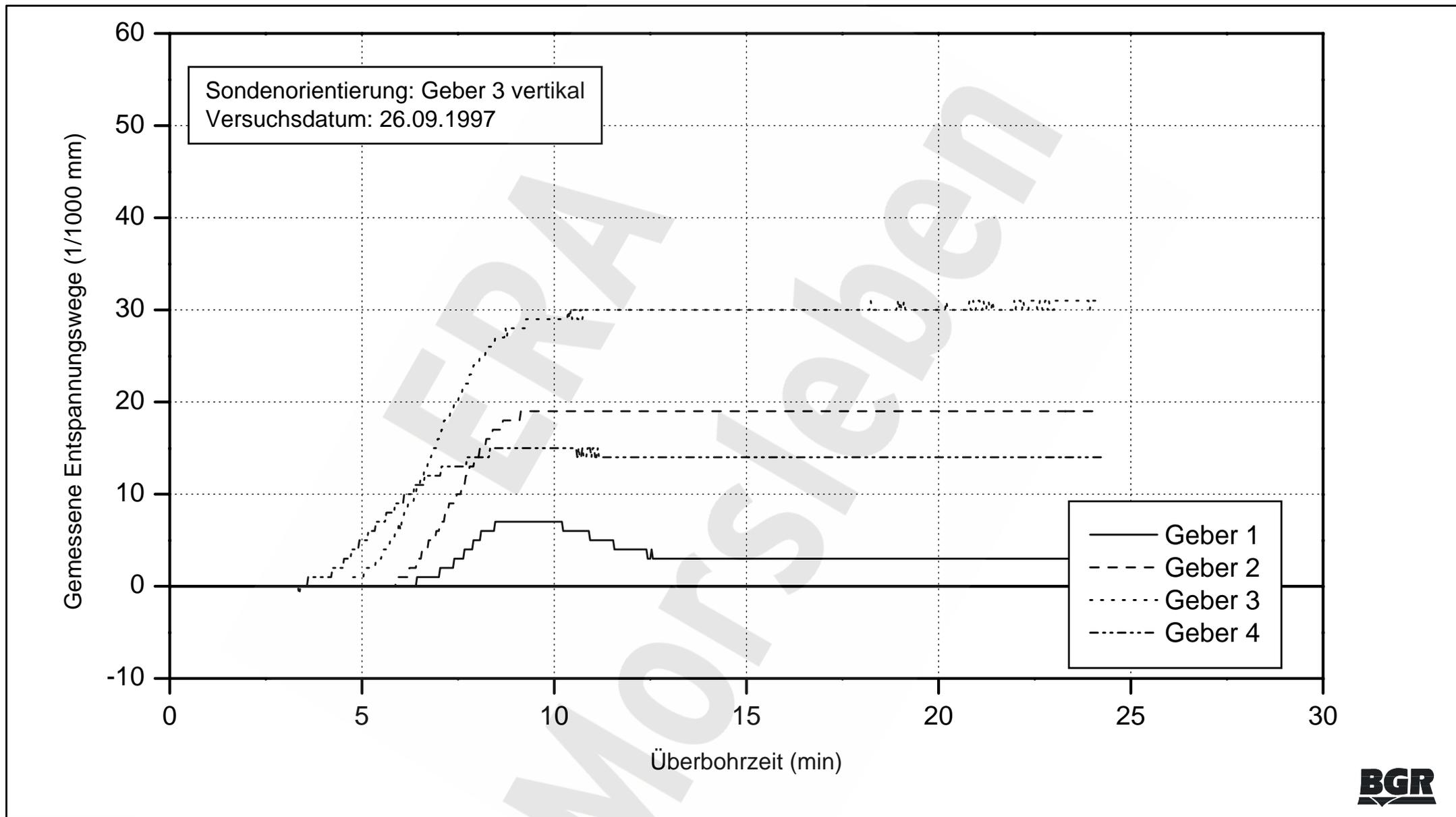


Versuchs- bezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Versuchs- datum	Bohrloch- tiefe (m) <sup>2)</sup>	Bohrkern- gewinn <sup>3)</sup>	Versuchs- qualität <sup>4)</sup>	E-Modul (GPa) <sup>5)</sup>
M6B1UB01	z3HA	24.09.97	9,75	ja	gut	60,9
M6B1UB02	z3HA	25.09.97	12,75	ja	gut	63,2
M6B1UB03	z3HA	26.09.97	15,75	nein	mangelhaft	(61,7)
M6B1UB04	z3HA	29.09.97	20,25	ja	gut	66,3
M6B1UB05	z3HA	30.09.97	24,75	ja	gut	73,9
M6B1UB06	z3HA	30.09.97	25,50	ja	gut	76,6
M6B1UB07	z3HA	01.10.97	30,75	nein	ausreichend	(61,7)
M6B1UB08	z3HA	02.10.97	32,25	ja	gut	50,8
M6B1UB09	z3HA	06.10.97	36,75	ja	gut	52,1
M6B1UB10	z3HA	07.10.97	39,75	nein	mangelhaft	(52,1)
M6B2UB01	z3HA	10.11.97	10,65	ja	gut	70,6
M6B2UB02	z3HA	11.11.97	15,15	nein	ausreichend	(60,2)
M6B2UB03	z3HA	12.11.97	19,65	nein	ausreichend	(60,2)
M6B2UB04	z3HA	13.11.97	23,39	ja	ausreichend	51,1
M6B2UB05	z3HA	14.11.97	27,89	ja	gut	58,9
M6B2UB06	z3LS	17.11.97	30,89	nein	mangelhaft	-
M6B2UB07	z3LS	18.11.97	33,15	nein	ausreichend	(30,0)
M6B2UB08	z3LS	18.11.97	34,65	nein	ausreichend	(30,0)
M6B2UB09	z3LS	19.11.97	36,15	nein	ausreichend	(30,0)

<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M6B2UB09:  
M = Morsleben  
6 = Lokation 6  
B2 = Bohrung 2 (interne Bezeichnung)  
UB09 = Überbohrversuch Nr. 09

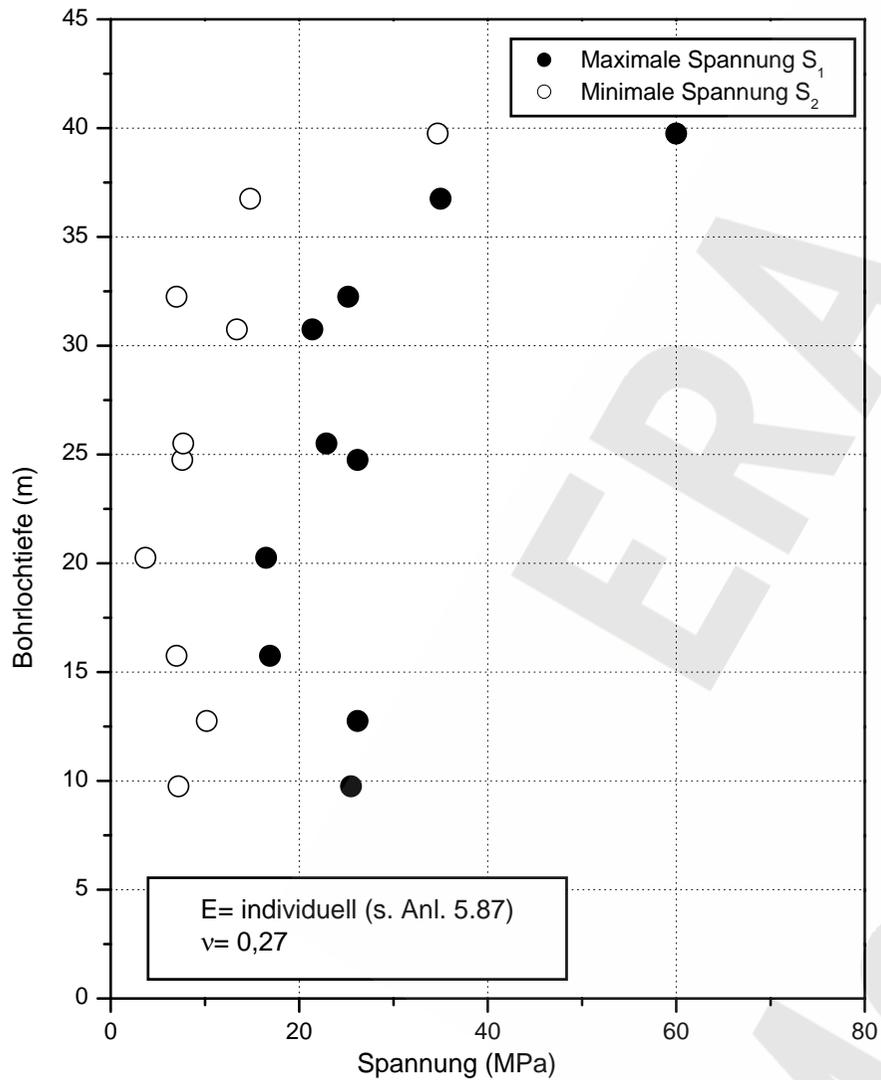
<sup>2)</sup> Tiefe des Pilotbohrlochmundes  
<sup>3)</sup> Bohrkerngewinn ausreichend?:  
ja: Kernlänge ≥ 37 cm  
nein: Kernlänge < 37 cm  
<sup>4)</sup> Kriterien nach Kap. 4.1.2

