

Technische Universität Hannover
Institut für Unterirdisches Bauen

Welfengarten 1
3000 Hannover 1

Projektbezogene numerische Berechnungen
zur Bohrlochstandsicherheit der
Bohrungen des KTB

D. Zander-Schiebenhöfer
R. B. Rokahr
K. H. Lux



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Veranlassung.....	19
1. Problemstellung.....	19
2. Vorgehensweise.....	23
3. Berechnungsergebnisse.....	24
3.1 Ergebnisse anhand des rotationssymmetrischen Berechnungsmodells.....	24
3.1.1 Berechnungsgrundlagen.....	24
3.1.2 Durchführung der Berechnungen.....	25
3.1.3 Ergebnisse.....	26
3.2 Ergebnisse infolge der Parametervariations- rechnungen anhand des ebenen Scheibenmodells..	26
3.2.1 Berechnungsgrundlagen.....	27
3.2.2 Durchführung der Berechnungen.....	27
3.3 Ergebnisse der Fallstudie für die Vorbohrung im Teufenbereich 600 m.....	32
3.3.1 Berechnungsgrundlagen.....	33
3.3.2 Durchführung der Berechnungen.....	34
3.3.3 Berechnungsergebnisse.....	34
4. Zusammenfassung.....	35
5. Ausblick.....	36
6. Literaturverzeichnis.....	36
7. Anlagen.....	39

Handwritten text, likely bleed-through from the reverse side of the page, is visible along the right edge.

VERANLASSUNG

Planung und Durchführung der Kontinentalen Tiefbohrung erfordern schon während der Phase der Vorbohrung eine intensive Prognose und Nachanalyse der Zustandsgrößen in dem bohrlochumgebenden Gebirgsbereich. Ziel des PL- Vorhabens :

Durchführung von projektbezogenen thermomechanischen Berechnungen für den bohrlochnahen Bereich der KTB unter Berücksichtigung von der Projektleitung aus der laufenden Bohrplanung entwickelten Randbedingungen

ist eine fortlaufende Berechnung, Auswertung und Bewertung der Zustandsgrößenverteilungen (Spannungen, Verschiebungen, Temperatur und des Porenflüssigkeitsdruckes) unter bohrungsrelevanten Beanspruchungsbedingungen und für projektbezogene Teufenbereiche.

1. PROBLEMSTELLUNG

Für die im Rahmen des KTB- Projektes abzuteufenden Bohrungen ist es aus unterschiedlichen Gesichtspunkten heraus von Interesse, den Spannungsverlauf und den dazugehörigen Verformungszustand im bohrlochnahen Gebirgsbereich im voraus zu untersuchen bzw. im nachhinein zu analysieren.

Aus der Sicht der Bohrtechnik ist es in erster Linie von Bedeutung, eine Beurteilung der Standsicherheit der Bohrung und eine Aussage über ihre zeitliche Gebrauchsfähigkeit (Nutzungsdauer) vorzunehmen. Im Hinblick auf die wissenschaftlichen Messungen im Bohrloch bzw. die Experimente im Labor an Gesteinsproben, die aus der Bohrung stammen, muß die Frage nach der Veränderung der Eigenschaften des Gesteinsverbandes bzw. des Gesteins im bohrlochnahen Gebirgsbereich infolge der Einwirkungen durch das Abteufen und den Betrieb der Bohrung beantwortet werden.

Im Einzelnen bedeutet dies, daß aus bohrtechnischer Sicht angestrebt wird, Bohrlochausbrüche, da sie in der Praxis nicht zu vermeiden sind, räumlich so begrenzt wie möglich zu halten und darüber hinaus zu gewährleisten, daß die Verformungen der Bohrlochwand während der geplanten Zeit der Bohrung eine ungehinderte Nutzung zulassen. Hinsichtlich der wissenschaftlichen Bohrloch- bzw. Laborexperimente wird eine möglichst geringe Störung des Primärzustandes des Gebirges gefordert.

Eine vorausschauende gebirgsmechanische Analyse des Bohrlochverhaltens bzw. der Bohrlochstandsicherheit, d.h. eine Untersuchung der sekundären Spannungs- und dazugehörigen Verformungszustände im bohrlochnahen Gebirgsbereich, muß daher in Abhängigkeit der Randbedingungen aus der Bohrtechnik untersuchen,

- wo es aufgrund der genannten Einwirkungen zu Bohrlochausbrüchen des Gebirges kommt (Spannungsnachweis),
- wie der zeitliche Verlauf der Bohrlochrandverformungen zu beurteilen ist und
- in welchem Maße der bohrlochnahe Gebirgsbereich in seinen Eigenschaften verändert, z.B. aufgelockert, wird (Zustandsbeschreibung).

Die Arbeiten innerhalb des PL- Vorhabens befassen sich daher mit der Untersuchung dieser gebirgsmechanischen Fragestellungen auf der Grundlage der numerischen Simulation des mechanischen Verhaltens im bohrlochumgebenden Gebirgsbereich anhand eines makroskopischen Berechnungsmodells. Im folgenden werden die Grundgedanken dieser gebirgsmechanischen Analyse kurz erläutert :

Makroskopische Versagenserscheinungen an der Bohrlochwand

Ergibt sich im bohrlochnahen Gebirgsbereich infolge der oben beschriebenen Einwirkungen ein Beanspruchungszustand, aufgrund dessen die Festigkeit des Gebirgsmaterials überschritten wird, so versagt das Gebirge, ausgehend von der Bohrlochwand, entweder im Zugspannungsbereich durch Ausbildung eines Zugrisses oder im Druckspannungsbereich durch Ausbildung eines Scherbruches. Dabei sind nach Abb.(1) - bei Annahme eines anisotropen Primärspannungszustandes - die folgenden grundsätzlichen, makroskopischen Versagensarten bzw. -orte denkbar :

1. Aufgrund von Zugspannungen in vertikaler Richtung bildet sich ein horizontaler Zugriß ausgehend von der Bohrlochwand aus.
2. Ebenfalls infolge von Zugspannungen kann in der Horizontalebene ein vertikaler Zugriß entstehen, der in Richtung der größeren horizontalen Hauptspannung (σ_H) orientiert ist, während
3. in Richtung der kleineren horizontalen primären Hauptspannung (σ_h) das Gebirge infolge Überschreitens der Druckfestigkeit durch Ausbildung eines Scherbruches versagt.

Das Auftreten von Zugrissen ist verbunden mit der Auflockerung des Gesteinsverbandes und dem Verlust von Bohrspülungsflüssigkeit. Im Bereich der Scherbruchzonen kommt es zu Bohrlochausbrüchen.

Beeinträchtigung des Gesteinsverbandes

Schon bevor sich makroskopische Scherbrüche ereignen, wird das Gefüge des betreffenden Bohrlochbereiches gestört. Dies geschieht z.B. durch eine verstärkte Mikrorißbildung, die eine Auflockerung des Gebirges zur Folge hat. In Laborversuchen kann diese verstärkt einsetzende Mikrorißbildung schon weit vor dem Erreichen der maximalen Bruchfestigkeit eines Prüfkörpers durch die verstärkt meßbaren akustischen Signale, die von der Gesteinsprobe während der Belastungsphase ausgesendet werden, nachgewiesen werden. Diese Beobachtung ist am Beispiel eines kristallinen Schiefers nach RUMMEL (1965) in Abb.(2) dargestellt. Für die geplanten wissenschaftlichen Experimente des KTB ist es daher von Interesse, nicht nur mögliche makroskopische Versagensbereiche zu beschreiben, sondern auch Zonen verstärkter Auflockerung des Gebirgsmaterials nachzuweisen.

Statische zeitunabhängige Beanspruchung des Gebirgsverbandes

Grundsätzlich wird das Gebirge mechanisch durch den wirksamen Gebirgsdruck (Differenzdruck zwischen primärem Gebirgsdruck und Spülungsdruck) sowie thermo- mechanisch durch die unterschiedlichen Temperaturen von Bohrspülung und Gebirge während des Bohrens beansprucht. Gegebenfalls muß eine mechanische Beanspruchung, die sich aus den unterschiedlichen Höhen des Bohrspülungs- und des Porenflüssigkeitsdruckes ergibt, berücksichtigt werden. Vernachlässigt werden im Rahmen einer allgemeinen Betrachtung zunächst Beanspruchungen des Gebirgsverbandes, die direkt aus dem Bohrbetrieb herrühren, wie z.B. das Schlagen des Gestänges gegen die Bohrlochwand oder die Spülungsdruckschwankungen während des Roundtrips.

Zeitabhängige thermomechanische Beanspruchung des Gebirgsverbandes infolge des Bohrbetriebs

Thermomechanisch sind für große Teufen zwei bohrbetrieblich bedingte unterschiedliche Phasen zu beachten, die sich zyklisch wiederholen :

1. Die während der Bohrphase ständig in der Bohrung zirkulierende Bohrspülung weist gegenüber dem Gebirge eine geringere Temperatur auf. Daraus folgt eine Abkühlung des Gebirges im Nahbereich der Bohrung durch Wärmeabgabe an die Spülung.
2. In der anschließenden Phase des Werkzeug- und Gestängewechsels (Roundtrip) steht die Spülung in der Bohrung. Der durch das Temperaturgefälle Spülung - bohrlochnahes Gebirge - bohrlochfernes Gebirge bedingte Wärme fluß führt dann zu einer Erwärmung der Spülung und einer Wiedererwärmung des bohrlochnahen Gebirgsbereiches.

Im Hinblick auf die Standsicherheit einer tiefen Bohrung stellt sich damit die Frage, ob diese thermisch bedingten, zyklisch wechselnden Spannungen überlagert mit dem durch den Bohrvortrieb bewirkten sekundären Spannungszustand schließlich zu einem Spannungszustand führen können, der auch Zugspannungen im Gebirge aufweist und somit ein Aufreißen der Bohrlochwand zur Folge haben kann.

Dabei muß gleichzeitig beachtet werden, daß sich die Festigkeit des Gesteinsverbandes infolge der zyklisch sich wiederholenden thermischen Beanspruchung abmindern kann (Ermüdungsfestigkeit).

Zeitabhängige Beanspruchung des Gebirgsverbandes infolge des Porenflüssigkeitsdruckes

Sofern der durchteufte Gesteinsverband ein System offener und miteinander verbundener Porenräume aufweist, die mit einer Porenflüssigkeit gefüllt sind, wird sich infolge der Wechselwirkung zwischen Bohrspülungsdruck und primärem Porenflüssigkeitsdruck in Abhängigkeit des Bohrspülungsdruckes ein zeitlich und räumlich veränderlicher Porenflüssigkeitsdruck im bohrlochumgebenden Gesteinsverband einstellen. Diese Porenflüssigkeitsdruckverteilungen sind in erster Linie abhängig von der Größe und den zeitlichen Schwankungen des Bohrspülungsdruckes sowie den hydraulischen Eigenschaften des Gebirgsverbandes.

Neben einer mechanischen Einwirkung des veränderlichen Porenflüssigkeitsdruckes auf die Zustandsgrößenverteilung in der Gesteinsmatrix ist in bezug auf die Beurteilung der Standsicherheit der Bohrung die Frage nach der Abminderung der vorhandenen Festigkeit des Gesteinsverbandes infolge eines veränderten Porendruckes zu klären. Im Sinne der Abb.(3) nach KESSELS (1987) wird davon ausgegangen, daß eine Verminderung des Porenflüssigkeitsdruckes eine stabilisierende Wirkung auf das Gebirge hat, da bei gleichbleibender Beanspruchung des Gebirges, gekennzeichnet durch die deviatorische Spannung σ_D , der sich ergebenden mittleren Spannung ($\sigma_m - p_0$) eine relativ höhere vom Gebirge aufnehmbare Beanspruchung zugeordnet ist.

Entscheidend für eine derartige Beurteilung des Gebirgszustandes ist die Kenntnis der makroskopischen Gesteinsfestigkeit in Abhängigkeit vom Porenflüssigkeitsdruck und von der mittleren Spannung σ_m , wie sie in Abb.(3) nach KESSELS (1987) als grundsätzlich 'negativ stabilisierend' bzw. 'positiv stabilisierend' klassifiziert werden.

Überprüfbarkeit der Berechnungen

Die Qualität und die Anwendbarkeit derartiger numerischer Berechnungen muß darüber hinaus auch anhand der Ergebnisse aus den Bohrlochmessungen der KTB- Vorbohrung überprüft werden

(Verifizierung der Berechnungsergebnisse). Im wesentlichen sind hier die Ergebnisse der Kaliberlogs und der Drill- Stem-Teste (DST) angesprochen.

2. VORGEHENSWEISE

Im 1. Abschnitt der Bearbeitung des PL- Vorhabens wurde zunächst exemplarisch für die Teufe von 10 km die Auswirkung der thermisch induzierten Spannungsänderungen auf den sekundären Spannungszustand im bohrlochnahen Gebirgsbereich untersucht. Hierbei wurde ein Berechnungsmodell gewählt, das das Bohrloch und das umgebende Gebirge als eine rotationssymmetrische Kreisringscheibe im ebenen Verzerrungszustand (EVZ) abbildet. Die Art der Modellbildung ist in Abb.(4) skizziert.

Aufbauend auf den Ergebnissen des 1. Bearbeitungsabschnittes wurde im 2. Abschnitt eine umfassendere Analyse des sekundären Spannungszustandes im bohrlochnahen Bereich des Gebirges für eine Teufe von 10 km vorgenommen. Dabei wurden die wesentlichen in die Berechnung eingehenden Einflußgrößen nach Tab.(1) in einer realistischen Bandbreite variiert, um ihre Auswirkung auf den Beanspruchungszustand des Gebirges beurteilen zu können. Zur Durchführung dieses Bearbeitungsabschnittes war auch eine veränderte Annahme des Berechnungsmodells notwendig, damit auch in der Horizontalebene zur Bohrlochachse anisotrope Primärspannungszustände berücksichtigt werden konnten. Daher wurde das Bohrloch und der umgebende Gebirgsbereich durch eine Scheibe im EVZ, wie in Abb.(5) angedeutet, abgebildet.

Darüber hinaus war es das Ziel des 2. Bearbeitungsabschnittes, die berechneten Spannungsverteilungen in bezug auf mögliche Versagenzustände bzw. -zonen sowie Auflockerungsbereiche des Gebirgsverbandes auszuwerten, um damit den Einfluß des jeweiligen variierten Parameters auf den Zustand im bohrlochnahen Gebirgsbereich zu veranschaulichen. Dazu mußte zunächst ein Kriterium zur Identifizierung derartiger kritischer Bereiche aufgestellt werden. Dieses Kriterium sollte auch einen Porenflüssigkeitsdruck innerhalb des Gebirges mit einbeziehen.

Der zunächst als zeitlich und räumlich konstant angesehene Porenflüssigkeitsdruck sollte im 3. Abschnitt der Bearbeitung nicht nur als räumlich mit der betrachteten Gebirgstiefe sondern auch als zeitlich in Abhängigkeit von dem Bohrspülungsdruck veränderlich angesehen werden. Dazu war eine gekoppelte Berechnung der mechanischen und der hydraulischen Zustandsgrößen notwendig. Diese Berechnungen wurden auf einen Teufenbereich von 600m bezogen, da zu dem betreffenden Zeitpunkt für diesen Teufenbereich schon Kaliberlogauswertungen aus der KTB- Vorbohrung vorlagen. Es ergab sich daher die Möglichkeit der Gegenüberstellung von Berechnungsergebnissen und Bohrlochmessungen.

Zur Ermittlung der Spannungs-, der Temperatur- und der Porenwasserdruckverteilung im bohrlochnahen Gebirgsbereich wurde als Berechnungsmethode die Methode der Finiten Elemente (FEM) angewendet. Die Wahl der Berechnungsgrößen wurde, sofern keine genaueren Daten aus der Vorbohrung vorlagen, bewußt konservativ getroffen, um die sich ergebenden Auswirkungen auf den sekundären Spannungszustand deutlich zu machen.

3. BERECHNUNGSERGEBNISSE

3.1 Ergebnisse anhand des rotationssymmetrischen Berechnungsmodells

Mit dem Ziel der qualitativen wie quantitativen Abschätzung der thermisch induzierten Spannungsänderungen im Nahbereich der KTB- Tiefbohrung wurde ein einfaches Berechnungsmodell gewählt, das das Bohrloch und das umgebende Gebirge durch eine rotationssymmetrische Kreisringscheibe mit kreisrundem Loch unter Innendruck abbildet.

Den Berechnungen wurde ein Temperaturwechselintervall mit einer Abkühlungsphase von 2 Tagen und einer darauffolgenden Wiedererwärmungsphase von ebenfalls 2 Tagen zugrunde gelegt. Die Temperaturdifferenz zwischen Bohrspülung und Gebirge wurde mit $\Delta T = 150 \text{ K}$ gewählt.

