Konsortium "Druckaufbautest"
vertreten durch die
Industrieverwaltungsgesellschaft AG (IVG)

Druckaufbautest in der Kaverne Etzel K102

- Abschlußbericht -

Institut für Unterirdisches Bauen Universität Hannover

1994

Inhaltsverzeichnis

Seite

1. Einleitung und Problemstellung 1
2. Projektbezogene Unterlagen und Literatur 3
3. Geologischer Aufbau im Bereich der Testkaverne Etzel K102 6
3.1 Salzstock Etzel 6
3.2 Geologischer Aufbau im Bereich der Kavernenbohrung K102 9
3.3 Ergebnisse aus physiko-chemischen Salzkernuntersuchungen 9
3.3.1 Zusammensetzung des Steinsalzes im Bereich der Kaverne Etzel K102 9
3.3.2 Dichte des Steinsalzes im Bereich der Bohrung K102 12
3.4 Explorationsbohrungen Etzel Nord 1001 und Etzel Nord 1002 16
3.4.1 Lage und geologisches Profil der Bohrungen 16
3.4.2 Festigkeits- und Verformungsverhalten 16
4. Kavernengeometrie der Testkaverne Etzel K102 20
4.1 Kavernenanlage Etzel 20
4.2 Kaverne K102 20
4.2.1 Kavernenbereich der Testkaverne K102 20
4.2.2 Halsbereich der Testkaverne K102 27
5. Versuchsaufbau und geplante Versuchsdurchführung 29
5.1 Verrohrung 29
5.2 Meßtechnik 32
5.2.1 Meßtechnische Instrumentierung 32
5.2.2 Kontinuierliche Messungen 34
5.2.3 Diskontinuierliche Messungen 37
5.3 Geplanter Versuchsverlauf 39
6. Durchgeführter Versuchsverlauf 43
6.1 Erste Druckaufbaustufe 43
6.2 Zweite Druckaufbaustufe 44
6.3 Dritte Druckaufbaustufe 45
6.4 Vierte Druckaufbaustufe 48
6.5 Versuchsphase I 52
6.6 Versuchsphase II zur Prüfung des Druckniveaus 54
6.7 Versuchsphase III (Stufenweise Druckentlastung) 59
6.8 Versuchsphase IV (Druckprüfung unter Maximaldruckniveau) 60

7. Zusammenfassende Darstellung und Interpretation der Versuchsergebnisse 63
7.1 Zusammenfassung des Versuchsverlaufs 63
7.1.1 Druckverlauf (soleseitiger Kopfdruck und diskontinuierliche Druckmessungen in ausgewählten Teufenlagen in der Testkaverne) und Volumenbilanz 63
7.1.2 Temperaturentwicklung in der Testkaverne über den Versuchszeitraum (diskontinuierliche Messungen) 66
7.1.3 Entwicklung des Blanket-Sole-Spiegels 67
7.1.4 Entwicklung des N_2-Süßwasser-Spiegels (Technischer Ringraum 7 $^5/8$" - 13 $^3/8$") 71
7.3 Berechnungsergebnisse und Schlußfolgerung 77
8. Zusammenfassung 155

1. Einleitung und Problemstellung

Aufgrund des viskosen Materialverhaltens von Salzgestein und der Druckdifferenz zwischen dem Innendruck und dem Gebirgsdruck verringert sich das Volumen von Salzkavernen mit der Zeit, wobei diese Konvergenz überproportional von der Höhe der Druckdifferenz abhängt. Im Falle einer verschlossenen, solegefüllten Kaverne bewirkt die Volumenabnahme eine Erhöhung des Innendruckes, der Druckunterschied verringert sich und die Konvergenzrate sinkt. Dieser sich über Jahrzehnte oder Jahrhunderte hinziehende Prozeß erreicht dann ein Stadium, in dem der Innendruck dem geostatischen Druck entspricht. Aufgrund der geringeren Dichte der Sole im Vergleich zur Dichte des Salzgesteins wird dieses Druckgleichgewicht zuerst im Dachbereich der Kaverne erzielt, während im Sohlbereich entsprechend der Höhe der Kaverne weiterhin noch eine Druckdifferenz besteht. Die Folge ist eine weitere Volumenabnahme im unteren Bereich verbunden mit einer Druckerhöhung im oberen Teil.

Theoretische Untersuchungen Mitte der achtziger Jahre kamen zu dem Ergebnis, daß sich im Dachbereich ein Überdruck einstellen kann, der mindestens um den Betrag $\Delta p = 0{,}5 \cdot H \cdot \gamma_{Sole}$ über dem geostatischen Druck liegen wird. Die Frage, ob dieses Überschreiten zu einem Aufreißen des Gebirges im Dachbereich führen wird, konnte allerdings nicht eindeutig beantwortet werden.

Erfahrungen aus in-situ-Versuchen in Bohrlöchern zur Bestimmung des Primärspannungszustandes zeigten, daß das Salzgebirge aufreißt, wenn der Innendruck im Bohrloch um einen bestimmten Betrag über dem geostatischen Druck liegt, wobei Drucksteigerungsraten gewählt wurden, die eine Versuchsdauer zwischen einigen Minuten und einigen Stunden ergaben. Da die veröffentlichten Druckgradienten in einer erheblichen Bandbreite schwanken und für die Ursachen des Aufreißens bis heute keine theoretischen Modelle zur Verfügung stehen, mit denen die gemessenen Aufreißdrücke eindeutig und widerspruchsfrei erklärt werden können, wurde beschlossen, mit Hilfe eines Großversuchs in situ Felddaten und Felderfahrungen zu gewinnen, um damit die Basis für ein genehmigungsfähiges Verfahren für den Abschluß von Salzkavernen zu schaffen, das wirtschaftlich tragbar, technisch sinnvoll, nicht umweltbelastend und gebirgsmechanisch vertretbar ist.

Die Randbedingungen wurden so gewählt, daß sich innerhalb eines vertretbaren Zeit-Kosten-Rahmens Druckanstiegsraten ergaben, die eine Übertragung auf große Zeiträume ermöglichen sollten. Die Versuchsplanung war so angelegt, daß mit der Ausrüstung ein Druckgradient von G = 0,320 bar/m hätte erreicht werden können. Unter Berücksichtigung des o.g. theoretisch möglichen Überdrucks Δp hätte bei Erreichen dieses Druckgradienten der überwiegende Teil der Kavernen verschlossen werden können. Die gewählten Druck-

aufbaustufen mußten sich an den vorgegebenen Zeitrahmen orientieren. Dabei wurden die einzelnen Druckaufbaustufen in Druckerhöhungsphasen und Beobachtungsphasen gegliedert, wobei die Druckerhöhungsphase jeweils etwa ein Drittel des Zeitraumes einer Druckaufbaustufe ausmachen sollte. Form und Höhe der Versuchskaverne sowie ihr Speichervolumen wurden für die in Deutschland bestehenden Kavernen und für eine Übertragung auf andere Kavernenlokationen als geeignet angesehen.

In der Zeit vom September 1990 bis Juni 1993 ist der Druckaufbautest durchgeführt worden. Zum geplanten Versuchsverlauf ergaben sich große Unterschiede, so daß prinzipiell nur vier Druckaufbaustufen von zwölf geplanten Druckstufen zur Durchführung kamen.

Da in den Zwischenberichten der Versuchsverlauf ausführlich dokumentiert worden ist, wird in Kapitel 6 das Versuchsprogramm lediglich zusammenfassend wiedergegeben.

Zunächst wird die geologische Situation im Bereich der Testkaverne Etzel K102 im dritten Kapitel vorgestellt. Daran anschließend wird die Testkaverne mit der Kavernenanlage Etzel im vierten Kapitel beschrieben, während im fünften Kapitel auf den Versuchsaufbau und die geplante Versuchsdurchführung eingegangen wird.

Im siebenten Kapitel erfolgt die gebirgsmechanische Interpretation des Druckaufbautestes.

Im achten Kapitel erfolgt die Zusammenfassung.

2. Projektbezogene Unterlagen und Literatur

Literatur zu Kapitel 3:

[1] Gomm, H.; Hieblinger, J.; Kühn, G.: German caverns store 60-million-bbl oil reserve. Oil & Gas Journal, 03.07.1978

[2] Gomm, H.; Hieblinger, J.; Kühn, G.: Cavern mining, filling operation uses remote and on-site equipment. Oil & Gas Journal, 10.07.1978

[3] Gomm, H.; Hieblinger, J.; Kühn, G.: Soltechnische Neuerungen und ihre Anwendung im Bundeskavernenspeicher Etzel. Compendium 76/77; Ergänzungsband der Zeitschrift Erdöl, Erdgas, Kohle, Petrochemie, S. 683-704.
"4. Gemeinschaftstagung ÖGEW/DGMW vom 04. - 06.10.1976 in Salzburg"

[4] Gomm, H.; Krick, G.; Kühn, G.: Bundesrohölreserve im Salzstock Etzel. Oel-Zeitschrift für die Mineralölwirtschaft, Juni 1973

[5] Hentschel, J.: Erfahrungen beim Umschlag und Lagerbetrieb flüssigkeitsgefüllter Salzkavernen unter Berücksichtigung betrieblicher Messungen in der IVG-Kavernenanlage Etzel. Das Markscheidewesen 91, Nr. 2, S. 368-374, 1984
"Vortrag auf der 35. Wissenschaftlichen Tagung des Deutschen Marktscheider Vereins in Clausthal-Zellerfeld am 23.09.1983"

[6] Hentschel, J.; Kleinitz, W.: Aufbau der Salzgesteine des Salzstockes Etzel abgeleitet aus Kernuntersuchungen und Loginterpretationen.
Compendium 75/76; Ergänzungsband der Zeitschrift Erdöl, Erdgas, Kohle, Petrochemie, S. 185-206
"3. DGMK-Fachgruppentagung vom 06. - 08.10.1975 in Hannover, in Gemeinschaft mit dem Verein für Tiefbohrtechnik e.V. (VTT)"

