



Kavernenfeld Hengelo

Bohrung 480

Arbeitspaket 3:
Durchführung von Versuchen
an Proben aus dem
Grund- und Deckgebirge

Abschlussbericht

Auftrags-Nr.: 5145031243
vom 22.03.2004

Hannover, Dezember 2004

**BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN
UND ROHSTOFFE
HANNOVER**

Kavernenfeld Hengelo
Bohrung 480

Arbeitspaket 3:
Durchführung von Versuchen
an Proben aus dem
Grund- und Deckgebirge

Abschlussbericht

1. Autoren:	5.1.2.e 5.1.2.e 5.1.2.e
2. Auftrags-Nr.:	5145031243 vom 22.03.2004
3. Auftraggeber:	Akzo Nobel Salt bv Hengelo, Boortorenweg 27, 7554 RS Hengelo, Niederlande
4. Datum:	21. Dezember 2004
5. Tagebuch-Nr.:	12074/04

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung	3
2	Untersuchungsziel	3
3	Lageplan der Bohrung und Säulenprofil	4
4	Auswahl der Proben und petrographische Beschreibung	4
5	Prüfmaschinen, Versuchsführung und Auswertung	5
5.1	Dichtebestimmung	5
5.2	Ultraschallmessungen	5
5.3	Festigkeitsuntersuchungen	6
5.3.1	Prüfmaschinen	6
5.3.2	Versuchsverlauf und Belastung	7
5.3.3	Auswertung	8
6	Probenübersicht, Probenvorbereitung und Vermessung	11
7	Gesteinsdichten und dynamische Materialparameter	11
8	Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen	13
8.1	Spannungs-Dehnungs-Diagramme	13
8.2	Auswertung der elastischen Kennwerte, Feuchte und Bruchspannungen	14
8.3	Bruchkennwerte nach Drucker-Prager	15
8.4	Oktaederspannungen	17
8.5	Fotodokumentation	17
9	Zusammenfassung	17
	Literaturverzeichnis	19
	Tabellenverzeichnis	19
	Abbildungsverzeichnis	20
	Anlagenverzeichnis	20
	Tabellen (17 Seiten)	
	Abbildungen (6 Seiten)	
	Anlagen (39 Seiten)	

1 Veranlassung

Die Fa. Akzo Nobel plant, ihr Solekavernenfeld in Hengelo zu erweitern. Aufbauend auf Untersuchungen bzw. Gutachten von Prof. LANGER aus den Jahren 1984 und 1985 wurde die BGR mit weiterführenden Bohrkernuntersuchungen beauftragt.

In einer Vorbesprechung am 09.07.03 in der BGR wurden anhand der bereits vorhandenen geologischen Kenntnisse des Kavernenfeldes Hengelo (Normalprofil) der zu erwartende Aufwand und ein grobes Versuchsprogramm abgeschätzt.

Im November / Dezember 2003 wurde die Kernbohrung Twenthe-Rijn 480 geteuft und unter teilweiser Beobachtung eines BGR-Mitarbeiters zur Versendung verpackt. Am 15.01.04 wurden die Kerne in der BGR angeliefert. Die gemeinsame Kernbefahrung der Bohrung fand am 03.02.04 in der BGR in der Lager- und Versuchshalle statt. Anwesend waren neben Vertretern der BGR die Fa. Akzo Nobel mit Gutachtern und Vertreter des Niederländischen Bergamtes SodM.

Nach einem ausführlichen Angebot der BGR vom 23.02.04 erteilte Fa. Akzo Nobel am 22.03.04 den Auftrag u. a. für festigkeitsmechanische Untersuchungen am Deck- und Grundgebirge.

Gegenstand dieses Berichtes sind die Untersuchungsergebnisse von je fünf Proben aus drei Schichten des Deckgebirges und einer Schicht des Grundgebirges.

2 Untersuchungsziel

Das Ziel der hier aufgeführten Untersuchungen ist die Bestimmung der elastischen und festigkeitsmechanischen Parameter für die salzspiegelnahen Deckgebirgsschichten und für das Grundgebirge. Sie sind wesentlich für numerische Berechnungen und die daraus folgende Beurteilung der Standsicherheit der geplanten Kavernenfelderweiterung. Zur Bestimmung der dynamischen Gesteinsparameter und zur Abschätzung der Probenqualität wurden vor den festigkeitsmechanischen Versuchen routinemäßig zerstörungsfreie Ultraschallmessungen an den ausgewählten Kernen vorgenommen.

3 Lageplan der Bohrung und Säulenprofil

Der Lageplan der Bohrung Twenthe-Rijn 480 ist in Anlage 1 dargestellt. Anlage 2 zeigt das Säulenprofil mit Stratigraphie, Lithologie und Teufenlage. Eingetragen sind ebenfalls die in Abschnitt 7 erläuterten, für die Festigkeitsuntersuchungen als relevant gewählten Gesteinsschichten und die entsprechenden Bohrkern.

4 Auswahl der Proben und petrographische Beschreibung

Am 03.02.2004 fand in der BGR eine gemeinsame Kernbefahrung der Bohrung Twenthe-Rijn 480 statt. Es wurde entschieden, die in aluminiumkaschiereten Kunststoffschläuchen verpackten Kerne aus dem nichtsalinaren Bereich des Deck- und Grundgebirges nur stichprobenartig zu öffnen, um die ggf. sofort einsetzende Austrocknung zu minimieren.

Bei Erstellung des geologischen Schichtenverzeichnisses durch die BGR (Bornemann, 10. Woche 2004) wurden die Kerne des Deckgebirges am 08.03.04 von den BGR-Mitarbeitern Schnier und Stührenberg zur Auswahl der festigkeitsmechanischen Untersuchungen gesichtet.

Es wurden 3 relevante Gesteinstypen im Deckgebirge vorgefunden:

F1: braunroter Tonstein (trsoT/^t)

F2: graugrüner Tonstein mit überwiegendem Anhydrit (trso4/^ah,t)

F3: Wechsellagerung Anhydrit – graugrüner/dunkelgrauer Tonstein (trsoT/^t,ah)

Bis auf den braunroten Tonstein waren viele Kerne gebrochen, so dass nur eine begrenzte und meist mit Untermaß vorhandene Probenzahl für die festigkeitsmechanischen Versuche zur Verfügung stand. Die Mantelflächen waren deutlich von den Spuren des Bohrvorgangs gekennzeichnet (bohrungsbedingte Verjüngungen des Querschnitts). Insbesondere Schicht F2 zeigte starke Einschnürungen. Weiter war zu erwarten, dass wegen der Bruchgefahr nur wenige Proben auf der Drehbank bearbeitet werden konnten. Das Standardmaß $h/d = 100/250$ mm/mm konnte daher nicht immer eingehalten werden.

Am 02.04.04 wurden die Kerne des Grundgebirges von den BGR-Mitarbeitern Schnier und Stührenberg gesichtet. Die bereits mit Klebeband verschlossenen Kernschläuche wurden geöffnet und anschließend wieder verschlossen.

Das Grundgebirge unter den Salzschiechten zeigt 2 relevante Gesteinsarten:

Fx: brauner Tonstein, schluffig, feinsandig, ca. 2 m mächtig (trsmS/^t,u,fs)

F4: Schluff-/Feinsandstein (tonig?), ab etwa 487,60 m Kernteufe (trsmS/^t,u,fs)

Die Kernqualität war ähnlich wie im Deckgebirge. Als relevant für das bergsmechanische Verhalten wird der „Schluff-/Feinsandstein“ ab 487,6 m Kernteufe angesehen. Als Schicht F4 wurden daher 5 Kerne für die Festigkeitsuntersuchungen bestimmt.

In Tabelle 1 sind die ausgewählten Kerne, ihre groben Längen und ihre Teufenlage aufgelistet.

5 Prüfmaschinen, Versuchsführung und Auswertung

5.1 Dichtebestimmung

Standardmäßig werden die rohen Bohrkern mit der Säge grob abgelängt und dann auf der Drehbank zu zylinderförmigen Proben mit planparallelen Endflächen gedreht. Zur Ermittlung der Dichte werden die Proben vermessen und gewogen. Die Gesteinsdichte berechnet sich aus der Masse der Probe und ihrem Volumen:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

mit ρ = Gesteinsdichte (g/cm³)

m = Masse des Prüfkörpers (g)

V = Volumen des Prüfkörpers (cm³)

Bei den Abkürzungserläuterungen werden jeweils die verwendeten Einheiten angegeben.

5.2 Ultraschallmessungen

Die Ultraschallmessungen wurden mit dem Gerät USIP 12 und den Prüfköpfen K0,5S (für die P-Welle) und B1Y (für die S-Welle) der Firma Krautkrämer durchgeführt. Die Messfrequenz betrug $f_{\text{Mess}} = 0,5$ MHz für die P-Welle und $f_{\text{Mess}} = 1,0$ MHz für die S-Welle. Die Proben wurden einmal in ihrer Längsrichtung und zweimal in der Querrichtung durchschallt. Sofern eine Gefüge-

einregelung erkennbar war, wurde in Querrichtung jeweils parallel und senkrecht dazu gemessen. In Querrichtung ist die Sender-/Empfänger-Ankopplung wegen der zylinderförmigen Proben allgemein ungünstiger.

Die Ultraschallwellengeschwindigkeiten der P-Welle und der S-Welle ergeben sich als Quotient aus der Probenlänge bzw. dem -durchmesser und der gemessenen Laufzeit. Die Bestimmung der dynamischen Elastizitätskenngößen erfolgt durch die Gln. (2) und (3):

$$E_{\text{dyn}} = \frac{v_{\text{S}}^2 \cdot \rho \cdot (3v_{\text{P}}^2 - 4v_{\text{S}}^2)}{v_{\text{P}}^2 - v_{\text{S}}^2} \quad (2)$$

und

$$\nu_{\text{dyn}} = \frac{v_{\text{P}}^2 - 2v_{\text{S}}^2}{2 \cdot (v_{\text{P}}^2 - v_{\text{S}}^2)} \quad (3)$$

mit E_{dyn} = dynamischer Elastizitätsmodul (kPa)

ν_{dyn} = dynamische Poissonzahl (-)

v_{P} = Geschwindigkeit der P-Welle (m/s)

v_{S} = Geschwindigkeit der S-Welle (m/s)

ρ = Gesteinsdichte (g/cm^3)

5.3 Festigkeitsuntersuchungen

5.3.1 Prüfmaschinen

Die festigkeitsmechanischen Untersuchungen erfolgten mit den servohydraulischen triaxialen Prüfmaschinen der BGR. Für die Proben des Deckgebirges wurde die Anlage TRE-1002 eingesetzt. Aus zeitlichen Gründen wurde für das Grundgebirge parallel die Anlage TRE-2502 genutzt. Beide Maschinen der Firma Schenck-Trebel arbeiten nach dem Kármán-Prinzip und werden digital gesteuert.

Es können zylindrische Proben bis zu den Abmessungen $d/h = 100/250$ mm/mm bei maximalen Versuchstemperaturen von 200 °C gefahren werden. Gesteuert werden die Versuche servohydraulisch über einen Rechner mit einer digitalen Mess- und Regelelektronik der Firma MTS.

Die Maschinen gehören der Genauigkeitsklasse 1 nach DIN 51223 an. Mit der digitalen Regelung kann es insbesondere bei geringen Dehnungsgeschwin-

digkeiten gelegentlich zu Oszillationen der resultierenden Kraft kommen. Dies ist ggf. bei den Versuchsauswertungen vermerkt.

Zum Schutz gegen ein Eindringen des Druckmediums für den Manteldruck (Hydraulik-Öl) werden die Gesteinskerne bei Triaxialversuchen mit eng anliegenden Gummischläuchen ummantelt. Zwischen Prüfkörper und Gummimanschette wird eine Teflonfolie gelegt, um den Außenschlauch vor Verletzungen durch die schärferen Kanten der Gesteinsbruchkörper zu schützen. Dadurch können größere Verformungen im Nachbruchbereich erreicht werden, da die Gefahr von frühzeitigen Schlauchrissen vermieden wird.

5.3.2 Versuchsverlauf und Belastung

Die wesentlichen Auswertegrößen von Deformations- und Festigkeitsuntersuchungen sind der Elastizitätsmodul, die Bruchspannung und die Bruchdehnung. Bei weggeregelten triaxialen Festigkeitsversuchen an Sedimentgesteinen bildet sich nach Überschreiten der Bruchfestigkeit unter gleich bleibenden Belastungsbedingungen meist ein ausgeprägter Nachbruchbereich aus, der ebenfalls ausgewertet wurde (Spannungsplateau in der Nachbruchphase, Restverformungsmodul). Die Versuche wurden bei „Raumtemperatur“ gefahren. Die tatsächlich am Kern anliegende Temperatur ist in der Triaxialzelle wegen der Maschinen- bzw. Ölwärme etwas unterschiedlich (siehe Angaben in Abschnitt 8).

Die triaxialen Festigkeitsversuche laufen wie folgt ab:

- (1) Aufbringen des hydrostatischen Ausgangsspannungsniveaus durch die gleichmäßig kontinuierliche Steigerung der Axial- und Radiallasten mit 1,0 MPa/min.
- (2) Erhöhung des Spannungsdeviators durch Steigerung der Axiallast bei konstantem Manteldruck mit konstanter Stauchungsrate, hier $1,0 \cdot 10^{-5}$ [1/sec].
- (3) Axiale Entlastung der Probe mit gleicher Rate bis etwa zum hydrostatischen Ausgangsspannungsniveau zur Ermittlung des E-Moduls. Die Entlastung wird möglichst vor Erreichen der Fließgrenze am Ende des linearen Teiles der Erstbelastung angesetzt. Dann erfolgt Wiederbelastung und ggf. eine nochmalige Entlastungsschleife.
- (4) Fortsetzung der Belastung mit konstanter Stauchungsrate bis zum Bruch und weiter in den Nachbruchbereich hinein.
- (5) Ent- und Wiederbelastung der Probe wie unter (3) zur Ermittlung des Restverformungsmoduls RVM.
- (6) Absenken des Manteldruckes mit 1,0 MPa/min bis zur vollständigen Entlastung. Beenden der weggeregelten axialen Belastung (Stauchungsrate).

Als Ausgangsspannungsniveau bzw. konstanter seitlicher Stützdruck σ_3 für die jeweils 5 Proben einer Schicht wurden die Spannungsstufen $\sigma_3 = 0,0; 1,0; 2,5; 6,0$ und $10,0$ gewählt. Bei der Entlastung (6) können theoretisch zu jedem Zeitpunkt die Nachbruchfestigkeiten ermittelt werden. Sie wurden, sofern relevant, bei Manteldrücken von $7,5; 5,0; 2,5$ und $1,0$ MPa abgelesen.

Nach dem Ausbau aus der Prüfmaschine wurden je 1 – 3 Teilstücke der zerstörten Proben zur Bestimmung des Feuchtegehaltes in einen Wärmeschrank gelegt und bei 105 °C getrocknet.

5.3.3 Auswertung

Die Weggeschwindigkeit ergibt sich aus dem Produkt der vorgegeben Stauchungsrate und der Probenausgangslänge:

$$\dot{s}_1 = \dot{\varepsilon}_1 \cdot l_0 \quad (4)$$

mit $\dot{s}_1$ = Weggeschwindigkeit (Länge pro Zeiteinheit) (mm/s)

$\dot{\varepsilon}_1$ = Stauchungsrate (s^{-1})

l_0 = Probenausgangslänge (mm)

Die Axialspannung ergibt sich aus dem Quotienten der vom Hauptzylinder der Triaxialprüfanlage erbrachten Kraft und der Probenquerschnittsfläche bei Versuchsbeginn. Dabei wird wegen der hohen Verformung die sich ändernde Querschnittsfläche einbezogen. Die in der Realität etwas tonnenförmige Gestaltsänderung wird üblicherweise durch einen volumentreuen Zylinder beschrieben. Auch der Einfluss des Manteldrucks ist zu berücksichtigen.

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_0} \left(1 - \frac{s_1}{l_0} \right) + \frac{s_1}{l_0} \sigma_3 \quad (\text{MPa}) \quad (5)$$

mit σ_1 = Axialspannung (MPa)

F_1 = Axialkraft (N)

A_0 = Probenquerschnittsfläche bei Versuchsbeginn (mm^2)

s_1 = axiale Probenverformung (mm)

σ_3 = Manteldruck (MPa)

Eine Korrektur der Axialkraft ist wegen des Zelleninnendruckes erforderlich, wenn die Querschnittsfläche des Prüfkörpers A von der Querschnittsfläche des Druckstempels (A_{St}) beim Durchgang durch die Zellenwand abweicht. Diese wird elektronisch im Rahmen der Versuchssteuerung berücksichtigt.

Die Bruchfestigkeit σ_B wird hier aus der maximal erreichten Kraft $F_{1,B}$ bestimmt und wird als Differenzspannung $\sigma_1 - \sigma_3$ angegeben.

$$\sigma_B = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{F_{1,B}}{A} - \sigma_3 \quad (6)$$

mit σ_B = Bruchfestigkeit (MPa)

$F_{1,B}$ = maximal erreichte Axialkraft (N)

A = Probenquerschnittsfläche zum Zeitpunkt $F_{1,B}$ (mm²)

Die wahre axiale Dehnung bzw. -stauchung ε_1 ist wie folgt definiert:

$$\varepsilon_1 = \ln \left(1 + \frac{s_1}{l_0} \right) \quad (7)$$

$s_1 > 0$: Probenlängung, $s_1 < 0$: Probenverkürzung

Als Anfangsverformungsmodul E_v wird die Steigung der Spannungs-Dehnungskurve der Erstbelastung bei 50 % der Bruchspannung ausgewertet.

Der Elastizitätsmodul E ergibt sich aus der Steigung der Sekante durch die Drittelpunkte des Entlastungsastes in der Ent- und Wiederbelastungsschleife nach (3) in Abschnitt 5.3.2 vor dem Bruch. Er wird als Quotient der Differenzen der Spannungen und der Stauchungen berechnet:

$$E = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\Delta\varepsilon} \quad (8)$$

mit E = Elastizitätsmodul (MPa)

$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ = Differenz der Differenzspannungen (MPa)

$\Delta\varepsilon$ = Differenz der Stauchungen (-)

Die statische Nachbruchfestigkeit (oder Restscherfestigkeit) ist das weitgehend konstante Spannungsniveau $\sigma_1 - \sigma_3$, das sich nach dem Bruch bei gleichbleibenden Versuchsbedingungen zeigt. Es ist hauptsächlich von der Ausbildung der Scherfläche(n) in der Probe abhängig.

Der Restverformungsmodul wird aus der RVM-Schleife gemäß (5) in Abschnitt 5.3.2 ermittelt. Er ist die Sekantensteigung zwischen dem unteren Wendepunkt und dem Schnittpunkt der End- und Wiederbelastung.

Bei Entlastung der Probe kann zu jedem Manteldruckwert die sogenannte dynamische Nachbruchfestigkeit abgelesen werden. Sie liegt meist etwas niedriger als die statische Nachbruchfestigkeit, da sich die Scherflächen aufgrund der kontinuierlich absinkenden Spannung σ_3 weniger konsolidieren können.

Die Darstellung der Bruchspannungen erfolgt wie bei Langer (1984) mit der Invariantendarstellung nach Drucker-Prager. Dazu werden die 1. Invariante des Spannungstensors und die 2. Invariante des deviatorischen Spannungstensors berechnet:

$$I_{\sigma} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (9)$$

$$II_s = 1/6[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (10)$$

mit $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = größte, mittlere und kleinste Hauptspannung (MPa)

Für triaxiale Versuche mit $\sigma_2 = \sigma_3$ gilt:

$$I_{\sigma} = \sigma_1 + 2\sigma_2 \quad (11)$$

$$\sqrt{II_s} = \frac{1}{\sqrt{3}}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (12)$$

Das modifizierte Bruchkriterium nach Drucker-Prager lautet:

$$F = \alpha \cdot (I_{\sigma})^p + \sqrt{II_s} - k = 0 \quad (13)$$

Wählt man den Exponenten $p = 1$, beschreiben die Bruchkennwerte α und k im Invariantendiagramm eine Gerade.

Für die heute vielfach gebräuchliche Darstellung in der Oktaederebene werden die Oktaedernormalspannung σ_o und die Oktaederschubspannung τ_o berechnet

(τ_o/σ_o – Diagramm). Es gelten folgende Beziehungen:

$$\sigma_o = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (14)$$

$$\tau_o = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (15)$$

Für rotationssymmetrische Verhältnisse mit $\sigma_2 = \sigma_3$ ergibt sich:

$$\tau_o = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (16)$$

6 Probenübersicht, Probenvorbereitung und Vermessung

Aus den Kernen des Deck- und Grundgebirges der Bohrung Twenthe-Rijn 480 (siehe Abschnitt 4) wurden 5 Proben je Schicht gefertigt.

Wie nach der visuellen Beurteilung erwartet, erwiesen sich die meist senkrecht zur Achse geschichteten Proben des Deck- und Grundgebirges als zu instabil für die Bearbeitung auf der Drehbank. Lediglich die Proben Nr. 020 (Schicht F1), 032 und 033 (Schicht F2) konnten erfolgreich abgedreht werden. Alle anderen Proben wurden am Mantel im erbohrten Zustand belassen und so genau wie möglich mit der Bandsäge auf Länge gebracht. Die Kerne wurden sofort nach der Bearbeitung wieder eingeschweißt. Die Arbeiten fanden am 02., 05. und 06.04.04 statt.

Vor dem Versuchsbeginn wurde jede Probe gewogen und mit der Schieblehre vermessen. Der Durchmesser wurde oben, unten und in der Mitte jeweils im Winkel von 90° gemessen. Die Länge wurde an den Stirnflächenrändern und in der Mitte ebenfalls im Winkel von 90° registriert. Aus den jeweils 6 Messwerten wurde der Mittelwert zur Volumenberechnung gebildet. Nach dem Fotografieren und Durchschallen wurden die Proben ummantelt und in die Triaxialpresse eingebaut. Einige wenige Proben wurden gesondert behandelt, wie z. B. Ausbesserung kleiner Schadstellen, um einen vorzeitigen Bruch zu vermeiden. Auf einen möglichst schnellen Probeneinbau wurde Wert gelegt, um Austrocknungen der Kerne zu vermeiden.

In Anlage 3 ist die petrographische Beschreibung der Proben gegeben. Die Tabellen 2 bis 5 zeigen eine Übersicht mit Labor- und Probennummern, Teufenangaben, geometrischen Daten und Gewicht für die 4 relevanten Gesteinschichten. Es sei darauf hingewiesen, dass aufgrund der ungenauen Probengeometrie alle daraus abgeleiteten Größen mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet sind.

7 Gesteinsdichten und dynamische Materialparameter

In den Tabellen 6 bis 9 sind die aus den Werten der Tabellen 2 bis 5 errechneten Gesteinsdichten angegeben. Insgesamt wurden Dichten zwischen 2,16 und 2,87 g/cm³ ermittelt. In den hauptsächlich aus Ton und Anhydrit bestehenden Proben deuten höhere Dichten auf einen höheren Anhydritanteil hin, während geringere Dichten auf überwiegend tonige Anteile hinweisen. Bei erhöhtem Wassergehalt sind zusätzlich schluffige oder feinsandige Anteile zu vermuten.

Nach LANGER (1985) wurden die damals untersuchten Proben der Bohrung Hengelo wie folgt klassifiziert:

- a) Anhydrit: $2,8 < \rho < 2,9 \text{ g/cm}^3$,
Mittelwert der Proben: $2,88 \text{ g/cm}^3$,
- b) Ton/Schluffstein/Anhydrit $2,6 < \rho < 2,8 \text{ g/cm}^3$,
Mittelwert der Proben: $2,67 \text{ g/cm}^3$,
- c) Ton/Schluffstein $2,3 < \rho < 2,6 \text{ g/cm}^3$,
Mittelwert der Proben: $2,43 \text{ g/cm}^3$

Der Mittelwert wurde aus den untersuchten Proben errechnet.

Die Schicht F1 besteht aus rotbraunem Tonstein mit Anhydritknollen/-lagen oder Flasern und z. T. mit graugrünen Tonsteinbrocken. Die ermittelten Probendichten liegen zwischen $2,43 < \rho < 2,54 \text{ g/cm}^3$ bei einem Mittelwert von $2,50 \text{ g/cm}^3$. Sie sind damit etwas größer als in der von LANGER (1985) klassifizierte Gesteinskennung (c), „Ton/Schluffstein mit wenig Anhydrit“ (Mittelwert $\rho = 2,43 \text{ g/cm}^3$).

Die Schicht F2 besteht aus grauem Anhydritgestein mit Tonsteinlagen bzw. geschichtetem graugrünen Tonstein mit Anhydritlagen. Die Wechselfolgen weisen eine ausgeprägte senkrechte Schichtung auf. Die Probendichten liegen zwischen $2,81 < \rho < 2,87 \text{ g/cm}^3$ bei einem Mittelwert von $2,84 \text{ g/cm}^3$. Sie entsprechen damit der Gesteinskennung (a) von LANGER (1985) „Anhydrit mit mehr oder weniger Schluff/Tonsteinlagen“ (Mittelwert $\rho = 2,88 \text{ g/cm}^3$).

Die Proben der Schicht F3 wurden aus 2 Teufenlagen entnommen, die von der Schicht F2 getrennt sind. Schicht F3 besteht aus einer Wechselfolge von dunkelgrauem Tonstein und hellgrauen Anhydritlagen. Die Probendichten liegen zwischen $2,70 < \rho < 2,81 \text{ g/cm}^3$ bei einem Mittelwert von $2,75 \text{ g/cm}^3$. Sie liegen damit zwischen den Gesteinskennungen (a) und (b) von LANGER (1985) „Anhydrit mit mehr oder weniger Schluff/Tonsteinlagen“ bzw. „Ton/Schluffstein/Anhydrit in Wechsellagerung bzw. mit starkem Anhydritanteil“ (Mittelwert $\rho = 2,88$ bzw. $2,67 \text{ g/cm}^3$).