3.1.1 Berechnungsgrundlagen

Für eine Teufe von 10 km wurden die folgenden Annahmen getroffen :

- Primärspannungszustand :
 - + $S(V) = -250.0 \text{ MPa}$
 - + $S(H) = -250.0 \text{ MPa}$
 - + $S(h) = -250.0 \text{ MPa}$
- Bohrlochinnendruck $P_i = 100.0 \text{ MPa}$
- Annahmen zu den stofflichen bzw. mechanischen Eigenschaften des Gebirges :
 - + linear elastisches Materialverhalten
 - + Homogenität und Isotropie
 - + Poissonzahl $\nu = 0.25$

- + Elastizitätsmodul $E = 80.0 \text{ GPa}$
- thermische Materialeigenschaften des Gebirges :
 - + Temperatureausdehnungskoeffizient $\alpha_T = 15.0 \cdot 10^{-6} \text{ (1/K)}$
 - + Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 2.14 \text{ (W/m/K)}$
 - + spezifische Wärmespeicherkapazität $c_p = 2.09 \cdot 10^6 \text{ (Ws/ m}^3 \text{ /K)}$
- thermische Randbedingungen :
 - + Temperaturdifferenz $\Delta T = 150.0 \text{ (K)}$
 - + Anfangstemperaturzustand des Gebirges $t = 0 \text{ Tage}$
 $T = 593 \text{ (K)}$
 - + Abkühlungsintervall $0 \text{ Tage} < t < 2.0 \text{ Tage}$
 - + Bohrlochwand $T = 443 \text{ (K)}$
 - + Außenrand des Modells Radius $r = 10 \text{ m} : T = 593 \text{ (K)}$
 - + Wiedererwärmungsintervall $2.0 \text{ Tage} < t < 4.0 \text{ Tage}$
 - + Außenrand des Modells Radius $r = 10 \text{ m} : T = 593 \text{ (K)}$

Die geometrischen Abmessungen und die Diskretisierung des gewählten Finite- Element- Modelles BM-10-1 sind in Abb.(6) wiedergegeben.

3.1.2 Durchführung der Berechnungen

Grundlage für die durchgeführten Untersuchungen war eine instationäre Berechnung der zeitlichen Temperaturverteilungen für das Berechnungsmodell BM-10-1. In Abb.(7) sind diese Temperaturverteilungen im Horizontalschnitt 1-1 durch das Berechnungsmodell für die Zeitintervallstützpunkte :

- $t = 0 \text{ Tage}$ (Ausgangszustand / Beginn der Abkühlungsphase)
- $t = 2 \text{ Tage}$ (Ende der Abkühlungsphase / Beginn der Wiedererwärmungsphase)
- $t = 4 \text{ Tage}$ (Ende der Wiedererwärmungsphase)

aufgezeigt.

3.1.3 Ergebnisse

Aus den Darstellungen der zeitlichen Entwicklung der sekundären Spannungverteilungen im Horizontalschnitt 1-1 durch das Berechnungsmodell können die folgenden wesentlichen Erkenntnisse gezogen werden :

1. Direkt an der Bohrlochwand (Knotenpunkt 255) ergeben sich für die Vertikalspannung σ_z (Abb.(8)) und die Umfangsspannung σ_φ (Abb.(9)) Betragsänderungen in Höhe von nahezu $\Delta\sigma = 240$ MPa. Ein Vergleich mit der für die gegebenen Randbedingungen nach STEPHENS et al (1982) in Gl.(1) ermittelten analytischen Lösung für die Umfangsspannung σ_φ läßt eine gute Übereinstimmung erkennen.

$$\Delta\sigma_\varphi = \frac{\alpha_1 \cdot E \cdot \Delta T}{1 - \nu} = \frac{1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 80000 \cdot 150}{1 - 0,25} = 240,0 \text{ MPa} \quad (1)$$

2. In der Abkühlungsphase wird der bohrlochnahe Gebirgsbereich, der zunächst allein durch den wirksamen Gebirgsdruck infolge des Unterschiedes zwischen den Primärspannungen und dem Bohrlochinnendruck belastet ist, aufgrund der thermisch induzierten Zugspannungen deutlich entlastet. Als Maß für die Höhe der Beanspruchung des Gebirges kann dabei zunächst vereinfachend der Betrag der deviatorischen Spannung $\sigma_D = \sqrt{2 J_2^D}$ angenommen werden, wie sie in Abb.(10) im Schnitt 1-1 dargestellt ist. Über den gesamten Bereich des Berechnungsmodells verbleibt das Gebirge im Druckspannungsbereich. Diese Aussage gilt jedoch zunächst nur für den hier betrachteten Fall.
3. Bei bestimmten Kombinationen von Bohrlochinnendruck und Primärspannungen einerseits und des Unterschiedes zwischen Bohrspülungstemperatur und der Primärtemperatur des Gebirges andererseits erscheinen Zugspannungen, ausgehend von der Bohrlochwand in Umfangsrichtung φ und Vertikalrichtung z , im Bereich des Möglichen zu liegen.

3.2 Ergebnisse infolge der Parametervariationsrechnungen anhand des ebenen Scheibenmodells

Da für die weiteren Berechnungen auch unterschiedliche, in der Horizontalebene zur Bohrlochachse anisotrope Primärspannungszustände berücksichtigt werden sollten, mußte ein verändertes Berechnungsmodell gewählt werden. Das Bohrloch und der umgebende Gebirgsbereich wurden daher durch eine Scheibe im ebenen Verzerrungszustand (EVZ) abgebildet. Die gewählte Diskretisierung des Finite- Element- Modells ist in den Abb.(11)

(Gesamtdarstellung) und Abb.(12) (Ausschnittsdarstellung) dargestellt.

3.2.1 Berechnungsgrundlagen

Für die Teufe von 10 km wurden übereinstimmend mit Kapitel 3.1.1. die folgenden stofflichen, mechanischen und thermischen Eigenschaften bzw. Randbedingungen angenommen :

- linear elastisches Spannungs- Dehnungsverhalten,
- Homogenität und Isotropie des Gebirgsmaterials,
- Elastizitätsmodul $E = 80\ 000\ \text{MPa}$,
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 2.14\ \text{W/m /K}$,
- spezifische Wärmekapazität $c_p = 2.09 \cdot 10^6\ \text{Ws/ m}^3\ \text{/K}$
- thermische Randbedingungen sowie der zeitliche Temperaturverlauf entsprechend Kap. 3.1.1.

Die geometrischen Abmessungen des Berechnungsmodells und die Wahl der Verschiebungsrandbedingungen sind Abb.(11) zu entnehmen.

3.2.2 Durchführung der Berechnungen

Die durchgeführten Parametervariationen setzten sich zusammen aus :

1. der Variation des Primärspannungszustandes $\underline{\sigma^P}$,
2. der Variation des Bohrspülungsdruckes p_i ,
3. der Variation der Poissonzahl ν ,
4. der Variation des spezifischen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T und
5. der Variation des Unterschiedes zwischen der Temperatur der Bohrspülung und der primären Gebirgstemperatur ΔT .

Auf eine Variation des Elastizitätsmoduls E wurde verzichtet, da anhand der analytischen Formel nach STEPHENS et al. (1982) dieser Parameter einen linearen Einfluß auf die zu berechnenden Zustandsgrößen hat, und da bereits der Einfluß der in gleicher Weise linear eingehenden Parameter α_T , spezifischer Wärmeausdehnungskoeffizient, und ΔT , Temperaturunterschied, einbezogen wurden. Die Größe und die Variationsbreite der untersuchten Berechnungsparameter sind in Tab. (1) angegeben.

Während die Berechnungen des vorausgegangenen Abschnittes allein der quantitativen Abschätzung der thermisch bedingten Spannungsänderungen im bohrlochnahen Gebirgsbereich dienen, so sollten für die hier beschriebenen Berechnungen auch mögliche Versagensbereiche des bohrlochumgebenden Gebirges angegeben werden (unter Beachtung der Annahmen: ideale Elastizität, Homogenität und Isotropie).

Bewertungskriterien

Bei der Bewertung der numerischen Berechnungsergebnisse hinsichtlich der Standsicherheit der Bohrung wurde von den im folgenden erläuterten und in Abb.(13) dargestellten Kriterium zur Identifizierung von Bruch- und Auflockerungsbereichen ausgegangen :

1. Für das Versagen des Gebirgsmaterials im Zugbereich (Ausbildung makroskopischer Zugrisse) wurde angenommen, daß
 - (a) das Gebirgsmaterial keine Zugfestigkeit besitzt und daß
 - (b) genau dann eine Zugbeanspruchung des Gebirges gegeben ist, wenn eine der 3 Hauptspannungen größer ist als der Porenflüssigkeitsdruck (Druckspannungen negativ).
2. Ein Versagen des Materials im Druckspannungsbereich (Vorbedingung für Bohrlochausbrüche) tritt ein, wenn die errechnete Beanspruchung eine im Labor gemessene aufnehmbare Beanspruchung des Materials überschreitet. Als Maß der Beanspruchung wird ein 'vertikaler' Ausnutzungsgrad η_v berechnet, der sich aus dem Verhältnis der berechneten deviatorischen Spannung σ_D zu der gemessenen möglichen Deviatorspannung $\sigma_{D,Bruch}$ in Abhängigkeit von der mittleren Spannung σ_m und dem Porenflüssigkeitsdruck p_0 ergibt. Diese Definition des Ausnutzungsgrades η_v ist in Abb.(14) skizziert.
3. Auflockerungserscheinungen des Gebirgsmaterials ergeben sich schon bei Beanspruchungszuständen weit vor dem Auftreten des makroskopischen Bruches, wie sich anhand von 'Acoustic- Emission'- Messungen an Gesteinsprüfkörpern z.B. während eines Kompressionsversuches im Labor nachweisen läßt (s.Abb.(2)). Danach werden schon bei Beanspruchungszuständen weit vor dem Erreichen des makroskopischen Bruches verstärkte akustische Intensitäten gemessen, die als ein Merkmal für die Bildung von Mikrorissen gelten und damit eine Auflockerung des Materials anzeigen.

Grundsätzlich ist hinzuzufügen, daß diese Versagensbereiche an stationären Berechnungsmodellen ermittelt wurden. Im Prinzip

müßte bei einer schrittweise aufgebrachten Beanspruchung im Falle des ersten Auftretens eines makroskopischen Versagens das kontinuumsmechanische Modell geändert werden und diese Vorgehensweise bis zur vollständig erreichten Beanspruchung wiederholt werden. Dabei wäre das mechanische Verhalten dieser Versagensbereiche in geeigneter Weise zu berücksichtigen. D.h. mit den hier durchgeführten Berechnungen können nur Bereiche identifiziert werden, in denen eine entsprechende Versagensart des Materials auftreten wird; über die genaue örtliche Ausdehnung können jedoch keine Aussagen getroffen werden.

Kriterium zur Identifizierung kritischer Gebirgsbereiche

Der nachfolgenden Beurteilung der Berechnungsergebnisse liegen darüber hinaus die folgenden Annahmen zugrunde :

1. Für das Kriterium der Identifizierung der Zugrißbereiche wurde vorausgesetzt, daß über den gesamten Bereich des Berechnungsmodells ein konstanter Porenflüssigkeitsdruck besteht, der in einem bestimmten Verhältnis zum Bohrspülungsdruck steht.

$$P_0 = k \cdot P_i$$

mit P_0 : Porenflüssigkeitsdruck

k : Faktor, der die Größe des Porenflüssigkeitsdruckes in Abhängigkeit vom Bohrspülungsdruck angibt; (2)
 $k = [0,0 \dots 1,0]$

P_i : Bohrspülungsdruck

Zunächst wurde $k = 1$ angenommen.

2. Bei der Beurteilung des Versagens im Druckspannungsbereich wurden die Versuchswerte von Westerly-Granite nach HEUZE (1983) angenommen, wie sie in Abb.(15) dargestellt sind.
3. Die Umrechnung dieser Versuchsergebnisse nach HEUZE (1983) in die $\sigma_D / (\sigma_m - p_0)$ -Ebene (mit $p_0 = 0$) ergibt die Bruchhüllkurve in Abb.(15). Die aus der Berechnung ermittelten Beanspruchungszustände des Gebirges lassen sich ebenfalls in dem $\sigma_D / (\sigma_m - p_0)$ -Diagramm darstellen. Ein nach Abb.(14) definierter und berechneter Ausnutzungsgrad η_V gibt dann an, bis zu welchem Grad das Material beansprucht wird bzw. in wie weit das Material sich im Zustand verstärkter Mikrorißbildung bzw. Auflockerung befindet.

Mangels entsprechender Versuchsergebnisse für kristallines Gestein orientiert sich die Auswertung der Berechnungsergebnisse zunächst an einem Versuchsergebnis an granitischem Schiefer nach RUMMEL (1965). Danach

ergeben sich verstärkte Mikrorißbildungen bei einem Ausnutzungsgrad von $\eta_v \geq 60-70 \%$.

Auswertung der Berechnungen

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien und Annahmen sind die Zustandsgrößenverteilungen für alle Berechnungsfälle nach Tab.(1) zu den Zeitpunkten $t= 0, 2, 4$ Tage in Form des Ausnutzungsgrades η_v ausgewertet worden. Diese Ausnutzungsgrade wurden in einer Isoliniendarstellung für die Horizontalebene zur Bohrlochachse dargestellt. Dabei wurde zunächst ein über den gesamten Gebirgsbereich konstanter Porenflüssigkeitsdruck in Höhe des Bohrspülungsdruckes angenommen.

Veranschaulichung der Bewertung der Untersuchung an einem exemplarischen Beispiel

Anhand des Berechnungsfalles p3e nach Tab.(1) soll die Art der Auswertung der Berechnungen exemplarisch erläutert werden. Bei diesem Berechnungsfall wurde ein anisotroper Primärspannungszustand angenommen. Die Wahl der Variationsparameter findet sich in Tab.(1).

Im Hinblick auf die Identifizierung makroskopischer Bruchbereiche ergibt sich anhand der Isoliniendarstellung von η_v in Abb.(16), daß bei der angenommenen Festigkeitshypothese für das Gebirge keine Bereiche makroskopischer Scherbrüche vorausgesagt werden können. In den betreffenden Gebirgsbereichen, in denen das Auftreten dieser Scherbrüche zunächst vermutet werden kann, treten zuerst Zugrisse auf (Abb.(17)). Diese Zugrisse erstrecken sich am Anfang des untersuchten Zeitintervalls $t= 0$ Tage (=Zustandberechnung ohne Berücksichtigung des Temperatureinflusses) und am Ende der Wiedererwärmungsphase $t= 4$ Tage auf Gebirgsbereiche direkt hinter der Bohrlochwand in einem Winkel zwischen σ_H - Richtung und 45° zur σ_H - Richtung. Am Ende der Abkühlungsphase $t= 2$ Tage ist dieser Zugrißbereich ringförmig um das Bohrloch ausgebildet.

Auflockerungen des Gesteinsverbandes ergeben sich in einem relativ schwach ausgeprägten Bereich direkt hinter der Bohrlochwand in σ_h - Richtung für die Zeitpunkte $t=0$ und 4 Tage.

Für das gesamte Zeitintervall bedeutet dies, daß sich im Verlauf des Abkühlungszeitraumes ringförmig um das Bohrloch verteilt Zugrisse auftreten, die sich in Richtung der kleineren horizontalen Hauptspannung σ_h im Verlauf des Wiedererwärmungsintervalles wieder schließen. In einer weitergehenden Bewertung der Bohrlochstandsicherheit müßte daher untersucht werden, in welcher Richtung diese Zugrisse orientiert sind und ob ein kombiniertes makroskopisches Scherriß- / Zugrißkriterium Anzeichen für das Eintreten von Bohrlochausbrüchen gibt. Darüber hinaus müßten bei der

Berechnung der Ausnutzungsgrade η_v die instationären Porenflüssigkeitsdruckverteilungen, die sich aufgrund eines zeitlich veränderlichen Bohrspülungsdruckes ergeben, berücksichtigt werden. Diese instationären Porenflüssigkeitsdruckverteilungen könnten dann zunächst im Voraus zur Berechnung der mechanischen Zustandsgrößen ermittelt werden.

Die derzeitige Auswertung der Zustandsgrößenverteilung ergibt eine starke Beeinträchtigung des Gesteinsverbandes infolge von Zugrissen und Auflockerungen des Materials in unmittelbarer Bohrlochumgebung.

Zusammenfassende Beurteilung der Ergebnisse der Parametervariationen

Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse der durchgeführten Parametervariationen stichpunktartig zusammengefaßt. Eine umfassendere Bewertung und Interpretation der Berechnungsergebnisse ist im Zwischenbericht zum PL- Vorhaben (ZANDER-SCHIEBENHÖFER et al (1987)) gegeben.