[7] Hofrichter, E.: Behälterlose Speicherung von Energieträgern in ausgesolten Kavernen. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift 7, 1972, S. 284-294
"Vortrag, gehalten auf der Arbeitstagung des Vereins für Tiefbohrtechnik e.V. und der Fachgruppe "Aufsuchung und Gewinnung" in der DGMK am 05.05.1972 in Clausthal-Zellerfeld"

[8] Kavernenbau- und Betriebsgesellschaft (KBB), Hannover: Schichtenverzeichnis Etzel Nord 1001 vom 17.11.1978

[9] Kavernenbau- und Betriebsgesellschaft (KBB), Hannover: Schichtenverzeichnis Etzel Nord 1002 vom 23.11.1978

[10] "Kavernenfeld Etzel fertig", Erdöl-Erdgas-Zeitschrift, 94. Jg., August 1978

[11] Kavernenspeicher-Projekt Etzel. Unterirdische Hohlräume für 10 Mio. t Rohölreserve des Bundes. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift, 90. Jg.; Oktober 1974

[12] Jaritz, W.: Eine Übersichtskarte der Tiefenlage der Salzstöcke in Nordwestdeutschland. Geol. Jahrb. 1972, Hannover 1990, S. 241-244 (mit Falttafel 9)

[13] Kavernenbau- und Betriebsgesellschaft (KBB), Hannover: Kavernenprojekt ETZEL. Bericht über die physiko-chemischen Salzkernuntersuchungen und Interpretationen der geophysikalischen Bohrlochmessungen im Salzgestein der Kavernenbohrung ETZEL K102

[14] Druckaufbautest in einer abgeschlossenen Kaverne Etzel K102 - Bericht 1: Laborversuche an Steinsalz der Lokationen Etzel Nord 1001/1002. Institut für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover, Hannover 1989

Literatur zu Kapitel 4:

[1] Prakla-Seismos AG: Echolog Etzel K102 - 893035 vom 17.04.1989

Literatur zu Kapitel 6:

[1] Druckaufbautest in einer abgeschlossenen Kaverne Etzel K102 - Handvorlage für das zweite Abstimmungsgespräch am 15.12.1978. Institut für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover, Hannover 1989

[2] Druckaufbautest in einer abgeschlossenen Kaverne Etzel K102 - Bericht zur 1. Druckaufbaustufe (September - November 1990). Institut für Unterirdisches Bauen, Universtität Hannover, Hannover 1990

[3] Druckaufbautest in einer abgeschlossenen Kaverne Etzel K102 - Bericht zur 2. Druckaufbaustufe (Dezember 1990 - März 1991). Institut für Unterirdisches Bauen, Universtität Hannover, Hannover 1991

[4] Druckaufbautest in einer abgeschlossenen Kaverne Etzel K102 - Bericht zur 3. Druckaufbaustufe (April - Juli 1991). Institut für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover, Hannover 1991

[5] Druckaufbautest in einer abgeschlossenen Kaverne Etzel K102 - Risikoabschätzung für Nachbarkavernen der K102 durch den Druckaufbautest. Institut für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover, Hannover 1991

[6] Druckaufbautest in einer abgeschlossenen Kaverne Etzel K102 - Zwischenbericht zum Stand des Druckaufbautests, Juni 1991. Institut für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover, Hannover 1991

[7] Druckaufbautest in einer abgeschlossenen Kaverne Etzel K102 - Zwischenbericht zum Stand des Druckaufbautests, September 1991. Institut für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover, Hannover 1991

[8] Druckaufbautest in einer abgeschlossenen Kaverne Etzel K102 - Zwischenbericht zum Stand des Druckaufbautests, Dezember 1991. Institut für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover, Hannover 1991

[9] Druckaufbautest in einer abgeschlossenen Kaverne Etzel K102 - Zwischenbericht zum Stand des Druckaufbautests, April 1992. Institut für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover, Hannover 1992

[10] Druckaufbautest in einer abgeschlossenen Kaverne Etzel K102 - Zwischenbericht zum Stand des Druckaufbautests, Oktober 1992. Institut für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover, Hannover 1992

[11] Druckaufbautest in einer abgeschlossenen Kaverne Etzel K102: Oktober 1992 - Januar 1993. Institut für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover, Hannover 1993

[12] Druckaufbautest in einer abgeschlossenen Kaverne Etzel K102: Februar 1993 - Juni 1993. Institut für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover, Hannover 1993

Literatur zu Kapitel 7:

[1] Borgmeier, M.: Untersuchungen zum belastungsabhängigen Durchlässigkeitsverhalten von Salzgestein für Gase unter besonderer Berücksichtigung der Porenraumbeladung. Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal, Dezember 1992.

[2] Fokker, P.A.; Kenter, C.J.; Rogaar, H.P.: The Effect of Fluid Pressures on the Mechanical Stability of (Rock) Salt. Seventh Symposium on Salt, Kyoto, 1992.

[3] Peach, C.J.: Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks. Faculteit Aardwetenschappen, Rijksuniversiteit te Utrecht, 1991.

3. Geologischer Aufbau im Bereich der Testkaverne Etzel K102

3.1 Salzstock Etzel

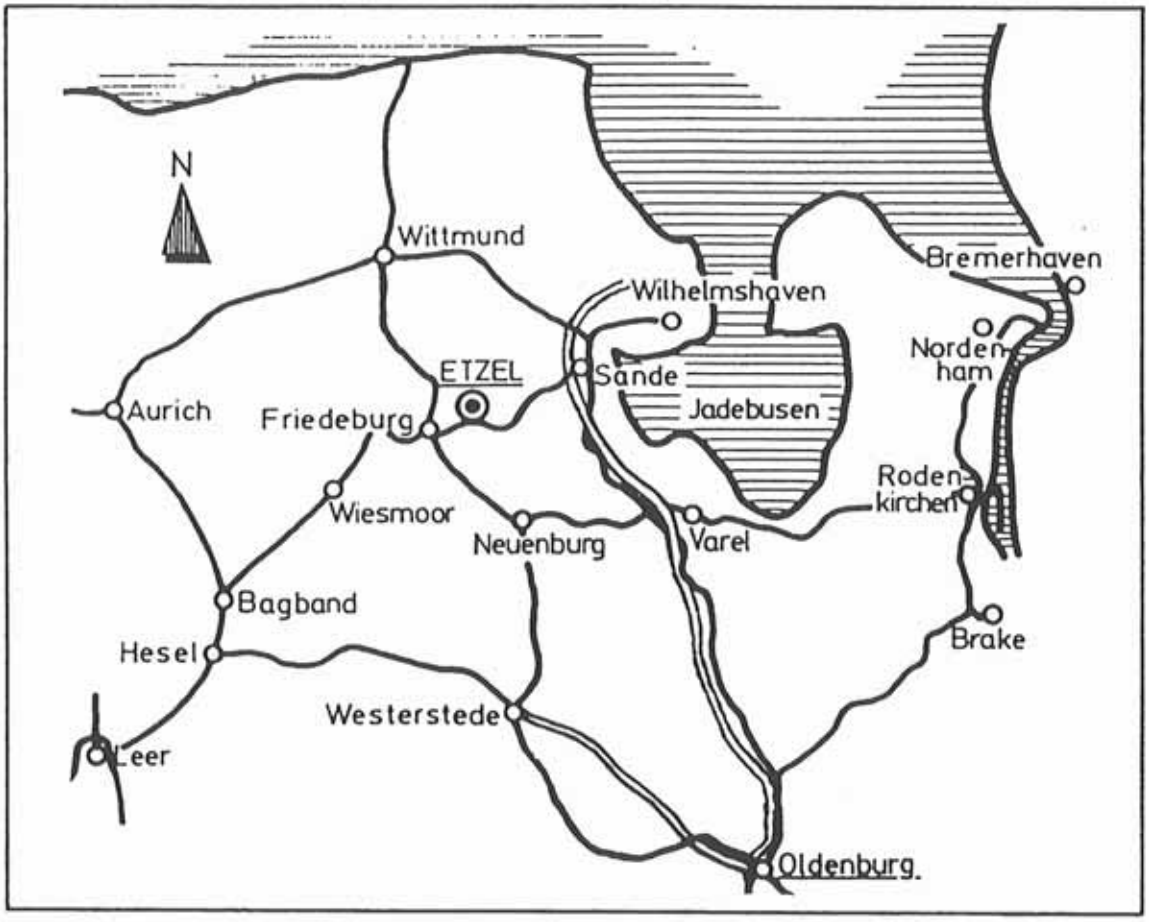
In Bild 3.1 ist die geographische Lage von Etzel westlich des Jadebusens anhand eines Kartenausschnitts Nordwestdeutschlands [6] zu ersehen. Im unteren Teil des Bildes sind für diesen Bereich die Toplagen der dort kartierten Salzstöcke bezogen auf die Erdoberfläche und die in diesem Gebiet ausgeführten Speicherkavernen dargestellt [7], [12].

