

DECKBLATT

| | Projekt | PSP-Element | Obj. Kenn. | Aufgabe | UA | Lfd. Nr. | Rev. |
|--------|---------|---------------------|-------------|-----------|-----|----------|------|
| | N A A N | N N N N N N N N N N | N N N N N N | X A A X X | A A | N N N N | N N |
| EU 320 | 9K | - | - | GHS | RA | 0001 | 00 |

Titel der Unterlage:

Darstellung der Nachweisführung zur Dichtigkeit der Schachtverfüllung im Bereich der Unterkreide
(Zwischenbericht 12/89)

Seite:

I.

Stand:

21.12.1989

Ersteller:



Textnummer:

Stempelfeld:

PSP-Element TP... 9K/21282

zu Plan-Kapitel: 4.2

Freigabe für Behörden

Freigabe im Projekt

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung.

Revisionsblatt

BfS

| | | | | | | | |
|--------|---------|---------------------|-------------|-----------|-----|----------|------|
| EU 320 | Projekt | PSP-Element | Obj. Kenn. | Aufgabe | UA | Lfd. Nr. | Rev. |
| | N A A N | N N N N N N N N N N | N N N N N N | X A A X X | A A | N N N N | N N |
| | 9K | - | - | GHS | RA | 0001 | 00 |

Titel der Unterlage:
 Darstellung der Nachweisführung zur Dichtigkeit der Schachtverfüllung im Bereich der Unterkreide
 (Zwischenbericht 12/89)

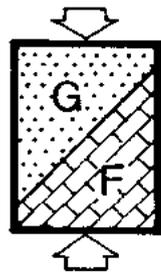
Seite:
 II.

Stand:
 21.12.1989

| Rev. | Revisionsst. Datum | verant. Stelle | Gegenzeichn. Name | rev. Seite | Kat. *) | Erläuterung der Revision |
|------|--------------------|----------------|-------------------|------------|---------|--------------------------|
| | | | | | | |

*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur
 Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
 Kategorie S = substantielle Änderung
 Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden.

[REDACTED]
Beratende Ingenieure für
GRUNDBAU UND FELSBAU GmbH



Schachtanlage Konrad
Schachtverschlüsse

Darstellung der Nachweisführung zur Dichtigkeit der
Schachtverfüllung im Bereich der Unterkreide

(Zwischenbericht 12/89)

Aachen, den 21.12.1989

Der Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) erstellt. Das BfS behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit Zustimmung des BfS zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Geschäftsführer: [REDACTED]

Zusammenfassung

Die im Hangenden des projektierten Endlagers Konrad anstehenden Tonsteine der Unterkreide werden von den Schächten Konrad 1 und Konrad 2 durchörtert, die als potentielle Wegsamkeiten für den beschleunigten Transport radionuklidbelasteter Wasser in die Biosphäre angesehen werden. Der vorliegende Zwischenbericht beinhaltet die Darstellung der im Rahmen des Genehmigungsverfahrens erforderlichen Nachweisführung zur Dichtigkeit der Schachtverfüllung im Bereich der Unterkreide.

Der Nachweis beschränkt sich nicht allein auf die durch die Schächte gebildeten Hohlräume, sondern erstreckt sich auch auf die die Schächte umgebende Auflockerungszone. Deshalb wird über die Durchlässigkeit der Schachtverfüllung hinaus auch die Durchlässigkeit des Gebirges unter Berücksichtigung der Wechselwirkung von Schachtverfüllung und Gebirge nachgewiesen. Der Nachweis der Dichtigkeit der die Schächte umgebenden Auflockerungszone basiert unter anderem auf der Selbstabdichtung des Gebirges durch spätere, bei Wasserzutritt eintretende Quellvorgänge.

Mit Hilfe eines umfangreichen Untersuchungsprogramms, das sowohl Feld- und Laborversuche als auch theoretische Betrachtungen enthält, sollen die zur Nachweisführung erforderlichen, das mechanische Verhalten, das Quellvermögen und die Durchlässigkeit des Gebirges beschreibenden Kennwerte und Parameter ermittelt werden. Erst nach Abschluß dieses Untersuchungsprogramms, mit dem erst vor kurzem begonnen worden ist, kann der abschließende Nachweis der Dichtigkeit erfolgen.

Im vorliegenden Zwischenbericht werden die bisher vorliegenden Ergebnisse erläutert und - soweit zum gegenwärtigen Zeitpunkt möglich - im Hinblick auf den zu erbringenden Nachweis bewertet. Außerdem wird beschrieben wie die aus dem bereits erwähnten Untersuchungsprogramm erhaltenen Erkenntnisse, bzw. wie der Nachweis der Dichtigkeit auf andere, nicht durch das Untersuchungsprogramm aufgeschlossene Bereiche übertragen werden können.

| <u>Inhalt</u> | <u>Seite</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 1. Einleitung | 1 |
| 2. Erläuterung des Nachweiskonzeptes | 3 |
| 3. Gebirge in der Umgebung der Schächte | 6 |
| 3.1 Schichtaufbau | 6 |
| 3.2 Vorhandene geotechnische Untersuchungen (bis einschl. 1987) | 7 |
| 3.2.1 Felsmechanische Eigenschaften | 7 |
| 3.2.2 Durchlässigkeit des Gebirges | 8 |
| 3.2.3 Mineralogie | 10 |
| 3.3 Geotechnische Untersuchungen für das Mittelalb (343 m Sohle) | 10 |
| 3.3.1 Felsmechanische Eigenschaften | 10 |
| 3.3.2 Spannungen im ungestörten Gebirge | 11 |
| 3.3.3 Durchlässigkeit des Gebirges | 12 |
| 3.3.4 Mineralogie | 12 |
| 3.4 Geotechnische Untersuchungen für das Barrême (541 m Sohle) | 12 |
| 3.4.1 Felsmechanische Eigenschaften | 12 |
| 3.4.2 Spannungen im ungestörten Gebirge | 14 |
| 3.4.3 Durchlässigkeit des Gebirges | 14 |
| 3.4.4 Mineralogie | 14 |
| 3.5 Extrapolation der Ergebnisse auf nicht durch die Erkundungen aufgeschlossene Bereiche | 15 |
| 4. Simulation des Abteufens der Schächte einschließlich des Ausbaus | 15 |
| 4.1 Ziel der Berechnungen und Beschreibung des Berechnungsverfahrens | 15 |
| 4.2 Berechnungen für das Mittelalb | 17 |
| 4.2.1 Berechnungsausschnitt und Berechnungsannahmen | 17 |
| 4.2.2 Ergebnisse Fall A1 | 20 |
| 4.2.3 Ergebnisse Fall A3 | 20 |
| 4.2.4 Ergebnisse Fall A5 | 21 |
| 4.2.5 Ergebnisse Fall B1 | 22 |

| <u>Inhalt</u> | <u>Seite</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 4.2.6 Ergebnisse Fall B2 | 22 |
| 4.2.7 Ergebnisse Fall Q1 | 22 |
| 4.3 Berechnungen für das Hauterive | 25 |
| 4.3.1 Berechnungsausschnitt und Berechnungsannahmen | 25 |
| 4.3.2 Ergebnisse Fall C1 | 25 |
| 4.4 Schlußfolgerungen aus den Berechnungsergebnissen | 26 |
| | |
| 5. Untersuchungen des Gebirges im Bereich des Schachtes 2 hinsichtlich der Auflockerungszone | 27 |
| 5.1 Allgemeines | 27 |
| 5.2 Ergebnisse der Untersuchungen im Mittelalb (343 m Sohle) | 28 |
| 5.3 Ergebnisse der Untersuchungen im Barrême (541 m Sohle) | 28 |
| 5.4 Extrapolation der Ergebnisse auf nicht durch die Erkundungen aufgeschlossene Bereiche | 28 |
| | |
| 6. Böden für die mineralische Abdichtung der Schächte | 28 |
| 6.1 Allgemeines | 28 |
| 6.2 Laboruntersuchungen an verschiedenen Böden | 29 |
| 6.2.1 Allgemeines | 29 |
| 6.2.2 Ergebnisse der Laboruntersuchungen an natürlichen Tonen | 30 |
| 6.2.3 Ergebnisse der Laboruntersuchungen an "Trockenmischungen" | 30 |
| 6.3 Rechnerische Untersuchungen zu den Spannungen und Verformungen in der Schachtverfüllung | 31 |
| 6.4 Vorschlag für den Einbau des Bodens | 33 |
| | |
| 7. Simulation der Schachtverfüllung - Rauben des Ausbaus, Ausbruch der Auflockerungszone und Einbau der mineralischen Abdichtung | 34 |
| 7.1 Allgemeines | 34 |
| 7.2 Berechnungen für das Mittelalb | 35 |
| 7.2.1 Berechnungsausschnitt und Berechnungsannahmen | 35 |
| 7.2.2 Ergebnisse Fall A1 | 35 |

| <u>Inhalt</u> | <u>Seite</u> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 7.2.3 Ergebnisse Fall A3 | 36 |
| 7.2.4 Ergebnisse Fall A5 | 36 |
| 7.2.5 Ergebnisse Fall B1 | 37 |
| 7.2.6 Ergebnisse Fall B2 | 38 |
| 7.3 Berechnungen für das Hauterive | 38 |
| 7.3.1 Berechnungsausschnitt und Berechnungsannahmen | 38 |
| 7.3.2 Ergebnisse Fall C1 | 39 |
| 7.4 Zusammenfassung und Bewertung der Berechnungsergebnisse | 39 |
| 8. Schlußfolgerungen zur Abdichtung der Schächte in der Unterkreide | 40 |
| 9. Nachweis der Standsicherheit der Füllsäule im Bereich unterhalb der mineralischen Abdichtung und der Schachtzugänge | 41 |
| 9.1 Allgemeines | 41 |
| 9.2 Vorschlag für Verfüllmaterialien und Einschätzung der mechanischen Kennwerte | 42 |
| 9.3 Rechnerische Untersuchungen zur Standsicherheit und zu den Verformungen der Verfüllsäule | 42 |
| Literaturverzeichnis | 44 |

Anlagen

- 3.1 Schichtenfolge in den Schächten Konrad 1 und Konrad 2
- 3.2 Zusammenstellung der für die Gesteine der Unterkreide ermittelten E-Moduln und Festigkeiten [3, 4, 5, 6]
- 3.3 Darstellung der Ergebnisse der WD-Tests im Hauterive, Schacht 2 [8]
- 3.4 Darstellung der Ergebnisse der WD-Tests im Hauterive, Schacht 1 [9]
- 3.5 Stratigraphie und Mineralogie im Bereich des Schachtes Konrad 2 und der Bohrung Konrad 101 [10]
- 3.6 Stratigraphie und Mineralogie im Bereich des Schachtes Konrad 2 und der Bohrung Konrad 101 [10]
- 3.7 Stratigraphie und Mineralogie im Bereich des Schachtes Konrad 2 und der Bohrung Konrad 101 [10]
- 3.8 Stratigraphie und Mineralogie im Bereich des Schachtes Konrad 2 und der Bohrung Konrad 101 [10]
- 3.9 Stratigraphie und Mineralogie im Bereich des Schachtes Konrad 2 und der Bohrung Konrad 101 [10]
- 3.10 Zusammenfassung der röntgenographischen Ergebnisse für das Mittelalb, Proben aus dem Schacht 2, Bohrung B11 (Teufe 343 m) [12]
- 3.11 Zusammenfassung der Analysenergebnisse für das Mittelalb, Proben aus dem Schacht 2, Bohrung B11 (Teufe 343 m) [12]
- 3.12 E-Moduln und Festigkeiten für das Barrême
- 3.13 Zusammenstellung der Ergebnisse der Quellhebungsversuche
- 3.14 Quellhebungsversuch Proben-Nr. 1138-1
- 3.15 Quellhebungsversuch Proben-Nr. 1138-2
- 3.16 Quellhebungsversuch Proben-Nr. 1138-3
- 3.17 Quellhebungsversuch Proben-Nr. 1141-1
- 3.18 Quellhebungsversuch Proben-Nr. 1141-2
- 3.19 Quellhebungsversuch Proben-Nr. 1114
- 3.20 Zusammenfassung der röntgenographischen Ergebnisse für das Barrême, Proben aus dem Schacht 2, Bohrung B10 (Teufe 541 m) [12]
- 3.21 Zusammenfassung der Analysenergebnisse für das Barrême, Proben aus dem Schacht 2, Bohrung B10 (Teufe 541 m) [12]

Anlagen

- 4.1 Elementennetz
- 4.2 Darstellung der Rechenschritte
- 4.3 Untersuchte Fälle und Berechnungsannahmen
- 4.4 Hauptnormalspannungen Fall A1, Vergleich der Radial- und Tangentialspannungen Fälle A1 und A3 (3. Rechenschritt)
- 4.5 Hauptnormalspannungen Fall A3, Vergleich der Radialverschiebungen Fälle A1 und A3 (3. Rechenschritt)
- 4.6 Hauptnormalspannungen Fall A5, Vergleich der Radial- und Tangentialspannungen in 2 Schnitten (3. Rechenschritt)
- 4.7 Fall A5: Verlauf der Radialverschiebungen in 2 Schnitten (3. Rechenschritt, Lage der Schnitte vgl. Anlage 4.6)
- 4.8 Hauptnormalspannungen Fall B1, Vergleich der Radial- und Tangentialspannungen Fälle B1 und B2 (3. Rechenschritt)
- 4.9 Hauptnormalspannungen Fall B2, Vergleich der Radialverschiebungen Fälle B1 und B2 (3. Rechenschritt)
- 4.10 Fall Q1: Dem Gebirge zugrunde gelegtes Quellgesetz
- 4.11 Fall Q1, 2. Rechenschritt: Radialverschiebungen
- 4.12 Fall Q1, 2. Rechenschritt: Radiale Quelldehnungen (nach 143 Iterationen)
- 4.13 Fall C1, Hauptnormalspannungen und Verlauf von Radial- und Tangentialspannungen sowie der Radialverschiebungen (3. Rechenschritt)

- 6.1 Auswahl geeigneter Bodenarten [15]
- 6.2 Ergebnisse der Laborversuche an Tonproben aus dem Unterallb
- 6.3 Proctorversuche Tongrube Stedum
- 6.4 Kornverteilungskurve für Kies-Sand-Tongemisch [16]
- 6.5 Zusammenstellung der Kennwerte für eine Trockenmischung [16]
- 6.6 Beispielhafte Darstellung der in der mineralischen Abdichtung herrschenden Radial- und Vertikalspannungen

- 7.1 Hauptnormalspannungen Fall A1, Vergleich der Radial- und Tangentialspannungen Fälle A1 und A3 (4. Rechenschritt)
- 7.2 Hauptnormalspannungen Fall A3, Vergleich der Radialverschiebungen Fälle A1 und A3 (4. Rechenschritt)

Anlagen

- 7.3 Hauptnormalspannungen Fall A5, Vergleich der Radial- und Tangentialspannungen in 2 Schnitten (4. Rechenschritt)
- 7.4 Fall A5: Verlauf der Radialverschiebungen in 2 Schnitten (4. Rechenschritt, Lage der Schnitte vgl. Anlage 7.3)
- 7.5 Hauptnormalspannungen Fall B1, Vergleich der Radial- und Tangentialspannungen Fälle B1 und B2 (4. Rechenschritt)
- 7.6 Hauptnormalspannungen Fall B2, Vergleich der Radialverschiebungen Fälle B1 und B2 (4. Rechenschritt)
- 7.7 Hauptnormalspannungen Fall C1, Verlauf von Radial- und Tangentialspannungen sowie der Radialverschiebungen (4. Rechenschritt)

- 9.1 Beispielhafte Darstellung der in der Füllsäule herrschenden Radial- und Vertikalspannungen

1. Einleitung

Die im Hangenden des Einlagerungsbereiches des projektierten Endlagers KONRAD anstehenden Tonsteine der Unterkreide mit einer Gesamtdicke von mehreren hundert Metern stellen hinsichtlich des Transports radionuklidbelasteter Wasser in die Biosphäre eine natürliche Barriere dar. Diese Barriere ist allerdings im Rahmen der Erkundung von unterhalb der Unterkreide-Tonsteine liegenden Lagerstätten, z.B. des Erzlagers der Grube Konrad im Oxford, im Verlauf der vergangenen Jahrzehnte mit einer Reihe von Tiefbohrungen durchteuft worden. Außerdem stellen die zwei für die Erzgewinnung hergestellten Schächte (Konrad 1 und 2) Durchbrüche durch die "Barriere Unterkreide" dar. Die alten Tiefbohrungen und die Schächte werden als potentielle Wegsamkeiten für den beschleunigten Transport radionuklidbelasteter Wasser in die Biosphäre angesehen.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens für das Endlager KONRAD sollen soweit möglich quantitative Nachweise der Dichtigkeit für die alten Tiefbohrungen im Modellgebiet Konrad und für die später zu verfüllenden Schächte geführt werden.

Im folgenden wird für die Verschlüsse der Schächte Konrad 1 und 2 die Führung des Nachweises der Dichtigkeit erläutert. Bereits vorliegende Ergebnisse der hierzu erforderlichen Einzeluntersuchungen werden in kurzer Form angegeben und bewertet. Da die Untersuchungen jedoch zu einem Teil noch nicht begonnen werden konnten bzw. noch keine belastbaren Ergebnisse vorliegen, muß der Nachweis der Dichtigkeit zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch unvollständig und in Konzeptform bleiben.

Durch die verfüllten und abgedichteten Schächte soll zunächst der Zulauf von Wasser aus den oberflächennahen Schichten zu den eingelagerten radioaktiven Abfällen erschwert werden. Zu einem späteren Zeitpunkt, wenn das Grubengebäude mit Wasser gefüllt sein wird und sich die ursprünglich vorhandene Sickerströmung im Gebirge wieder eingestellt hat, sollen die im Bereich der Schächte möglicherweise aufsteigenden Wassermengen auf ein zulässiges Maß begrenzt sein. Die

Abdichtung der Schächte beschränkt sich nicht nur auf die durch die Schächte gebildeten Hohlräume sondern sie muß sich auch auf die, die Schächte umgebenden Auflockerungszonen erstrecken.

Der Nachweis der Wirksamkeit der Schachtverschlüsse erfolgt für einen Zeitraum von 10000 Jahren. Das bedeutet jedoch nicht, daß die Wirksamkeit nach diesem Zeitraum endet.

Die Schächte sind entsprechend der Aufgabenstellung mit geeigneten im Sinne der Langzeitsicherheitsanalyse ausreichend dichten Materialien zu verfüllen. Bei der Auswahl der Materialien sind außerdem die unterschiedlichen Gebirgsverhältnisse zu berücksichtigen. Insbesondere auch im Hinblick auf eine Verringerung der Wegsamkeiten über die Auflockerungszone, die durchlässiger als das umgebende Gebirge sein kann, sind die Materialien so auszuwählen, daß die in der Langzeitsicherheitsanalyse geforderte Barrierewirkung erreicht wird.

Unter Bezugnahme auf die Schichtenfolge des Gebirges wird die Schachtverfüllung hinsichtlich der zu erfüllenden Anforderungen in drei Bereiche unterteilt [1].

Dies sind die Bereiche:

- A) des Quartärs und der Oberkreide,
- B) der Unterkreide und
- C) des Malm und des Dogger.

Mit den Verfüll- und Abdichtungsmaßnahmen im Bereich A der Schachtverfüllung sollen mögliche Zuflüsse von Tages- und Grundwasser bereits unmittelbar nach Einbringen der Verfüllung reduziert bzw. soweit möglich verhindert werden. Gemäß der Langzeitsicherheitsanalyse muß für den Querschnitt des Schachtes und der Auflockerungszone in vertikaler Erstreckung ein integraler k_f -Wert von $\leq 1 \cdot 10^{-4}$ m/s erreicht werden.

Der Bereich B (Unterhauterive bis Oberalb) stellt gemäß der Langzeitsicherheitsanalyse die Hauptbarriere im Hinblick auf eine Ausbreitung von radionuklidbelasteten Wässern aus dem Endlager in die Biosphäre dar. Schacht und Auflockerungszone im Bereich B müssen so verfüllt bzw. abgedichtet werden, daß ein integraler k_f -Wert von $\leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s erreicht wird. Bei ggf. zusätzlich notwendigen Abdichtungsmaßnahmen in der Auflockerungszone gelten für das zur Anwendung kommende Einpreßgut die gleichen obengenannten Anforderungen [1].

Der Bereich C unterhalb der obengenannten Hauptbarriere muß die Auflasten der darüber liegenden Schachtverfüllung verformungsarm so aufnehmen, daß die darüber liegende Abdichtung ihre Funktion erfüllen kann. Desgleichen muß die Anbindung der Füllsäule an das zuvor verfüllte Grubengebäude in der Weise erfolgen, daß ein Abrutschen oder Auslaufen der Füllsäule in mögliche Hohlräume im schachtnahen Grubengebäude nicht möglich ist und eine Gefährdung der Wirksamkeit der Schachtverfüllung insgesamt ausgeschlossen werden kann. Gemäß der Langzeitsicherheitsanalyse beträgt der zu fordernde integrale k_f -Wert in diesem Bereich $\leq 1 \cdot 10^{-4}$ m/s [1].

Die Funktion der Schachtverfüllung darf durch Abbaueinwirkungen und Erdbeben nicht beeinträchtigt werden.

Der vorliegende Bericht umfaßt die Darstellung der Nachweisführung der Dichtigkeit der Schachtverfüllung in den Bereichen B und C, wobei die Dichtigkeitsanforderungen im Bereich C von untergeordneter Bedeutung sind.

2. Erläuterung des Nachweiskonzeptes

Die Führung des Nachweises der Dichtigkeit der Schachtverschlüsse erfolgt in mehreren Schritten, die im folgenden kurz erläutert werden.

Zunächst sind die Parameter zu bestimmen, die die Verhältnisse im weitgehend ungestörten Gebirge beschreiben (Verformbarkeit, Festigkeit, Quellverhalten, Wasserdurchlässigkeit, Primärspannungszustand etc.). Die Ergebnisse früherer geotechnischer Untersuchungen werden

hierzu durch ein umfangreiches Erkundungsprogramm ergänzt, in dem die Verhältnisse in ausgewählten Teilbereichen der Unterkreide hinsichtlich der o.g. Parameter bestimmt werden. Hierzu werden vom Schacht 2 aus je eine Untersuchungsstrecke in Mittelalb und im Barrême aufgefahren. Die an die Strecken angrenzenden Schichten werden durch Bohrungen aufgeschlossen, die der Durchführung von Feldversuchen und der Gewinnung von Probenmaterial für Laborversuche dienen. Für die im Rahmen des Untersuchungsprogramms nicht unmittelbar aufgeschlossenen Gebirgsbereiche wird eine Extrapolation der Versuchsergebnisse vorgenommen, die sich i.w. auf die Mineralogie der Gesteine und die Ergebnisse früherer Untersuchungen abstützt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden zur Durchführung von Berechnungen benötigt, in denen das Abteufen der Schächte einschließlich des Einbaus der Schachtsicherung simuliert wird. Die Berechnungen liefern Aussagen zum gegenwärtigen Zustand im schachtnahen Gebirgsbereich, insbesondere hinsichtlich des Auftretens von Festigkeitsüberschreitungen und damit verbundenen Auflockerungen. Die Durchführung der Berechnungen erfolgt zeitlich parallel zur Durchführung des Untersuchungsprogramms. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Berechnungsannahmen anhand der Untersuchungsergebnisse fortlaufend zu überprüfen und ggf. anzupassen.

Da das Untersuchungsprogramm auch Aussagen hinsichtlich der Ausbildung einer Auflockerungszone im schachtnahen Bereich liefert, können die Berechnungsannahmen weiterhin durch Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen der Erkundungen verifiziert bzw. verbessert werden.

Insgesamt werden von den Berechnungen zum Abteufen der Schächte und den Ergebnissen des Erkundungs- bzw. Untersuchungsprogramms in der Unterkreide zutreffende Eingangswerte für die weiterführenden Berechnungen erwartet. Mit den weiterführenden Berechnungen soll danach der eigentliche Nachweis der Dichtigkeit der Schachtverschlüsse geführt werden. In diesen Berechnungen wird die ggf. erforderliche schrittweise Herausnahme der Auflockerungszone (Schachtaufweitung) und die nachfolgende Verfüllung des Schachtes mit einem Boden simuliert. Es tritt hierbei eine Wechselwirkung zwischen Gebirge und

Schachtverfüllung ein, die neben den bereits genannten Einflüssen aus dem Gebirge auch von den Eigenschaften des Verfüllmaterials abhängt. Es werden daher umfangreiche Laborversuche an für die mineralische Abdichtung in Frage kommenden Böden durchgeführt, die zur Wahl eines geeigneten Bodens führen. Die maßgeblichen Parameter dieses Bodens sind neben der Wasserdurchlässigkeit auch die Verformungs-, Quell- und Kriecheigenschaften sowie die Verarbeitbarkeit und die Einbaubarkeit.

Die bereits angesprochenen Berechnungen zur Schachtaufweitung und -verfüllung lassen Rückschlüsse auf die resultierende Wasserdurchlässigkeit in den einzelnen Abschnitten der Unterkreide zu und ermöglichen somit die Dichtigkeit zu beurteilen. Für das Gesamtsystem aus mineralischer Schachtverfüllung und schachtnahem Gebirgsbereich (Auflockerungszone) im Bereich der Unterkreideschichten ist dabei wie erwähnt ein integraler Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f \leq 10^{-8} \text{ m/s}$ zu erfüllen. Der integrale Durchlässigkeitsbeiwert ergibt sich aus der unter Annahme inhomogener Verhältnisse rechnerisch ermittelten, durch die Schachtverfüllung und die Auflockerungszone strömenden Wassermenge mit der Annahme des mittleren Gefälles.

$$K_i = \frac{Q}{A \cdot I} \quad (1)$$

K_i = integraler Durchlässigkeitsbeiwert

Q = Durchfluß bzw. Wassermenge in der Zeiteinheit

I = mittleres Gefälle

A = betrachtete Querschnittsfläche

Sollten die Untersuchungen zeigen, daß nicht in allen aufgelockerten Bereichen von einer ausreichenden Selbsabdichtung infolge Quellen des Gebirges bzw. der Schachtverfüllung ausgegangen werden kann, so sind Abdichtungsinjektionen mit Tonsuspensionen vorgesehen. Im Rahmen des Untersuchungsprogramms werden auch hierzu Feldversuche durchgeführt.

Der Nachweis der in [1] gestellten Forderung nach einer durch Abbau- und Erdbebeneinwirkungen nicht beeinträchtigten Funktion der Schachtverfüllung, wird zu einem späteren Zeitpunkt geführt.

Die Füllsäule im Schachtbereich unterhalb der mineralischen Abdichtung soll i.w. als Fundament für die Schachtabdichtung dienen. Die Anforderungen hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit sind vergleichsweise gering. Für die Füllsäule sind i.w. Fragen der Standicherheit und der Verformbarkeit zu betrachten. Es ist nachzuweisen, daß die Füllsäule so ausgebildet werden kann, daß durch sie keine Funktionseinbußen der darüberliegenden Schachtabdichtung eintreten können.

3. Gebirge in der Umgebung der Schächte

3.1 Schichtaufbau

Die Schichtenfolge des Gebirges im Bereich der Schächte Konrad 1 und Konrad 2 ist in der Anlage 3.1 dargestellt.

Unter der Geländeoberkante stehen die Lockergesteine des Quartärs bis zu einer Tiefe von 3,5 bzw. 36 m an. Darunter folgen die Kalk-, Kalkmergel- und Tonmergelsteine der Oberkreide, die sich in die etwa 130 m dicke Schicht des Turon und die 76 - 98 m dicke Schicht des Cenoman aufgliedert. Unterhalb einer Teufe von 229 m bzw. 246 m stehen die Ton-Tonmergelsteine der Unterkreide in einer Dicke von etwa 536 m im Schacht Konrad 1 und von etwa 400 m im Schacht Konrad 2 an. Die Unterkreide läßt sich in die Schichten des Alb (d = 270 bzw. 225 m), des Apt (d = 46 bzw. 31 m), des Barrême (d = 137 bzw. 76,5 m) und des Hauterive (d = 117 bzw. 67,5 m) unterteilen [2].

Im Schacht Konrad 2 wurde in etwa 469 m Teufe an der Basis des Alb eine ca. 1,7 m dicke Feinsandsteinschicht, der sogenannte Hilssandstein, aufgeschlossen. Diese Schicht ist wasserführend und weist im ungestörten Zustand einen Wasserdruck von 47 bar auf. Im Bereich des Schachtes Konrad 1 ist diese wasserführende Schicht nicht vorhanden.

Im Schacht Konrad 1, der eine Teufe von 1232,5 m besitzt, wurden die unterhalb der Unterkreide anstehenden Schichten des Weißjura (Malm) in einer Mächtigkeit von etwa 430 m aufgeschlossen. Die Sohle des Schachtes Konrad 1 liegt etwa an der Basis des Malm.

Im Schacht Konrad 2 stehen die Schichten des Malm nur in einer Dicke von ca. 231 m an. Die Sohle des 999 m tiefen Schachtes liegt daher in den oberen Schichten des Braunjura (Dogger).

Die Schichten des Malm bestehen i.w. aus Kalksteinen und Tonmergelsteinen, die im Bereich des Oxford z.T. erzhaltig sind. Die vom Schacht 2 angeschnittenen oberen Schichten des Dogger bestehen i.w. aus tonigen Gesteinen.

3.2 Vorhandene geotechnische Untersuchungen (bis einschl. 1987)

3.2.1 Felsmechanische Eigenschaften

Zur Ermittlung der Festigkeit und der Verformbarkeit der anstehenden Gesteine wurden bereits von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) im Auftrag der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) eine Reihe von Laborversuchen und z.T. auch Feldversuchen durchgeführt. In der Anlage 3.2 sind die Ergebnisse von ein- und dreiaxialen Druckversuchen an Gesteinsproben aus den Schichten der Unterkreide zusammengestellt [3, 4, 5, 6]. Soweit möglich, wurden hierfür die vorliegenden Ergebnisse für die einzelnen Schichten und für Gesteine mit gleicher Petrographie aufgeschlüsselt.

Die Mittelwerte der Elastizitätsmoduln (Erstbelastungsmoduln) liegen demnach in den jeweils zusammengefaßten Versuchsserien zwischen 1570 MPa und 7170 MPa. Die größten in den Laborversuchen ermittelten E-Moduln ergaben sich im Hauterive ($E = 5410 - 7140$ MPa).

In den Schichten des Hauterive wurden außerdem Dilatometerversuche durchgeführt, in denen der Mittelwert für den Verformungsmodul des Gebirges zu 1500 MPa bestimmt wurde [7]. Dieser Modul ist somit deutlich kleiner, als die für das Gestein ermittelten E-Moduln. In den anderen Schichten der Unterkreide wurden bisher keine Dilatometerversuche durchgeführt.

Die in den Laborversuchen ermittelten Gesteinsfestigkeiten sind ebenfalls in der Anlage 3.2 dargestellt. Die einaxialen Druckfestigkeiten betragen zwischen 10,9 und 26,3 MPa. Sie wurden überwiegend

aus den Ergebnissen dreiaxialer Druckversuche abgeleitet, in denen die mittleren Scherparameter c und φ (s. Anlage 3.2) mit Hilfe der linearen Regression bestimmt wurden.

3.2.2 Durchlässigkeit des Gebirges

Die Gebirgsdurchlässigkeit wird im wesentlichen durch die Öffnungsweiten und die Raumstellung der vorhandenen Trennflächen bestimmt, da das Gestein nahezu undurchlässig ist. Demzufolge läßt sich die Gebirgsdurchlässigkeit nur durch in-situ Versuche, wie z.B. WD-Versuche bestimmen.

Im Hauterive wurde in den Jahren 1986 und 1987 von der BGR im Nahbereich der Schächte Konrad 1 und 2 WD-Versuche zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Gebirges durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in den Anlagen 3.3 und 3.4 dargestellt. Daraus können außerdem die Lage und die Orientierung der Bohrungen, in denen die Versuche durchgeführt wurden, entnommen werden. In beiden Schächten wurden jeweils in 3 verschiedenen Horizonten (A-C) je 3 Schrägbohrungen ausgeführt [8, 9].

Bei den von Schacht 2 aus durchgeführten Versuchen (Anlage 3.3) zeigten sich nur in den Bohrungen des Horizontes C Durchlässigkeiten, die oberhalb des zulässigen Wertes von 10^{-8} m/s liegen. Bei den Bohrungen C1 und C2 reichen diese Bereiche nur etwa 2-3 m von den Bohransatzpunkten in das Gebirge hinein. Lediglich in der Bohrung C3 wurden auch in tieferen Gebirgsbereichen oberhalb des Grenzwertes liegende Durchlässigkeiten ermittelt. Einige Versuchsabschnitte wiesen angabegemäß Umläufigkeiten auf und können deshalb nicht berücksichtigt werden.

Ähnliche Ergebnisse zeigen auch die von der BGR vom Schacht 1 aus durchgeführten WD-Versuche [9]. Hier wurden nur in den östlich gerichteten Bohrungen A1, B1 und C1 für einige Versuchsabschnitte Durchlässigkeitsbeiwerte größer 10^{-8} m/s bestimmt. Mit Ausnahme der Bohrung B1, in der eine den zulässigen Wert übersteigende Durchlässigkeit noch in etwa 5-6 m Entfernung vom Schachtrand festgestellt

wurde, reichen die Bereiche größerer Durchlässigkeit in den anderen beiden Bohrungen max. 4 m vom Schachtrand in das Gebirge hinein (vgl. Anlage 3.4).

Die für die steigenden Bohrungen (A2, A3, B2, B3, C2, C3, vgl. Anlage 3.4) angegebenen Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_f = 10^{-9}$ m/s spiegeln dabei die Genauigkeit des Durchflußmengenmeßgerätes wieder. Die tatsächliche Durchlässigkeit des Gebirges ist in diesem Bereich vermutlich wesentlich kleiner [9].

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Zahl der Klüfte, die an den gewonnenen Bohrkernen kartiert wurde und der Wasserdurchlässigkeit des Gebirges konnte im Hauterive weder im Schacht 1 noch im Schacht 2 nachgewiesen werden (s. Anlagen 3.3 und 3.4). Hierzu wären zusätzliche Angaben zur Öffnungsweite der Trennflächen erforderlich. Möglicherweise ist ein Teil der Klüfte geschlossen und dementsprechend hydraulisch praktisch unwirksam.

Nennenswerte Sickerwasserzutritte zu den Schächten sind nur im Quartär und den anschließenden Zonen der Oberkreide zu verzeichnen sowie im Schacht Konrad 2 im Bereich des Hils.

Zusammenfassend kann die Bandbreite der Durchlässigkeiten (k_f -Werte) der im Bereich der Schächte anstehenden Schichten im ungestörten Zustand nach den vorliegenden Unterlagen etwa wie folgt angegeben werden [21]:

| | |
|-----------------------|---------------------------|
| Quartär: | $10^{-4} - 10^{-7}$ m/s |
| Oberkreide: | $10^{-5} - 10^{-9}$ m/s |
| Unterkreide (o.Hils): | $10^{-10} - 10^{-13}$ m/s |
| Hilssandstein: | 10^{-5} m/s |
| Malm: | $10^{-7} - 10^{-9}$ m/s |
| Dogger-Tonsteine: | $10^{-10} - 10^{-12}$ m/s |

Einflüsse aus bergbaulichen Maßnahmen oder örtlich erhöhte Durchlässigkeiten in Störzonen sind hierbei nicht berücksichtigt.

3.2.3 Mineralogie

Umfangreiche mineralogische Untersuchungen wurden von der BGR an Gesteinsproben aus der Bohrung Konrad 101 durchgeführt [10]. In den Anlagen 3.5 - 3.9 sind die mengenmäßigen Anteile der einzelnen Minerale über der Tiefe in Form von Balkendiagrammen dargestellt. Bemerkenswert ist der Anteil des quellfähigen Tonminerals Smektit, der im Bereich des Alb und Apt bis zu etwa 20 - 30 % des Gesamtmineralbestandes ausmacht (s. Anlage 3.5). Im Bereich des Barrême und des Hauterive sind dagegen die Tonminerale Muskovit und Illit mit ca. 20 % Anteil stärker vertreten als in den darüber liegenden Schichten. Der Smektit-Anteil ist in den Gesteinen des Barrême und des Hauterive i.a. vernachlässigbar.

Der Quarzgehalt beträgt in der Unterkreide i.H. zwischen ca. 20 und 30 % (s. Anlage 3.8). In der Oberkreide liegt der Quarzgehalt dagegen i.a. unter 10 %. Hier dominiert der Calcitgehalt, der häufig bis zu ca. 90 % beträgt (s. Anlage 3.9).

Auf die Anteile der übrigen am Gesteinsaufbau beteiligten Minerale soll hier nicht näher eingegangen werden. Sie können im einzelnen den o.g. Anlagen entnommen werden.

3.3 Geotechnische Untersuchungen für das Mittelalb (343 m-Sohle)

3.3.1 Felsmechanische Eigenschaften

Da die bisher vorliegenden Untersuchungsergebnisse (vgl. Abschnitt 3.2) für einen quantitativen und belastbaren Nachweis der Dichtigkeit der Schachtverschlüsse nicht ausreichen, sind weitere Untersuchungen erforderlich. Da der Bereich des Mittelalb hinsichtlich der mineralogischen Zusammensetzung und der felsmechanischen Eigenschaften nach den derzeitigen Erkenntnissen näherungsweise als repräsentativ für den oberen Teil der Unterkreide, d.h. das gesamte Alb angesehen werden kann, wird hier ein umfangreiches Untersuchungsprogramm angesetzt [11]. Im Rahmen der Auffahrung einer Untersuchungsstrecke im oberen Teil des Mittelalb vom Schacht 2 aus

(343 m-Sohle) wird das hier anstehende Gebirge großmaßstäblich aufgeschlossen. Die oberhalb und unterhalb angrenzenden Schichten werden von der Strecke aus durch vergleichsweise kurze Bohrungen ($L \leq 50$ m) erkundet.

Im Bereich der Strecken wird das Gebirge sorgfältig kartiert, um Aussagen über das Trennflächengefüge (Raumstellung, Abstände, Ausbildung) zu erhalten. Diese Aussagen sind erforderlich, da sie die mechanischen und die hydraulischen Eigenschaften des Gebirges maßgeblich beeinflussen.

Aus der Versuchsstrecke und aus den Bohrungen werden Gesteinsproben für Laborversuche entnommen, in denen die Festigkeit, die Verformbarkeit und die Quelleigenschaften des Gesteins bestimmt werden. Weiterhin werden in den Bohrlöchern Dilatometerversuche zur Bestimmung der Verformbarkeit des geklüfteten Gebirges durchgeführt. Auch die Quelleigenschaften des Gebirges sollen neben den Versuchen im Labor mit Hilfe von in-situ Versuchen im Bohrloch bestimmt werden.

Die Kenntnis der im Rahmen der o.g. geotechnischen Untersuchungen zu bestimmenden felsmechanischen Eigenschaften des ungestörten Gebirges ist zur Durchführung der im Abschnitt 4 beschriebenen Berechnungen erforderlich. Auf die Bestimmung der felsmechanischen Eigenschaften des durch das Abteufen der Schächte gestörten Gebirges wird im Abschnitt 5 näher eingegangen.

Da mit der Untersuchungsstrecke im Mittelalb bisher noch nicht begonnen wurde, liegen noch keine Versuchsergebnisse vor.

3.3.2 Spannungen im ungestörten Gebirge

Zur Ermittlung des im ungestörten Gebirge herrschenden Spannungszustandes sind Primärspannungsmessungen in den von der Strecke aus abzuteufenden Bohrlöchern mit Hilfe von Triaxialzellen vorgesehen[11]. Die Kenntnis des Spannungszustandes ist für die Simulation des Abteufens der Schächte und des Einbringens der Schachtverfüllung erforderlich. Die Größe der Stoßverschiebungen im Schacht, der Auf-

lockerungszone und der quellbedingten Verformungen im Nahbereich des Schachtes hängen u.a. vom Primärspannungszustand ab.

3.3.3 Durchlässigkeit des Gebirges

Die Durchlässigkeit des Gebirges wird durch Wasserabpreßversuche (WD-Tests) in den Bohrlöchern ermittelt. Die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit des ungestörten Gebirges dient zum einen der Absicherung der bisherigen Annahmen (s. Abschnitt 3.2) und zum anderen der Abgrenzung der im Zuge des Schachtabteufens entstandenen Auflockerungszone vom ungestörten Gebirgsbereich.

3.3.4 Mineralogie

Mit Hilfe der mineralogischen Untersuchungen soll die Abhängigkeit der in den Labor- und Feldversuchen ermittelten felsmechanischen Eigenschaften von der Zusammensetzung der Gesteine nachgewiesen werden. Dies betrifft insbesondere die Quelleigenschaften und die Festigkeit. Die mineralogischen Untersuchungen stellen eine der Grundlagen zur Extrapolation von Versuchsergebnissen auf andere Gebirgsbereiche dar (vgl. Abschnitt 3.5).