1. Für die untersuchten Primärspannungszustände lassen sich unter den angegebenen Berechnungsannahmen, insbesondere bei den zugrunde gelegten Festigkeitskennwerten des Gebirgsmaterials, ohne Berücksichtigung des Porenflüssigkeitsdruckes für eine Teufe von 10 km und einen Bohrlochinnendruck von 100 MPa auf der Grundlage der Berechnungsergebnisse keine Bereiche vorhersagen, in denen sich makroskopische Scherrisse und damit Bohrlochausbrüche ereignen. Diese Feststellung unterstreicht die Wichtigkeit verlässlicher lokationsspezifischer Materialkennwerte.
2. Die Berücksichtigung des Porenflüssigkeitsdruckes p_0 in voller Höhe des Bohrlochinnendruckes führt zu einem höheren berechneten Ausnutzungsgrad des Gebirgsmaterials, da bei gleichbleibender deviatorischer Beanspruchung σ_D des Gebirges einer um p_0 verminderten mittleren Spannung σ_m ein vergleichsweise geringerer Wert der vom Material aufnehmbaren deviatorischen Spannung $\sigma_{D,Bruch}$ zugeordnet ist (s. Abb.(3)).

Daher muß, theoretisch betrachtet, auch eine Erhöhung des Bohrlochinnendruckes p_i nicht zwangsläufig zu einer Abminderung der mechanischen Beanspruchung an der Bohrlochwand führen.

3. Die Berücksichtigung des Porenflüssigkeitsdruckes p_0 führt bei der Beurteilung der Zustandsgrößen im bohrlochnahen Gebirgsbereich zur Vorhersage räumlich stärker ausgedehnter Zonen, in denen sich Zugrisse bilden. Diese Zugrißzonen sind vor allem am Ende der Abkühlungsphase (Zeitpunkt $t=2.0$ Tage) und für die untersuchten anisotropen Primärspannungszustände besonders

ausgeprägt.

4. Die Bewertung der Bildung möglicher Auflockerungsbereiche ist bei dem gewählten Kriterium nach Abb.(13) in besonderem Maße von der Verifizierung dieses Kriteriums anhand lokationsspezifischer Gesteine abhängig. Die Berücksichtigung eines Porenflüssigkeitsdruckes bei der Bewertung der Ausnutzungsgrade des Gebirgsmaterials beeinflusst auch die Ausdehnung und Lage dieser vorherzusagenden Auflockerungsbereiche erheblich.
5. Mit der Annahme einer Poissonzahl, die von dem Wert für inkompressibles Material ($\nu = 0.5$) abweicht, ist in der kontinuumsmechanischen Berechnung eine implizite Volumenänderung verbunden, die bei den hier untersuchten Berechnungsfällen vor allem zu einer unterschiedlichen Ausdehnung möglicher Zugrißzonen führt.
6. Die untersuchte Variationsbreite für die Parameter spezifischer Wärmeausdehnungskoeffizient und Temperaturunterschied führt bei Annahme einer betragsmäßigen Verminderung der Werte zum Abklingen des Einflusses der thermisch induzierten Spannungen und damit zu weniger stark ausgeprägten Zugrißzonen, wie auch anhand der analytischen Lösung nach STEPPHENS et al.(1982) abgeschätzt werden kann.

3.3 Ergebnisse der Fallstudie für die Vorbohrung im Teufenbereich 600m

Die bisher in der Vorbohrung des KTB durchgeführten Kalibermessungen zeigen, wie in Abb.(18) nach KESSELS (1988) dargestellt, nicht nur teilweise erhebliche Bohrlocherweiterungen, sondern auch für bestimmte Zeitintervalle ein kontinuierliches Anwachsen der Bohrlochquerschnitte. In Abb.(19) ist die Volumenentwicklung für den Teufenbereich von 500-700 m bezogen auf das durchschnittliche aufsummierte 25 m- Volumen im Zeitintervall vom 30/11/87 bis zum 21/01/88 nach KESSELS (1988) dargestellt.

Ziel dieser Berechnungen war es, zu untersuchen, ob es eine mechanische Erklärung für diese kontinuierlichen Bohrlocherweiterungen gibt. Dabei wurde von der im folgenden erläuterten Grundvorstellung ausgegangen, die durch Abb.(20) veranschaulicht wird :

Der zeitliche Verlauf des Bohrens bringt es mit sich, daß in zyklischer Wiederholung Bohrphase und die Phase des Werkzeug- und Gestängewechsels (Roundtrip) aufeinander folgen. Dadurch werden fortlaufende Spülungsdruckänderungen in der Bohrung verursacht :

- zum einen durch das Abschalten der Pumpen, die während der Bohrphase einen zusätzlichen Kopfdruck auf die

Spülungssäule aufgeben, und

- zum anderen durch den stoßweisen Aus- bzw. Einbauvorgang des Bohrgestänges (Kolbeneffekt).

Bei vorausgesetzter Porosität und hydraulischer Permeabilität des Gebirges unterliegt damit auch die Porenflüssigkeitsdruckverteilung im umgebenden Gebirge diesen zeitlichen Druckänderungen.

Die schlagartigen Spülungsdruckschwankungen könnten das Entstehen von Zugrissen bewirken, die dann im Zusammenwirken mit schon vorhandenen Fehlstellen des Gebirgsverbandes zu Bohrlochausbrüchen führen könnten. Wie in Abb.(21) skizziert ist es denkbar, daß durch das Zusammenwirken von schon vorher im Gesteinsverband vorhandenen radial zum Bohrloch orientierten verheilten Rissen mit den hydromechanisch induzierten und in Ringrichtung ausgebildeten Zugrissen sich einzelne Gesteinsbrocken lösen könnten. Nach Abb.(21) wirkt im Moment der schlagartigen Spülungsdruckabsenkung auf die in Ringrichtung orientierte Rissfläche der volle Porenflüssigkeitsüberdruck. Zur Veranschaulichung der Größenordnung der möglichen auftretenden Kräfte wurde in Abb.(21) eine einfache Abschätzung angegeben, die verdeutlicht, daß die hervorgerufenen Kräfte schon bei geringen Teufen und Rissabmessungen groß genug sein können, um die oben angesprochenen Materialfehlstellen wieder aufzubrechen und somit einen Gesteinsbrocken in das Bohrloch hinein zu drücken.

3.3.1 Berechnungsgrundlagen

Wie auch in den vorausgegangenen Bearbeitungsabschnitten wurde von dem linearen Elastizitätsverhalten, der Homogenität und der Isotropie des Gebirges ausgegangen. Elastizitätsmodul und Poissonzahl wurden mit $E = 80 \text{ GPa}$ bzw. $\nu = 0.25$ angesetzt. Der Primärspannungszustand wurde für die Teufe von 600m als isotrop mit $S(H) = S(h) = S(Z) = -16.8 \text{ MPa}$ angenommen. Der Spülungsdruck setzte sich aus den folgenden Anteilen zusammen :

- + Spülungsdruck infolge überlagernder Spülungssäule $P_i = 6.0 \text{ MPa}$ in 600m Teufe
- + Kopfdruck auf die Spülungssäule 4.0 MPa
- + Spülungsdruckschwankung infolge Gestängeziehens 2.0 MPa .

Danach ergeben sich die Spülungsdrücke während des Bohrens zu 10.0 MPa und direkt nach Spülungsende zu Beginn des Gestängeziehens zu 4.0 MPa .

Untersucht wurde ein Roundtripintervall von 3 Stunden mit einer Bohrphase von 144 Minuten und einer Roundtripzeit von 36 Minuten. Für den unmittelbar hinter der Bohrlochwand

liegenden Ringbereich des Gebirges wurde bis zu einer Tiefe von 1 cm eine um den Faktor 10 höhere Permeabilität angenommen (Annahme eines hydraulisch isolierenden Ringbereiches). Die hydraulischen Eigenschaften des Gebirges bzw. der Porenflüssigkeit orientieren sich an den Ergebnissen des 2. Drill- Stem- Testes in der Vorbohrung des KTB.

- + Porosität des Gesteinsverbandes $\phi = 1.0 \%$
- + Permeabilität des Gesteinsverbandes $k = 4.2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^{**2}$
- + Permeabilität des Gesteinsverbandes im Randbereich zum Bohrloch $k = 4.2 \cdot 10^{-18} \text{ m}^{**2}$
- + Speicherkoeffizient des Gesteinsverbandes $S = 3.7 \cdot 10^{-5} \text{ 1/MPa}$
- + spezifisches Gewicht der Porenflüssigkeit $\rho = 1.0 \text{ t/m}^{**3}$
- + Viskosität der Porenflüssigkeit $\eta = 10.0 \text{ mP}$

Durch das zugrunde gelegte Berechnungsmodell BM-10-3 wurde das Gebirge in gleicher Weise wie durch das in Kap.(3.2) verwendete Berechnungsmodell BM-10-2 idealisiert. Lediglich die geometrischen Werte wurden auf den in der Teufe von 600m geringeren Bohrllochdurchmesser von 6 Zoll abgestimmt.

3.3.2 Durchführung der Berechnungen

Auf der Grundlage der FEM wurde der mechanische Spannungszustand vor und nach dem Absenken des Spülungsdruckes berechnet. Die Verteilung der zeitlich veränderlichen Porenflüssigkeitsdrücke des Gebirge wurde ebenfalls anhand des Berechnungsmodells BM-10-3, jedoch in einer gesonderten Berechnung für das gesamte Bohrintervall von 0-3 Stunden ermittelt.

3.3.3 Berechnungsergebnisse

Die erwarteten Zugrißzonen lassen sich durch die numerischen Modellrechnung nachweisen. Interpretiert man die Spülungsdruckschwankungen als schlagartige Belastungsänderungen, so läßt sich in einem Vergleich der mechanischen Zustandsgrößen mit den Porenflüssigkeitsdrücken zum Zeitpunkt der Spülungsdruckabsenkung zeigen, daß im unmittelbaren Bohrlochrandbereich des Gebirges Zugrißbildungen hervorgerufen werden. Dabei wird als Bedingung für die Entstehung eines Zugrisses das Kriterium angewendet, daß die kleinste Hauptspannung im Gebirge kleiner sein muß als der an diesem Ort anstehende Porenflüssigkeitsdruck ($\sigma_1 < p_0$). (s.a.Kap.(3.2)).

Dieser Vergleich der kleinsten Hauptspannung des Gebirges mit den Porenflüssigkeitsdrücken p ist in Abb.(22) dargestellt. Danach können sich in einem Gebirgsbereich bis ca. 1 cm hinter der Bohrlochwand Zugrisse ereignen. Die sich

hieraus ableitenden Bohrlocherweiterungen sind um ein Vielfaches größer als die in der Vorbohrung beobachteten. Aufgrund der oben diskutierten Erläuterung einer möglichen zeitlichen Bohrlochausbruchsentwicklung ist es denkbar, daß nicht gleich beim ersten Lastzyklus dieser gesamte Bereich ausbrechen wird, vielmehr ist es wahrscheinlich, daß durch die fortlaufende Wiederholung von Spülungsdruckschwankungen eine Schwächung dieses Gebirgsbereiches stattfindet, die dann irgendwann im Zusammenwirken mit den oben genannten Fehlstellen zum Ausbruch eines Gesteinsbrockens führen kann.

Während der soeben geschilderte zeitliche Effekt schon in der bisher in der Vorbohrung des KTB erreichten Teufe zu beachten ist, so ist für die wesentlich größeren angestrebten Teufen der Hauptbohrung des KTB darüber hinaus die Überlagerung der thermisch induzierten Spannungen, die in Kap. 3.2. näher untersucht wurden, mit zu berücksichtigen.

Die vorgenommene Fallstudie erhebt keinen Anspruch auf eine umfassende und vollständige Untersuchung. Insbesondere das komplexe Zusammenwirken der genannten makroskopischen Effekte mit den mikroskopischen bleibt zu klären. Es ist denkbar, daß gerade durch dieses Zusammenwirken kontinuierliche Bohrlocherweiterungen stattfinden.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Anhand makroskopischer Berechnungsmodelle wurde der Versuch unternommen, eine Prognose für die Standsicherheit der Tiefbohrung des KTB abzugeben. Dabei müssen auch in bezug auf die Nutzung der Bohrung vor allem die Fragen nach

- dem Auftreten von Festigkeitsüberschreitungen des Gesteinsverbandes, die in Form von Scher- oder Zugrissen erscheinen,
- der zeitlichen Entwicklung der Bohrlochverformungen und
- dem Grad der Auflockerung des Gesteinsverbandes

beantwortet werden.

Auf der Grundlage des derzeitigen Standes der Arbeiten läßt sich festhalten, daß

- der Temperaturunterschied zwischen Bohrspülung und Primärtemperatur des Gebirges in großen Teufen zu einer verstärkten Zugrißbildung im unmittelbaren Bohrlochnahbereich des Gebirges beiträgt,
- die Berücksichtigung eines zeitlich und räumlich veränderlichen Porenflüssigkeitsdruckes im Gebirge einen wesentlichen Einfluß auf die Bewertung der

Standssicherheit bzw. des Zustandes des bohrlochnahen Gebirges hat und

- die Prognose der Standssicherheit der Bohrung ganz entscheidend von der Kenntnis realistischer Festigkeitsparameter sowie hydraulischer Eigenschaften des zu durchteufenden Gesteinsverbandes abhängt, was die Forderung nach der Durchführung derartiger Versuche an lokationsspezifischen bzw. an aus der Vorbohrung stammenden Gesteinsmaterial nachhaltig unterstreicht.

5. AUSBLICK

Die bisher durchgeführten numerischen Untersuchungen hatten das Ziel, Detailpunkte der Bohrlochstabilität genauer zu untersuchen. Dabei wurde im Rahmen des Vorhabens nicht der Anspruch auf Vollständigkeit der Untersuchungen gestellt. Vielmehr ergaben sich die einzelnen Bearbeitungsabschnitte aus der laufenden Arbeit bzw. Zusammenarbeit mit der KTB-Projektleitung.

Daher sind natürlich Bereiche offen geblieben, die ebenfalls einer gebirgsmechanischen Untersuchung unterzogen werden sollten. Stichpunktartig sollen hier im wesentlichen genannt werden :

- die Einbeziehung des dilatanten Verhaltens des Gesteinsverbandes während des Belastungsvorganges,
- der Einfluß dieser Dilatanz auf die hydraulischen Eigenschaften,
- die Durchführung einer vollständig gekoppelten mechanisch- hydraulischen Berechnung,
- die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus numerischen Berechnungen und Bohrlochmessungen.

In bezug auf den Detailpunkt 'Vergleich mit Bohrlochmessdaten' bleibt anzumerken, daß zum gegenwärtigen Zeitpunkt im Rahmen des Vorhabens eine Datenbank aufgebaut wird, die es ermöglicht, ausgewählte Bohrbetriebsdaten mit den gemessenen Bohrlochvolumina und deren zeitlicher Entwicklung zu korrelieren.

6. LITERATURVERZEICHNIS

HEUZE, F.E.: High- Temperature Mechanical, Physical and Thermal Properties of Granitic Rocks- A Review. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.

Abstr., Vol.20, No.1, pp3-10, 1983.

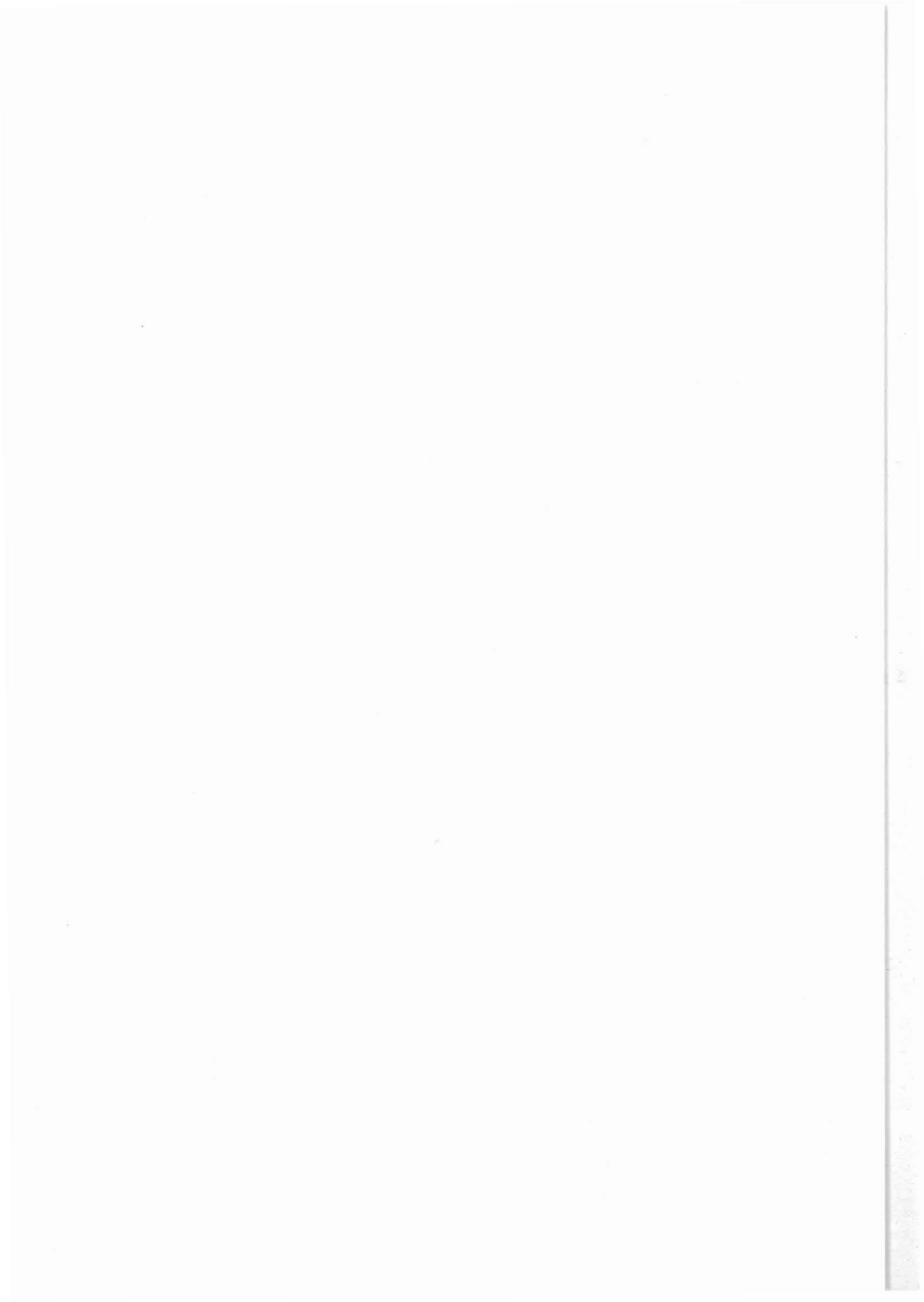
KESSELS.W: Persönliche Mitteilungen, 1987.