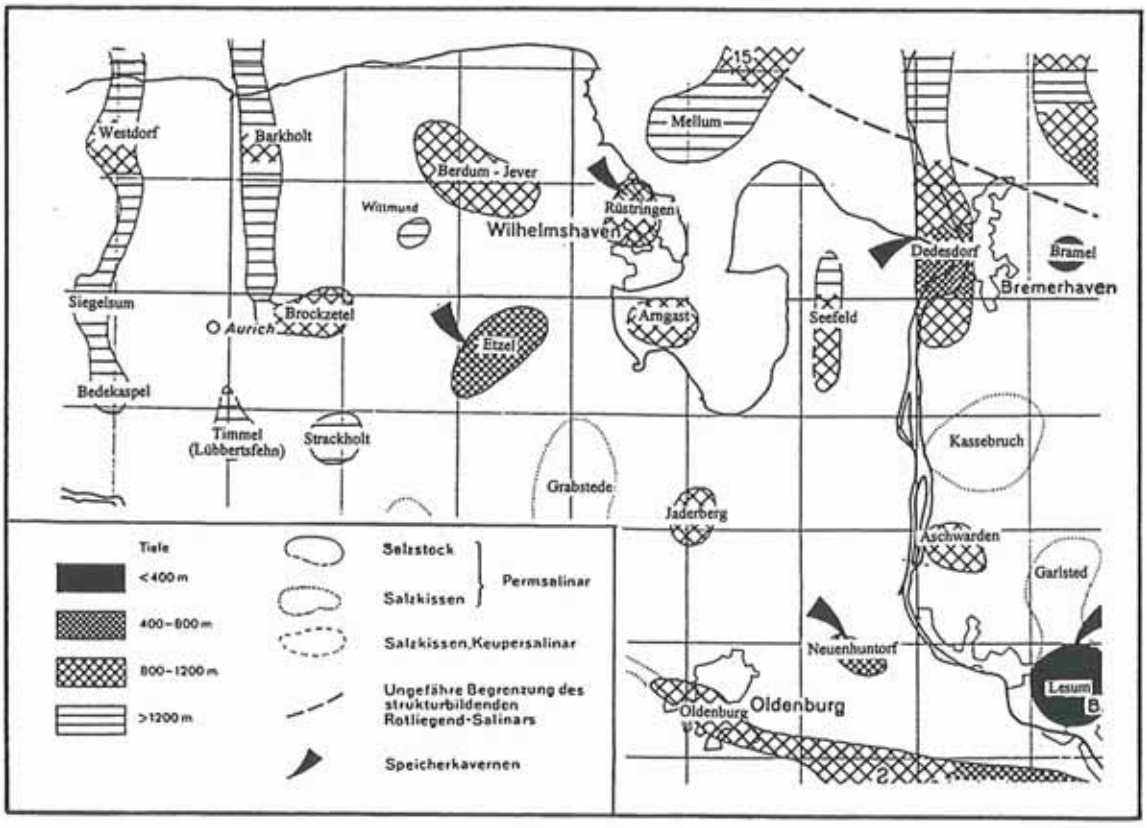
Für den Salzstock Etzel werden für die Toplage 400 bis 800 Meter angegeben. Beim Salzstock Etzel handelt es sich um ein Zechsteindiapir mit einem annähernd symmetrischen, elliptischen Umriß. Durch seismische Untersuchungen aus den 30er Jahren und nachfolgenden Erdölaufschlußbohrungen und durch zwei Aufschlußbohrungen im Jahre 1971 waren die Teufe und die räumliche Lage des Salzspiegels bekannt. Der Salzspiegel taucht in nordwestlicher Richtung flach, in südöstlicher Richtung steil ab. Die Mächtigkeit des Deckgebirges im Bereich des Kavernenfeldes besitzt ein Minimum von 643 m und ein Maximum von 750 bis 770 m im westlichen und 1024 m im östlichen Teil des Kavernenfeldes. Die Mächtigkeit der geologischen Abfolge oberhalb des Steinsalzes kann nach [11] etwa mit

30 - 100 m Quartär
250 - 300 m Tertiär
250 - 300 m Oberkreide
40 - 60 m Unterkreide
20 - 25 m Mantelanhydrit des Zechsteins

angegeben werden.

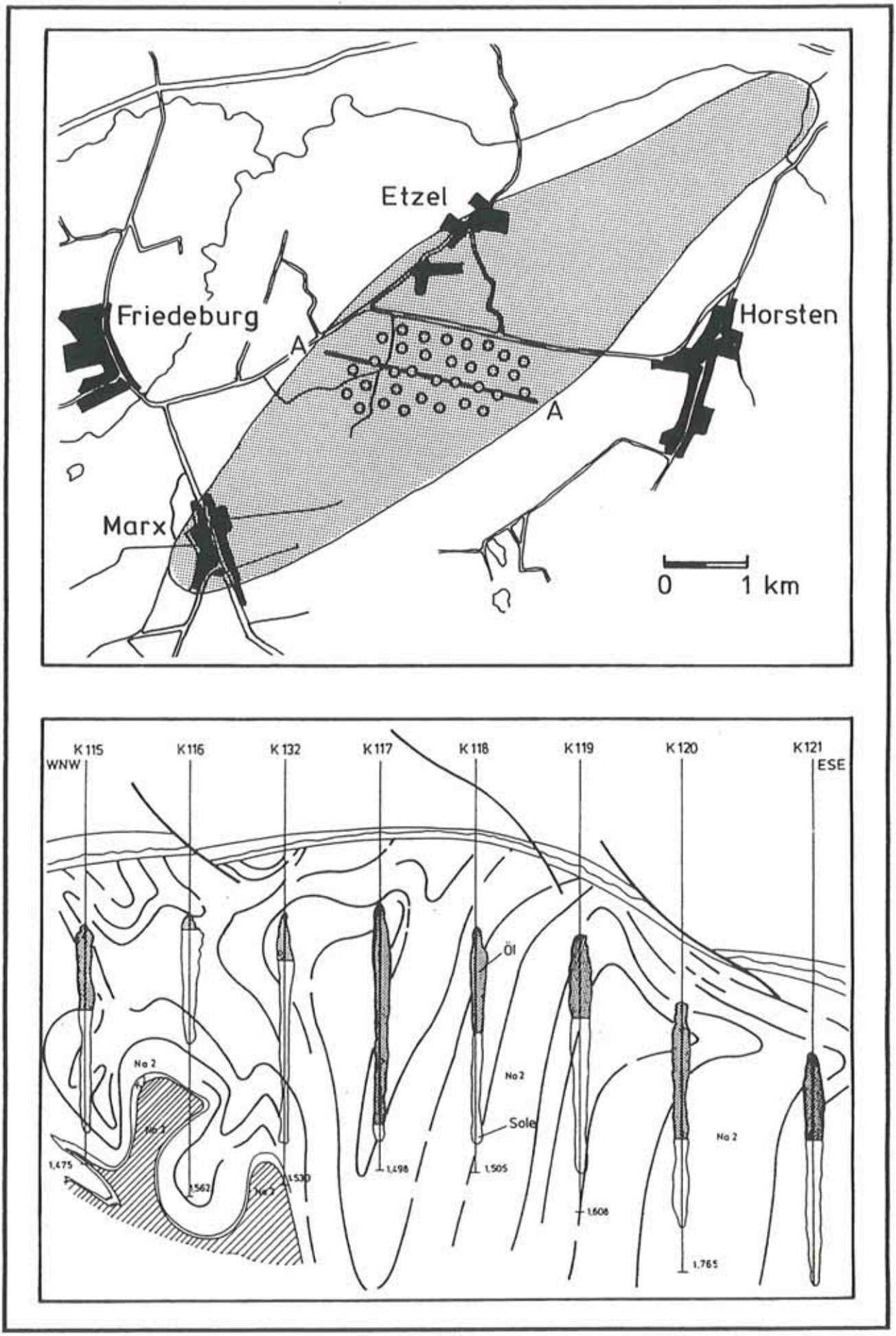
In Bild 3.2 ist ein Lageplan des Salzstockes und im unteren Teil des Bildes ein Schnitt im Bereich der Kavernenanlage in Nordwest-Südost-Richtung dargestellt [1], [5]. Im gezeigten Schnitt wird deutlich, wie die Teufenlage der Kavernen dem Salzspiegel folgt. Weiterhin ist die für die Kavernenanlage Etzel typische langgestreckte Form der Kavernen in unterschiedlichen Befüllsituationen Öl/Sole zu erkennen.





Lageplan Etzel

Bild 3.1



Lageplan und Schnitt A-A durch den Salzstock Etzel

Bild 3.2

3.2 Geologischer Aufbau im Bereich der Kavernenbohrung K102

Die für die Kaverne K102 niedergebrachte Bohrung ist in der Zeit vom 02.12.1971 bis zum 19.01.1972 bis zur Endteufe von 1545 m ausgeführt worden. Aus dem in [13] enthaltenen Bohrlochbild Etzel K102 ergibt sich ein geologischer Aufbau, der in Bild 3.3 dargestellt ist. Neben der geologischen Abfolge mit Teufenangaben sind die Kavernenverrohrung und die Kavernenform (nach der echometrischen Vermessung von 1989) aufgenommen worden.

Der Salzspiegel befindet sich in ca. 694 m Teufe. Das Kavernendach, ungefähr in 850 m Teufe, ist damit ca. 150 m vom Salzspiegel entfernt. Das Schichtstreichen wird in 705 m Teufe mit etwa 93° mit Einfallsrichtung nach SSW und in 1300 m mit 38° mit Einfallsrichtung SE angegeben. Der Einfallswinkel schwankt bis ca. 850 m zwischen 55° - 65° und von 934 m bis zur Endteufe zwischen 80° - 90°.

In einer isometrischen Darstellung im Bild 3.4 ist die Testkaverne K102 mit ihren Nachbarkavernen dargestellt. Die grauen Schattierungen repräsentieren die angetroffenen Mächtigkeiten der überlagernden Deckgebirgsschichten. Als zusätzliche Information zur geologischen Abfolge im Bereich der Testkaverne kann der Aufschluß der Explorationsbohrungen 1001 und 1002 hinzugezogen werden, die nordwestlich der Testkaverne im Bereich zwischen der K102 und K101 abgeteuft worden sind. Der Salzspiegel konnte hierbei in einer Teufe von 686 m angetroffen werden.