Die Schicht F4 besteht aus rotbraunem Tonstein, schluffig/feinsandig, z. T. mit grünen Tonsteinbänkchen oder Anhydritbrocken. Die ermittelten Probendichten zeigen mit Werten zwischen $2,16 < \rho < 2,49 \text{ g/cm}^3$ bei einem Mittelwert von $2,31 \text{ g/cm}^3$ die größte Bandbreite. Sie sind damit gleich oder geringer als in der Gesteinskennung (c) von LANGER (1985) „Ton/Schluffstein mit wenig Anhydrit“ (Mittelwert $\rho = 2,43 \text{ g/cm}^3$).

In den Tabellen 6 – 9 sind die Durchschallungsergebnisse und die daraus berechneten dynamischen Gesteinskenngrößen nach den Gleichungen (2) und (3) angegeben. Nicht alle Messungen führten zu einem Ergebnis. Bei der Durchschallung in Längsrichtung war keine S-Welle zu ermitteln, so dass hier keine dynamischen Materialparameter angegeben werden können. Bei allen

Proben des Grundgebirges wurden vermutlich aufgrund der materialbedingten schlechten Ankopplungsmöglichkeit keine verwertbaren Ergebnisse erzielt. In radialer Richtung sind wegen der horizontalen Gesteinslagerung nahezu alle Messungen als „parallel zur Schichtung“ anzusehen. Standardmäßig wurden sie um 90° versetzt durchschallt. In der rein statistischen Auswertung (Tabellen 6 – 8) ergeben sich dennoch Differenzen. Eine Auswertung der plausiblen Ergebnisse führt zu folgenden Ergebnissen:

In Schicht F1 liegt der dynamische E-Modul bei ca. 25 000 MPa, die Querkontraktionszahl bei etwa 0,34. In Schicht F2 ergibt sich für den dynamischen E-Modul ein deutlich höherer Wert mit ca. 75 000 MPa. Die Querkontraktionszahl ist mit ca. 0,27 geringer. Für Schicht F3 können die Werte grob mit 56 000 MPa bzw. 0,36 angegeben werden.

8 Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen

8.1 Spannungs-Dehnungs-Diagramme

Die Festigkeitsuntersuchungen wurden wie in Abschnitt 5.3.2 beschrieben durchgeführt. Bei den ersten Versuchen (Proben Nr. 020, 022, 024 und 025) mit der Prüfmaschine TRE-2001 kam es aufgrund der empfindlichen digitalen Maschinensteuerung zu Oszillationen der Regelkraft F_1 . Die direkte analoge Aufzeichnung zeigt den Effekt nur bei hoher Auflösung, wie Anlage 4 beispielhaft anhand der F_1 - s_1 -Diagramme zu Versuch Nr. 020 zeigt. Das Versuchsergebnis und die Auswertung sind dadurch nicht beeinträchtigt. In den meisten weiteren Versuchen konnten diese Effekte durch regeltechnische Korrekturen vermieden werden. Bei den Proben des Grundgebirges traten an der Maschine TRE-2502 vereinzelt ähnliche Effekte auf.

In Anlage 5 sind die Spannungs-Dehnungs-Diagramme in der Darstellung $(\sigma_1 - \sigma_3) = f(\epsilon_1)$ nach den Gleichungen (6) und (7) des Abschnitts 5.3.3 für die Schichten F1 bis F4 abgebildet. Sie zeigen folgenden Verlauf: Belastungsphase, E-Modulschleife(n), Bruchphase und Nachbruchphase mit Restverformungsmodulschleife.

Folgende Besonderheiten sind zu vermerken:

Wegen einer Systemumstellung sind die Kernbezeichnungen nicht völlig identisch mit den Angaben in den Tabellen 2 – 5 dieses Berichtes. Eine Identifikation über die Kern- bzw. Proben-Nr. ist aber eindeutig.

Bei einigen Proben (021, 029, 030) wurden kleine, an den Endflächen ausgebrochene Stücke mit Kleber fixiert. Einige schadhafte Stellen oder kleine Löcher an der Oberfläche wurden mit Gips oder Epoxydharz ausgefüllt (021, 025). Kern 041 zeigte deutliche Risse in Längsrichtung. Wie bei den kernbohrungsbedingten Unebenheiten und Einschnürungen an den Mantelflächen konnten keine Auswirkungen auf das Versuchsergebnis festgestellt werden.

In der Nachbruchphase wurde bei Probe 025 die Sicherheitsschaltung ausgelöst, die den Versuch entlastete. Nach Wiederbelastung und programmgemäßer Fortführung war das erreichte Spannungsniveau um 1 – 2 MPa geringer. Ein ähnliches Verhalten konnte bei Probe 030 kurz vor dem Bruch beobachtet werden.

8.2 Auswertung der elastischen Kennwerte, Feuchte und Bruchspannungen

In den Tabellen 10 bis 13 sind die aus den Festigkeitsversuchen ermittelten Kennwerte (E , E_v , $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{Bruch}}$, $(\epsilon_1)_{\text{Bruch}}$, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{Nachbruch}}$, RVM, Versuchsdauer t und Feuchtegehalt nach dem Versuch) aufgelistet. Neben weiteren charakteristischen Kenngrößen ist die in der Triaxialzelle im Öl während des Versuchs gemessene Temperatur vermerkt.

Die Verformungskennwerte E , E_v und RVM zeigen mit Ausnahme des Grundgebirges eine beträchtliche Streubreite. Eine trendmäßige Abhängigkeit von der Probendichte oder dem anliegenden Manteldruck σ_3 ist nicht zu erkennen. Die Mittelwerte der Schichten F2 und F3 (z. B. $E = 28\,300$ bzw. $15\,000$ MPa) sind deutlich größer als die der Schichten F1 ($E = 8\,400$ MPa) und F4 ($E = 6\,100$ MPa).

Der an ausgewählten Probenstücken gemessene Feuchtegehalt lag in der Schicht F1 zwischen 5,5 und 8,8 Gewichts-%. In der Schicht F2 wurden 0 – 2,3 %, in der Schicht F3 0 – 4,8 %, gemessen. Geringer Feuchtegehalt zeugt von hohem Anhydritanteil. Im Grundgebirge (nur 1 Probenstück je Kern) waren mit 7,3 bis 16,3 % erheblich höhere Feuchtegehalte zu verzeichnen. Auch die Werte innerhalb einer Schicht differierten, was teilweise erkennbare Auswirkungen auf die Festigkeitsergebnisse hat.

Abb. 1 zeigt alle ermittelten Bruchspannungen nach Gl. (6) für unterschiedliche Probendichten und Manteldrücke. Die Ergebnisse jeder Gesteinsschicht sind zur besseren Identifikation mit einer gestrichelten Linie verbunden. Die Symbole aus den Versuchen mit $\sigma_3 = 0$ MPa (einaxiale Druckfestigkeit) sind vergrößert.

Als grobe Charakterisierung ist ein Anstieg der Bruchspannungen mit steigender Dichte ersichtlich. Die höchsten Bruchspannungen ($\sigma_1 - \sigma_3$) werden mit den stark anhydrithaltigen Kernen der Schicht F2 erzielt. Die Proben 035 und 032 mit $\rho = 2,86$ g/cm³ erreichen Werte von 76 und 59 MPa. Probe 034 erreicht 53 MPa. Die Kerne 031 und 033 mit $\rho = 2,81$ g/cm³ erreichen „nur“ 38 bzw. 58 MPa. Auffällig ist der deutlich abfallende Wert der Probe 033, die mit dem höchsten Seitendruck $\sigma_3 = 10$ MPa gefahren wurde. Hier kann sich der Wassergehalt ausgewirkt haben, der mit ca. 2 % fast doppelt so hoch war wie bei den anderen Proben dieser Schicht (Porendruckanstieg durch undrainierten Versuch, Reduktion der effektiven Normalspannung). Ähnliches gilt für

Schicht F3. Die Kerne mit $\rho \approx 2,8 \text{ g/cm}^3$ (027 und 030) erreichen Bruchspannungen von 46 und 57 MPa, die mit $\rho \approx 2,7 \text{ g/cm}^3$ (028, 037 und 029) „nur“ 15, 17 und 39 MPa. Die letzten 3 Proben weisen gegenüber den Kernen 027 und 030 einen deutlich höheren Feuchtegehalt aus.

Die Bruchspannungen der 5 untersuchten Kerne aus dem Grundgebirge (Schicht F4) mit einer Dichte von $2,16 < \rho < 2,49 \text{ g/cm}^3$ liegen zwischen 9 und 19 MPa. Die geringe Dichte und der höhere Wassergehalt der Kerne 038, 039 und 042 mit 12 bzw. 16 % sind ein Indiz für einen hohen Schluff/Feinsandanteil. Dieser bewirkt eine weniger gute Bindung in der Gesteinsmatrix, als es bei den Proben 040 und 041 der Fall gewesen sein dürfte. Ein höherer Manteldruck führt daher nicht zu einer entsprechend höheren Bruchspannung.

Die Bruchspannungen der 5 Proben aus Schicht F1 mit $2,43 < \rho < 2,54 \text{ g/cm}^3$ haben Werte zwischen 18 und 31 MPa ergeben. Wegen der relativ geringen Streubreite können aus dieser Darstellung keine belastbaren Aussagen getroffen werden.

Es ist darauf hinzuweisen, dass fast alle Kerne einen senkrecht zur Bohrung gerichteten Schichtverlauf aufweisen. Besonders Schicht F3 zeigt eine deutliche Wechsellagerung, die eine hohe Anisotropie des Gesteinsverhaltens erwarten lässt. Die Proben wurden senkrecht zur Schichtung belastet. Bei Proben, deren Schichten schräg (Scherflächen) zur Probenachse verlaufen, ist eine deutlich geringere Festigkeit zu erwarten. Dies ist in den Berechnungen zu berücksichtigen.

8.3 Bruchkennwerte nach Drucker-Prager

In den Tabellen 14 – 17 sind die für das modifizierte Bruchkriterium nach Drucker-Prager (Gl. 13) erforderlichen Invarianten nach den Gl. (11) und (12) aus den Bruch- und Nachbruchspannungen für jede Gesteinsschicht der Bohrung Twenthe-Rijn 480 errechnet worden. Zum Vergleich mit den Untersuchungsergebnissen von LANGER (1985) aus den Kernbohrungen Hengelo 319, 308 und 310 sind die relevanten Daten in Tabelle 18, geordnet nach der Einteilung (a), (b) und (c) aus Abschnitt 7, zusammengestellt.

Mit den Bruchkenngrößen ist eine lineare Regression durchgeführt worden, mit der sich die Bruchkennwerte nach Drucker-Prager ergeben (Mittelwerte, Tabelle 19). Aufgrund der geringen Datenbasis und der daraus folgenden hohen Streubreite ist diese Vorgehensweise als Parametergrundlage für numerische Berechnungen nicht optimal. Es besteht die Gefahr, dass die Festigkeiten partiell über- oder unterschätzt werden.

Der relevante Bereich der 1. Invariante des Spannungstensors liegt etwa zwischen 5 und 50 MPa. Konservativ ist daher grafisch eine untere Einhüllende für die Bruch- und Nachbruchfestigkeit ermittelt worden. Die Kennwerte nach

Drucker-Prager sind in Tabelle 19 angegeben. Eine ähnliche Auswertung wurde von EICKEMEIER & HEUSERMANN (2003, 2004) mit den Ergebnissen aus den Kernbohrungen Hengelo 319, 308 und 310 vorgenommen. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Tabelle 19 angegeben.

In den Abbildungen 2 – 5 sind die Werte für jede Schicht in einem Invarianten-Diagramm aufgetragen. Als Einzelwerte sind die Bruchkenngrößen, die statischen und dynamischen Nachbruchkenngrößen und die jeweils relevanten Vergleichsergebnisse nach Abschnitt 7 (LANGER, 1985) eingetragen. Die als untere Einhüllende nach Drucker-Prager ermittelten Geraden sind als Bruch- und Nachbruchfestigkeiten in Blau bzw. Rot eingezeichnet. Zum Vergleich sind die von EICKEMEIER & HEUSERMANN (2003, 2004) ermittelten Ergebnisse angegeben.

In der Schicht F1 (Abb. 2) lassen die Invarianten der Proben 022 ($\sigma_3 = 0$) und 020 ($\sigma_3 = 1,0$ MPa) ein etwas höheres Niveau erkennen als die übrigen Werte der Schicht F1. Alle 5 Ergebnisse liegen aber innerhalb der Streubreite aus der Gesteinskennung Hengelo (c) von 1985, die mit Seitendrücken von $\sigma_3 = 0, 3$ und 10 MPa gefahren wurden. Die im Nachbruch ermittelten Werte haben eine relativ geringe Streubreite. Die als untere Einhüllende ermittelte Bruchfestigkeit weicht geringfügig vom Ergebnis „TS-A“ nach EICKEMEIER & HEUSERMANN (2004) ab. Die Nachbruchfestigkeit liegt nur 1 bis 1,5 MPa tiefer.

Im Invariantendiagramm der Schicht F2 (Abb. 3) zeigen die Bruchkenngrößen bis auf Probe 033 ($\sigma_3 = 10$ MPa) einen fast linearen Anstieg. Die Werte der ohne Seitendruck gefahrenen zwei Proben aus Hengelo (a) liegen im gleichen Bereich. Die außerhalb dieser Grafik liegenden Werte mit $\sigma_3 = 1,0$ MPa (116/65 bzw. 120/68 MPa) sind dagegen etwas größer. Im Nachbruchbereich ist das abweichende Verhalten der Probe 033 nicht zu erkennen. Wie bei Schicht F1 liegen die Bruchkennwerte nach Drucker-Prager eng beieinander. Die Nachbruchfestigkeit liegt 1 bis 2 MPa tiefer als das Ergebnis „A“ von EICKEMEIER & HEUSERMANN (2004).

Die Invarianten der Schicht F3 (Abb. 4) verlaufen affin zur Schicht F2, jedoch auf tieferem Niveau. Sie liegen entsprechend unterhalb der Werte aus Hengelo (a), aber im Streubereich von Hengelo (b) mit den Seitendrücken 0, 1, 3 und 10 MPa. Als untere Einhüllende für die Bruchwerte wurde daher eine Gerade gewählt, die ca. 1 MPa tiefer liegt als „TS+A“ von EICKEMEIER & HEUSERMANN (2004). Die Nachbruchkennwerte weichen nur geringfügig voneinander ab.

Die Invarianten der Schicht F4 (Grundgebirge, Abb. 5) liegen unterhalb der aus Gesteinskennung Hengelo (c) mit $\sigma_3 = 0, 3$ und 10 MPa. Im Nachbruchverhalten sind keine Besonderheiten zu erkennen. Die ermittelten Geraden liegen sowohl für die Bruch- als auch für die Nachbruchfestigkeit 1 bis 1,5 MPa unterhalb der von EICKEMEIER & HEUSERMANN (2004) ermittelten Werte für „TS-A“. Das Material „TS-A“ stammt aus dem Deckgebirge; das Grundgebirge wurde 1985 nicht untersucht.

8.4 Oktaederspannungen

Für die heute vielfach gebräuchliche Darstellung in der Oktaederebene werden die Oktaedernormalspannung σ_O und die Oktaederschubspannung τ_O nach den Gleichungen (14) und (16) in Abschnitt 5.3.3 berechnet. Die Ergebnisse sind grafisch in Abb. 6 dargestellt (τ_O/σ_O – Diagramm).

8.5 Fotodokumentation

In Anlage 6 sind ausgewählte Fotografien der Kerne vor und nach dem Versuch dokumentiert. Sie zeigen die unterschiedlichen Gesteine der Schichten F1 bis F4. Aus den Bruchbildern konnten keine generellen Rückschlüsse auf die Festigkeitseigenschaften abgeleitet werden.

9 Zusammenfassung

Aus der Bohrung Twenthe-Rijn 480 in Hengelo wurden insgesamt 20 zylinderförmige Bohrkerne festigkeitsmechanisch untersucht. Je 5 Kerne wurden aus 3 Deckgebirgs- und einer Grundgebirgsschicht entnommen. Nach Bestimmung der Dichte wurden die Proben vor dem Versuch zur Ermittlung der dynamischen Materialparameter durchschallt und fotografiert. Mit dehnungsgeregelten triaxialen Festigkeitsuntersuchungen unter je 0,0; 1,0; 2,5; 6,0 und 10,0 MPa Seitendruck wurden die elastischen Materialkennwerte sowie die Bruch- und Nachbruchfestigkeit bestimmt. Nach dem Versuch wurden die (zerstörten) Proben erneut fotografiert. An Teilstücken wurde der Feuchtegehalt durch Trocknung bei 105 °C bestimmt. Mit den Invarianten der Bruchfestigkeit wurden für jede untersuchte Gesteinsschicht die Bruchkennwerte nach Drucker-Prager errechnet. Die Ergebnisse wurden mit früheren Untersuchungsergebnissen von LANGER (1985) an Kernen der Bohrungen Hengelo 319, 308 und 310 und mit deren Neuauswertung durch EICKEMEIER & HEUSERMANN (2003, 2004) verglichen und bewertet. Die jetzt ermittelten

Gesteinsfestigkeiten sind gleich groß oder liegen etwas niedriger. Die wesentlichen Ergebnisse sind in Tabellen- und Diagrammform dargestellt. Neben allen Spannungs-Dehnungsdiagrammen ist eine Fotodokumentation ausgewählter Versuche angefügt.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

Im Auftrag:

5.1.2.e



- Dir. u. Prof.-

5.1.2.e



- Wiss. Angestellter -

5.1.2.e



- GOR -

5.1.2.e



- GOR -

Literaturverzeichnis

LANGER, M. (1985): Gutachten: Gesteinsmechanische Untersuchungen an Bohrkernen des Deckgebirges, Kavernenfeld Hengelo. BGR, April 1985

LANGER, M. (1984): Gutachten: Geotechnische Laboruntersuchungen an Bohrkernen des Kavernenfeldes Hengelo. – Hannover (BGR), Februar 1984

EICKEMEIER, R. & HEUSERMANN, S. (2004): Ermittlung der zulässigen Beanspruchung von Pfeilern im Kavernenfeld Hengelo. – Hannover (BGR).

EICKEMEIER, R. & HEUSERMANN, S. (2003): Geomechanische Modellberechnungen zu Geländeoberflächensenkungen im Kavernenfeld Hengelo. – Hannover (BGR).

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Kerne für die festigkeitsmechanischen Untersuchungen

Tabelle 2: Probenübersicht, Schicht F1

Tabelle 3: Probenübersicht, Schicht F2

Tabelle 4: Probenübersicht, Schicht F3

Tabelle 5: Probenübersicht, Schicht F4

Tabelle 6: Dynamische Materialparameter, Schicht F1

Tabelle 7: Dynamische Materialparameter, Schicht F2

Tabelle 8: Dynamische Materialparameter, Schicht F3

Tabelle 9: Dynamische Materialparameter, Schicht F4

Tabelle 10: Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laborversuche, Schicht F1

Tabelle 11: Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laborversuche, Schicht F2

Tabelle 12: Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laborversuche, Schicht F3

Tabelle 13: Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laborversuche, Schicht F4

Tabelle 14: Invarianten und Oktaederspannungen, Schicht F1, Rötton

Tabelle 15: Invarianten und Oktaederspannungen, Schicht F2, so4

Tabelle 16: Invarianten und Oktaederspannungen, Schicht F3, so4

Tabelle 17: Invarianten und Oktaederspannungen, Schicht F4, Solling-Folge

Tabelle 18: Untersuchungsergebnisse nach LANGER, 1985

Tabelle 19: Bruchkennwerte nach Drucker-Prager

Seitenzahl der Tabellen: 17

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Spannungen im Bruchzustand als Funktion der Probendichte

Abb. 2: Schicht F1, Rötton, Bruchdiagramm nach Drucker-Prager

Abb. 3: Schicht F2, so4, Bruchdiagramm nach Drucker-Prager

Abb. 4: Schicht F3, so4, Bruchdiagramm nach Drucker-Prager

Abb. 5: Schicht F4, Solling-Folge, Bruchdiagramm nach Drucker-Prager

Abb. 6: Schicht F4, Bruchspannungen in der Oktaederebene

Seitenzahl der Abbildungen: 6

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Übersichtskarte Kavernenfeld Hengelo mit Bohrung 480

Anlage 2: Säulenprofil, M 1: 500, Akzo Nobel Bohrung 480

Anlage 3: Petrographische Beschreibung der Proben

Anlage 4: F_1 – s_1 –Diagramme zu Versuch Nr. 020

Anlage 5: Spannungs-Dehnungs–Diagramme

Anlage 6: Fotodokumentation

Seitenzahl der Anlagen: 39

Tabellen

Tabelle 1: Ausgewählte Kerne für die festigkeitsmechanischen Untersuchungen

Schicht F1, Deckgebirge:

Kern	Kiste Nr.	Kernlängen	Teufe	
1	1	2 x 250 mm	385,0 – 396,0	
1	8	2 x 240 mm		
1	9	1 x 210 mm, 1 x 220 mm		
2	2	2 x 250 mm		Reservekern

Schicht F2, Deckgebirge:

Kern	Kiste Nr.	Kernlängen	Teufe	
3	2	2 x 225 mm	403,0 – 406,1	
3	3	1 x 250 mm		
3	4	2 x 250 mm		
3	1	1 x 250 mm		Reservekern

Schicht F3, Deckgebirge:

Kern	Kiste Nr.	Kernlängen	Teufe	
2	9	1 x 247 mm, 1 x 220	401,6 – 403,0	
2	10	1 x 200 mm, 1 x 210		
3	8	1 x 200 mm	408,7 – 409,7	

Schicht F4, Grundgebirge:

Kern	Kiste Nr.	Kernlängen	Teufe	
12	5	1 x 210 mm	487,6 – 493,0	
12	6	1 x 220 mm		
12	7	1 x 210 mm		
12	8	1 x 240 mm		
12	10	1 x 230 mm, 1 x 200 mm		Reservekern

Tabelle 2: Probenübersicht, Schicht F1

Stratigraphische Einheit: Rötton, Schicht F1									
Kern- bezeichnung	File- Nummer	Proben- Nummer	Teufe	Abmessungen (Durchschnittswerte)		Fläche	Volumen	Gewicht	Strati- graphie
Twenthe-Rijn480			[m]	I _o [mm]	d _o [mm]	A [cm ²]	V [cm ³]	m [g]	
Twenthe-Rijn480/01/001/02	04020	020	385.05-385.30	249.69	96.96	73.84	1843.64	4623.4	Rötton
Twenthe-Rijn480/01/001/03	04021	021	385.30-385.55	240.56	99.09	77.12	1855.12	4501.50	Rötton
Twenthe-Rijn480/01/008/01	04022	022	392.14-392.38	237.84	100.83	79.85	1899.13	4832.00	Rötton
Twenthe-Rijn480/01/009/02	04024	024	392.65-392.87	220.96	101.02	80.15	1771.00	4485.70	Rötton
Twenthe-Rijn480/02/002/01	04025	025	395.35-395.57	219.91	99.43	77.65	1707.53	4219.60	Rötton

Tabelle 3: Probenübersicht, Schicht F2

Stratigraphische Einheit: so4 (Salz D), Schicht F2									
Kern-bezeichnung	File Nummer	Proben-Nummer	Teufe	Abmessungen (Durchschnittswerte)		Fläche	Volumen	Gewicht	Strati-graphie
Twenthe-Rijn480			[m]	l _o [mm]	d _o [mm]	A [cm ²]	V [cm ³]	m [g]	
Twenthe-Rijn480/03/001/01	04031	031	403.85-404.10	247.95	101.23	80.48	1995.59	5605.5	so4 (Salz D)
Twenthe-Rijn480/03/002/01	04032	032	404.21-404.46	249.96	98.00	75.43	1885.44	5394.8	so4 (Salz D)
Twenthe-Rijn480/03/002/02	04033	033	404.46-404.71	249.97	98.93	76.87	1921.47	5403.2	so4 (Salz D)
Twenthe-Rijn480/03/003/01	04034	034	405.00-405.24	239.63	101.24	80.50	1929.01	5521.4	so4 (Salz D)
Twenthe-Rijn480/03/004/01	04035	035	405.61-405.86	249.06	101.26	80.53	2005.72	5727.7	so4 (Salz D)

Tabelle 4: Probenübersicht, Schicht F3

Stratigraphische Einheit: so4 (Salz D), Schicht F3									
Kern-bezeichnung	File-Nummer	Proben-Nummer	Teufe	Abmessungen (Durchschnittswerte)		Fläche	Volumen	Gewicht	Strati-graphie
Twenthe-Rijn480			[m]	l _o [mm]	d _o [mm]	A [cm ²]	V [cm ³]	m [g]	
Twenthe-Rijn480/03/008/01	04037	037	409.16-409.41	248.30	100.73	79.69	1978.72	5337.7	so4 (Salz D)
Twenthe-Rijn480/02/009/01	04027	027	401.65-401.90	247.83	101.17	80.39	1992.26	5589.0	so4 (Salz D)
Twenthe-Rijn480/02/009/02	04028	028	401.95-402.17	225.79	101.09	80.26	1812.22	4917.6	so4 (Salz D)
Twenthe-Rijn480/02/010/01	04029	029	402.52-402.73	210.44	101.26	80.53	1694.70	4597.4	so4 (Salz D)
Twenthe-Rijn480/02/010/02	04030	030	402.73-402.93	203.76	101.24	80.50	1640.26	4589.4	so4 (Salz D)

Tabelle 5: Probenübersicht, Schicht F4

Stratigraphische Einheit: Solling-Folge, Schicht F4									
Kern-bezeichnung	File-Nummer	Proben-Nummer	Teufe	Abmessungen (Durchschnittswerte)		Fläche	Volumen	Gewicht	Strati-graphie
Twenthe-Rijn480			[m]	l _o [mm]	d _o [mm]	A [cm ²]	V [cm ³]	m [g]	
Twenthe-Rijn480/12/005/01	04038	038	487.74-487.95	205.26	98.85	76.74	1575.24	3531.8	Solling-Folge
Twenthe-Rijn480/12/006/01	04039	039	488.10-488.32	219.40	100.17	78.81	1729.03	3829.5	Solling-Folge
Twenthe-Rijn480/12/007/01	04040	040	488.77-488.98	204.37	100.32	79.04	1615.41	4029.7	Solling-Folge
Twenthe-Rijn480/12/008/01	04041	041	489.62-489.86	239.38	99.99	78.52	1879.71	4628.5	Solling-Folge
Twenthe-Rijn480/12/010/01	04042	042	491.43-491.66	229.16	100.49	79.31	1817.50	3922.0	Solling-Folge