Im Bereich der geplanten Untersuchungsstrecke im Mittelalb wurde zur Vorerkundung eine horizontale Bohrung ausgeführt. Aus dieser Vorbohrung B11 sind bereits einige Proben von der BGR hinsichtlich ihrer Mineralogie untersucht worden. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Anlagen 3.10 und 3.11 dargestellt. Als Hauptkomponenten treten Smektit und Calcit auf. Muskovit-Illit konnte nur in Spuren bzw. als Nebenkomponente nachgewiesen werden [12]. Diese Ergebnisse stimmen weitgehend mit den Ergebnissen der mineralogischen Untersuchungen an Proben aus dem Mittelalb aus der Bohrung Konrad 101 überein (vgl. Anlagen 3.5 - 3.9).

3.4 Geotechnische Untersuchungen für das Barrême (541 m-Sohle)

3.4.1 Felsmechanische Eigenschaften

Eine zweite Untersuchungsstrecke ist im unteren Teil der Unterkreide

in den Schichten des Barrême vorgesehen. Auch das hierdurch großmaßstäblich aufgeschlossene Gebirge repräsentiert einen größeren, wesentlichen Teil der Unterkreide. Durch die Ausführung von Bohrungen von dieser Strecke aus ist die Erkundung der oberhalb und unterhalb anstehenden Barrêmeschichten und auch eines großen Teils des darunter anstehenden Hauterive möglich.

Die Zielsetzungen und die Durchführung der geotechnischen Untersuchungen können den Ausführungen im Abschnitt 3.3.1 entnommen werden, die hier in gleicher Weise gültig sind.

Auch im Bereich der geplanten Strecke im Barrême wurde eine horizontale Vorbohrung (B10) abgeteuft. An Proben aus dieser Vorbohrung wurden bereits einige Laborversuche durchgeführt. Die Ergebnisse von ein- und dreiaxialen Druckversuchen sind in der Anlage 3.12 den bereits bekannten Ergebnissen gegenübergestellt. Es zeigt sich, daß an den Kernstücken aus der Bohrung B10 sowohl für den E-Modul mit $E = 9930 \text{ MPa}$ wie auch für die einaxiale Druckfestigkeit mit $\sigma_{dg} = 21,7 \text{ MPa}$ deutlich größere Werte ermittelt wurden, als bei früheren Versuchen.

Die Ergebnisse von Quellhebungsversuchen an Proben aus der Vorbohrung B10 sind in den Anlagen 3.13 - 3.19 dargestellt. Die eingebauten 6 Proben stammen alle aus dem Kernstück von 1,87 - 1,91 m, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die mineralogische Zusammensetzung in allen Proben etwa gleich ist. An jeweils 3 Proben wurde die Quelldehnung parallel bzw. senkrecht zur Schichtung ermittelt. Die Bewässerung der Proben erfolgte unterschiedlich mit destilliertem Wasser, salinarem Wasser aus dem Ort 300 oder aus dem Hils-sandstein.

Wie die Ergebnisse der Versuche zeigen, ergeben sich bei den mit destilliertem Wasser bewässerten Versuchen sowohl senkrecht als auch parallel zur Schichtung etwa gleich große Quelldehnungen von ca. 13 % (Anlagen 3.14, 3.17). Für die mit Wasser aus dem Ort 300 bewässerten Proben ergeben sich deutlich kleinere Quelldehnungen von nur 1,9 bzw. 1,3 % parallel bzw. senkrecht zur Schichtung (Anlagen 3.15,

3.18). Die Bewässerung mit Wasser aus dem Hilssandstein führt ebenfalls zu kleinen Quellhebungen von 0,4 bzw. 1,8 % (Anlagen 3.16, 3.19).

Wie diese ersten Versuche zeigen, wird die Quelldehnung sehr stark von der Zusammensetzung des zur Bewässerung verwendeten Wassers beeinflusst. Ein Einfluß der Schichtung auf die Quelleigenschaften des Gesteins ist in diesen Versuchen nicht beobachtet worden. Über die Größe des maximalen Quelldruckes können noch keine Aussagen gemacht werden, da die hierzu laufenden Versuche noch nicht abgeschlossen sind.

3.4.2 Spannungen im ungestörten Gebirge

Hinsichtlich der Zielsetzung und der Durchführung der von der Untersuchungsstrecke im Barrême aus geplanten Primärspannungsmessungen wird auf die Ausführungen im Abschnitt 3.3.2 verwiesen.

3.4.3 Durchlässigkeit des Gebirges

Auch für die Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit des Gebirges im Bereich der Untersuchungsstrecke im Barrême bzw. in den angrenzenden Schichten gelten die für die Untersuchungsstrecke im Mittelalb genannten Ausführungen (vgl. Abschnitt 3.3.3).

3.4.4 Mineralogie

Aus der Vorbohrung B10 sind bereits einige Proben hinsichtlich ihrer mineralogischen Zusammensetzung von der BGR untersucht worden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Anlagen 3.20 und 3.21 dargestellt. Hauptbestandteil des Gesteins ist demnach Quarz, gefolgt von dem nicht quellfähigen Tonmineral Kaolinit. Die Tonminerale Muskovit und Illit treten in nahezu allen Proben als Nebenkomponente auf, während Smektit nur in Spuren nachgewiesen werden konnte [12]. Wie ein Vergleich mit den Anlagen 3.5 - 3.9 zeigt stimmen die Ergebnisse qualitativ mit den früheren Untersuchungsergebnissen an Proben aus der Bohrung Konrad 101 überein.

3.5 Extrapolation der Ergebnisse auf nicht durch die Erkundungen aufgeschlossene Bereiche

Durch das Untersuchungsprogramm in den Strecken der 343 m und der 541 m Sohle werden detaillierte Kenntnisse über die felsmechanischen Eigenschaften, die Durchlässigkeit und die Mineralogie des Gebirges im Bereich der Strecken und der Bohrungen gewonnen. Die Übertragung dieser Ergebnisse auf andere, nicht aufgeschlossene bzw. nicht mit Versuchsergebnissen belegte Bereiche soll i.w. anhand der mineralogischen Untersuchungen sowie der petrographischen Gesteinsbeschreibungen erfolgen. Bereits vorliegende Ergebnisse wie z.B. aus der Bohrung Konrad 101 oder die Auswertung der Schachtkartierungen sind dabei ebenfalls sehr wichtig.

4. Simulation des Abteufens der Schächte einschließlich des Ausbaus

4.1 Ziel der Berechnungen und Beschreibung des Berechnungsverfahrens

Mit den Berechnungen zur Simulation des Abteufens der Schächte soll der gegenwärtig im Gebirge im Nahbereich der Schächte herrschende Spannungs-Verformungszustand ermittelt werden. Die Eingangsparameter der Berechnungen (Verformbarkeit, Festigkeiten, Quellparameter, Primärspannungen) sind dabei innerhalb der Bandbreite der bereits ermittelten bzw. zu erwartenden Parameter zu variieren. Die Berechnungsergebnisse lassen Rückschlüsse auf die Intensität und Ausdehnung der infolge des Schachtabteufens eingetretenen Auflockerung des Gebirges und auch auf die Wasserdurchlässigkeit dieser Auflockerungszone zu. Durch den Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen der vom Schacht 2 aus durchzuführenden Erkundungen (s. Abschnitt 5) können die Berechnungsannahmen überprüft bzw. die Bandbreite der Annahmen eingegrenzt werden. Dies ist auch für die Berechnungen zur Simulation der Schachtverfüllung (s. Abschnitt 7) von großer Bedeutung.

Die Berechnungen zur Simulation des Herstellvorganges der Schächte werden mit dem Rechenprogramm FEST 03, das auf der Methode der Finiten Elemente basiert, durchgeführt.

Im folgenden wird in kurzer Form auf die bei diesem Berechnungsverfahren verwendete Spannungsdehnungsbeziehung und die Leistungsfähigkeit des Programms eingegangen, das an anderer Stelle ausführlich beschrieben ist [13].

Für den Fels wird von einer elastisch-viskoplastischen Spannungsdehnungsbeziehung ausgegangen, wobei sowohl für den elastischen als auch für den viskoplastischen Bereich eine Anisotropie berücksichtigt werden kann. Für das Gestein und für die Trennflächen wird ein Mohr-Coulomb'sches Bruchkriterium zugrunde gelegt, das im Zugspannungsbereich im τ - σ -Diagramm durch eine Vertikale abgeschnitten wird ("tension cut-off"). Dabei wird der Einfluß der Trennflächen auf die Festigkeit des Gebirges dadurch berücksichtigt, daß die Scherfestigkeiten und die Zugfestigkeiten für die verschiedenen Trennflächenscharen, deren Raumstellungen beliebig gewählt werden können, gegenüber den entsprechenden Gesteinsfestigkeiten reduziert werden.

Die bei Festigkeitsüberschreitungen auftretenden viskoplastischen Verformungen können mit Hilfe einer assoziierten sowie mit einer nicht assoziierten Fließregel durch eine Iterationsrechnung bestimmt werden. Die damit verbundene Volumenvergrößerung im plastischen Zustand wird maßgeblich durch Dilatanzwinkel bestimmt, die sowohl für das Gestein als auch für die Trennflächen beliebig vorgegeben werden können.

Als Elementtyp wird hauptsächlich das isoparametrische Raumelement mit variabler Knotenzahl (3 bis 21) verwendet, mit dem sich sowohl zwei- als auch dreidimensionale Berechnungen durchführen lassen. Dabei wird der Fels gewöhnlich durch 8-Knoten-Elemente mit einem linearen Verformungsansatz nachgebildet. Gekrümmte Strukturen, wie z.B. der Schachtausbau, werden durch höherwertige Elemente mit nichtlinearem Verformungsansatz modelliert.

Das Programmsystem FEST 03 ermöglicht eine Simulation von Ausbruchfolgen oder Bauzuständen in verschiedenen Rechenschritten, wie z.B. das abschnittsweise Verfüllen eines Schachtes.

Als Randbedingungen können Knotenpunkte als vollständig unverschieblich, in einzelnen Richtungen als unverschieblich oder mit Verschiebungen, die während der Berechnung konstant gehalten werden, vorgegeben werden. Es ist auch möglich für einzelne Knotenpaare zu vereinbaren, daß sie sich während der Berechnung in gleicher Weise verschieben. Auch können am Rand oder im Innern des Kontinuums äußere Belastungen als Knotenkräfte oder Elementlasten angegeben werden, die als Einzel- oder Flächenlasten aber auch als Volumenkräfte (z.B. Eigengewicht) wirken können.

Bei dem ebenfalls zur Verfügung stehenden Rechenprogramm FESWELL handelt es sich um eine erweiterte Version des Rechenprogramms FEST03, mit dem dreidimensionale Spannungs- und Verformungszustände unter Berücksichtigung der Quelleigenschaften von Tonstein bzw. Ton berücksichtigt werden können. Die für das Quellverhalten zugrunde gelegten Spannungsdehnungsbeziehungen und der Programmablauf sind an anderer Stelle beschrieben [14].

4.2 Berechnungen für das Mittelalb

4.2.1 Berechnungsausschnitt und Berechnungsannahmen

Der gewählte Berechnungsausschnitt ist in der Anlage 4.1 dargestellt. Es handelt sich um eine horizontal liegende Gebirgsscheibe, deren Abmessungen in x- und z-Richtung jeweils 50 m und in y-Richtung 1 m betragen. Die Knoten der Ebenen $x = 0$ und $x = 50$ m sind in x-Richtung verschieblich und in z-Richtung unverschieblich gelagert, während die Knoten der Ebenen $z = 0$ und $z = 50$ m in x-Richtung festgehalten und in z-Richtung verschieblich sind. Durch diese Annahmen ergeben sich die x- und z-Achse als Symmetrieachsen, so daß man die Berechnungen auf einen Viertelkreis beschränken kann. Die Knoten der Ebene $y = 0$ sind in allen Richtungen frei verschieblich. Im Unterschied dazu werden die Knoten der Ebene $y = 1$ in y-Richtung festgehalten und können sich nur in x- und z-Richtung verschieben.

Die Simulation der Überlagerung geschieht durch Berücksichtigung entsprechender Knotenkräfte senkrecht zur x-z-Ebene. So ist es

möglich, mit dem gleichen Netz verschiedene Überlagerungshöhen zu berücksichtigen.

Das Elementennetz ist in 171 Elemente mit insgesamt 222 Knoten je Ebene eingeteilt. Es ermöglicht die Simulation des Schachtausbruches und des Einbaus der Schachtsicherung (s. Anlage 4.1).

Die zur Nachbildung des Abteufvorganges der Schächte durchgeführten Rechenschritte sind in der Anlage 4.2 dargestellt. Der 1. Rechenschritt beinhaltet die Berechnung der Spannungen und Verformungen für den ungestörten Zustand im Gebirge vor Beginn der bergbaulichen Eingriffe (Primärzustand). Im 2. Rechenschritt wird der Ausbruch des Schachtes simuliert, indem für die innerhalb des Ausbruchs gelegenen Elemente die Kennwerte von Luft angesetzt werden. Für das Gebirge wird in diesem Rechenschritt wie im Primärfall elastisches Spannungsdehnungsverhalten angenommen. Erst im folgenden 3. Rechenschritt, mit dem der Einbau der Schachtsicherung nachvollzogen wird, schließt sich an die elastische Berechnung eine Iterationsrechnung zur Berücksichtigung viskoplastischer Verformungen des Gebirges an.

Die den im folgenden beschriebenen Berechnungen zugrundegelegten Kennwerte und Annahmen sind in der Anlage 4.3 zusammengestellt. Die Überlagerungshöhe wird mit 420 m, d.h. der maximalen Überlagerung des Mittelalb am Schacht 1, angenommen. Die Wichte des Gebirges wird mit $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$ berücksichtigt. Wasserdruck oder Auftrieb werden nicht berücksichtigt, so daß sich die Vertikalspannung infolge des Eigengewichtes des Gebirges zu $\sigma_y \approx 10 \text{ MPa}$ ergibt.

Für den E-Modul des Gebirges wird zunächst 1500 MPa angenommen. Dieser Wert entspricht etwa der Hälfte des in den Laborversuchen an Gesteinsproben ermittelten Moduls. In-situ-Messungen des Verformungsmoduls des Gebirges (z.B. Dilatometerversuche) wurden im Bereich des Mittelalb bisher nicht durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.2).

Die Poissonzahl kann erfahrungsgemäß mit etwa $\nu = 0,33$ angenommen werden. Die Horizontalspannungen infolge der behinderten Querdehnung ergeben sich dann zu

$$\sigma_x = \sigma_z = k_o \cdot \sigma_y = \frac{\nu}{1 - \nu} \cdot \sigma_y = 0,5 \cdot \sigma_y \approx 5 \text{ MPa.}$$

In den beiden Berechnungsfällen B1 und B2 wird der Einfluß einer zusätzlichen Horizontalspannung in der Größe von $\Delta\sigma_H = 4,5 \text{ MPa}$ untersucht. Eine derartige horizontale Zusatzspannung kann beispielsweise infolge tektonischer Vorgänge oder infolge der Entstehungsgeschichte der Tongesteine vorliegen.

Für die Festigkeit des Gebirges wird in der Mehrzahl der Berechnungsfälle eine einaxiale Druckfestigkeit von 10 MPa zugrundegelegt. Dieser Wert liegt an der unteren Grenze der im Labor an Gesteinsproben ermittelten Bandbreite der Festigkeiten (vgl. Anlage 3.2). Nimmt man den Reibungswinkel der tonigen Gesteine mit $\psi = 20^\circ$ an, so ergibt sich hieraus die Kohäsion zu $c = 3,5 \text{ MPa}$ (s. Anlage 4.3).

In einem Berechnungsfall (Fall A3, s. Anlage 4.3) wird der Einfluß einer deutlich geringeren einaxialen Druckfestigkeit (5 MPa) untersucht. Die Kohäsion ergibt sich dann unter der Annahme von $\psi = 20^\circ$ zu $c = 1,75 \text{ MPa}$.

Im Berechnungsfall A5 wird neben der Festigkeit der Matrix eine trennflächenbedingte Abminderung der Festigkeit des Gebirges berücksichtigt (s. Anlage 4.3). Da hierzu keine Untersuchungsergebnisse vorliegen, werden 2 senkrecht aufeinanderstehende, parallel zur Schachtachse verlaufende Trennflächenscharen mit kleinsten Scherparametern angenommen $\psi = 30^\circ$, $c = 0$. Diese Annahme ist im Hinblick auf Standsicherheitsberechnungen an horizontalen Scheiben als ungünstig einzustufen.

Der E-Modul der Betonformsteine wird in allen Berechnungsfällen auf der Grundlage von Versuchsergebnissen an Proben aus dem Schachtausbau mit $E = 10000 \text{ MPa}$ angenommen [20]. Da für die zwischen Formsteinausbau und Gebirge eingebauten Wabensteine keine derartigen Versuchsergebnisse vorliegen, wird den Berechnungen ein anhand von Erfahrungen abgeschätzter E-Modul (100 MPa) zugrundegelegt (s. Anlage 4.3). Sowohl für die Betonformsteine als auch für die Wabensteine wird eine linear elastische Spannungsdehnungsbeziehung angenommen.

4.2.2 Ergebnisse Fall A1

Im Fall A1 wird für das Gebirge eine Kohäsion von 3,5 MPa bei einem Reibungswinkel von 20° entsprechend einer einaxialen Druckfestigkeit von $\sigma_{dg} = 10$ MPa angenommen (vgl. Anlage 4.3). In der Anlage 4.4 sind für den 3. Rechenschritt die Hauptnormalspannungen sowie der Verlauf der Radial- und der Tangentialspannungen dargestellt. Festigkeitsüberschreitungen ergeben sich nur in dem unmittelbar hinter dem Ausbau liegenden Felsbereich. Die Tangentialspannungen besitzen am Ausbruchrand ein Maximum von 10 MPa und nehmen mit zunehmender Entfernung vom Ausbruchrand auf den für den Primärzustand angenommenen Wert von 5 MPa ab. Die Radialspannungen besitzen am Ausbruchrand den Wert Null und wachsen mit zunehmender Entfernung vom Ausbruchrand auf den im Primärfall herrschenden Wert von 5 MPa an. Der Ausbau wird demzufolge unter den im Fall A1 getroffenen Annahmen nicht durch Gebirgsdruck belastet.

Der Verlauf der Radialverschiebungen des Gebirges ist in der Anlage 4.5 dargestellt. Die Verschiebungen sind am Ausbruchrand mit etwa 18 mm am größten. Mit zunehmendem Abstand zum Ausbruchrand werden die Radialverschiebungen schnell kleiner und betragen in ca. 9 m Entfernung noch etwa 5 mm.

4.2.3 Ergebnisse Fall A3

Im Fall A3 wird der Einfluß einer gegenüber dem Fall A1 kleineren Gebirgsfestigkeit ($c = 1,75$ MPa, $\varphi = 20^\circ$, $\sigma_{dg} = 5$ MPa) untersucht. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind ebenfalls in den Anlagen 4.4 und 4.5 wiedergegeben. Wie die Darstellung der Hauptnormalspannungen mit den gekennzeichneten Elementen, in denen Festigkeitsüberschreitungen auftreten, zeigt, ergibt sich um den Schacht herum eine ca. 1,5 - 2 m breite Zone, in der sich das Gebirge plastisch verhält (s. Anlage 4.5). Für die Tangentialspannungen ergeben sich dadurch im hohlraumnahen Bereich kleinere Werte als im Fall A1. Eine vergleichende Gegenüberstellung der Spannungsverläufe in diesen beiden Fällen findet sich in der Anlage 4.4. Im Fall A3 besitzt die Tangentialspannung am Hohlraumrand einen Wert von etwa 6 MPa und wächst dann auf etwa 9 MPa an. Mit zunehmender Entfernung vom Hohlraumrand

fällt sie auf den Wert des Primärzustandes ($\sigma_t = 5$ MPa) ab. Für die Radialspannungen ergibt sich im Fall A3 am Ausbruchrand ein Wert von ca. 1,5 MPa, der der Belastung der Schachtsicherung durch Gebirgsdruck entspricht. Mit zunehmendem Abstand wächst die Radialspannung auf etwa 5 MPa an (s. Anlage 4.4).

Die für den Fall A3 ermittelten Verschiebungen sind in der Anlage 4.5 den Verschiebungen des Falls A1 gegenübergestellt. Am Hohlraumrand sind die Verschiebungen im Fall A3 mit ca. 22 mm um etwa 25 % größer als im Fall A1. Bereits in ca. 1,5 m Entfernung vom Hohlraumrand nehmen die Verschiebungen allerdings auf etwa 10 mm ab.

4.2.4 Ergebnisse Fall A5

Mit dem Fall A5 soll wie erwähnt der Einfluß von senkrecht zueinander streichenden und vertikal einfallenden Trennflächenscharen mit geringer Scherfestigkeit ($c = 0$, $\varphi = 30^\circ$) untersucht werden. Die Verformbarkeit und Festigkeit des Gesteins entspricht im Übrigen den Annahmen des Falles A1. Auch in diesem Fall kann sich die Berechnung auf einen Viertelkreis beschränken, jedoch liegt keine Rotationssymmetrie wie in den Fällen A1 und A3 vor.

Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in den Anlagen 4.6 und 4.7 dargestellt. Wie aus den in der Anlage 4.6 dargestellten Hauptnormalspannungen hervorgeht, treten deutlich größere Bereiche mit Festigkeitsüberschreitungen als im Fall A1 auf. Der Verlauf der Radial- und Tangentialspannungen für den 3. Rechenschritt ist entlang zweier Schnitte in der Anlage 4.6 dargestellt. Der Schnitt I-I ist etwa unter 45° zu beiden Trennflächenscharen geführt, während der Schnitt II-II näherungsweise parallel bzw. senkrecht zum Streichen der Trennflächen verläuft. Die Tangentialspannung entlang des Schnittes I-I ist am Hohlraumrand mit etwa 2,5 MPa am kleinsten. Dies ist auf die in diesem Schnitt durch die Trennflächen reduzierte Scherfestigkeit zurückzuführen. Erst mit zunehmender Entfernung wächst die Tangentialspannung im Schnitt I-I auf max. etwa 9 MPa in ca. 2 m Entfernung vom Ausbruchrand an, um dann langsam auf 5 MPa abzufallen. Die Radialspannung im Schnitt I-I beträgt am Ausbruch-

rand etwa 1,0 MPa und wächst dann mit zunehmender Entfernung auf den Endwert von 5 MPa an.

Die Tangentialspannung entlang des Schnittes II-II weist einen dem Fall A1 ähnlichen Verlauf auf. Der größte Wert beträgt an der Hohlraumwand etwa 11 MPa. Mit zunehmender Entfernung nimmt die Tangentialspannung auf 5 MPa ab. Die Radialspannung weist am Hohlraumrand wie im Schnitt I-I einen Wert von etwa 1,0 MPa auf. Die Belastung der Schachtsicherung durch Gebirgsdruck ist somit in den beiden betrachteten Schnitten etwa gleich groß und beträgt ca. 1 MPa.

Der Verlauf der Radialverschiebungen entlang der beiden betrachteten Schnitte I-I und II-II ist in der Anlage 4.7 dargestellt. Bemerkenswert ist, daß die Verschiebungen am Hohlraumrand im Schnitt II-II um ca. 25 % größer sind als im Fall A1 (Anlage 4.5). Im Schnitt I-I sind die Radialverschiebungen mit 18,7 mm dagegen nur geringfügig größer als im Fall A1.

4.2.5 Ergebnisse Fall B1

Mit dem Fall B1 soll der Einfluß einer zusätzlichen horizontalen Primärspannung von $\Delta\sigma_H = 4,5$ MPa auf den Spannungs- und Verformungszustand im Gebirge infolge des Schachtabteufens untersucht werden. Die Annahmen hinsichtlich der Verformbarkeit entsprechen denen des Falles A1. Im Fall B1 wird jedoch für das Gebirge rein elastisches Verhalten zugrundegelegt. Die zusätzliche horizontale Primärspannung wird durch entsprechende Verschiebungen der Knoten in den Ebenen $x = 50,0$ und $z = 50,0$ simuliert. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind auf den Anlagen 4.8 und 4.9 dargestellt. Wie man an der Darstellung der Hauptnormalspannungen erkennt, sind diese gegenüber den entsprechenden Spannungen im Fall A1 (vgl. Anlage 4.4) wesentlich größer. Besonders deutlich geht dies aus den Verläufen der Tangential- und Radialspannungen hervor. Sie entsprechen qualitativ den Ergebnissen des Falles A1. Die Tangentialspannung weist allerdings im Fall B1 mit etwa 19 MPa am Ausbruchrand nahezu den doppelten Wert wie im Fall A1 auf. Mit zunehmender Entfernung vom Ausbruchrand nähern sich die Tangential- und Radialspannung den Spannungen des Primärfalles, die 9,5 MPa betragen.

Der Verlauf der Radialverschiebungen, der für den Fall B1 in der Anlage 4.9 dargestellt ist, entspricht qualitativ dem des Falles A1. Die Verschiebungen sind jedoch im Fall B1 nahezu doppelt so groß und betragen am Hohlraumrand in radialer Richtung 33,7 mm (Fall A1: 17,8 mm).

4.2.6 Ergebnisse Fall B2

Auch im Fall B2 wird der Einfluß einer zusätzlichen horizontalen Primärspannung von $\Delta\sigma_H = 4,5$ MPa untersucht. Im Unterschied zum Fall B1 wird jedoch die Festigkeit des Gebirges ($\sigma_{dg} = 10$ MPa: $\varphi = 20^\circ$, $c = 3,5$ MPa) berücksichtigt.

Wie die Darstellung der Hauptnormalspannungen in der Anlage 4.9 zeigt, ergeben sich nur in den unmittelbar am Ausbruchrand liegenden Elementreihen gegenüber dem Fall B1 veränderte Spannungen. Festigkeitsüberschreitungen treten nur in den ersten 2 Elementreihen, d.h. bis in etwa 1,0 m Entfernung vom Ausbruchrand, auf. Der Verlauf der Radial- und Tangentialspannungen für den Fall B2 ist den Ergebnissen des Falles B1 in der Anlage 4.8 gegenübergestellt. Infolge der viskoplastischen Iteration zur Simulation von Festigkeitsüberschreitungen wird die Tangentialspannung am Ausbruchrand von etwa 19 MPa im Fall B1 auf etwa 10 MPa im Fall B2 vermindert. Die maximale Tangentialspannung stellt sich in einem Abstand von ca. 1 m vom Ausbruchrand mit etwa 15 MPa ein. Die Radialspannung beträgt am Ausbruchrand etwa 0,5 MPa, so daß in diesem Fall die Schachtsicherung durch Gebirgsdruck belastet wird. Mit zunehmendem Abstand vom Hohlraumrand nähern sich die Tangential- und Radialspannungen dem Wert der Horizontalspannung im Primärfall (9,5 MPa).

Der Verlauf der Radialverschiebungen im Fall B2 ist in der Anlage 4.9 dargestellt. Gegenüber dem Fall B1 ergibt sich am Hohlraumrand mit 36,7 mm eine um ca. 10 % größere Verschiebung.

4.2.7 Ergebnisse Fall Q1

Mit dem Fall Q1 soll der Einfluß des Quellens untersucht werden. Die Berechnung wurde mit oben erwähntem Programm FESWELL durchgeführt

[14]. Das der Berechnung zugrundegelegte Quellgesetz ist in der Anlage 4.10 dargestellt. Danach treten bei Spannungen, die größer als σ_0 sind keine Quelldehnungen mehr ein. Bei Spannungen, die kleiner oder gleich σ_{\min} sind, ergibt sich der Maximalwert der Quelldehnung (ϵ_{\max}). Zwischen den Spannungen σ_{\min} und σ_0 wurden die Quelldehnungen bei halblogarithmischer Darstellung durch die in der Anlage 4.10 dargestellte Gerade beschrieben.

Die dem Fall Q1 zugrundegelegten Berechnungsannahmen sind in der Anlage 4.3 zusammengestellt. Für das Gebirge wurde rein elastisches Verhalten, unter Berücksichtigung der bereits in den anderen Fällen gewählten Elastizitätskonstanten, angenommen. Die Werte für die Quellparameter $\sigma_0 = 5 \text{ MPa}$ und $k_q = 3 \%$ wurden anhand von Erfahrungen in anderen quellfähigen Tonsteinen geschätzt, da für das Projekt Konrad noch keine verlässlichen Versuchsergebnisse vorliegen.

Im 1. Rechenschritt wurden wie bei den Fällen A1-B2 die im Primärfall herrschenden Spannungen ermittelt. Der Aushub des Schachtes wurde im 2. Rechenschritt simuliert. Die Iterationsrechnung zur Ermittlung der quellbedingten Verschiebungen und Spannungen schließt sich dabei an die elastische Lösung an. Um den maximalen Einfluß des Quellens zu ermitteln, wurde auf die Berücksichtigung der Schachtsicherung verzichtet. Die Ergebnisse der Berechnung sind in den Anlagen 4.11 und 4.12 dargestellt. Der Verlauf der Radialverschiebungen ist über die Entfernung zum Ausbruchrand aufgetragen. Neben der elastischen Lösung, die weitgehend dem Fall A1 entspricht, (vgl. Anlage 4.5), sind in der Anlage 4.11 die quellbedingten Radialverschiebungen in der gleichen Form dargestellt. Am Ausbruchrand ergeben sich infolge des Quellens zur Schachtachse gerichtete Verschiebungen von etwa 14 mm. Mit zunehmendem Abstand werden die Verschiebungen rasch kleiner und ab ca. 1,0 m Entfernung vom Schacht werden durch das Quellen in das Gebirge gerichtete Verschiebungen hervorgerufen.

Der Verlauf der radialen Quelldehnungen ist in der Anlage 4.12 dargestellt. Am Schachtrand ergeben sich mit 9 % die größten Quelldehnungen (ϵ_{\max}). Mit zunehmender Entfernung zum Schacht, wird die radiale Quelldehnung rasch kleiner und beträgt ab ca. 2 m Entfernung

vom Schacht Null, d.h. daß ab dieser Entfernung das Gebirge nicht mehr quillt.

4.3 Berechnungen für das Hauterive

4.3.1 Berechnungsausschnitt und Berechnungsannahmen

Die Berechnungen für das Hauterive werden mit dem gleichen FE-Netz, das auch den Berechnungen für das Mittelalb zugrundegelegt wurde, durchgeführt (s. Anlage 4.1). Zur Berücksichtigung der größeren Überlagerungshöhe ($H_{\bar{u}} = 765$ m im Schacht 1), werden die Knotenkräfte senkrecht zur x-z-Ebene entsprechend vergrößert. Die Randbedingungen und Rechenschritte entsprechen den für das Mittelalb durchgeführten Berechnungen (vgl. Abschnitt 4.2.1).

Bisher wurde nur ein Berechnungsfall (Fall C1) für den Bereich des Hauterive durchgeführt. Die in diesem Fall getroffenen Annahmen hinsichtlich der Festigkeit und der Verformbarkeit des Gebirges entsprechen den Annahmen für den Fall A1 (s. Anlage 4.3). Lediglich die Primärspannungen sind entsprechend der größeren Überlagerungshöhe größer als im Fall A1.

4.3.2 Ergebnisse Fall C1

Wie erwähnt liegen dem Fall C1 mit Ausnahme der Überlagerungshöhe, die hier $H_{\bar{u}} = 765$ m beträgt, die gleichen Kennwerte und Annahmen wie dem Fall A1 zugrunde. Die Annahme des E-Moduls von $E = 1500$ MPa ist durch die Ergebnisse der im Hauterive durchgeführten Dilatometerversuche begründet. Für die Festigkeit werden im Fall C1 mit $c = 3,5$ MPa, $\varphi = 20^\circ$ und $\sigma_{dg} = 10$ MPa die gleichen Annahmen wie im Fall A1 getroffen.

Die Berechnungsergebnisse für den Fall C1 sind in der Anlage 4.13 dargestellt. Die Hauptnormalspannungen im 3. Rechenschritt weisen nahezu die gleiche Größe und den gleichen Verlauf wie im Fall B2 auf, da die horizontalen Primärspannungen mit

$$\sigma_H = \sigma_v \cdot K_0 = H_{\bar{u}} \cdot \gamma \cdot \frac{\nu}{1 - \nu} = 9,2 \text{ MPa}$$

etwa so groß sind wie die des Falles B2 ($\sigma_H = 9,5$ MPa). Der Bereich in dem die Festigkeit überschritten wird, ist jedoch mit einer Breite von etwa 1,7 m deutlich größer als im Fall B2 (vgl. Anlage 4.9), da im Fall C1 die Vertikalspannungen erheblich größer sind. Die Verläufe der Tangential- und Radialspannung entsprechen qualitativ denen im Fall B2, jedoch ist die Radialspannung am Ausbruchrand mit etwa 2 MPa ungefähr 4-mal so groß wie im Fall B2. Auch die Tangentialspannung ist mit etwa 14 MPa am Ausbruchrand deutlich größer als im Fall B2.

Die für den Fall C1 ermittelten Radialverschiebungen (s. Anlage 4.13) sind mit ca. 40 mm am Ausbruchrand um etwa 10 % größer als im Fall B2 und mehr als doppelt so groß wie im Fall A1 (17,8 mm). In etwa 1,5 m Entfernung vom Ausbruchrand betragen die Verschiebungen nur noch ca. 15 mm. In größerer Entfernung vom Schacht ist die Abnahme der Verschiebungen nicht mehr so ausgeprägt. In etwa 9 m Entfernung vom Ausbruchrand betragen sie immer noch ca. 10 mm (s. Anlage 4.13).

4.4 Schlußfolgerungen aus den Berechnungsergebnissen

Aus den bisher durchgeführten Berechnungen zur Herstellung der Schächte wird ersichtlich, daß die Festigkeit des Gesteins und die Festigkeit auf eventuellen Trennflächen einen wesentlichen Einfluß auf die Größe der Auflockerungszone haben. Ob und in welchem Umfang Festigkeitsüberschreitungen (plastische Zonen) und damit verbundene Auflockerungen eintreten, wird jedoch ebenso vom Primärspannungszustand, d.h. i.w. von der Überlagerungshöhe bestimmt. Der Einfluß zusätzlicher horizontaler Primärspannungen wirkt sich nicht so stark aus.

Nach den Ergebnissen der in den vorhergehenden Abschnitten erläuterten Berechnungen und der bislang durchgeführten Laborversuche kann man nicht ausschließen, daß die radiale Erstreckung der Auflockerungszone in einigen Bereichen der Unterkreide einige Meter beträgt. Es wird jedoch erwartet, daß über größere Abschnitte der Unterkreide nur geringfügig aufgelockerte Zonen im an die Schächte angrenzenden Gebirge auftreten.

Die auf der Grundlage grob abgeschätzter Quellparameter durchgeführte Berechnung zum Quellen zeigt, daß die Ausdehnung des Bereiches im an den Schacht angrenzenden Gebirge, in dem Quelldehnungen auftreten, unter den getroffenen Annahmen wesentlich kleiner ist als der Schachtdurchmesser. Jedoch wird auch der daran anschließende Gebirgsbereich noch durch das Quellen beeinflusst.

5. Untersuchungen des Gebirges im Bereich des Schachtes 2 hinsichtlich der Auflockerungszone

5.1 Allgemeines

Neben den im Abschnitt 3 beschriebenen Untersuchungszielen soll die Größe der durch den Schachtausbruch bedingten Auflockerungszone durch die in den Versuchsstrecken vorgesehenen Untersuchungen, die in [11] beschrieben sind, ermittelt werden. Hierzu sind zunächst die Kartierungen der Strecken, in denen die Raumstellung, die Öffnungsweite und der Abstand der Trennflächen festgestellt werden, auszuwerten. Darüberhinaus ergeben sich aus den WD-Versuchen Durchlässigkeitsbeiwerte, die in Verbindung mit den Kartierungen der Bohrkerne ebenfalls Hinweise auf die Größe der Auflockerungszone bzw. ihre Wirksamkeit im Hinblick auf die Durchlässigkeit liefern. Weitere Informationen ergeben sich aus den vorgesehenen Durchschallungsversuchen (Ultraschall-Versuche), mit denen der dynamische E-Modul des Gebirges ermittelt werden kann. Aus der Änderung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes und des dynamischen E-Moduls in Abhängigkeit vom Abstand zum Schachtrand lassen sich Rückschlüsse auf die Dicke der Auflockerungszone ziehen.

Wie bereits im Abschnitt 4 erwähnt sollen anhand der Untersuchungsergebnisse auch die Annahmen der Berechnungen zur Herstellung der Schächte überprüft bzw. die Streubreite der Annahmen eingegrenzt werden. Die Berechnungen können auf diese Weise mit Hilfe der Untersuchungsergebnisse "geeicht" werden. Von besonderer Bedeutung ist dies für die Festlegung zutreffender Eingangswerte bei den Berechnungen zur Schachtverfüllung, die ein wesentlicher Bestandteil des Dichtigkeitsnachweises sind.

Die zusätzlich zu den o.g. Untersuchungen in den Strecken und den Bohrlöchern vorgesehenen Injektionsversuche mit Tonsuspension geben darüber hinaus Aufschluß über die Injizierbarkeit der Auflockerungszone. In Abhängigkeit von diesen Ergebnissen wird festgelegt, ob eine Aufweitung des Schachtes zweckmäßig ist und wie weit sie gegebenenfalls reichen muß, um die geforderte Abdichtung der Schächte zu erreichen.

5.2 Ergebnisse der Untersuchungen im Mittelalb (343 m Sohle)

Ergebnisse hierzu liegen zur Zeit noch nicht vor.

5.3 Ergebnisse der Untersuchungen im Barrême (541 m Sohle)

Ergebnisse hierzu liegen zur Zeit noch nicht vor.

5.4 Extrapolation der Ergebnisse auf nicht durch die Erkundungen aufgeschlossene Bereiche

Hinsichtlich der Vorgehensweise zur Extrapolation der Ergebnisse auf nicht durch das Untersuchungsprogramm aufgeschlossene Bereiche gelten i.w. die Ausführungen im Abschnitt 3.5.

6. Böden für die mineralische Abdichtung der Schächte

6.1 Allgemeines

Außer den bereits genannten Anforderungen an die mineralische Abdichtung ($k_f \leq 10^{-8}$ m/s und Wirksamkeit > 10000 Jahre) sollten die hierfür in Frage kommenden Böden nach Möglichkeit quellfähig sein, einen hohen Seitendruck bewirken, zeitlich begrenzte Setzungerscheinungen zeigen und gut einbaubar sein. Viele Böden erfüllen einen Teil dieser Anforderungen sehr gut, andere dagegen weniger gut oder gar nicht. Es stellt sich daher die Aufgabe, einen Boden zu finden, der die o.g. Anforderungen in einer insgesamt zufriedenstellenden Weise erfüllt.

Die geeigneten Bodenarten lassen sich bereits von vornherein stark

einschränken. Aufgrund der geforderten Wirksamkeit über mehr als 10000 Jahre scheiden Böden mit einem organischen Anteil von mehr als 3 % aus. In der Anlage 6.1 ist der Streubereich der Bodenkennwerte für verschiedene natürlich vorkommende Bodenarten angegeben. Die Anforderungen an die Durchlässigkeit kann danach nur von 4 Boden-
gruppen nämlich von Kies-Sand-Feinkorngemischen ($G\bar{U}$, $G\bar{T}$), Sand-Fein-
korngemischen ($S\bar{U}$, $S\bar{T}$), mittelplastischem Ton (TM) und hochplasti-
schem Ton (TA) erfüllt werden. Diese Bodenarten können aus natürli-
chen Lagerstätten entnommen werden oder aber künstlich durch Mischen
entsprechender Bodenarten z.B. Kies-Sand-Gemisch und Ton hergestellt
werden. Außer diesen Böden sind auch Gemische aus Kies, Sand und
Bentonit grundsätzlich geeignet.

6.2 Laboruntersuchungen an verschiedenen Böden

6.2.1 Allgemeines

Zur Beurteilung einiger infrage kommender Böden hinsichtlich ihrer
Abdichtungseigenschaften und ihrer Einbaubarkeit sind umfangreiche
Laboruntersuchungen erforderlich, in denen die bodenmechanischen
Eigenschaften dieser Böden bestimmt werden. Es sind Untersuchungen
zur Bestimmung der folgenden Eigenschaften vorgesehen:

- Korngrößenverteilung
- Wassergehalt
- Plastizität
- Verdichtbarkeit
- Durchlässigkeit
- Steifemodul
- Scherfestigkeit
- Konsolidationsverhalten
- Kriechverhalten
- Quellfähigkeit

Diese Untersuchungen sind erforderlich, um zum einen das Setzungs-
verhalten der Verfüllung abschätzen und zum anderen um die Wechsel-
wirkung zwischen Verfüllung und umgebenden Gebirge während und nach

dem Einbau der Verfüllung möglichst wirklichkeitsnah in Berechnungen erfassen zu können.

6.2.2 Ergebnisse der Laboruntersuchungen an natürlichen Tonen

Wie im Abschnitt 6.1 ausgeführt kommen mittelplastische (TM) und ausgeprägt plastische (TA) Tone für eine mineralische Abdichtung infrage. Da entsprechende Tone in der Umgebung der Schachtanlage vorkommen und in Tongruben abgebaut werden, sollen sie auf ihre Eignung untersucht werden.