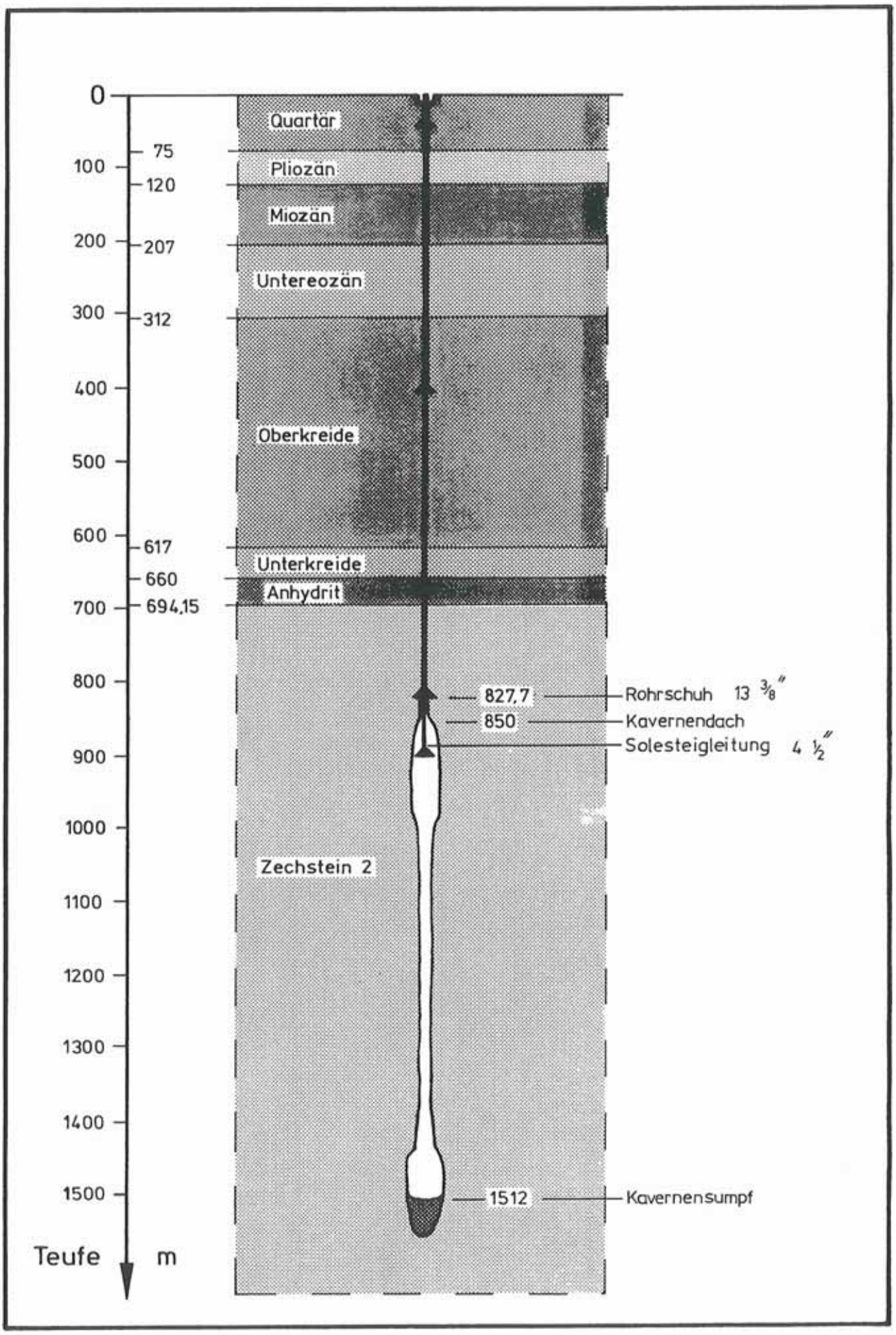
3.3 Ergebnisse aus physiko-chemischen Salzkernuntersuchungen

3.3.1 Zusammensetzung des Steinsalzes im Bereich der Kaverne Etzel K102

Im Bereich des Steinsalzes (Zechstein 2) sind 14 Kernstrecken erbohrt worden, drei davon orientiert.

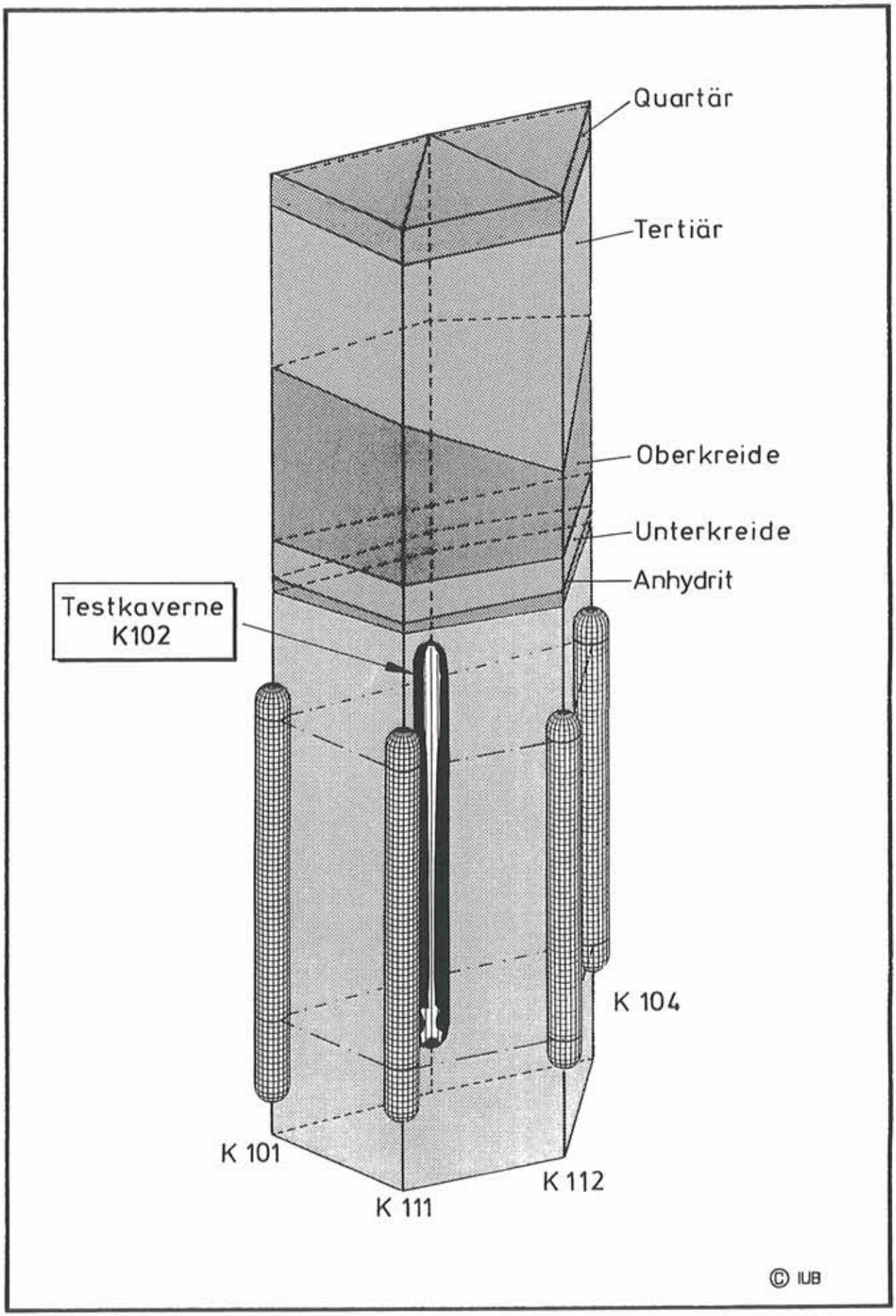
An 68 Kernen wurden physiko-chemische Untersuchungen durchgeführt. Neben Anhydrit und Polyhalit enthielt das Salzgestein geringe Mengen an Ton. Darüber hinaus konnte etwas Kieserit nachgewiesen werden.

Allgemein konnte über die untersuchte 830 m lange Salzstrecke ein relativ einheitlicher Mineralgehalt festgestellt werden.



Geologischer Aufbau im Bereich der Kavernenbohrung K102

Bild 3.3



Geologisches Blockbild für den
Bereich der Testkaverne K102

Bild 3.4

Für die geplante Kaverne im Bereich zwischen 845 - 1465 m und für den Sumpfbereich (1465 - 1523 m) ergaben sich folgende Zusammensetzungen:

	Kavernenbereich von bis 845 - 1465 m	Sumpfbereich von bis 1465 - (1523) m
Anhydrit (Vol.%)	4,5	5,2
Polyhalit (Vol.%)	3,6	3,2
Ton (Vol.%)	1,9	2,3

Tab. 3.1: Zusammensetzung des Steinsalzes der Bohrung Etzel K102

Als Mittelwerte für den gesamten Untersuchungsbereich sind in [13] für Anhydrit 4,83 Vol.%, Polyhalit 3,6 Vol.% und für Ton 2,1 Vol.% zu finden.