Tabelle 6: Dynamische Materialparameter, Schicht F1

Stratigraphische Einheit: Rötton, Schicht F1									
Proben-Nr. Bohrung	Dichte	Ultraschallmessungen		dynamische Materialparameter		Durchschallungs- richtung		Material	
	Rho [g/cm³]	P - Welle [m/s]	S - Welle [m/s]	E _{dyn} [MPa]	ν _{dyn} [-]				
020 Twenthe-Rijn480	2.51	- 3977 3861	- 1897 1974	- 24400 25850	- 0.35 0.32	längs radial parallel radial parallel		braunroter Tonstein, wenig Anhydr.	
021 Twenthe-Rijn480	2.43	3039 3316 3432	- - -	- - -	- - -	längs radial parallel radial parallel		braunroter Tonstein, wenig Anhydr.	
022 Twenthe-Rijn480	2.54	3495 3733 3909	- 1866 -	- 23650 -	- 0.33 -	längs radial parallel radial parallel		braunroter Tonstein, wenig Anhydr.	
024 Twenthe-Rijn480	2.53	- 3558 3712	- - -	- - -	- - -	längs radial parallel radial parallel		braunroter Tonstein, wenig Anhydr.	
025 Twenthe-Rijn480	2.47	3084 3269 3303	- - -	- - -	- - -	längs radial parallel radial parallel		braunroter Tonstein, wenig Anhydr.	
Mittel- werte	2.50	3206 3607	- 1912	- 24633	- 0.33	längs radial parallel			
Standard- abweichung	0.04	1202 231	- 41	- 811	- 0.01	längs radial parallel			

Tabelle 7: Dynamische Materialparameter, Schicht F2

Stratigraphische Einheit: so4 (Salz D), Schicht F2							
Proben-Nr. Bohrung	Dichte	Ultraschallmessungen		dynamische		Durchschallungs- richtung	Material
		P - Welle	S - Welle	Materialparameter			
	Rho	[m/s]	[m/s]	E _{dyn}	nue _{dyn}		
	[g/cm³]			[MPa]	[-]		
031 Twenthe-Rijn480	2.81	- 5813 5828	- 3331 3148	- - 72050	- - 0.29	längs radial parallel radial parallel	Anhydrit mit Tonsteinlagen
032 Twenthe-Rijn480	2.86	5346 5748 5715	- 3967 3542	- 94150 85300	- 0.05 0.19	längs radial parallel radial (senkrecht)	Anhydrit mit Tonsteinlagen
033 Twenthe-Rijn480	2.81	4859 5075 5654	- 2852 2870	- 58050 61450	- 0.27 0.33	längs radial parallel radial parallel	Anhydrit mit Tonsteinlagen
034 Twenthe-Rijn480	2.86	5345 5706 5787	- 3292 -	- 77600 -	- 0.25 -	längs radial parallel radial parallel	Anhydrit mit Tonsteinlagen
035 Twenthe-Rijn480	2.86	5267 5814 5858	- - -	- - -	- - -	längs radial parallel radial parallel	Wechselfolge Tonstein/ Anhydritlagen
Mittel- werte Standard- abweichung	2.84	5204	-	-	-	längs	
		5700	3286	74767	0.23	radial parallel	
	0.02	1665	-	-	-	längs	
		134	282	10917	0.07	radial parallel	

Tabelle 8: Dynamische Materialparameter, Schicht F3

Stratigraphische Einheit: so4 (Salz D), Schicht F3									
Proben-Nr. Bohrung	Dichte [g/cm³]	Ultraschallmessungen		dynamische Materialparameter		Durchschallungs- richtung		Material	
		P - Welle [m/s]	S - Welle [m/s]	E _{dyn} [MPa]	ν _{ue dyn} [-]				
037 Twenthe-Rijn480	2.70	3949	-	-	-	längs	radial parallel	Wechselfolge Tonstein/ Anhydrit	
		5045	-	-	-	radial parallel	radial parallel		
		4689	-	-	-	längs	radial parallel		
027 Twenthe-Rijn480	2.81	6019	2611	52950	0.38	längs	radial parallel	Wechselfolge Tonstein/ Anhydrit	
		6028	2679	55450	0.38	radial parallel	radial parallel		
028 Twenthe-Rijn480	2.71	-	-	-	-	längs	radial parallel	Wechselfolge Tonstein/ Anhydrit	
		5592	2936	61250	0.31	radial parallel	radial parallel		
029 Twenthe-Rijn480	2.71	5596	3148	68200	0.27	längs	radial parallel	Wechselfolge Tonstein/ Anhydrit	
		-	-	-	-	radial parallel	radial parallel		
030 Twenthe-Rijn480	2.80	5836	-	-	-	längs	radial parallel	Wechselfolge Tonstein/ Anhydrit	
		5732	-	-	-	radial parallel	radial parallel		
		6572	2481	48800	0.42	längs	radial parallel	Wechselfolge Tonstein/ Anhydrit, 15°	
		6592	2553	51500	0.41	radial senkrecht	radial senkrecht		
Mittel- werte	2.75	3949	-	-	-	längs	radial parallel		
Standard- abweichung	0.04	5770	2735	56358	0.36	längs	radial parallel		
		1975	-	-	-	längs	radial parallel		
		439	205	5578	0.05				

Tabelle 9: Dynamische Materialparameter, Schicht F4

Stratigraphische Einheit: Solling-Folge, Schicht F4							
Proben-Nr. Bohrung	Dichte	Ultraschallmessungen		dynamische Materialparameter		Durchschallungs- richtung	Material
	Rho [g/cm³]	P - Welle [m/s]	S - Welle [m/s]	E _{dyn} [MPa]	nue _{dyn} [-]		
038 Twenthe-Rijn480	2.24	kein Durchgang		-	-		dunkelbrauner Tonstein, Anhydritbrocken
039 Twenthe-Rijn480	2.21	kein Durchgang		-	-		rotbrauner, schluffig/fein- sand. Tonstein
040 Twenthe-Rijn480	2.49	kein Durchgang		-	-		rotbr., schluff. Tonstein/ Anhydritbrocken
041 Twenthe-Rijn480	2.46	kein Durchgang		-	-		rotbrauner Tonstein
042 Twenthe-Rijn480	2.16	kein Durchgang		-	-		rotbrauner, schluffig/fein- sand. Tonstein
Mittel- werte	2.31						
Standard- abweichung	0.13						

Tabelle 10: Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laborversuche, Schicht F1

Bohrung: Twenthe-Rijn480 Stratigraphische Einheit: Rötton Deckgebirge, F1

Gesteinstyp: Braunroter Salzton				Belastung			Elast. Kennwerte		Bruch		Nachbruch			
Kern-Nr.	Schicht	Teufe [m]	Dichte [g/cm³]	$\dot{\epsilon}$ [s ⁻¹]	σ_3 [MPa]	T [°C]	E [MPa]	Ev [MPa]	$\sigma_1 - \sigma_3$ Bruch [MPa]	ϵ Bruch [%]	$\sigma_1 - \sigma_3$ Nachbruch [MPa]	RVM [MPa]	Feuchte (nach Versuch) [%]	t [h:min]
022	F1	392.2	2.54	1 * 10 ⁻⁵	0.0	23.7	10 600	6 850	22.9	0.46	4.5	3 850	5.48, 5.70	0:33
020	F1	385.2	2.51	1 * 10 ⁻⁵	1.0	23.6	11 230	8 730	27.6	0.46	10.4	3 520	7.26, 7.31, 7.38	1:22
024	F1	392.7	2.53	1 * 10 ⁻⁵	2.5	23.7	6 800	4 500	18.2	0.58	8.9	2 800	5.89, 6.33, 6.93	1:25
025	F1	395.4	2.47	1 * 10 ⁻⁵	6.0	24.2	5 100	4 000	23.3	0.87	10.0	3 650	7.04, 7.18, 7.20	1:47
					5.0						9			
					2.5						5.7			
					1.0						3.2			
021	F1	385.4	2.43	1 * 10 ⁻⁵	10.0	24.2	8 300	4 500	31.5	1.00	22.1	4 400	8.30, 8.43, 8.81	2:43
					7.5						20.0			
					5.0						16.5			
					2.5						11.2			
					1.0						6.4			
Mittelwerte:			2.50				8 410	5 720	24.7	0.67		3 640		

Tabelle 12: Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laborversuche, Schicht F3

Bohrung: Twenthe-Rijn480

Stratigraphische Einheit: Zwischenmittel so4 Deckgebirge, F3

Gesteinstyp: Wechsellagerung Anhydrit-graugrüner Tonstein				Belastung			Elast. Kennwerte		Bruch			Nachbruch			
Kern-Nr.	Schicht	Teufe [m]	Dichte [g/cm³]	$\dot{\epsilon}$ [s ⁻¹]	σ_3 [MPa]	T [°C]	E [MPa]	Ev [MPa]	$\sigma_1 - \sigma_3$ Bruch [MPa]	ϵ Bruch [%]	$\sigma_1 - \sigma_3$ Nachbruch [MPa]	RVM [MPa]	Feuchte (nach Versuch) [%]	t [h:min]	
028	F3	402.0	2.71	1 * 10 ⁻⁵	0.0	24.1	8 000	4 650	15.2	0.250	6.2	4 400	3.49, 3.53, 3.78	0:44	
037	F3	409.3	2.70	1 * 10 ⁻⁵	1.0	22.8	8 400	6 700	17.2	0.350	12.1	4 800	3.16, 4.25, 4.77	0:44	
027	F3	401.7	2.81	1 * 10 ⁻⁵	2.5 1.0	20.9	19 200	14 700	46.5	0.420	20.7 13.4	7 200	0.0, 1.73, 2.64	1:05	
030	F3	402.8	2.80	1 * 10 ⁻⁵	6.0 5.0 2.5 1.0	24.0	22 000	11 400	56.7	0.720	31.2 28.2 18.9 11.0	7 900	0.0, 1.37, 2.09	2:10	
029	F3	402.6	2.71	1 * 10 ⁻⁵	10.0 7.5 5.0 2.5 1.0	24.1	17 000	10 200	39.3	0.510	28.0 24.6 20.1 14.2 9.2	8 500	2.75, 2.80, 3.49	1:45	
Mittelwerte:			2.75				14 920	9 530	35.0	0.450		6 560			

Tabelle 14: Invarianten- und Oktaederspannungen, Schicht F1, Rötton

Kern-Nr.	Bruch F1					Nachbruch F1		
	$\sigma_1 - \sigma_3$ Bruch [MPa]	Sig-0 [MPa]	Tau-0 [MPa]	ISig [MPa]	Wurzel IIs [MPa]	$\sigma_1 - \sigma_3$ Nachbruch [MPa]	ISig [MPa]	Wurzel IIs [MPa]
22	22.9	7.6	10.8	22.9	13.2	4.5	4.5	2.6
20	27.6	10.2	13.0	30.6	15.9	10.4	13.4	6.0
24	18.2	8.6	8.6	25.7	10.5	8.9 6.0	16.4 9.0	5.1 3.5
25	23.3	13.8	11.0	41.3	13.5	10.0 9.00 5.70 3.20	28.0 24.0 13.2 6.2	5.8 5.2 3.3 1.8
21	31.5	20.5	14.8	61.5	18.2	22.10 20.0 16.5 11.2 6.4	52.1 42.5 31.5 18.7 9.4	12.8 11.5 9.5 6.5 3.7

Tabelle 15: Invarianten- und Oktaederspannungen, Schicht F2, so4

Kern-Nr.	Bruch F2					Nachbruch F2		
	$\sigma_1 - \sigma_3$ Bruch [MPa]	Sig-0 [MPa]	Tau-0 [MPa]	ISig [MPa]	Wurzel IIs [MPa]	$\sigma_1 - \sigma_3$ Nachbruch [MPa]	ISig [MPa]	Wurzel IIs [MPa]
31	37.6	12.5	17.7	37.6	21.7	11.4	11.4	6.6
34	52.5	18.5	24.7	55.5	30.3	15.9	18.9	9.2
32	59.1	22.2	27.9	66.6	34.1	29.5 18.8	37.0 21.8	17.0 10.9
35	76.1	31.4	35.9	94.1	43.9	39.1 35.6 23.3 13.2	57.1 50.6 30.8 16.2	22.6 20.6 13.5 7.6
33	57.9	29.3	27.3	87.9	33.4	52.2 34.2 21.6 12.9 7.4	82.2 56.7 36.6 20.4 10.4	30.1 19.7 12.5 7.4 4.3

Tabelle 16: Invarianten- und Oktaederspannungen, Schicht F3, so4

Kern-Nr.	Bruch F3					Nachbruch F3		
	$\sigma_1 - \sigma_3$ Bruch [MPa]	Sig-0 [MPa]	Tau-0 [MPa]	ISig [MPa]	Wurzel IIs [MPa]	$\sigma_1 - \sigma_3$ Nachbruch [MPa]	ISig [MPa]	Wurzel IIs [MPa]
28	15.2	5.1	7.2	15.2	8.8	6.2	6.2	3.6
37	17.2	6.7	8.1	20.2	9.9	12.1	15.1	7.0
27	46.5	18.0	21.9	54.0	26.8	20.7 13.4	28.2 16.4	12.0 7.7
30	56.7	24.9	26.7	74.7	32.7	31.2 28.2 18.9 11.0	49.2 43.2 26.4 14.0	18.0 16.3 10.9 6.4
29	39.3	23.1	18.5	69.3	22.7	28.0 24.6 20.1 14.2 9.2	58.0 47.1 35.1 21.7 12.2	16.2 14.2 11.6 8.2 5.3

Tabelle 17: Invarianten- und Oktaederspannungen, Schicht F4, Solling-Folge

Kern-Nr.	Bruch F4					Nachbruch F4		
	$\sigma_1 - \sigma_3$ Bruch [MPa]	Sig-0 [MPa]	Tau-0 [MPa]	ISig [MPa]	Wurzel IIs [MPa]	$\sigma_1 - \sigma_3$ Nachbruch [MPa]	ISig [MPa]	Wurzel IIs [MPa]
41	10.9	3.6	5.1	10.9	6.3	3.5	3.5	2.0
38	9.1	4.0	4.3	12.1	5.3	6.1	9.1	3.5
39	15.1	7.5	7.1	22.6	8.7	9.8 4.6	17.3 7.6	5.7 2.7
40	19.4	12.5	9.1	37.4	11.2	15.6 14.2 9.7 6.5	33.6 29.2 17.2 9.5	9.0 8.2 5.6 3.8
42	18.7	16.2	8.8	48.7	10.8	12.5 12.1 11.5 8.9 4.9	42.5 34.6 26.5 16.4 7.9	7.2 7.0 6.6 5.1 2.8

Tabelle 18: Untersuchungsergebnisse nach Langer, 1985

Bohrung: Hengelo 319, 308 und 310

Zuordnung	Kern-Nr.	Gesteinstyp	Teufe [m]	Dichte [g/cm³]	Länge [mm]	Belastung			Bruch			Nachbruch		
						$\dot{\epsilon}, \dot{\sigma}$ [s ⁻¹]	σ_3 [MPa]	T [°C]	l_{Bruch} [mm]	σ_{Bruch} [MPa]	ϵ_{Bruch} [%]	σ_D [MPa]	ISig [MPa]	Wurzel IIS [MPa]
(a) A	K4-2I	Anhydrit	417.4	2.9	248.8	1 MPa/min	0.0	26	1.1	62.10	0.44	61.83	61.83	35.7
(a) A	K4-15	Anhydrit	422.5	2.9	237.5	1 MPa/min	0.0	26	0.8	36.03	0.34	35.91	35.91	20.7
(a) A	K4-3I	Anhydrit	417.8	2.87		1 * 10 ⁻⁵	1.0	21		118.0	0.6		120.0	67.5
(a) A	K4-3II	Anhydrit	417.9	2.87		1 * 10 ⁻⁵	1.0	21		114.2	0.6		116.2	65.4
(b) T/S-A	K3-2I	Tonstein-Anhydrit	415.2	2.66		1 * 10 ⁻⁵	1.0	21		26.7	0.5		28.7	14.8
(b) T/S-A	K4-16III	Anhydrit-Tonstein	423.3	2.74		1 * 10 ⁻⁵	1.0	21		46.5	0.7		48.5	26.3
(b) T/S-A	K4-17I	Tonstein	423.8	2.62		1 * 10 ⁻⁵	1.0	21		23.7	0.8		25.7	13.1
(b) T/S-A	K4-17III	Tonstein	424.0	2.66		1 * 10 ⁻⁵	1.0	21		29.4	0.5		31.4	16.4
(b) T/S-A	K2-24	Schluffstein	405.6	2.6	232.5	1 MPa/min	0.0	26	1.3	26.74	0.56	26.59	26.59	15.3
(b) T/S-A	K2-28	Schluffstein	407.5	2.6	227.5	1 MPa/min	0.0	26	1.0	21.91	0.44	21.81	21.81	12.6
(b) T/S-A	K2-9I	Ton-Schluffstein	401.9	2.64		1 * 10 ⁻⁵	10.0	21		67.6	1.6		87.6	33.3
(b) T/S-A	K2-9II	Ton-Schluffstein	401.4	2.61		1 * 10 ⁻⁵	3.0	21		44.0	1.2		50.0	23.7
(b) T/S-A	K4-3III	Tonstein	418.0	2.73		1 * 10 ⁻⁵	3.0	21		37.8	0.9		43.8	20.1
(b) T/S-A	K4-16I	Anhydrit-Tonstein	423.1	2.74		1 * 10 ⁻⁵	3.0	21		48.2	1.0		54.2	26.1
(b) T/S-A	K4-16II	Ton-Schluffstein	418.0	2.72		1 * 10 ⁻⁵	10.0	21		75.7	1.2		95.7	37.9
(c) T/S	K3-13I	Schluffstein	412.6	2.4	252.0	1 MPa/min	0.0	26	1.1	13.94	0.44	13.88	13.88	8.0
(c) T/S	K3-14	Schluffstein	413.2	2.4	250.0	1 MPa/min	0.0	26	1.5	20.93	0.60	20.80	20.80	12.0
(c) T/S	K2-11	Schluffstein	401.9	2.41		1 * 10 ⁻⁵	3.0	21		28.1	1.2		34.1	14.5
(c) T/S	K2-12II	Ton-Schluffstein	402.3	2.41		1 * 10 ⁻⁵	3.0	21		31.2	1.5		37.2	16.3
(c) T/S	K2-15	Ton-Schluffstein	402.7	2.41		1 * 10 ⁻⁵	3.0	21		34.8	1.5		40.8	18.4
(c) T/S	K2-8II	Ton-Schluffstein	401.4	2.58		1 * 10 ⁻⁵	10.0	21		44.8	1.6		64.8	20.1
(c) T/S	K2-12I	Ton-Schluffstein	402.3	2.41		1 * 10 ⁻⁵	10.0	21		37.6	2.3		57.6	15.9
(c) T/S	K3-12II	Schluffstein	402.7	2.29		1 * 10 ⁻⁵	10.0	21		55.5	1.9		75.5	26.3
(c) T/S	K3-12III	Schluffstein		2.32			10.0			42.1	1.7		62.1	18.5
(c) T/S	K4-17II	Tonstein	423.1	2.54		1 * 10 ⁻⁵	10.0	21		47.0	1.7		67.0	21.4

(a) A	Anhydrit	Rho, g/cm³
(b) T/S-A	Ton/Schluffstein/Anhydrit	2.8 - 2.9
(c) T/S	Ton/Schluffstein	2.6 - 2.8
		2.3 - 2.6

(nach Langer, 1985)

Tabelle 19: Bruchkennwerte nach Drucker-Prager

Bohrungen Hengelo 319, 308 und 310						
LANGER (1985)			EICKEMEIER & HEUSERMANN (2004):			
Material	Mittelwerte		untere Einhüllende			
	Bruchfestigkeit		Material	Bruchfestigkeit		Nachbruchfestigkeit
	α	k, MPa		α	k, MPa	α
Anhydrit A, (a)	0.45	7.5	A	0.4442	4.888	0.3332
Ton/Schluffst./Anhydrit T/S-A, (b)	0.3	7.0	TS+A	0.3219	4.844	0.2092
Ton/Schluffstein T/S, (c)	0.2	5.5	TS-A	0.1985	4.297	0.1588
						3.438

Bohrung Twenthe-Rijn 480						
STÜHRENBURG et al. (2004)						
Material	Mittelwerte			untere Einhüllende		
	Bruchfestigkeit			Bruchfestigkeit		Nachbruchfestigkeit
	α	k, MPa		α	k, MPa	α
Schicht F1, Rötton	0.141	9.1	(Deckgeb.)	0.211	4.3	0.175
Schicht F2, so4	0.310	11.5	(Deckgeb.)	0.411	5.8	0.309
Schicht F3, so4	0.357	3.5	(Deckgeb.)	0.322	3.0	0.238
Schicht F4, Solling-Folge	0.149	4.5	(Grundgeb.)	0.150	3.3	0.133
						1.3

Drucker-Prager-Kriterium: $F = 0 = \alpha I_{\sigma} + \sqrt{II_s} - k$ (Zugspannungen positiv)

Abbildungen

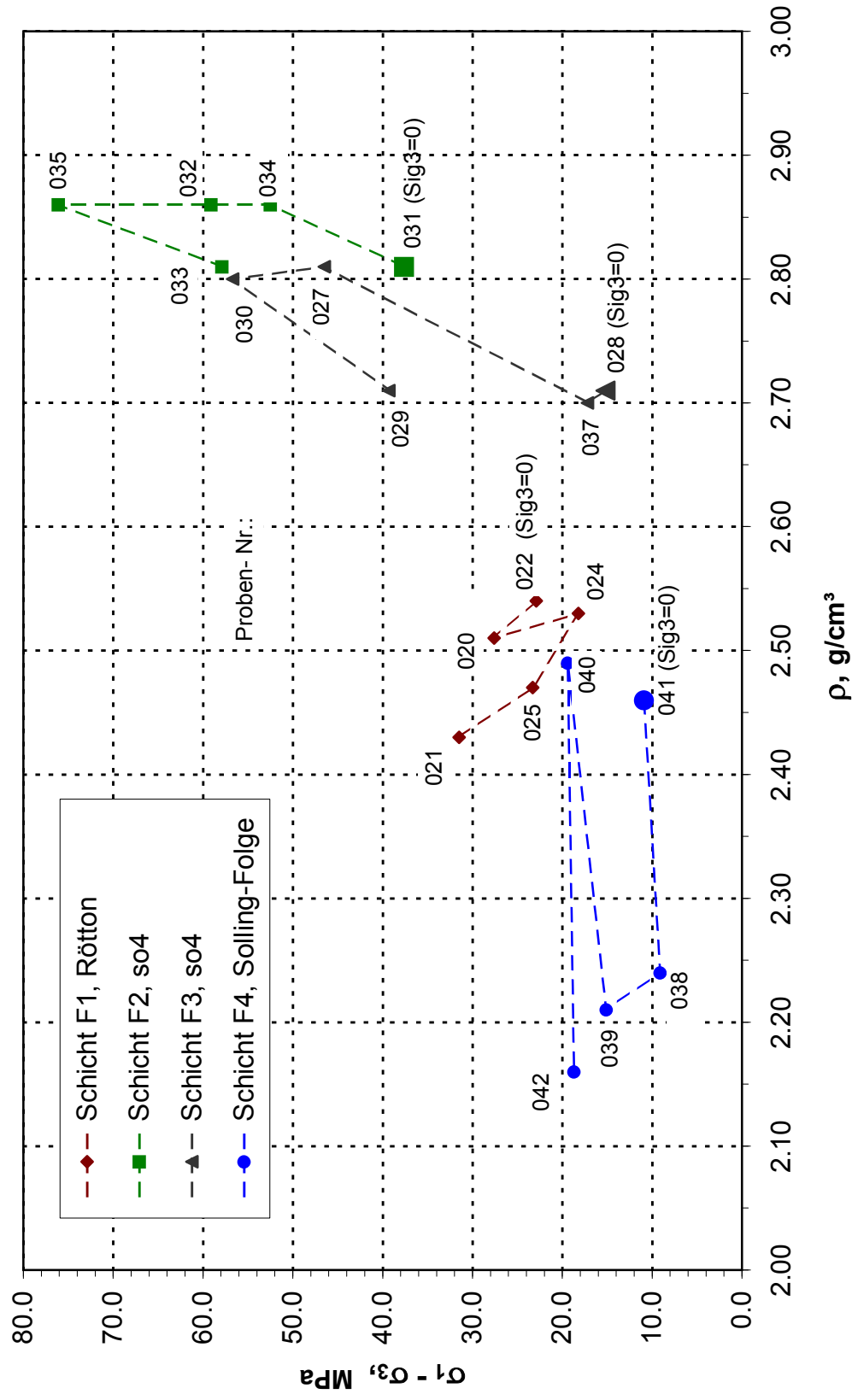


Abb. 1: Bohrung Twenthe-Rijn480
Spannungen im Bruchzustand als Funktion der Probendichte