Es wurden Tonproben aus 3 verschiedenen Tongruben entnommen. Die Ergebnisse der daran bisher durchgeführten Untersuchungen sind in der Anlage 6.2 dargestellt. Bei allen Proben handelt es sich demnach um hochplastische Tone (TA).

Für die Probe 1 (Tongrube Stedum) wurden außerdem Proctorversuche zur Verdichtbarkeit durchgeführt. Die Proctordichte beträgt für diesen Boden $\rho_{pr} = 1,34 \text{ g/cm}^3$ bei einem optimalen Wassergehalt von $w_{opt} = 34 \%$ (Anlage 6.3).

Weitere Versuchsergebnisse liegen noch nicht vor.

6.2.3 Ergebnisse der Laboruntersuchungen an "Trockenmischungen"

Die im folgenden beschriebenen Versuchsergebnisse sind dem Bericht "DYWIDAG Abdichtungsmaterial, Bodenmechanische Eigenschaften" entnommen [16]. Die Kornverteilungskurve für die untersuchte Trockenmischung ist in der Anlage 6.4 dargestellt. Nach DIN 18196 handelt es sich bei diesem Boden um einen sandigen Kies mit Tonbeimengungen (GT vgl. Anlage 6.1 Zeile 3). Die Ergebnisse der weiteren Untersuchungen sind in der Anlage 6.5 dargestellt. Die Durchlässigkeit liegt mit $k_f < 5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ deutlich unterhalb der geforderten Durchlässigkeit und auch deutlich unterhalb der Angabe in der Anlage 6.1 Zeile 3 und Spalte i. Dies ist vermutlich durch den Bentonit, der den gesamten Feinkornanteil bildet, zu erklären. Die erreichbare Wichte ist mit $2,15 \text{ g/cm}^3$ etwa 60 % größer als die für den Ton ermittelte Proctordichte. Die Scherparameter betragen $\varphi = 42^\circ$ und $c = 0$ für den

trockenen und $\varphi = 36^\circ$ und $c = 50 \text{ kN/m}^2$ für den gesättigten Zustand. Sättigungssetzungen bzw. Sackungen wurden bei Wassersättigung nicht festgestellt.

Im Rahmen der weiteren Bearbeitung sollen zusätzliche Versuche zum Quell- und Kriechverhalten der Trockenmischung durchgeführt werden. Gegebenenfalls ist auch der Bentonitanteil zu vergrößern, um die Quellfähigkeit zu erhöhen.

6.3 Rechnerische Untersuchungen zu den Spannungen und Verformungen in der Schachtverfüllung

Die Ermittlung der Spannungen in der Verfüllsäule ist erforderlich, da hierdurch auch der Spannungszustand und das Quellverhalten des umgebenden Gebirges beeinflusst werden. Weiterhin ist die Kenntnis des Spannungszustandes in der Schachtverfüllung erforderlich, um das Quellverhalten der Verfüllung selbst sowie die eintretenden Verformungen beurteilen zu können. Die Größe der Verformungen soll begrenzt werden, um die möglicherweise durch Relativverschiebungen zwischen Gebirge und Schachtverfüllung entstehenden Bereiche mit höherer Durchlässigkeit klein zu halten bzw. zu vermeiden.

Die Größe der in der Schachtverfüllung wirkenden Spannungen hängt von verschiedenen Faktoren, wie den Scherparametern (c, φ) des verwendeten Bodens, der Wichte des Bodens (γ), den Wandreibungswinkel (δ), den Quellparametern (σ_0, k_c) sowie von der auf die mineralische Schachtverfüllung wirkenden Auflast (p) ab. Weitere Einflüsse stellen die Konsolidation und das Kriechen dar. Die Verformungen der Schachtverfüllung hängen vom Spannungszustand und vom Steifemodul (E_S) des Verfüllbodens ab. Hierbei ist zu beachten, daß der Steifemodul keine konstante Größe sondern spannungsabhängig ist.

Bei der Verfüllung eines tiefen Schachtes mit einem Boden ist i.a. davon auszugehen, daß sich eine Silowirkung einstellt. Die Spannungen in der Füllsäule lassen sich für einen kreisförmigen Schacht nach der Silotheorie [18] mit den Formeln

$$\sigma_z(z) = \gamma \cdot r \cdot \frac{1}{2 \cdot k \cdot \tan \delta} + \left(p - \frac{\gamma \cdot r}{2 \cdot k \cdot \tan \delta} \right) e^{\left(- \frac{2 \cdot k \cdot \tan \delta}{r} \cdot z \right)} \quad (2)$$

$$\sigma_r(z) = k \cdot \sigma_z(z) \quad (3)$$

ermitteln, wobei r den Radius des Schachtes, δ den Wandreibungswinkel, k den Seitendruckbeiwert und z die Tiefe bezeichnen. Die Formeln (2) und (3) gelten strenggenommen nur für kohäsionslose Böden.

In der Anlage 6.6 sind für den Schacht 1 die o.a. Formeln unter der Annahme geschätzter Kennwerte für die mineralische Abdichtung ausgewertet worden und die sich ergebenden Vertikal- und Radialspannungen dargestellt. Das Gewicht der Asphaltabdichtung wurde dabei als zusätzliche Auflast (p) berücksichtigt. Der Seitendruckbeiwert in der mineralischen Abdichtung wird entsprechend dem Erdrubedruckbeiwert mit $k = k_0 = 1 - \sin \varphi$ angenommen. Wie man erkennt nehmen die Vertikal- und Horizontalspannungen ausgehend vom Maximum in der Fuge zwischen Asphaltabdichtung und mineralischer Füllsäule mit zunehmender Tiefe rasch ab. So beträgt die Vertikalspannung 50 m unterhalb der Oberkante der mineralischen Abdichtung nur noch etwa 0,27 MPa gegenüber 3,64 MPa an der Fuge. Mit zunehmender Tiefe nähert sich die Vertikalspannung dem Grenzwert

$$\sigma_z = \frac{\gamma \cdot r}{2 \cdot k \cdot \tan \delta} = 0,226 \text{ MPa.}$$

Die zugehörige Radialspannung ergibt sich zu $\sigma_r = \sigma_z \cdot k = 0,15 \text{ MPa}$. Ohne Berücksichtigung einer Silowirkung würden sich diese Werte an der Unterkante einer ca. 11 m dicken Schicht unter Eigengewicht einstellen. Bei Annahme eines Steifemoduls von $E_S = 10 \text{ MPa}$ ergibt sich eine mittlere Stauchung von $\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{0,23}{10} \approx 0,02$ (ca. 2 %). Im oberen Bereich der mineralischen Füllsäule ergeben sich aufgrund der dort höheren Spannungen größere Stauchungen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß mit steigendem Spannungsniveau auch der Steifemodul anwächst.

Durch die oben bereits genannten Einflüsse wie Konsolidierung, Quellen und Kriechen verändert sich das Verformungsverhalten der mineralischen Füllsäule. Infolge der Konsolidation treten die Verformungen

mit einer zeitlichen Verzögerung ein, die abhängig von der Durchlässigkeit und dem Steifemodul des Bodens und der Höhe der Bodensäule ist.

Das durch die spätere Durchströmung der Abdichtung verursachte Quellen führt in der Füllsäule in der Regel nur zu einer Erhöhung der Spannungen. Lediglich in den Übergangsbereichen zur Asphaltabdichtung und zur statischen Füllsäule kann es zu Verschiebungen kommen, falls der Quelldruck höher ist als die sich dort aus dem Eigengewicht bzw. der Silotheorie einstellenden Spannungen. Eine Abschätzung dieser Verformungen kann erst erfolgen, wenn Quellparameter für die mineralische Abdichtung vorliegen.

Durch das Kriechen der mineralischen Abdichtung können sich langfristig ähnliche Verhältnisse wie bei einem nahezu reibungslosen Material einstellen. Ergänzend zur Spannungsverteilung nach der Silotheorie sind die sich für diesen Fall in der mineralischen Abdichtung einstellenden Spannungen in der Anlage 6.5 dargestellt. Bei Annahme eines Wandreibungswinkels von $\delta = 0$ ergibt sich die Vertikalspannung in der Füllsäule zu $\sigma_v = \gamma \cdot z + \sigma$ und die Radialspannung zu $\sigma_r = \sigma_v \cdot k$. Die Radialspannung an der Basis der mineralischen Abdichtung ergibt sich dann zu ca. 9,6 MPa und die Vertikalspannung zu ca. 14,3 MPa. Mit diesen Spannungszunahmen sind erhebliche Verformungen verbunden. Es sollte daher angestrebt werden, einen Boden einzubauen, der keine oder nur eine geringe Neigung zum Kriechen aufweist.

6.4 Vorschlag für den Einbau des Bodens

Der Einbau des Bodens für die mineralische Abdichtung soll so erfolgen, daß sich die gewünschten Eigenschaften, d.h. i.w. eine geringe Durchlässigkeit, ein hoher Steifemodul und ein geringes Kriechmaß einstellen. Genauere Empfehlungen bzw. Vorschläge zum Einbau werden erst nach der Auswahl eines Bodens für die mineralische Abdichtung angegeben.

7. Simulation der Schachtverfüllung - Rauben des Ausbaus, Ausbruch der Auflockerungszone und Einbau der mineralischen Abdichtung

7.1 Allgemeines

Für den Nachweis der Dichtigkeit der Schachtverschlüsse wird im Bereich der mineralischen Abdichtung ein integraler k_f -Wert von $k_f \leq 10^{-8}$ m/s für die Schachtverfüllung und die den Schacht umgebende Auflockerungszone gefordert. Die Einhaltung dieses Durchlässigkeitsbeiwertes für die Schachtverfüllung wird durch Wahl eines entsprechenden Bodens gewährleistet (vgl. Abschnitt 6). In der Auflockerungszone ist durch das ausbruchbedingte Öffnen von Rissen und Trennflächen oder Veränderungen im Gefüge des Gesteins möglicherweise eine größere Durchlässigkeit vorhanden, als im weitgehend ungestörten Gebirge und in der Schachtverfüllung. In diesem Bereich ist eine Selbstabdichtung des Gebirges, hervorgerufen durch Quellvorgänge im Gebirge möglich. Die Quellvorgänge führen zum Schließen von Trennflächen und Rissen bzw. zur Verdichtung des aufgelockerten Gefüges. Beeinflusst werden diese Vorgänge durch die in der Schachtverfüllung wirkenden Seitendrücke und Quelldrücke.

Zur Simulation dieser komplexen Vorgänge, die sich gegenseitig stark beeinflussen, sind FE-Berechnungen vorgesehen, in denen die bei der Schachtverfüllung eintretenden Bauzustände und das mögliche Quellen von Gebirge und Schachtverfüllung berücksichtigt werden. Zur Anwendung kommen die Programmsysteme FFST03 und FESWELL (s. Abschnitt 4.1).

Die im folgenden erläuterten Berechnungen beschränken sich noch auf die Untersuchung der Größe der entstehenden Auflockerungszone. Berechnungen zur Verfüllung des Schachtes mit Berücksichtigung des Quellverhaltens sind zu einem späteren Zeitpunkt, wenn weitere Erkenntnisse zum Quellverhalten von Gebirge und Schachtverfüllung vorliegen, vorgesehen.

7.2 Berechnungen für das Mittelalb

7.2.1 Berechnungsausschnitt und Berechnungsannahmen

Der Berechnungsausschnitt und die Berechnungsannahmen entsprechen den Ausführungen im Abschnitt 4. Bei den im folgenden erläuterten Berechnungen handelt es sich um die Fortführung der bereits im Abschnitt 4.2 vorgestellten Berechnungsfälle A1, A3, A5, B1 und B2 (vgl. Anlage 4.3). Die Berechnungen werden um einen 4. Rechenschritt ergänzt, in dem die Herausnahme der Schachtsicherung (Betonformsteine und Wabensteine) sowie die Aufweitung des Schachtes auf einen Durchmesser von 11 m simuliert wird. Mit den Berechnungen soll untersucht werden, in welchem Umfang sich bei der Herausnahme des Schachtausbaus und der infolge des Schachtabteufens entstandenen "alten" Auflockerungszone eine "neue" Auflockerungszone ausbilden kann. Die hier erläuterten 2-dimensionalen Berechnungen stellen dabei den ungünstigsten Fall dar, da weder die stützende Wirkung der der Schachtaufweitung nachlaufenden Schachtverfüllung noch die stützende Wirkung des oberhalb des jeweiligen Aufweitungsbereiches verbliebenen Schachtausbaus berücksichtigt werden.

Die räumliche Tragwirkung infolge der o.g. stützenden Elemente (Schachtverfüllung und Ausbau) kann nur in 3-dimensionalen Berechnungen unter Berücksichtigung der einzelnen Bauzustände erfaßt werden. Entsprechende Berechnungen sind im Rahmen der weiteren Bearbeitung vorgesehen. In diesen Berechnungen wird dann auch das Quellverhalten der mineralischen Abdichtung und des anstehenden Gebirges berücksichtigt.

7.2.2 Ergebnisse Fall A1

Die dem Fall A1 zugrundegelegten Annahmen wurden bereits im Abschnitt 4.2.2 erläutert und können der Anlage 4.3 entnommen werden. Wie die Darstellung der Hauptnormalspannungen in der Anlage 7.1 zeigt, stellt sich um den Schacht herum eine Erhöhung der Tangentialspannungen und eine Verringerung der Radialspannungen ein. Am Ausbruchrand sind die Radialspannungen Null, während die Tangential-

spannungen mit ca. 10 MPa etwa in der Größe der angenommenen einaxialen Druckfestigkeit liegen. Festigkeitsüberschreitungen treten gerade noch nicht auf. In größerer Entfernung vom Schacht liegt der nahezu ungestörte Primärspannungszustand vor (5 MPa in horizontaler Richtung).

Die aus der Aufweitung des Schachtes resultierenden Radialverschiebungen sind mit $f_r = 10$ mm sehr klein (vgl. Anlage 7.2).

7.2.3 Ergebnisse Fall A3

Mit dem Fall A3 wird der Einfluß einer gegenüber dem Fall A1 reduzierten Festigkeit des Gebirges von $c = 1,75$ MPa, $\varphi = 20^\circ$ ($\sigma_{dg} = 5$ MPa) untersucht (vgl. Anlage 4.3). Auch in diesem Fall stellt sich eine Erhöhung der tangentialen Hauptnormalspannungen um den Schacht herum ein (vgl. Anlage 7.2).

Aufgrund der geringeren Festigkeit kommt es jedoch in einem ca. 3 m dicken an den Ausbruch angrenzenden Gebirgsbereich zu Festigkeitsüberschreitungen. Der Verlauf der tangentialen und der radialen Hauptnormalspannungen im Fall A3 ist den entsprechenden Spannungsverläufen im Fall A1 in der Anlage 7.1 gegenübergestellt.

Der Verlauf der infolge der Aufweitung des Schachtes eintretenden Radialverschiebungen ist in der Anlage 7.2 dargestellt. Die Verschiebungen sind mit etwa 270 mm am Ausbruchrand sehr viel größer als im Fall A1, klingen aber mit zunehmender Entfernung zum Hohlraum rasch ab. Die Vergrößerung der Verschiebungen im Fall A3 ist allein auf die Festigkeitsüberschreitungen im schachtnahen Gebirgsbereich zurückzuführen. Es ist davon auszugehen, daß hiermit eine deutliche Auflockerung des Gebirges in diesem Bereich verbunden ist.

7.2.4 Ergebnisse Fall A5

Mit dem Fall A5 wird der Einfluß zweier vertikal einfallender, senkrecht zueinander stehender Trennflächenscharen untersucht. Für die Trennflächen wird mit $c = 0$ und $\varphi = 30^\circ$ eine gegenüber dem Gebirge

($c = 3,5 \text{ MPa}$, $\psi = 20^\circ$, $\sigma_{dg} = 10 \text{ MPa}$) verminderte Scherfestigkeit angenommen (vgl. Anlage 4.3). Wie die Darstellung in der Anlage 7.3 zeigt, wird die Größe und die Richtung der Hauptnormalspannungen maßgeblich durch die Trennflächen beeinflusst. Der Spannungszustand ist nicht radialsymmetrisch. Im unmittelbar an den Ausbruchrand angrenzenden Gebirgsbereich fallen die Richtungen der größten Hauptnormalspannungen etwa mit der Streichrichtung der beiden Trennflächenscharen zusammen. In Richtung der Diagonalen zu den Streichrichtungen der Trennflächen ergibt sich eine weitgehend entlastete Gebirgszone, deren maximale Dicke ca. 1,5 m in Richtung des Schnittes I-I beträgt (s. Anlage 7.3). Die Bereiche mit Festigkeitsüberschreitungen reichen etwa 3-5 m in das Gebirge hinein und sind damit größer als im Fall A3 (vgl. Anlage 7.2).

Der Verlauf der Radial- und Tangentialspannungen ist für die Schnitte I-I und II-II in der Anlage 7.3 dargestellt. Auch in dieser Darstellung ist die entlastete Zone in Richtung des Schnittes I-I deutlich erkennbar.

Die sich im Fall A5 ergebenden Radialverschiebungen sind in der Anlage 7.4 für die Schnitte I-I und II-II über der Entfernung zum Hohlraumrand aufgetragen. In Richtung des Schnittes I-I beträgt die Radialverschiebung am Ausbruchrand demnach ca. 61 mm. Mit zunehmender Entfernung nimmt die Radialverschiebung schnell ab. In Richtung des Schnittes II-II ist die Radialverschiebung etwa 25 % kleiner und beträgt nur ca. 45 mm. Im Unterschied zum Schnitt I-I ist die Abnahme mit zunehmender Entfernung vom Ausbruchrand geringer. In etwa 3 m Entfernung vom Ausbruchrand weist die Radialverschiebung in Richtung des Schnittes II-II etwa die doppelte Größe wie die sich in gleicher Entfernung in Richtung des Schnittes I-I ergebende Radialverschiebung auf (25 bzw. 10 mm).

7.2.5 Ergebnisse Fall B1

Mit dem Fall B1 wird der Einfluß einer zusätzlichen horizontalen Primärspannung von $\Delta\sigma_H = 4,5 \text{ MPa}$ untersucht. In allen 4 Rechenschritten wird elastisches Gebirgsverhalten angenommen (vgl. Anlage 4.3). Die Ergebnisse entsprechen qualitativ denen des Falles A1, jedoch

ergeben sich wegen der zusätzlichen horizontalen Primärspannungen etwa doppelt so große Radial- und Tangentialspannungen (vgl. Anlage 7.5 mit 7.1).

Auch die Radialverschiebungen sind im Fall B1 mit 18,7 mm am Ausbruchrand (s. Anlage 7.6) etwa doppelt so groß wie die Verschiebungen im Fall A1 (vgl. Anlage 7.2).

7.2.6 Ergebnisse Fall B2

Der Fall B2 entspricht weitgehend dem Fall B1 mit dem Unterschied, daß im Fall B2 kein rein elastisches Materialverhalten zugrundegelegt wird. Für den Fall B2 wird die Festigkeit wie im Fall A1 mit $c = 3,5 \text{ MPa}$, $\varphi = 20^\circ$ und $\sigma_{dg} = 10 \text{ MPa}$ angenommen (vgl. Anlage 4.3).

Wie man aus der Darstellung der Hauptnormalspannungen in der Anlage 7.6 erkennt, ergeben sich im Fall B2 Bereiche mit Festigkeitsüberschreitungen (Auflockerungszone), die ca. 1,0 - 1,5 m tief in das Gebirge hinein reichen. Die Radial- und Tangentialspannungen weisen qualitativ einen ähnlichen Verlauf wie im Fall A1 auf (Anlage 7.5).

Der Verlauf der Radialverschiebungen ist in der Anlage 7.6 dargestellt. Am Ausbruchrand ergeben sich mit 29 mm etwa um 50 % größere Verschiebungen als aus der elastischen Lösung (Fall B1). Die Verschiebungen klingen jedoch mit zunehmender Entfernung vom Hohlraumrand rasch ab.

7.3 Berechnungen für das Hauterive

7.3.1 Berechnungsausschnitt und Berechnungsannahmen

Auch die Berechnung für das Hauterive stellt eine Fortführung des bereits im Abschnitt 4.3 erläuterten Berechnungsfalles C1 dar, indem die Aufweitung des Schachtes in einem 4. Rechenschritt simuliert wird. Die Annahmen, die sich von der Berechnung Fall A1 (Mittelalb) nur durch die größere Überlagerungshöhe unterscheiden, sind der Anlage 4.3 zu entnehmen.

7.3.2 Ergebnisse Fall C1

Die Ergebnisse des Falles C1 sind in der Anlage 7.7 dargestellt. Die Zone mit Überschreitungen der Gebirgsfestigkeit reicht demnach ca. 2-2,5 m tief in das Gebirge hinein. Der Verlauf der Radial- und der Tangentialspannungen in einem radial geführten Schnitt kann ebenfalls der Anlage 7.7 entnommen werden.

Die Radialverschiebungen betragen am Ausbruchrand ca. 390 mm. Mit zunehmender Entfernung vom Ausbruchrand klingen sie jedoch rasch ab. In ca. 2 m Entfernung vom Ausbruchrand beträgt die Radialverschiebung nur noch 25 mm (Anlage 7.7).

7.4 Zusammenfassung und Bewertung der Berechnungsergebnisse

In den vorgestellten 2-dimensionalen Berechnungen wird der Ausbruch einer Auflockerungszone von 1,35 m Dicke, d.h. eine Aufweitung des Schachtes von 8,3 m auf 11 m Ausbruchdurchmesser simuliert. Da weder die Stützung des Gebirges durch die mineralische Abdichtung unterhalb noch die Stützung durch den noch nicht entfernten Ausbau oberhalb des Aufweitungsbereiches berücksichtigt werden, stellen die Berechnungen für die Ermittlung der Auflockerungszone den ungünstigsten Fall dar.

Bei Scherparametern von $c = 3,5 \text{ MPa}$, $\varphi = 20^\circ$ ($\sigma_{dg} = 10 \text{ MPa}$), die nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand für eine vertretbare Annahme gehalten werden, ergeben sich in den Berechnungen für das Unteralb ($H_u = 420 \text{ m}$) keine Festigkeitsüberschreitungen infolge der Aufweitung des Schachtes (Fall A1). Näherungsweise kann davon ausgegangen werden, daß sich demnach für diesen Fall auch keine nennenswerte Auflockerungszone ergibt. Ist die Festigkeit des Gebirges geringer ($c = 1,75 \text{ MPa}$, $\varphi = 20^\circ$, $\sigma_{dg} = 5 \text{ MPa}$), so ergibt sich eine ca. 3 m dicke Zone mit Festigkeitsüberschreitungen, die als Auflockerungszone angesehen werden kann (Fall A3). Bei Annahme von 2 vertikalen, senkrecht zueinander stehenden Trennflächenscharen mit geringer Scherfestigkeit ($c = 0$, $\varphi = 30^\circ$) ergeben sich Überschreitungen der Festigkeit in Bereichen, die vom Ausbruchrand ca. 3-5 m tief in das Gebir-

ge hineinreichen (Fall A5) und die als Auflockerungszonen interpretiert werden.

Die Berücksichtigung zusätzlicher horizontaler Primärspannungen ($\Delta\sigma_H = 4,5$ MPa) führt bei sonst gegenüber dem Fall A1 unveränderten Berechnungsannahmen zu einer ca. 1,5 m dicken Zone mit Festigkeitsüberschreitungen (Auflockerungszone).

Im Hauterive ergeben sich wegen der großen Überlagerungshöhe ($H_U = 765$ m) bei sonst gegenüber dem Fall A1 unveränderten Annahmen hinsichtlich der Festigkeit des Gebirges Festigkeitsüberschreitungen (Auflockerungen) in einem Bereich von ca. 2,5 m Dicke (Fall C1).

8. Schlußfolgerungen zur Abdichtung der Schächte in der Unterkreide

Die bisherigen Berechnungen (s. Abschnitte 4 und 7) zeigen, daß bei Festigkeiten des Gebirges von $c = 3,5$ MPa und $\psi = 20^\circ$ und ($\sigma_{dg} = 10$ MPa) zumindest im oberen Bereich der Unterkreide keine ausgeprägte Auflockerungszone zu erwarten ist, falls nicht Trennflächen mit ungünstiger Raumstellung bzw. zusätzliche horizontale Primärspannungen im Gebirge vorliegen. Eine weitergehende Beurteilung ist zu diesem Zeitpunkt allerdings nicht möglich, da der größte Teil der vorgesehenen Untersuchungen noch aussteht und somit die Eingangswerte für die Berechnungen nicht hinreichend abgesichert sind.

Die an die Schachtverfüllung im Bereich der Unterkreide zu stellenden Anforderungen (s. Abschnitt 6) können grundsätzlich von einem Boden erfüllt werden. Im Rahmen der weiteren Bearbeitung sind jedoch noch eine größere Anzahl von Laboruntersuchungen durchzuführen.

Insgesamt kann anhand der bisher durchgeführten Untersuchungen abgeschätzt werden, daß die Anforderungen an die Durchlässigkeit, d.h. ein integraler Durchlässigkeitsbeiwert von $k_F \leq 10^{-8}$ m/s im Bereich der Unterkreideschichten, erfüllt werden können. Möglicherweise sind im oberen Bereich der Unterkreide auch Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_F \approx 10^{-9} - 10^{-10}$ m/s nachweisbar. Das bedeutet, daß ggf. die Anforderungen an die Durchlässigkeit der Schachtverfüllung im Bereich der

Unterkreide insgesamt auch dann erfüllt werden können, wenn sich für den unteren Bereich der Unterkreide höhere Durchlässigkeiten als $k_f = 10^{-8}$ m/s aus den Untersuchungen ergeben.

9. Nachweis der Standsicherheit der Füllsäule im Bereich unterhalb der mineralischen Abdichtung und der Schachtzugänge

9.1 Allgemeines

Der unterhalb der mineralischen Abdichtung liegende Füllsäulenabschnitt hat die Aufgabe, die aus der mineralischen Abdichtung resultierende Auflast in das Gebirge einzuleiten. Die dabei auftretenden Verschiebungen sollen möglichst gering sein. An die Durchlässigkeit des statischen Füllsäulenabschnittes werden mit der Forderung eines integralen k_f -Wertes von $k_f \leq 10^{-4}$ m/s nur vergleichsweise geringe Anforderungen gestellt.

Wie Schadensfälle an verfüllten Schächten zeigen [17], ist insbesondere beim Auftreten von Wasser in verfüllten Schächten ein Auslaufen der Füllsäule in nichtverfüllte Strecken möglich. Die Schadensfälle sind neben der ungünstigen Wirkung des Wassers i.w. auf ungeeignete, nicht suffosionsstabile Böden und auf mangelhafte Verdichtung der für die Füllsäule verwendeten Böden zurückzuführen. Wie Untersuchungen [18, 19] zeigen, kann ein Auslaufen der Füllsäule ausgeschlossen werden, wenn kein strömendes Wasser vorhanden ist und wenn außerdem der Reibungswinkel des Bodens nicht vom Wassergehalt abhängig ist. Dies gilt auch für den Fall, daß die anschließenden Strecken nicht verfüllt sind.

Strömendes Wasser ist beim Endlager Konrad in der statischen Füllsäule nicht zu erwarten, da der Wasserzufluß von oben durch die mineralische Abdichtung, die eine sehr geringe Durchlässigkeit besitzt, begrenzt wird. Eine aus dem Grubengebäude nach oben gerichtete Strömung braucht nicht berücksichtigt zu werden, da die hieraus resultierenden Strömungskräfte über die Strecken in die Füllsäule eingetragen werden und daher stützend wirken. Durch Wahl eines Bodens, der keine oder nur geringe Schluff- bzw. Tonanteile enthält,

kann auch die Forderung nach einem vom Wassergehalt unabhängigen Reibungswinkel erfüllt werden.

Im übrigen ist es vorgesehen alle Strecken zu verfüllen, so daß ein Auslaufen der Verfüllsäule ausgeschlossen werden kann.

9.2 Vorschlag für Verfüllmaterialien und Einschätzung der mechanischen Kennwerte

Mit den o.g. Anforderungen an den Boden für die statische Füllsäule läßt sich anhand der Anlage 6.1 eine Vorauswahl treffen. Danach sind sandige Kiese (GW, GI) und kiesige Sande (SW, SI) geeignet (vgl. Anlage 6.1, Zeilen 2 u. 6). Für den sandigen Kies ergibt sich eine geringere Zusammendrückbarkeit und ein etwas größerer Reibungswinkel als für den kiesigen Sand. Andererseits ist die Durchlässigkeit des sandigen Kieses größer als die des kiesigen Sandes. Bei geeigneter Abstufung der Körnungslinie können die Anforderungen hinsichtlich der Durchlässigkeit jedoch erreicht werden.

Für Vorberechnungen sollte von einem Reibungswinkel von $\varphi = 30^\circ$ und einem Steifemodul $E_S = 50-100$ MPa ausgegangen werden. Diese Kennwerte liegen unterhalb der in Anlage 6.1 Zeile 2, Spalten f und g gemachten Angaben und werden daher für vertretbare Annahmen gehalten. Für den zur Anwendung kommenden Boden müssen selbstverständlich die Durchlässigkeit, der Reibungswinkel und die Zusammendrückbarkeit durch Untersuchungen nachgewiesen werden.

9.3 Rechnerische Untersuchungen zur Standsicherheit und zu den Verformungen der Verfüllsäule

Die Ermittlung der Spannungen kann nach der in Abschnitt 6.3 erläuterten Silotheorie erfolgen. Unter der Annahme des oben angegebenen Reibungswinkel von $\varphi = 30^\circ$ und eines Wandreibungswinkels von $\delta = 20^\circ$ sind die Spannungen im Bereich der statischen Füllsäule unter Berücksichtigung der im Abschnitt 6.3 unterschiedenen Fälle in der Anlage 9.1 dargestellt.

Für den Fall, daß in der mineralischen Abdichtung die Silowirkung gilt, ergeben sich über die ganze Höhe der statischen Füllsäule nahezu konstante Vertikalspannungen von

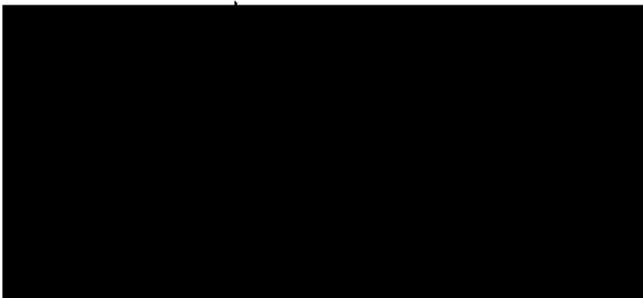
$$\sigma_v = \frac{\gamma \cdot r}{2 \cdot k \cdot \tan \delta} = 0,24 \text{ MPa.}$$

Die Radialspannungen betragen dann $\sigma_r = k \cdot \sigma_v = 0,12 \text{ MPa}$ ($\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$, $r = 4,15 \text{ m}$, $k = k_0 = 1 - \sin \varphi$ und $\delta = 20^\circ$). Die Spannungen unterscheiden sich somit nur geringfügig von den nach der Silotheorie im Bereich der mineralischen Abdichtung ermittelten Spannungen (vgl. Anlage 9.1). Die Stauchungen in der statischen Füllsäule ergeben sich je nach Annahme für den Steifemodul zu

$$\xi = \frac{0,24}{100} - \frac{0,24}{50} = 0,2 - 0,4 \text{ \%}.$$

Für den Fall, daß in der mineralischen Abdichtung keine Silowirkung vorhanden ist, sondern der volle Überlagerungsdruck $\sigma_v = 14,4 \text{ MPa}$ wirkt, ist die Spannungsverteilung in der statischen Füllsäule ebenfalls dargestellt (Anlage 9.1). Die im oberen Bereich der statischen Füllsäule großen Vertikal- und Radialspannungen klingen demnach sehr schnell ab. Etwa 50 m unterhalb der mineralischen Abdichtung beträgt die Vertikalspannung nur noch $\sigma_v = 0,42 \text{ MPa}$ und $\sigma_r = 0,21 \text{ MPa}$. Die von den Schächten abgehenden Strecken liegen mehr als 50 m unterhalb der Basis der mineralischen Abdichtung, so daß hier bereits der vollständig nach der Silotheorie reduzierte Spannungszustand in der Füllsäule vorliegt. Dennoch sollten alle Strecken verfüllt werden um ein Auslaufen der Füllsäule auf jeden Fall zu verhindern. In den Streckenabschnitten, deren Abstand zum Schacht weniger als ca. 50 m beträgt, sollte für die Verfüllung derselbe Boden, der auch für die statische Füllsäule verwendet wird, eingebaut werden. Zwischen den beiden Böden ist ein 2-stufiger Filter anzuordnen um Erosion bzw. Suffosion vollständig auszuschließen.

Aachen, den 21.12.1989



Literaturverzeichnis

- [1] Konzept- und Systembeschreibung Schachtverschluß, Fassung August 1989, Physik.-Techn.-Bundesanstalt, Deilmann-Haniel, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Prof. Dr.-Ing. W. Wittke, Beratende Ingenieure für Grundbau und Felsbau GmbH

- [2] Plan, Endlager für radioaktive Abfälle, Schachtanlage Konrad, Unterkapitel 3.1.9, Stand 9/86; Geologische, hydrologische und hydrogeologische Verhältnisse, Physik.-Techn.-Bundesanstalt, Braunschweig

- [3] Untersuchungen zur Festigkeit und Verformbarkeit von Tonmergel und Tonstein Prüfkörpern aus der Bohrung Konrad 101, Ergebnisse von Dauerstandsversuchen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Juli 1986

- [4] Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laboruntersuchungen aus den Schachtwiderlagerbohrungen im Schacht Konrad 2, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Juli 1986

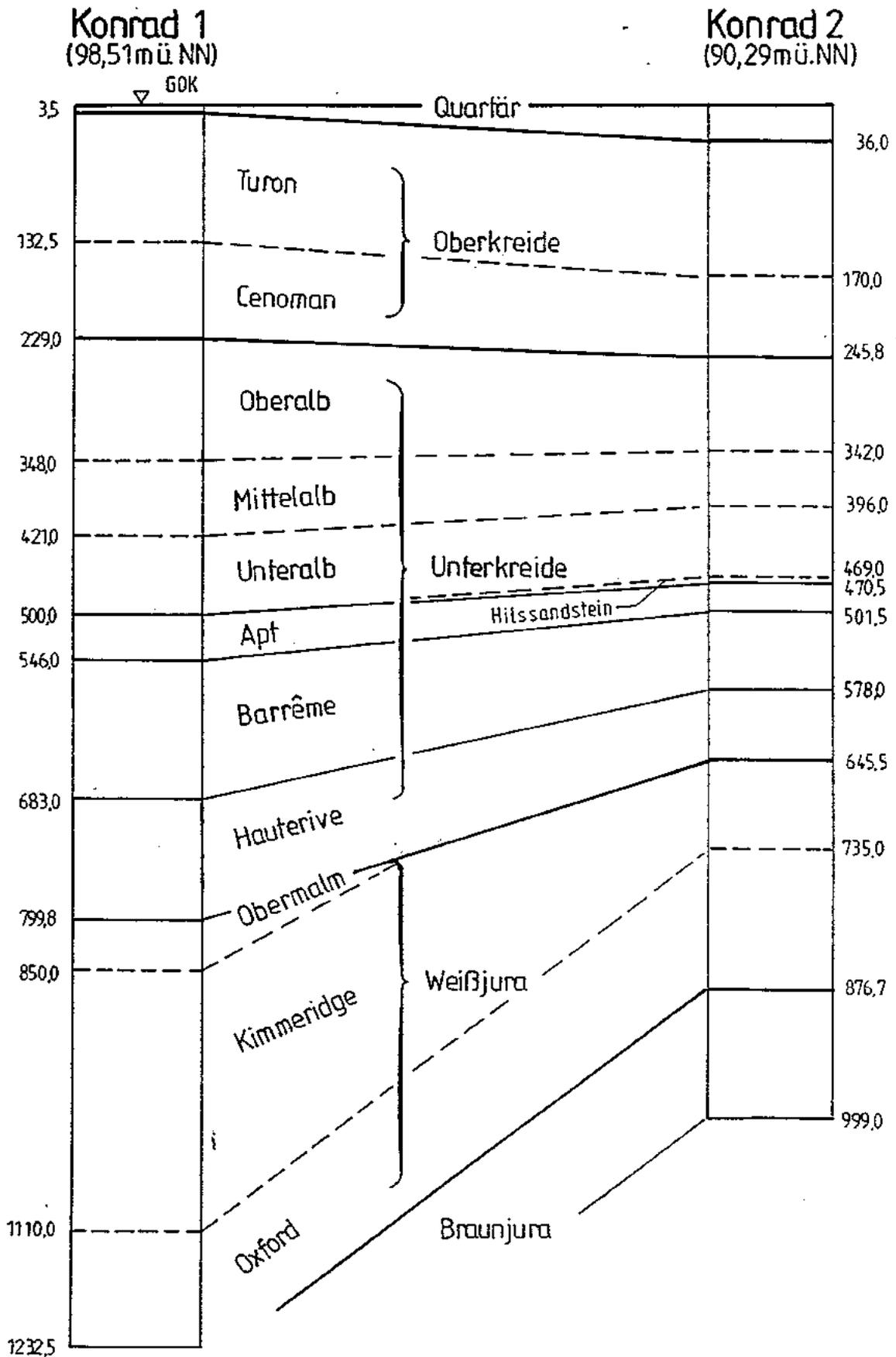
- [5] Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laboruntersuchungen an Gesteinsproben aus dem Hangend- und Liegendbereich der Grube Konrad, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, September 1986

- [6] Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Laboruntersuchungen an Gesteinsproben aus dem Schachtwiderlagerbohrungen im Schacht Konrad, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Februar 1987

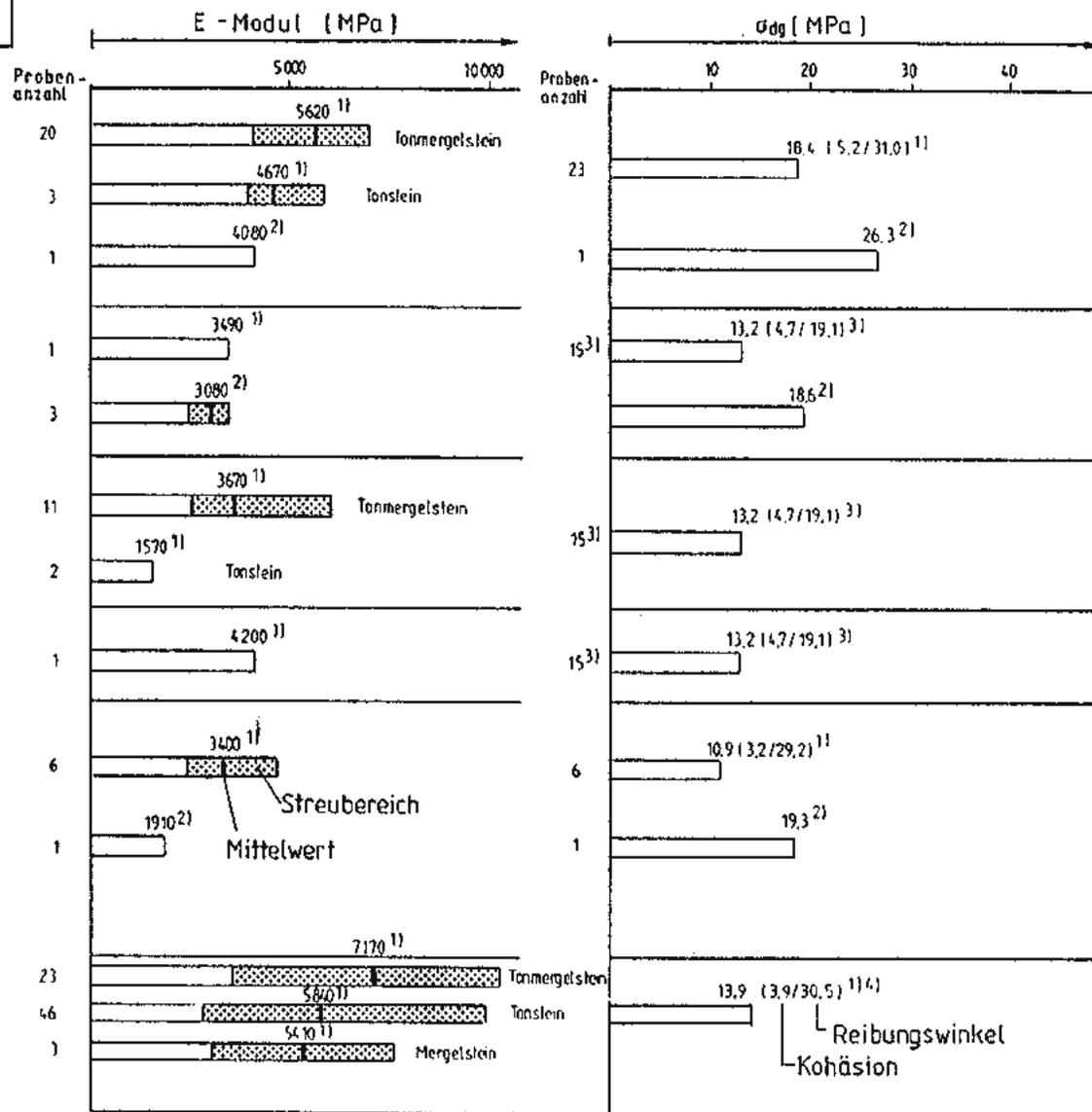
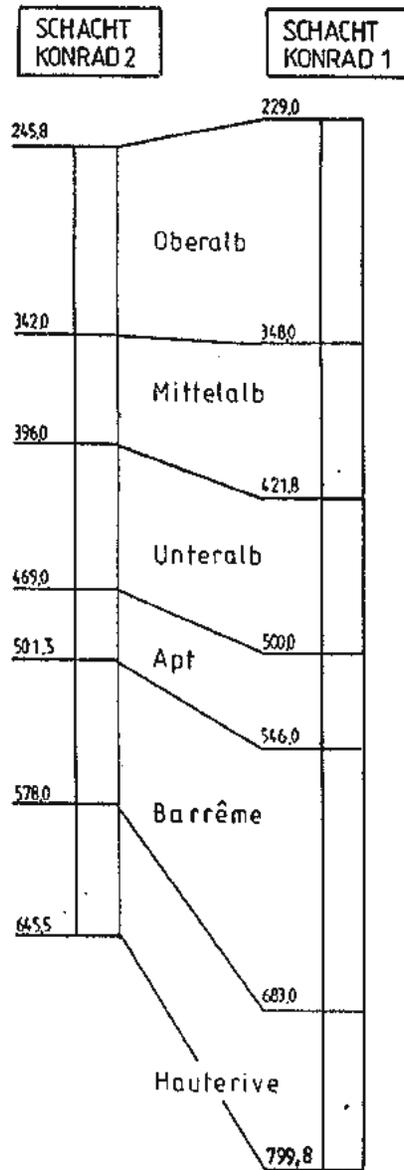
- [7] Dilatometermessungen im Bereich des geplanten Widerlagers, Tgb.-Nr. 11813/86, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, August 1986