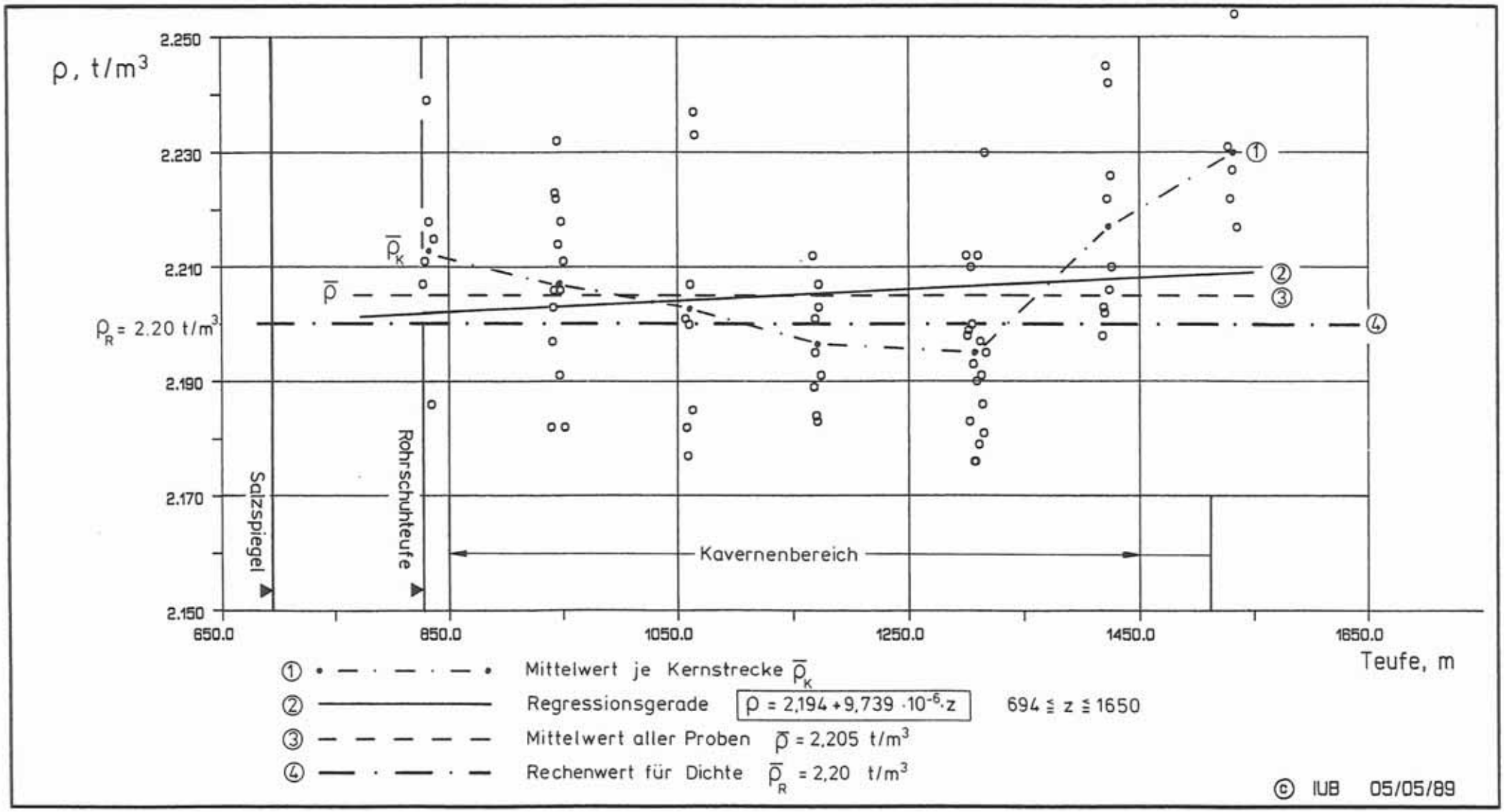
3.3.2 Dichte des Steinsalzes im Bereich der Bohrung K102

Für die Dichte des Steinsalzes wird ein Wertebereich von 2,176 bis 2,255 g/ml und ein Mittelwert von 2,206 g/ml angegeben [13].

In Bild 3.5 sind die Ergebnisse der Dichtebestimmung bezogen auf die Teufe der untersuchten Kerne aufgetragen.

Zusätzlich zur Orientierung ist die Lage des Salzspiegels, die Rohrschuhteufe der letzten zementierten Verrohrung und der Kavernenbereich aufgenommen worden.

Für die aufgeführten Ergebnisse der Dichteuntersuchungen sind im Vergleich zu dem die Kurve 4 darstellenden theoretischen Rechenwert für die Steinsalzdichte drei mögliche Auswertungen dargestellt.



Steinsalzdichten der Bohrung Etzel K102 aus physiko - chemischen Salzkernuntersuchungen [13]

Bild 3.5

Kurve 1 kennzeichnet den Mittelwert je Kernstrecke. Die Kurve 2 stellt eine Regressionsanalyse der Gesamtheit der festgestellten Dichten dar. Mit der Formulierung

$$\rho = 2{,}194 + 9{,}739 \cdot 10^{-6} \cdot z$$

kann für die Teufe z zwischen 694 m und 1650 m die Dichte des Salzgesteins beschrieben werden.

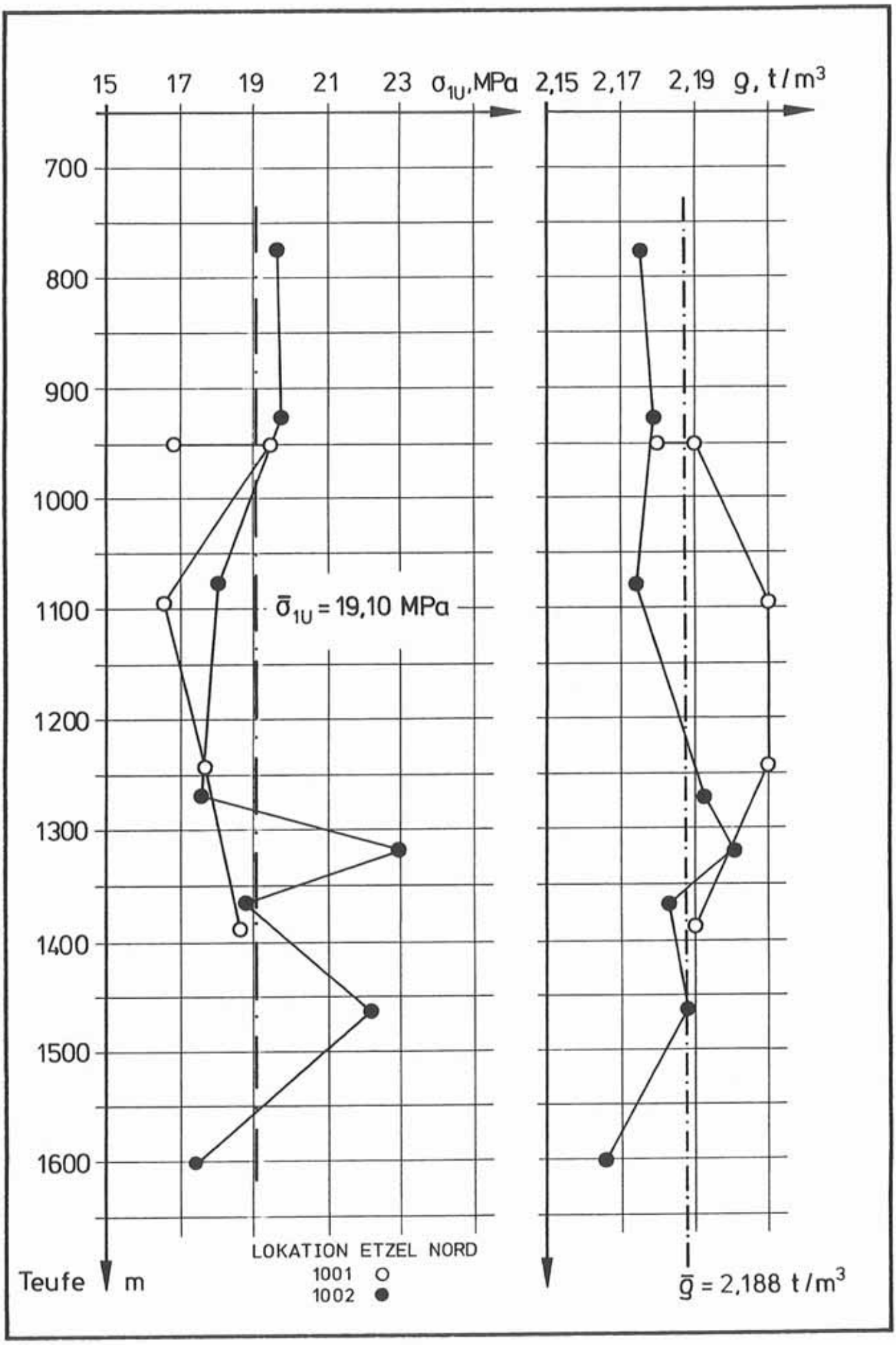
Der Mittelwert aller Proben wird mit der Geraden 3 beschrieben. Er kann mit 2,205 t/m³ angegeben werden.

Zu einem Vergleich mit den aus den physiko-chemischen Salzkernuntersuchungen entnommenen Dichtewerten für das Steinsalz der Kavernenbohrung Etzel K102 können die innerhalb der Laboruntersuchungen am Institut für Unterirdisches Bauen ermittelten Dichten herangezogen werden.

Im Bild 3.6 sind beispielhaft in der linken Darstellung die ermittelten Festigkeiten aus einaxialen Druckversuchen über die Teufe aufgetragen. Die Prüfkörper entstammen den Lokationen Etzel Nord 1001 und Etzel Nord 1002 [14]. Aus dem Diagramm läßt sich keine Teufenabhängigkeit erkennen. Dasselbe Ergebnis ergibt sich, wenn die Dichten in Abhängigkeit der Teufe dargestellt werden (linke Bildhälfte). Aus diesem Grund kann im Hinblick auf die Dichte des Salzgesteins über die Teufe der gleiche Wert angesetzt werden. Der Mittelwert für die Proben, mit denen einaxiale Druckversuche durchgeführt wurden, kann mit 2,188 t/m³ angegeben werden. Für Steinsalz der Lokation Etzel Nord 1001 beträgt der Mittelwert aus sämtlichen untersuchten Proben 2,195 t/m³, für die Lokation Etzel Nord 1002 2,186 t/m³. Der Mittelwert für beide Lokationen zusammen beträgt 2,190 t/m³.

Nach [13] konnten keine Anzeichen für massive Anhydritbänke oder Kalisalzeinlagerungen, weder aus Loginterpretationen noch aus Spülproben und Kernbefunden, festgestellt werden.

Hieraus ist zu ersehen, daß die Annahme einer Dichte für das anstehende Steinsalz im Bereich von 2,20 t/m³ als zutreffend anzusehen ist.