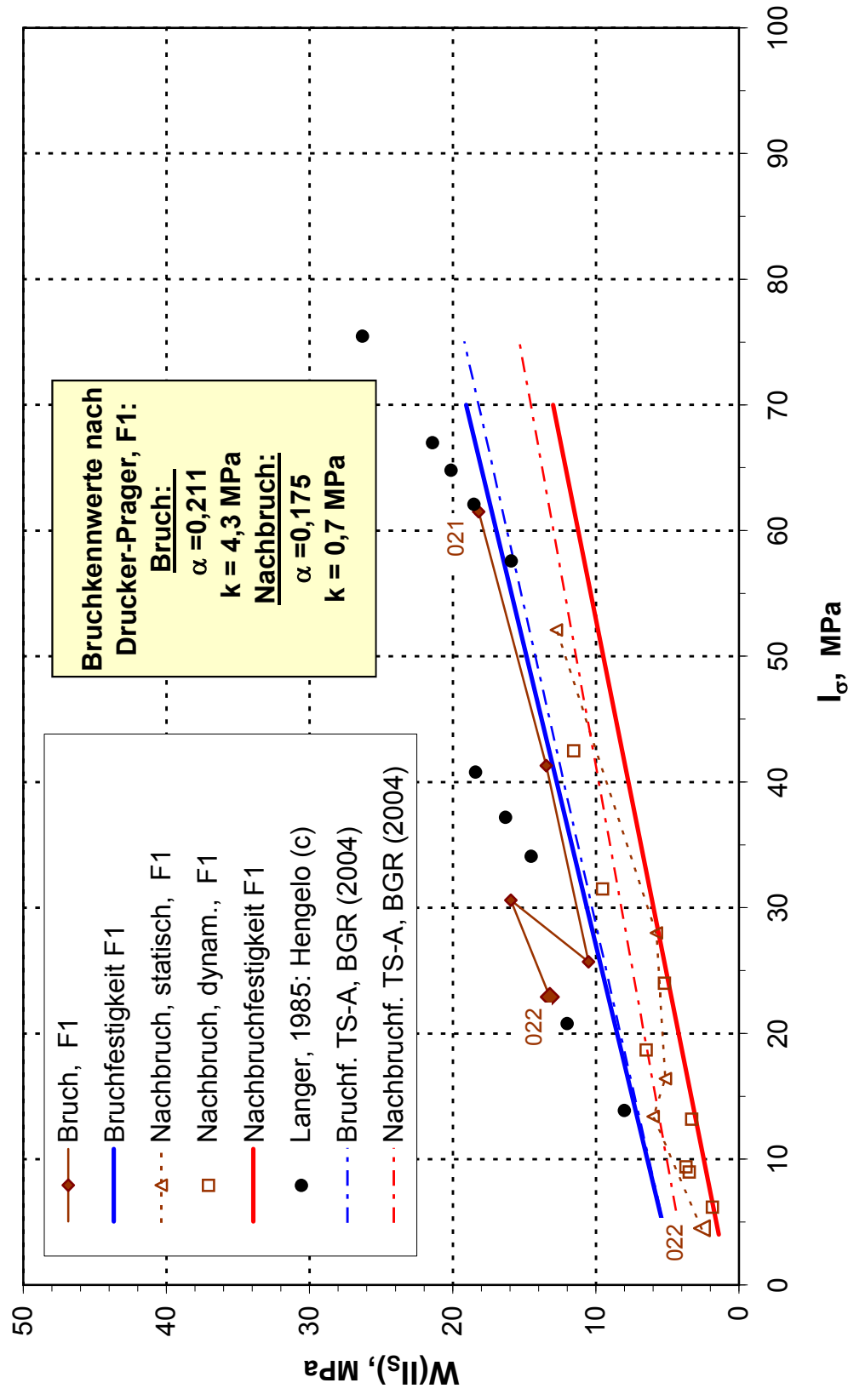


Abb. 2: Bohrung Twenthe-Rijn480, Schicht F1, Rötton
Bruchdiagramm nach Drucker-Prager

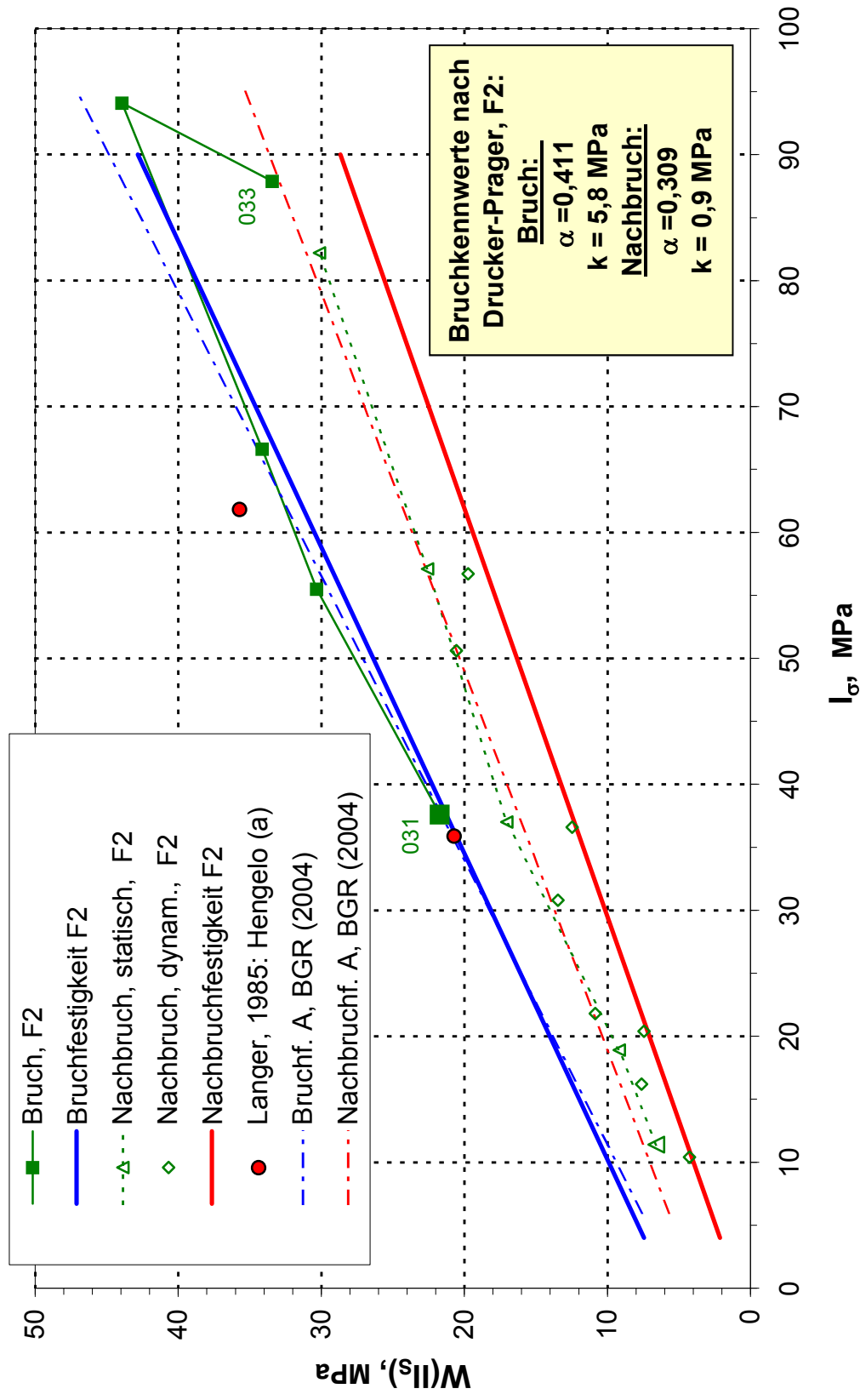


Abb. 3: Bohrung Twenthe-Rijn480, Schicht F2, so4
Bruchdiagramm nach Drucker-Prager

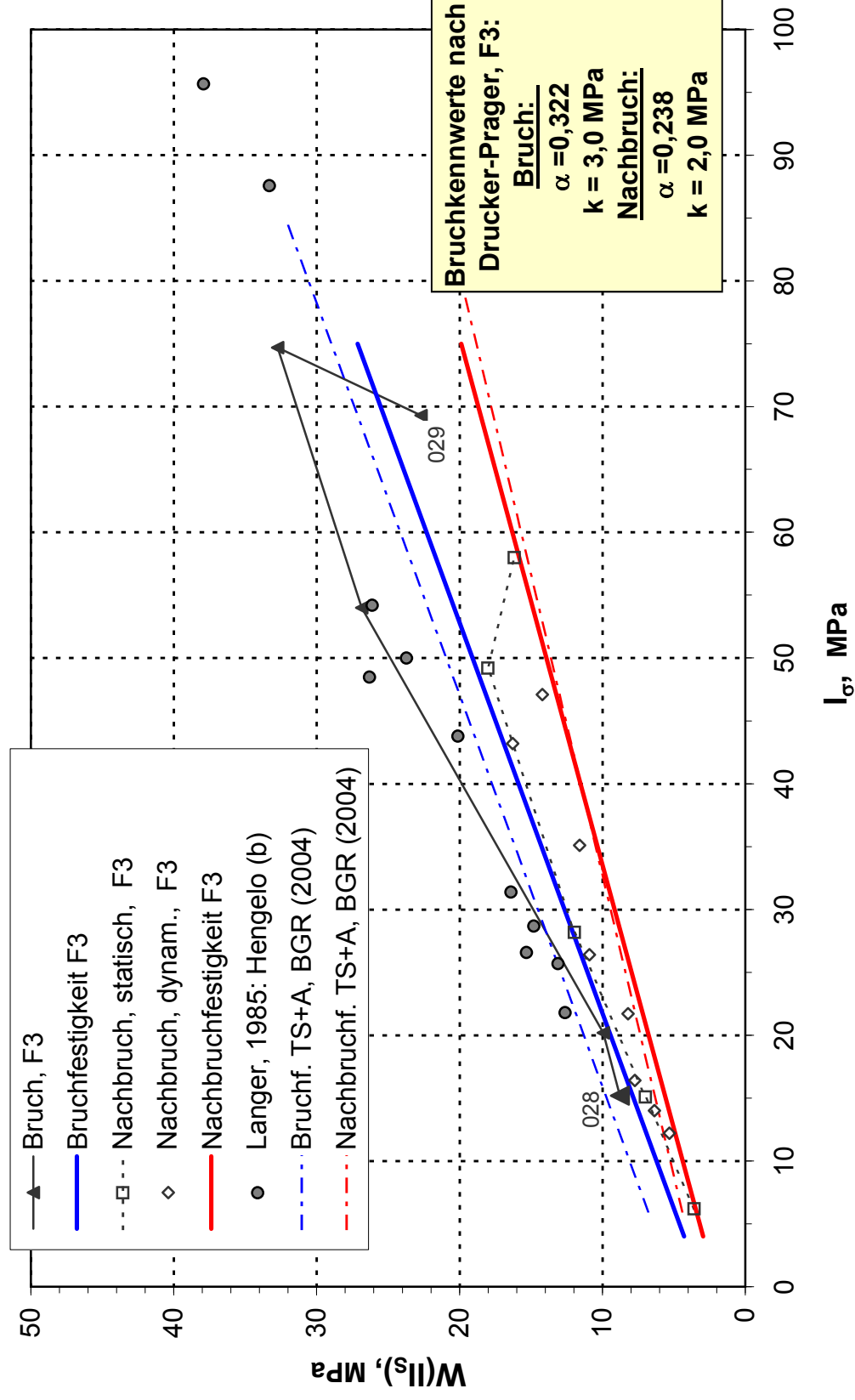


Abb. 4: Bohrung Twenthe-Rijn480, Schicht F3, so4
Bruchdiagramm nach Drucker-Prager

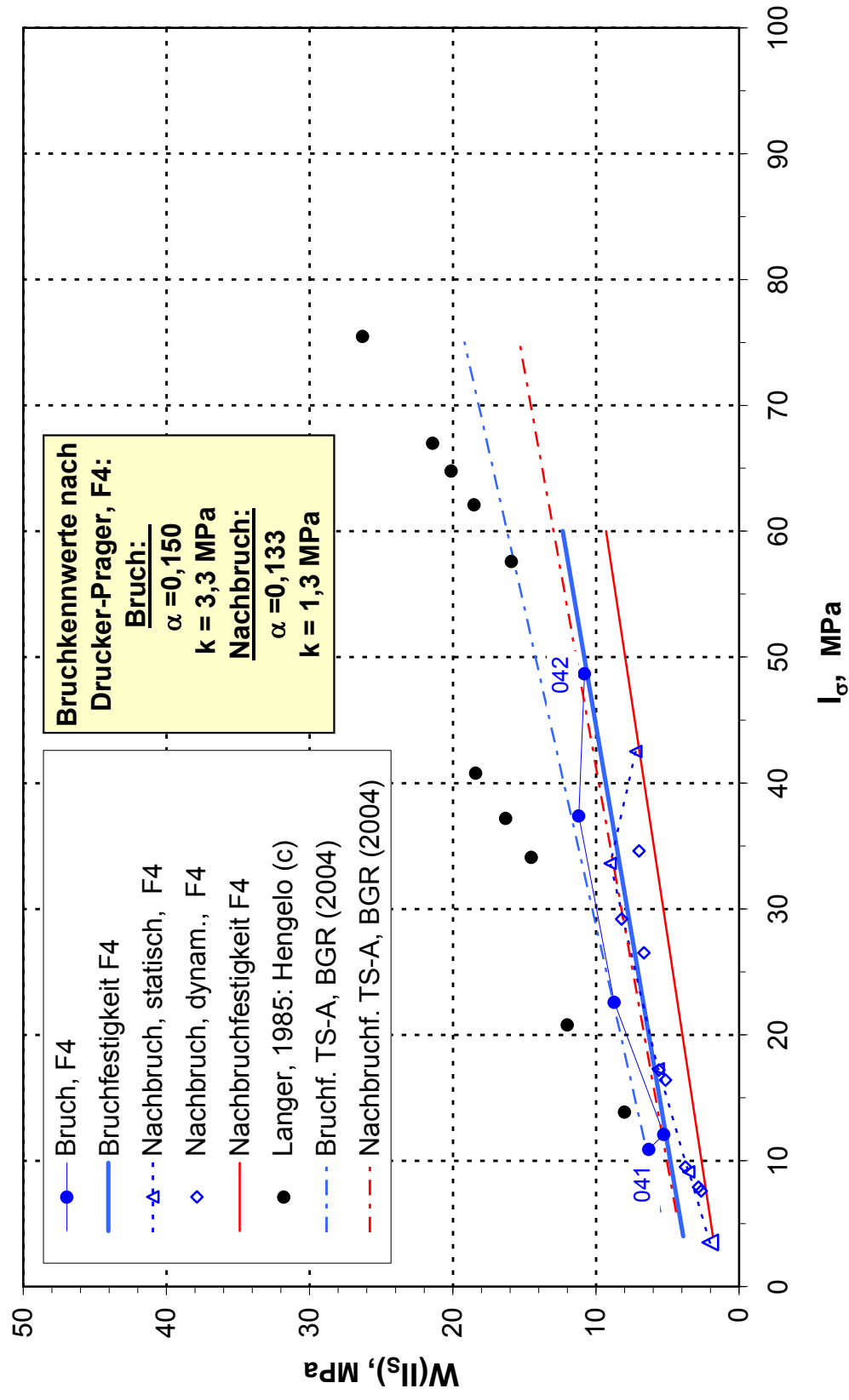


Abb. 5: Bohrung Twenthe-Rijn480, Schicht F4, Solling-Folge
Bruchdiagramm nach Drucker-Prager

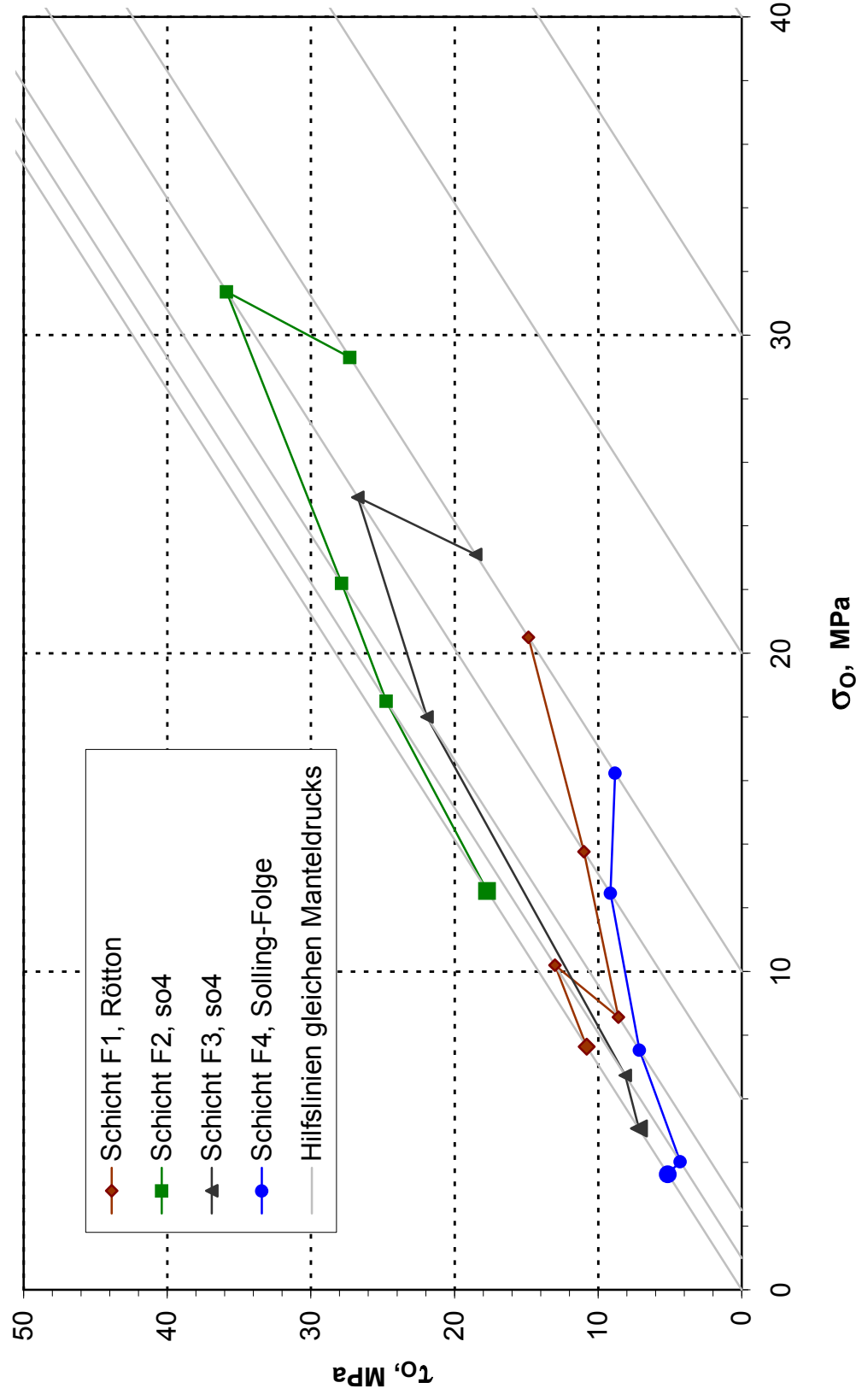
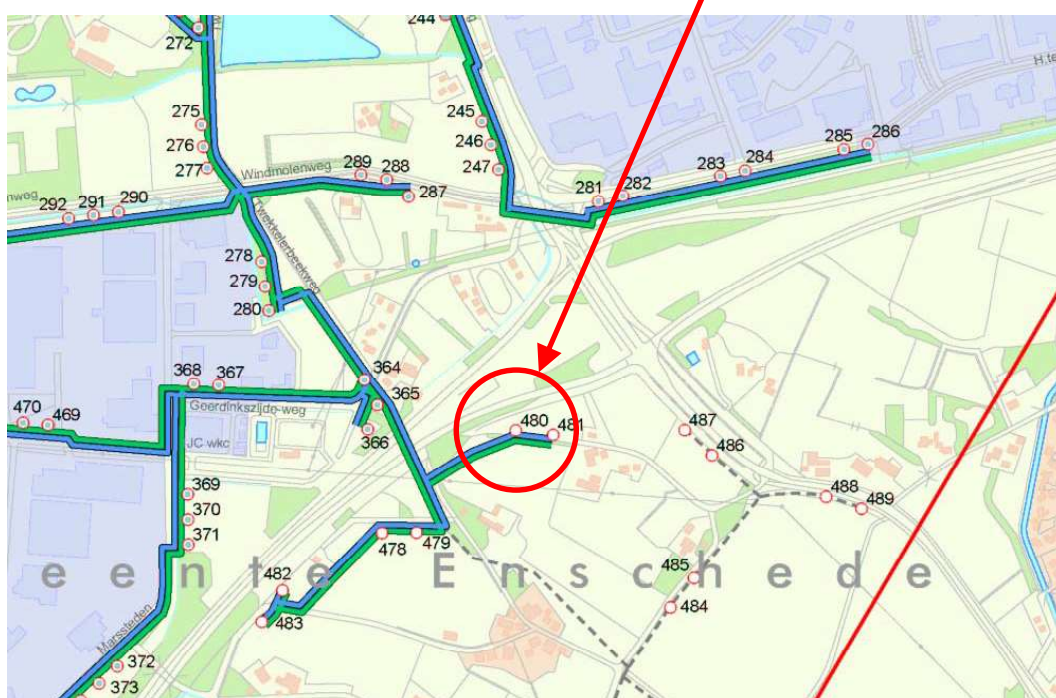
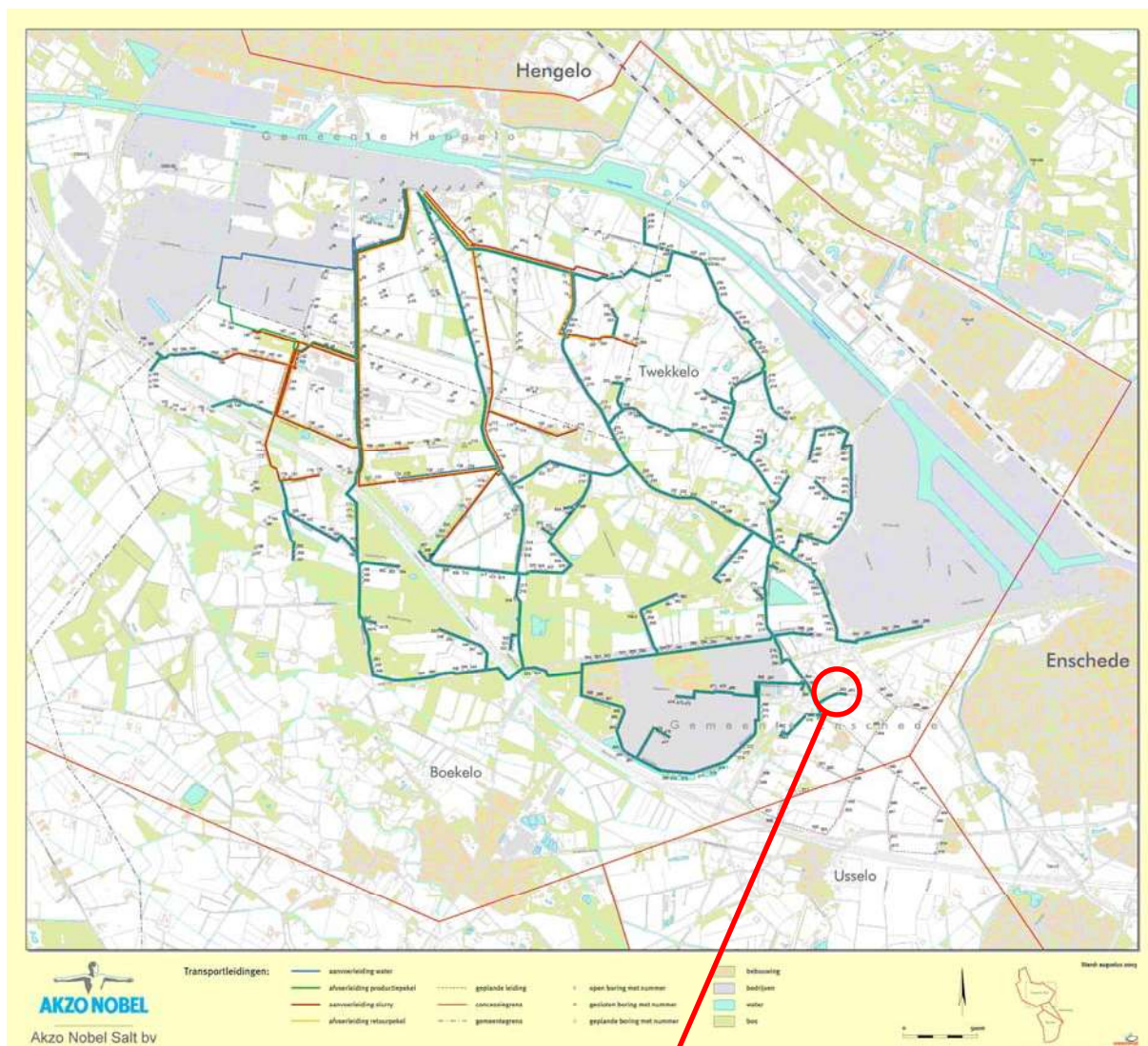
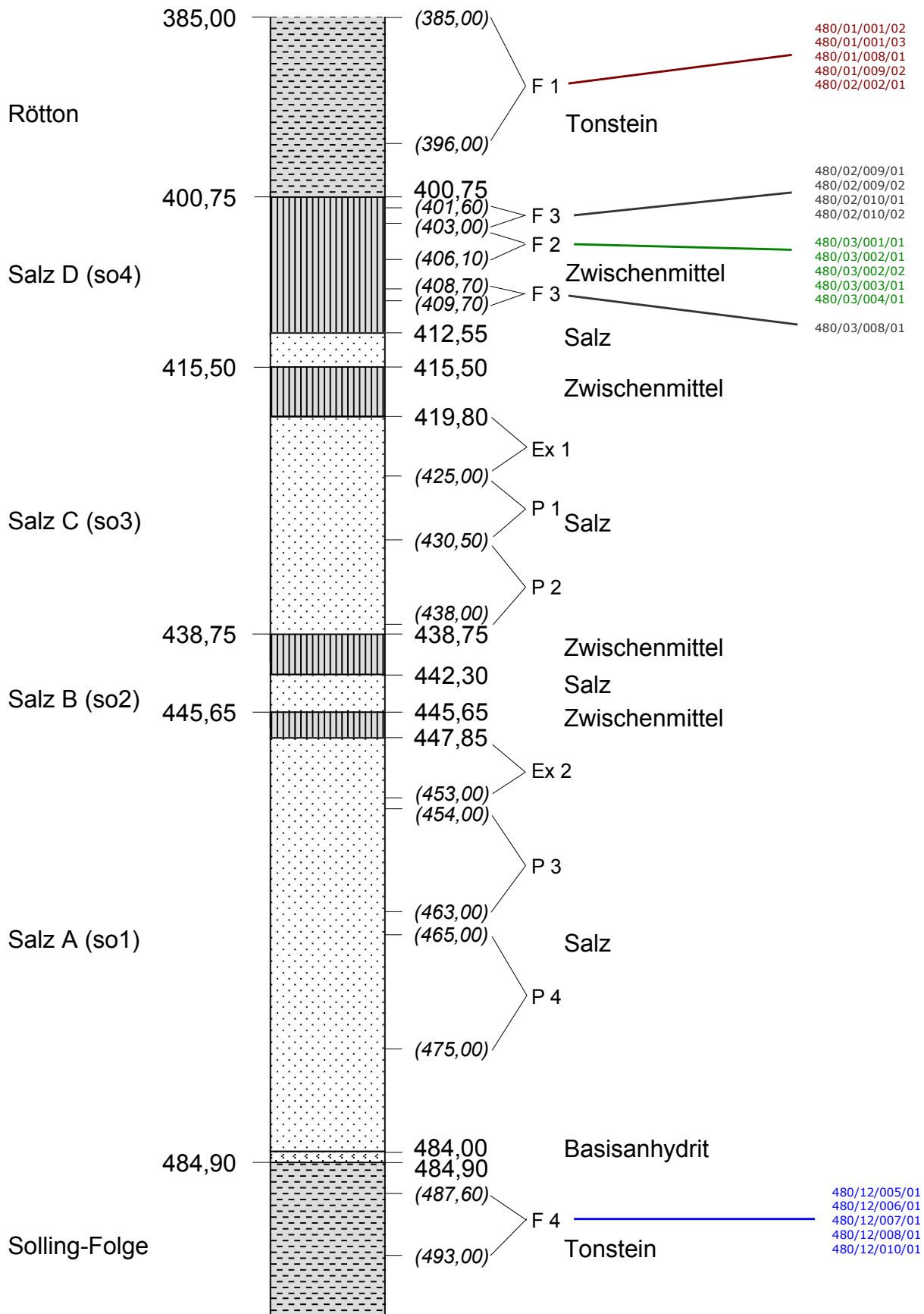