<sup>5)</sup> Für die Auswertung der Überbohrversuche  
ermittelter oder gewählter E-Modul  
(Werte in Klammern sind geschätzt)

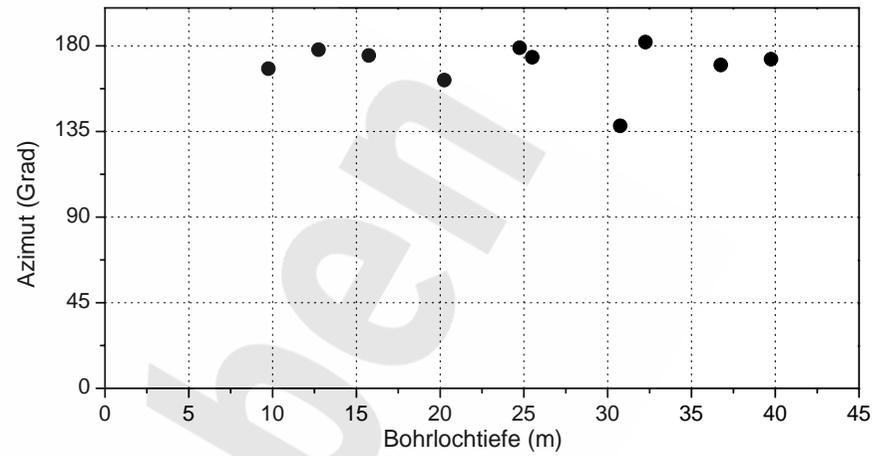


Exemplarische Darstellung von Messdaten aus einem Überbohrversuch in Lokation 6

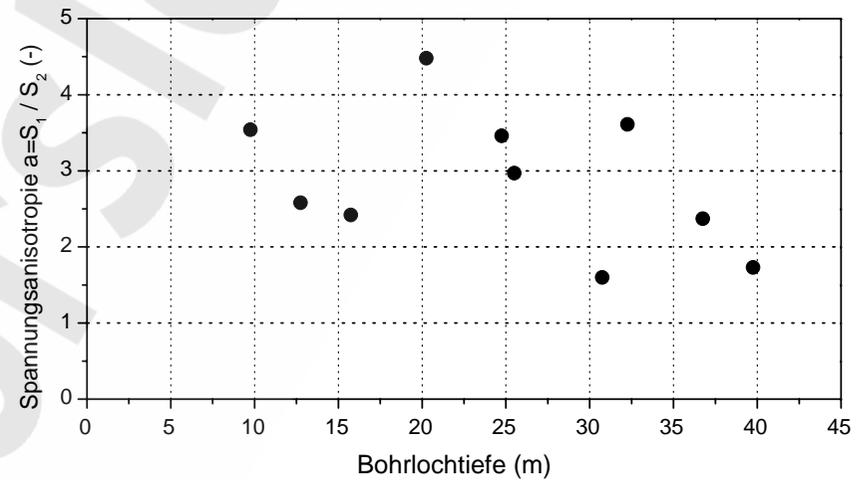
Anlage 5.88



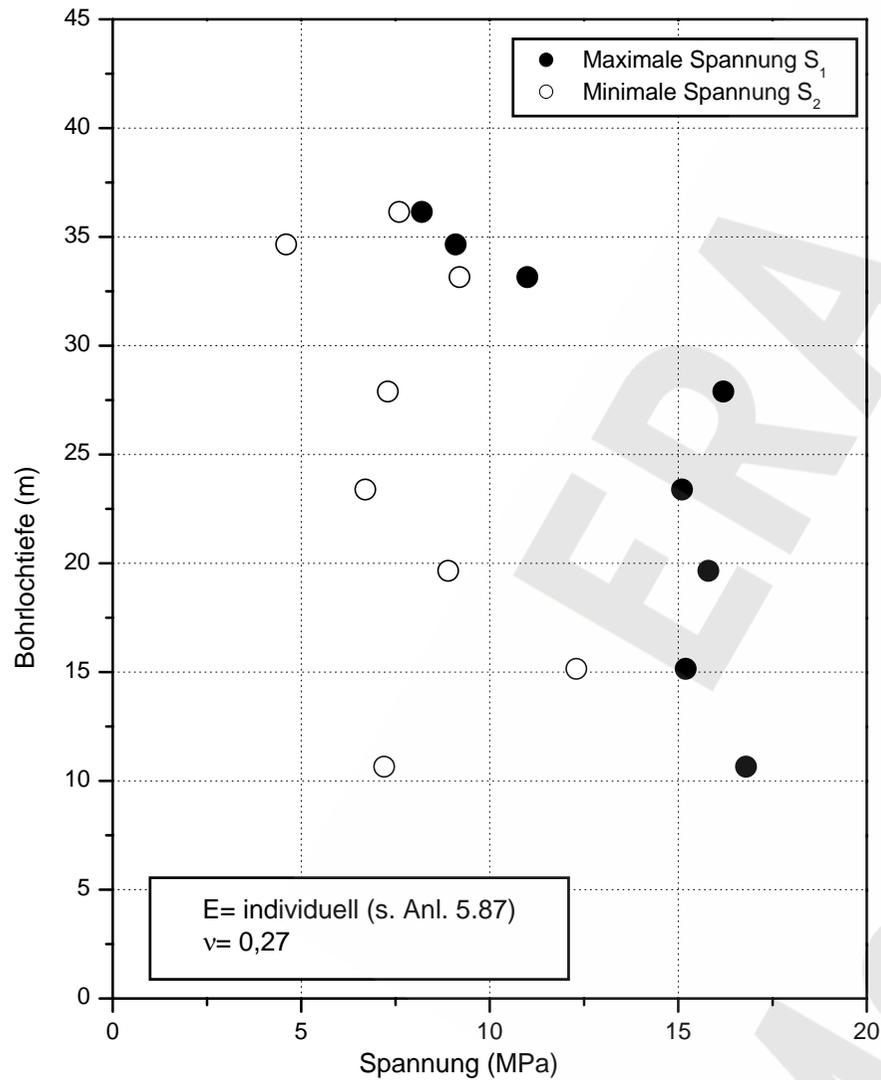
a) Spannungsbeträge



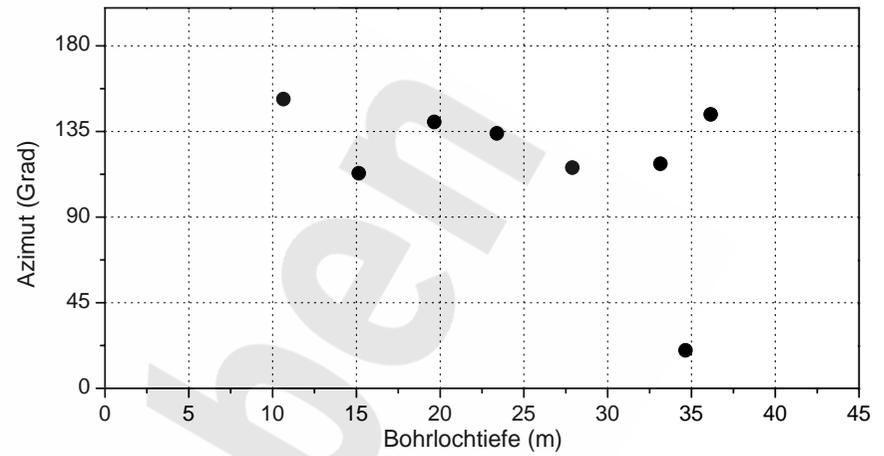
b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$