Einaxiale Druckfestigkeit und Dichte
Vergleich der Bohrungen Etzel Nord 1001 - 1002

Bild 3.6

3.4 Explorationsbohrungen Etzel Nord 1001 und Etzel Nord 1002

3.4.1 Lage und geologisches Profil der Bohrungen

Für gesteinsmechanische Untersuchungen an Steinsalz des Salzstockes Etzel konnte auf am Institut für Unterirdisches Bauen befindliches Prüfkörpermaterial aus zwei Explorationsbohrungen nordöstlich des Kavernenfeldes Etzel aus dem Jahre 1978 zurückgegriffen werden.

Zweck dieser Salzstockuntersuchungsbohrungen war die Erkundung des Zechstein-Salzstockes Etzel hinsichtlich seiner Zusammensetzung und Strukturierung im nördlichen Bereich. Die Bohrung Etzel Nord 1001 befindet sich ca. 3 km nordöstlich des Kavernenfeldes und wurde vom Bohrunternehmen Deutsche Schachtbau- und Tiefbohrgesellschaft mbH, Lingen (24.08. - 26.09.1978) ausgeführt. Beim Bohrvorgang bis zur Endteufe von 1650,0 m wurden zehn orientiert gebohrte Kernstrecken gewonnen. Die geologische Abfolge dieser Bohrung [8] ist Bild 3.7 zu entnehmen.

Die Bohrung Etzel Nord 1002 liegt ca. 1,8 km nordöstlich der Kavernenanlage Etzel. Bei dieser Bohrung wurden neun orientierte Kernstrecken erbohrt. Die Endteufe von 1650,0 m entspricht der Bohrung Etzel Nord 1001 (Bohrzeit: 03.10. - 04.11.1978). Die geologische Abfolge [9] ist in Bild 3.8 angegeben.

3.4.2 Festigkeits- und Verformungsverhalten

An Probenmaterial der obengenannten Bohrungen wurden einaxiale und triaxiale Versuche (Kurzzeitversuche) zur Einordnung des Festigkeitsverhaltens durchgeführt. Im oberen Teil des Bildes 3.9 ist eine Einordnung der ermittelten Kurzzeitfestigkeiten dargestellt [14].

Eine Gegenüberstellung der sekundären Kriechrate $\dot{\varepsilon}_s$ findet sich im unteren Teil des Bildes 3.9. Für die Bestimmung der Parameter η_m und m für das Stoffgesetz LUBBY2 sind sowohl einaxiale als auch triaxiale Kriechversuche durchgeführt worden [14].

Insgesamt liegt das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Steinsalzes aus den Bohrungen Etzel Nord 1001 und 1002 im mittleren Bereich der bisher am Institut für Unterirdisches Bauen vorhandenen Erfahrungswerte.

Etzel-Nord 1001

Teufe unter GOK		Geologische Abfolge
ca. 85	m	Quartär und Pliozän
---------- Transgression ----------		
312	m	Mittel- und Untermiozän
---------- Transgression ----------		
329	m	Mitteloligozän
335	m	Unteroligozän
361	m	Obereozän 3
425	m	Obereozän 2
439	m	Obereozän 1
445	m	Untereozän
---------- Störung ----------		
592	m	Oberkreide (ungegliedert)
638	m	Cenoman
672	m	Alb
686	m	Apt
710	m	Hauterive
---------- Transgression ----------		
727,5	m	Mantelanhydrit des Salzstockes
Endteufe 1650	m	Zechstein-Steinsalz der Staßfurt-Folge (Na 2 beta)

© IUB

Geologie der Bohrung Etzel-Nord 1001

Bild 3.7

Etzel-Nord 1002

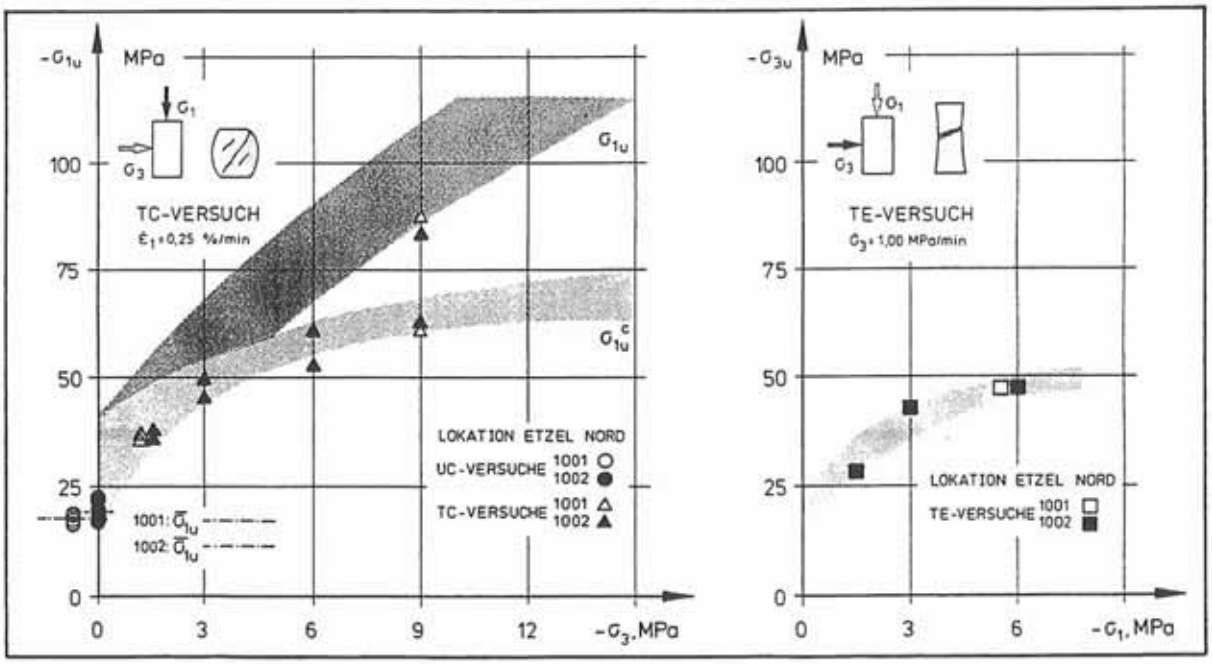
Teufe unter GOK		Geologische Abfolge
ca. 65	m	Quartär und Pliozän
---------- Transgression ----------		
211	m	Mittel- bis Untermiozän
---------- Transgression ----------		
331,5	m	Untereozän 3 - 1
---------- Transgression ----------		
614	m	Oberkreide (ungegliedert)
663	m	Cenoman
695	m	Alb
710	m	Apt
732,5	m	Hauterive
---------- Transgression ----------		
754	m	Mantelanhydrit des Salzstocks
Endteufe 1650	m	Zechstein-Steinsalz der Staßfurt-Folge (Na 2 beta)

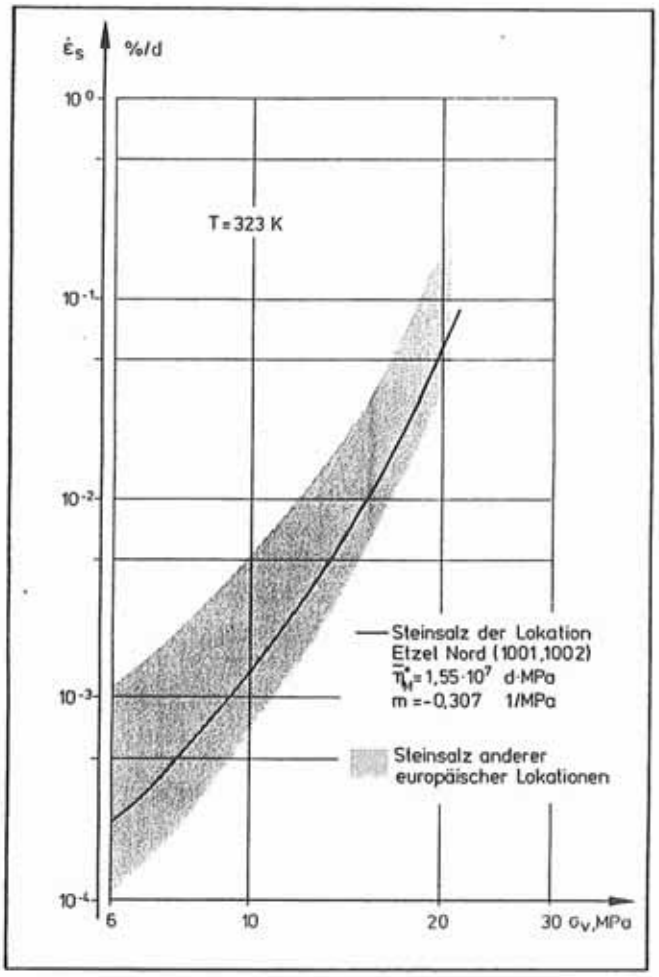
© IUB

Geologie der Bohrung Etzel-Nord 1002

Bild 3.8

Einordnung der ermittelten Kurzzeitfestigkeiten





Sekundäre Kriechraten

Stoffgesetz LUBBY2:

$$\underline{\dot{\varepsilon}}^v(t) = \frac{2}{3}\,\frac{1}{\bar{\eta}_M(\sigma, T)} \cdot \underline{M}_2 \cdot \underline{\sigma}$$

mit:

$$\bar{\eta}_M(\sigma) = \bar{\eta}_M^* \cdot \exp(m \cdot \sigma_v)$$

© IUB

Festigkeits- und Verformungsverhalten

Bild 3.9

4. Kavernengeometrie der Testkaverne Etzel K102

4.1 Kavernenanlage Etzel

Im Auftrag der Bundesregierung wurden von der Industrieverwaltungsgesellschaft (IVG), Bonn-Bad Godesberg, auf dem Salzstock Etzel - ca. 25 km südwestlich von Wilhelmshaven - in den Jahren 1974 bis 1978 33 Kavernen auf einer Fläche von 230 ha in einem hexagonalen Raster von ca. 250 m errichtet. Die Kavernenanlage Etzel ist für die Einlagerung von 10 Mio. Tonnen Rohöl vorgesehen und umfaßt ein geometrisches Gesamtvolumen von 13,6 Mio. m^3.