KESSELS.W: in KTB REPORT 88-4, Kap 8.4, '8 Zwischenberichte der KTB- PL, Bohrlochgeophysik, 8.4 Bohrlochstabilität', 1988.

RUMMEL,F.: Geräuschemessungen zur Untersuchung der Verformungen in Gesteinsproben bei einachsiger Belastung, Technische Mitteilungen 65/1, Gebirgsmechanik, Gesellschaft für angewandte Geophysik, 1965.

STEPHENS,G. und VOIGHT,B.: Hydraulic Fracturing Theory For Conditions ' of Thermal Stress. Int. Journ. of Rock Mech. Min. Sci.& Geomechanical Abstr., Vol.19, p279- 284, 1982

ZANDER-SCHIEBENHÖFER,D.; ROKAHR,R.B. und LUX,K.H.: Zwischenbericht zum vertrag Nr.2 - 609637/8 "Durchführung von projektbezogenen thermomechanischen Berechnungen für den bohrlochnahen Bereich der KTB unter Berücksichtigung von der Projektleitung aus der laufenden Bohrplanung entwickelter Randbedingungen", 1987.



7. ANLAGEN

Variation : Primärspannungszustand $\underline{\sigma}^P$							
Berechnungslauf	ΔT [K]	α_T [1/K]	ν [-]	p_i [MPa]	σ_h [MPa]	σ_H [MPa]	σ_V [MPa]
p1e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	100.0	-250.0	-250.0	-250.0
p2e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	100.0	-125.0	-375.0	-250.0
p3e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	100.0	-125.0	-250.0	-250.0
p4e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	100.0	-187.5	-375.0	-250.0

Variation : Bohrlochinnendruck p_i							
Berechnungslauf	ΔT [K]	α_T [1/K]	ν [-]	p_i [MPa]	σ_h [MPa]	σ_H [MPa]	σ_V [MPa]
p1e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	100.0	-250.0	-250.0	-250.0
p11e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	110.0	-250.0	-250.0	-250.0
p12e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	130.0	-250.0	-250.0	-250.0
p13e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	160.0	-250.0	-250.0	-250.0
p14e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	200.0	-250.0	-250.0	-250.0
p3e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	100.0	-125.0	-250.0	-250.0
p7e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	110.0	-125.0	-250.0	-250.0
p8e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	130.0	-125.0	-250.0	-250.0
p9e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	160.0	-125.0	-250.0	-250.0
p10e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	200.0	-125.0	-250.0	-250.0

Variation : Poissonzahl ν							
Berechnungslauf	ΔT [K]	α_T [1/K]	ν [-]	p_i [MPa]	σ_h [MPa]	σ_H [MPa]	σ_V [MPa]
p5e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.10	100.0	-125.0	-250.0	-250.0
p3e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	100.0	-125.0	-250.0	-250.0
p6e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.40	100.0	-125.0	-250.0	-250.0

Variation : spez. Wärmeausdehnungskoeffizient α_T							
Berechnungslauf	ΔT [K]	α_T [1/K]	ν [-]	p_i [MPa]	σ_h [MPa]	σ_H [MPa]	σ_V [MPa]
p15e	150	$7.5 \cdot 10^{-6}$	0.25	100.0	-125.0	-250.0	-250.0
p3e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	100.0	-125.0	-250.0	-250.0

Variation : Temperaturunterschied ΔT							
Berechnungslauf	ΔT [K]	α_T [1/K]	ν [-]	p_i [MPa]	σ_h [MPa]	σ_H [MPa]	σ_V [MPa]
p16e	50	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	100.0	-125.0	-250.0	-250.0
p17e	100	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	100.0	-125.0	-250.0	-250.0
p3e	150	$15.0 \cdot 10^{-6}$	0.25	100.0	-125.0	-250.0	-250.0

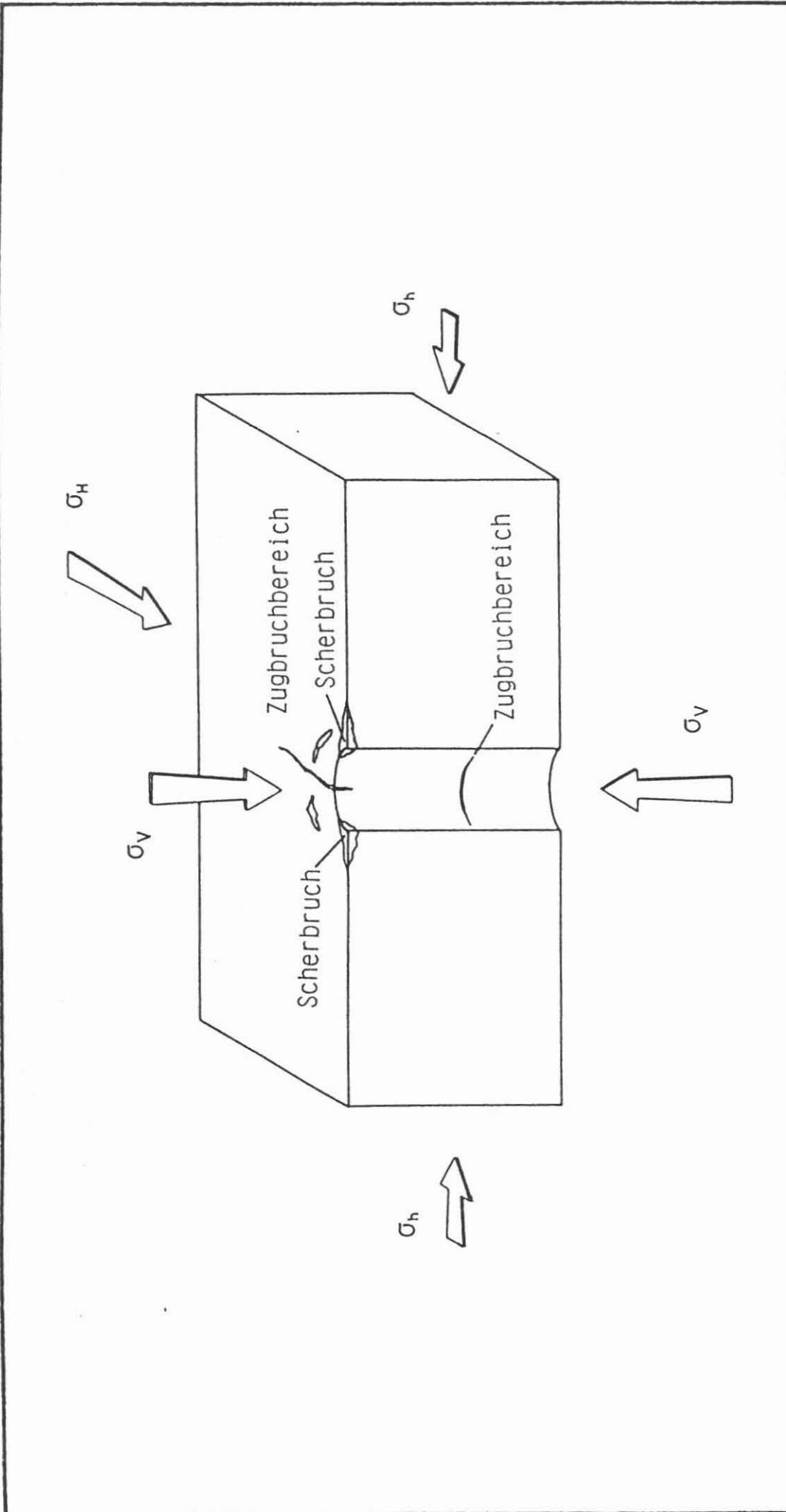
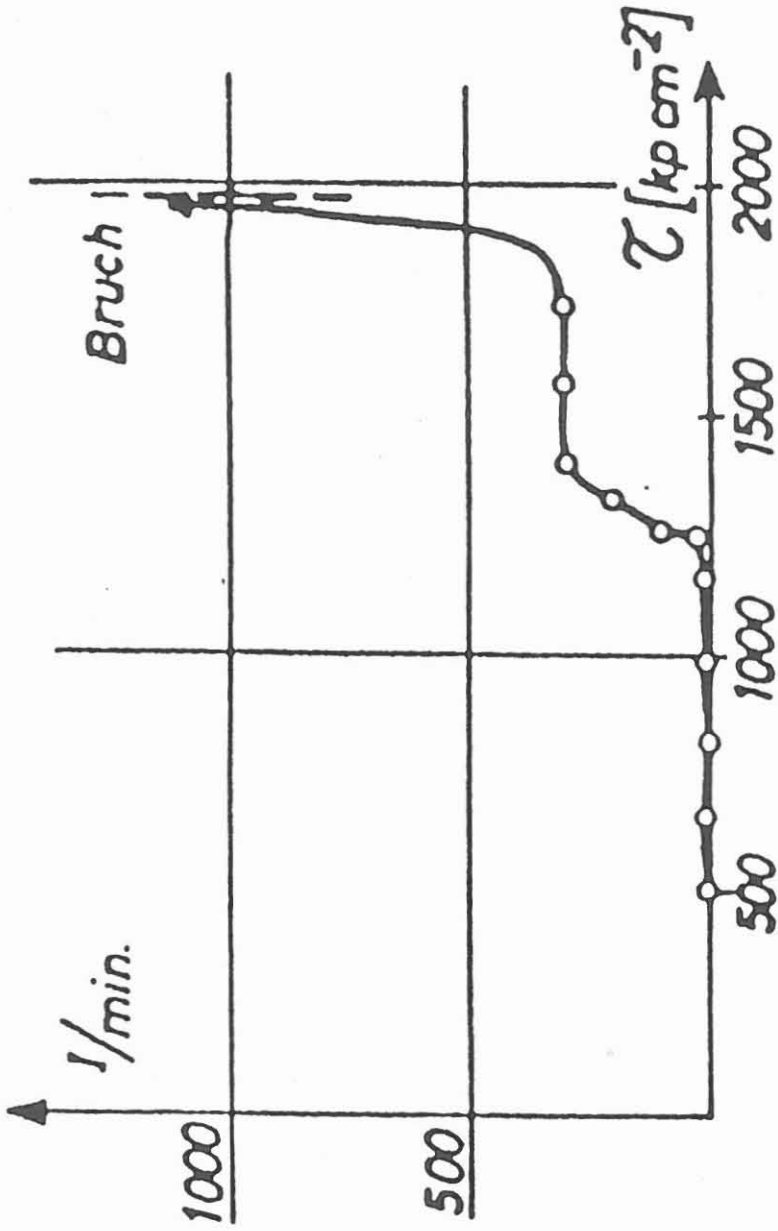


Abb. 1

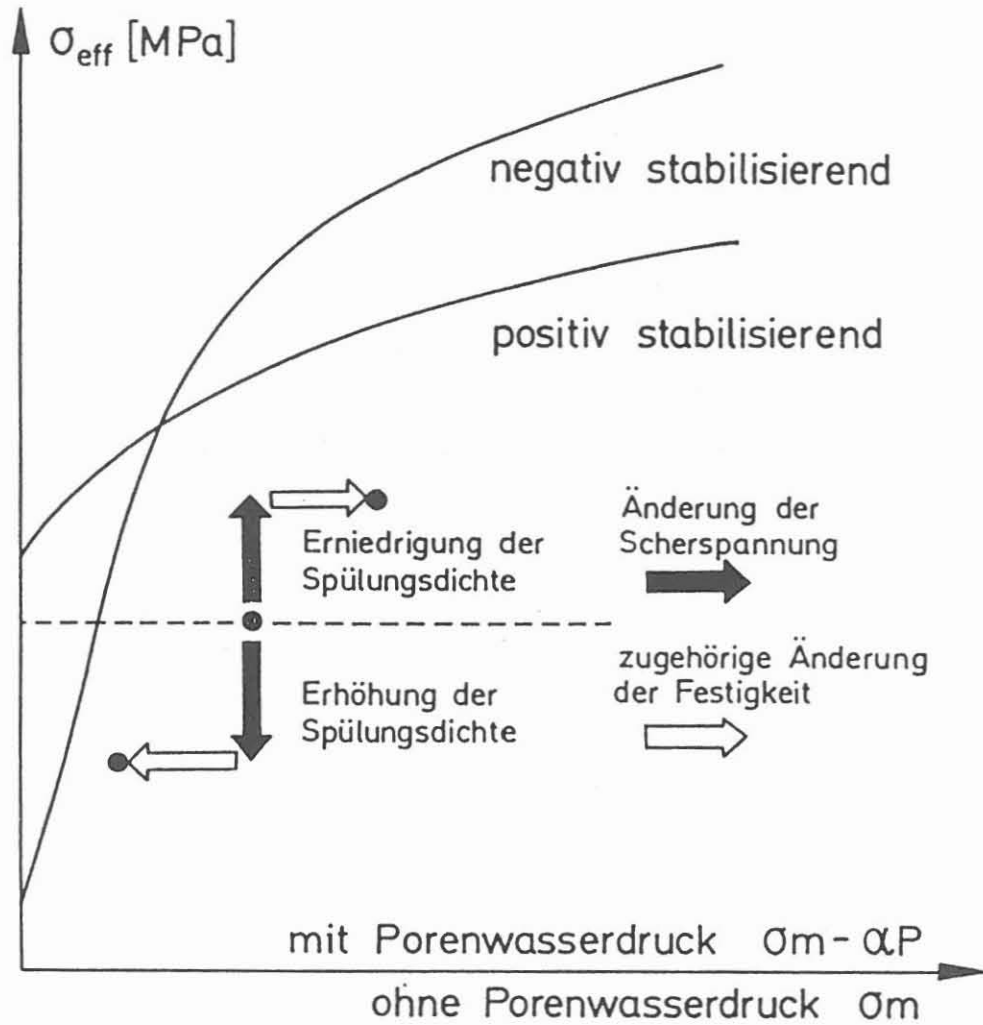
Skizzierung möglicher Bruchbereiche in Abhängigkeit des Primärspannungszustandes



Impulshäufigkeit in Abhängigkeit von der Spannung
(kristalliner Schiefer, Schieferung senkrecht zur
Richtung der Spannung), RUMMEL (1965)

Acoustic- Emission- Diagramm für kristallinen Schiefer nach RUMMEL (1965)