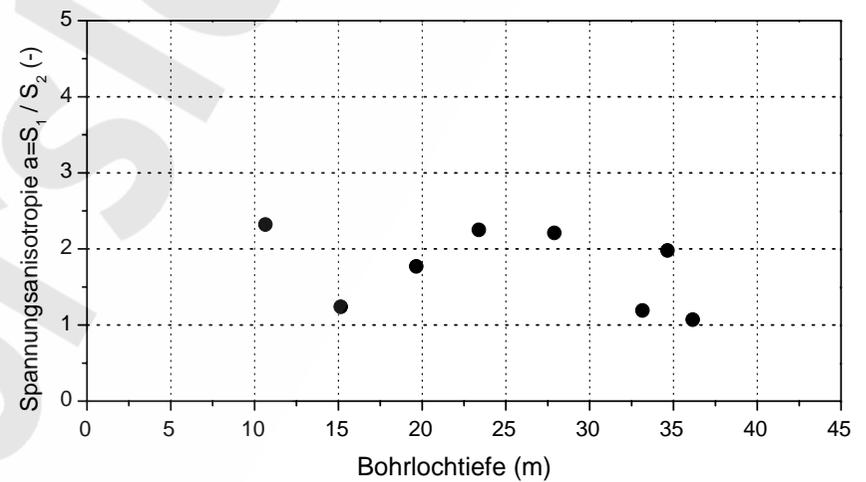
c) Grad der Spannungsanisotropie



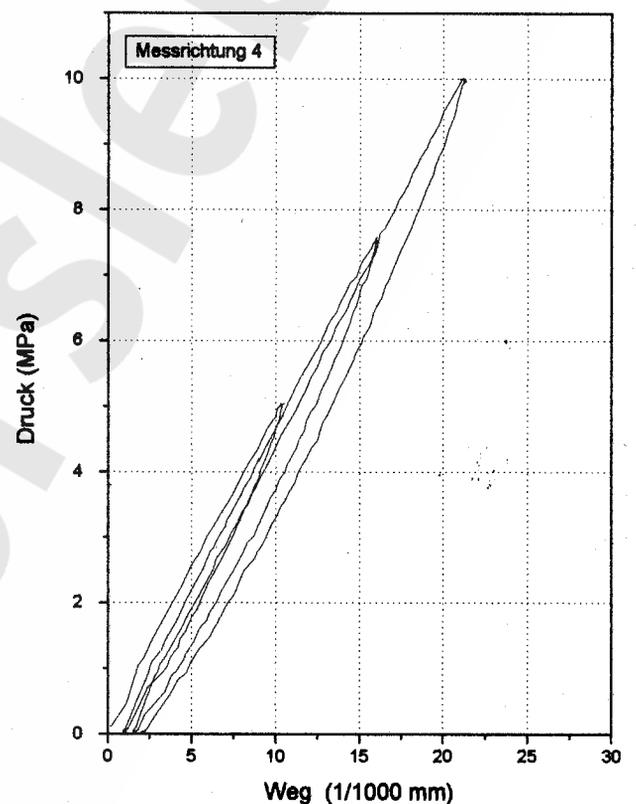
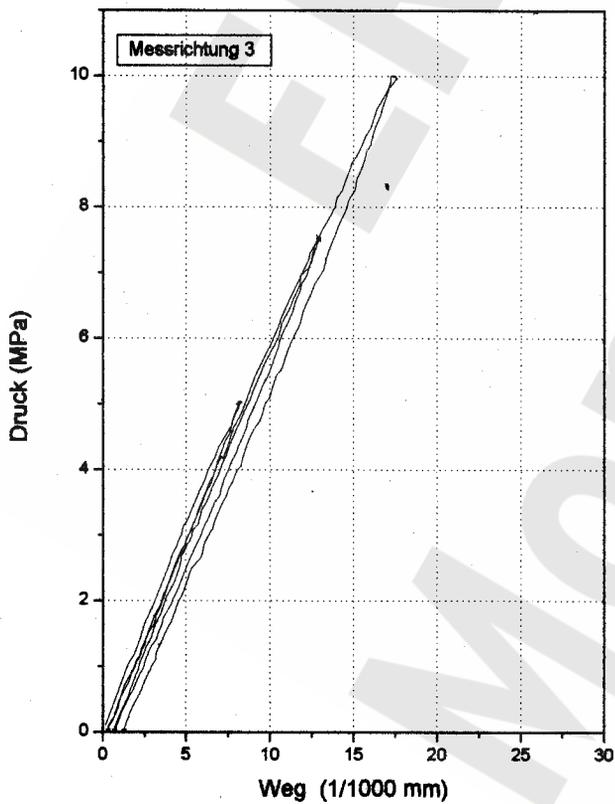
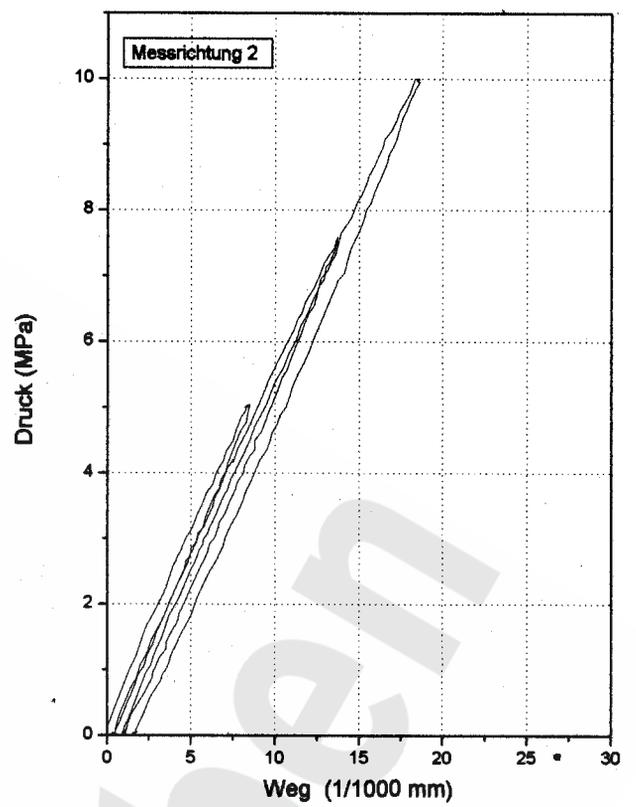
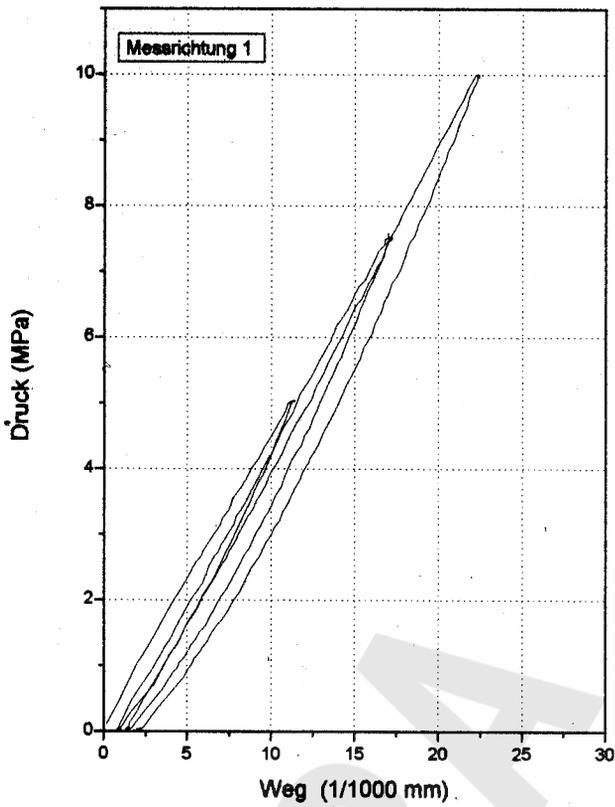
a) Spannungsbeträge