In Bild 4.1 findet sich eine Darstellung der gesamten Kavernenanlage mit Betriebsplatz, Verteilerstationen und den einzelnen Kavernenplätzen.

4.2 Kaverne K102

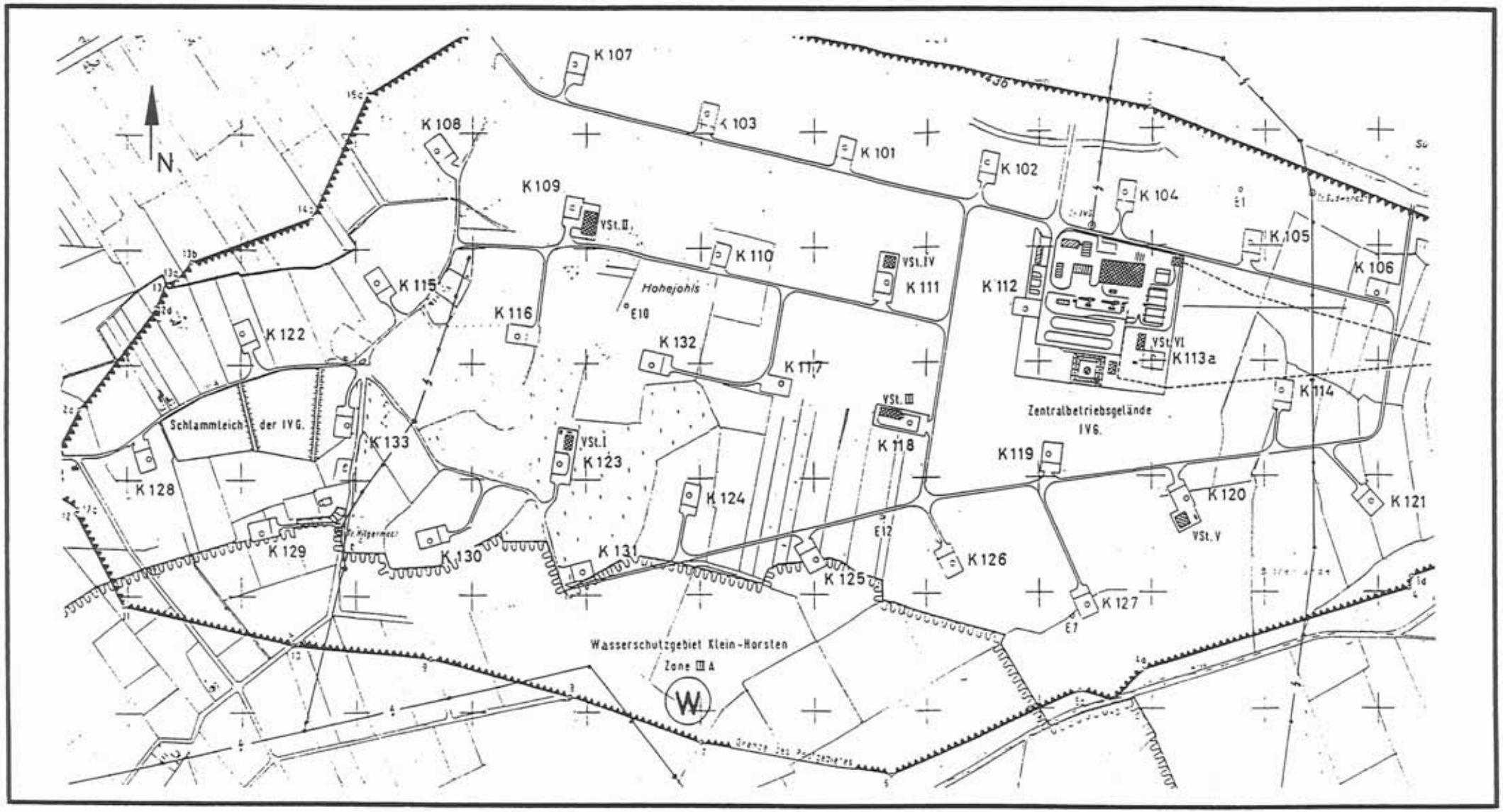
4.2.1 Kavernenbereich der Testkaverne K102

Die Kaverne K102 befindet sich am nördlichen Rand des Kavernenfeldes. Im Bild 4.2 ist die Kaverne K102 mit den Nachbarkavernen und weiteren Kavernen des nördlichen Bereichs dargestellt.

Die vor Beginn des Druckaufbautests vorgesehene echometrische Vermessung ist im April 1989 nach Entlastung auf Solekopfdruck = 0 bar durchgeführt [1] worden.

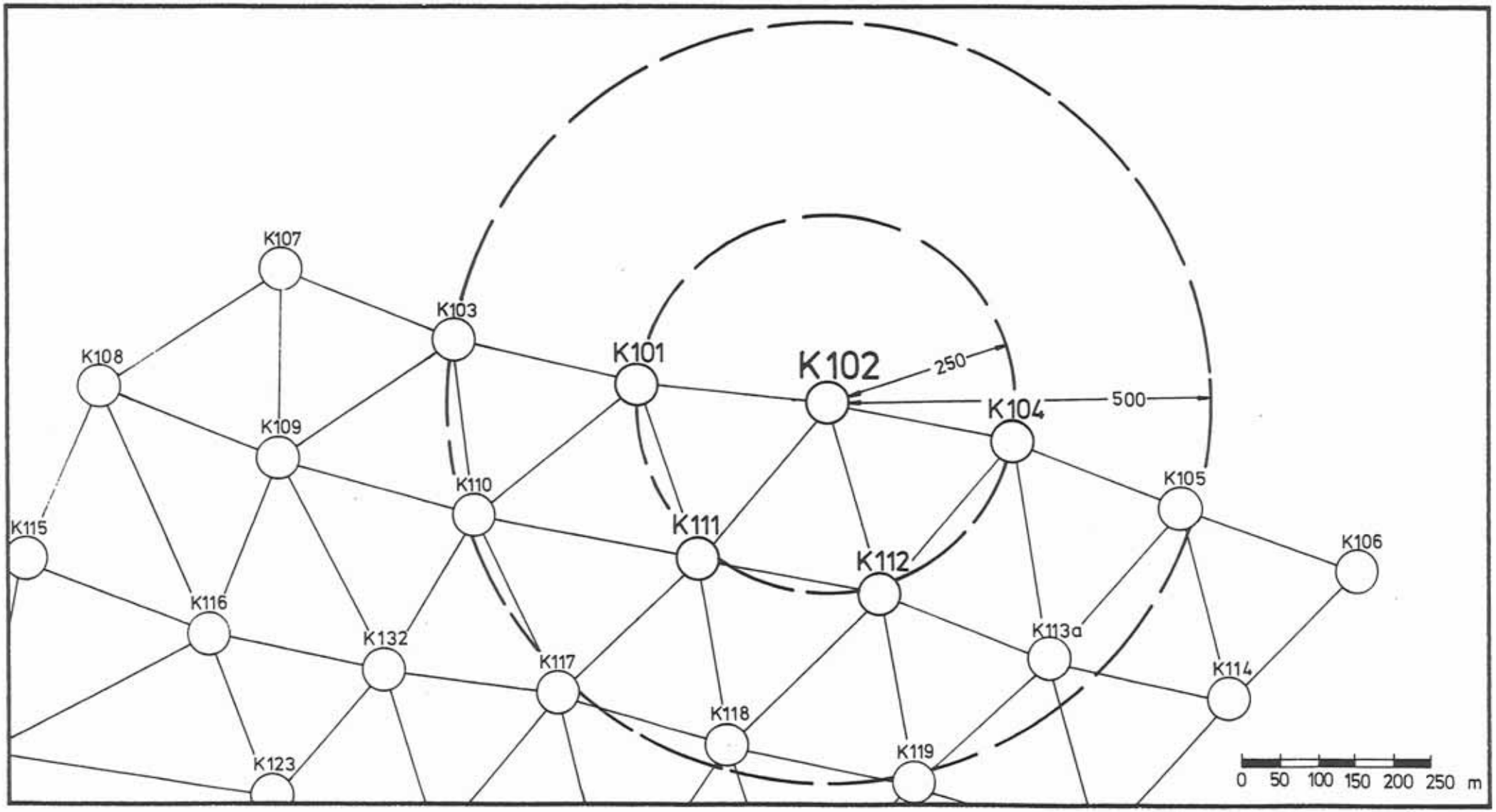
Das Volumen kann danach unter Berücksichtigung der Volumenanteile im äußersten Sumpfbereich sowie des Volumens des Kavernenhalses nach [1] mit ca. 233.315 m^3 angegeben werden. In Bild 4.3 ist ein Schnitt der Kaverne K102 dargestellt. Dieser entspricht dem Vertikalschnitt 10 (315° - 135°) der echometrischen Vermessung vom 17.04.1989. Die senkrechte Ausdehnung beträgt 662 m. Das Kavernendach befindet sich in einer Teufe von 850 m.