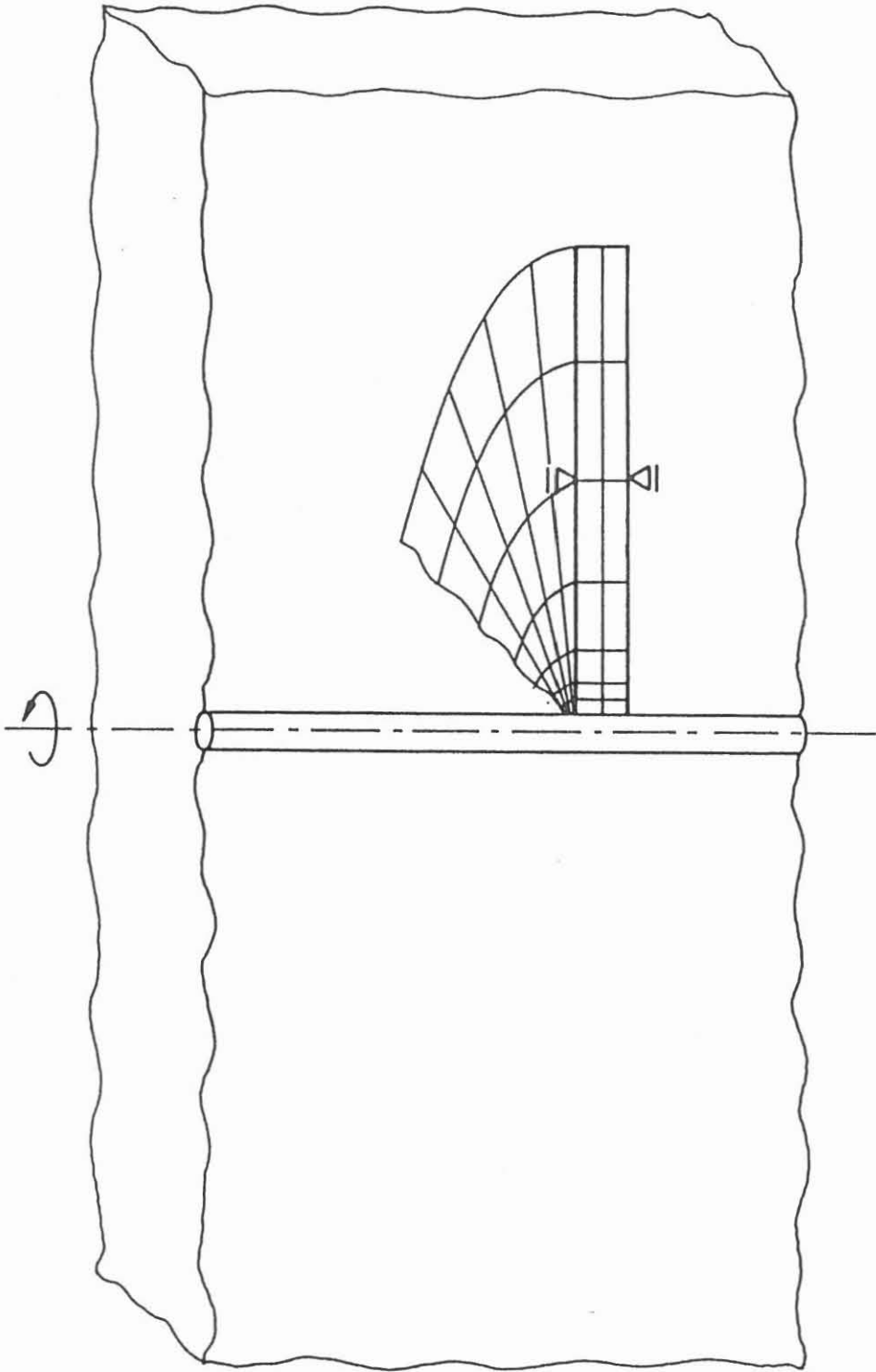
Abb. 2



© KTB
Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

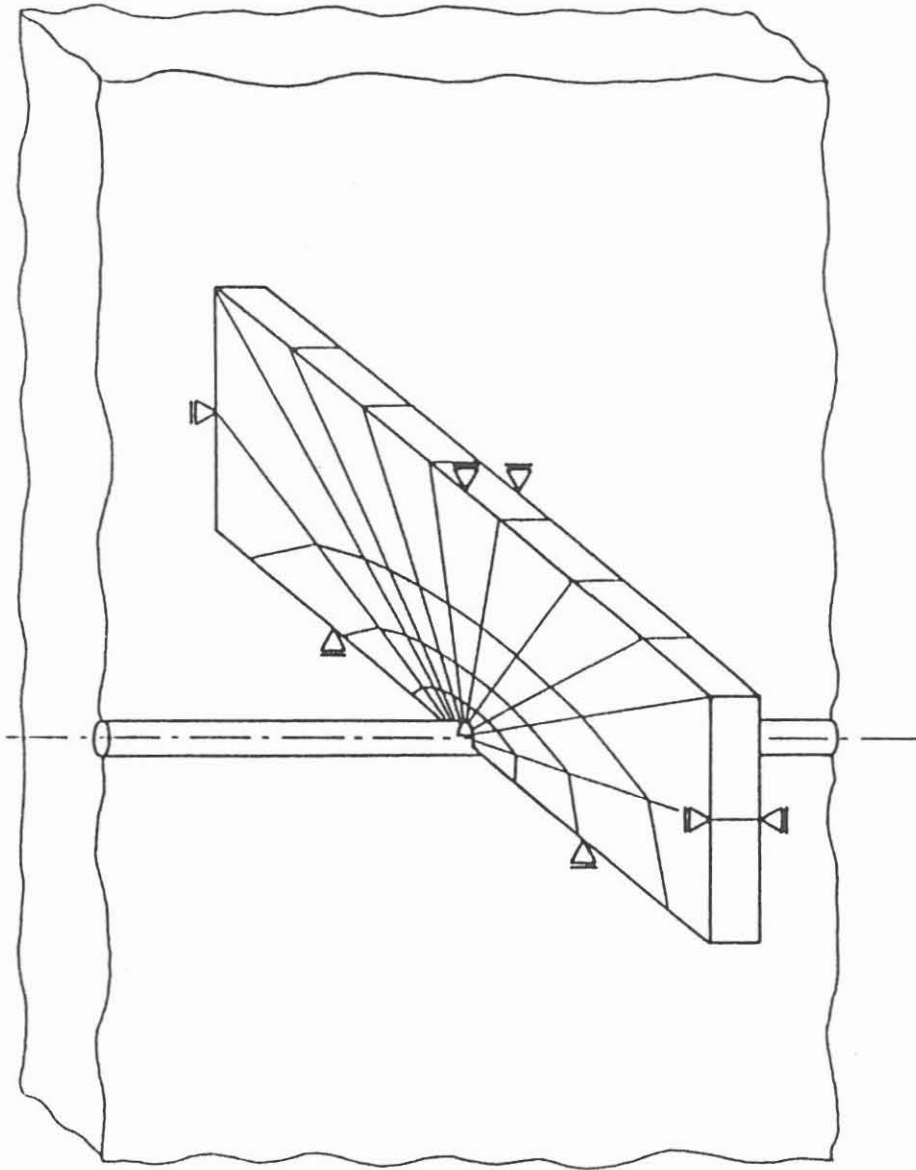
Festigkeitsverhalten des Gesteinsverbandes
nach KESSELS (1987)

Abb. 3



Idealisierung des bohrlochnahen Gebirgsbereiches durch
ein rotationssymmetrisches Berechnungsmodell

Abb. 4



Idealisierung des bohrlochnahen Gebirgsbereiches durch ein ebenes Berechnungsmodell im EVZ

Abb. 5

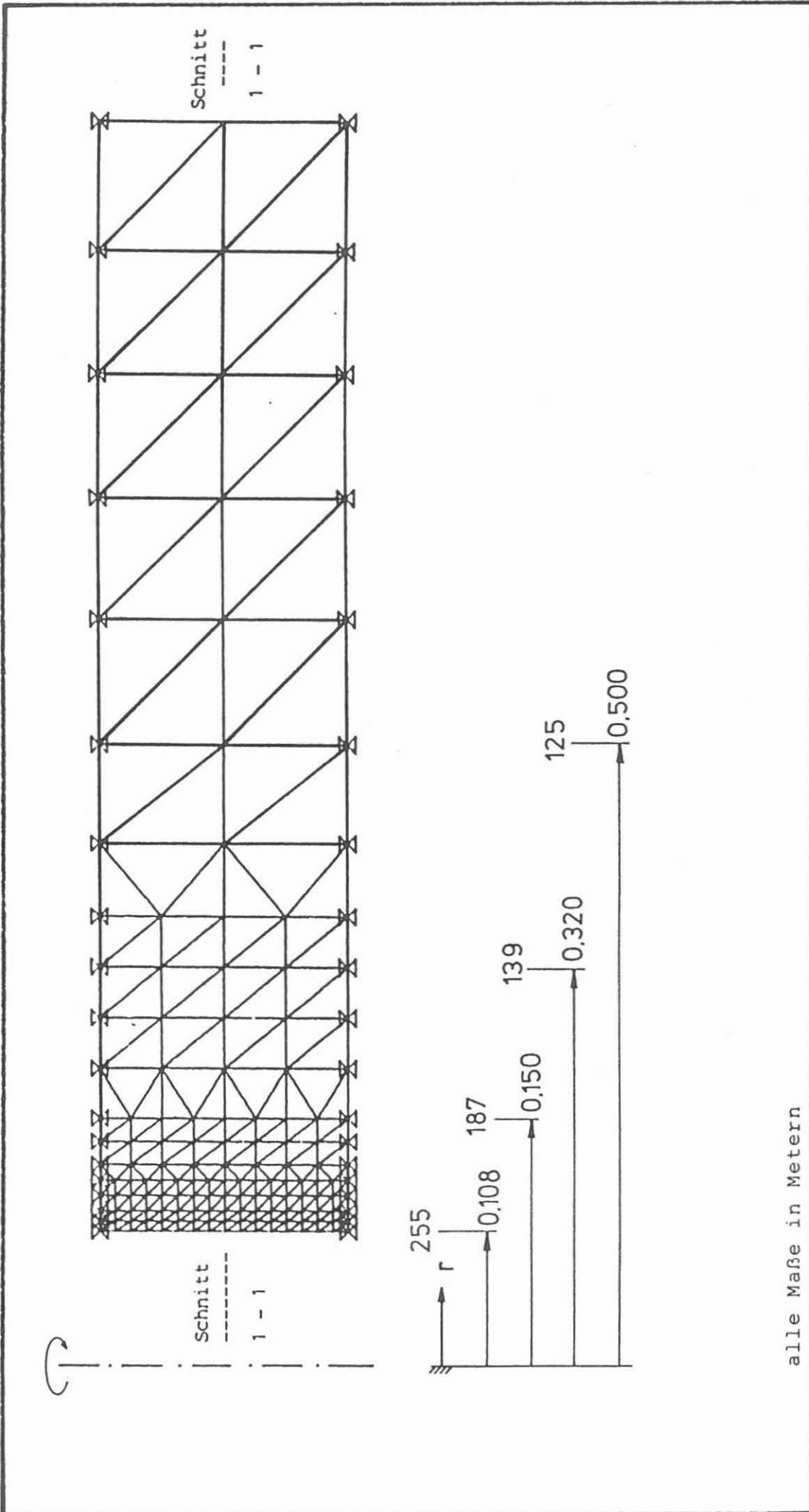
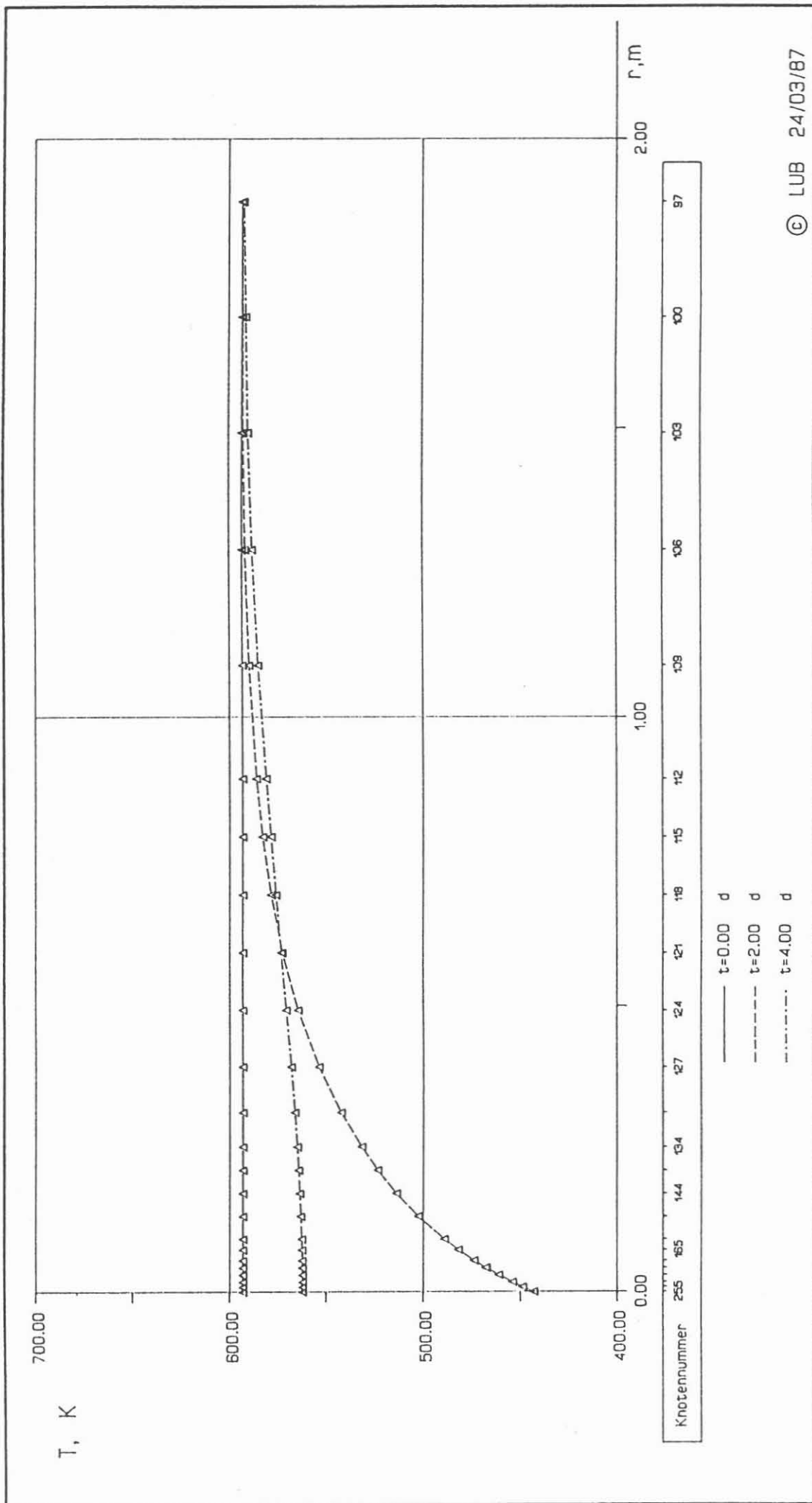