Abb. 6: Bohrung Twenthe-Rijn480
Bruchspannungen in der Oktaederebene

Anlagen

Anlage 1: Übersichtskarte Kavernenfeld Hengelo mit Bohrung 480



Akzo Nobel, Bohrung Twenthe-Rijn 480**Stratigraphie****Lithologie****Getestete Proben**

Legende

- F1: Homogenbereich im Tonstein des Rötton, Festigkeitsversuche
- F2: Homogenbereich im Zwischenmittel des so4 (Wechselfolge aus Anhydrit und Tonstein), Festigkeitsversuche
- F3: Homogenbereich im Zwischenmittel des so4 (Wechselfolge aus Anhydrit und Tonstein), Festigkeitsversuche
- F4: Tonstein der Solling-Folge, Festigkeitsversuche
- Ex1: Steinsalz des so3, Triaxialversuche zur Bestimmung der Dilatanzgrenze unter Extensionsbeanspruchung
- Ex2: Steinsalz des so1, Triaxialversuche zur Bestimmung der Dilatanzgrenze unter Extensionsbeanspruchung
- P1: Homogenbereich im Steinsalz des so3, Kriechversuche
- P2: Homogenbereich im Steinsalz des so3, Kriechversuche
- P3: Homogenbereich im Steinsalz des so1, Kriechversuche und Triaxialversuche zur Bestimmung der Dilatanzgrenze unter Kompressionsbeanspruchung
- P4: Homogenbereich im Steinsalz des so1, Kriechversuche und Triaxialversuche zur Bestimmung der Dilatanzgrenze unter Kompressionsbeanspruchung

Anlage 3: Petrographische Beschreibung der Proben

(Anl. 3.1)

Twenthe-Rijn 480/01/001/02, Proben-Nr. 020, (F1)

Teufe 385,05 - ,30m
Rötton

Tonstein, rotbraun, nicht karbonatisch, ungeschichtet, einzelne
partienweise verdichtete Nester mit bis zu 1 cm großen
Anhydritknollen, Schichteinfallen 0°

File 04020

3ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/01/001/03, Proben-Nr. 021, (F1)

Teufe 385,30 - ,54m
Rötton

Tonstein, rotbraun, nicht karbonatisch, ungeschichtet, einzelne
partienweise verdichtete Nester mit bis zu 1 cm großen
Anhydritknollen, Schichteinfallen 0°

File 04021

3ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/01/008/01, Proben-Nr. 022, (F1)

Teufe 392,14 - ,38m
Rötton

Tonstein, rotbraun, nicht karbonatisch, bereichsweise von
grüngrauen Tonsteinlagen, zerbrochenen, hellgrauen
anhydritischen Flasern und Schlieren durchsetzt, Einfallen 0°

File 04022

1ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/01/009/02, Proben-Nr. 024, (F1)

Teufe 392,65 - ,87m
Rötton

Tonstein, rotbraun, nicht karbonatisch, gut geschichtet, durch
hellgraue Anhydritlagen in unregelmäßigen Abständen,
bereichsweise schlierige Schichtung, Einfallen 0°

File 04024

3ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/02/002/01, Proben-Nr. 025, (F1)

Teufe 395,35 - ,57m
Rötton

Tonstein, rotbraun, nicht karbonatisch, bereichsweise hellgraue
anhydritische Flasern und Schlieren, Einfallen 0°

File 04025

3ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/02/009/01, Proben-Nr. 027, (F3)

Teufe 401,65 - ,90m
D) so4 (Salz

Wechselfolge aus dunkelgrauem Tonstein, nicht karbonatisch,
und hellgrauen Anhydritlagen (mm – 5 cm dick) , Einfallen 0°

File 04027

3ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/02/009/02, Proben-Nr. 028, (F3)

Teufe 401,95 - 402,17m
so4 (Salz D)

Wechselfolge aus dunkelgrauem Tonstein, nicht karbonatisch,
und hellgrauen Anhydritlagen (mm – 5 cm dick) , Einfallen 0°

File 04028

1ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/02/010/01, Proben-Nr. 029, (F3)

Teufe 402,52 - ,73m
so4 (Salz D)

Wechselfolge aus dunkelgrauem Tonstein, nicht karbonatisch,
und hellgrauen Anhydritlagen (mm – 5 cm dick), Einfallen 0°

File 04029

3ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/02/010/02, Proben-Nr. 030, (F3)

Teufe 402,73 - ,93m so4 (Salz D)

Wechselfolge aus dunkelgrauem Tonstein, nicht karbonatisch, und hellgrauen Anhydritlagen (mm – 5 cm dick) , Einfallen 0°

File 04030 3ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/03/001/01, Proben-Nr. 031, (F2)

Teufe 403,85 - 404,10m so4 (Salz D)

Anhydrit, grau, mit wenigen mm – 1 cm dicken Tonsteinlagen, nicht karbonatisch, unregelmäßig begrenzt, 0° Einfallen

File 04031 1ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/03/002/01, Proben-Nr. 032, (F2)

Teufe 404,21 - ,46m so4 (Salz D)

Anhydrit, grau, mit wenigen mm – 1 cm dicken Tonsteinlagen, nicht karbonatisch, unregelmäßig begrenzt, 0° Einfallen

File 04032 3ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/03/002/02, Proben-Nr. 033, (F2)

Teufe 404,46 - ,71m so4 (Salz D)

Anhydrit, grau, mit wenigen mm – 1 cm dicken Tonsteinlagen, nicht karbonatisch, unregelmäßig begrenzt, 0° Einfallen

File 04033 3ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/03/003/01, Proben-Nr. 034, (F2)

Teufe 405,00 - ,24m so4 (Salz D)

Anhydrit, grau, mit wenigen mm – 1 cm dicken Tonsteinlagen, nicht karbonatisch, unregelmäßig begrenzt, 0° Einfallen

File 04034 3ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/03/004/02, Proben-Nr. 035, (F2)

Teufe 405,61 - ,86m so4 (Salz D)

Wechselfolge aus gut geschichtetem dunkelgraugrünem Tonstein, nicht karbonatisch, mit grauen Anhydritlagen, beide mm- 2 cm stark, Einfallen 0°

File 04035 3ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/03/008/01, Proben-Nr. 037, (F3)

Teufe 409,16 - ,41m so4 (Salz D)

Wechselfolge aus dunkelgraugrünem Tonsteinlagen, nicht karbonatisch, mit grauen Anhydritlagen, beide mm- 3 cm stark, Einfallen 15°

File 04037 3ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/012/005/01, Proben-Nr. 038, (F4)

Teufe 487,74 - ,95m Sollingfolge

Tonstein, dunkelbraun, schluffig, nicht karbonatisch, mit einzelnen bis zu 1 cm großen Anhydritbrocken, Einfallen ca. 0°

File 04038 3ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/012/006/01, Proben-Nr. 039, (F4)

Teufe 488,10 - ,32m Sollingfolge

Tonstein, rotbraun, nicht karbonatisch, mit zwischengelagerten schluffigen z.T. feinsandigen grünen Tonsteinbänken, Einfallen ca.0°

File 04039 3ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/012/007/01, Proben-Nr. 040, (F4)

Teufe 488,77 - ,98m Sollingfolge

Tonstein, rotbraun, schluffig, nicht karbonatisch, mit einzelnen bis zu 1 cm großen Anhydritbrocken, Einfallen ca. 0°

File 04040 3ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/012/008/01, Proben-Nr. 041, (F4)

Teufe 489,62 - ,86m Sollingfolge

Tonstein, rotbraun, nicht karbonatisch, 0° Einfallen

File 04041 1ax Festigkeit

Twenthe-Rijn 480/012/010/01, Proben-Nr. 042, (F4)

Teufe 491,43 - ,66m Sollingfolge

Tonstein, rotbraun, nicht karbonatisch, schluffig, schwachfeinsandig, vereinzelt graue Anhydritspots, 0° Einfallen

File 04042 3ax Festigkeit

TRE 1002

Kernbez.: AKZ0480101101102

Labornr.: 04004

Probennr.: 020

Material: Ton (Fn) + 50 T/°C

Versuchsbeg.: 30.4.04

Versuchsende: 30.4.04

Versuchsart: Triaxial m. Nachbruch

$$\dot{\epsilon} = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

$$\sigma_3 = 1 \text{ MPa}$$

$$T = \text{RT}$$

 $F [\text{kN}]$ $\uparrow$

200

100

0

0

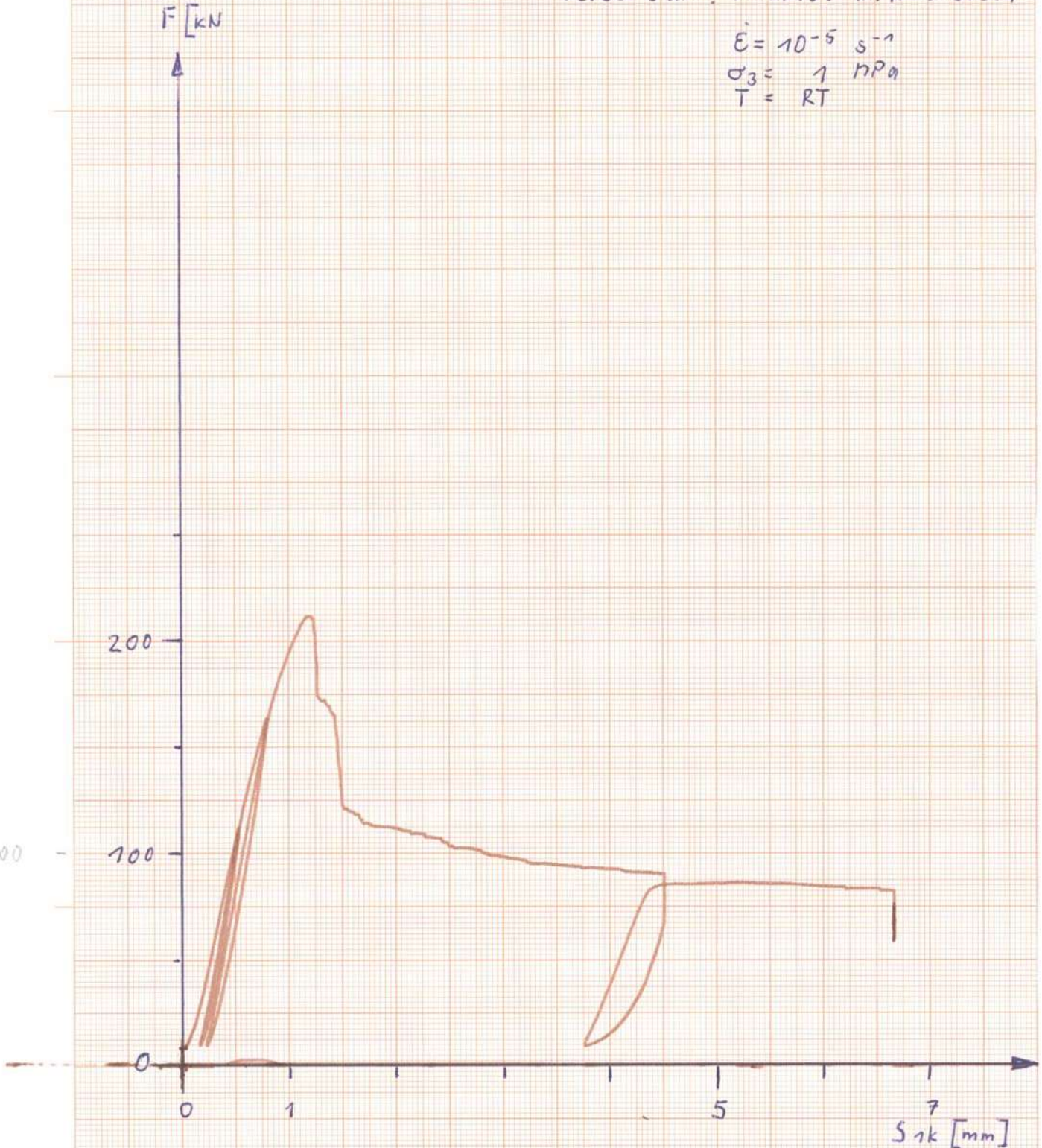
1

5

7

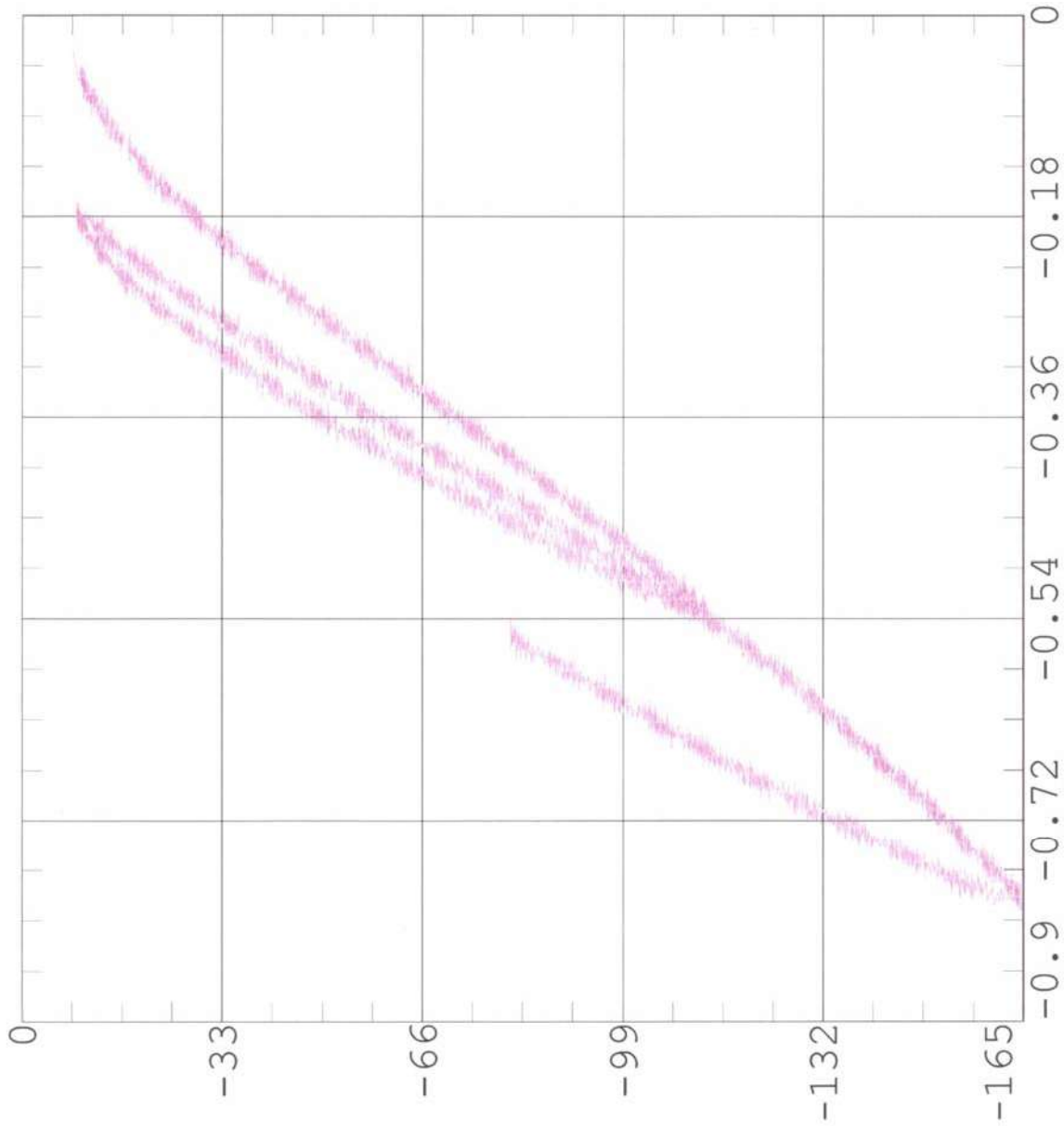
 $S_{1k} [\text{mm}]$

020 30.4.04



TRE 1002

$F1 = f(s1)$



F1

30.4.04

AKZO 480101101102

04 004 020

1. Schleife

Anlage 4.2

Blatt: -1-

Anlage 5:

Spannungs-Dehnungs-Diagramme

Triaxiale Festigkeitsversuche

Deck- und Grundgebirge

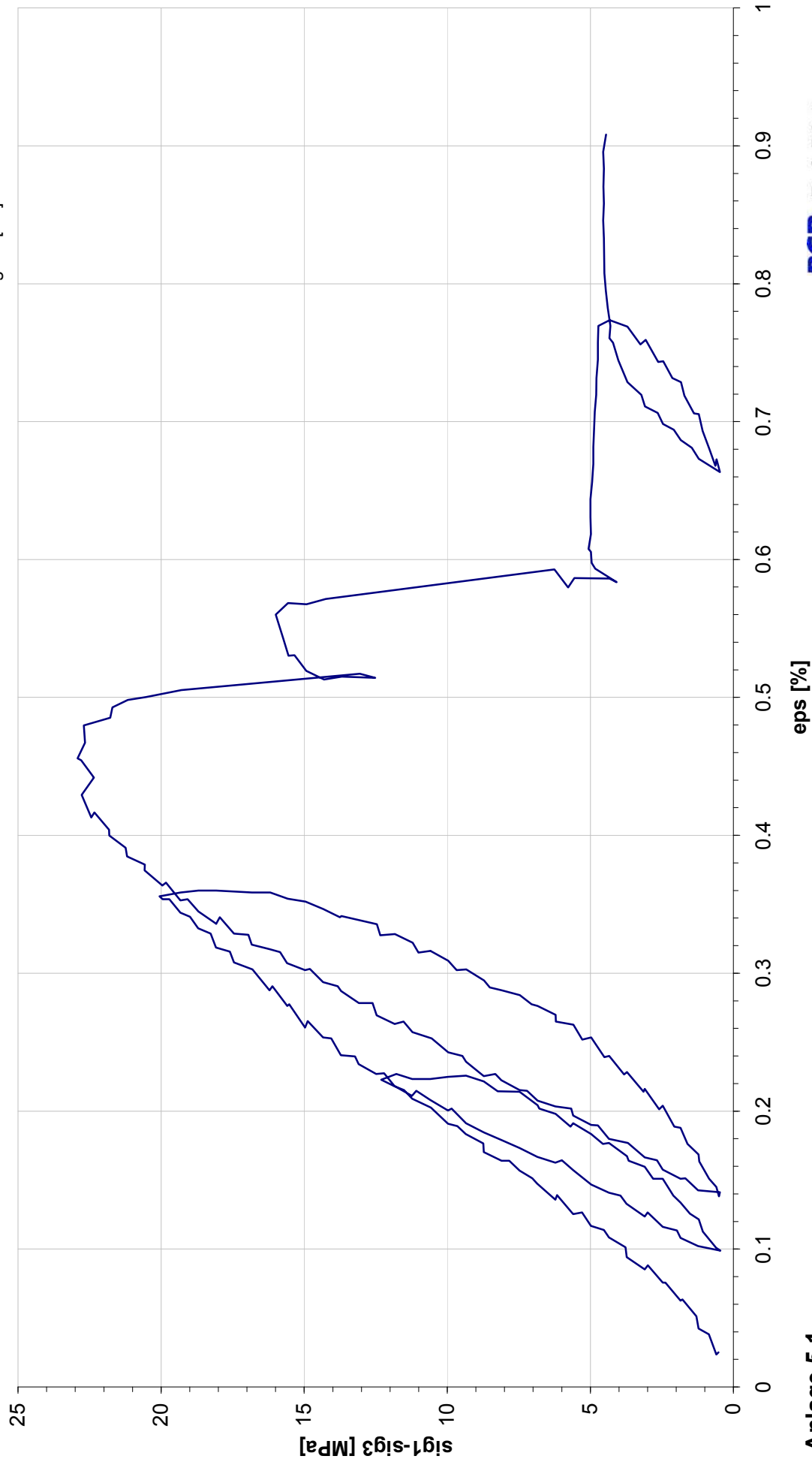
Bohrung Twenthe-Rijn 480

Proben Nr.: 22

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/1/08/01/0
Labornummer : 04004
Filename : 04004022.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trsoT/4t
Durchmesser, mm : 100.83
Höhe, mm : 237.84
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 0 \\ 0
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

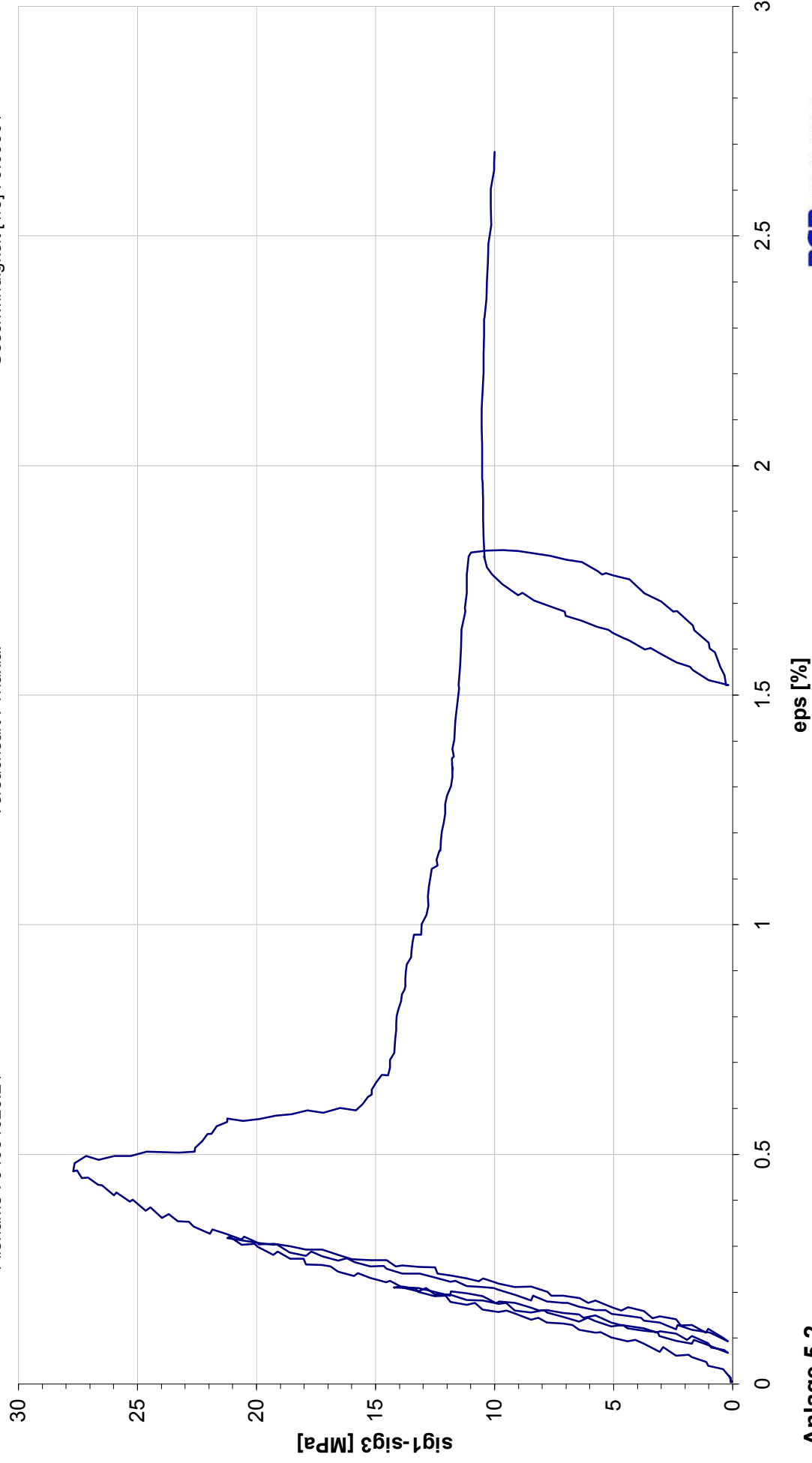


Proben Nr.: 20

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/1/01/02/0
Labornummer : 04004
Filename : 04004020.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trsoT/^t
Durchmesser, mm : 96.96
Höhe, mm : 249.69
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 1 \\ 1
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