- [8] Durchströmungsversuche auf der Schachtanlage Konrad im Schacht 2, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Mai 1986
- [9] Durchströmungsversuche auf der Schachtanlage Konrad, Ort 300, Schacht 1, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Februar 1987
- [10] Tiefbohrung Konrad 101, Laborbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, August 1985
- [11] Erläuterung der zur Dichtigkeit der alten Bohrungen und der Schachtverschlüsse geplanten Untersuchungen und Versuche, Prof. Dr.-Ing. W. Wittke, Beratende Ingenieure für Grundbau und Felsbau GmbH, Aachen, Juni 1989
- [12] Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen der Bohrungen B11 und B10 (Mittelalb und Barrême, Loseblattsammlung), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Oktober-November 1989
- [13] Wittke, W.: Felsmechanik - Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Tokyo, New York, 1984
- [14] Dreidimensionale Spannungs- und Verformungszustände im quellfähigen Fels und deren numerische Berechnung, Prof. Dr.-Ing. W. Wittke, Beratende Ingenieure für Grundbau und Felsbau GmbH, Aachen, November 1989
- [15] Grundbau Taschenbuch Teil 1, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, München, Düsseldorf 1980
- [16] DYWIDAG Abdichtungsmaterial, Bodenmechanische Eigenschaften, Dyckerhoff & Widmann AG, Essen November 1989

- [17] Das Problem aufgegebener Tagesschächte, Auswirkung auf die Tagesoberfläche, Erfahrungen und Schadensfälle, Hinweise für Schutzvorkehrungen und Sicherungsmaßnahmen unter besonderer Berücksichtigung des niederrheinisch-westfälischen Steinkohlengebietes (Ruhrgebiet), Mitteilungen der Westfälischen Berggewerkschaftskasse Heft 36, Bochum Dezember 1980
- [18] Geomechanische Untersuchung der Stabilität von Schotter-schichten und -böschungen zur Sicherung von Versatzsäulen in Schächten, Neue Bergbautechnik 6. Jahrgang Heft 8, August 1976
- [19] Richtlinien für das Verfüllen und Abdecken von Tages-schächten, Entwurf, Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld, Clausthal-Zellerfeld, Juli 1989
- [20] Gutachten über die Standfestigkeit der Schächte Konrad 1 und 2 im Hinblick auf die weitere Verwendung für die Erz- und Materialförderung, Seilfahrt und Wetterführung, Westfälische Berggewerkschaftskasse, Bochum, November 1984
- [21] Parameterstudien zur Grundwasserbewegung auf einem Modell-schnitt von Salzgitter Höhenzug zum Salzstock Callerlah - Hydraulische Höhen, Fließwege, Fließzeiten - Ergänzender Bericht zum Plan Konrad, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Februar 1986

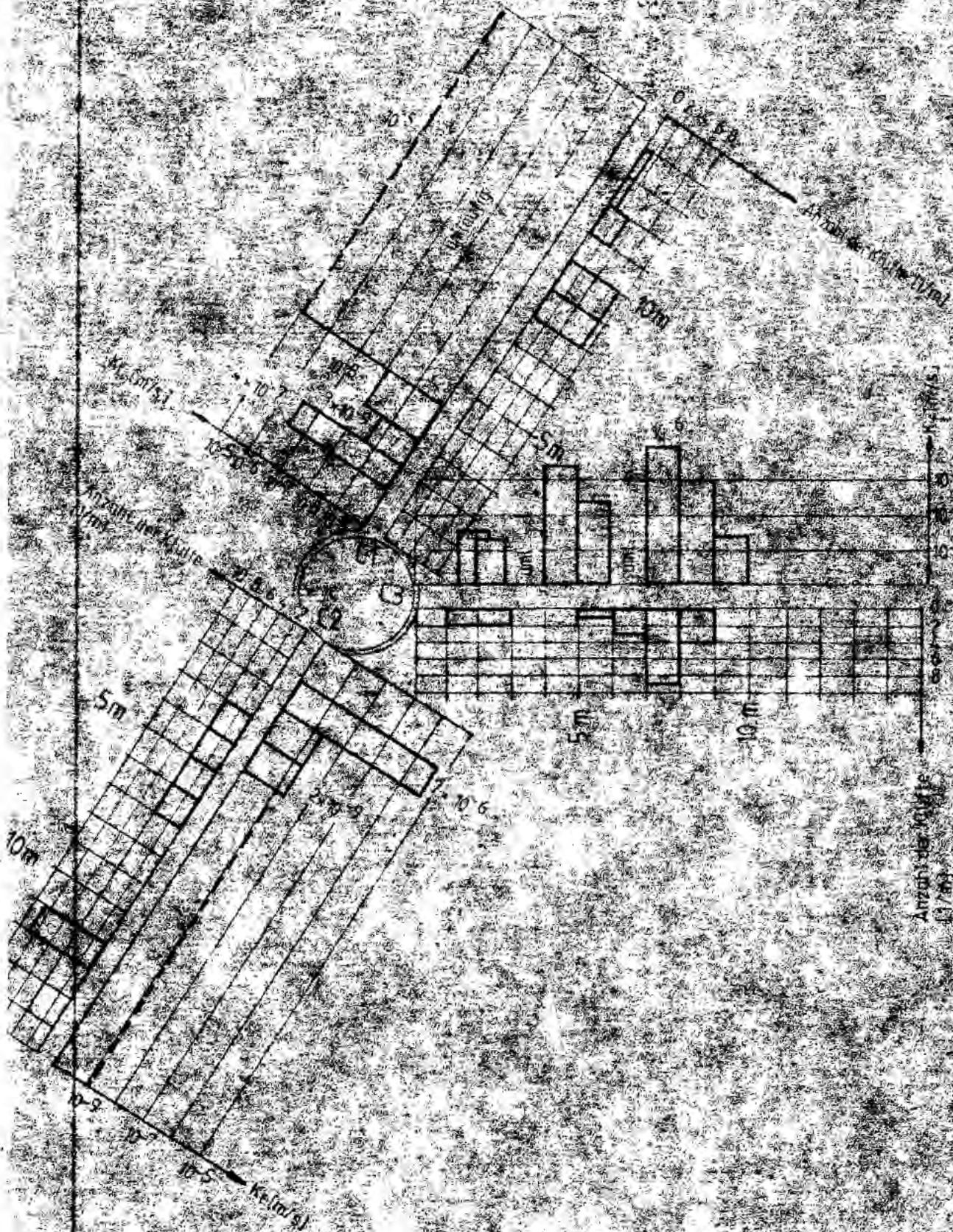


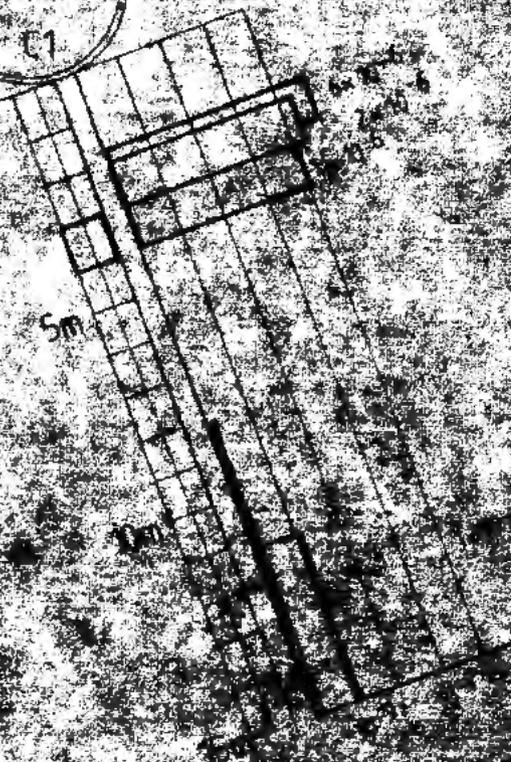
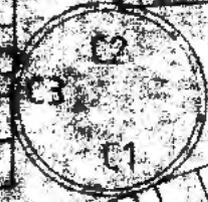
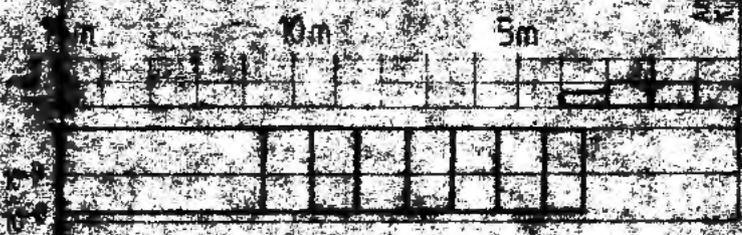
Schichtenfolge in den Schächten Konrad 1 und Konrad 2



- ¹⁾ Dreiaxialversuch
- ²⁾ Einaxialversuch
- ³⁾ gemeinsame Ermittlung von σ_{dg} für Mittel-, Unteralb, Apt
- ⁴⁾ Werte aus 2 Versuchsreihen

Zusammenstellung der für die Gesteine der Unterkreide ermittelten E-Moduln und Festigkeiten [3,4, 5,6]





Stratigraphie

Mineralogie in der Bohrung Konrad 101

Schacht Konrad 2

Konrad 101

Teufe = 0,0 m (90,3 mü.NN)

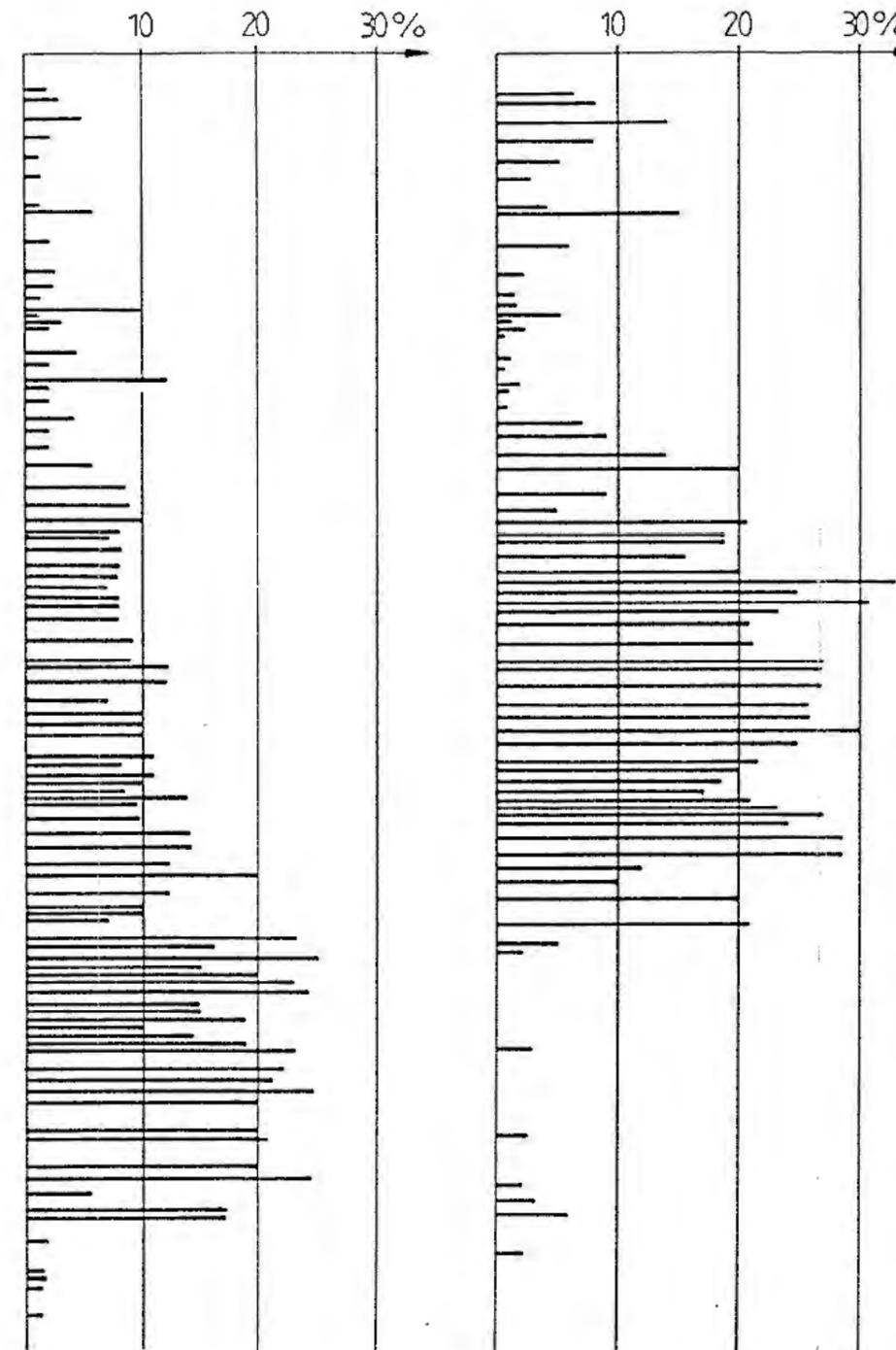
0,0 m (87,6 mü.NN)

| | | | |
|-------|---------------------------|-------|-------------|
| 36,0 | Quartär | 11,0 | Oberkreide |
| | Turon | | |
| 170,0 | | 164,0 | Unterkreide |
| | Cenoman | | |
| 245,0 | | 250,0 | |
| | Oberalb | | |
| 342,0 | | 345,0 | |
| | Mittelalb | | |
| 396,0 | | 389,0 | |
| | Unferalb Hilssandstein | 456,3 | |
| 469,0 | | 476,8 | |
| 470,5 | Apt | 506,0 | |
| | Barrême | 533,3 | |
| 501,5 | | 562,7 | |
| | Hauterive | 607,0 | |
| 578,0 | | 626,6 | |
| | Ma(m ungliedert) | | |
| 645,5 | | | |

ca. 500 m

Muskovit - Illit - Gehalt

Smektit - Gehalt



Stratigraphie

Mineralogie in der Bohrung Konrad 101

Schacht Konrad 2

Konrad 101

Quarz

Feldspat

Opal - CT

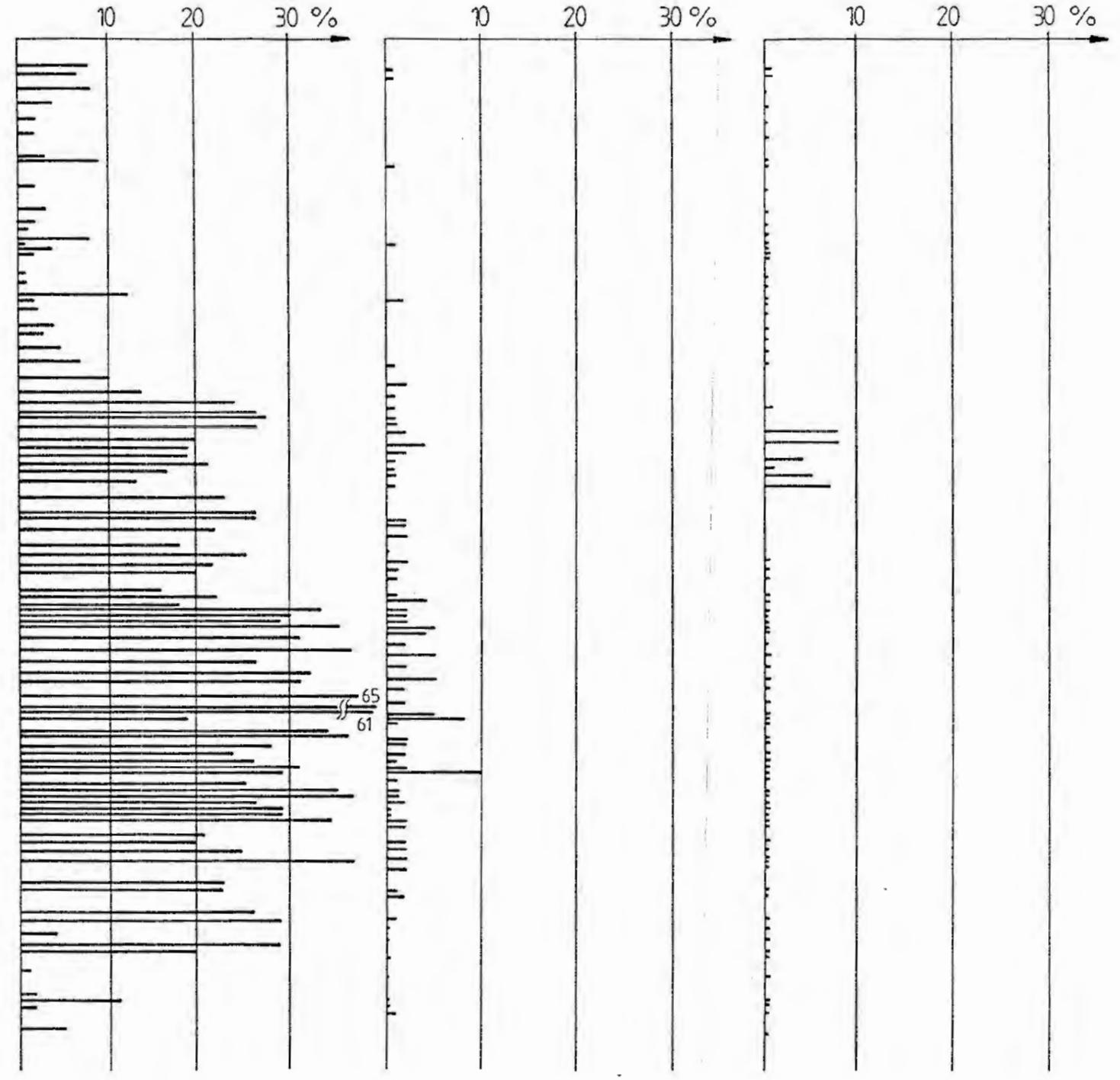
Teufe = 0,0 m (90,3 mü.NN)

0,0 m (87,6 mü.NN)

| | | |
|-------|---------------------|-------|
| 36,0 | Quartär | 11,0 |
| | Turon | |
| 170,0 | | 164,0 |
| | Cenoman | |
| 245,0 | | 250,0 |
| | Oberalb | |
| 342,0 | | 345,0 |
| | Mittelalb | |
| 396,0 | | 389,0 |
| | Unteralb | |
| 469,0 | Hilssandstein | 456,3 |
| 470,5 | Apt | 476,8 |
| 501,5 | | 506,0 |
| | Barrême | 533,3 |
| 578,0 | | 562,7 |
| | Hauterive | 607,0 |
| 645,5 | | 626,6 |
| | Malm (ungegliedert) | |

Oberkreide

Unterkreide



ca. 500m

Stratigraphie und Mineralogie im Bereich des Schachtes Konrad 2 und der Bohrung Konrad 101 [10]

StratigraphieMineralogie in der Bohrung Konrad 101

Schacht Konrad 2

Konrad 101

Teufe = 0,0 m (90,3 mü.NN)

0,0 m (87,6 mü.NN)

| | | |
|-------|---------------------|-------|
| 36,0 | Quartär | 11,0 |
| | Turon | |
| 170,0 | | 164,0 |
| | Cenoman | |
| 245,0 | | 250,0 |
| | Oberalb | |
| 342,0 | | 345,0 |
| | Mittelalb | |
| 396,0 | | 389,0 |
| | Unteralb | |
| 469,0 | Hilssandstein | 456,3 |
| 470,5 | Apt | 476,8 |
| 501,5 | | 506,0 |
| | Barrême | 533,3 |
| 578,0 | | 562,7 |
| | Hauterive | 607,0 |
| 645,5 | | 626,6 |
| | Malm (ungegliedert) | |

Oberkreide

Unterkreide

Kaolinit

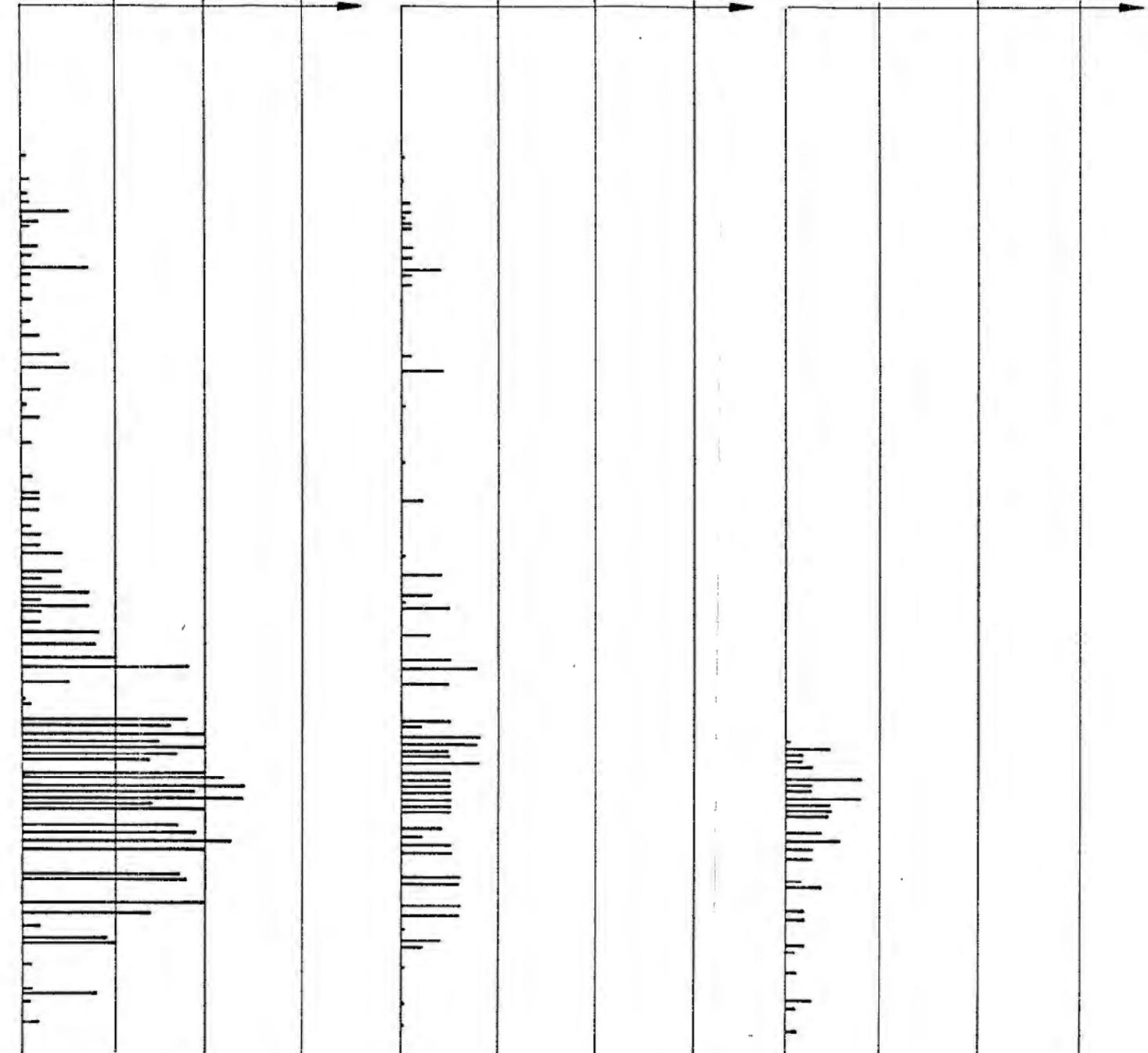
Chlorit

Pyrit

10 20 30%

10 20 30%

10 20 30%



ca. 500 m

Stratigraphie

Mineralogie in der Bohrung Konrad 101

Schacht Konrad 2

Konrad 101

Clinoptilolith

Apatit

amorphe Komponente

Teufe = 0,0 m (90,3 mü.NN)

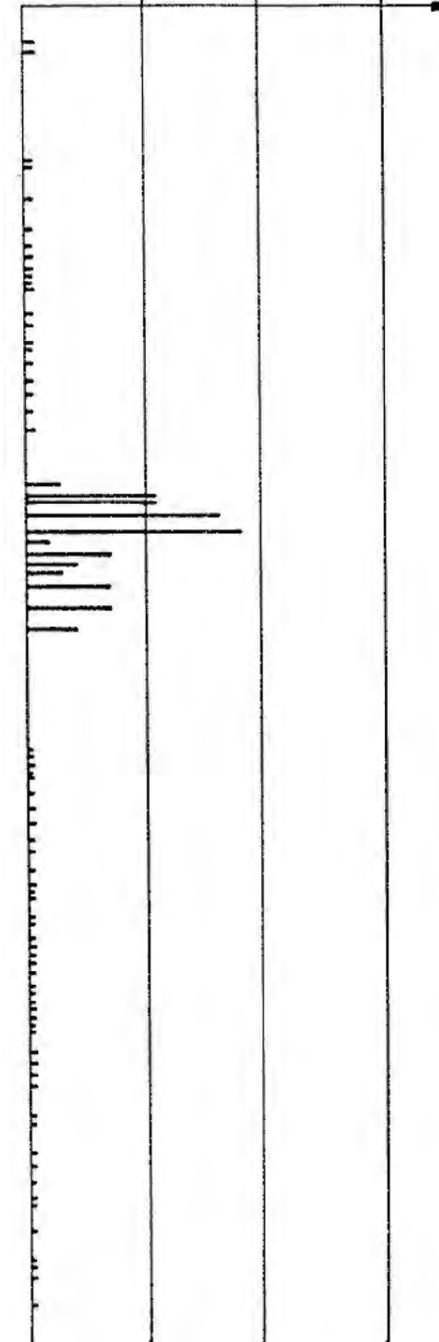
0,0 m (87,6 mü.NN)

| | | |
|-------|---------------------------|-------|
| 36,0 | Quartär | 11,0 |
| | Turon | |
| 170,0 | | 164,0 |
| | Cenoman | |
| 245,0 | | 250,0 |
| | Oberalb | |
| 342,0 | | 345,0 |
| | Mittelalb | |
| 396,0 | | 389,0 |
| | Unteralb Hilssandstein | |
| 469,0 | | 456,3 |
| 470,5 | Apt | 476,8 |
| 501,5 | | 506,0 |
| | Barrême | |
| 578,0 | | 562,7 |
| | Hauterive | |
| 645,5 | | 607,0 |
| | | 626,6 |
| | Ma(m (ungegliedert) | |

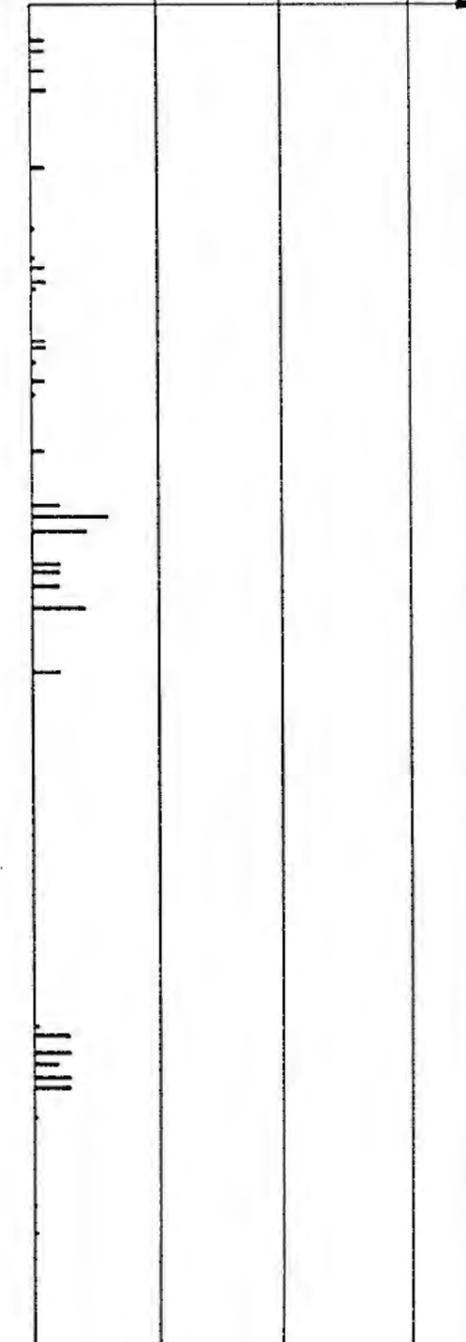
Oberkreide

Unterkreide

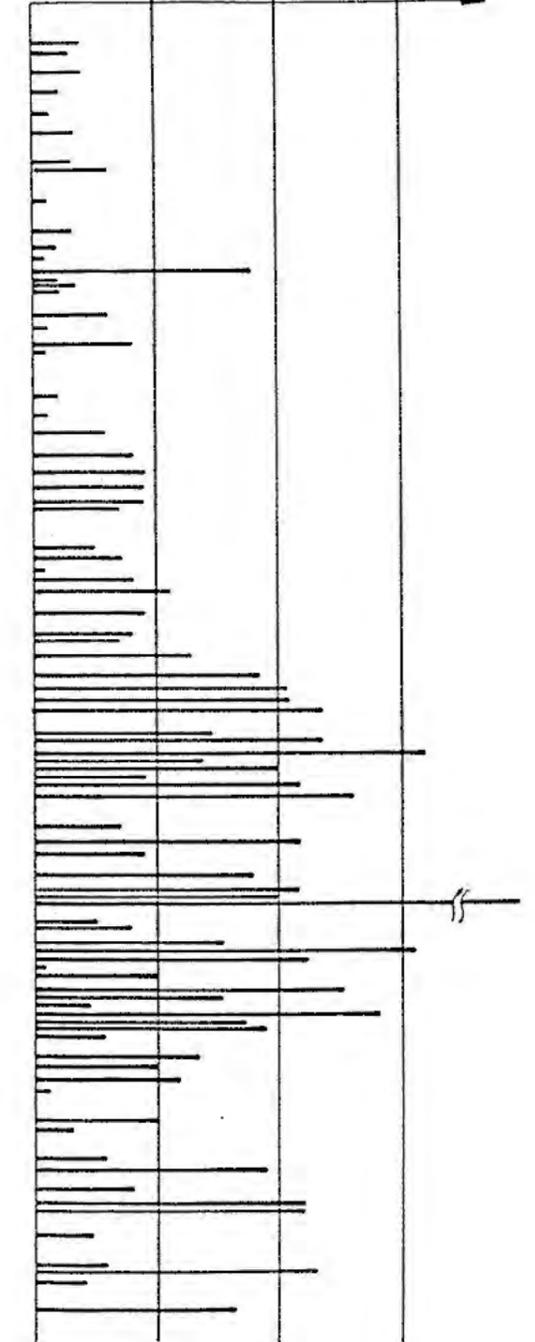
10 20 30 %



10 20 30 %



10 20 30 %



ca. 500 m

Stratigraphie

Mineralogie in der Bohrung Konrad 101

Schacht Konrad 2

Konrad 101

Teufe = 0,0 m (90,3 m ü. NN)

0,0 m (87,6 m ü. NN)

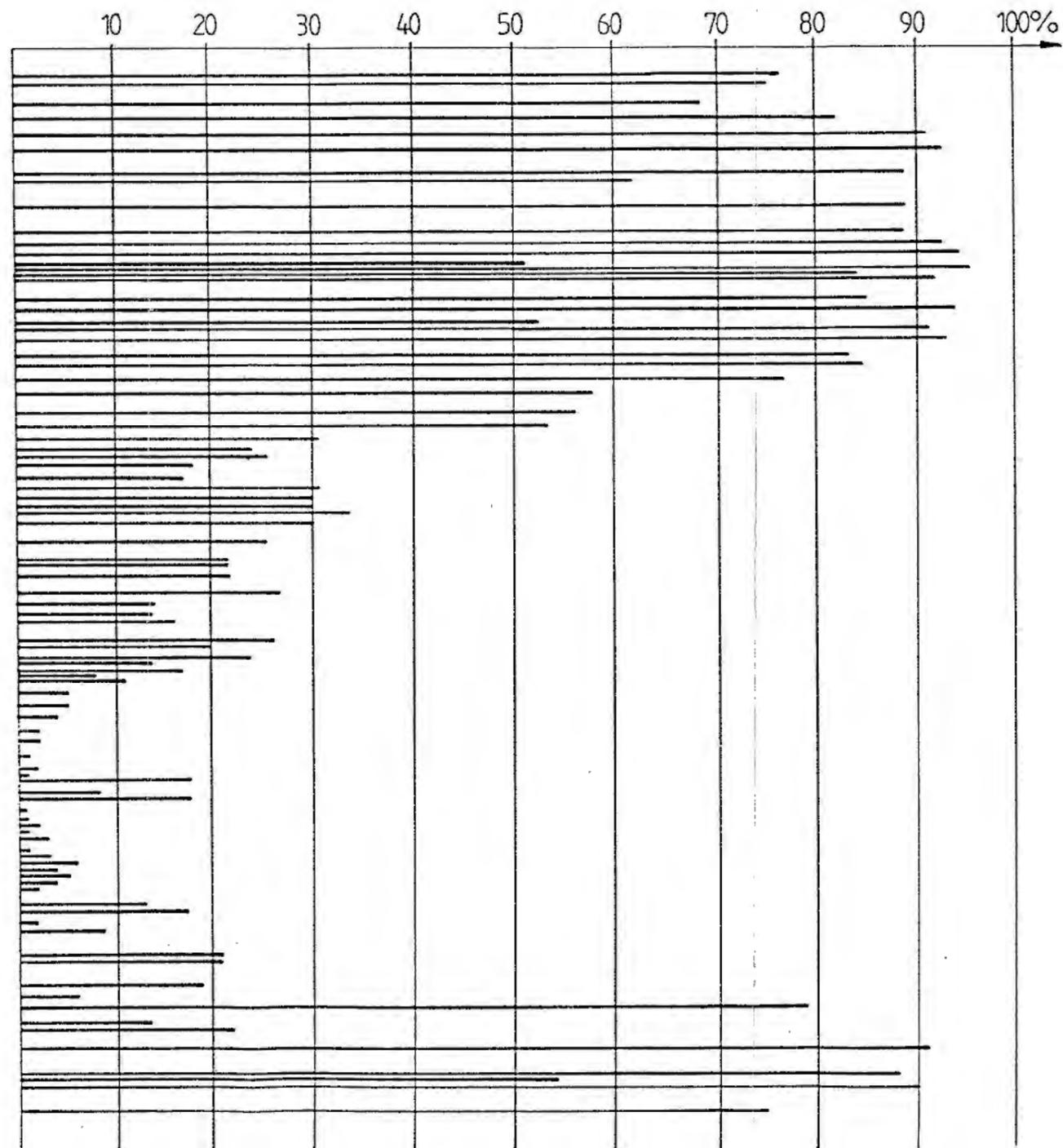
| | | |
|-------|---------------------------|-------|
| 36,0 | Quartär | 11,0 |
| | Turon | |
| 170,0 | | 164,0 |
| | Cenoman | |
| 245,0 | | 250,0 |
| | Oberalb | |
| 342,0 | | 345,0 |
| | Mittelalb | |
| 396,0 | | 389,0 |
| | Unteralb Hilssandstein | |
| 469,0 | | 456,3 |
| 470,5 | Apt | 476,8 |
| 501,5 | | 506,0 |
| | Barrême | |
| 578,0 | | 562,7 |
| | Hauterive | |
| 645,5 | | 607,0 |
| | | 626,6 |
| | Malm (ungegliedert) | |

Oberkreide

Unterkreide

ca. 500 m

Calcit



| Labor Nr. [-] | Bohrlochtiefe [m] | Hauptkomponenten | Nebenkompontenten | NK - Spuren ^{x)} | Spuren ^{x)} |
|------------------|------------------------|------------------|-------------------|---------------------------|----------------------|
| 72409 | bei 1.10 | Suchtit, Calcit | Quarz | Muskovit - Illit | Do, Ka, Chl, Fsp, Si |
| 72410 | 1.18 - 1.38 | " | " | " | " |
| 72411 | 3.44 - 3.67 | " | " | " | " |
| 72412 | 4.25 - 4.40 | " | " | " | " |
| 72413 | 6.16 - 6.28 | " | " | " | " |
| 72414 | 7.14 - 7.25 | " | " | " | " |
| 72415 | 8.78 - 9.00 | " | " | " | " |
| 72416 | 10.97 - 11.06 | " | " | " | " |
| 72417 | 12.80 - 13.00 | " | " | " | " |
| 72418 | 13.35 - 13.45 | " | " | " | " |
| 72419 | 14.78 - 14.86 | " | " | " | " |
| 72420 | 31.90 - 32.02 | " | " | " | " |
| 72421 | 35.18 - 35.28 | " | " | " | " |
| 72422 | 37.49 - 37.57 | " | " | " | " |
| 72423 | 39.90 - 40.00 | " | " | " | " |
| 72424 | 16.00 - 16.23 | " | " | " | " |
| 72425 | 17.24 - 17.40 | " | " | " | " |
| 72426 | bei 19.00 | " | " | " | " |
| 72427 | 20.58 - 20.73 | " | " | " | " |
| 72428 | 22.18 - 22.35 | " | " | " | " |
| 72429 | 24.40 - 24.60 | " | " | " | " |
| 72430 | 26.11 - 26.22 | " | " | " | " |
| 72431 | 27.68 - 27.82 | " | " | " | " |
| 72432 | 28.08 - 28.32 | " | " | " | " |
| 72433 | 30.78 - 31.00 | " | " | " | " |

^{x)} Do = Dolomit
 Ka = Kaalinit
 Chl = Chlorit
 Fsp = Feldspat
 Si = Siderit

Anmerkungen:

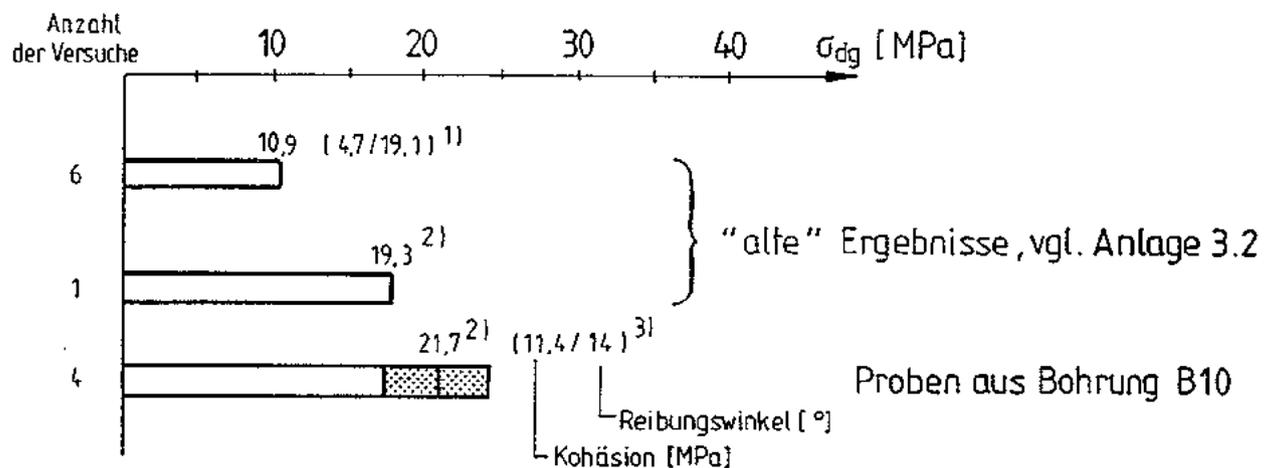
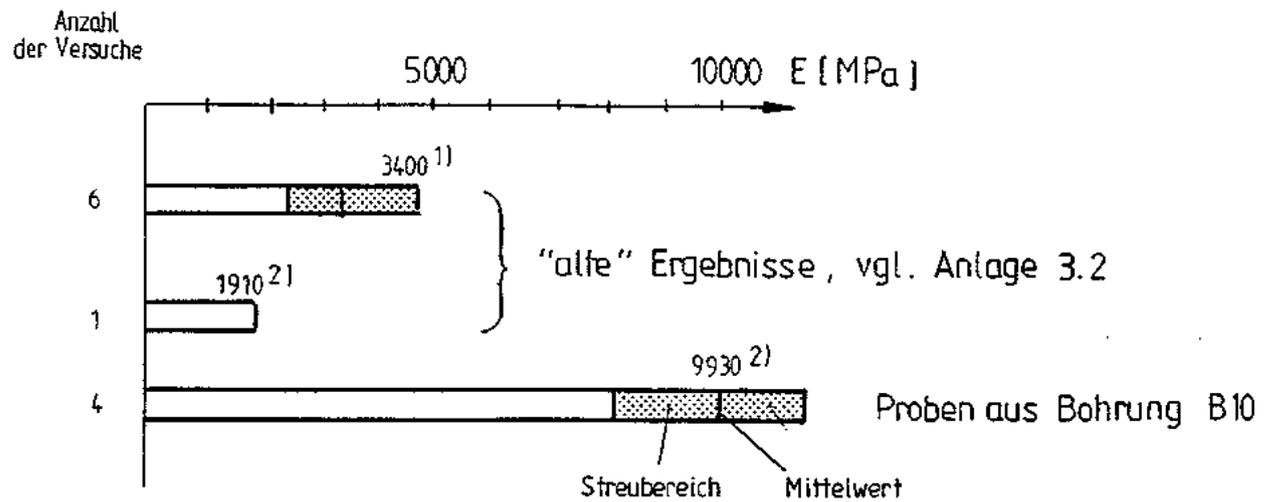
1. In einigen Proben ist ein Mixed-Layer nachweisbar
2. Halit ist mit der Diffraktomie nicht nachzuweisen

Zusammenfassung der röntgenographischen Ergebnisse für das Mittelalb; Proben aus dem Schacht 2,
Bohrung B11 (Teufe 343 m) [12]

| Labor-Nr. | Bohrlochtiefe [m] | Kalkgehalt [%] | Wasser- gehalt [%] | C - org. [%] | Komverteilung [%] | | | | | | |
|-----------|----------------------|-------------------|--------------------------|-----------------|----------------------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|
| | | | | | < 2 *) | - 6.3 *) | - 20 *) | - 63 *) | - 112 *) | - 200 *) | - 355 *) |
| 72409 | bei 1.10 | | 7.6 | | | | | | | | |
| 72410 | 1.18 - 1.38 | | 7.1 | | | | | | | | |
| 72411 | 3.44 - 3.67 | | 6.7 | | | | | | | | |
| 72412 | 4.25 - 4.40 | | 6.8 | | | | | | | | |
| 72413 | 6.16 - 6.28 | | 7.4 | | | | | | | | |
| 72414 | 7.14 - 7.25 | | 7.3 | | | | | | | | |
| 72415 | 8.78 - 9.00 | | 7.4 | | | | | | | | |
| 72416 | 10.97 - 11.06 | | 7.6 | | | | | | | | |
| 72417 | 12.80 - 13.00 | | 7.6 | | | | | | | | |
| 72418 | 13.35 - 13.45 | | 7.7 | | | | | | | | |
| 72419 | 14.78 - 14.86 | | 7.8 | | | | | | | | |
| 72420 | 31.90 - 32.02 | | 8.0 | | | | | | | | |
| 72421 | 35.18 - 35.28 | | 8.4 | | | | | | | | |
| 72422 | 37.49 - 37.57 | | 8.3 | | | | | | | | |
| 72423 | 39.90 - 40.00 | | 7.6 | | | | | | | | |
| 72424 | 16.00 - 16.23 | | 7.5 | | | | | | | | |
| 72425 | 17.24 - 17.40 | | 7.3 | | | | | | | | |
| 72426 | bei 19.00 | | 6.9 | | | | | | | | |
| 72427 | 20.58 - 20.73 | | 7.1 | | | | | | | | |
| 72428 | 22.18 - 22.35 | | 7.6 | | | | | | | | |
| 72429 | 24.40 - 24.60 | | 7.6 | | | | | | | | |
| 72430 | 26.11 - 26.22 | | 7.6 | | | | | | | | |
| 72431 | 27.68 - 27.82 | | 7.6 | | | | | | | | |
| 72432 | 28.08 - 28.32 | | 7.5 | | | | | | | | |
| 72433 | 30.78 - 31.00 | | 7.7 | | | | | | | | |

*) $\times 10^{-3}$ [mm]

Zusammenfassung der Analyseergebnisse für das Mittelalb, Proben aus dem Schacht 2,
Bohrung B11 (Teufe 343m) [12]



¹⁾ Dreiaxialer Druckversuch

²⁾ Einaxialer Druckversuch

³⁾ Dreiaxialer Druckversuch
2 Serien à 3 Versuche

Die Werte in Klammern geben die Kohäsion [MPa]
und die Reibungswinkel [°] an

E-Moduln und Festigkeiten für das Barrême

| Bohrung | Bohrmeter | Proben - Nr. | Wasser 2) | Probeabmessungen | | Dichte vor dem Versuch | Wassergehalt vor dem Versuch | Druckspannung | Quell - dehnung | Quellzeit | Versuchsergebnis in Anlage |
|--------------------|--------------|--------------|-----------|------------------|------|------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------|-----------|----------------------------|
| | | | | l_0 | d | | | | | | |
| - | (m) | - | - | [cm] | [cm] | [g/cm ³] | [%] | [kN/m ²] | [%] | [Tage] | - |
| B 10 ¹¹ | 25,15- 25,30 | 1138. 1 | A | 1,90 | 6,99 | 2,38 | 0,058 | 5,0 | | | |
| | | 1138. 2 | B | 1,88 | 6,99 | 2,39 | | | | | |
| | | 1138. 3 | C | 1,87 | 6,99 | 2,38 | | | | | |
| | 21,05 21,20 | 1141. 1 | A | 1,91 | 6,98 | 2,37 | 0,062 | 5,0 | | | |
| | | 1141. 2 | B | 1,87 | 6,99 | 2,35 | | | | | |
| | 21,20- 21,36 | 1114 | C | 1,87 | 6,97 | 2,37 | 0,052 | 5,0 | | | |
| | | | | | | | | | | | |

Anmerkungen :

- 1) 544m - Sohle
- 2) A = dest. Wasser
- B = Wasser aus Schacht 1 (Ort 300)
- C = Wasser aus Schacht 2 (Hils)
- 3) Belastung II Schichtung : Proben - Nr. 1138
- Belastung I Schichtung : Proben - Nr. 1141
- Proben - Nr. 1114

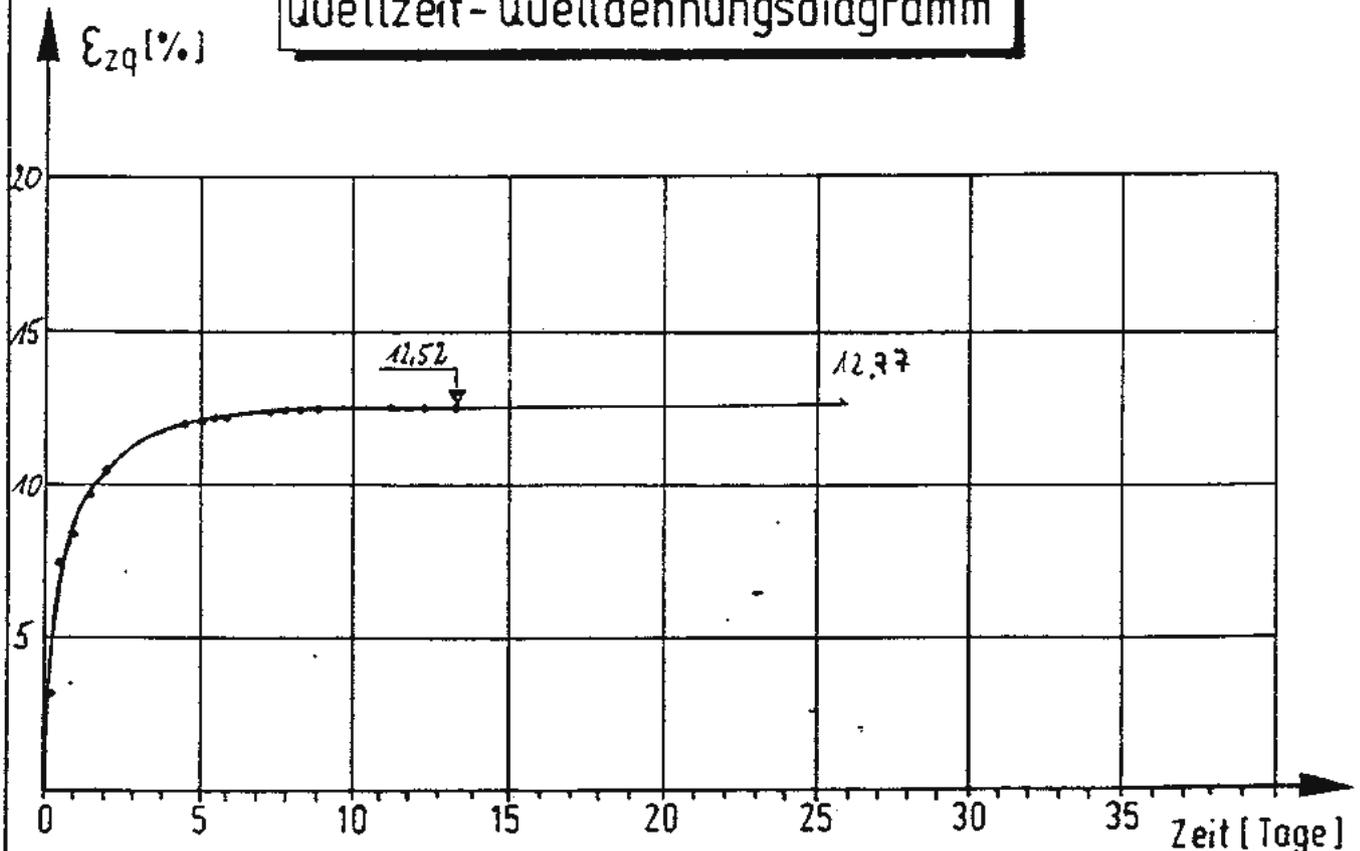
Zusammenstellung der Ergebnisse der Quellhebungsversuche

Schachtanlage Konrad
Schachtverschluss

Anlage 3.13
Dez. 1989

| | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------------|--------------------|
| Proben-Nr | | | 1138-1 |
| Bohrung | | | 810, 544 m - Sohle |
| Bohrmeter | | [m] | 25,15 - 25,30 |
| Gesteinsart | | | Tonstein |
| Belastungsrichtung | | | II Schichtung |
| Wasser | | | Aquacelst |
| Dichte vor dem Versuch | ρ | [g/cm ³] | 2,38 |
| Wassergehalt vor dem Versuch | w | [1] | 0,058 / |
| Dichte nach dem Versuch | ρ | [g/cm ³] | |
| Wassergehalt nach dem Versuch | w | [1] | |
| Auflast | σ | [kN/m ²] | 5,0 |
| Quelldehnung | $\epsilon_{zq,0}$ | [%] | 12,77 |
| Quellzeit | t_q | [Tage] | 26 |

Quellzeit- Quelldehnungsdiagramm



RWTH
AACHEN

PROJEKT KONRAD
Quellhebungsversuch
Proben-Nr. 1138-1

Anlage

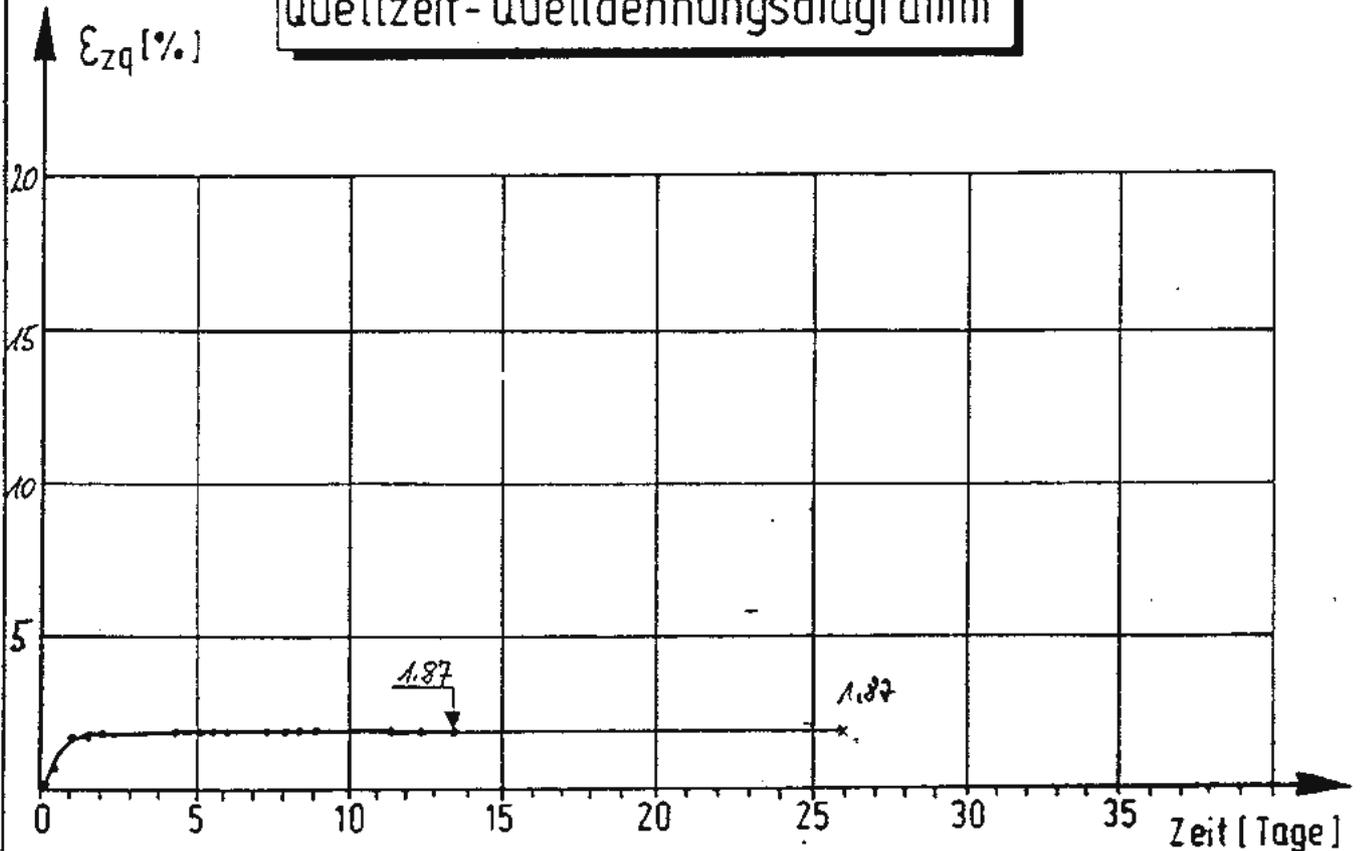
3.14

Maßstab:

Datum: 8.11

| | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------------|------------------|
| Proben-Nr | | | A138-2 |
| Bohrung | | | B10, 544 m-Sohle |
| Bohrmeter | | [m] | 25.15 - 25.30 |
| Gesteinsart | | | Tonstein |
| Belastungsrichtung | | | II Schichtung |
| Wasser | | | Ort 300 |
| Dichte vor dem Versuch | ρ | [g/cm ³] | 2.39 |
| Wassergehalt vor dem Versuch | w | [%] | 0.058 / |
| Dichte nach dem Versuch | ρ | [g/cm ³] | |
| Wassergehalt nach dem Versuch | w | [%] | |
| Auflast | σ | [kN/m ²] | 5.0 |
| Quelldehnung | $\epsilon_{zq,0}$ | [%] | 1.87 |
| Quellzeit | t_q | [Tage] | 26 |

Quellzeit- Quelldehnungsdiagramm



RWTH
AACHEN

PROJEKT KONRAD
Quellhebungsversuch

Proben-Nr. A138-2

Anlage

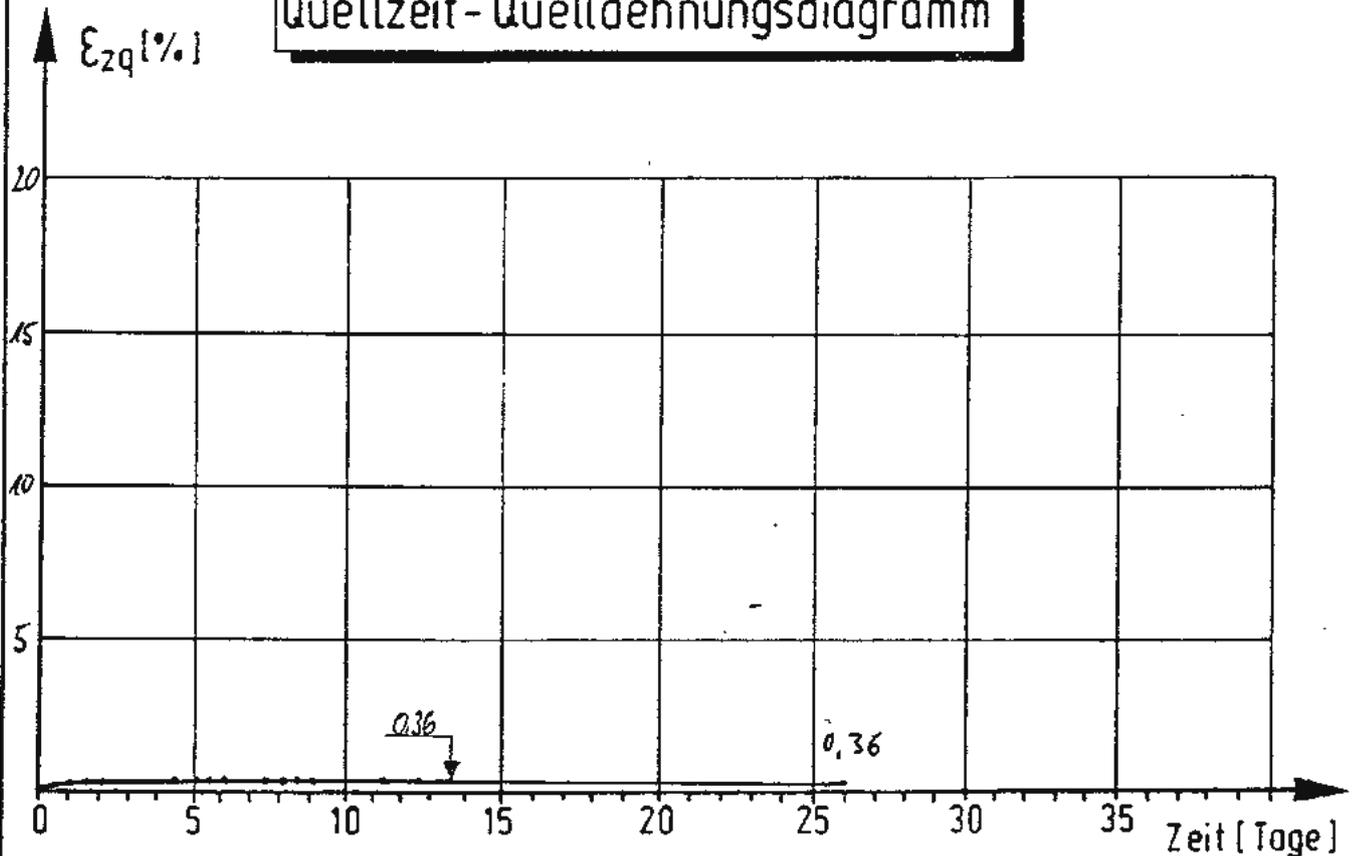
3.15

Maßstab:

Datum: 8.11

| | | | |
|-------------------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------------------------------|
| Proben-Nr. | | | 1138-3 |
| Bohrung Bohrmeter Gesteinsart | | [m] | 810, 544 m-Sohle 25,15 - 25,30 Tonstein |
| Belastungsrichtung Wasser | | | Schichtung Hils |
| Dichte vor dem Versuch | ρ | [g/cm ³] | 2,38 |
| Wassergehalt vor dem Versuch | w | [%] | 0,058 / |
| Dichte nach dem Versuch | ρ | [g/cm ³] | |
| Wassergehalt nach dem Versuch | w | [%] | |
| Auflast | σ | [kN/m ²] | 5,0 |
| Quelldehnung | $\epsilon_{2q,0}$ | [%] | 0,36 |
| Quellzeit | t_q | [Tage] | 26 |

Quellzeit- Quelldehnungsdiagramm



PROJEKT KOHRAD
 Quellhebungsversuch
 Proben-Nr. 1138-3

Anlage

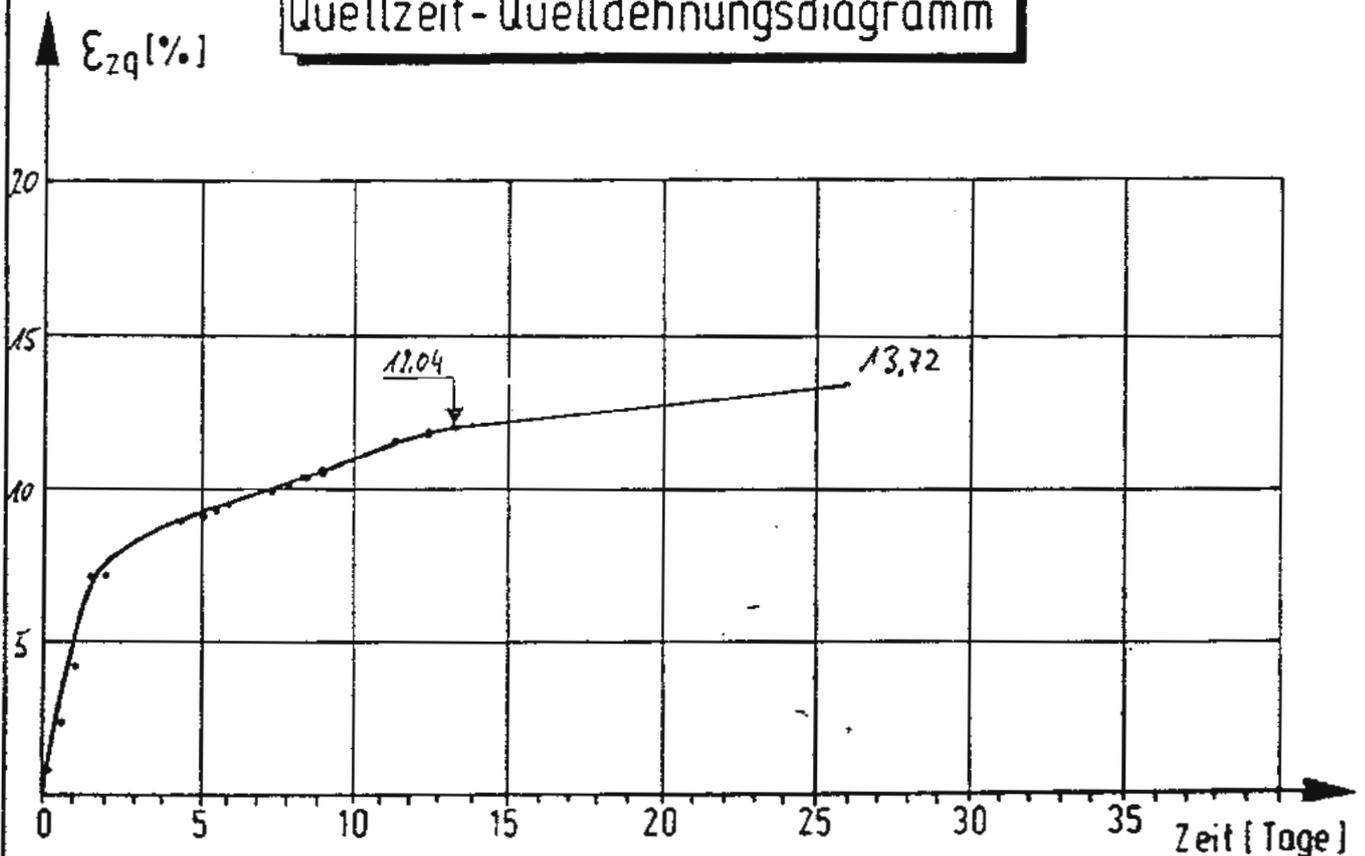
3.16

Maßstab:

Datum: 8.11

| | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------------|------------------|
| Proben-Nr. | | | 1141-1 |
| Bohrung | | [m] | B10, 544 m-Sohle |
| Bohrmeter | | | 21.05 - 21.20 |
| Gesteinsart | | | Tonstein |
| Belastungsrichtung | | | ⊥ Schichtung |
| Wasser | | | Regenwasser |
| Dichte vor dem Versuch | ρ | [g/cm ³] | 2.37 |
| Wassergehalt vor dem Versuch | w | [%] | 0.062 |
| Dichte nach dem Versuch | ρ | [g/cm ³] | |
| Wassergehalt nach dem Versuch | w | [%] | |
| Auflast | σ | [kN/m ²] | 5.0 |
| Quelldehnung | $\epsilon_{zq,0}$ | [%] | 13.72 |
| Quellzeit | t_q | [Tage] | 26 |

Quellzeit - Quelldehnungsdiagramm



RWTH
AACHEN

PROJEKT KONRAD
Quellhebungsversuch
Proben-Nr. 1141-1

Anlage

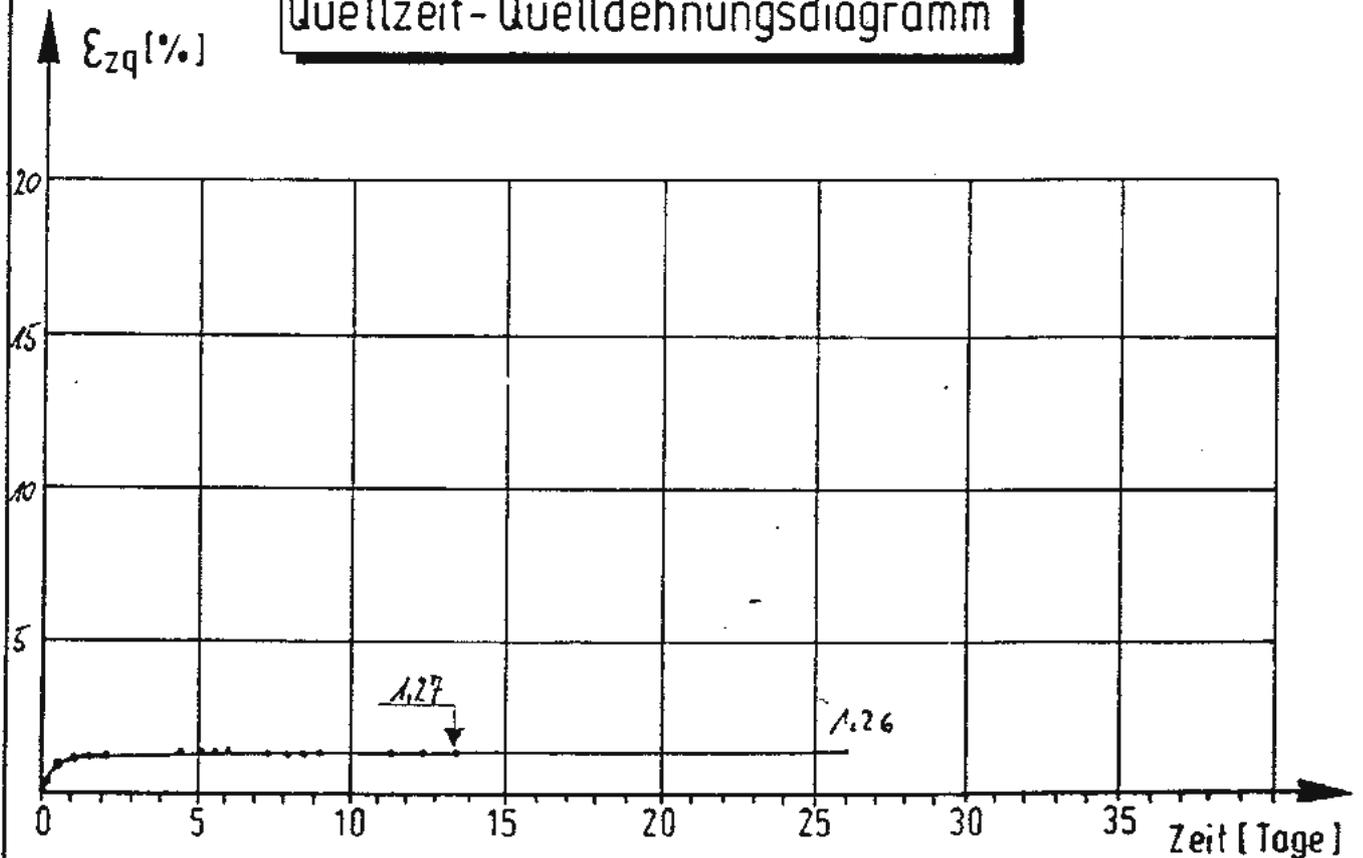
3.17

Methoden:

Datum: 8.11

| | | | |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Proben-Nr. | | | 1141-2 |
| Bohrung Bohrmeter Gesteinsart | | [m] | BA0, 544 m-Sohle 21.05 - 21.20 Tonstein |
| Belastungsrichtung Wasser | | | ⊥ Schichtung Ort 300 |
| Dichte vor dem Versuch Wassergehalt vor dem Versuch | ρ w | [g/cm ³] [] | 2.35 0.062 / |
| Dichte nach dem Versuch Wassergehalt nach dem Versuch | ρ w | [g/cm ³] [] | |
| Auflast Quelldehnung Quellzeit | σ $\epsilon_{zq,0}$ t_q | [kN/m ²] [%] [Tage] | 5.0 1.26 26 |

Quellzeit - Quelldehnungsdiagramm



RWTH
AACHEN

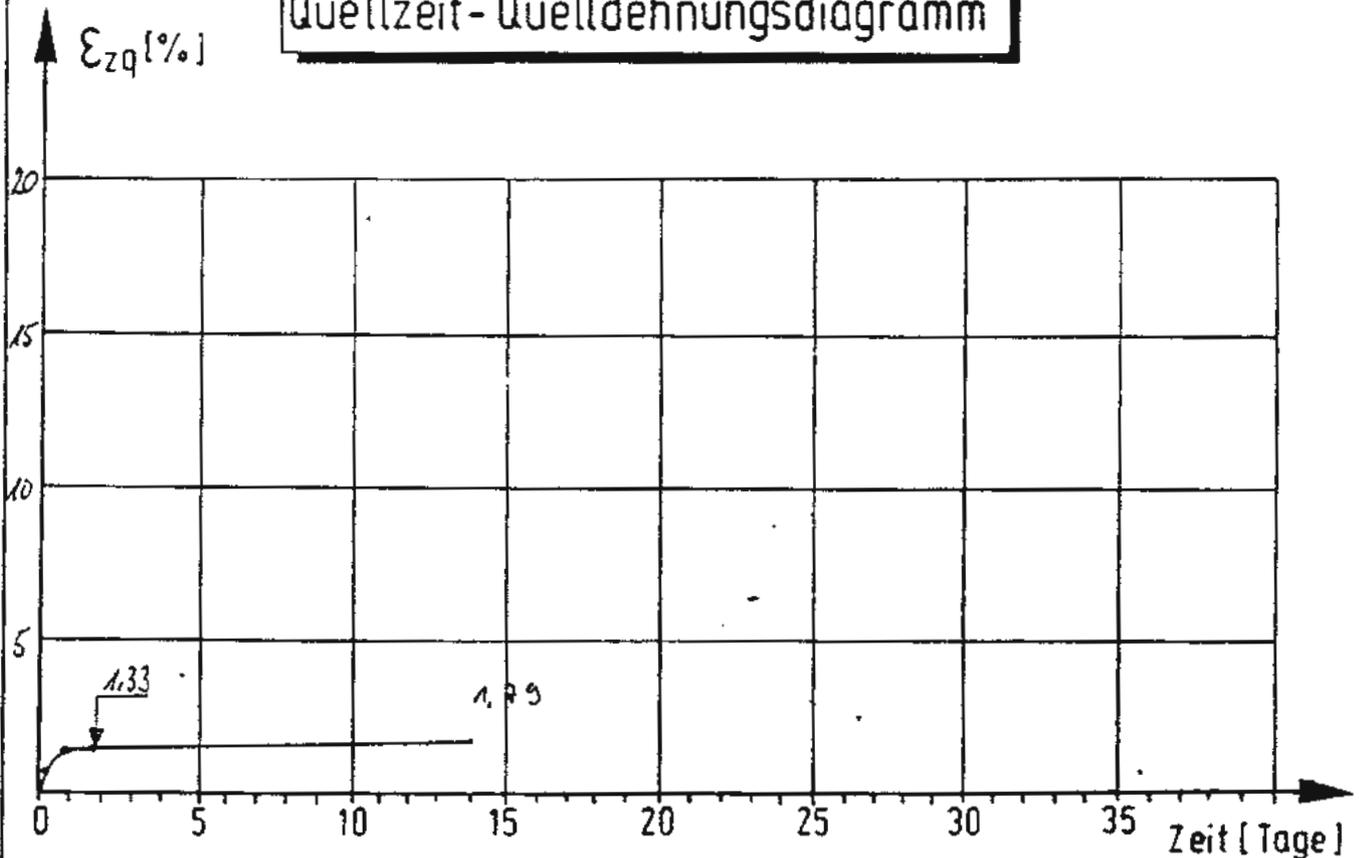
PROJEKT KONRAD
Quellhebungsversuch
Proben-Nr. 1141-2

Anlage

3.18

| | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------------|------------------|
| Proben-Nr. | | | 1114 |
| Bohrung | | | Ø10, 544 m-Sohle |
| Bohrmeter | | [m] | 21,20 - 21,36 |
| Gesteinsart | | | Tonstein |
| Belastungsrichtung | | | ⊥ Schichtung |
| Wasser | | | Hils |
| Dichte vor dem Versuch | ρ | [g/cm ³] | 2,37 |
| Wassergehalt vor dem Versuch | w | [1] | 0,0521 |
| Dichte nach dem Versuch | ρ | [g/cm ³] | |
| Wassergehalt nach dem Versuch | w | [1] | |
| Auflast | σ | [kN/m ²] | 5,0 |
| Quelldehnung | $\epsilon_{zq,0}$ | [%] | 1,79 |
| Quellzeit | t_q | [Tage] | 14 |

Quellzeit- Quelldehnungsdiagramm



RWTH
AACHEN

PROJEKT KOHRAD
Quellhebungsversuch
Proben-Nr. 1114

Anlage

3.19

Herstellung:

Datum: 2.11

| Lab.-Nr. [-] | Bohrlochtiefe [m] | Hauptkomponenten | Nebenkompontenten ^{x)} | Nk. - Spuren ^{x)} | Spuren ^{x)} |
|-----------------|----------------------|------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 72332 | 1.05 - 1.23 | Quarz | Kaolinit, M-I | Calcit, Py | Halit, Fsp, Do |
| 72333 | 2.76 - 2.88 | Quarz | Kaolinit, Calcit, M-I | Py | Halit, Fsp, Do |
| 72334 | 8.62 - 8.70 | Quarz | Kaolinit | M-I, Py | Calcit, Halit, Fsp, Do |
| 72335 | 11.15 - 11.30 | Quarz | Kaolinit, Calcit | M-I, Halit | Py, Fsp, Do |
| 72336 | 12.50 - 12.60 | Quarz | Kaolinit, Calcit | M-I | Py, Halit, Fsp, Do |
| 72337 | 13.30 - 13.36 | Quarz | Kaolinit, Calcit | M-I, Halit | Py, Fsp, Do |
| 72338 | 15.55 - 15.70 | Quarz | Calcit | Kaolinit, Halit | M-I, Py, Fsp, Do |
| 72339 | 16.40 - 16.50 | Quarz | Kaolinit | Calcit, M-I | Py, Halit, Fsp, Do |
| 72340 | 17.90 - 17.97 | Quarz | Calcit | Kaolinit, Halit | M-I, Py, Fsp, Do |
| 72341 | 19.56 - 19.66 | Quarz | Kaolinit | Py | Calcit, M-I, Halit, Fsp, Do |
| 72342 | 21.36 - 21.46 | Quarz | Kaolinit | Py | Calcit, M-I, Halit, Fsp, Do |
| 72399 | 22.43 - 22.53 | Quarz | Kaolinit | M-I, Py | Calcit, Halit, Fsp, Do |
| 72400 | 24.49 - 24.63 | Quarz | Kaolinit, M-I | Py | Calcit, Halit, Fsp, Do |
| 72390 | ca. 14.60 | Quarz | Kaolinit | Calcit, M-I, Py | Halit, Fsp, Do |
| 72391 | ca. 16.20 | Quarz | Kaolinit | M-I, Py | Calcit, Halit, Fsp, Do |
| 72392 | ca. 17.00 | Quarz | Kaolinit | M-I, Py | Calcit, Halit, Fsp, Do |
| 72393 | ca. 18.30 | Quarz | Kaolinit | Calcit, M-I, Py | Halit, Fsp, Do |
| 72394 | 20.40 - 20.50 | Quarz | Kaolinit, Calcit | M-I | Py, Halit, Fsp, Do |
| 72395 | 22.15 - 22.30 | Quarz | Kaolinit, Calcit | M-I, Py | Halit, Fsp, Do |
| 72396 | 23.50 - 23.60 | Quarz | Kaolinit, M-I | Calcit, Py | Halit, Fsp, Do |
| 72397 | 24.50 - 24.60 | Quarz | Kaolinit, Calcit, M-I | Py | Halit, Fsp, Do |
| 72398 | 25.05 - 25.15 | Quarz | Kaolinit, Calcit | M-I, Py | Halit, Fsp, Do |
| 72401 | 26.01 - 26.14 | Quarz | Kaolinit, Calcit, M-I | Py, | Halit, Fsp, Do |
| 72402 | 26.90 - 26.97 | Quarz | Kaolinit, Calcit, M-I | Py | Halit, Fsp, Do |
| 72403 | 28.05 - 28.17 | Quarz | Kaolinit, M-I | Calcit, Py | Halit, Fsp, Do |
| 72404 | 29.64 - 29.75 | Quarz | Kaolinit, M-I | Calcit, Py | Halit, Fsp, Do |
| 72405 | 31.35 - 31.40 | Quarz | Kaolinit, M-I | Calcit, Py, Do | Halit, Fsp, Do |
| 72406 | ca. 31.55 | Quarz | Kaolinit, M-I | Calcit, Py | Halit, Fsp, Do |
| 72407 | 33.17 - 33.30 | Quarz | Kaolinit, M-I | Py | Calcit, Halit, Fsp, Do |
| 72408 | 34.64 - 34.77 | Quarz | Kaolinit, M-I | Py | Calcit, Halit, Fsp, Do |

x) M-I = Muskovit-Illit
 Py = Pyrit
 Do = Dolomit
 Fsp = Feldspat

Anmerkungen:

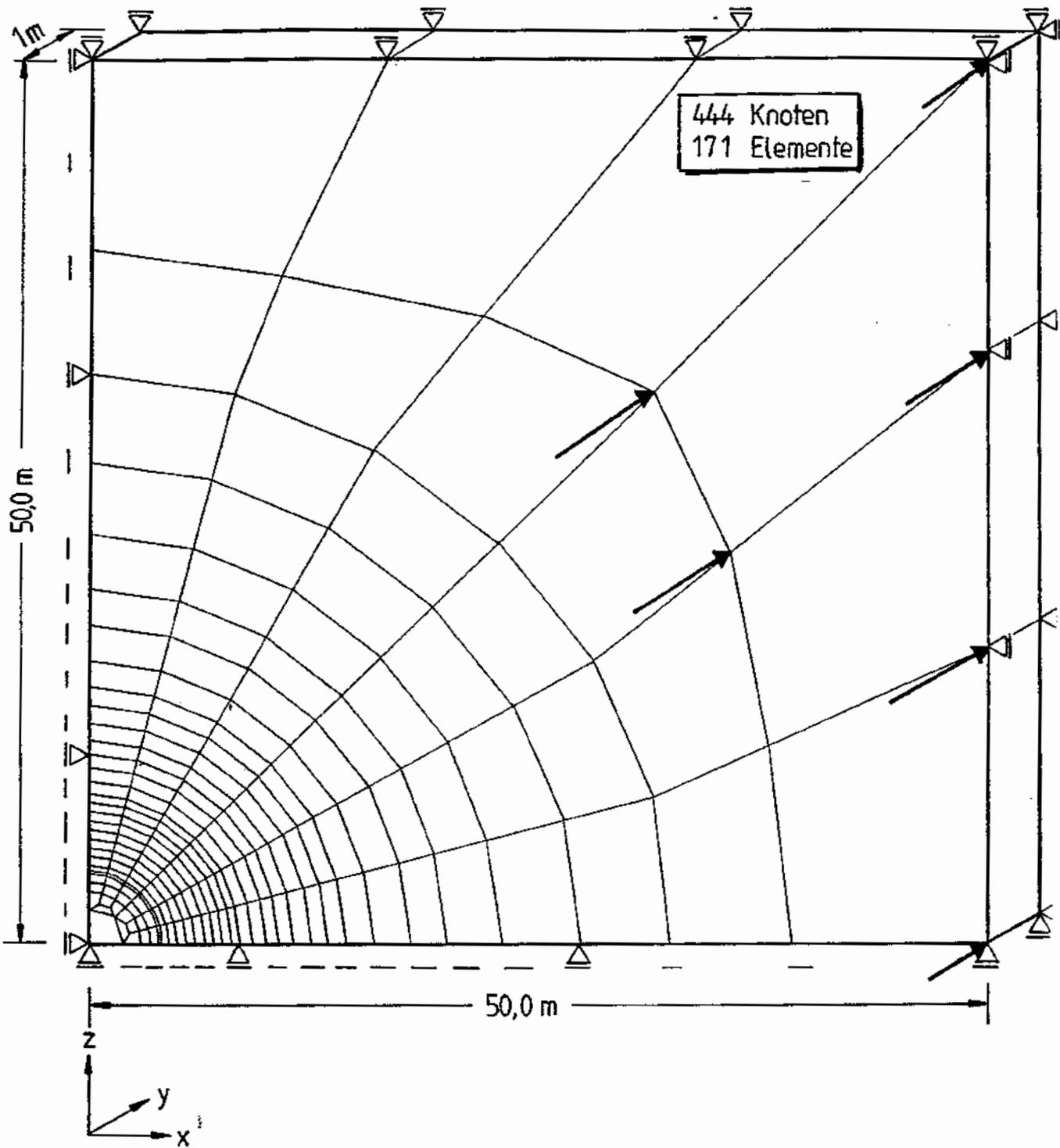
1. In saemtlichen Proben tritt zusaetzlich Chlorit und ein "Smektit-Illit" in Spuren auf.
2. Vereinzelt koennen Spuren von Mix-Layer nachgewiesen werden.
3. Siderit liegt an der Nachweisgrenze.