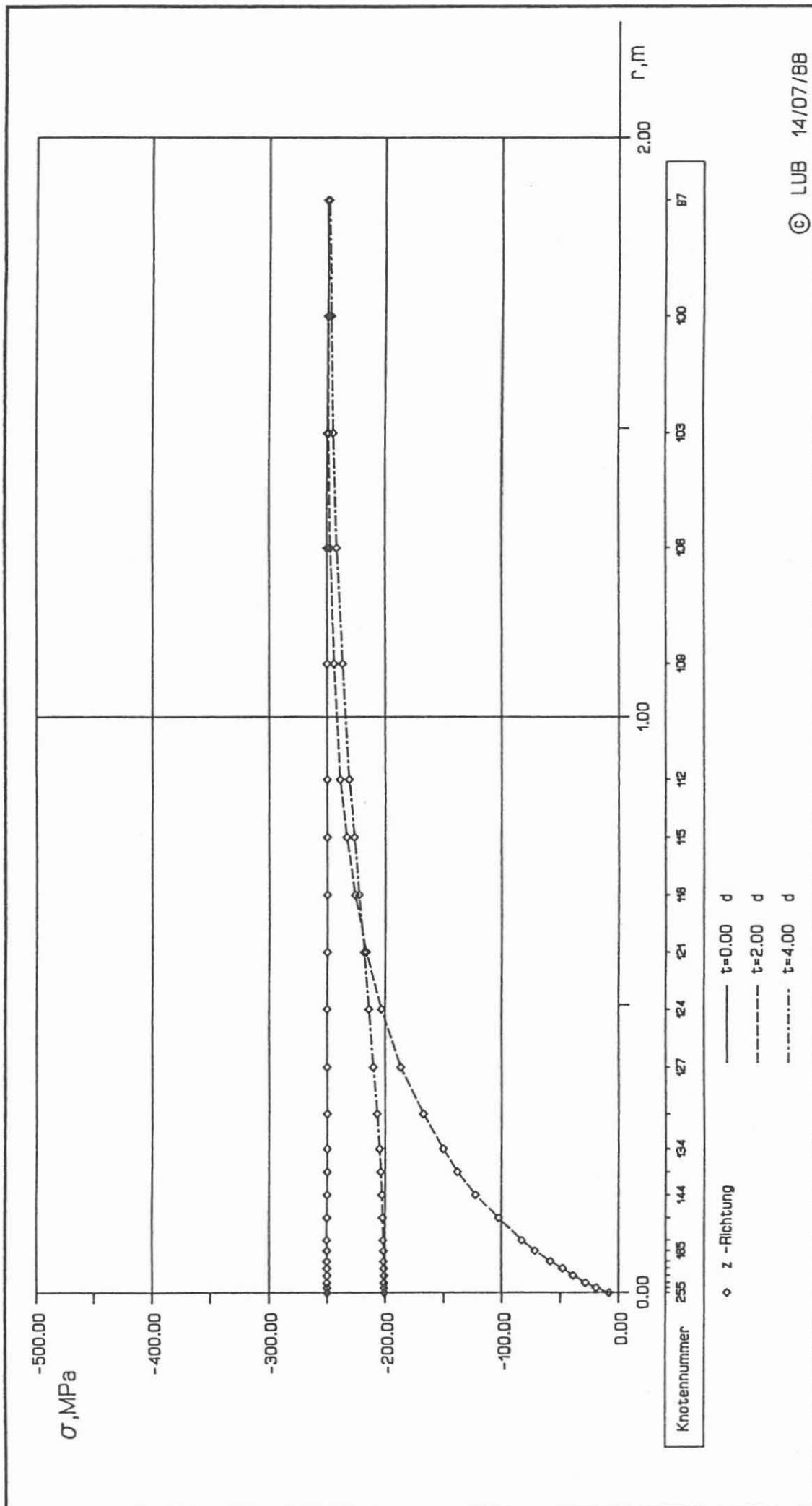
Abb. 6

Berechnungsmodell BM-10-1
Ausschnittsdarstellung



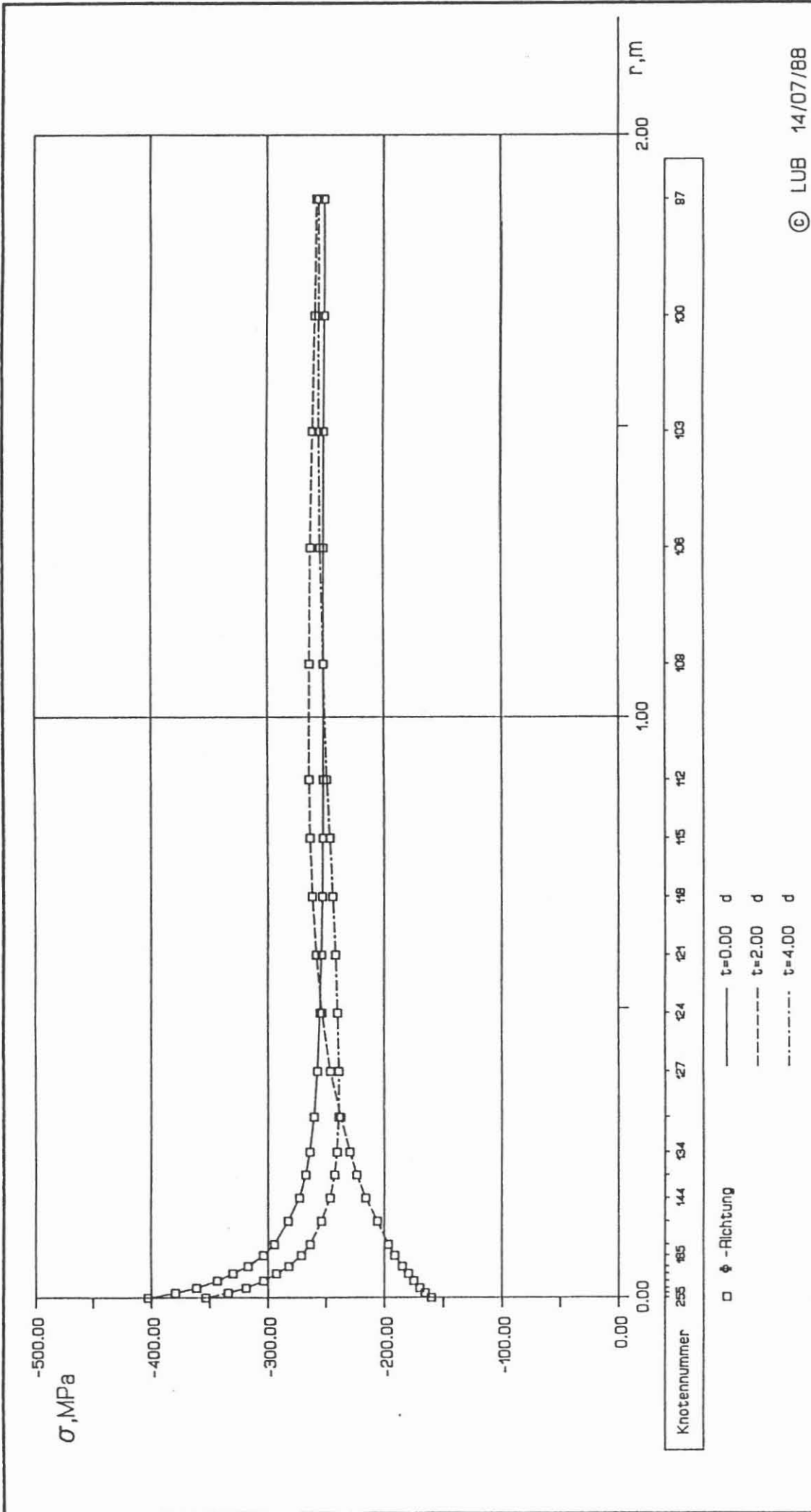
thermische Berechnung BM-10-1 Teufe 10 km
Temperaturverläufe im Schnitt 1-1

Abb. 7



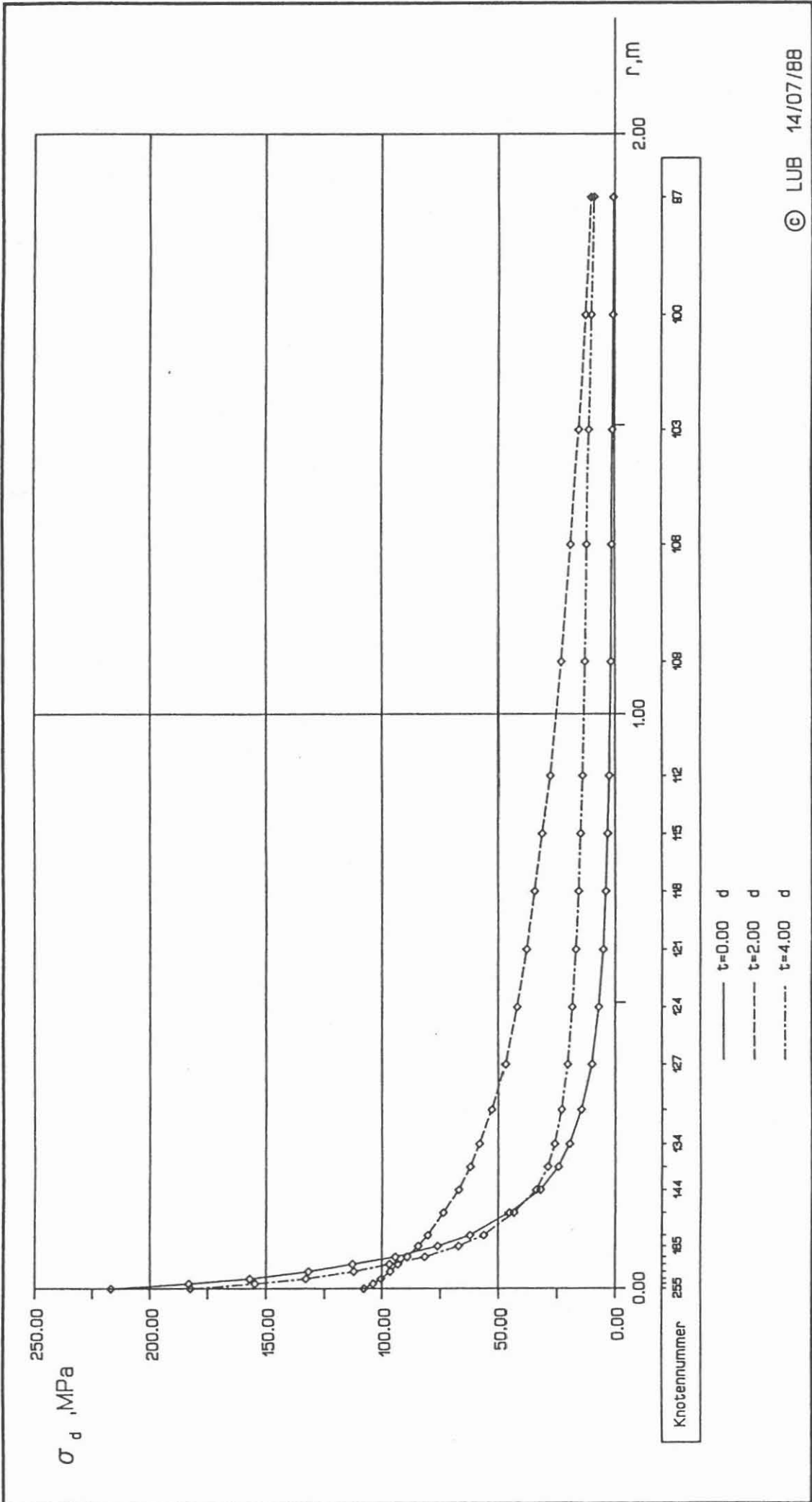
thermo- elastische Berechnung BM-10-1 Teufe 10 km
Verlauf der Vertikalspannungen im Schnitt 1-1

Abb. 8



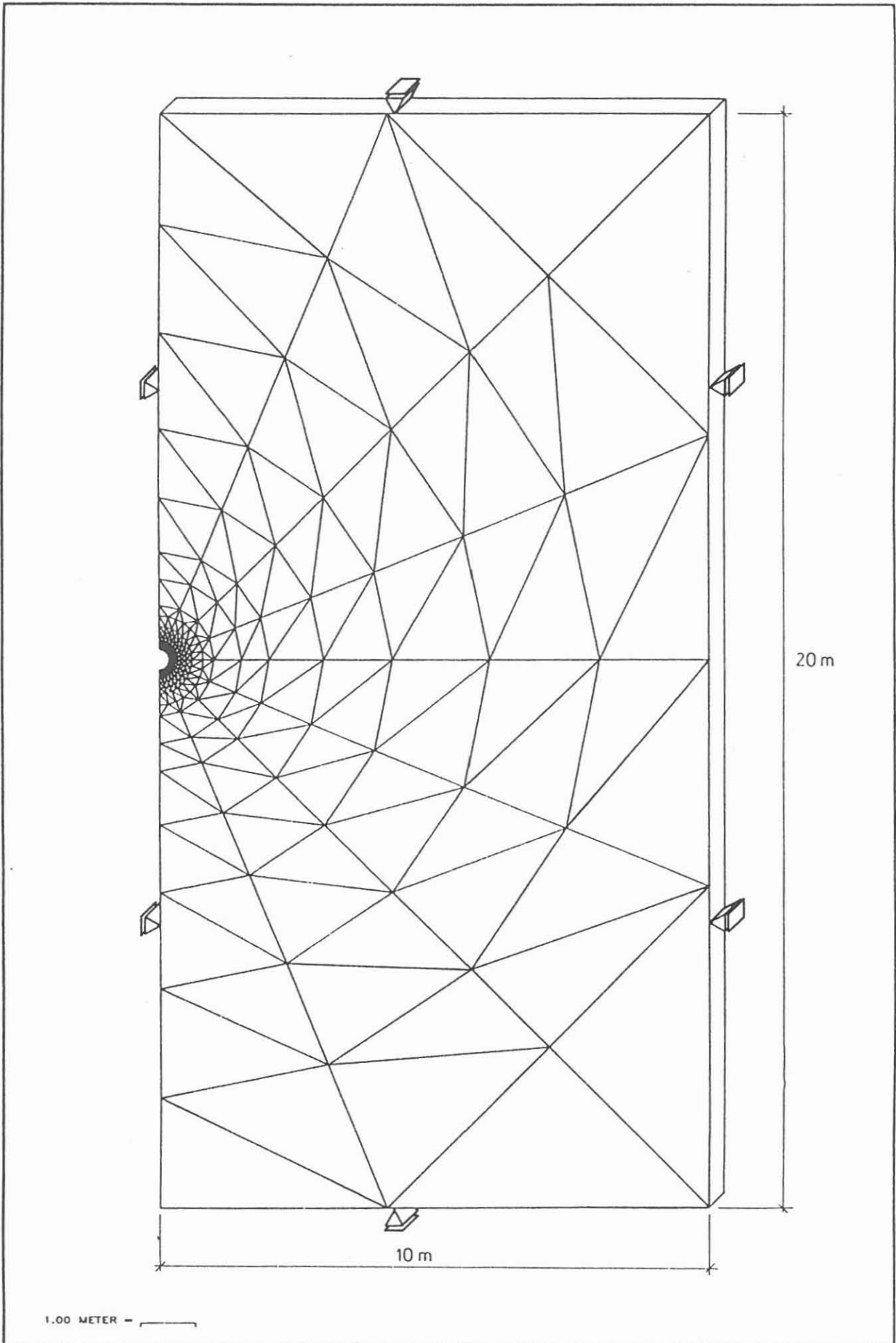
thermo- elastische Berechnung BM-10-1 Teufe 10 km
Verlauf der Spannungen in Umfangsrichtung im Schnitt 1-1

Abb. 9



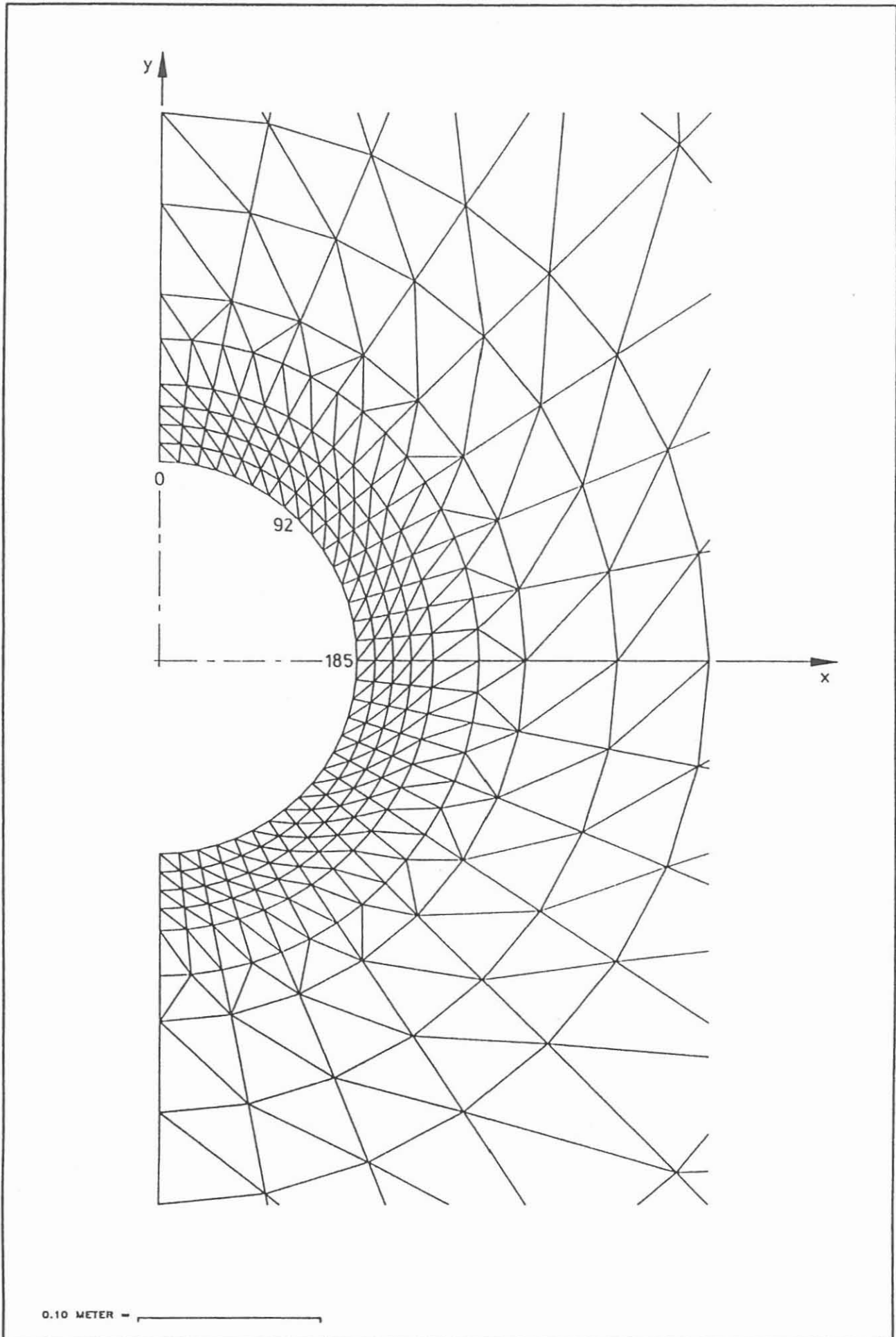
thermo- elastische Berechnung BM-10-1 Teufe 10 km
Verlauf der Deviatorspannungen im Schnitt 1-1