b) Richtung der maximalen Spannung  $S_1$



c) Grad der Spannungsanisotropie



Projekt : MORSLEBEN LOKATION 6  
 Versuchsbezeichnung : M6B1UB01  
 Material : ANHYDRIT  
 Belastung : 5/ 7,5/ 10 MPa  
 Versuchsdatum : 04.12.97 10.30'

**BGR**  
 B2.6/B2.1-08/00-Heu/Kü

Anlage 5.91

Last-Deformationsdiagramme für Prüfkörper aus Überbohrversuch M6B1UB01

Kern- bezeichnung <sup>1)</sup>	Stratigraph. Einheit	Entnahme- tiefe (m)	E-Modul (GPa)					Mittelwert (GPa) (p = 10/15/20 MPa)
			bei Entlastung p (MPa) von					
			5	7,5	10	15	20	
M6B1HZ01	z3HA	2,25 - 2,81	47,3	47,1	47,9	49,2	51,9	49,7
M6B1UB01	z3HA	9,75 - 10,25	61,3	60,2	59,9	61,2	61,7	60,9
M6B1UB02	z3HA	12,75 - 13,30	62,1	62,8	62,7	63,0	63,9	63,2
M6B1UB04	z3HA	20,25 - 21,00	66,5	65,1	65,5	66,4	66,9	66,3
M6B1UB05	z3HA	24,75 - 25,32	74,3	73,4	73,4	74,4	73,8	73,9
M6B1UB06	z3HA	25,50 - 26,08	80,3	77,5	76,6	76,8	76,4	76,6
M6B1UB08	z3HA	32,25 - 32,75	46,5	46,2	48,0	50,6	53,7	50,8
M6B1UB09	z3HA	36,75 - 37,77	50,9	49,3	49,4	52,6	54,2	52,1
M6B2UB01	z3HA	10,65 - 11,20	63,6	63,7	64,4	73,5	73,9	70,6
M6B2UB04	z3HA	23,39 - 23,89	37,2	38,5	40,8	55,7	56,8	51,1
M6B2UB05	z3HA	27,89 - 28,90	52,9	53,6	54,0	60,9	61,7	58,9

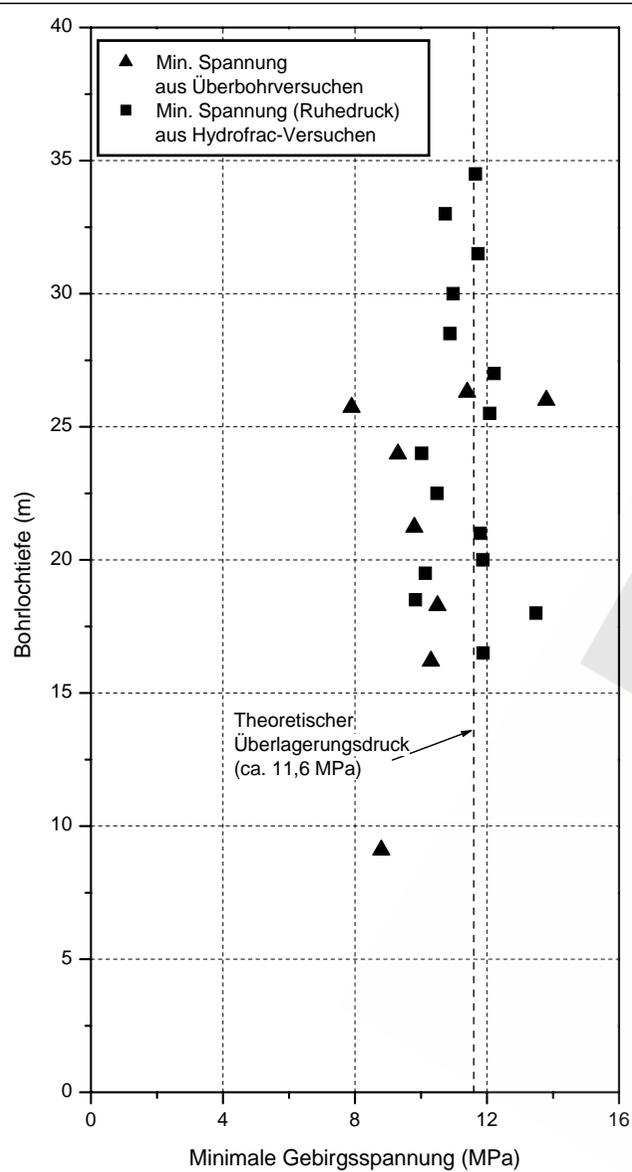
<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M6B2UB05:

- M = Morsleben
- 6 = Lokation 6
- B2 = Bohrung 2 (interne Bezeichnung)
- UB05 = Hohlkern aus Überbohrversuch Nr. 05

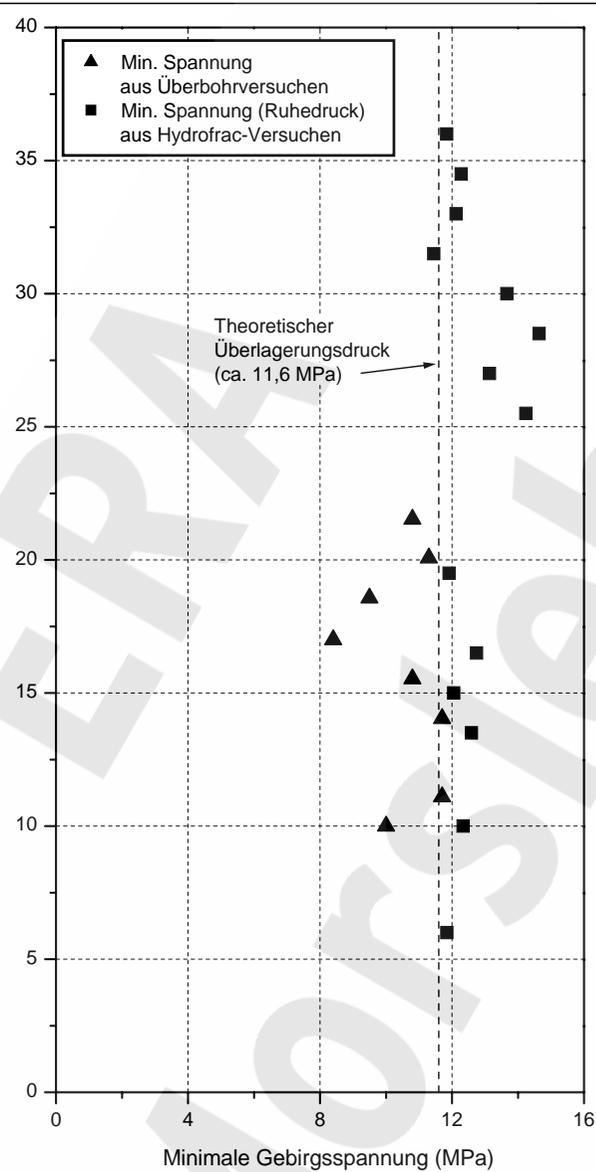
<sup>1)</sup> z.B. bedeutet M6B1HZ01:

- M = Morsleben
- 6 = Lokation 6
- B1 = Bohrung 1 (interne Bezeichnung)
- HZ01 = Hohlkern mit lfd. Nr., der nicht direkt aus einem Überbohrversuch stammt

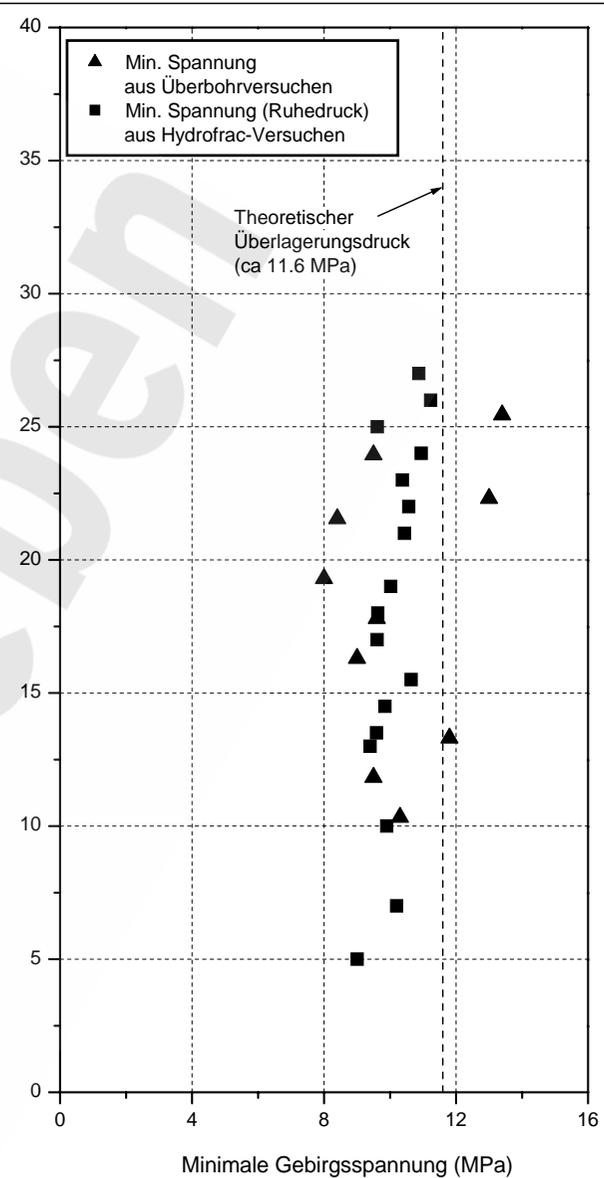
Gesamtmittel Bohrung B1 (z3HA): 61,7 GPa (nur Laststufen p = 10/15/20 MPa)  
Gesamtmittel Bohrung B2 (z3HA): 60,2 GPa (nur Laststufen p = 10/15/20 MPa)



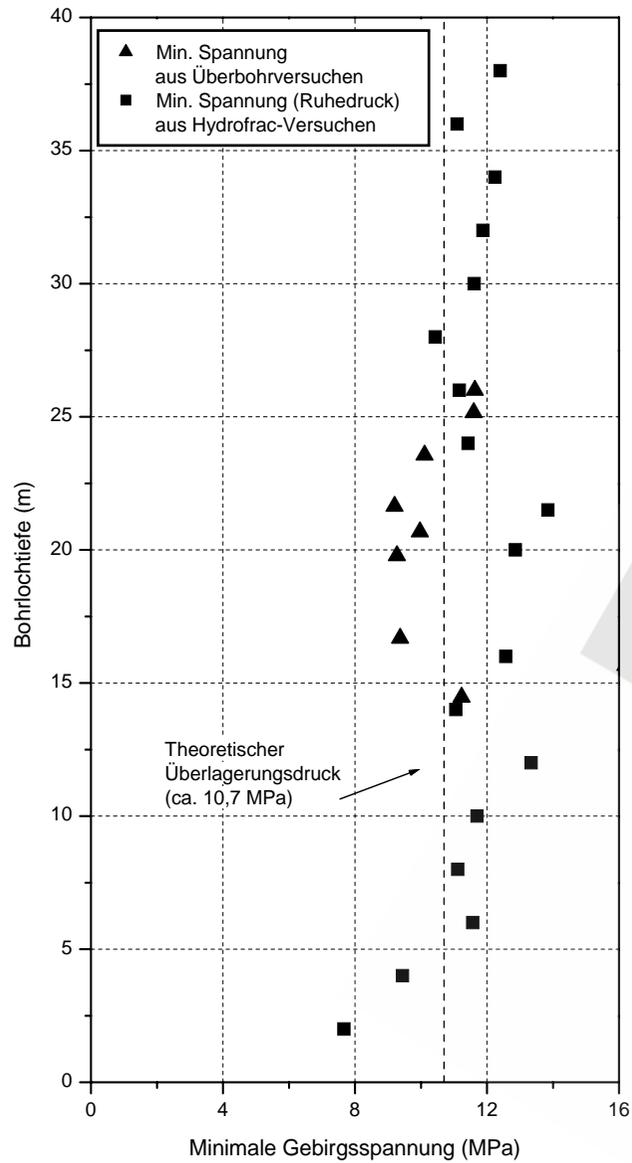
a) Horizontalbohrungen RB 409 und RB 402



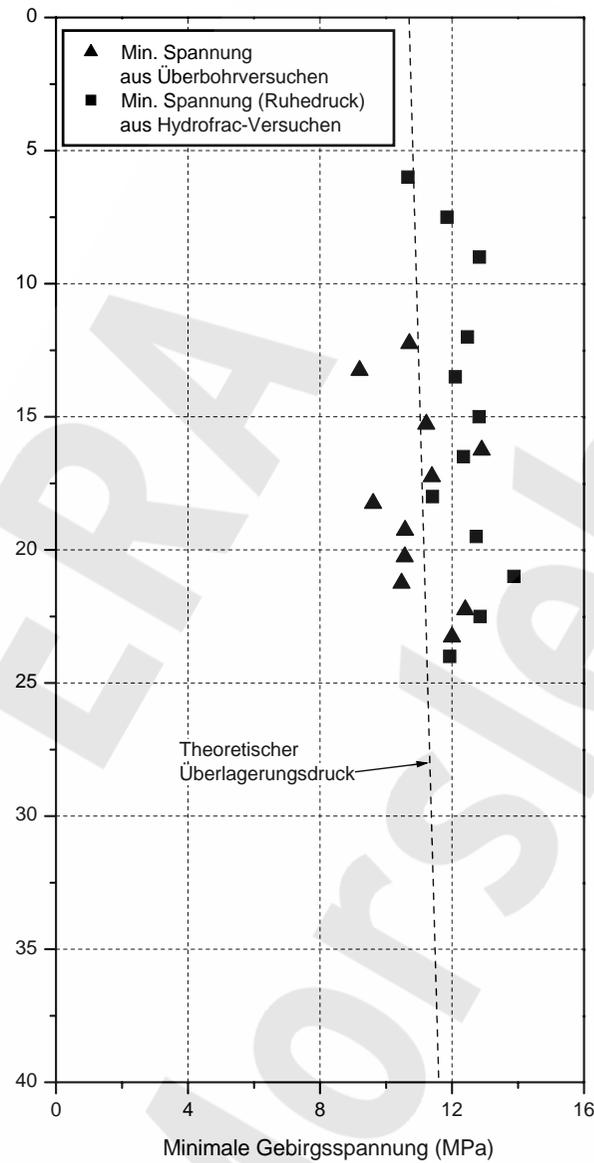
b) Horizontalbohrungen RB 408 und RB 466