Zusammenfassung der röntgenographischen Ergebnisse für das Barrême, Proben aus dem Schacht 2,
 Bohrung B10 (541 m Teufe) [12]

| Lab.-Nr. [-] | Bohrlochtiefe [m] | Kalkgehalt [%] | Wasser- gehalt [%] | C-org. [%] | Kornverteilung [%] | | | | | | |
|-----------------|----------------------|-------------------|--------------------------|---------------|-----------------------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|
| | | | | | <2 *) | -6.3 *) | -20 *) | -63 *) | -112 *) | -200 *) | -355 *) |
| 72332 | 1.05 - 1.23 | 6.2 | 6.8 | 3.39 | 49.2 | 21.5 | 22.9 | 6.2 | 0.2 | -.- | -.- |
| 72333 | 2.76 - 2.88 | 9.4 | 6.5 | ---- | 49.8 | 21.6 | 21.6 | 6.7 | 0.4 | -.- | -.- |
| 72334 | 8.62 - 8.70 | 3.6 | 6.9 | ---- | 52.3 | 19.8 | 21.4 | 6.2 | 0.3 | -.- | -.- |
| 72335 | 11.15 - 11.30 | 16.6 | 5.8 | ---- | 55.4 | 15.5 | 20.8 | 7.2 | 1.1 | -.- | -.- |
| 72336 | 12.50 - 12.60 | 11.7 | 6.5 | 1.70 | 54.4 | 16.5 | 21.6 | 6.8 | 0.7 | -.- | -.- |
| 72337 | 13.30 - 13.36 | 22.2 | 5.4 | ---- | 53.2 | 16.9 | 19.3 | 8.9 | 1.4 | -.- | -.- |
| 72338 | 15.55 - 15.70 | 22.1 | 5.8 | ---- | 55.1 | 12.4 | 20.9 | 10.7 | 1.0 | -.- | -.- |
| 72339 | 16.40 - 16.50 | 8.9 | 6.1 | ---- | 52.6 | 14.9 | 19.2 | 12.6 | 0.7 | -.- | -.- |
| 72340 | 17.90 - 17.97 | 20.4 | 5.2 | 1.05 | 52.2 | 14.9 | 20.7 | 10.7 | 1.4 | -.- | -.- |
| 72341 | 19.56 - 19.66 | 3.5 | 6.4 | ---- | 54.4 | 17.1 | 17.2 | 10.1 | 1.2 | -.- | -.- |
| 72342 | 21.36 - 21.46 | 3.6 | 6.9 | ---- | 51.9 | 20.1 | 20.0 | 7.0 | 1.1 | -.- | -.- |
| 72399 | 22.43 - 22.53 | | 6.6 | | | | | | | | |
| 72400 | 24.49 - 24.63 | | 6.4 | | | | | | | | |
| 72390 | ca. 14.60 | | 6.8 | | | | | | | | |
| 72391 | ca. 16.20 | | 6.4 | | | | | | | | |
| 72392 | ca. 17.00 | | 5.9 | | | | | | | | |
| 72393 | ca. 18.30 | | 6.0 | | | | | | | | |
| 72394 | 20.40 - 20.50 | | 6.0 | | | | | | | | |
| 72395 | 22.15 - 22.30 | | 6.2 | | | | | | | | |
| 72396 | 23.50 - 23.60 | | 6.3 | | | | | | | | |
| 72397 | 24.50 - 24.60 | | 6.3 | | | | | | | | |
| 72398 | 25.05 - 25.15 | | 6.5 | | | | | | | | |
| 72401 | 26.01 - 26.14 | | 6.6 | | | | | | | | |
| 72402 | 26.90 - 26.97 | | 6.5 | | | | | | | | |
| 72403 | 28.05 - 28.17 | | 6.0 | | | | | | | | |
| 72404 | 29.64 - 29.75 | | 6.1 | | | | | | | | |
| 72405 | 31.35 - 31.40 | | 5.8 | | | | | | | | |
| 72406 | ca. 31.55 | | 5.9 | | | | | | | | |
| 72407 | 33.17 - 33.30 | | 5.6 | | | | | | | | |
| 72408 | 34.64 - 34.77 | | 6.2 | | | | | | | | |

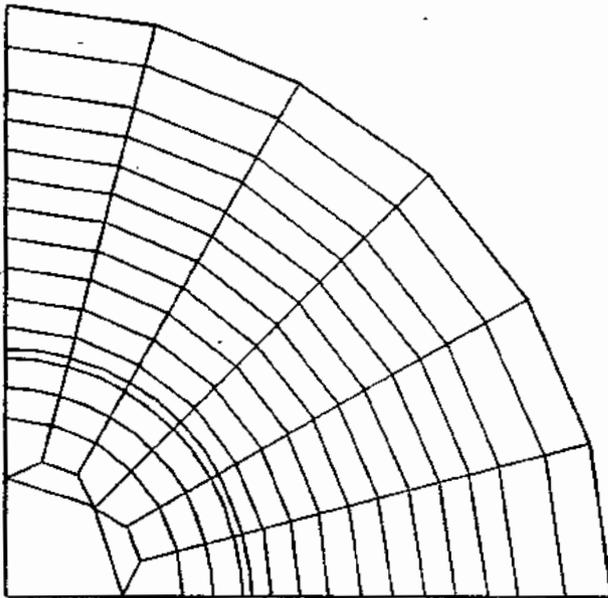
*) $\times 10^{-3}$ [mm]

Zusammenfassung der Analyseergebnisse für das Barrême, Proben aus Schacht 2,
Bohrung B10 (Teufe 541m) [12]

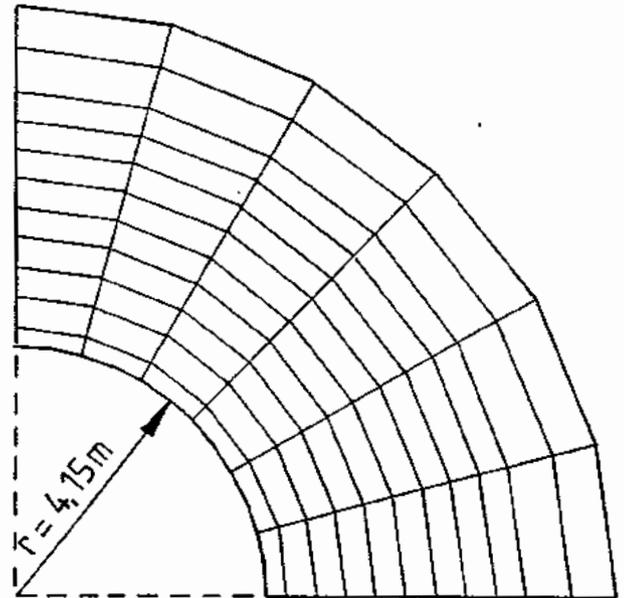


Elementennetz

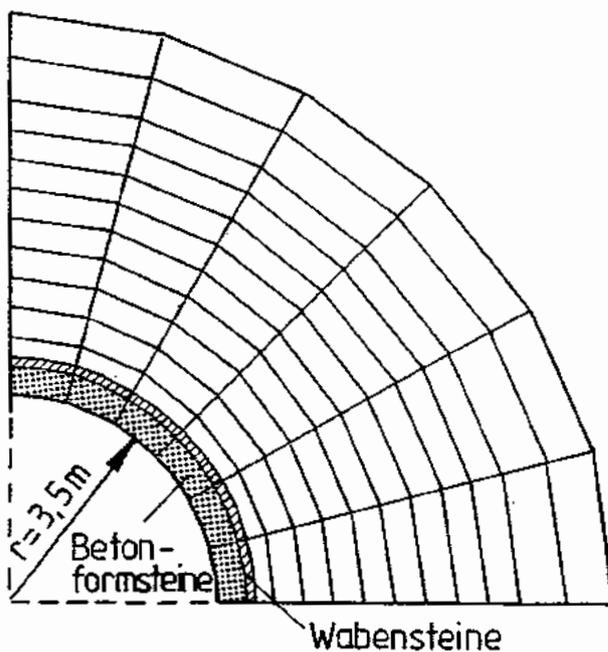
Simulation der Überlagerung durch Knotenkräfte
(in y-Richtung)

1. Rechenschritt

Primärfall , Simulation der Überlagerung durch Knotenkräfte (elastisch)

2. Rechenschritt

Ausbruch des Schachtes (elastisch)

3. Rechenschritt

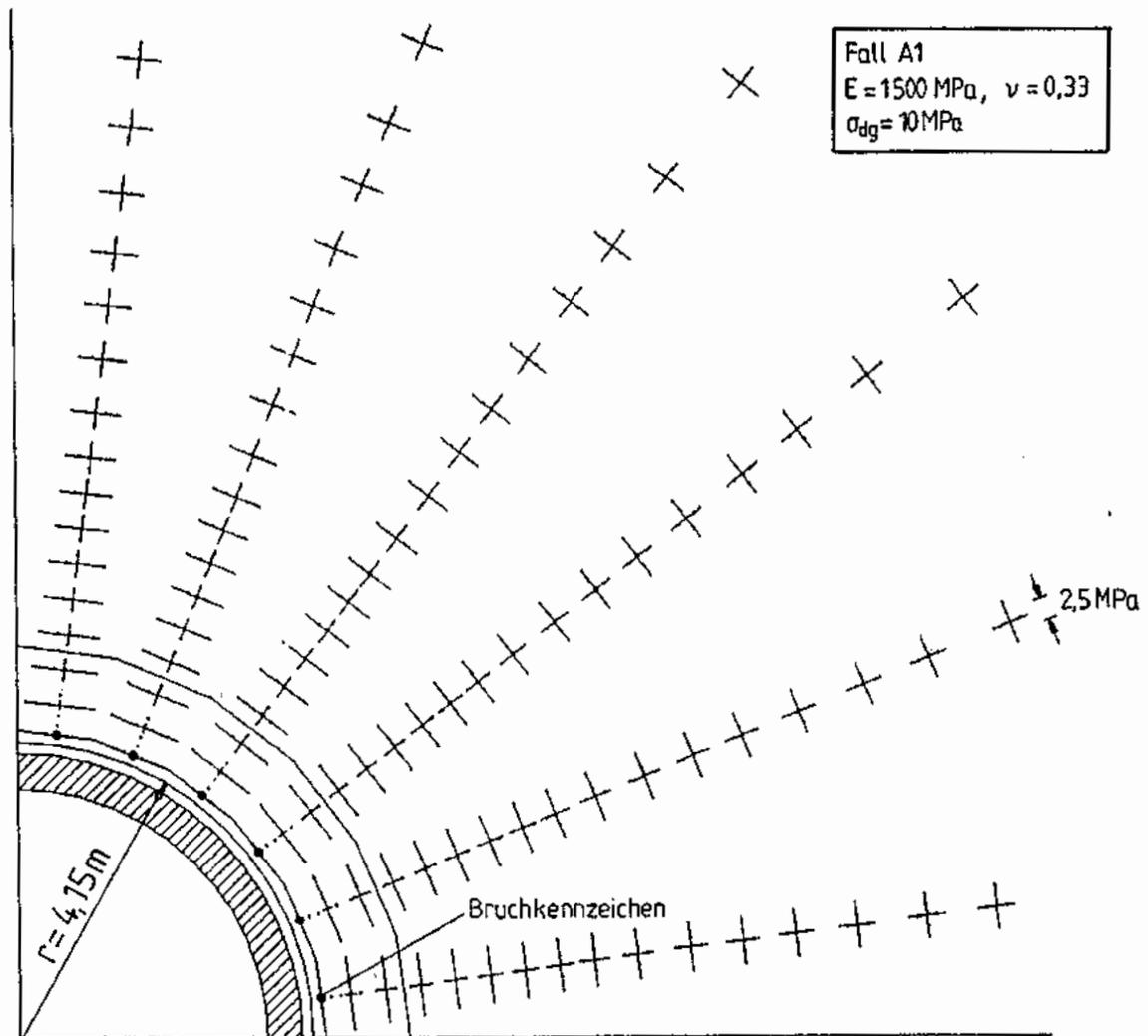
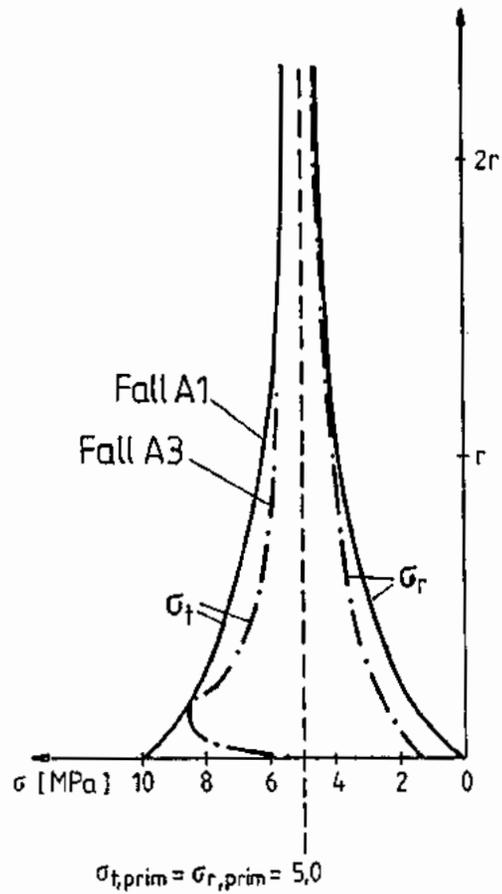
Einbau der Schachtsicherung und Start der viskoplastischen Iteration

Darstellung der Rechenschritte

| Fall | A1 | A3 | A5 | B1 | B2 | C1 | Q1 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $H_{\text{Ü}}$ [m] $\Delta\sigma_{\text{H}}$ [MPa] | 420 0 | | | <input type="text" value="4,5"/> | <input type="text" value="4,5"/> | <input type="text" value="765"/> | |
| Schicht- bezeichnung | Mittel- alb | | | | | Hau- terive | |
| Gebirge: γ [kN/m ³] E [MPa] ν [-] c [MPa] ψ [°] σ_{Z} [MPa] ψ [°] K_{q} [%] σ_{o} [MPa] | 24 1500 0,33 3,5 20 0 10 - - | <input type="text" value="1,75"/> | | <input type="text" value="elast."/> " " " | | | <input type="text" value="elast."/> " " " <input type="text" value="3,0"/> <input type="text" value="5,0"/> |
| Trennflächen: c [MPa] ψ [°] | - - | - - | <input type="text" value="0"/> <input type="text" value="30"/> | - - | - - | - - | - - |
| Primärspannung: σ_{v} [MPa] σ_{H} [MPa] | 10,0 5,0 | | | <input type="text" value="9,5"/> | <input type="text" value="9,5"/> | <input type="text" value="18,4"/> <input type="text" value="9,2"/> | |
| Betonformsteine: γ [kN/m ³] E [MPa] ν [-] | 25 10000 0,2 | | | | | | - |
| Wabensteine: γ [kN/m ³] E [MPa] ν [-] | 25 100 0,33 | | | | | | - |

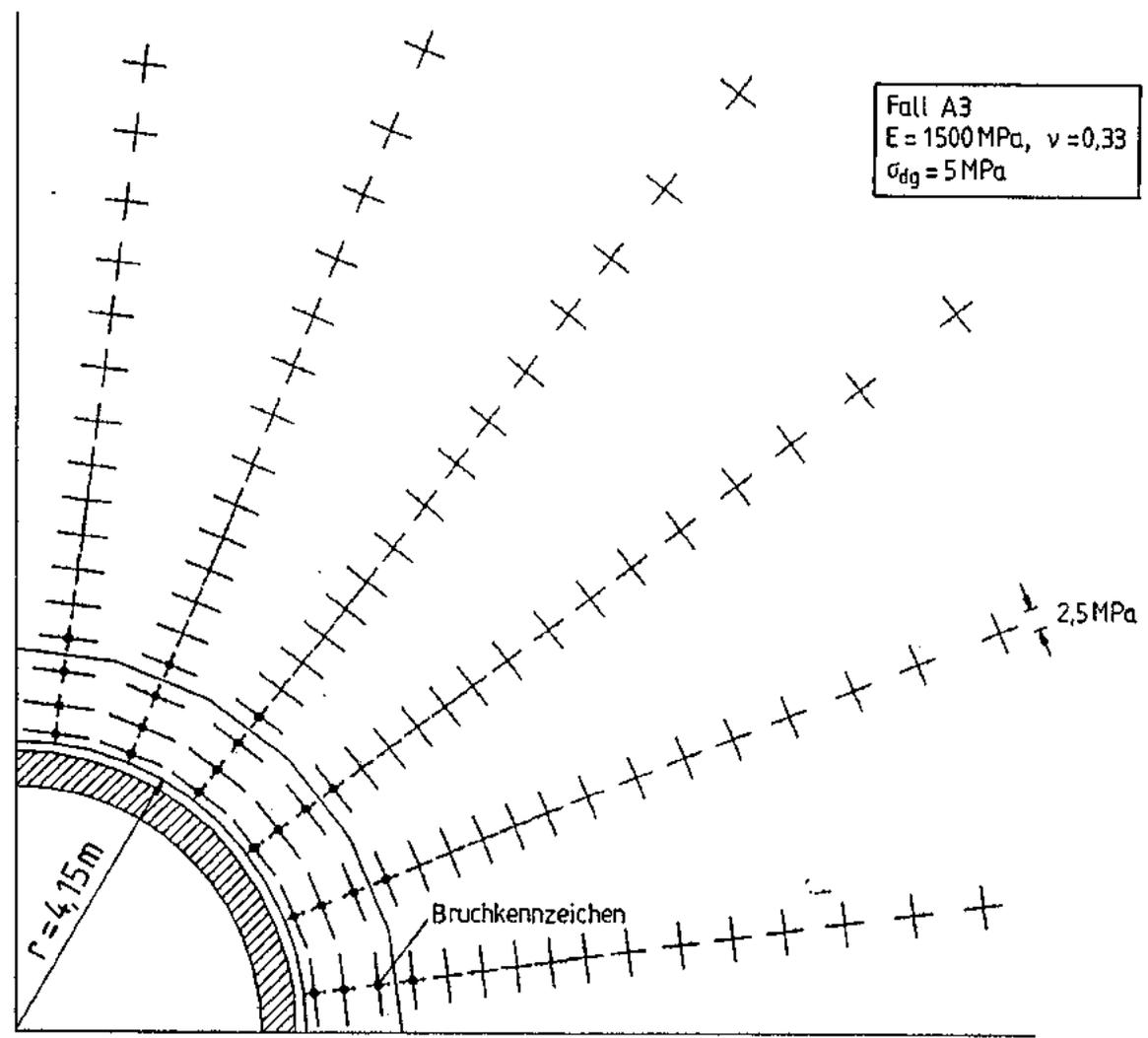
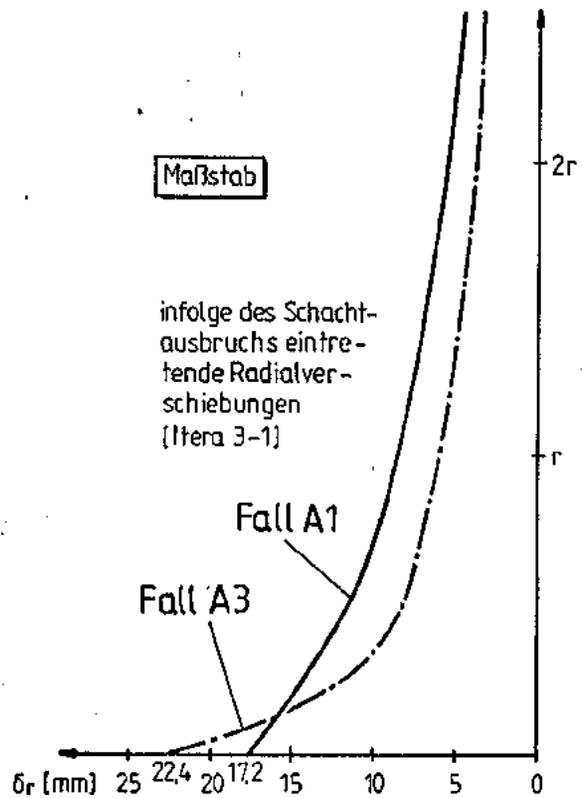
gegenüber Fall A1 geänderte Annahmen

Untersuchte Fälle und Berechnungsannahmen



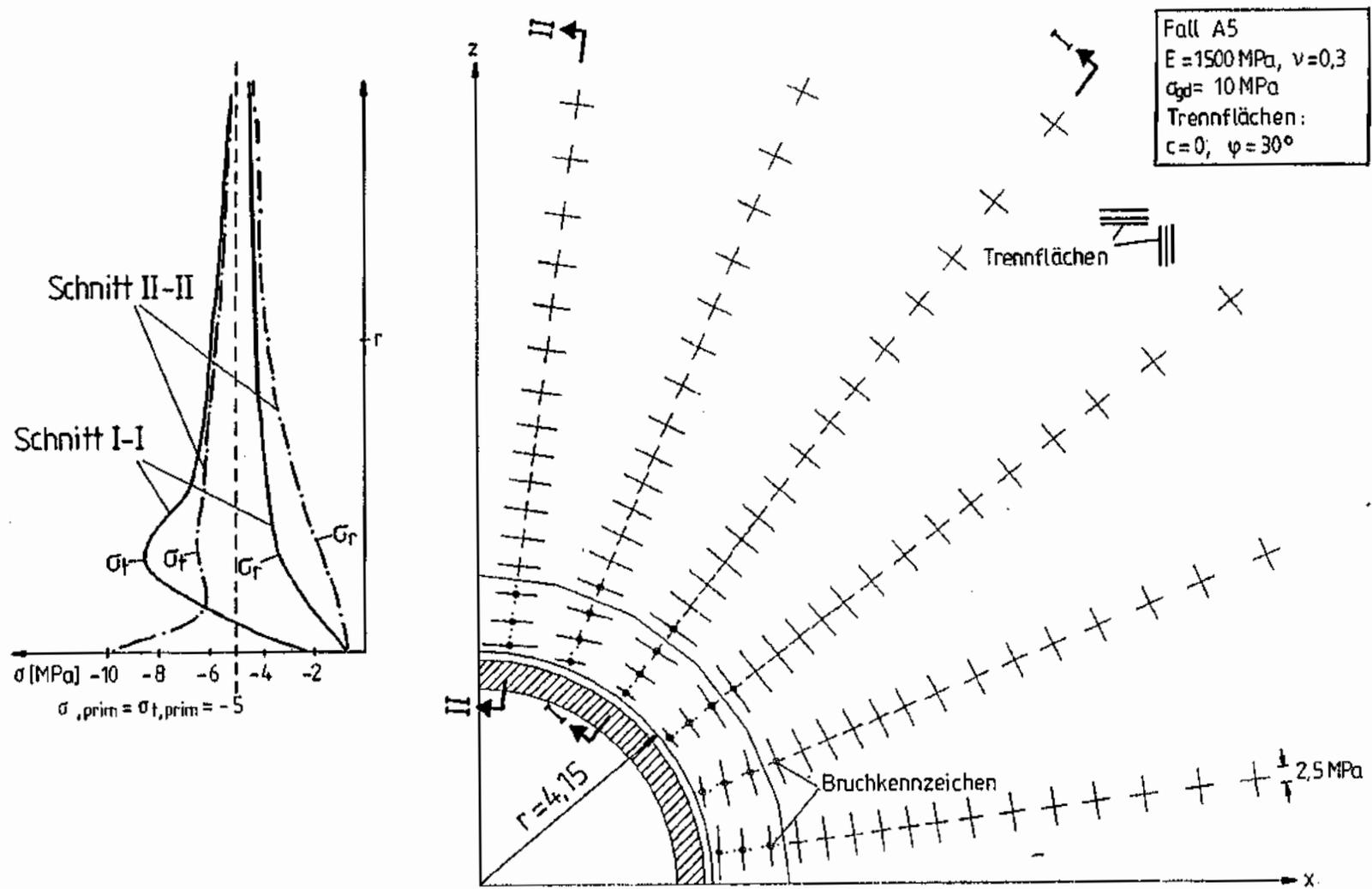
Hauptnormalspannungen Fall A1, Vergleich Radial- und Tangentialspannungen Fälle A1 und A3 (3. Rechenschritt)

| | |
|----------------------|------------|
| Schachtanlage Konrad | |
| Schachtverschluss | |
| Dez. 1989 | Anlage 4,4 |



Hauptnormalspannungen Fall A3, Vergleich der Radialverschiebungen Fälle A1 und A3 (3. Rechenschritt)

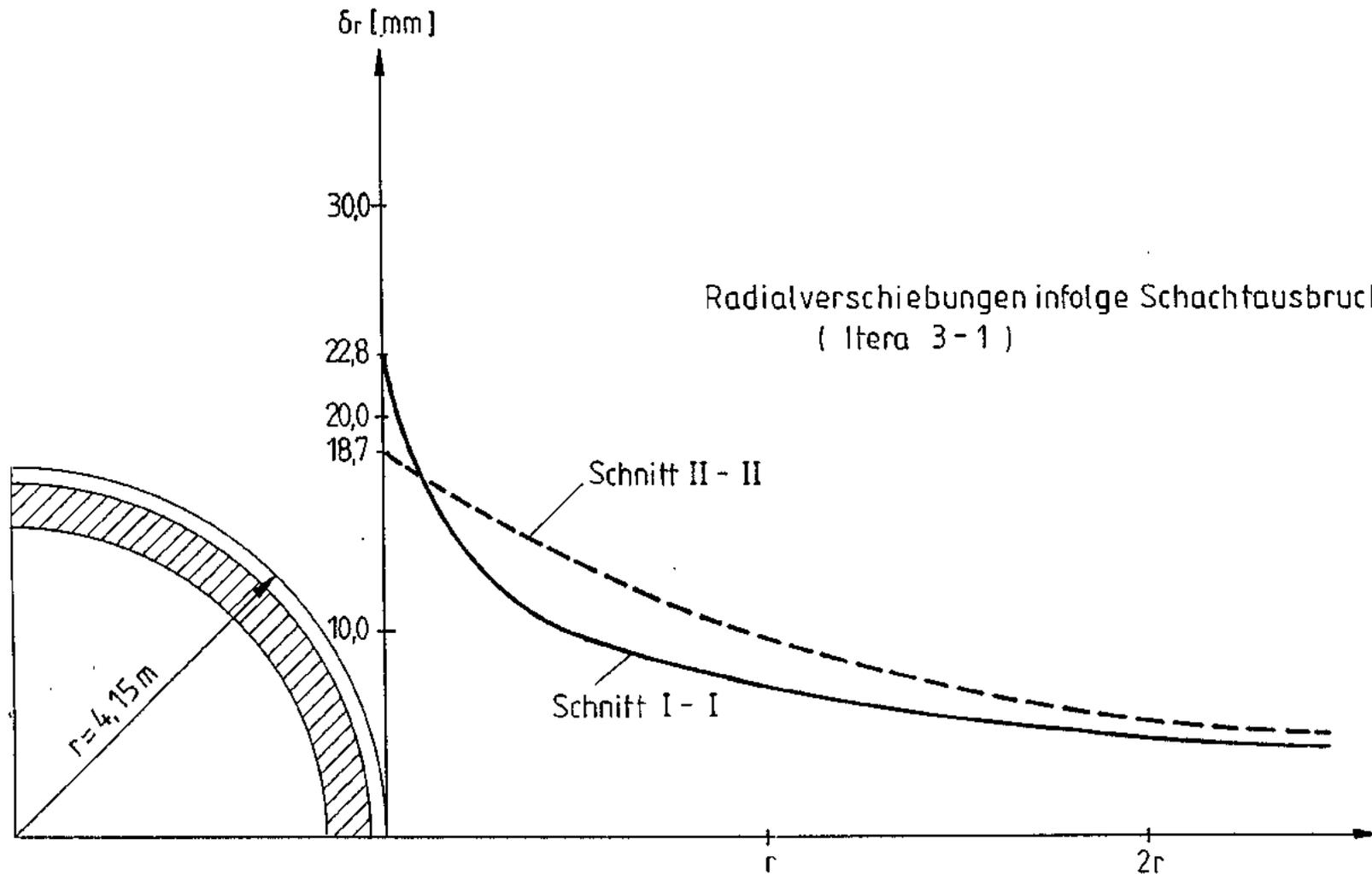
| | |
|----------------------|-----------|
| Schachtanlage Konrad | |
| Schachtverschluss | |
| Anlage 4.5 | Dez. 1989 |



Hauptnormalspannungen Fall A5, Vergleich der Radial- und Tangentialspannungen in 2 Schnitten (3. Rechenschritt)

Schachtanlage Konrad
 Schachtverschluss

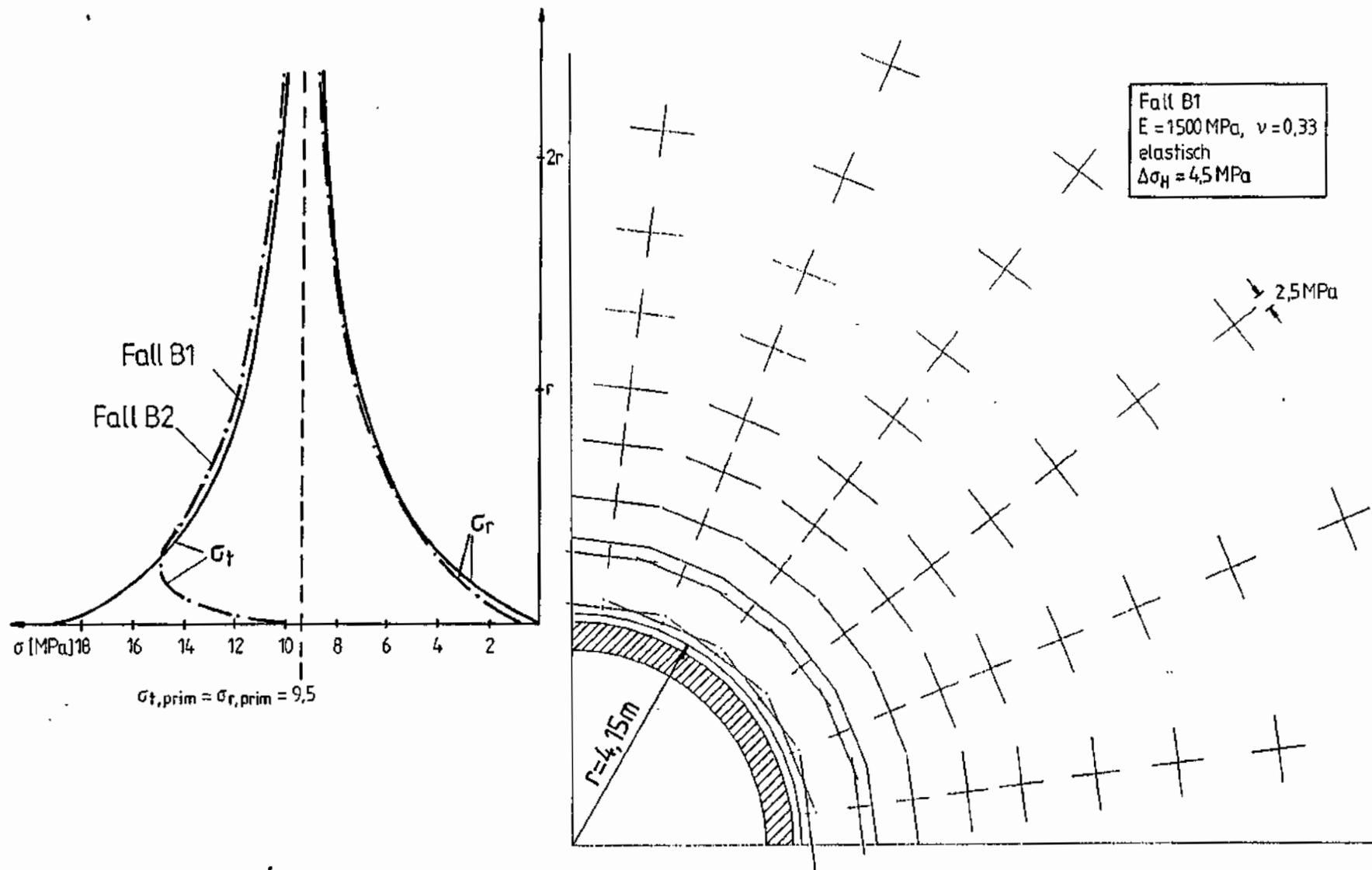
Anlage 4.6
 Dez. 1989



Fall A5 : Verlauf der Radialverschiebungen in 2 Schnitten
(3. Rechenschritt, Lage der Schnitte vgl. Anlage 4.6)

Schachtanlage Konrad
Schachtverschluss

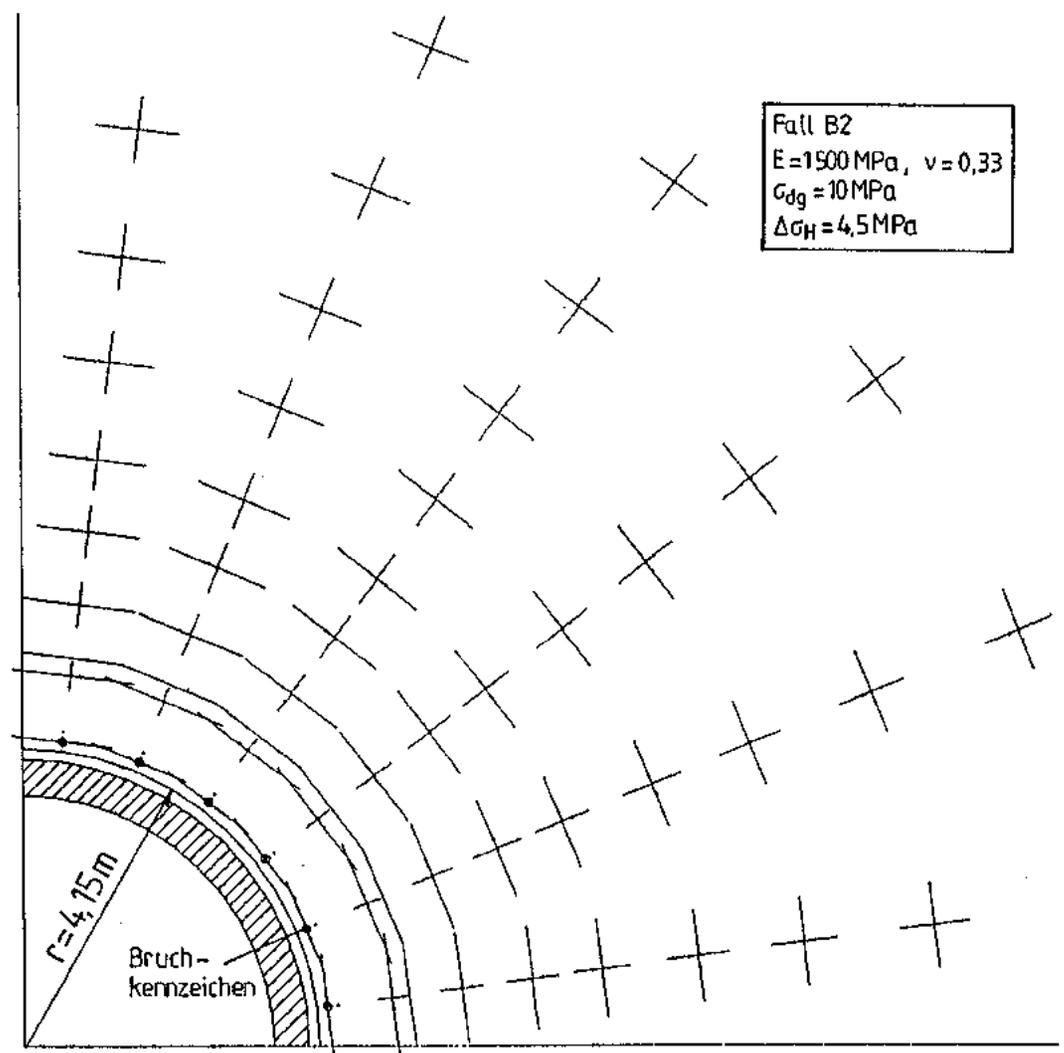
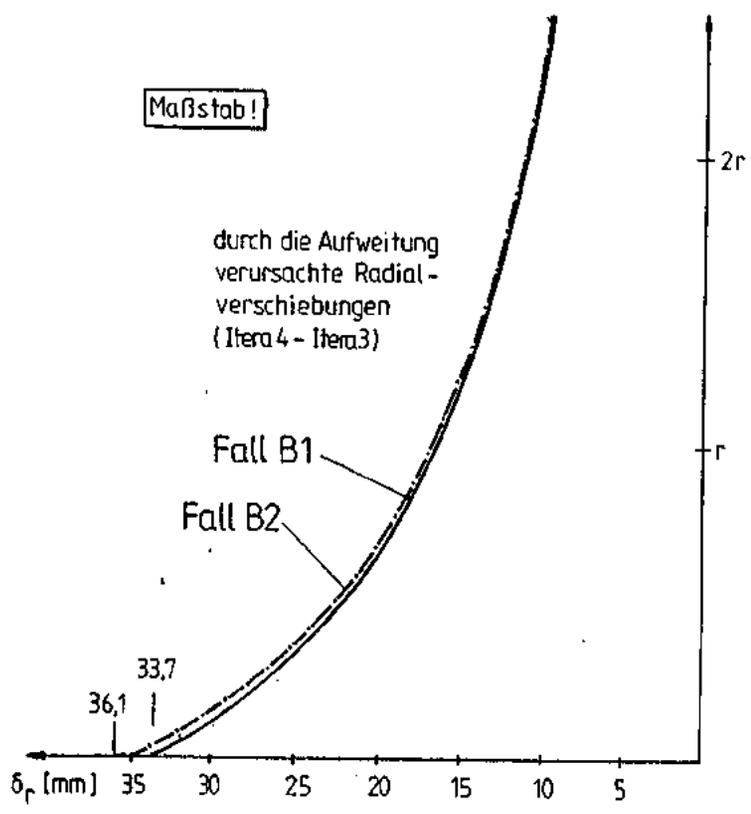
Anlage 4.7
Dez. 1989



Hauptnormalspannungen Fall B1, Vergleich Radial- und Tangentialspannungen Fälle B1 und B2 (3. Rechenschritt)