Abb. 10



Berechnungsmodell BM-10-2
Gesamtdarstellung

Abb. 11



Berechnungsmodell BM-10-2
Ausschnittsdarstellung

Abb. 12

1. Kriterium für das Überschreiten der Zugfestigkeit

$$\sigma_{1,2,3} > P_0 = f(P_i)$$

mit $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Hauptspannungen
 P_0 : Porenflüssigkeitsdruck
 P_i : Bohrspülungsdruck

2. Kriterium für das Überschreiten der Druckfestigkeit

$$\sigma_D = f(\sigma_m - P_0) > \sigma_{D,Bruch}$$

mit σ_D : deviatorische Spannung
 σ_m : mittlere Spannung
 P_0 : Porenflüssigkeitsdruck
 $\sigma_{D,Bruch}$: deviatorische Spannung im Bruchpunkt des Materials

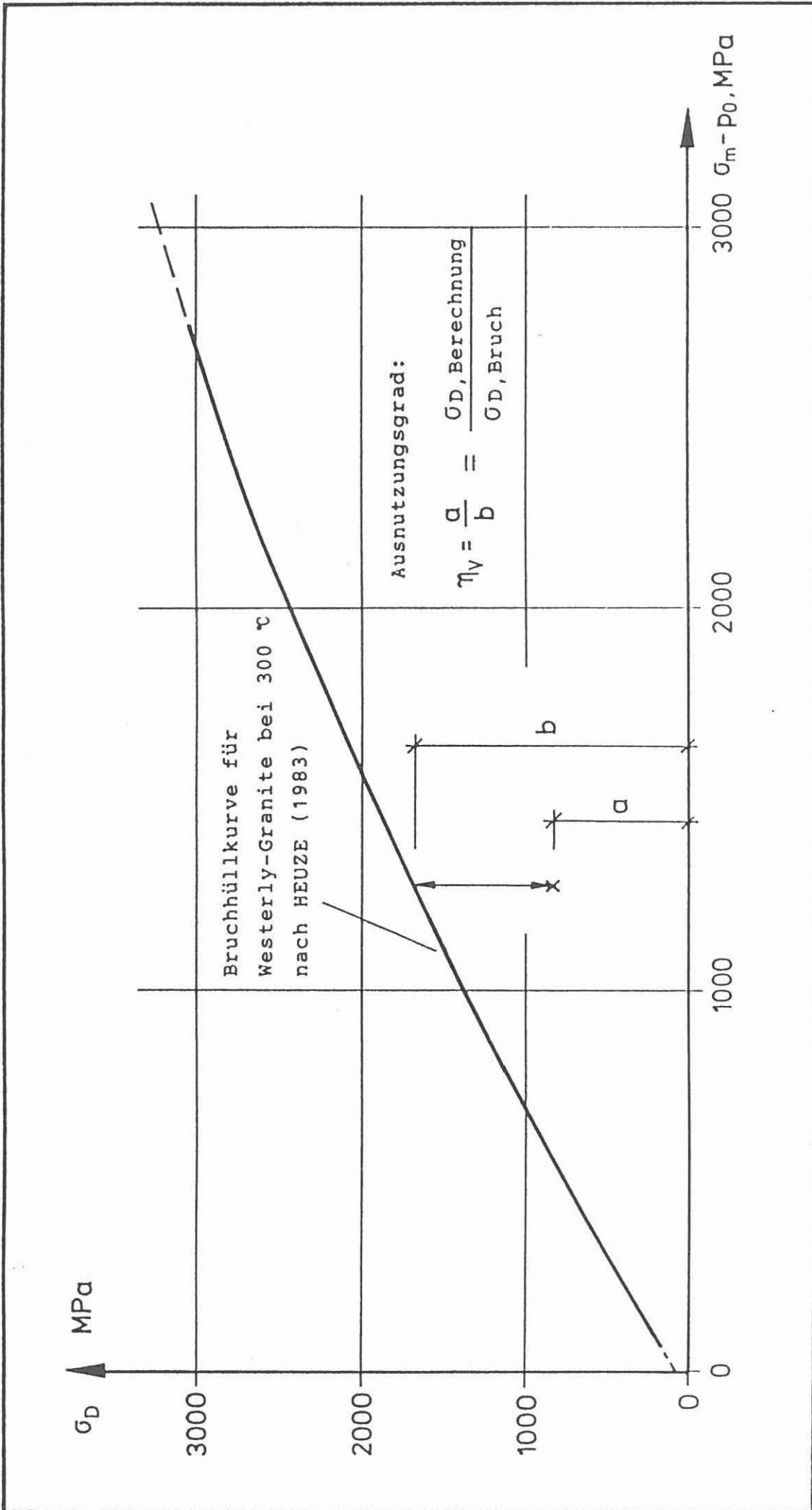
3. Kriterium für die Auflockerung des Gebirges

$$\sigma_D > f_a \cdot \sigma_{D,Bruch} \quad \text{bzw.}$$

$$\eta > f_a$$

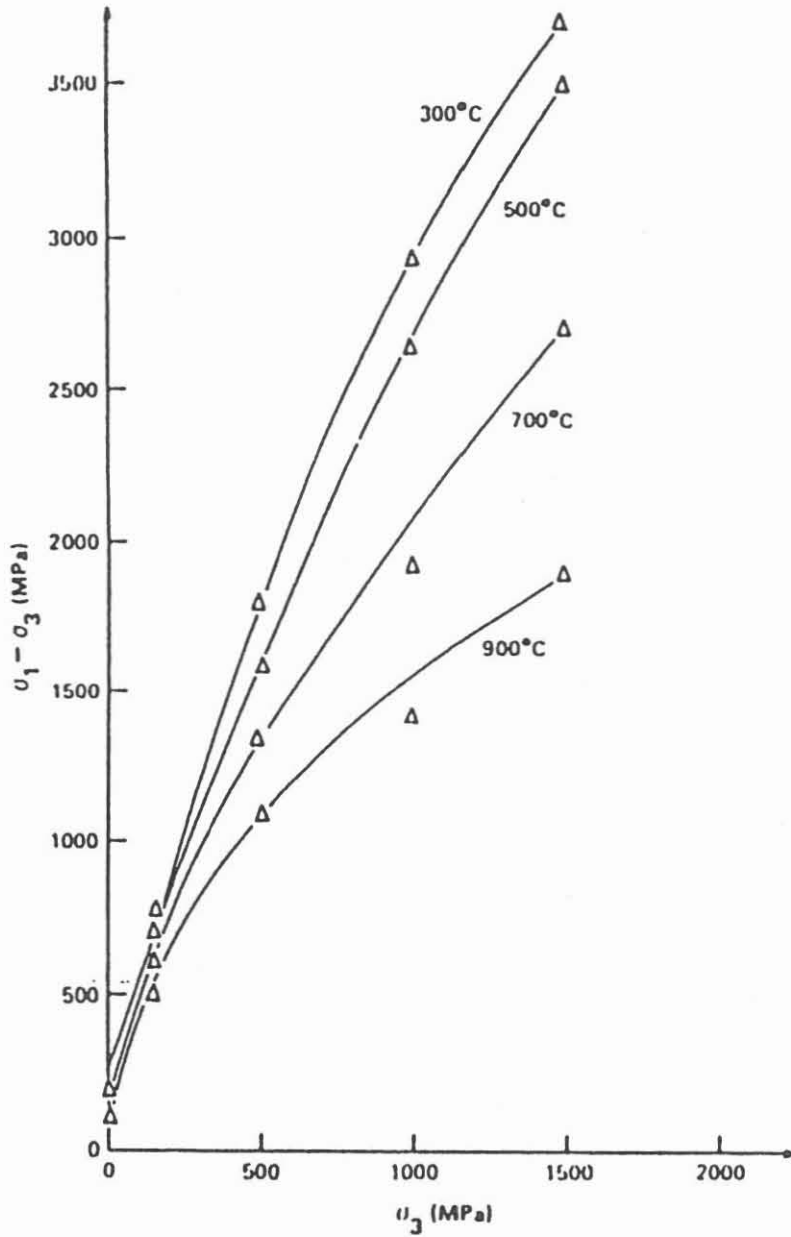
mit σ_D : deviatorische Spannung
 f_a : Faktor der den Punkt verstärkter Mikrorißbildung des Materials im Verhältnis zur Bruchspannung angibt.
 $\sigma_{D,Bruch}$: deviatorische Spannung im Bruchpunkt des Materials
 η : Ausnutzungsgrad des Materials

$$\eta = \sigma_D / \sigma_{D,Bruch}$$



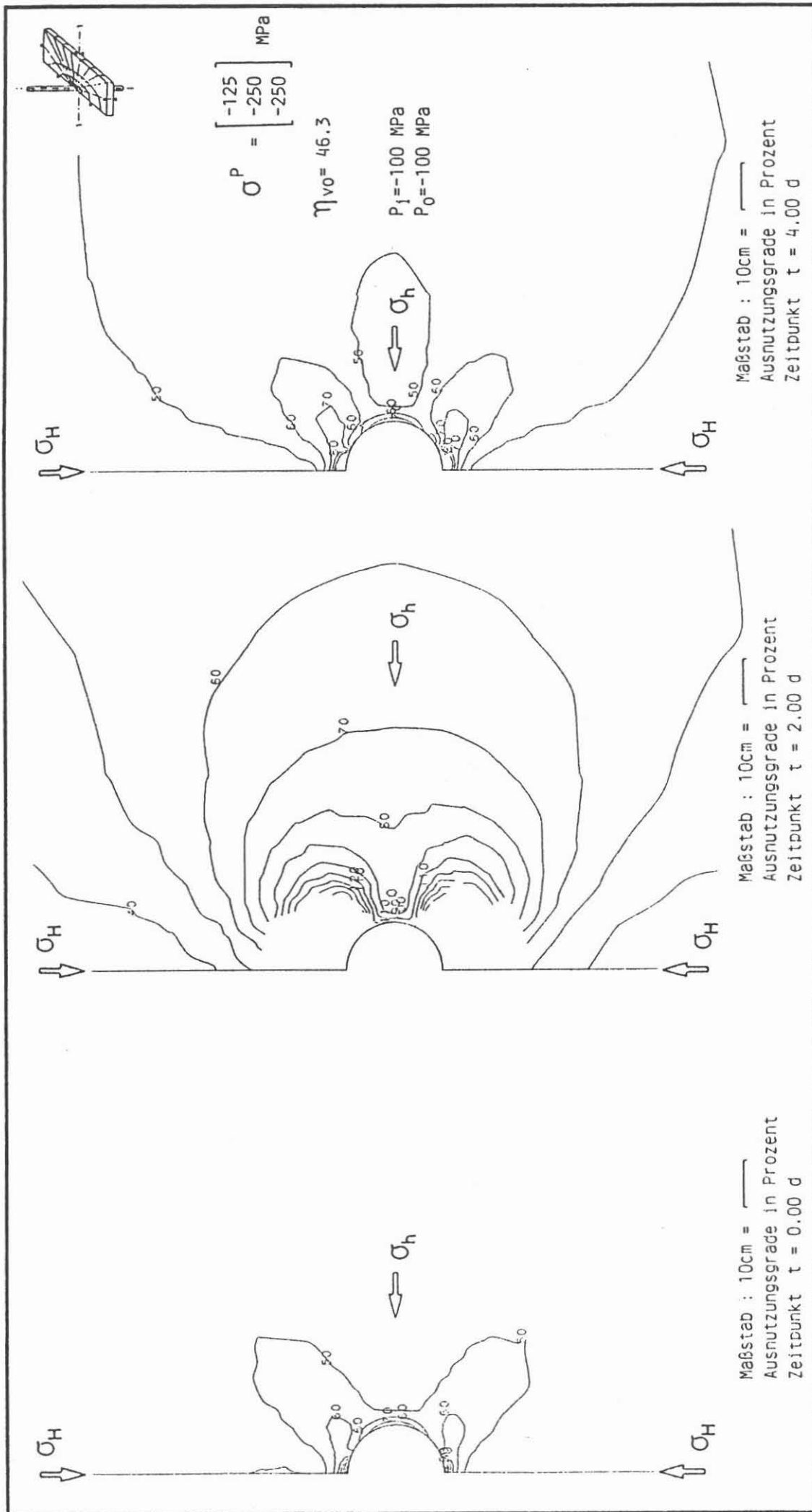
Bruchhüllkurve für Westerly-Granite nach HEUZE (1983) mit Darstellung der Berechnung eines vertikalen Ausnutzungsgrades

Abb. 14



Festigkeitswerte für Westerly- Granite in Abhängigkeit von der Temperatur nach HEUZE (1983)

Abb. 15



Isolinienarstellung der Ausnutzungsgrade Teufe 10 km Berechnungsfall p3e Abb. 16

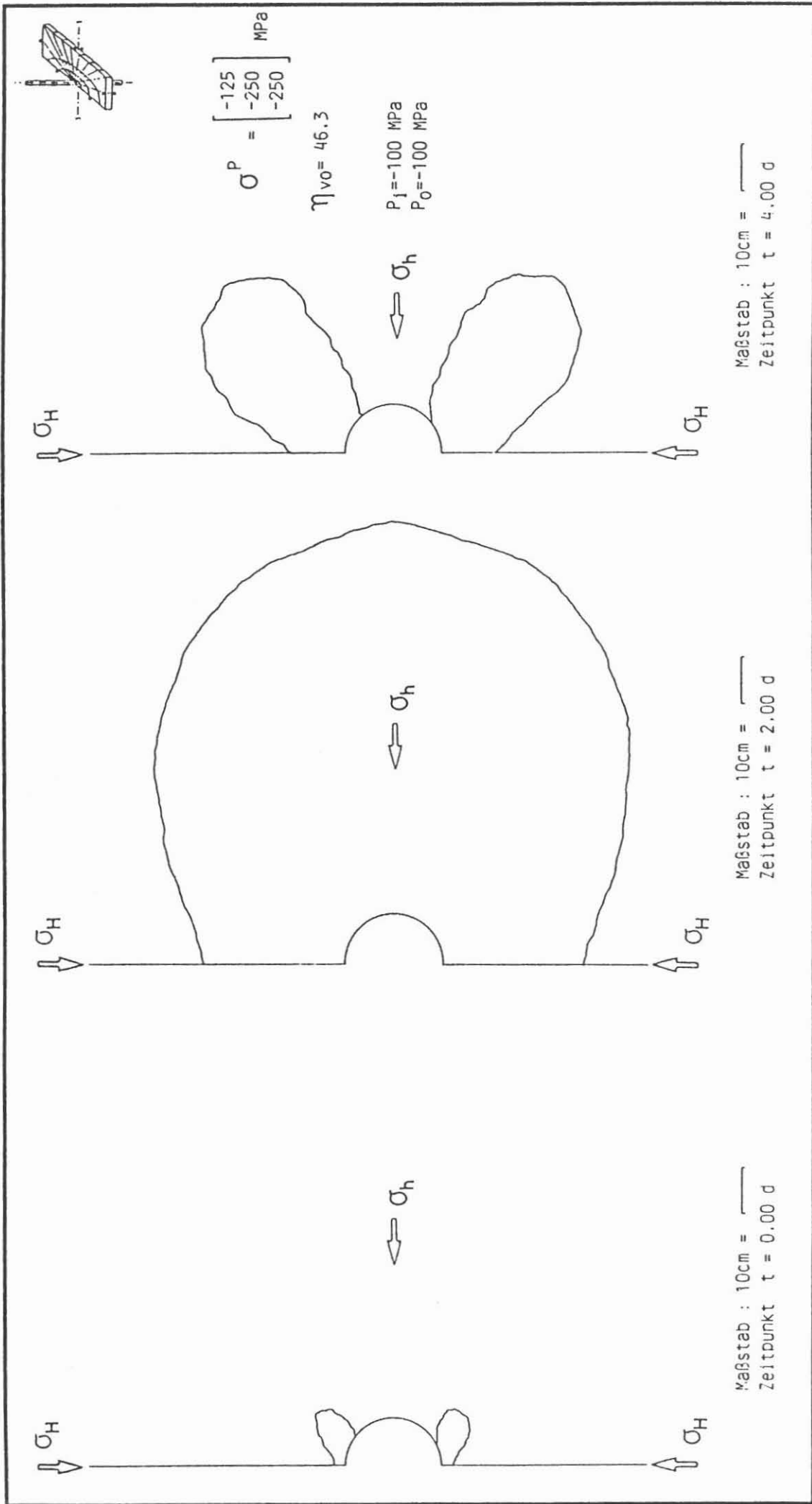
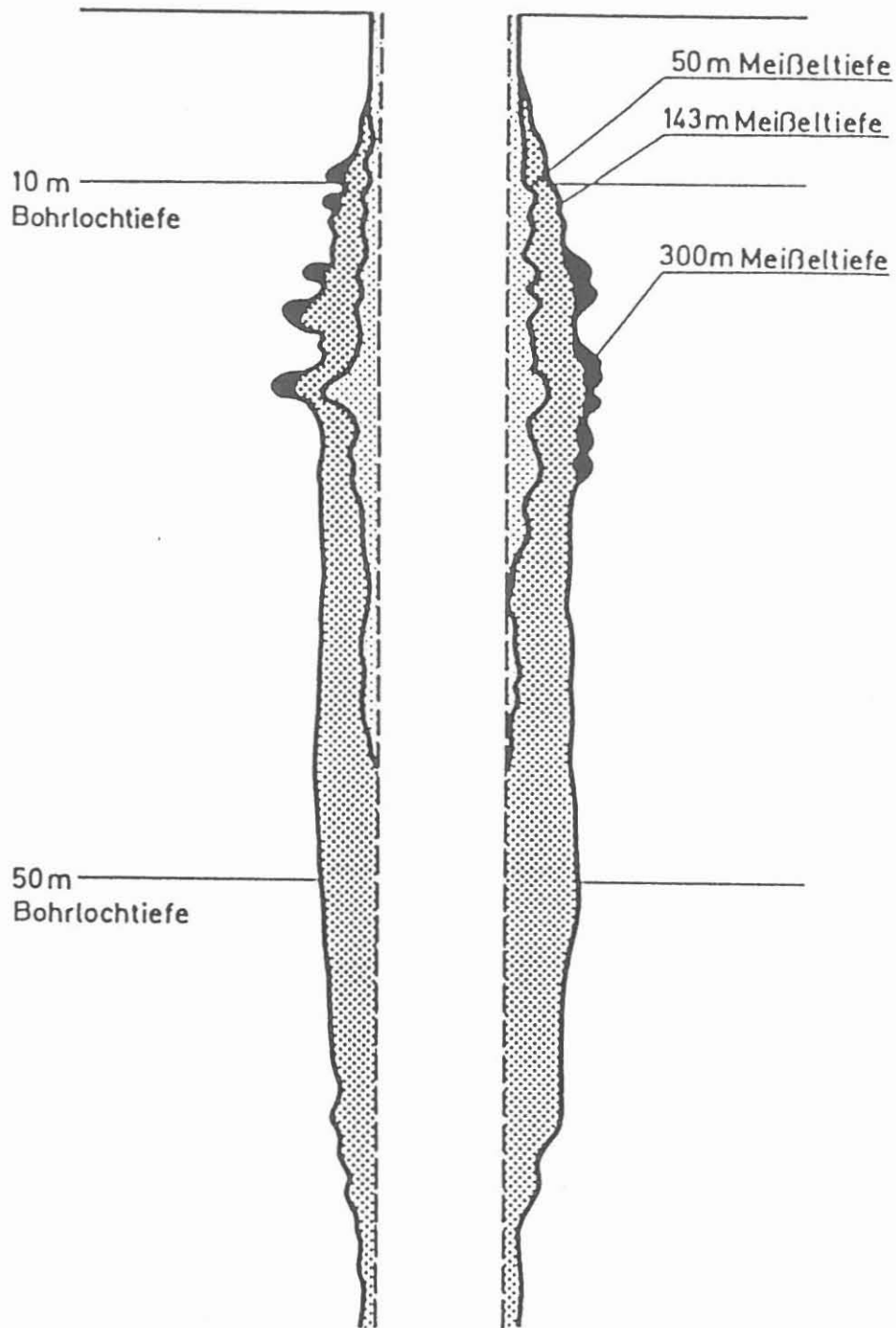