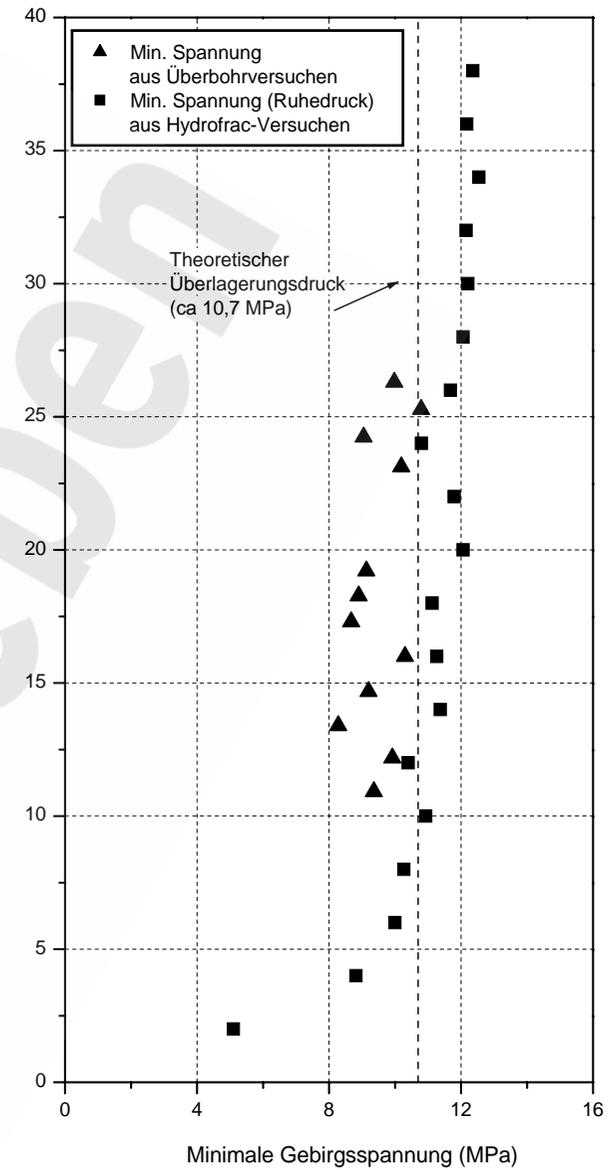
c) Horizontalbohrungen RB 410 und RB 403



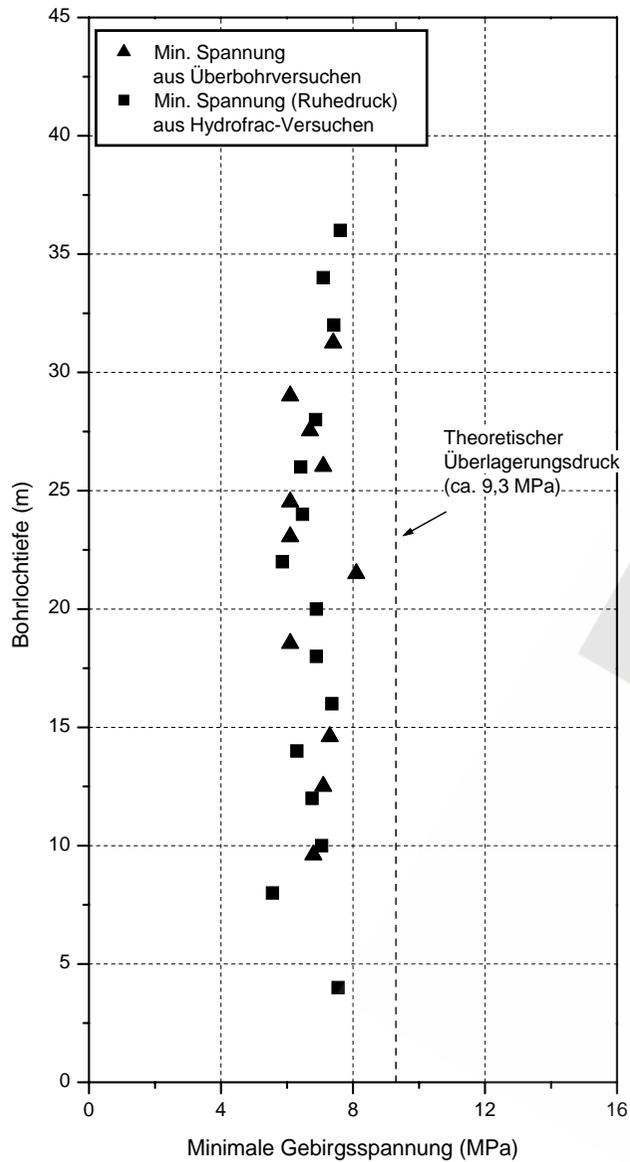
a) Horizontalbohrungen RB 421 und RB 475