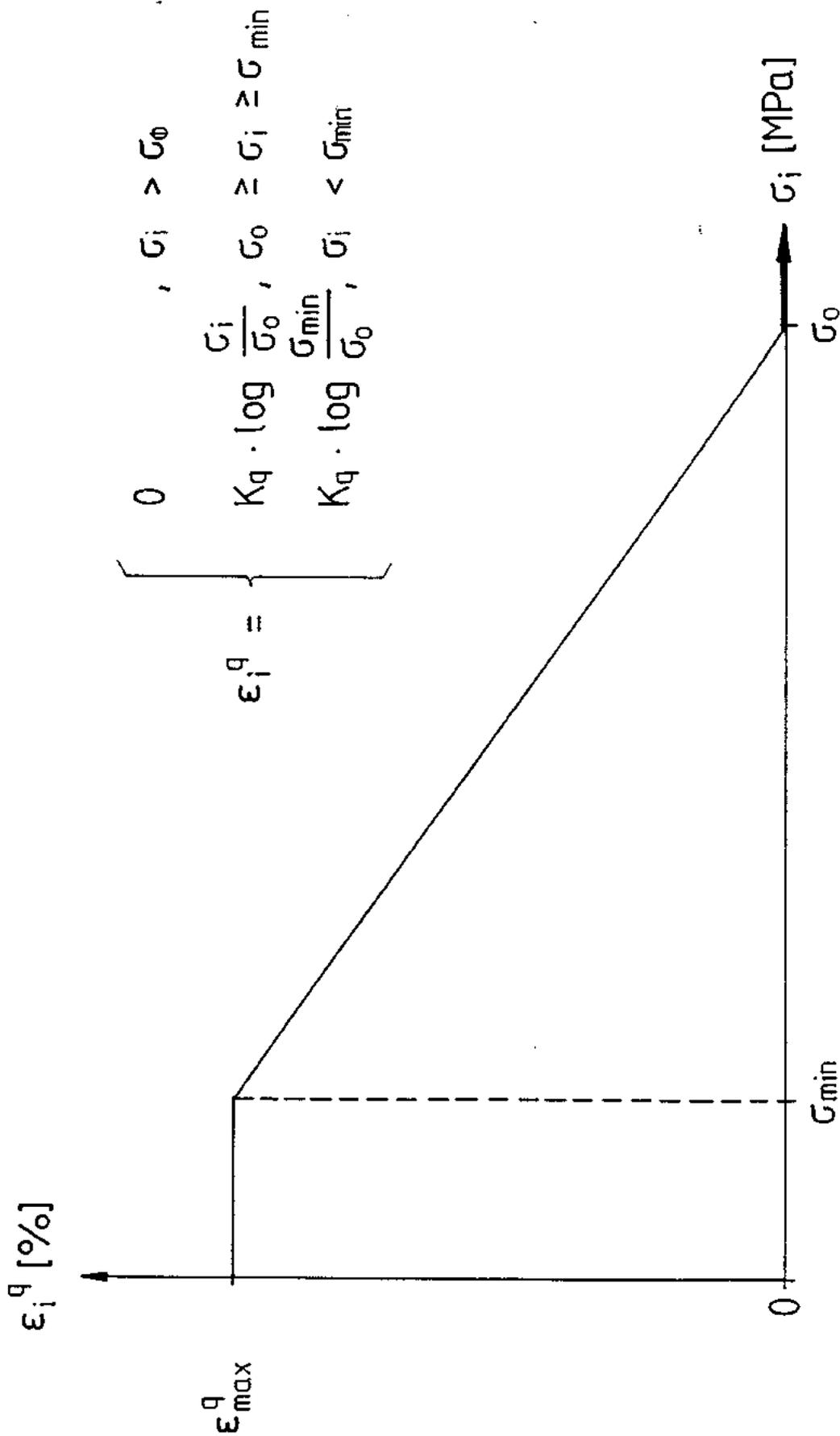
Schachtanlage Konrad
Schachtverschluss

Anlage 4.8
Dez. 1989



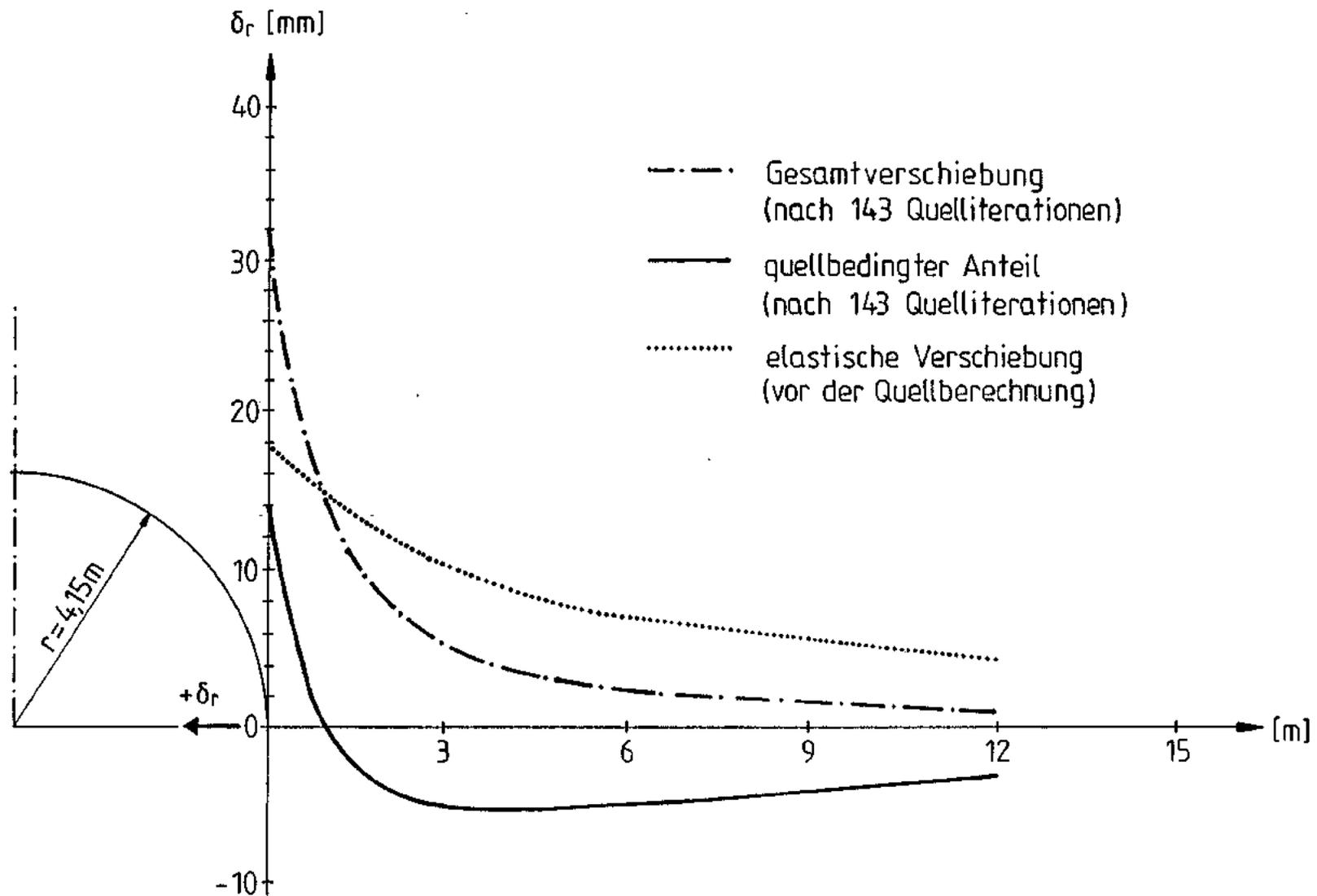
Hauptnormalspannungen Fall B2, Vergleich Radialverschiebungen Fälle B1 und B2 (3.Rechenschritt)

| | |
|----------------------|-------------------|
| Schachtanlage Konrad | Schachtverschluss |
| Anlage 4.9 | |
| Dec. 1989 | |



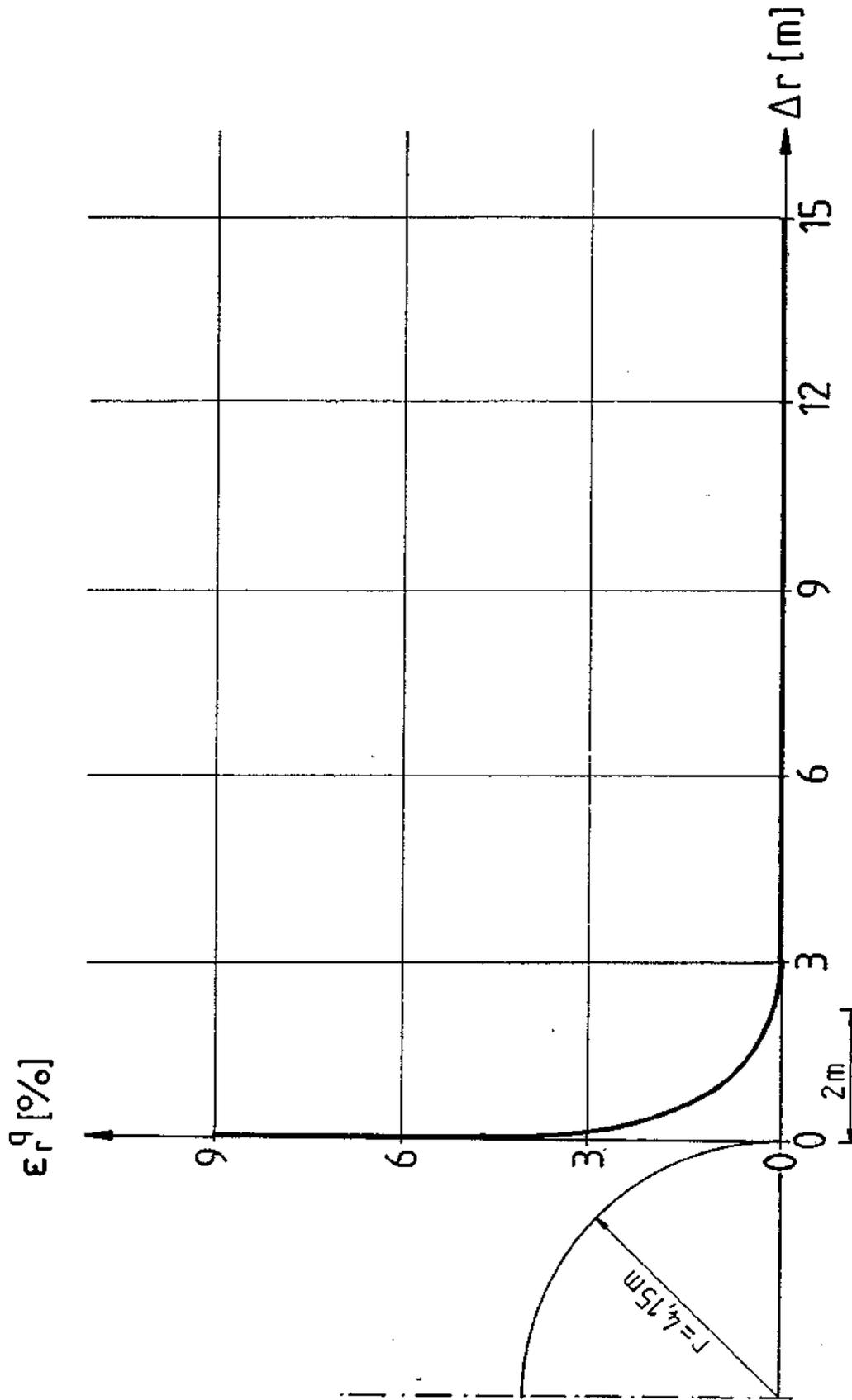
$$\epsilon_i^p = \begin{cases} 0 & , \sigma_i > \sigma_0 \\ K_q \cdot \log \frac{\sigma_i}{\sigma_0} & , \sigma_i \geq \sigma_{min} \\ K_q \cdot \log \frac{\sigma_{min}}{\sigma_0} & , \sigma_i < \sigma_{min} \end{cases}$$

Fall Q1 : Dem Gebirge zugrunde gelegtes Quellgesetz

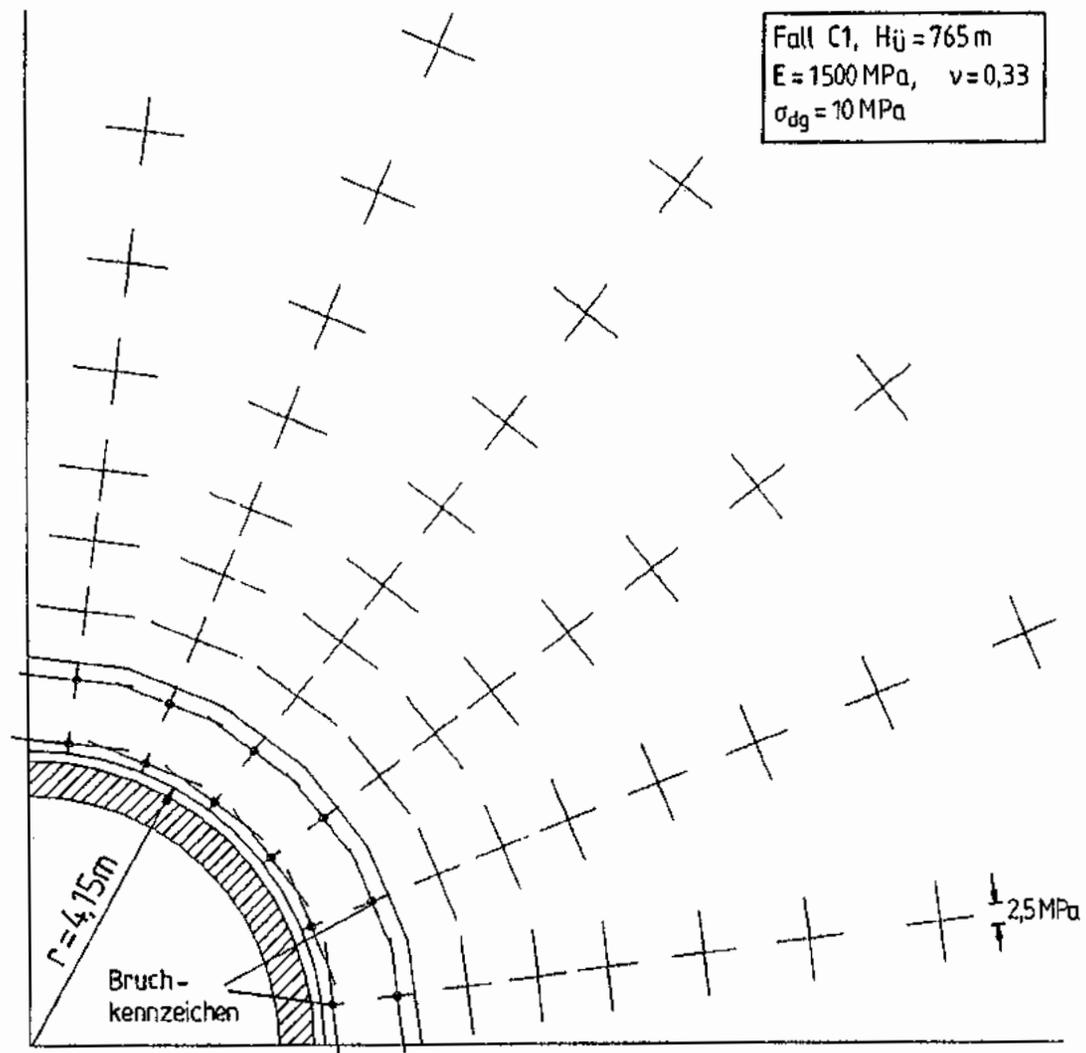
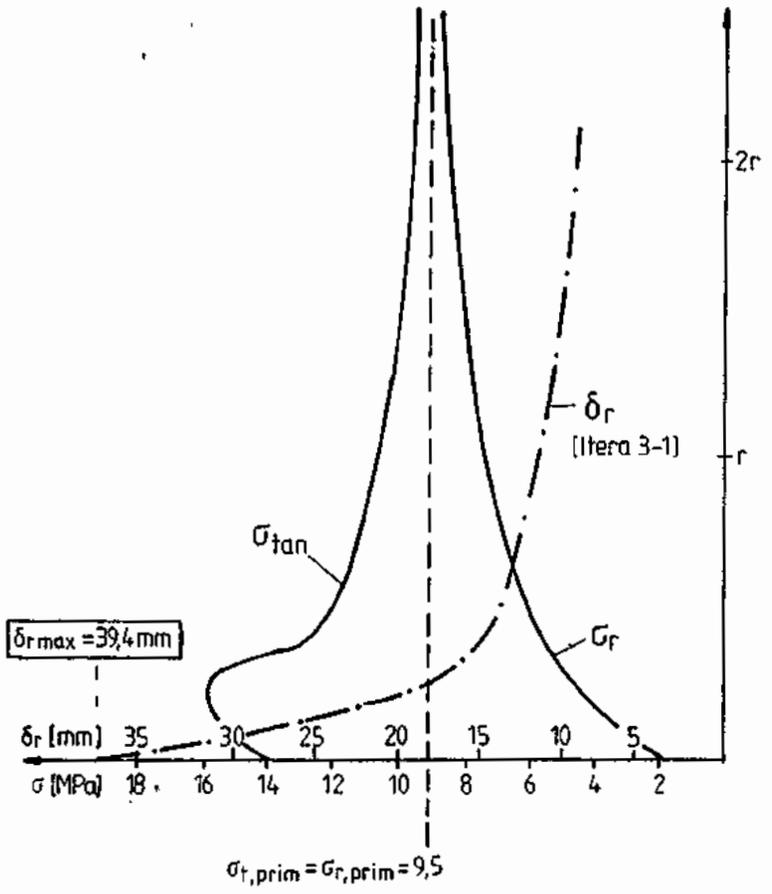


Fall Q1, 2. Rechenschritt: Radialverschiebungen

| | |
|----------------------|-----------|
| Schachtanlage Konrad | |
| Schachtverschluss | |
| Anlage 4.11 | Dez. 1989 |



Fall Q1, 2. Rechenschritt : Radiale Quelldehnungen (nach 143 Iterationen)



Fall C1, Hauptnormalspannungen und Verlauf von Radial- und Tangentialspannungen sowie der Radialverschiebungen (3. Rechenschritt)

Schachtanlage Konrad
Schachtverschluss

Anlage 4.13
Dez. 1989

| Spalte | a | b | c | | | | | | d | | | e | | f | | | g | | | h | i |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------|------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|----------|-----------|--------------|----------------------------|------------|-----------------------------|----------|---------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------|------------|----------------------------------------------------------------|------------------------|
| | | | Korngrößenverteilung | | Ungleichförmigkeitszahl C_U | Plastizitätsgrenzen des Kornanteils < 0,04 mm | | | Wichte | | w | Proctorwerte | | Zusammendrückbarkeit | | | Scherparameter | | | | |
| Zeile Nr. | Bodenart | Boden-Gruppe nach DIN 18 196 | < 0,06 mm % | < 2,0 mm % | | | w_L % | w_p % | I_p % | γ kN/m ³ | | γ' kN/m ³ | | q_{Pr} t/m ³ | w_{Pr} | $E_s = v_e \cdot \sigma_{at} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{at}} \right)^{w_e}$ | v_c | w_e | Δu | φ' | c' kN/m ² |
| 1 | Kies, gleichkörnig | GE | < 5 | < 60 | 2 5 | — | — | — | 16,0 19,0 | 9,5 10,5 | 5 2 | 1,70 1,90 | 8 5 | 400 900 | 0,6 0,4 | 0 | 34 42 | — | 32 35 | 2.10 ⁻¹ 1.10 ⁻² | |
| 2 | Kies, sandig, mit wenig Feinkorn | GW, GI | < 5 | < 60 | 10 100 | — | — | — | 21,0 23,0 | 11,5 13,5 | 7 3 | 2,00 2,25 | 7 4 | 400 1100 | 0,7 0,5 | 0 | 35 45 | — | 32 35 | 1.10 ⁻² 1.10 ⁻⁶ | |
| 3 | Kies, sandig, mit Schluff- oder Tonbeimengungen, die das Korngerüst nicht sprengen | GU, GT | 8 15 | < 60 | 30 300 | 20 45 | 16 25 | 4 25 | 21,0 24,0 | 11,5 14,5 | 9 3 | 2,10 2,35 | 7 3 | 400 1200 | 0,7 0,5 | 0 + | 35 43 | 10 0 | 32 35 | 1.10 ⁻¹ 1.10 ⁻⁵ 1.10 ⁻⁸ | |
| 4 | Kies-Sand-Feinkorn-gemisch. Das Feinkorn sprengt das Korngerüst | GÜ, GÜ | 20 40 | < 60 | 100 1000 | 20 50 | 16 25 | 4 30 | 20,0 22,5 | 10,5 13,0 | 13 5 | 1,90 2,20 | 10 5 | 150 400 | 0,9 0,7 | ++ | 28 35 | 30 5 | 22 30 | 1.10 ⁻⁸ 1.10 ⁻¹¹ | |
| 5 | Sand, gleichkörnig | a) Feinsand | SE | < 5 | 100 | 1,2 3 | — | — | 16,0 19,0 | 9,5 11,0 | 22 8 | 1,60 1,75 | 15 10 | 150 300 | 0,75 0,60 | 0 | 32 40 | — | 30 32 | 2.10 ⁻⁴ 1.10 ⁻⁵ | |
| | | b) Grobsand | SE | < 5 | 100 | 1,2 3 | — | — | 16,0 19,0 | 9,5 11,0 | 16 6 | 1,60 1,75 | 13 8 | 250 700 | 0,70 0,55 | 0 | 34 42 | — | 30 34 | 5.10 ⁻³ 2.10 ⁻⁴ | |
| 6 | Sand, gut abgestuft und Sand, kiesig | SW, SI | < 5 | < 60 | 6 15 | — | — | — | 18,0 21,0 | 10,0 12,0 | 11 5 | 1,90 2,15 | 10 6 | 200 600 | 0,70 0,55 | 0 | 33 41 | — | 32 34 | 5.10 ⁻⁴ 2.10 ⁻⁵ | |
| 7 | Sand mit Feinkorn, das das Korngerüst nicht sprengt | SU, ST | 8 15 | > 60 | 10 50 | 20 45 | 16 25 | 4 25 | 19,0 22,5 | 10,5 13,0 | 15 4 | 2,00 2,20 | 13 7 | 150 500 | 0,80 0,65 | + | 32 40 | 10 0 | 30 32 | 1.10 ⁻⁵ 1.10 ⁻⁷ | |
| 8 | Sand mit Feinkorn, das das Korngerüst sprengt | SÜ, SÜ | 20 40 | > 60 | 30 300 | 20 50 | 16 30 | 4 30 | 18,0 21,5 | 9,0 11,0 | 20 8 | 1,70 2,00 | 18 12 | 50 250 | 0,90 0,75 | ++ | 25 32 | 50 10 | 22 30 | 1.10 ⁻⁷ 1.10 ⁻¹⁰ | |
| 9 | Schluff, geringplastisch | UL | > 50 | > 80 | 5 50 | 25 35 | 20 28 | 4 11 | 17,5 21,0 | 9,5 11,0 | 28 15 | 1,60 1,80 | 22 15 | 40 110 | 0,80 0,60 | + | 28 35 | 20 5 | 25 30 | 1.10 ⁻⁵ 1.10 ⁻⁸ | |
| 10 | Schluff, mittel- und hochplastisch | UM | > 80 | 100 | 5 50 | 35 50 | 22 23 | 7 20 | 17,0 20,0 | 8,5 10,5 | 35 20 | 1,55 1,75 | 23 16 | 30 70 | 0,90 0,70 | ++ | 25 33 | 30 10 | 22 29 | 2.10 ⁻⁶ 1.10 ⁻⁹ | |
| 11 | Ton, geringplastisch | TL | > 80 | 100 | 6 20 | 25 35 | 15 22 | 7 16 | 19,0 22,0 | 9,5 12,0 | 28 14 | 1,65 1,85 | 20 14 | 20 50 | 1,00 0,90 | ++ | 24 32 | 60 15 | 20 28 | 1.10 ⁻⁷ 2.10 ⁻⁹ | |
| 12 | Ton, mittelpplastisch | TM | > 90 | 100 | 5 40 | 40 50 | 18 25 | 16 28 | 18,0 21,0 | 8,5 11,0 | 38 18 | 1,55 1,75 | 23 17 | 10 30 | 1,00 0,95 | ++ | 20 30 | 80 20 | 10 20 | 5.10 ⁻⁸ 1.10 ⁻¹⁰ | |
| 13 | Ton, hochplastisch | TA | 100 | 100 | 5 40 | 60 85 | 20 35 | 33 55 | 16,5 20,0 | 7,0 10,0 | 55 20 | 1,15 1,65 | 27 20 | 6 20 | 1,00 1,00 | +++ | 17 27 | 100 30 | 6 15 | 1.10 ⁻⁹ 1.10 ⁻¹¹ | |
| 14 | Schluff oder Ton, organisch | OU, OT | > 80 | 100 | 5 30 | 45 70 | 30 45 | 10 30 | 15,5 19,0 | 5,5 9,0 | 60 30 | 1,45 1,70 | 27 18 | 5 20 | 1,00 0,85 | +++ | 20 26 | 70 20 | 15 22 | 1.10 ⁻⁹ 2.10 ⁻¹¹ | |
| 15 | Torf | HN, HZ | — | — | — | — | — | — | 10,4 13,0 | 0,4 3,0 | 800 100 | — | — | 3 8 | 1,00 1,00 | ++ | 24 30 | 15 5 | — | 1.10 ⁻⁵ 1.10 ⁻⁸ | |
| 16 | Mudde | F | — | — | — | 100 250 | 30 80 | 50 170 | 12,5 16,0 | 2,5 6,0 | 200 50 | — | — | 4 15 | 1,00 0,90 | +++ | 22 28 | 20 5 | — | 1.10 ⁻⁷ 1.10 ⁻⁹ | |

Die Symbole in Spalte g weisen darauf hin, ob in der

Bodenart bei statischen Spannungsänderungen die Scherfestigkeit beeinflussende Porenwasser-differenzdrücke Δu entstehen:

0 = kein oder sehr geringer

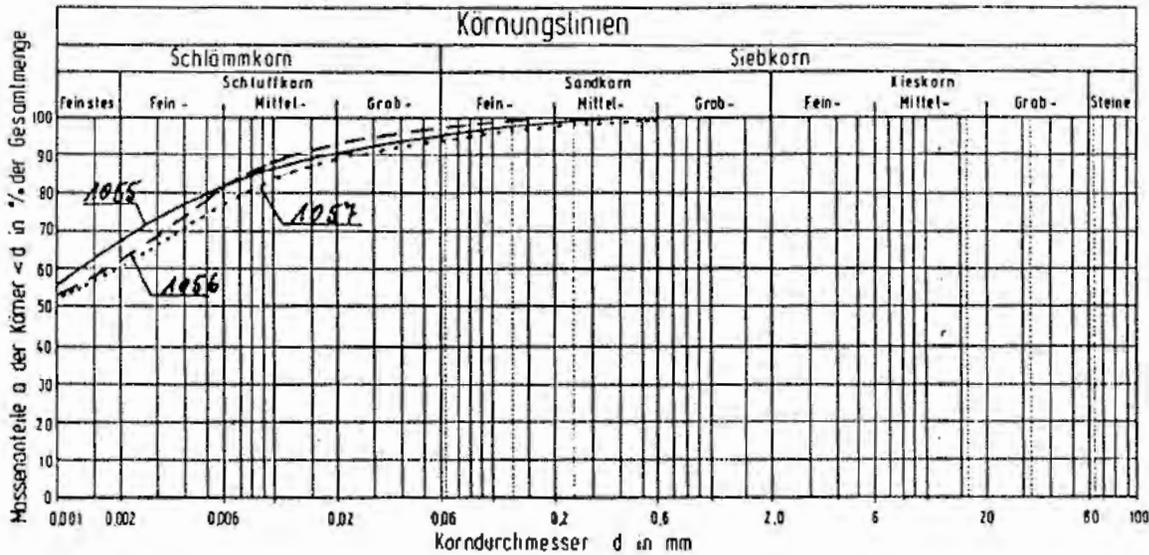
+ = geringer

++ = mittlerer bis starker

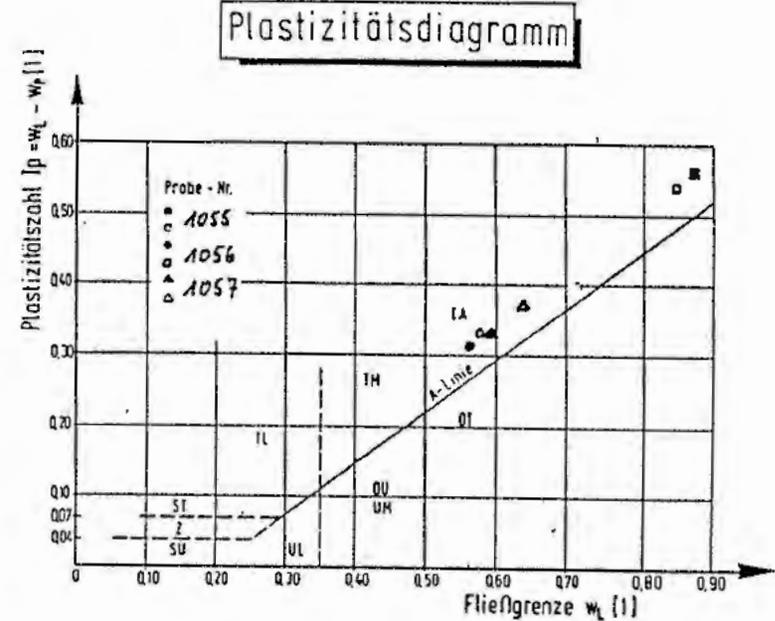
+++ = sehr starker Einfluß des Porenwasserdrückes auf die Scherfestigkeit.

In Spalte f bedeutet σ_{at} den mittleren Atmosphärendruck (10 kN/m²).

Auswahl geeigneter Bodenarten [15]



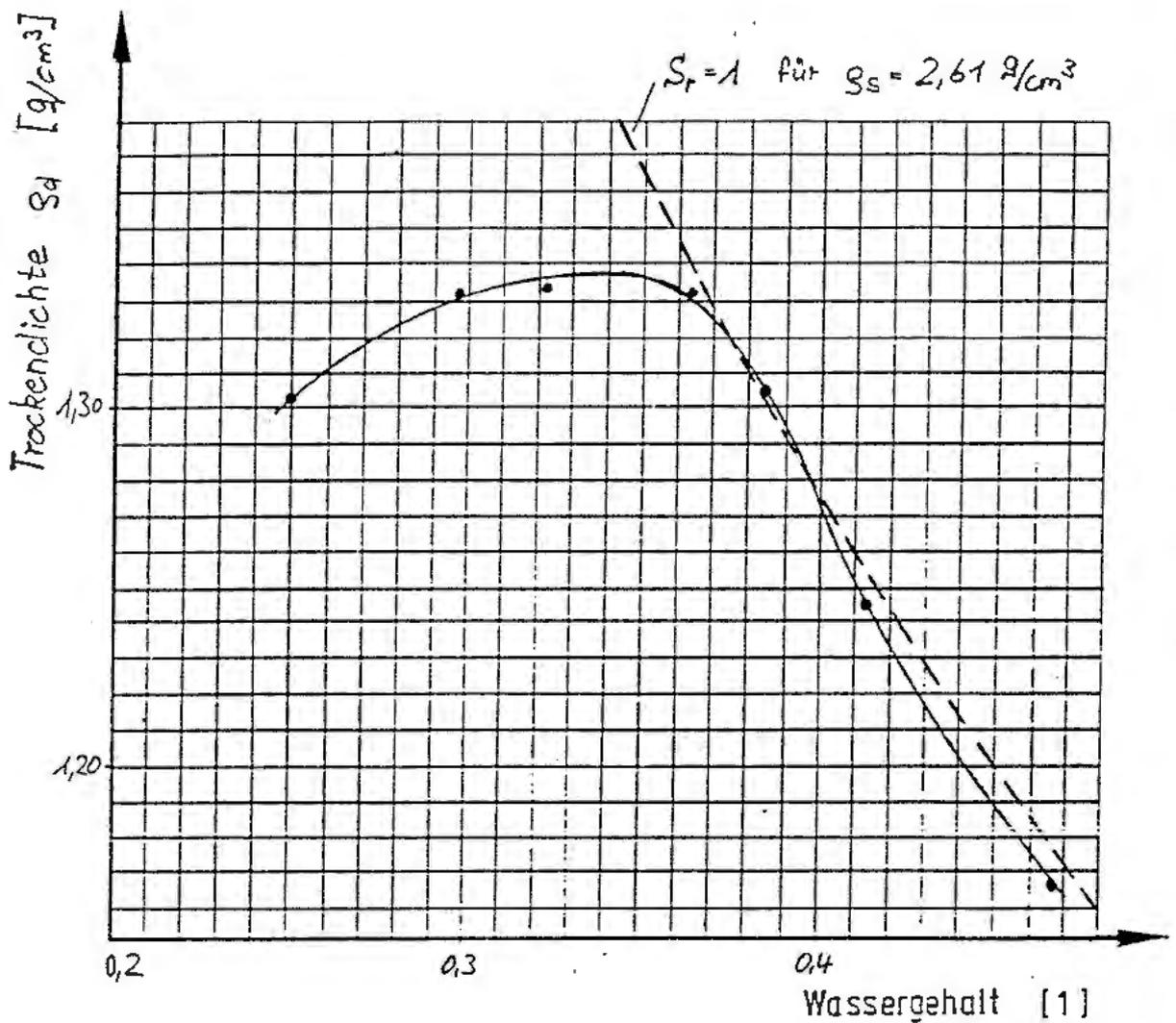
| Entnahmestelle | Probe-Nr. | Korngrößenverteilung | | | Wassergehalte | | | Plastizitätszahl I_p | Benennung nach der Korngrößenverteilung | Benennung nach DIN 18186 | Konsistenzzahl I_c | Korndichte ρ_s | Proctorwerte | |
|----------------|-----------|----------------------|-----|-----|---------------|----------------|----------------|---------------------------|------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|--------------|----------------|
| | | T | U | S | w | w _L | w _p | | | | | | ρ_{pr} | w _M |
| | | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | | | | [g/cm ³] | [g/cm ³] | [%] | |
| 1 Stadium | 1055 | 66 | 29 | 5 | 0,340 | 0,871 0,844 | 0,108 0,302 | 0,563 0,542 | T ₁ U ₁ f ₁ ' | TA | 0,94 0,93 | 2,61 | 1,34 | 0,340 |
| 2 | 1056 | 52 | 35 | 3 | 0,245 | 0,564 0,564 | 0,246 0,233 | 0,315 0,321 | T ₁ U ₁ f ₁ ' | TA | 1,00 0,96 | 2,64 | - | - |
| 3 | 1057 | 61 | 33 | 6 | 0,263 | 0,589 0,639 | 0,252 0,262 | 0,327 0,377 | T ₁ U ₁ f ₁ ' | TA | 0,97 1,00 | 2,64 | - | - |



- SU Sand-Schluff-Gemische
- Z Zwischenschicht
- ST Sand-Ion-Gemische
- IL leicht plastische Zone
- TL Mittelplastische Zone
- TH Mittelplastische Zone
- UA Ausgeprägt plastische Zone
- UL - Leicht plastische Schluffe.
- OU Schluffe mit organischen Beimengungen und organogene Schluffe
- UH Mittelplastische Schluffe
- OT Zone mit organischen Beimengungen und organogene Zone

PROCTORVERSUCH Probe Nr. 1055 (Stedum)

DATUM 31.10.89 BODENART: Ton, u. fs' (TA)
 KORNGROSSE: < 20 mm



| | |
|--------------------------|------------|
| Proctordichte : | 1,34 g/cm³ |
| optimaler Wassergehalt : | 34 % |

| | |
|----------------------------------------------------|---------------|
| | |
| PROJEKT KONRAD Proctorversuch Tonrube Stedum | Anlage 6.3 |
| Datum: 3.11.89 | |

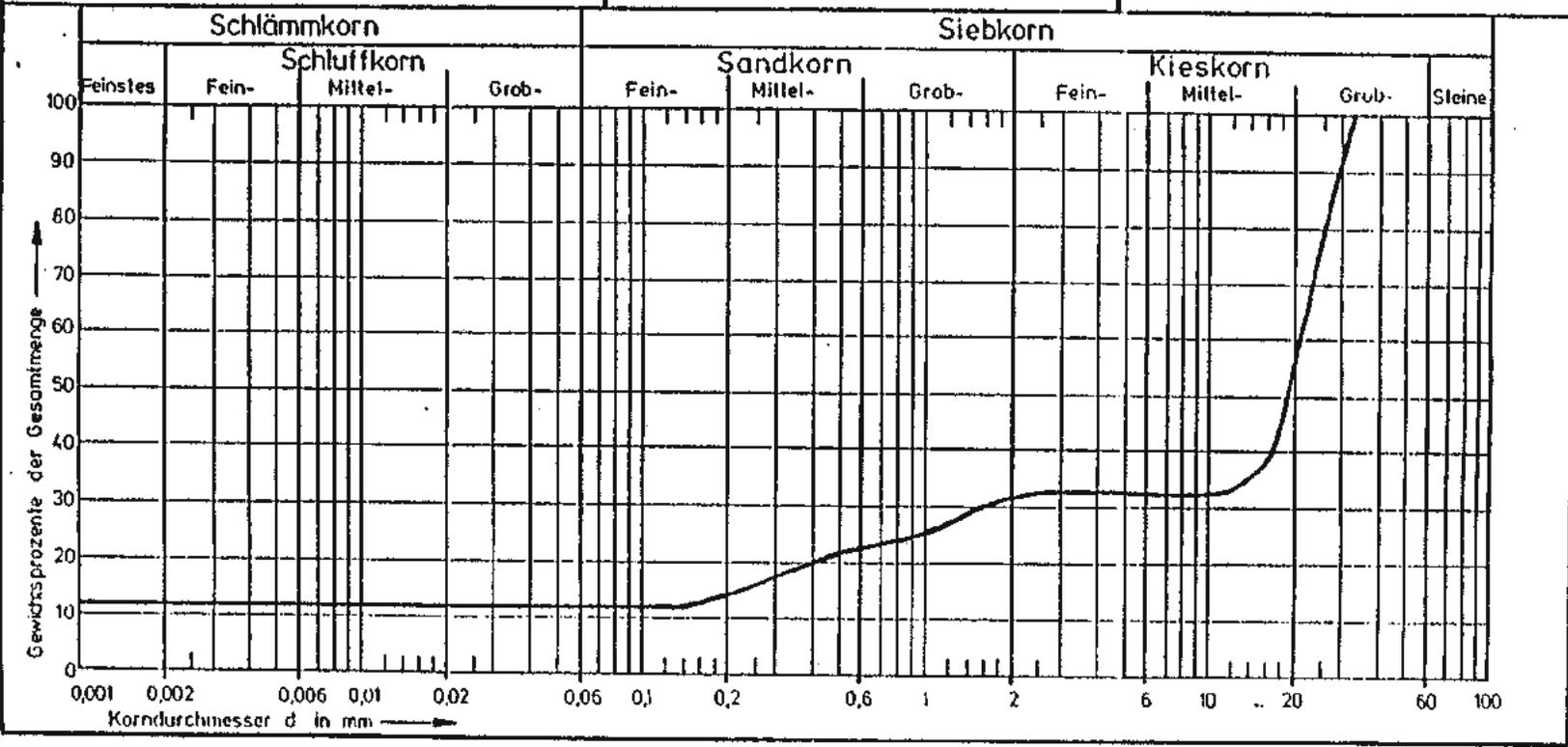
Raster-Papier Nr. 775-A-DIN A 4 80/85 g/qm

Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik
 RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

KÖRNUNGSKURVEN

Anlage zu

Blatt



Kornverteilungskurve für Kies-Sand-Tongemisch [16]