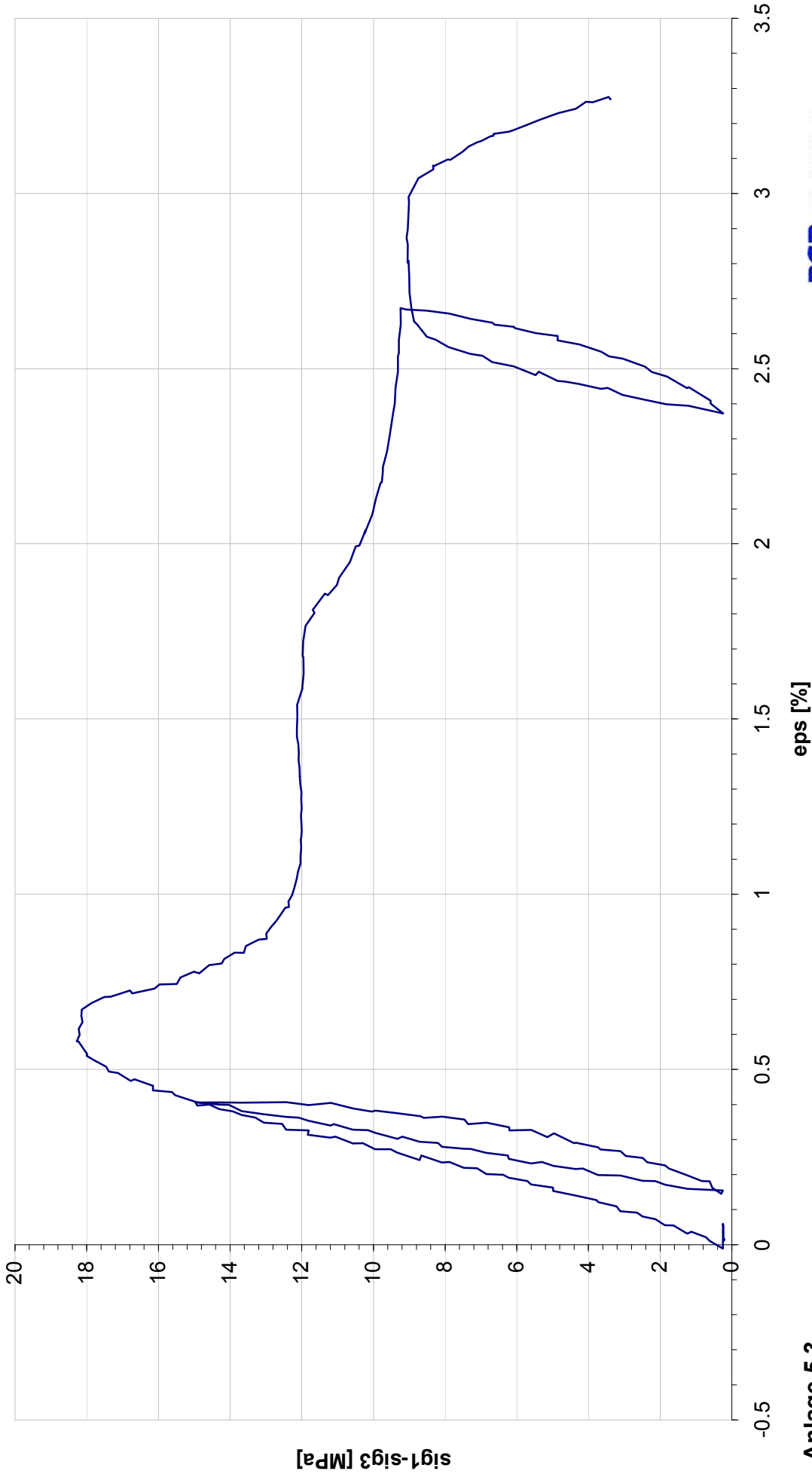


Proben Nr.: 24

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/1/09/02/0
Labornummer : 04004
Filename : 04004024.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trsoT/4t
Durchmesser, mm : 101.02
Höhe, mm : 220.79
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 2.5 \ 2.5
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001



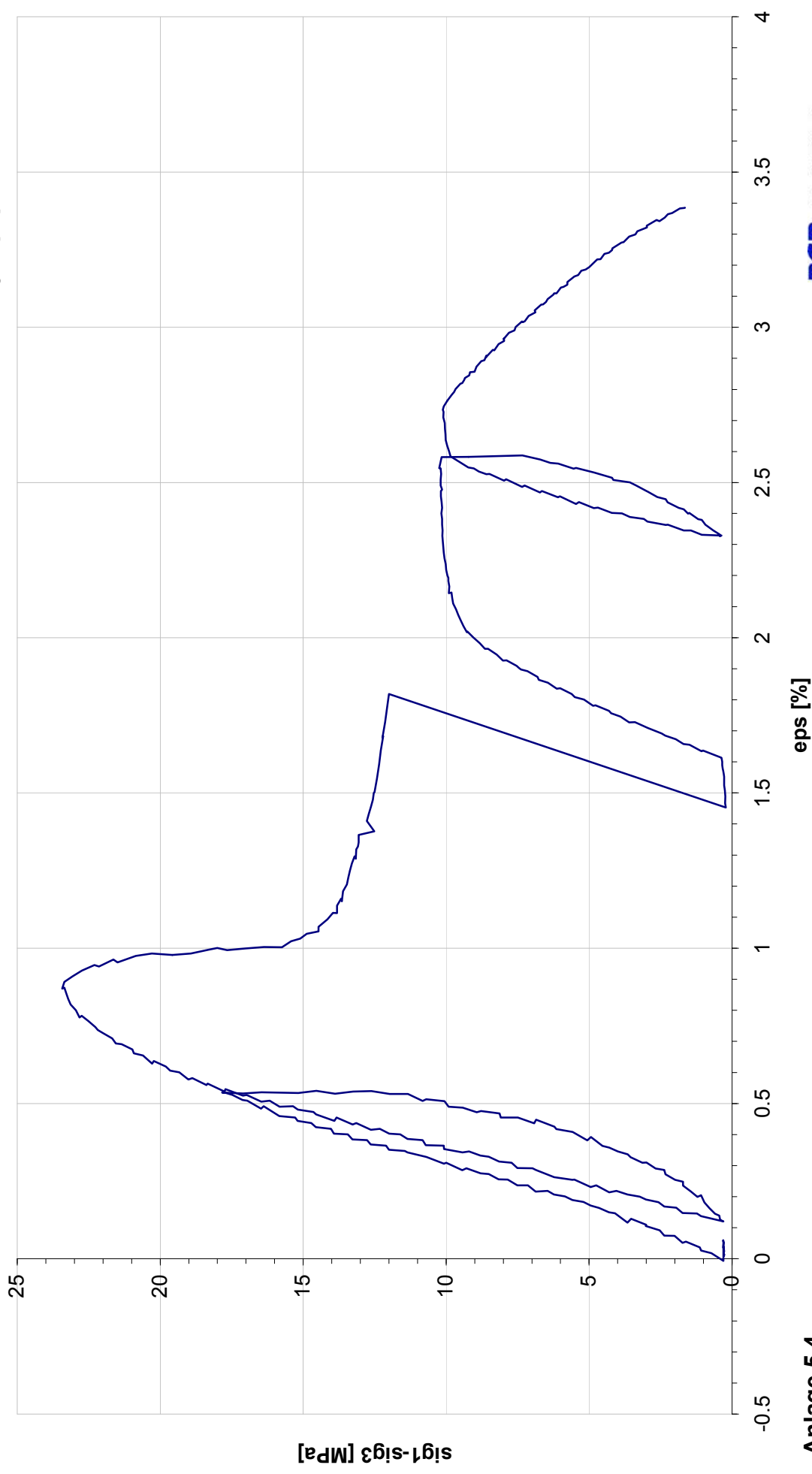
Proben Nr.: 25

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/2/02/01/0
Labornummer : 04004
Filename : 04004025.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trsoT/t
Durchmesser, mm : 99.43
Höhe, mm : 220.
Versuchsart : Triaxial

Manteldruck, MPa : 6 \\\ 6
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

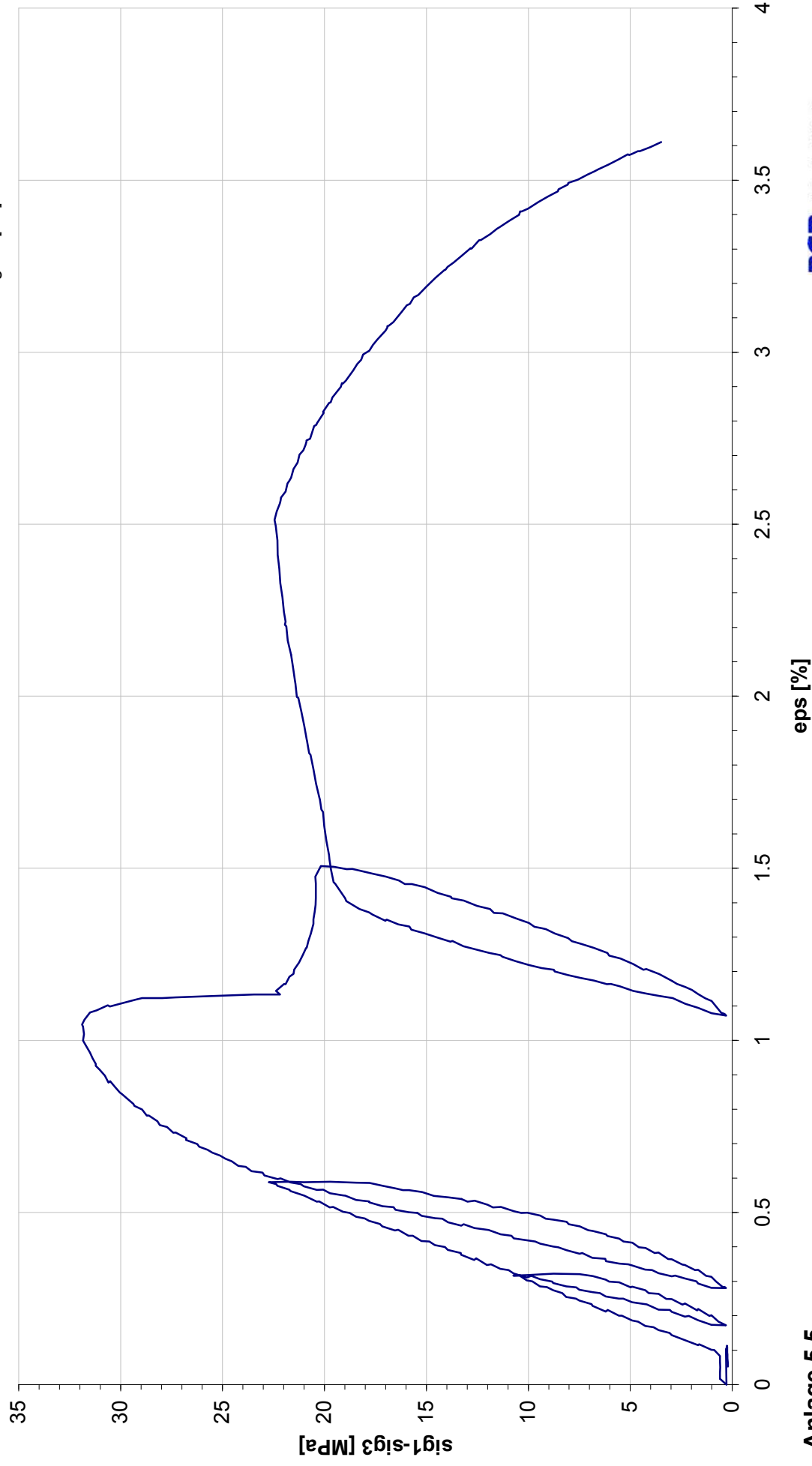


Proben Nr.: 21

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/1/01/03/0
Labornummer : 04004
Filename : 04004021.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trsoT/t
Durchmesser, mm : 99.09
Höhe, mm : 240.56
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 10 \ 10
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

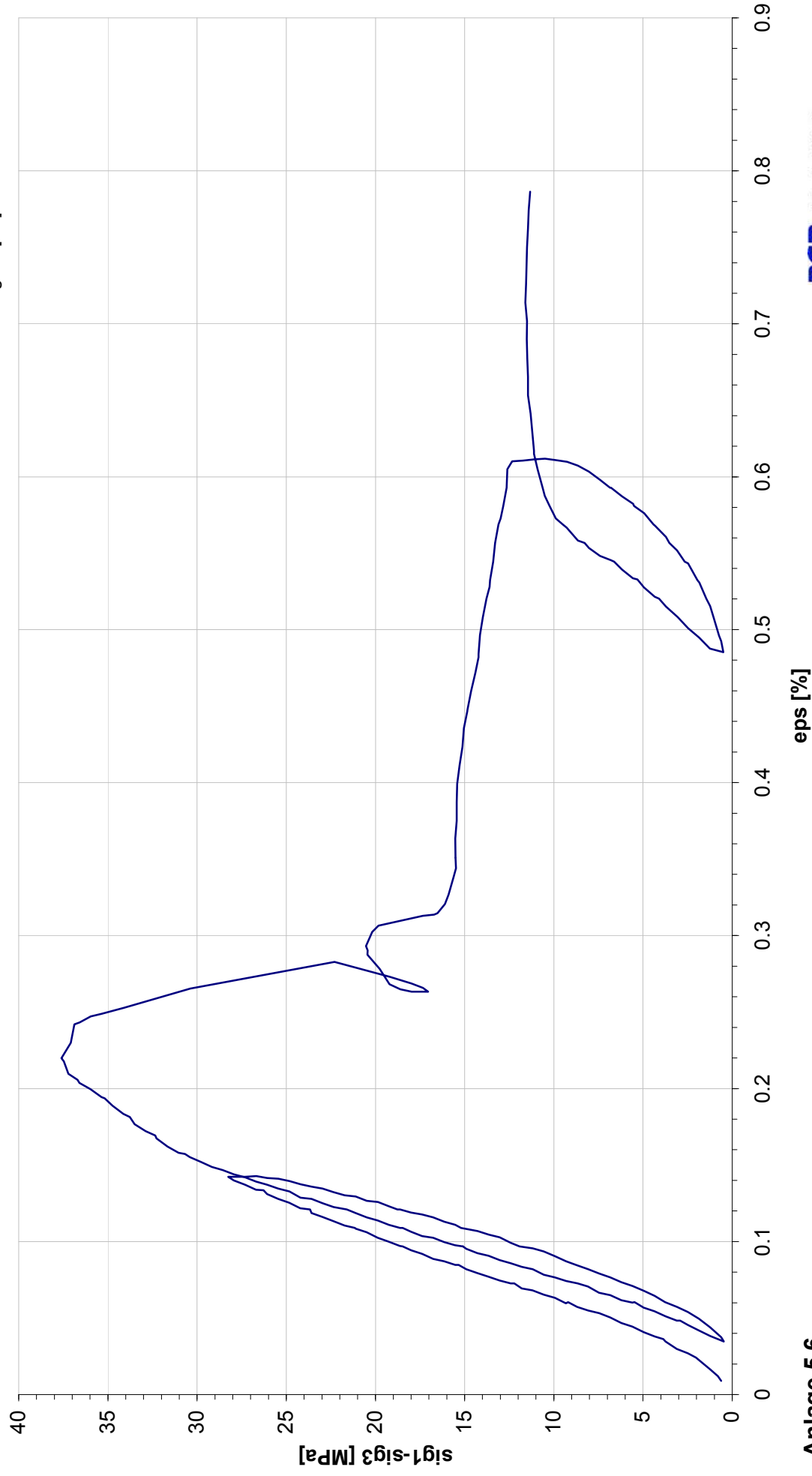


Proben Nr.: 31

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/3/01/01/0
Labornummer : 04004
Filename : 040040031.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trso4/ah
Durchmesser, mm : 101.23
Höhe, mm : 247.95
Versuchsart : Einaxial
Manteldruck, MPa : 0 \\ 0
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

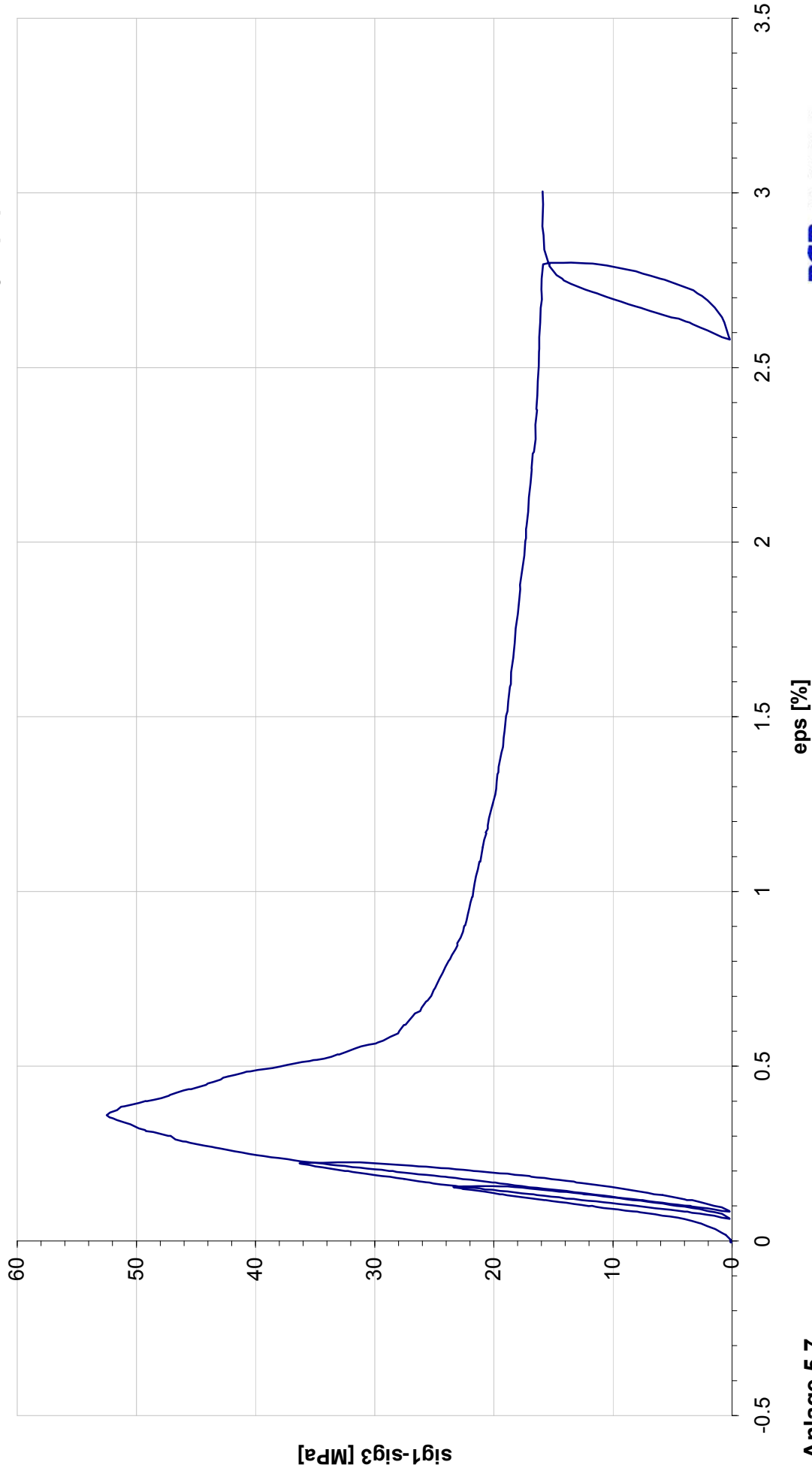


Proben Nr.: 34

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/3/03/01/0
Labornummer : 04004
Filename : 04004034.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trso4/^ah
Durchmesser, mm : 101.24
Höhe, mm : 239.63
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 1 \ 1
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

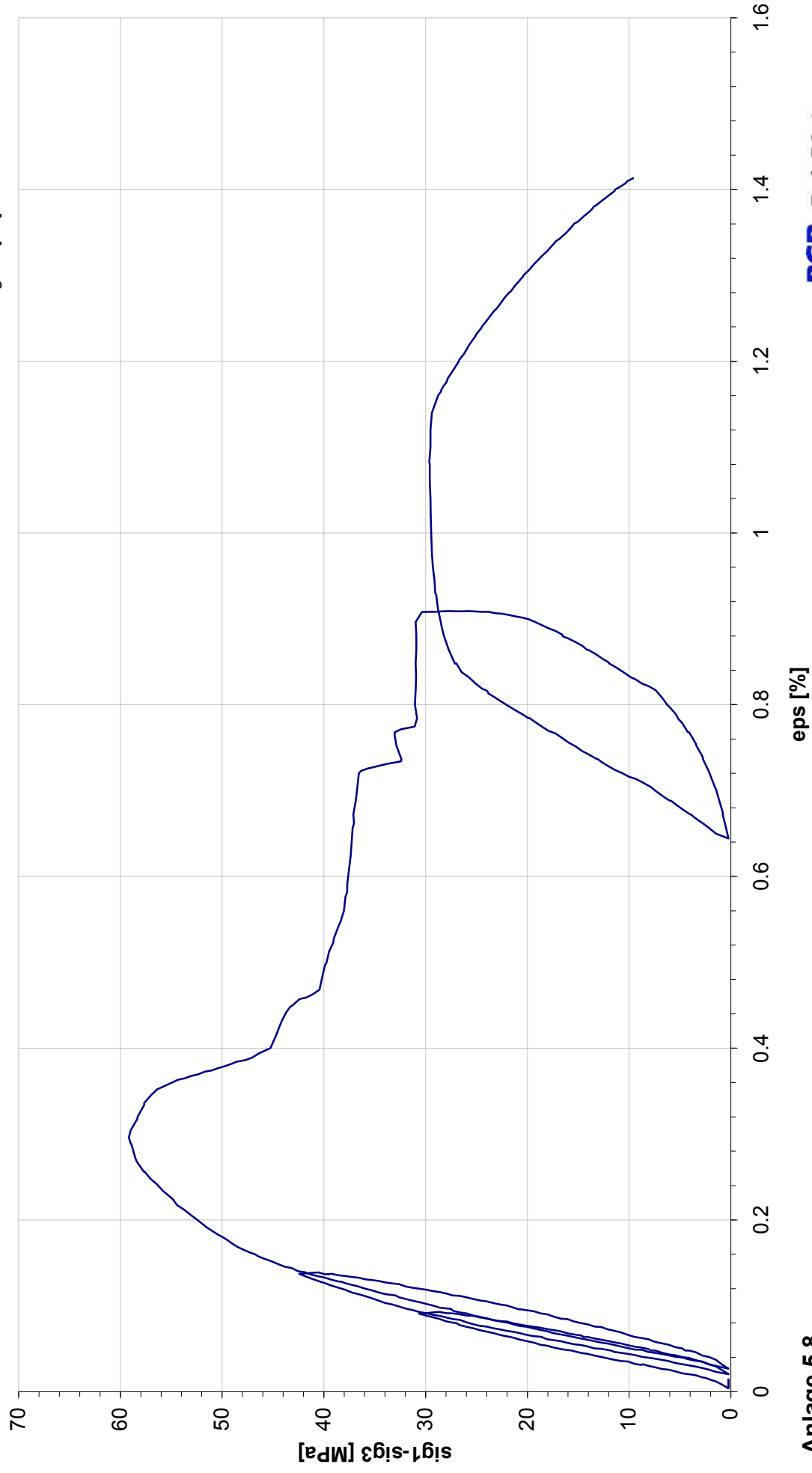


Proben Nr.: 32

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/3/02/01/0
Labornummer : 04004
Filename : 04004032.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trso4/^ah
Durchmesser, mm : 98.
Höhe, mm : 249.96
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 2.5 \\ 2.5
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 20.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

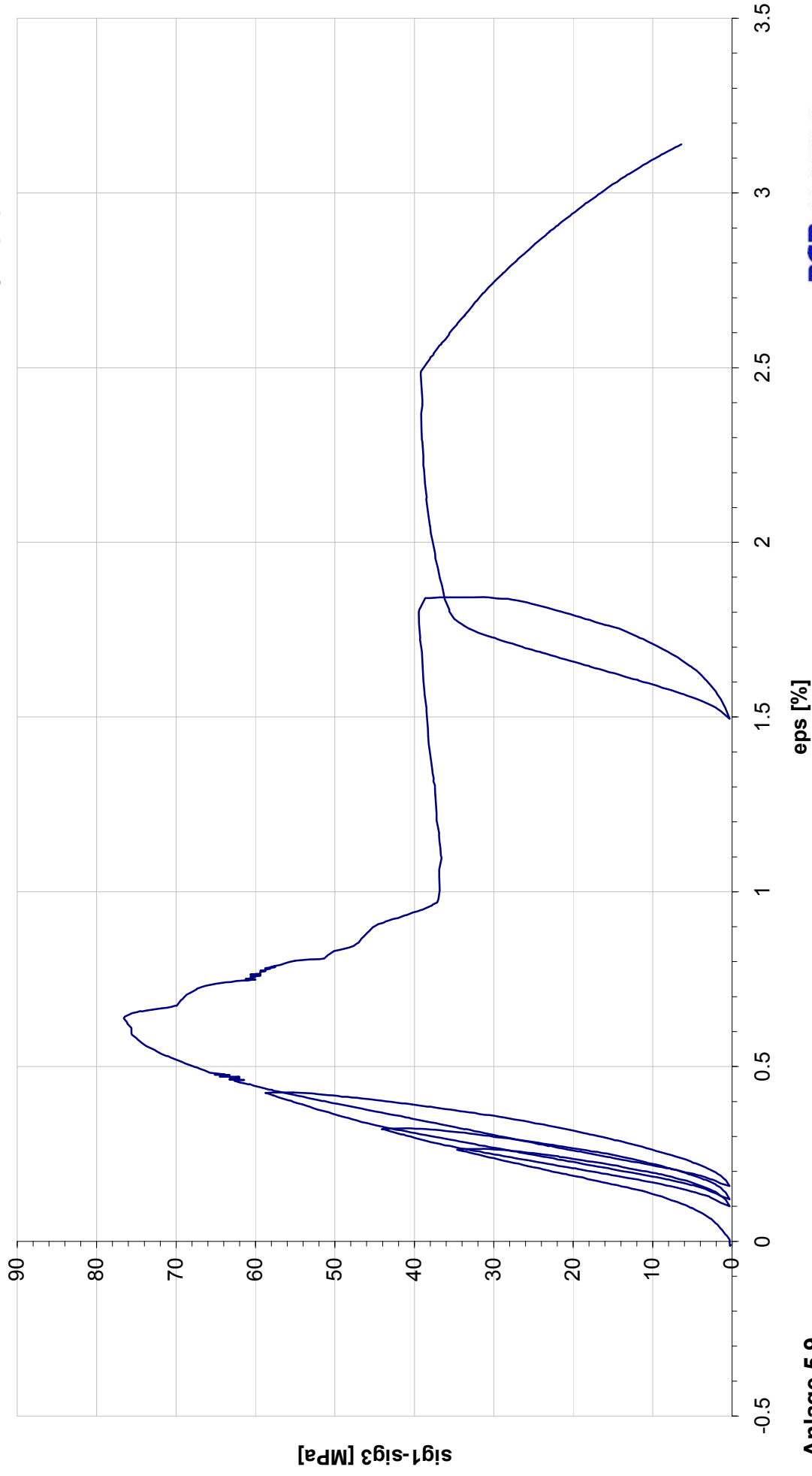


Proben Nr.: 35

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/3/04/02/0
Labornummer : 04004
Filename : 04004035.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trso4/^ah
Durchmesser, mm : 101.26
Höhe, mm : 249.06
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 6 \ 6
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 23.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