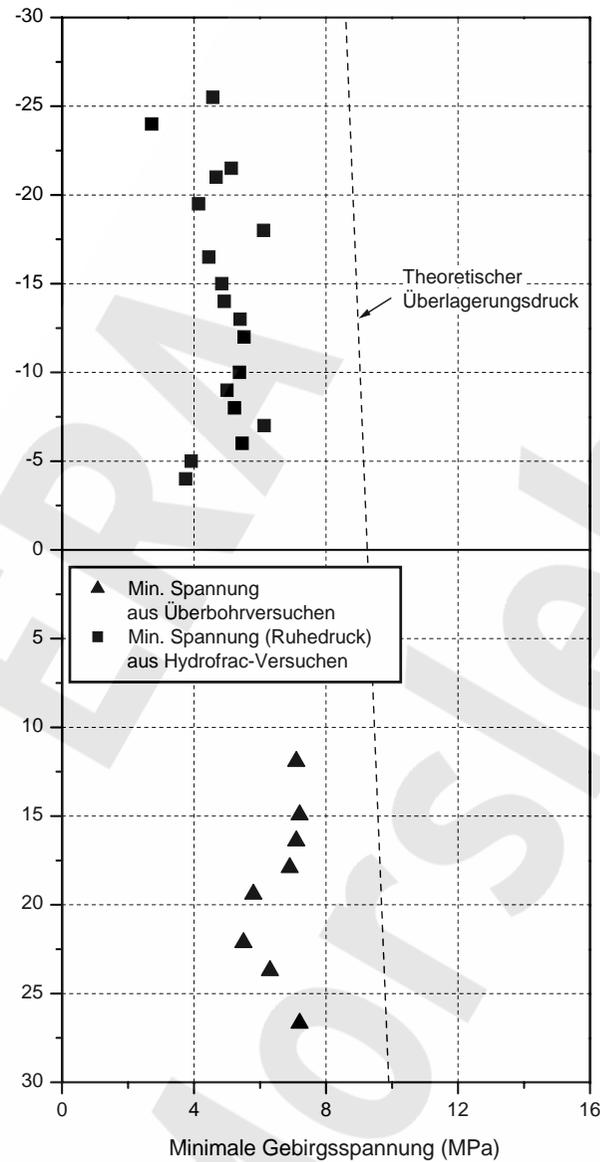
b) Vertikalbohrungen RB 422 und RB 476



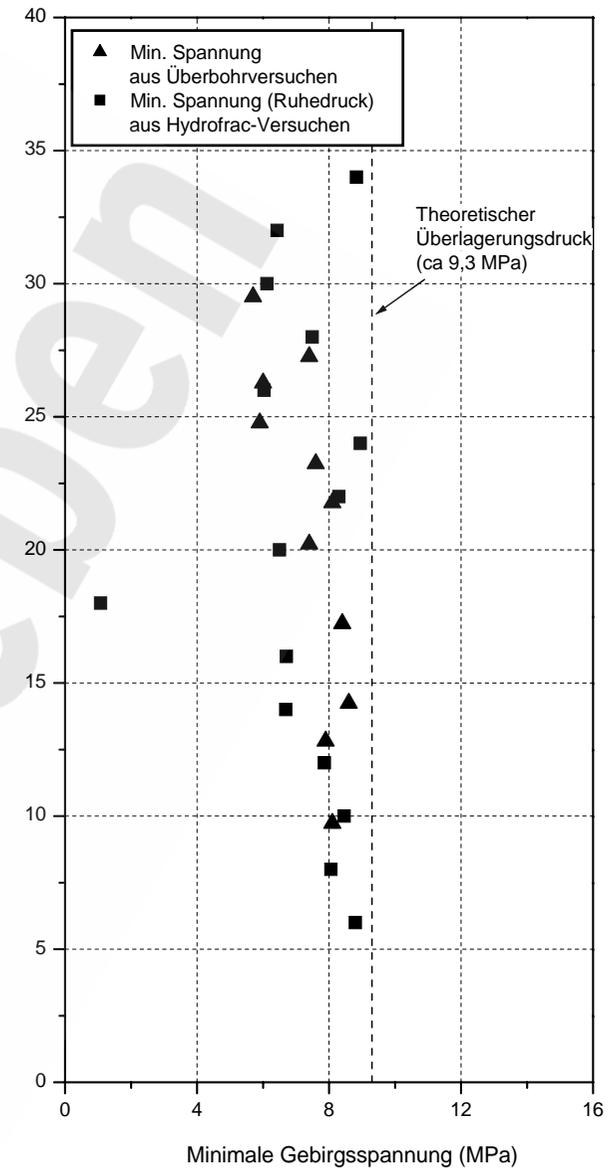
c) Horizontalbohrungen RB 423 und RB 468



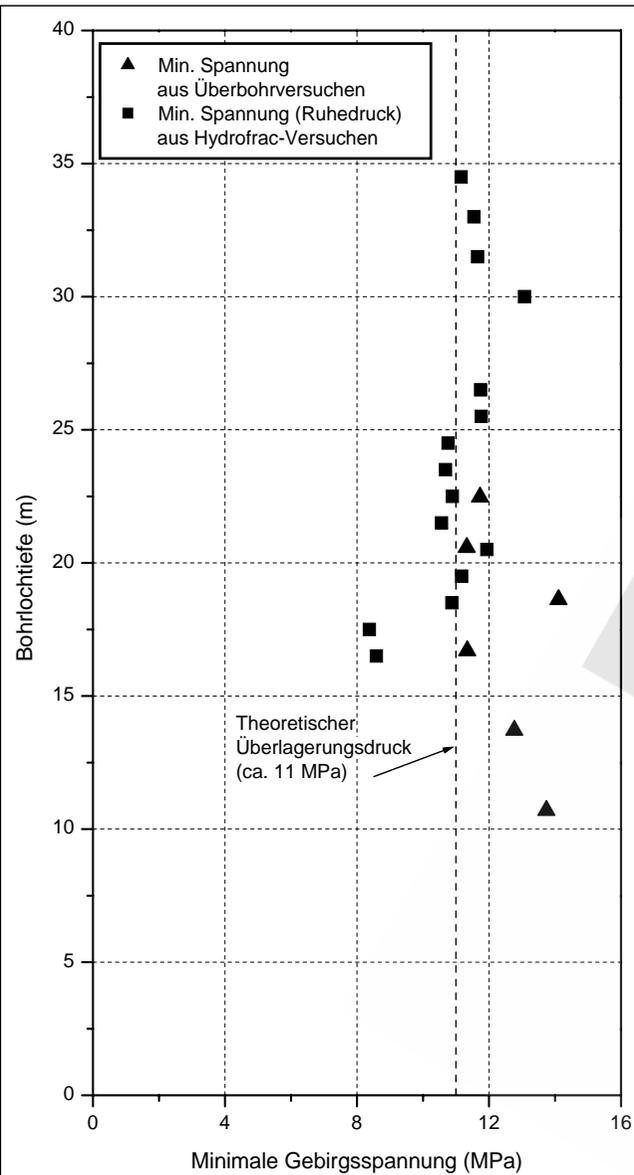
a) Horizontalbohrungen RB 434 und RB 427



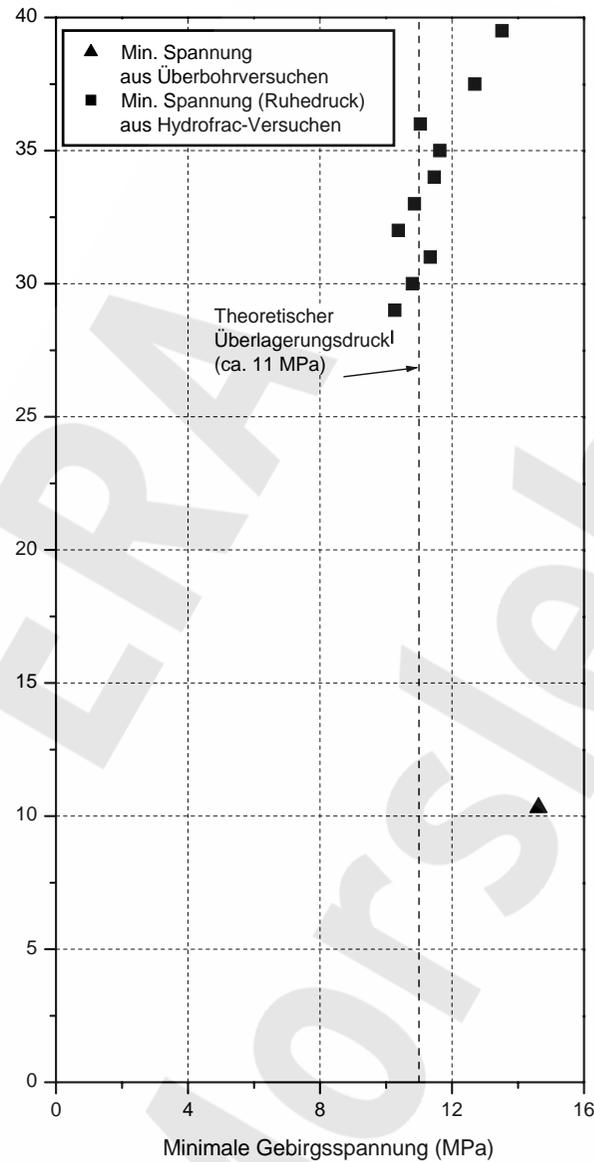
b) Vertikalbohrungen RB 435 und RB 428



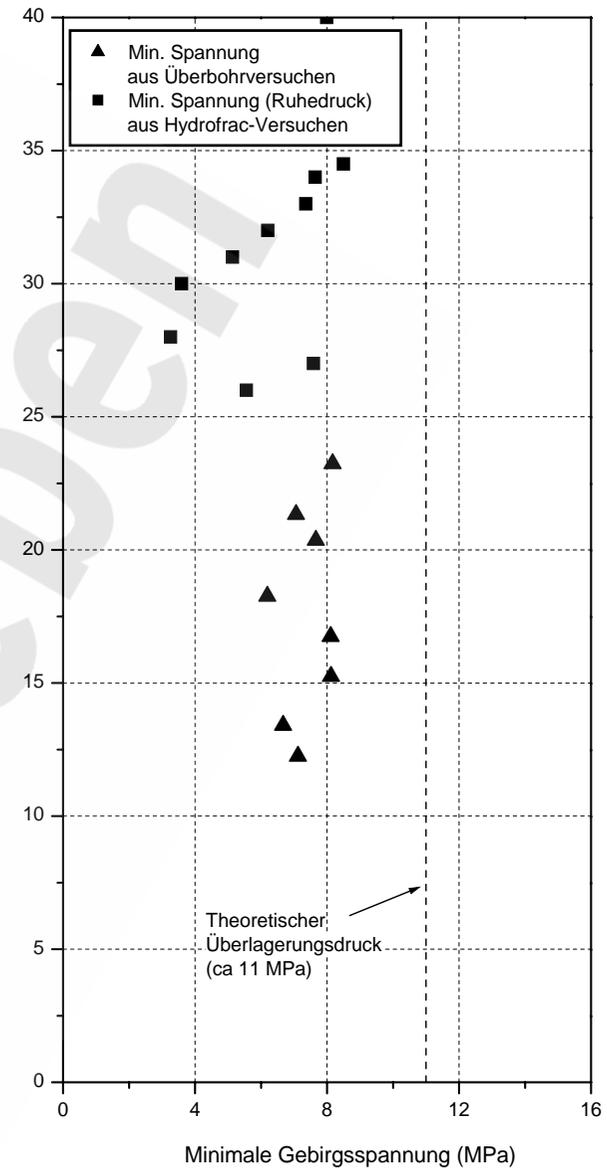
c) Horizontalbohrungen RB 436 und RB 429