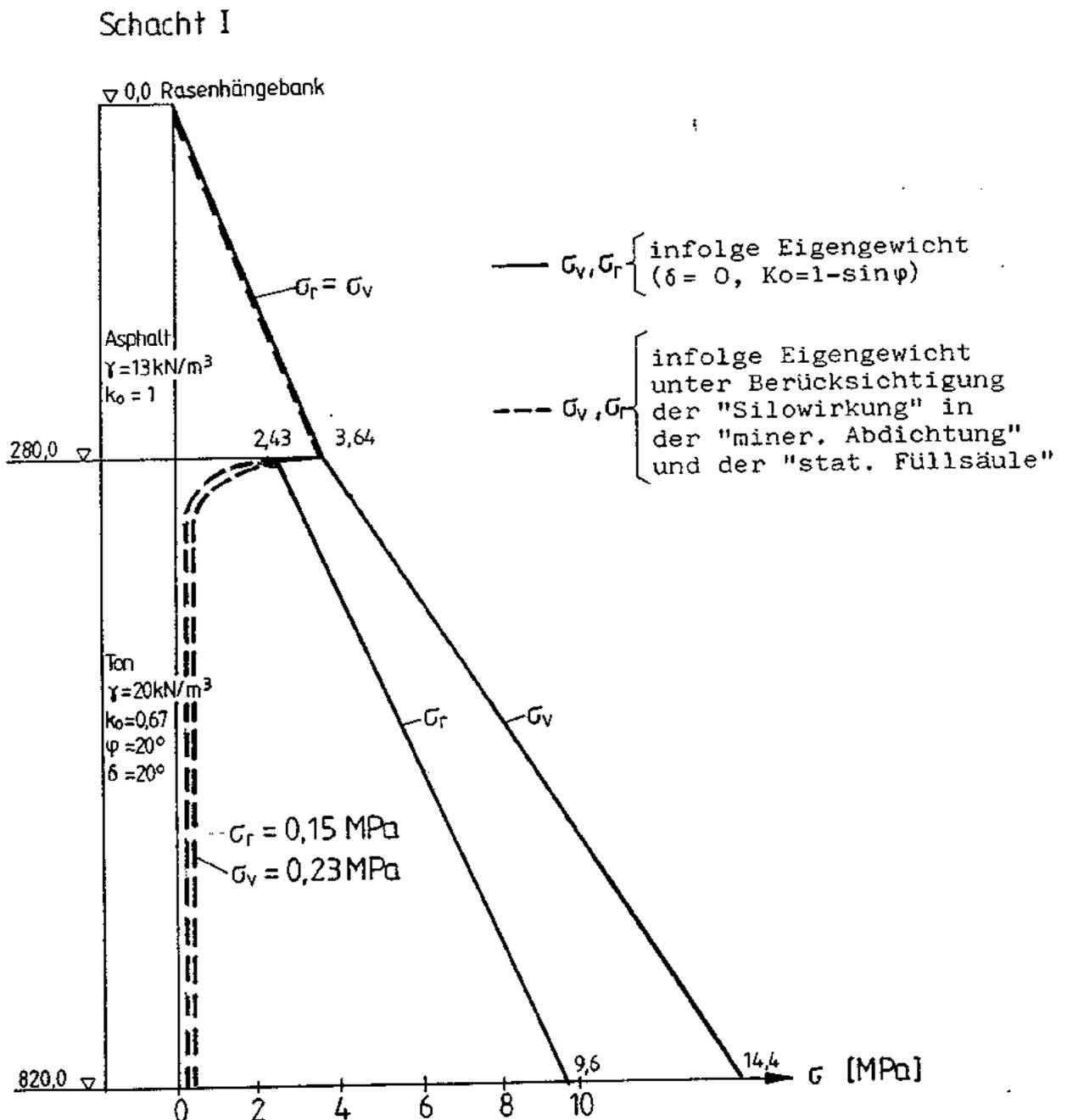


Schachanlage Konrad
 Schachtverschluss

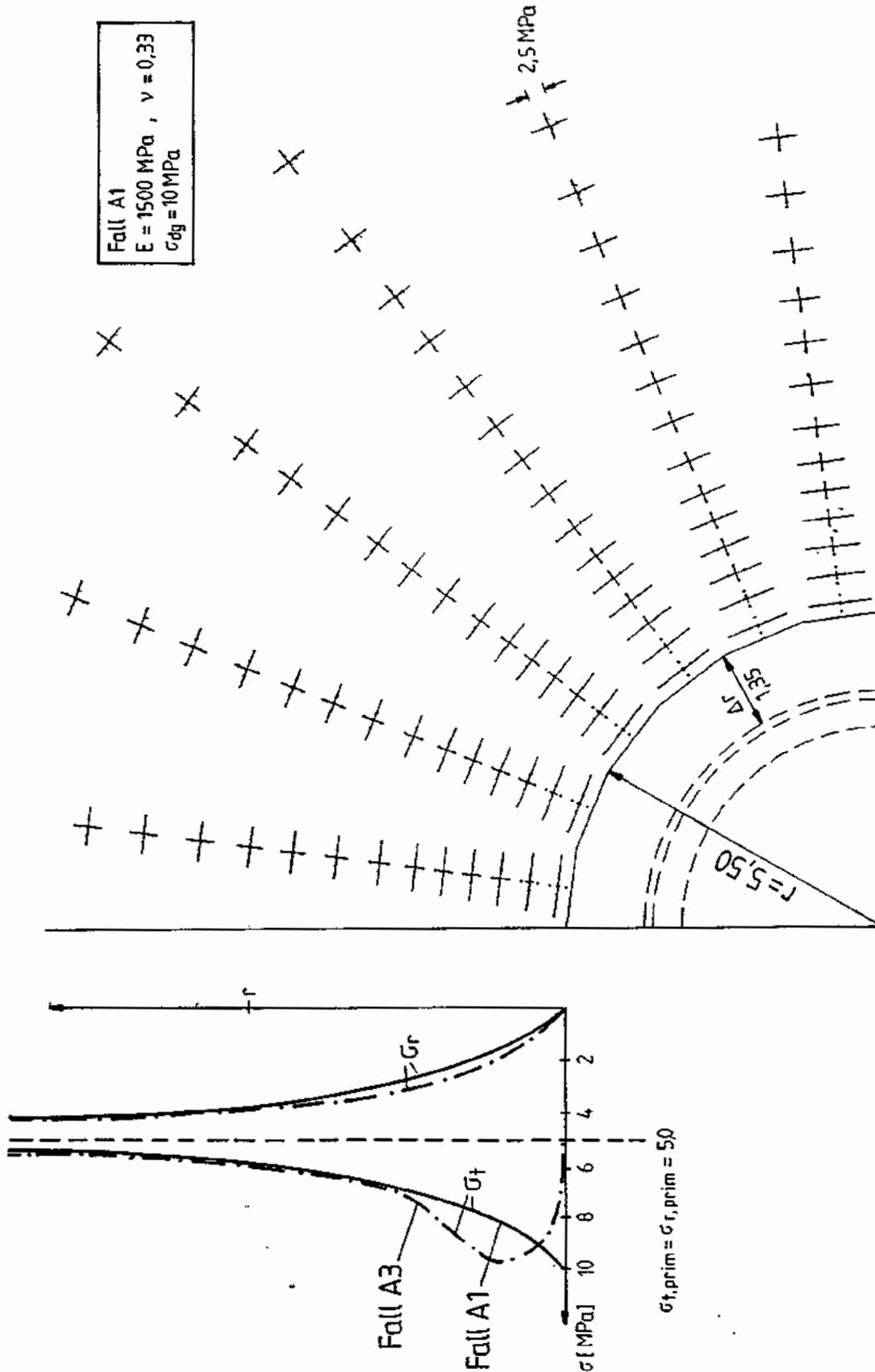
Anlage 6.4
 Dez. 1989

| Wert | Einheit | trocken | gesättigt |
|--------------|-----------------|---------|---------------------|
| ρ_{s_0} | g/cm^3 | 2.65 | |
| ρ_0 | g/cm^3 | 2.17 | |
| ρ_{0d} | g/cm^3 | >2.15 | |
| w | % | <1 | 8 |
| n | % | <18 | |
| k | m/s | | $<5 \cdot 10^{-11}$ |
| c_u | KN/m^2 | 0 | 50 |
| Phi | Grad | 42 | 36 |
| E_s | KN/m^2 | 40000 | 40000 |
| CBR | % | 108 | 100 |

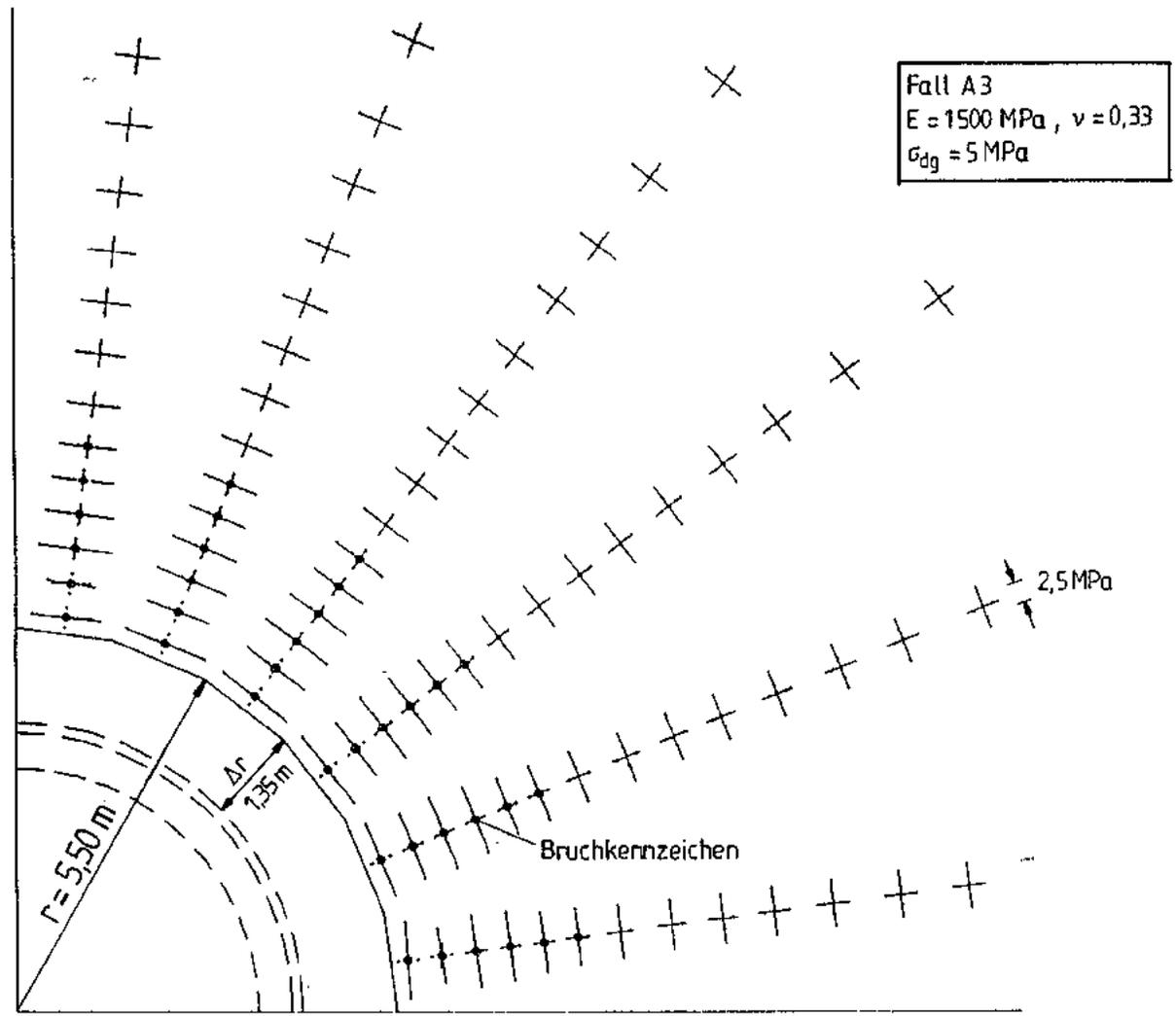
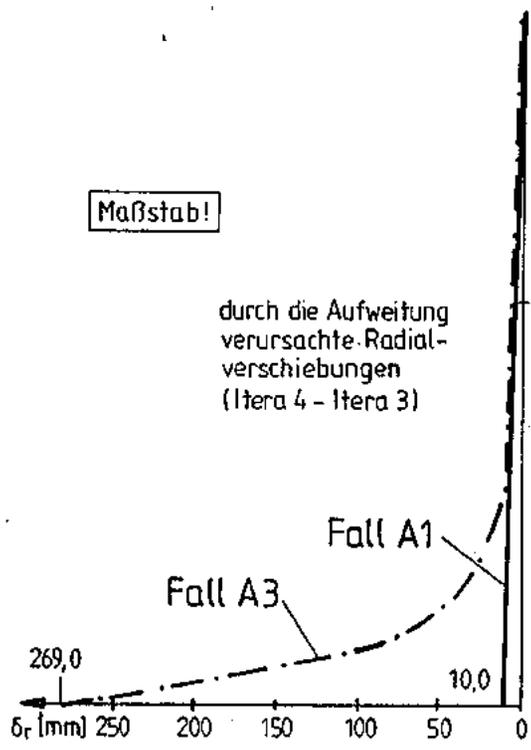
Zusammenstellung der Kennwerte für eine Trocken-
mischung [16]



Beispielhafte Darstellung der in der mineralischen Abdichtung herrschenden Radial- und Vertikalspannungen

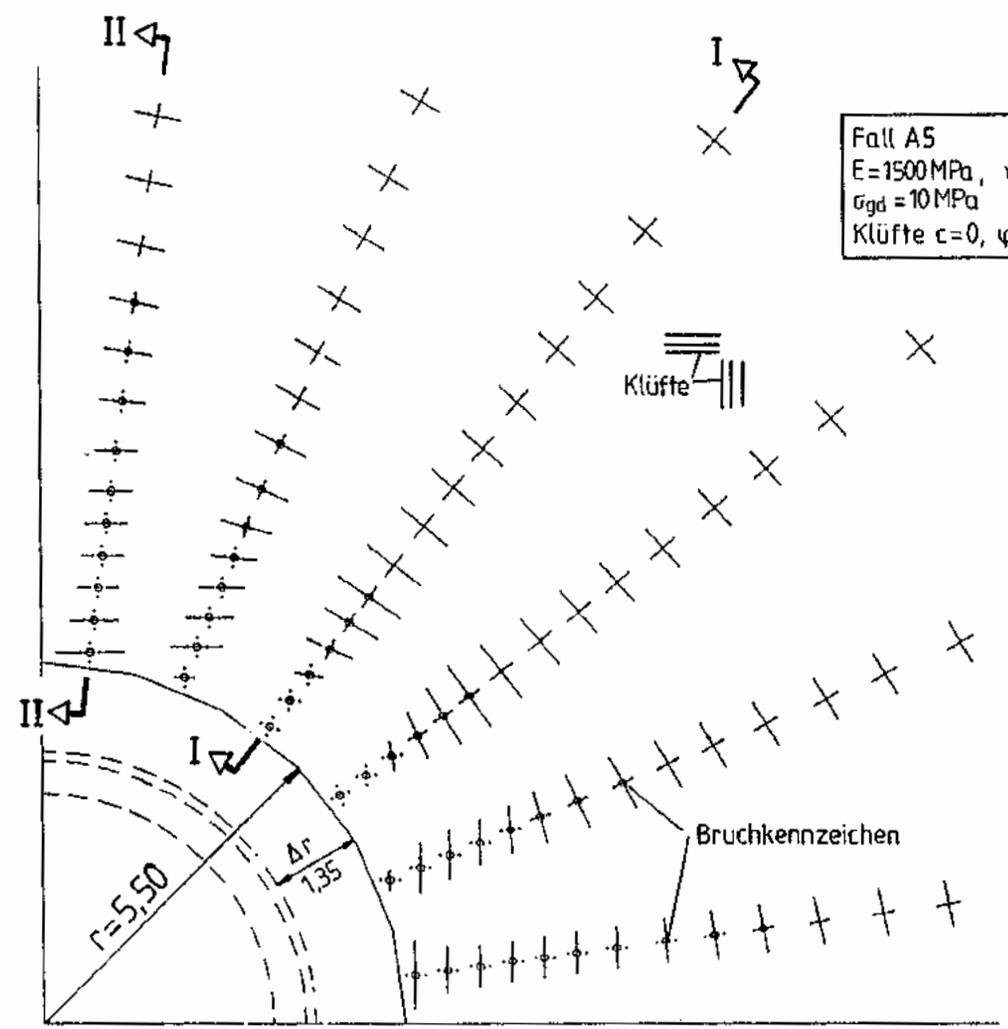
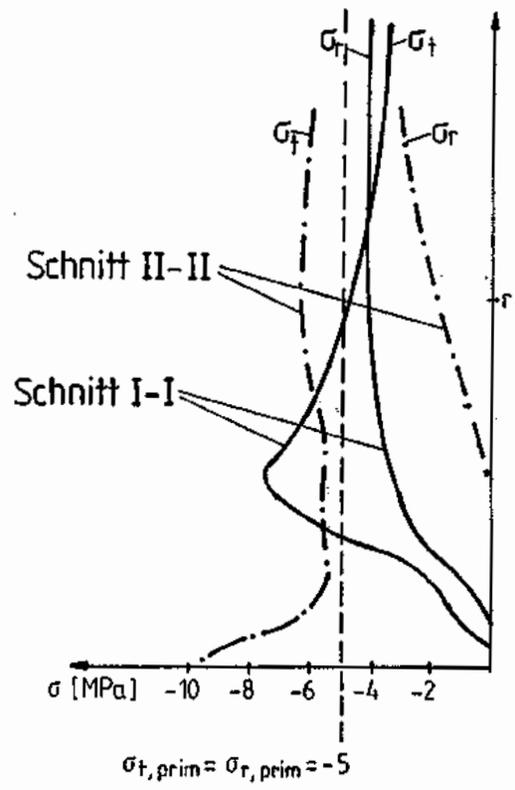


Hauptnormalspannungen Fall A1, Vergleich Radial- und Tangentialspannungen
Fälle A1 und A3 (4. Rechenschritt)



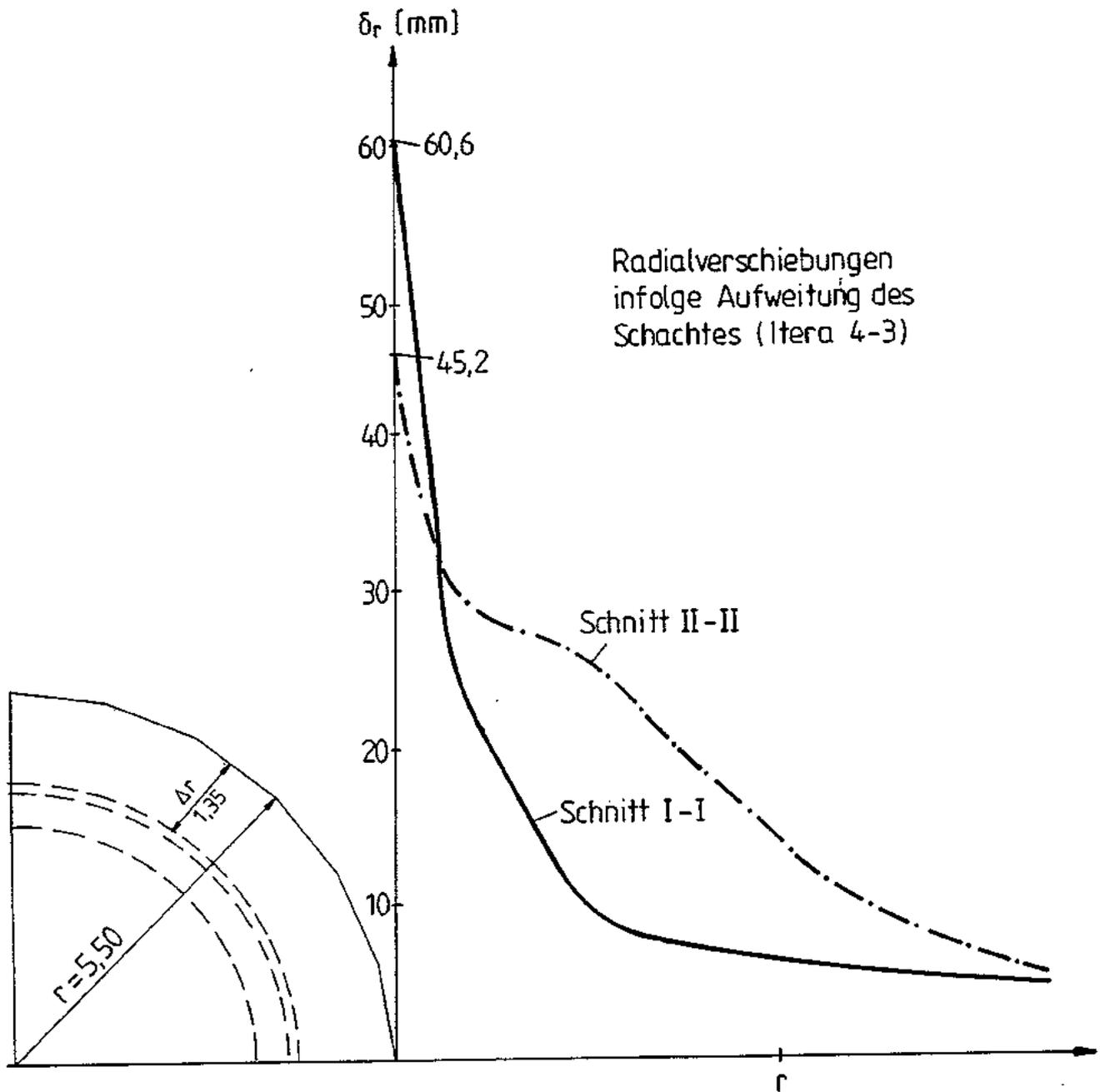
Hauptnormalspannungen Fall A3, Vergleich der Radialverschiebungen, Fälle A1 und A3(4.Rechenschritt)

| | |
|----------------------|------------|
| Schachtanlage Konrad | |
| Schachtverschluss | |
| Dec. 1989 | Anlage 7.2 |

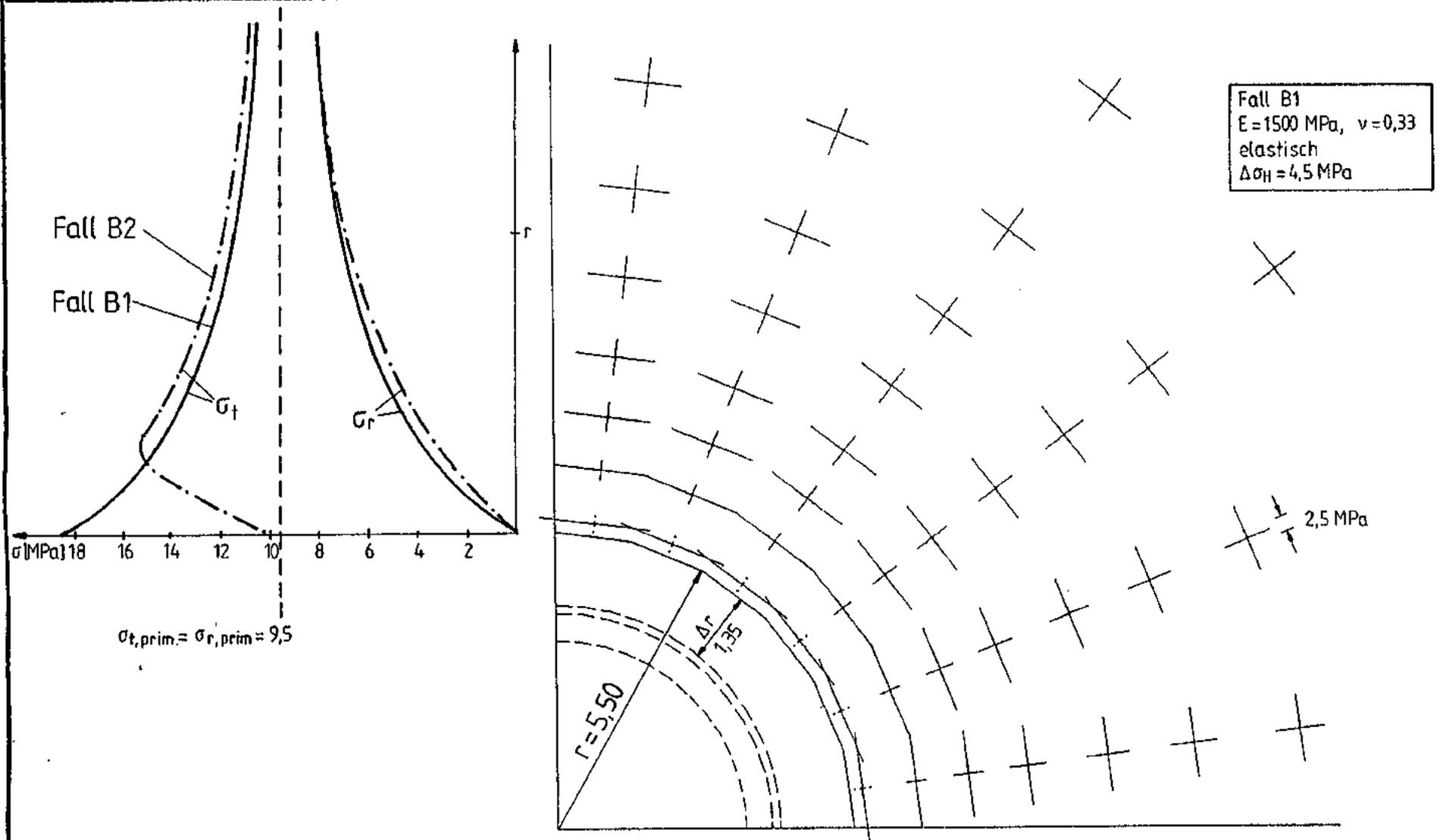


Fall A5
 $E = 1500 \text{ MPa}$, $\nu = 0,3$
 $\sigma_{gd} = 10 \text{ MPa}$
Klüfte $c = 0$, $\psi = 30^\circ$

Hauptnormalspannungen Fall A5, Vergleich der Radial- und Tangentialspannungen in 2 Schnitten (4. Rechenschritt)

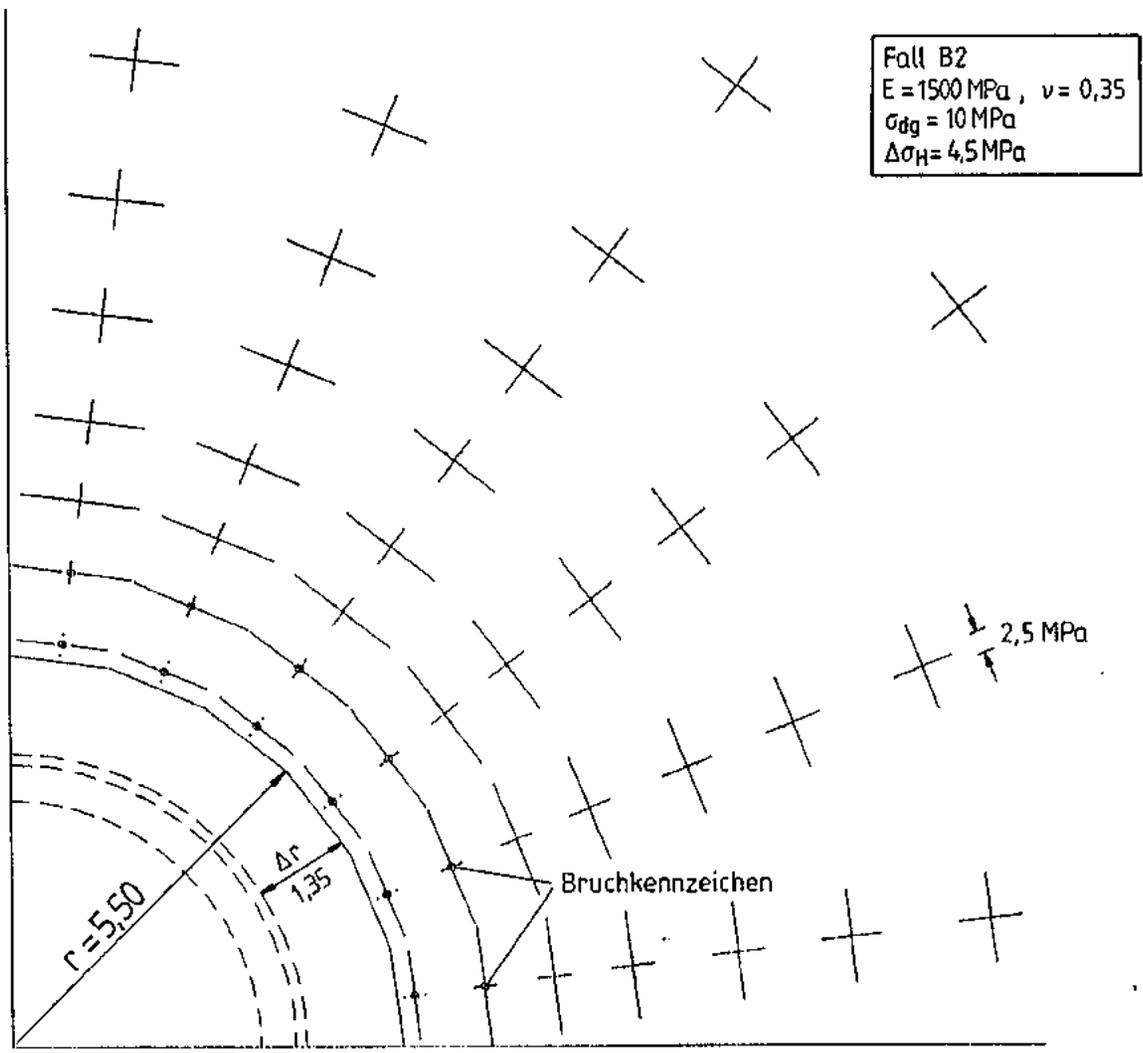
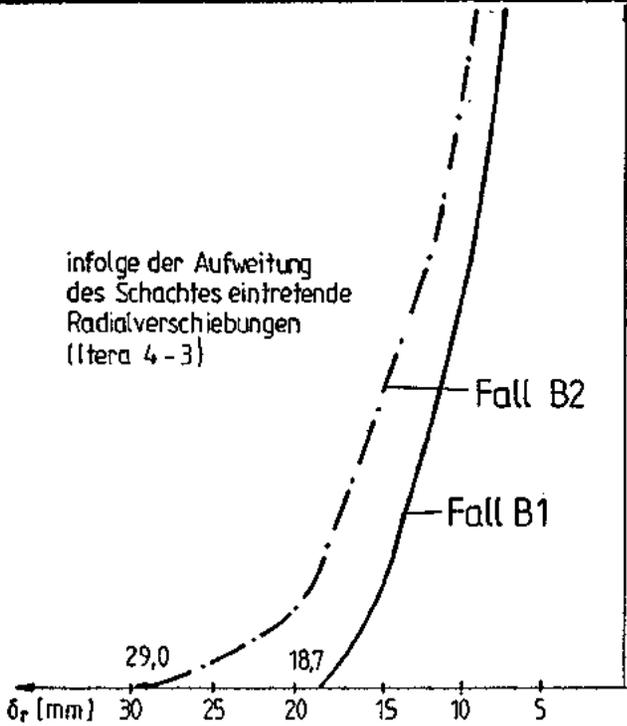


Fall A5, Verlauf der Radialverschiebungen in
2 Schnitten (4. Rechenschritt, Lage der Schnitte
vgl. Anlage 7.3)

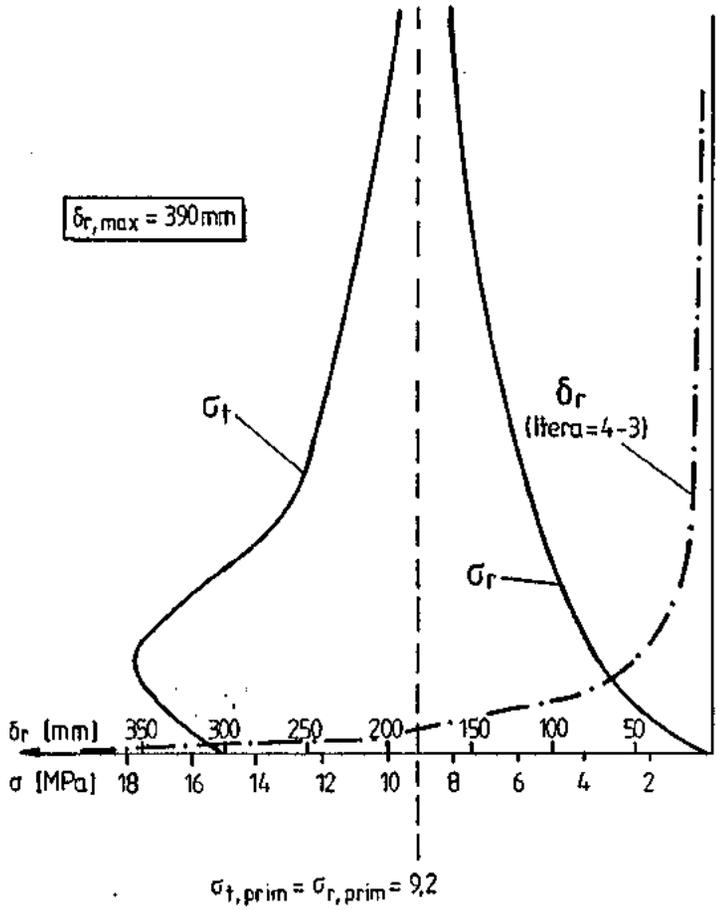


Hauptnormalspannungen Fall B1, Vergleich der Radial- und Tangentialspannungen Fälle B1 und B2 (4. Rechenschritt)

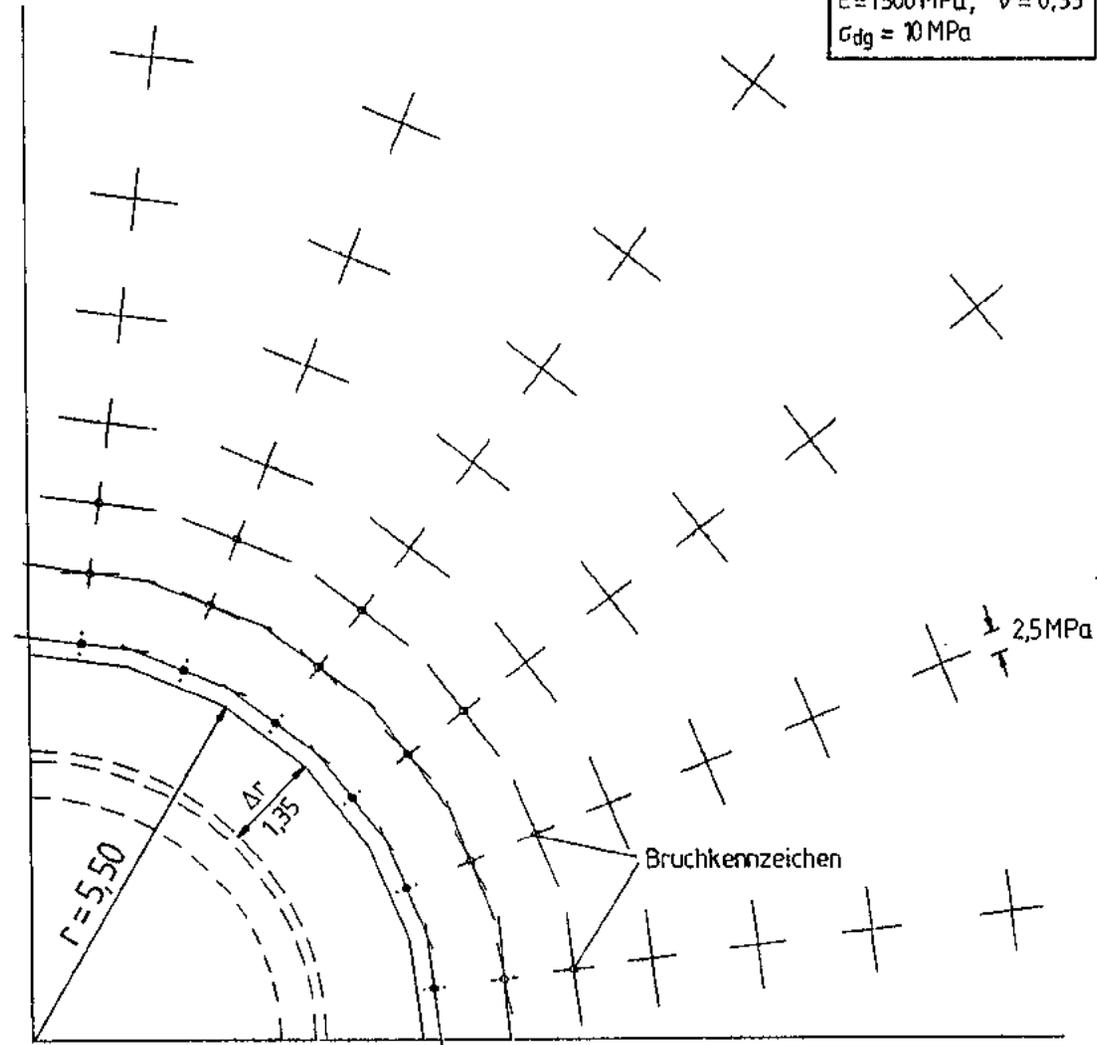
| | |
|----------------------|------------|
| Schachtanlage Konrad | Anlage 7.5 |
| Schachtverschluss | Dez. 1989 |



Hauptnormalspannungen Fall B2, Vergleich der Radialverschiebungen Fälle B1 und B2 (4. Rechenschritt)



Fall C1, H_ü = 765 m
 E = 1500 MPa, $\nu = 0,33$
 $\sigma_{dg} = 10$ MPa

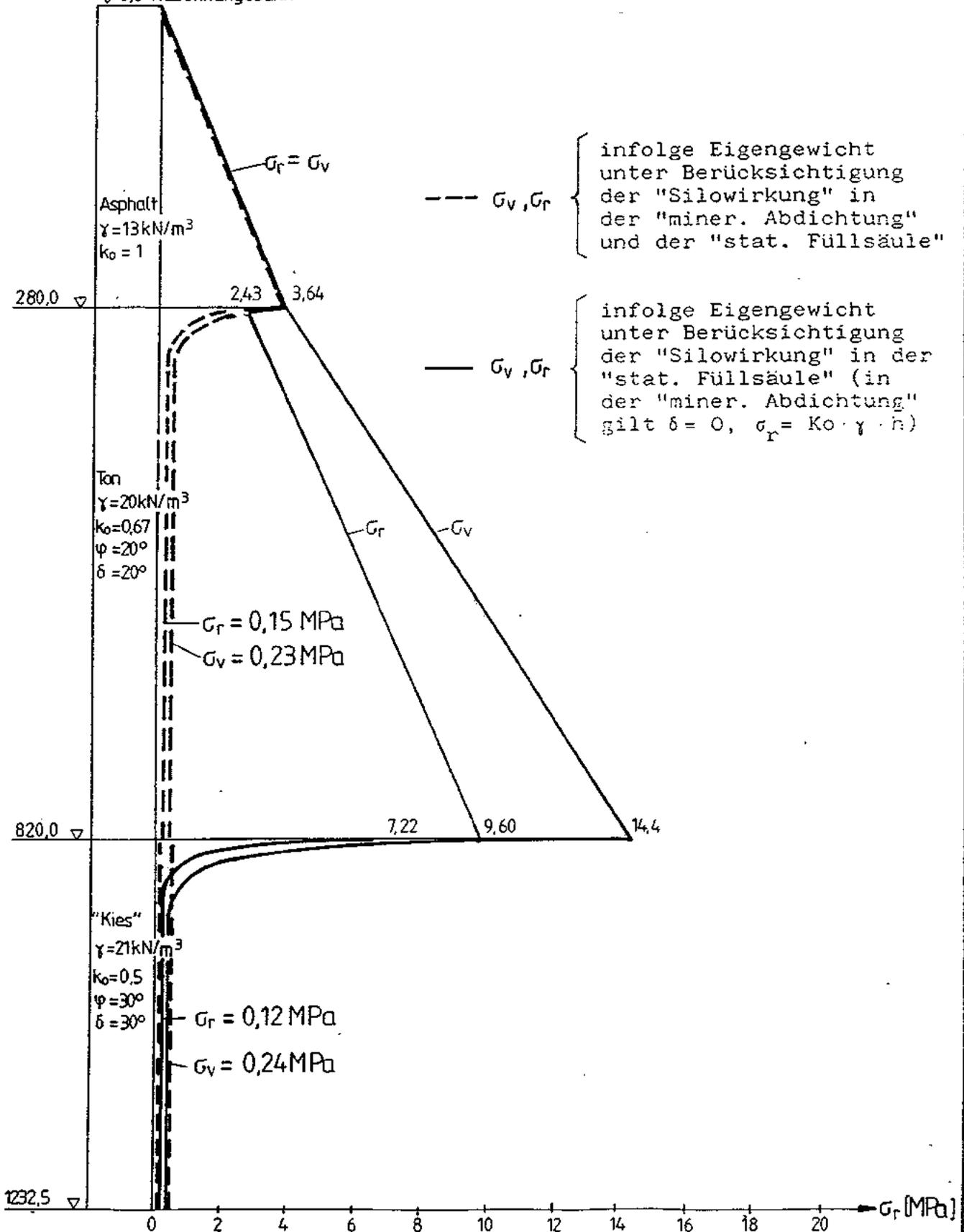


Hauptnormalspannungen Fall C1, Verlauf der Radial- und Tangentialspannungen sowie der Radialverschiebungen (4. Rechenschritt)

| | |
|----------------------|------------|
| Schachtanlage Konrad | Anlage 77 |
| Schachtverschluss | Dez. 1989. |

Konrad I

▽ 0,0 Rasenhängebank



Beispielhafte Darstellung der in der Füllsäule herrschenden Radial- und Vertikalspannungen