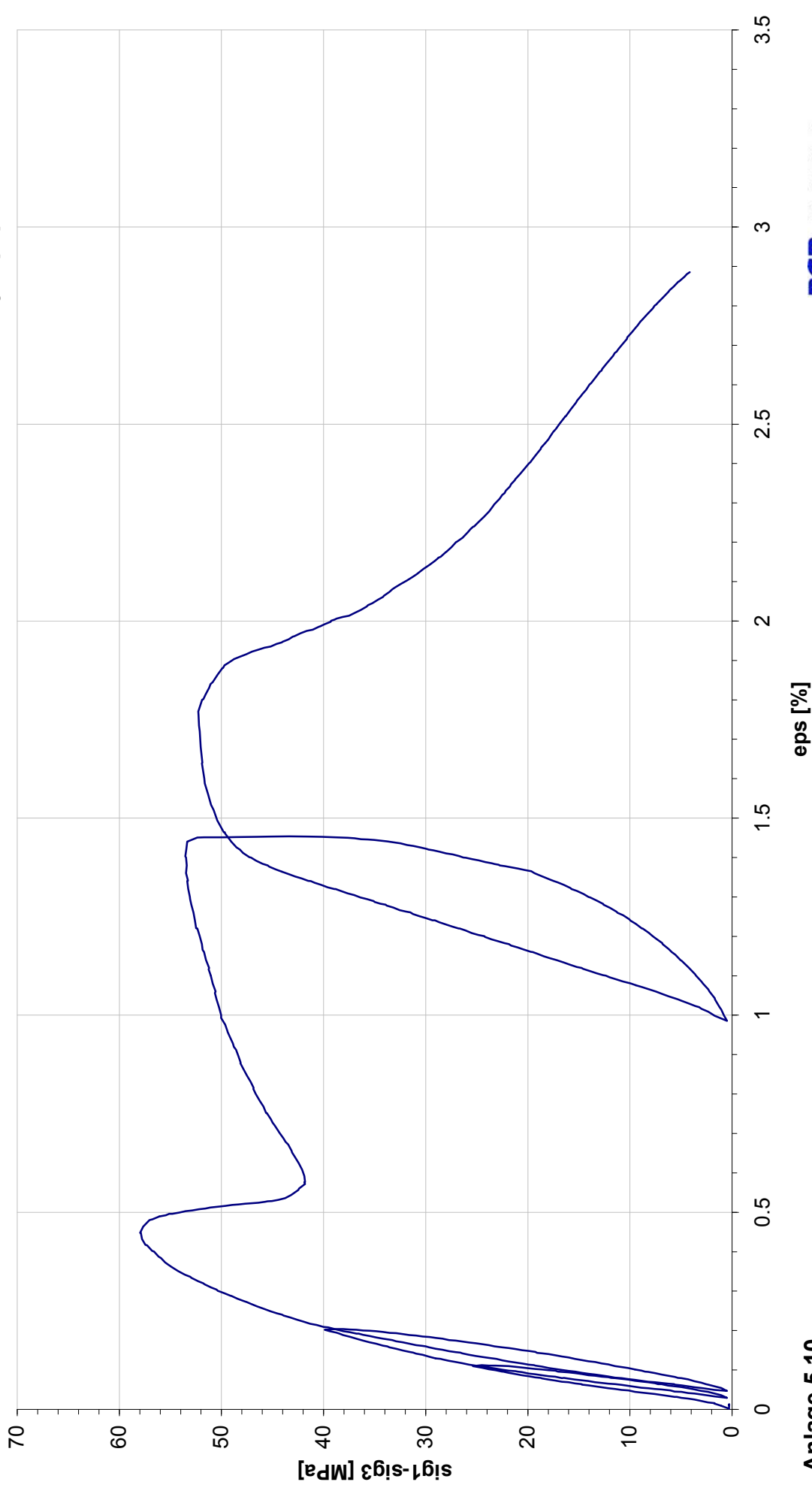


Proben Nr.: 33

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/3/02/02/0
Labornummer : 04004
Filename : 04004033.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trso4/^ah
Durchmesser, mm : 98.93
Höhe, mm : 249.97
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 10 \\ 10
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

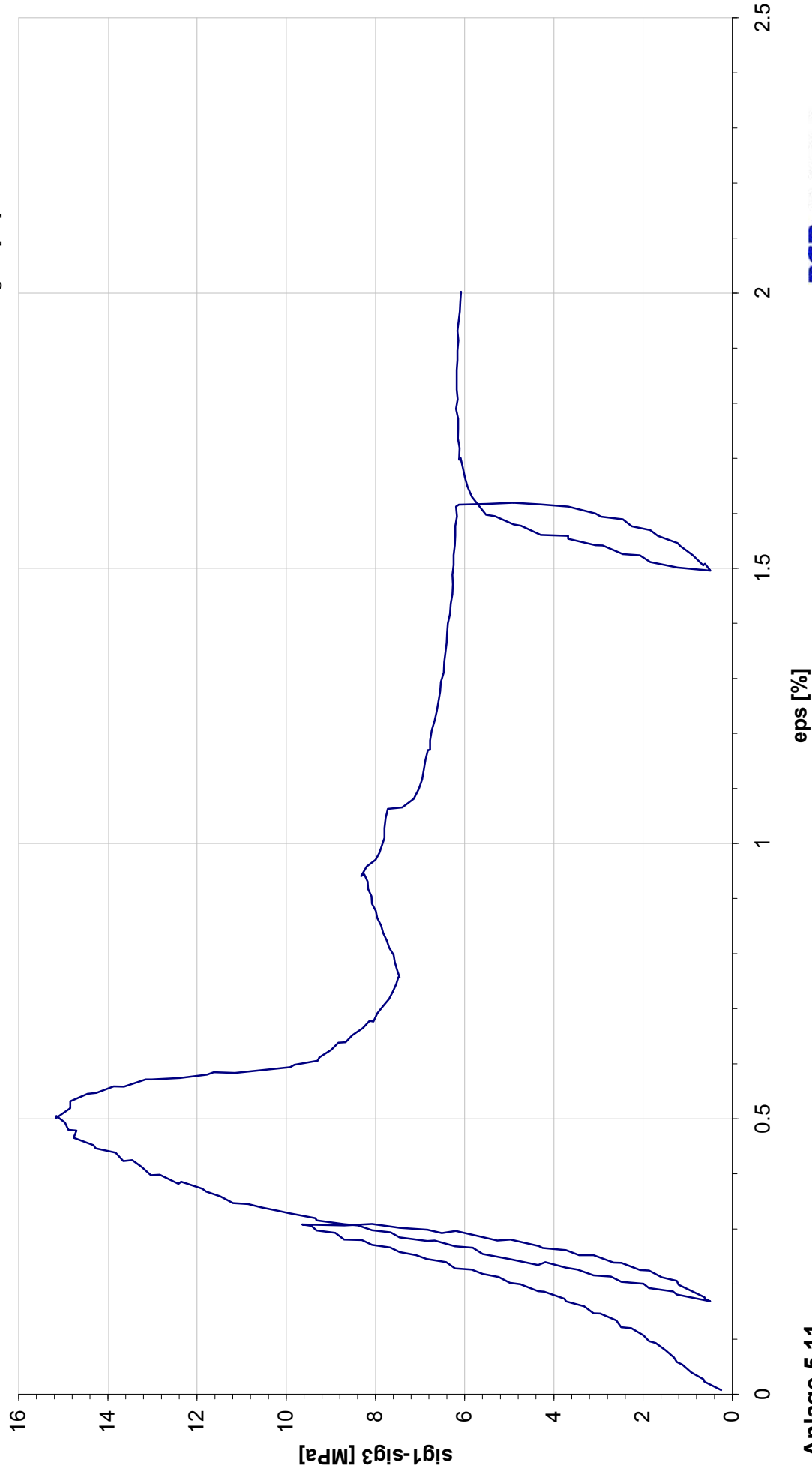


Proben Nr.: 28

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/2/09/02/0
Labornummer : 04004
Filename : 04004028.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trso4/tt
Durchmesser, mm : 101.09
Höhe, mm : 225.79
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 0 \ 0
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

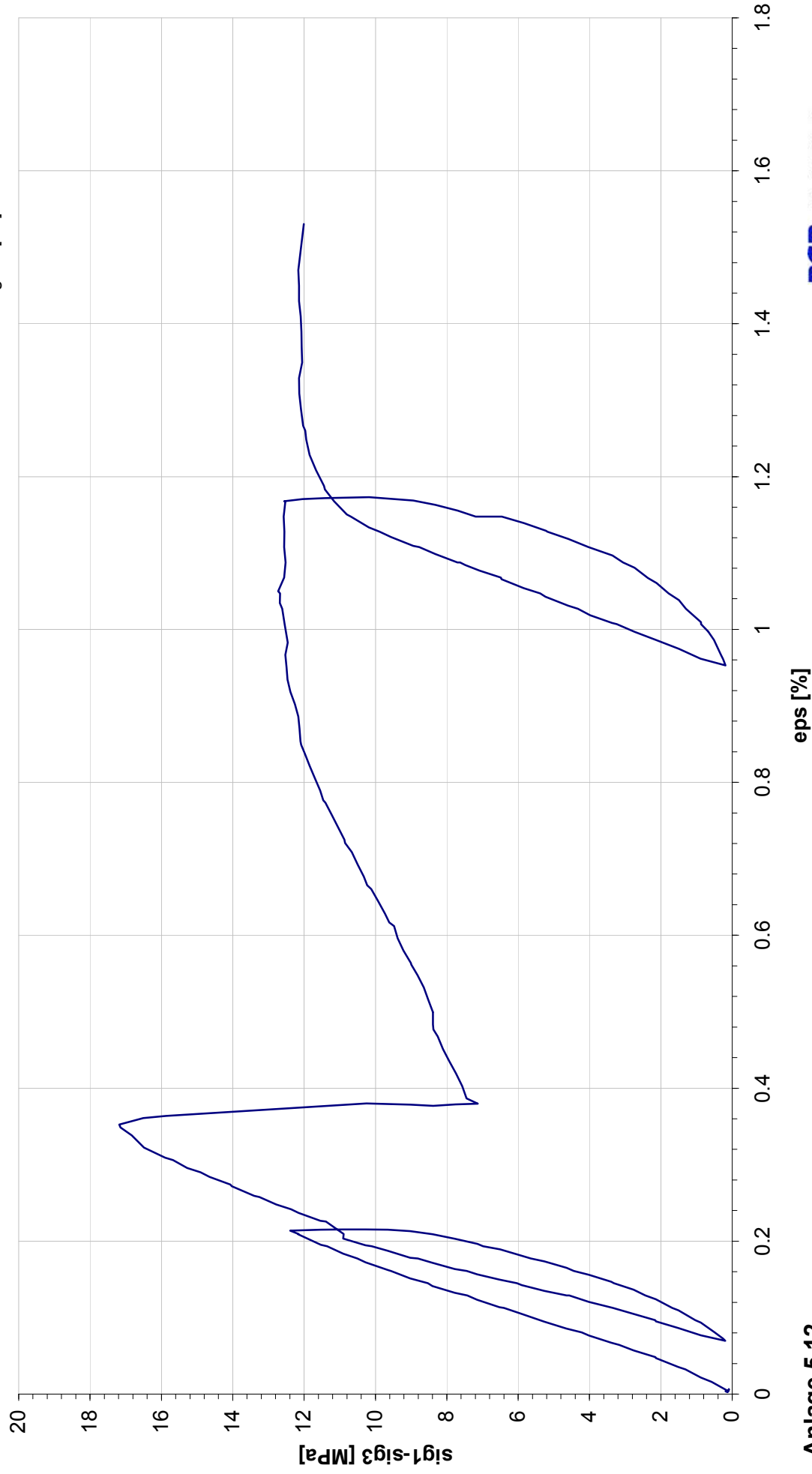


Proben Nr.: 37

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/3/08/01/0
Labornummer : 04004
Filename : 04004037.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trso4/tt
Durchmesser, mm : 100.73
Höhe, mm : 248.3
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 1 \\ 1
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

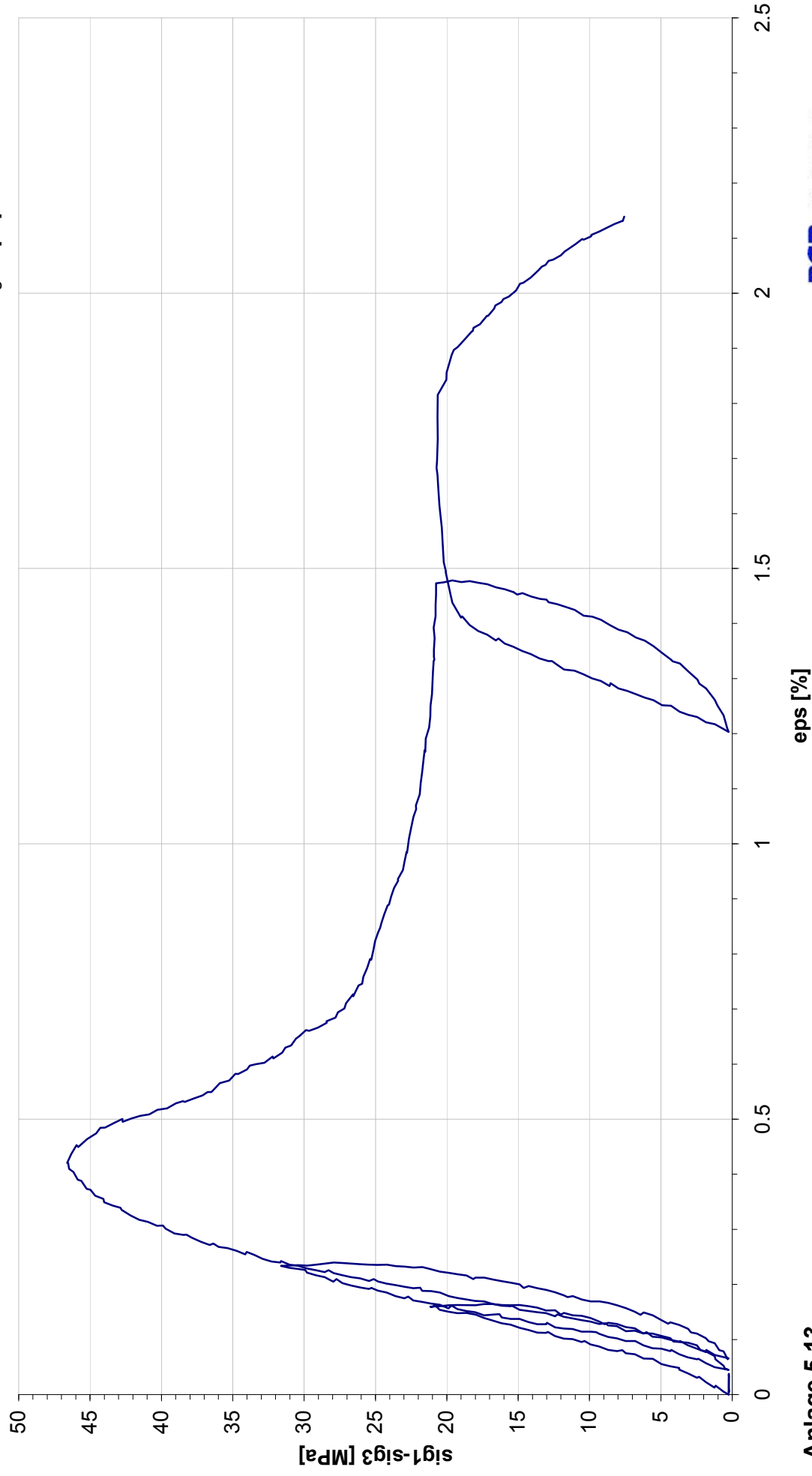


Proben Nr.: 27

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/2/09/01/0
Labornummer : 04004
Filename : 04004027.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trso4/tt
Durchmesser, mm : 101.17
Höhe, mm : 247.83
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 2.5 \ 2.5
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 19.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

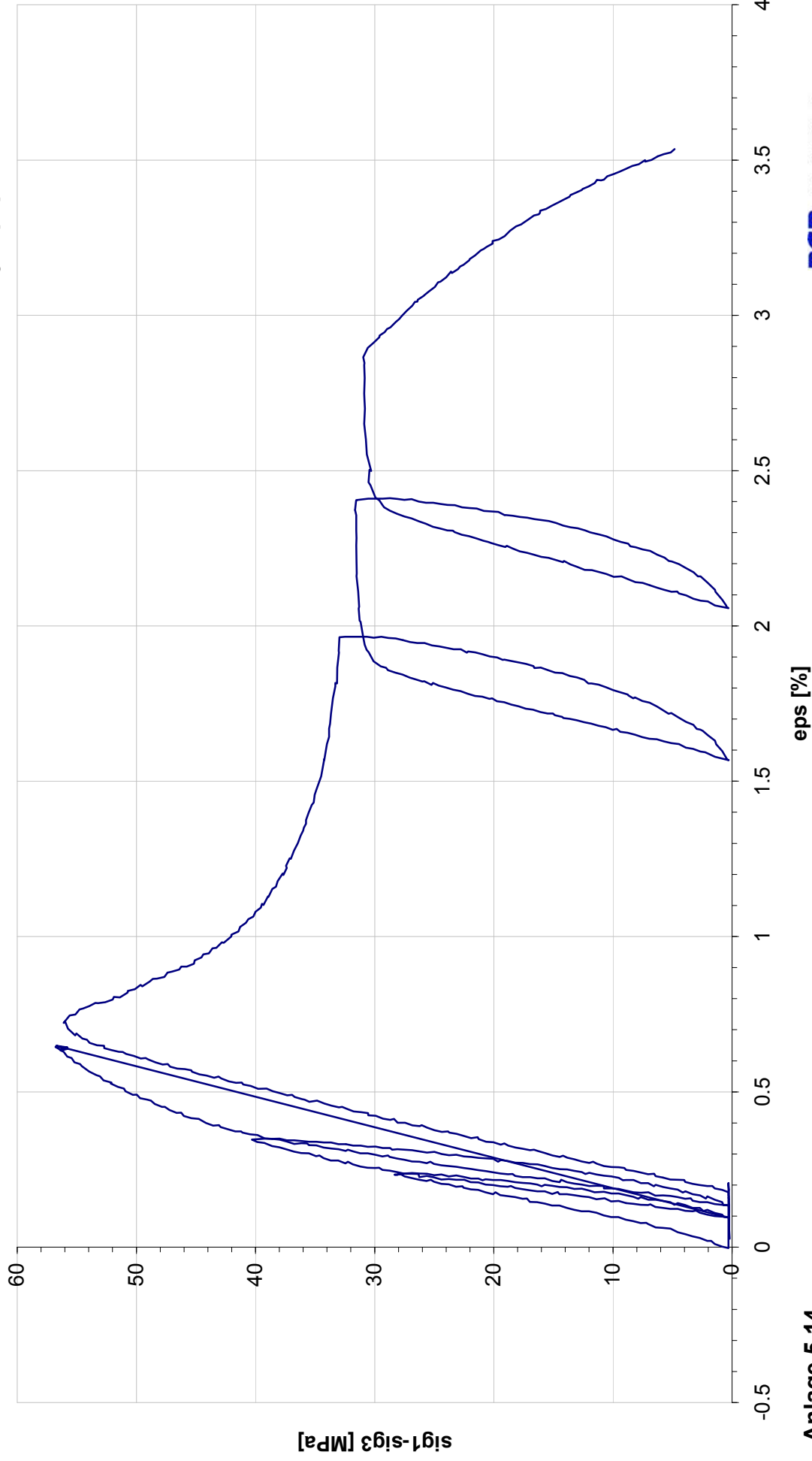


Proben Nr.: 30

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/2/010/02/0
Labornummer : 04004
Filename : 04004030.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trso4/tt
Durchmesser, mm : 101.24
Höhe, mm : 203.76
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 6 || 6
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

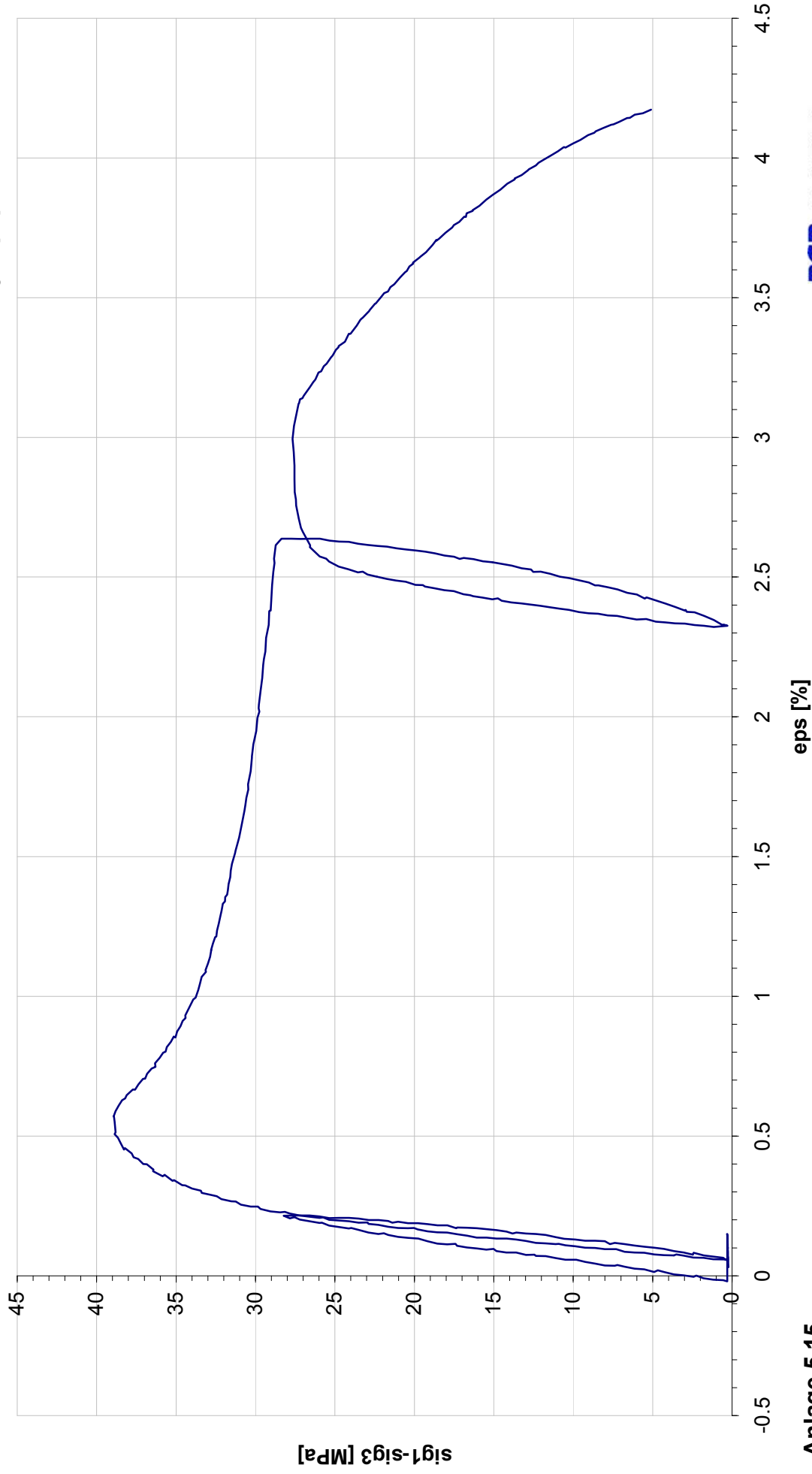


Proben Nr.: 29

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/2/010/01/0
Labornummer : 04004
Filename : 04004029.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trso4/tt
Durchmesser, mm : 101.26
Höhe, mm : 210.44
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 10 \ 10
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