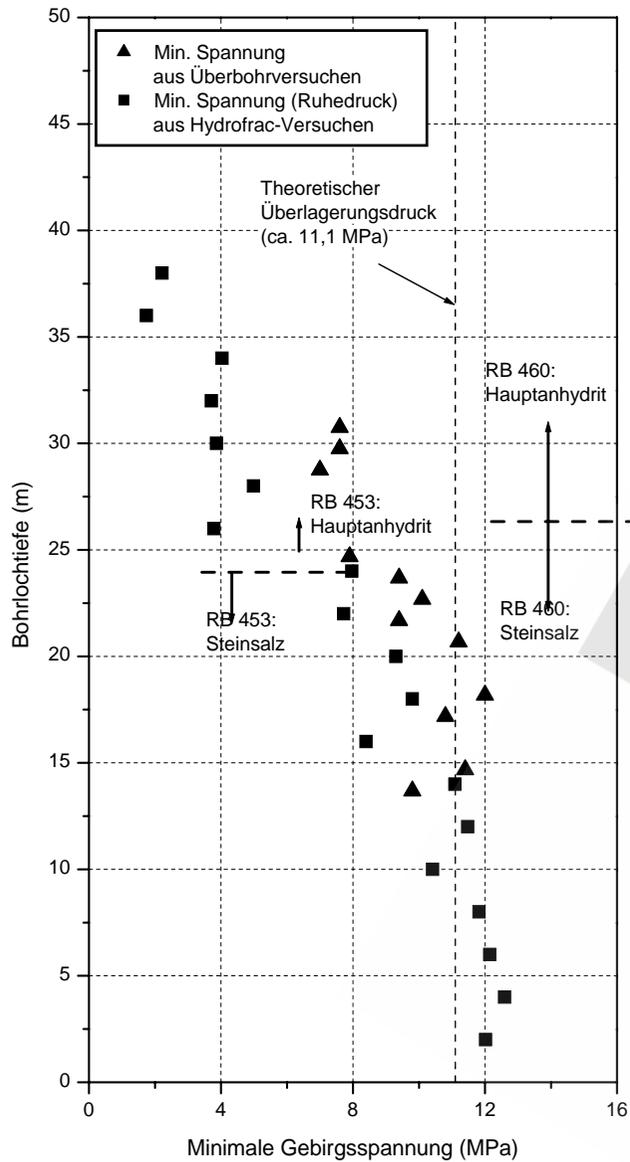
a) Horizontalbohrungen RB 447 und RB 440



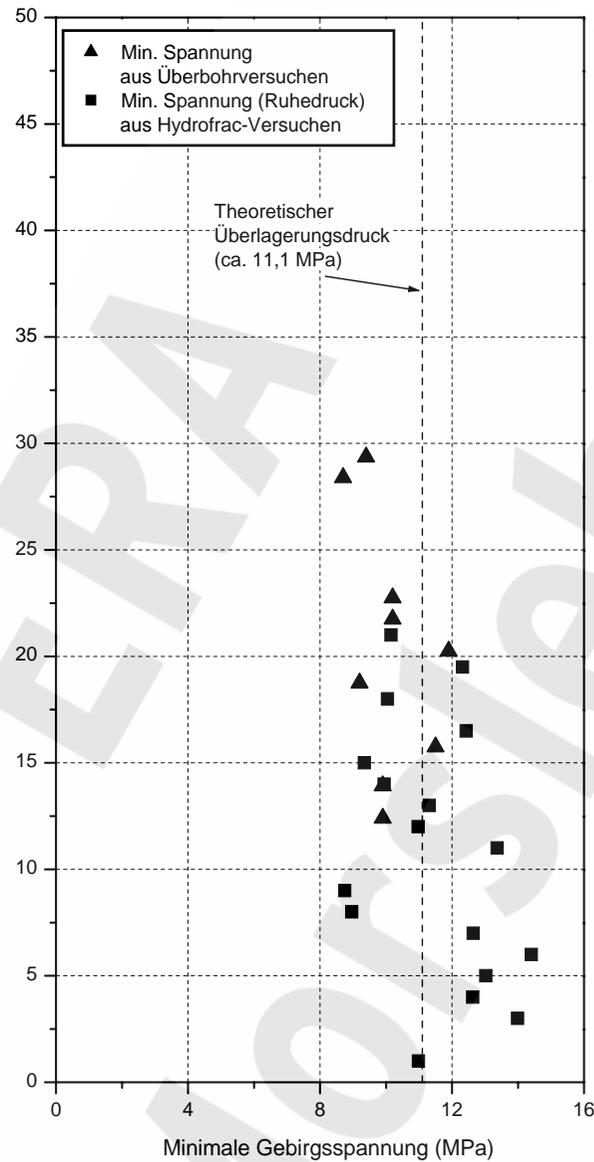
b) Horizontalbohrungen RB 448 und RB 441



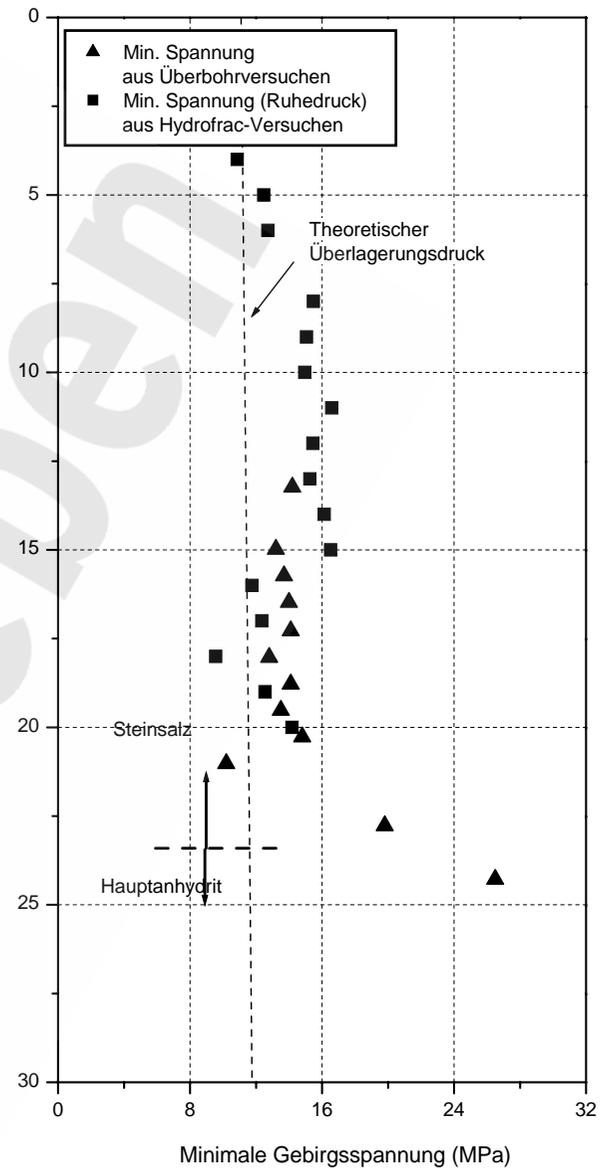
c) Horizontalbohrungen RB 449 und RB 442



a) Horizontalbohrungen RB 460 und RB 453



b) Horizontalbohrungen RB 461 und RB 454



c) Vertikalbohrungen RB 462 und RB 455