Abb. 17

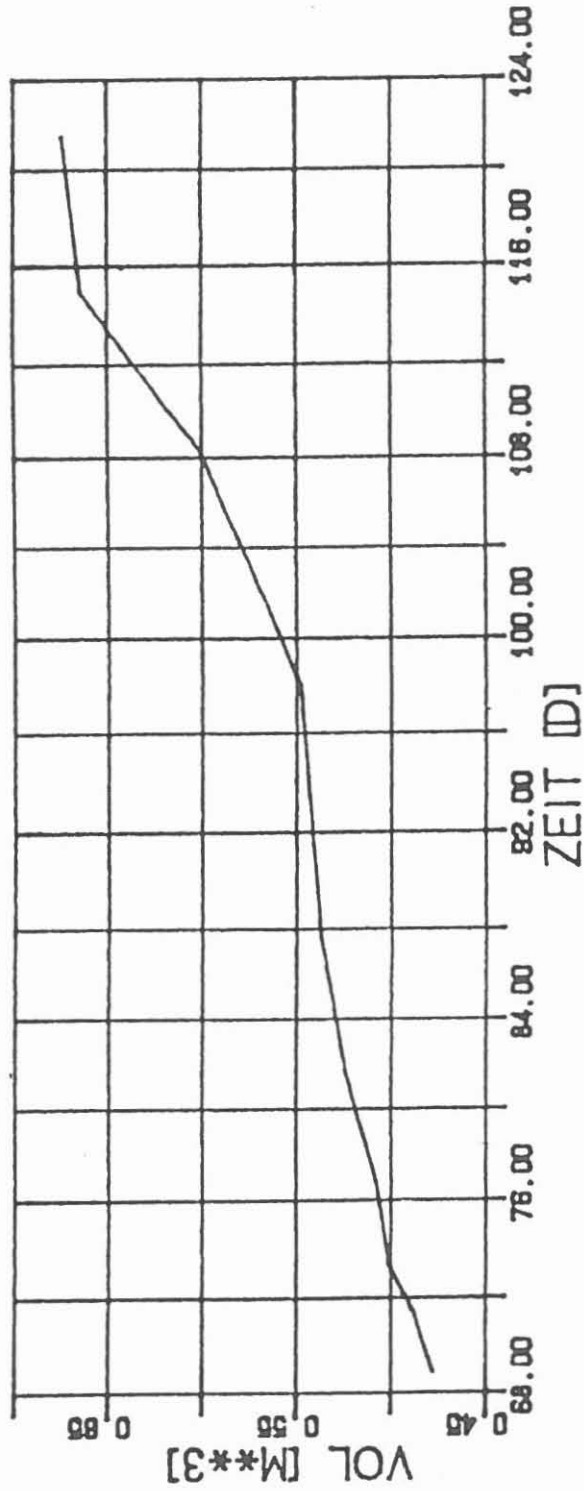
Darstellung der möglichen Zugrißzonen Teufe 10 km Berechnungsfall p3e



© KTB
Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Vergleichende Darstellung von Kaliberlogs KTBVB
im oberen Teufenbereich nach KESSELS (1988)

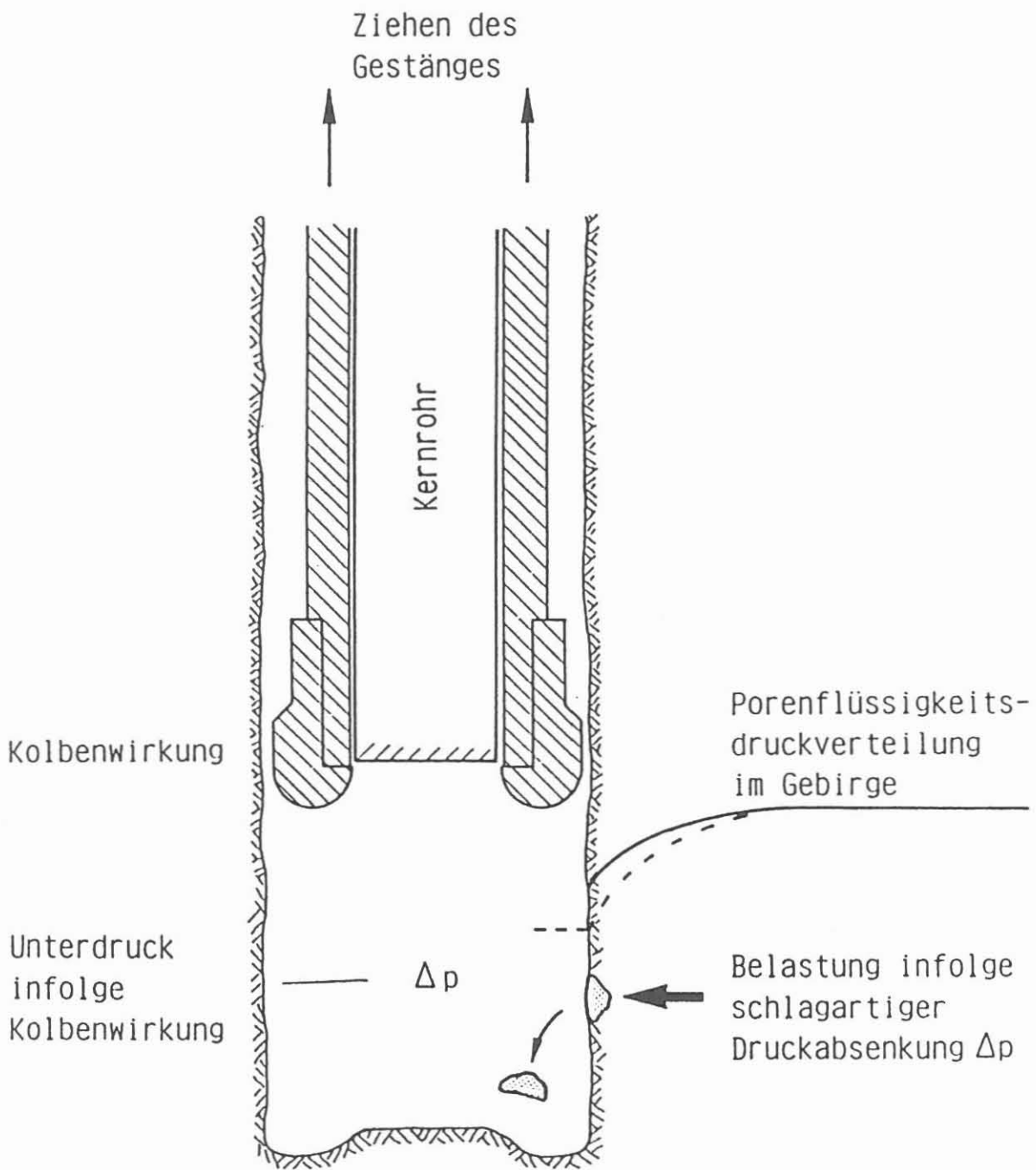
Abb. 18



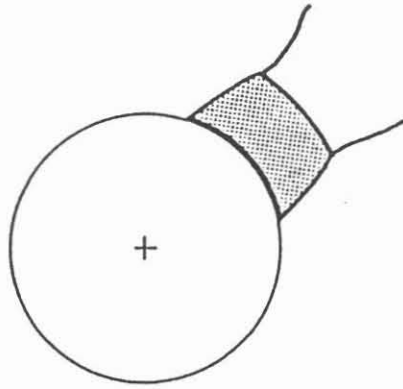
©KTBB
Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Entwicklung des mittleren Volumens der 25 m Bohrlochabschnitte
Teufenbereich von 500 - 700 m nach KESSELS (1988)

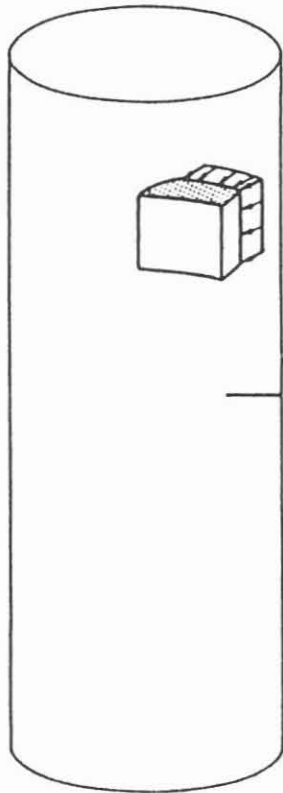
Abb. 19



Δp ~ 40 bar infolge Abschalten der Pumpen
~ 10 - 70 bar infolge Kolbenwirkung

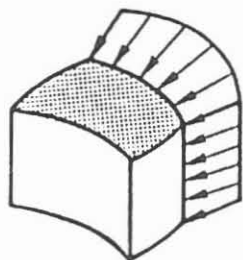


vorgegebene
Materialschwächung
(verheiliter RiB)



} $\Delta p_0 \approx 50 \text{ bar}$

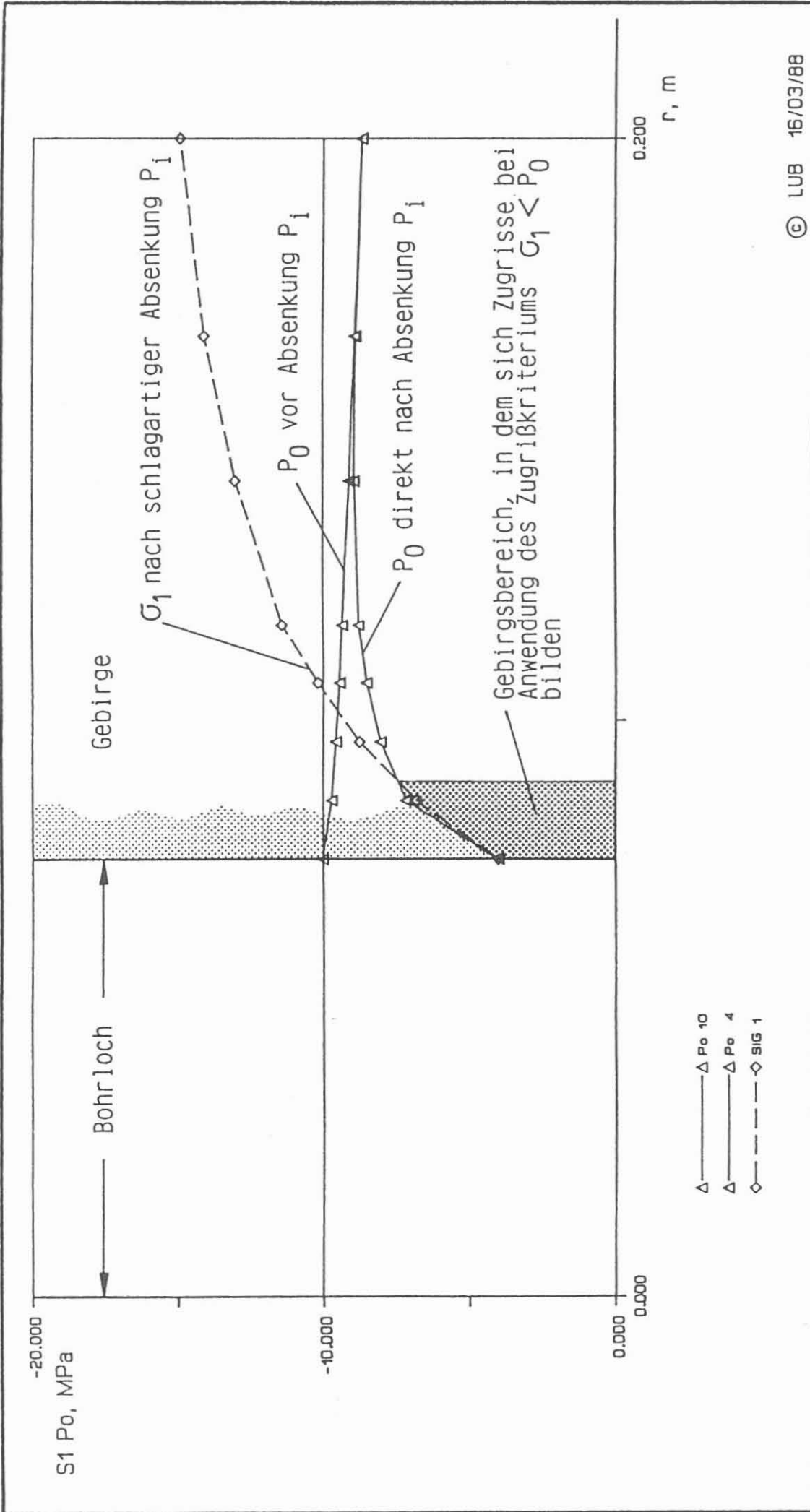
Porenwasserdruck-
verteilung



$$\begin{aligned} F &= \Delta p_0 * A \\ &= 50 \text{ bar} * 0.01 \text{ m}^2 \\ &= 50 \text{ KN} \\ &(\hat{=} 5 \text{ t Masse}) \end{aligned}$$

möglicher Ausbruch infolge vorgegebener
Schwächung des Gesteinsverbandes

Abb. 21



vergleichende Darstellung der kleinsten Hauptspannung und des Porendruckes zu verschiedenen Zeiten eines Bohrintervalls Tiefe 600 m Schnitt 1-1

Abb. 22