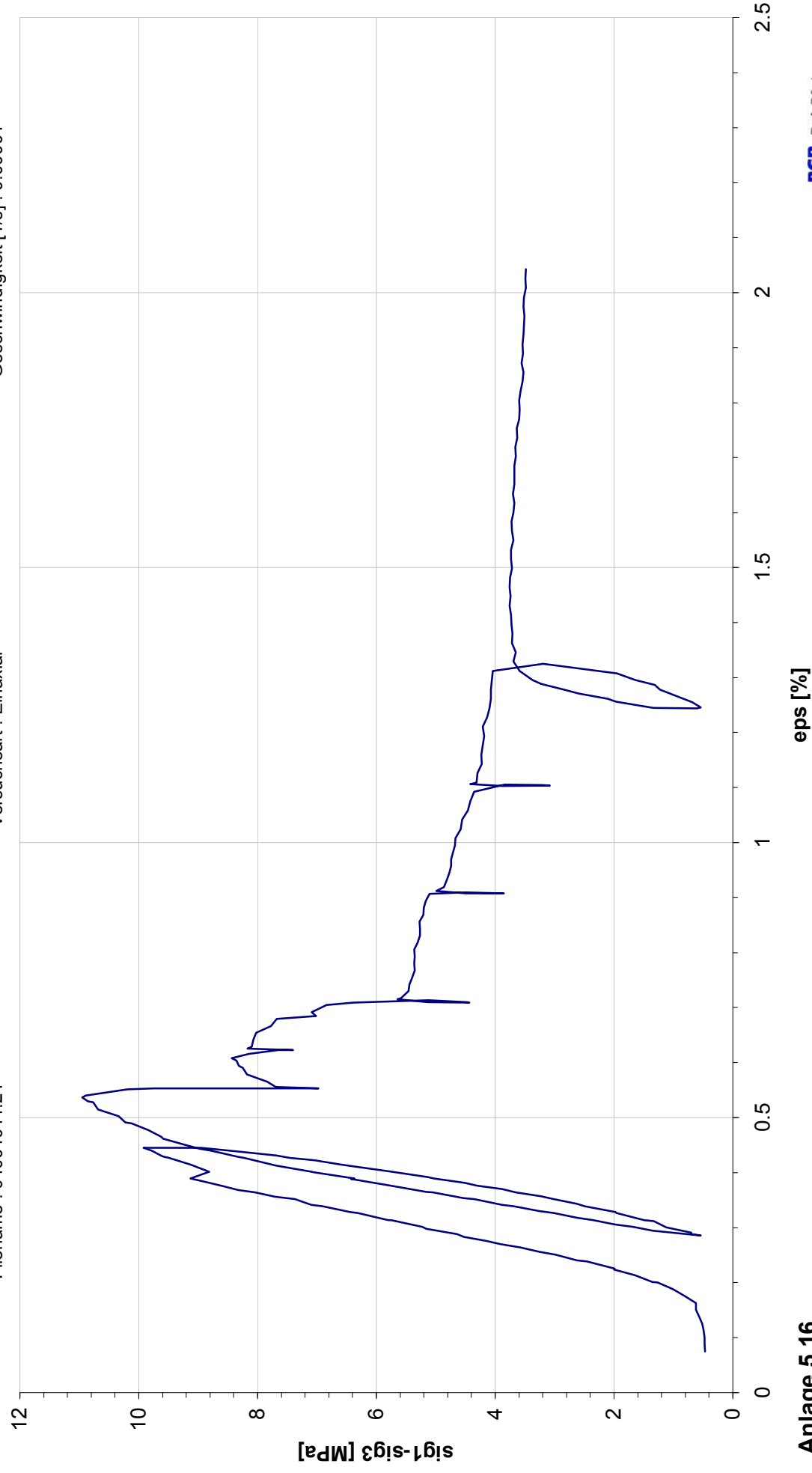


Proben Nr.: 41

Projekt : 9Y32140200/
Kernbezeichnung : AKZO-480/12/08/01/0
Labornummer : 004004
Filename : 04004041.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trmS/^t
Durchmesser, mm : 99.99
Höhe, mm : 239.37
Versuchsart : Einaxial
Manteldruck, MPa : 0 \\ 0
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

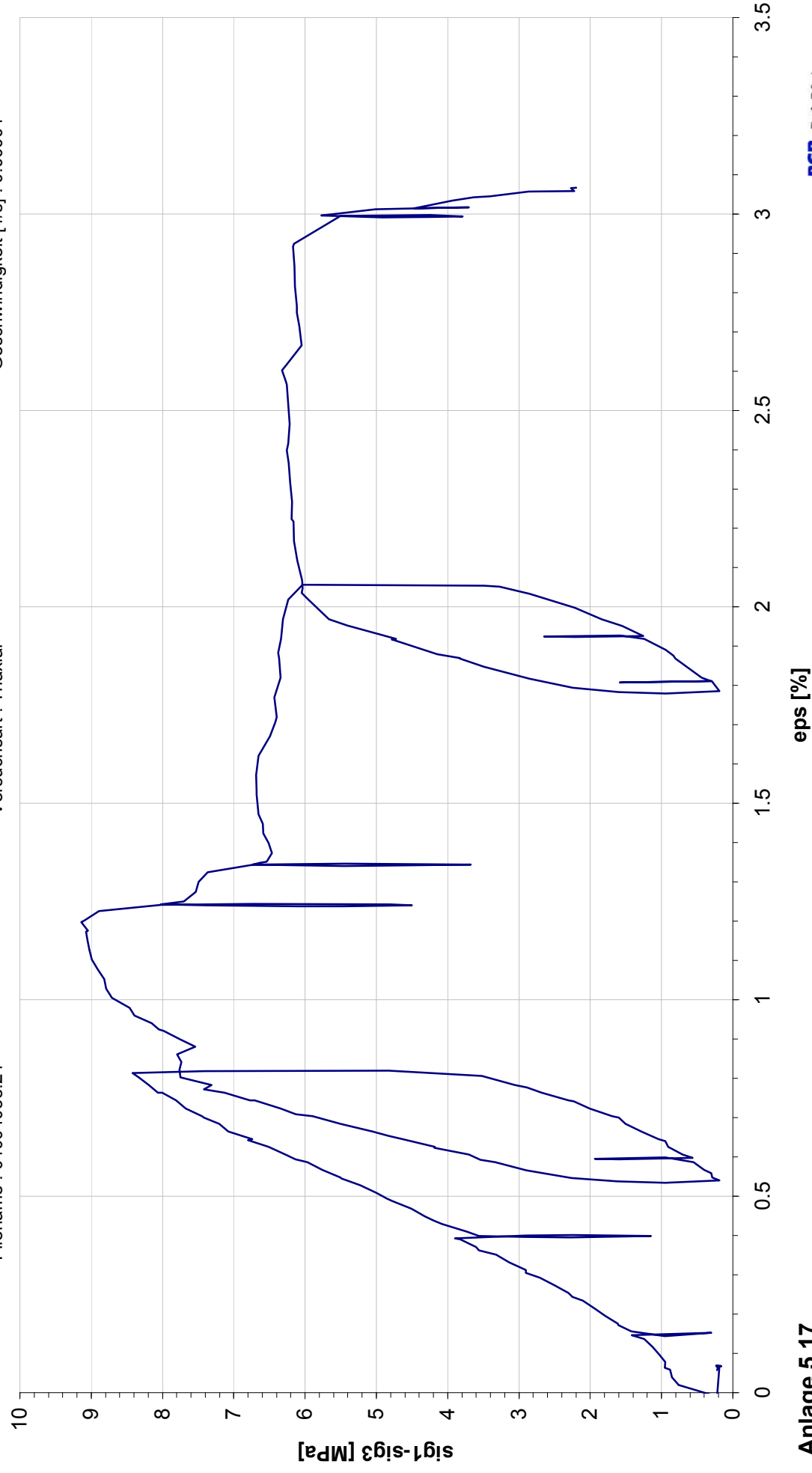


Proben Nr.: 38

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AN-480/12/05/01/0
Labornummer : 004004
Filename : 04004038.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trsmS/tt
Durchmesser, mm : 98.85
Höhe, mm : 205.25
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 1 \ 1
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

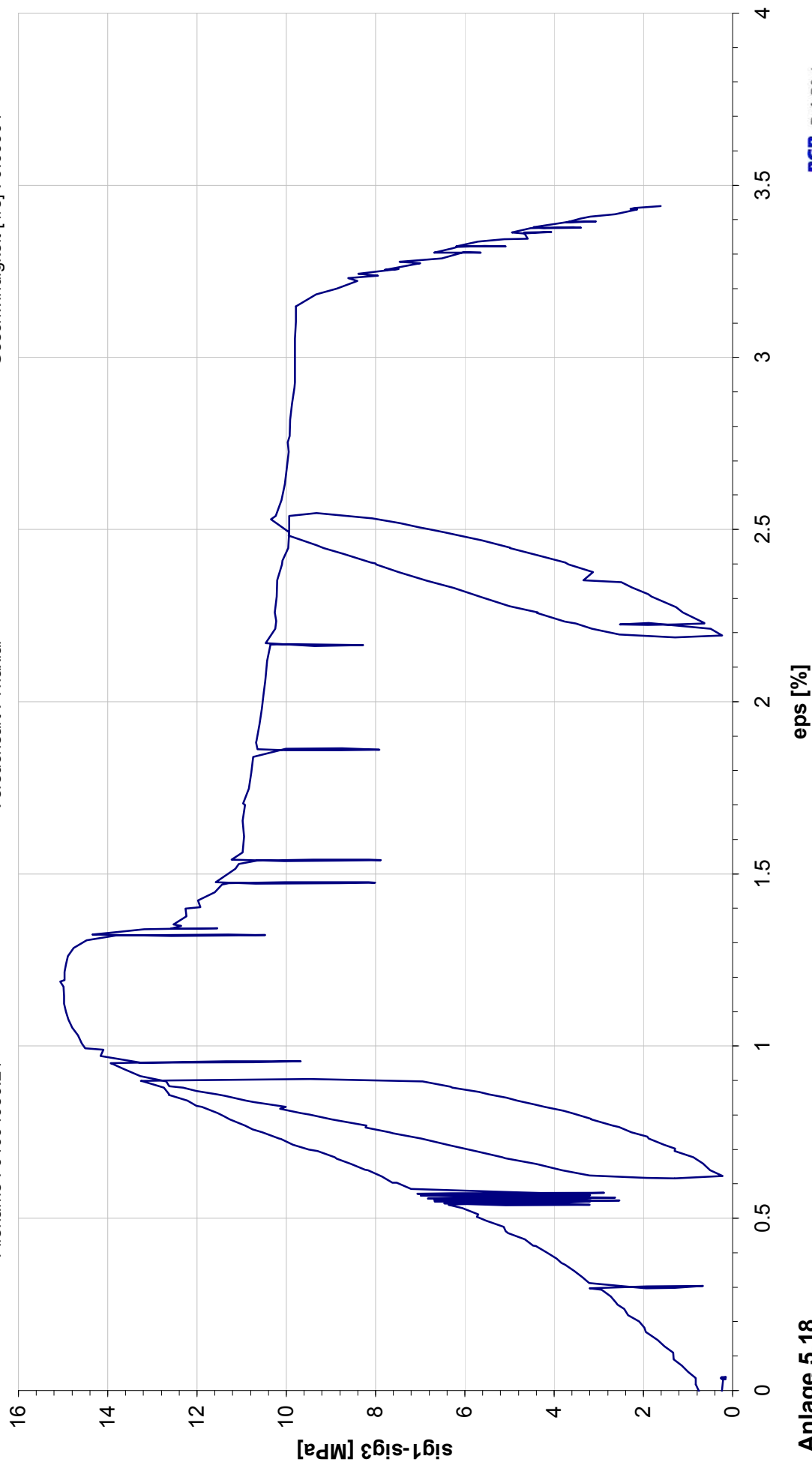


Proben Nr.: 39

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/12/06/01/0
Labornummer : 004004
Filename : 04004039.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trmS/^t
Durchmesser, mm : 100.17
Höhe, mm : 219.4
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 2.5 \\ 2.5
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

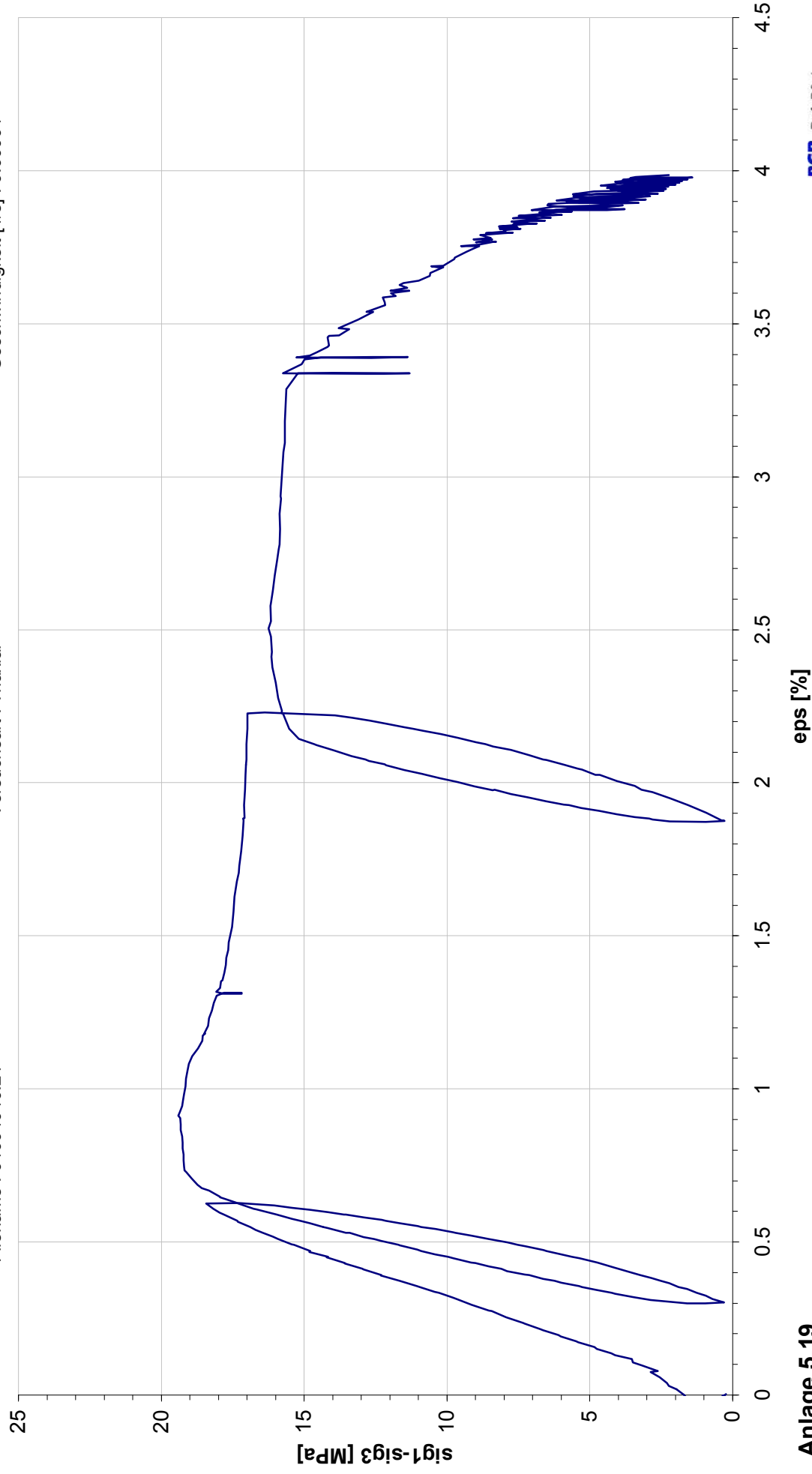


Proben Nr.: 40

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/12/07/01/0
Labornummer : 004004
Filename : 04004040.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trsmS/t
Durchmesser, mm : 100.32
Höhe, mm : 204.37
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 6 \\ 6
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001

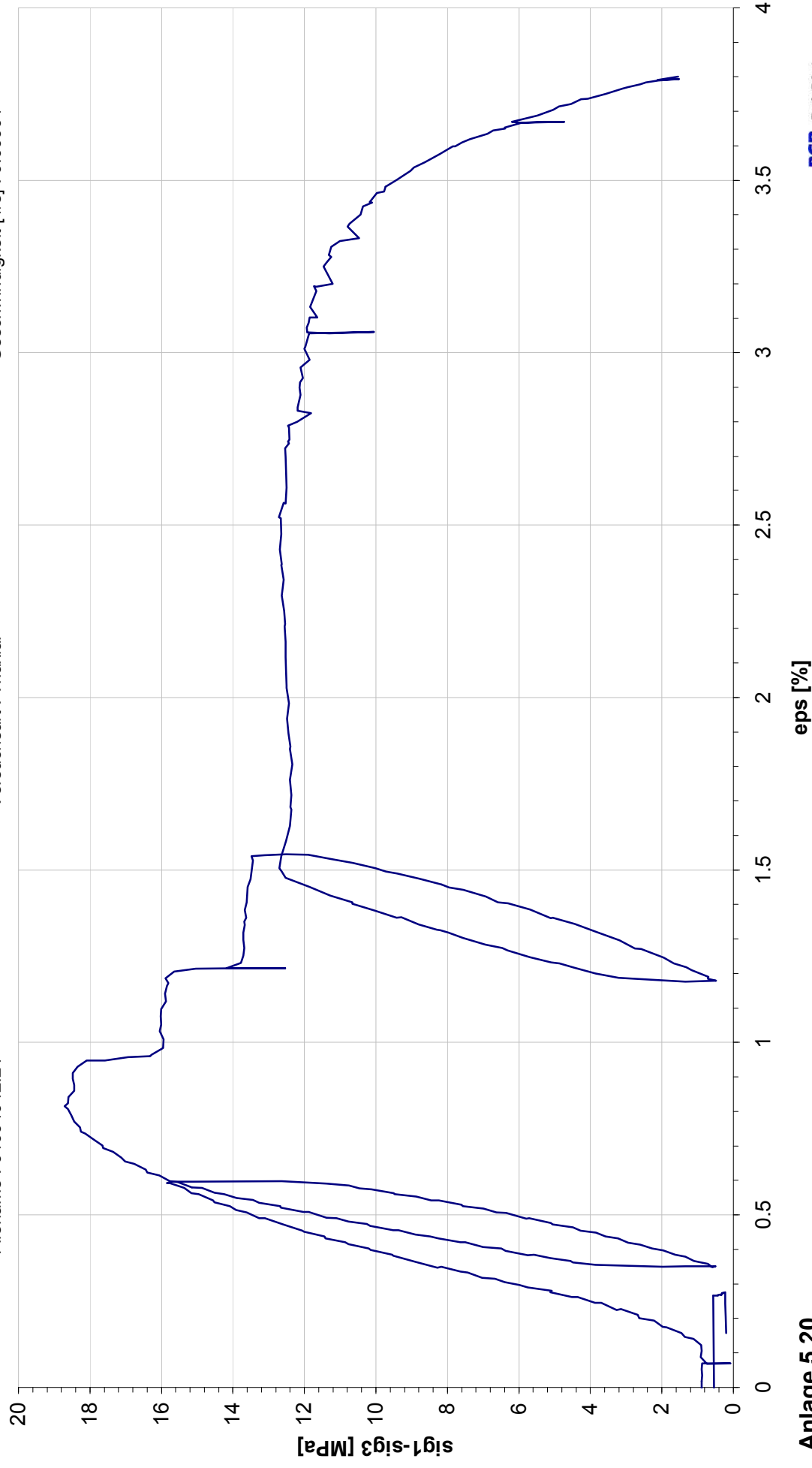


Proben Nr.: 42

Projekt : 05-0074-04-0814-02/
Kernbezeichnung : AKZO-480/12/010/01/0
Labornummer : 004004
Filename : 04004042.24

sig1-sig3=f(eps)

Material : trsmS/t
Durchmesser, mm : 100.49
Höhe, mm : 229.16
Versuchsart : Triaxial
Manteldruck, MPa : 10 \ 10
Flüssigkeitsdruck :
Temperatur, °C : 21.5
Geschwindigkeit [1/s] : 0.00001



Anlage 6:
Fotodokumentation

Triaxiale Festigkeitsversuche

Deck- und Grundgebirge

Bohrung Twenthe-Rijn 480

Anlage 6.1: Fotodokumentation

Kern Twenthe-Rijn-480/01/001/02

Deckgebirge, Schicht F1
Proben-Nr. 027

vor dem Versuch



nach dem Versuch



Anlage 6.2: Fotodokumentation

Kern Twenthe-Rijn-480/01/009/02

Grundgebirge, Schicht F1
Proben-Nr. 024

vor dem Versuch



nach dem Versuch



Anlage 6.3: Fotodokumentation

Kern Twenthe-Rijn-480/03/002/02

Deckgebirge, Schicht F2
Proben-Nr. 033

vor dem Versuch



nach dem Versuch



Anlage 6.4: Fotodokumentation

Kern Twenthe-Rijn-480/03/004/02

Deckgebirge, Schicht F2
Proben-Nr. 035

vor dem Versuch



nach dem Versuch

(mit / ohne Teflon-
Ummantelung)



Anlage 6.5: Fotodokumentation

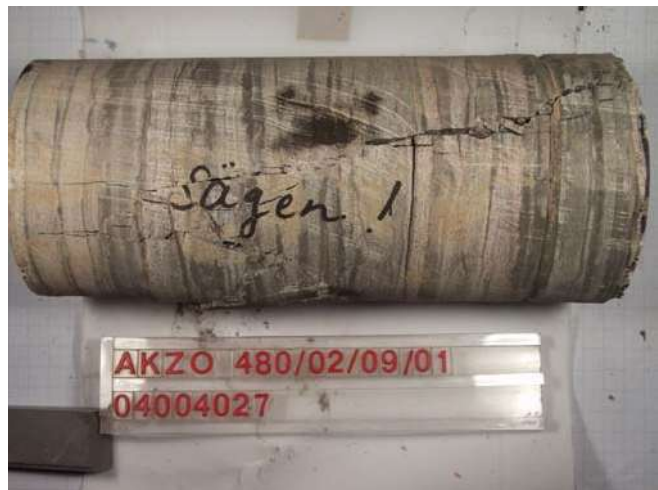
Kern Twenthe-Rijn-480/02/009/01

Deckgebirge, Schicht F3
Proben-Nr. 027

vor dem Versuch



nach dem Versuch



Anlage 6.6: Fotodokumentation

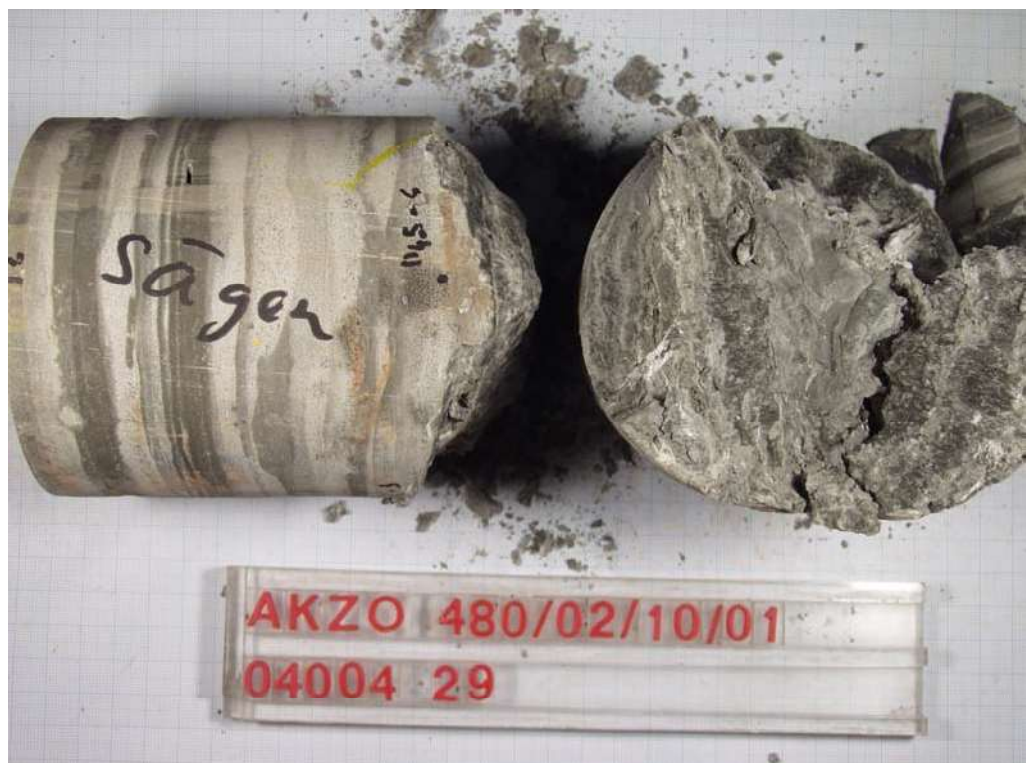
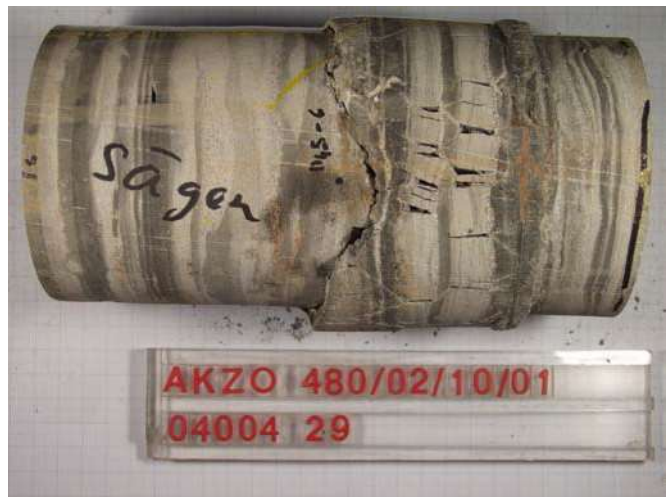
Kern Twenthe-Rijn-480/02/010/01

Deckgebirge, Schicht F3
Proben-Nr. 029

vor dem Versuch



nach dem Versuch



Anlage 6.7: Fotodokumentation

Kern Twenthe-Rijn-480/12/005/01

Grundgebirge, Schicht F4
Proben-Nr. 038

vor dem Versuch



nach dem Versuch



Anlage 6.8: Fotodokumentation

Kern Twenthe-Rijn-480/12/007/01

Grundgebirge, Schicht F4
Proben-Nr. 040

vor dem Versuch



nach dem Versuch