In Bild 4.4 ist das Flächen- und Volumenprotokoll der echometrischen Vermessung enthalten [1]. Der Dachbereich bis zu einer Teufe von 1 000 m hat einen Radius von ca. 13,50 m. Der im Flächen- und Volumenprotokoll angegebene Radius entspricht dem mittleren Radius in Bild 4.6 bzw. kann mit dem Radius- und Durchmesserprotokoll in Bild 4.5 verglichen werden. Ab 1 000 m Teufe verjüngt sich die Kaverne zunächst sehr stark, daran anschließend relativ kontinuierlich bis zum minimalen Radius von 6,77 m (Mittelwert) in einer



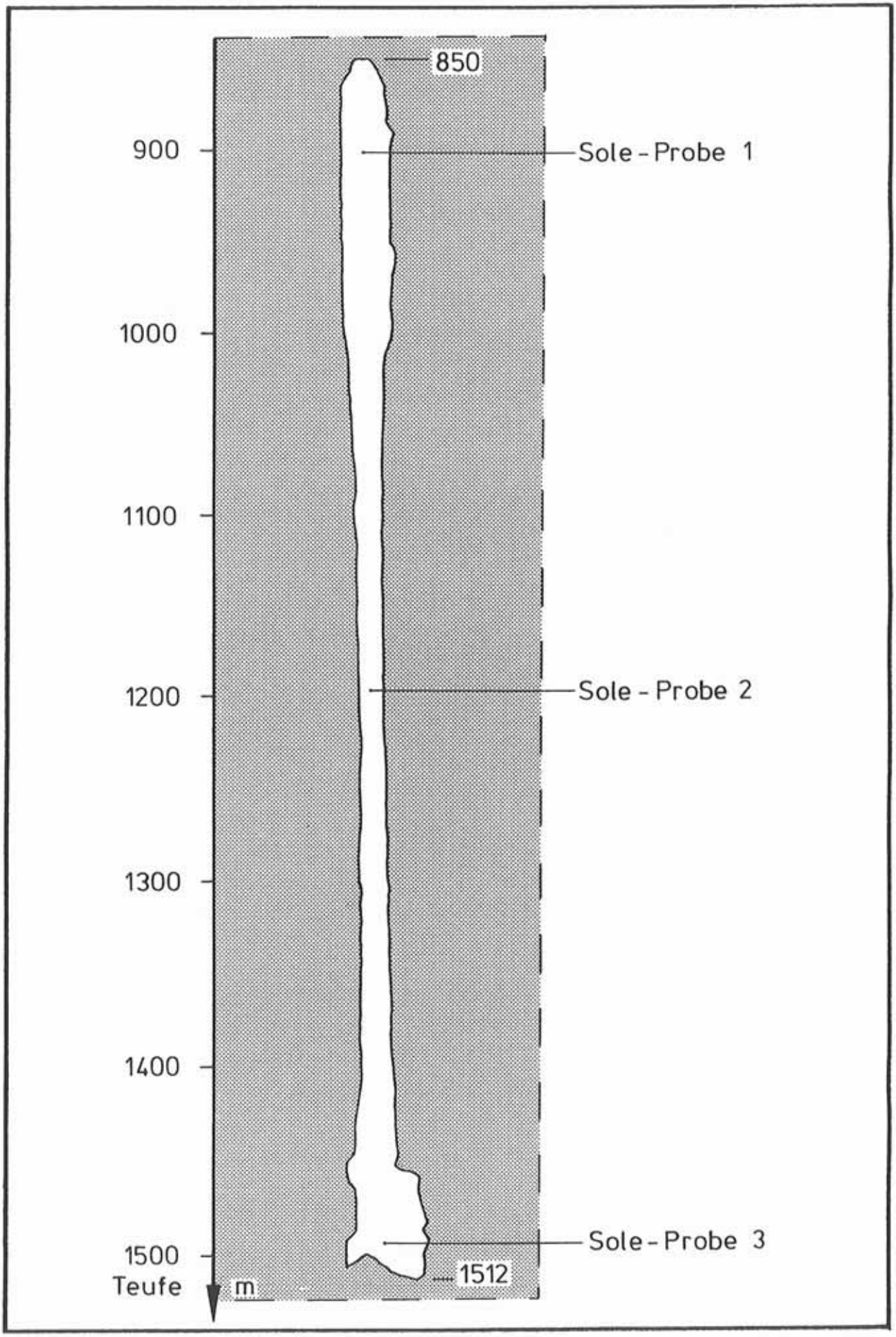
IVG - Kavernenanlage Etzel

Bild 4.1



Kaverne K102 mit Nachbarkavernen im nördlichen
Feldteil der IVG - Kavernenanlage Etzel

Bild 4.2



Vertikalschnitt nach echometrischer Vermessung vom 17.04.89

Bild 4.3

Tiefe [m]	Fläche [m^2]	Radius [m]	Tiefenbereich [m]	Volumen [m^3]	Gesamtvolumen [m^3]
851.0	73.00	4.82	849.80 <-> 852.00	160.6	160.6
853.0	137.00	6.60	852.00 <-> 854.00	274.0	434.6
855.0	126.00	6.33	854.00 <-> 856.25	283.5	718.1
857.5	192.00	7.82	856.25 <-> 858.75	480.0	1198.1
860.0	309.00	9.92	858.75 <-> 861.25	772.5	1970.6
862.5	384.00	11.06	861.25 <-> 863.75	960.0	2930.6
865.0	482.00	12.39	863.75 <-> 867.50	1807.5	4738.1
870.0	470.00	12.23	867.50 <-> 875.00	3525.0	8263.1
880.0	517.00	12.83	875.00 <-> 882.50	3877.5	12140.6
885.0	511.00	12.75	882.50 <-> 887.50	2555.0	14695.6
890.0	606.00	13.89	887.50 <-> 892.50	3030.0	17725.6
895.0	605.00	13.88	892.50 <-> 897.50	3025.0	20750.6
900.0	606.00	13.89	897.50 <-> 905.00	4545.0	25295.6
910.0	546.00	13.18	905.00 <-> 917.50	6825.0	32120.6
925.0	564.00	13.40	917.50 <-> 932.50	8460.0	40580.6
940.0	560.00	13.35	932.50 <-> 945.00	7000.0	47580.6
950.0	535.00	13.05	945.00 <-> 952.50	4012.5	51593.1
955.0	635.00	14.22	952.50 <-> 962.50	6350.0	57943.1
970.0	585.00	13.65	962.50 <-> 977.50	8775.0	66718.1
985.0	556.00	13.30	977.50 <-> 992.50	8340.0	75058.1
1000.0	496.00	12.57	992.50 <-> 1007.50	7440.0	82498.1
1015.0	304.00	9.84	1007.50 <-> 1022.50	4560.0	87058.1
1030.0	257.00	9.04	1022.50 <-> 1037.50	3855.0	90913.1
1045.0	228.00	8.52	1037.50 <-> 1052.50	3420.0	94333.1
1060.0	205.00	8.08	1052.50 <-> 1067.50	3075.0	97408.1
1075.0	194.00	7.86	1067.50 <-> 1082.50	2910.0	100318.1
1090.0	179.00	7.55	1082.50 <-> 1097.50	2685.0	103003.1
1105.0	170.00	7.36	1097.50 <-> 1112.50	2550.0	105553.1
1120.0	164.00	7.23	1112.50 <-> 1127.50	2460.0	108013.1
1135.0	159.00	7.11	1127.50 <-> 1142.50	2385.0	110398.1
1150.0	153.00	6.98	1142.50 <-> 1157.50	2295.0	112693.1
1165.0	149.00	6.89	1157.50 <-> 1172.50	2235.0	114928.1
1180.0	148.00	6.86	1172.50 <-> 1187.50	2220.0	117148.1
1195.0	145.00	6.79	1187.50 <-> 1202.50	2175.0	119323.1
1210.0	144.00	6.77	1202.50 <-> 1217.50	2160.0	121483.1
1225.0	148.00	6.86	1217.50 <-> 1232.50	2220.0	123703.1
1240.0	153.00	6.98	1232.50 <-> 1247.50	2295.0	125998.1
1255.0	156.00	7.05	1247.50 <-> 1262.50	2340.0	128338.1
1270.0	159.00	7.11	1262.50 <-> 1277.50	2385.0	130723.1
1285.0	163.00	7.20	1277.50 <-> 1292.50	2445.0	133168.1
1300.0	167.00	7.29	1292.50 <-> 1307.50	2505.0	135673.1
1315.0	173.00	7.42	1307.50 <-> 1322.50	2595.0	138268.1
1330.0	176.00	7.48	1322.50 <-> 1337.50	2640.0	140908.1
1345.0	185.00	7.67	1337.50 <-> 1352.50	2775.0	143683.1
1360.0	192.00	7.82	1352.50 <-> 1367.50	2880.0	146563.1
1375.0	205.00	8.08	1367.50 <-> 1382.50	3075.0	149638.1
1390.0	218.00	8.33	1382.50 <-> 1395.00	2725.0	152363.1
1400.0	229.00	8.54	1395.00 <-> 1405.00	2290.0	154653.1
1410.0	246.00	8.85	1405.00 <-> 1415.00	2460.0	157113.1
1420.0	265.00	9.18	1415.00 <-> 1425.00	2650.0	159763.1
1430.0	287.00	9.56	1425.00 <-> 1435.00	2870.0	162633.1
1440.0	308.00	9.90	1435.00 <-> 1442.50	2310.0	164943.1
1445.0	401.00	11.30	1442.50 <-> 1447.50	2005.0	166948.1
1450.0	495.00	12.55	1447.50 <-> 1452.50	2475.0	169423.1
1455.0	1194.00	19.50	1452.50 <-> 1457.50	5970.0	175393.1
1460.0	1058.00	18.35	1457.50 <-> 1465.00	7935.0	183328.1
1470.0	997.00	17.81	1465.00 <-> 1475.00	9970.0	193298.1
1480.0	1107.00	18.77	1475.00 <-> 1482.50	8302.5	201600.6
1485.0	1123.00	18.91	1482.50 <-> 1487.50	5615.0	207215.6
1490.0	1408.00	21.17	1487.50 <-> 1492.50	7040.0	214255.6
1495.0	1547.00	22.19	1492.50 <-> 1497.50	7735.0	221990.6
1500.0	1345.00	20.69	1497.50 <-> 1502.50	6725.0	228715.6
1505.0	920.00	17.11	1502.50 <-> 1507.50	4600.0	233315.6

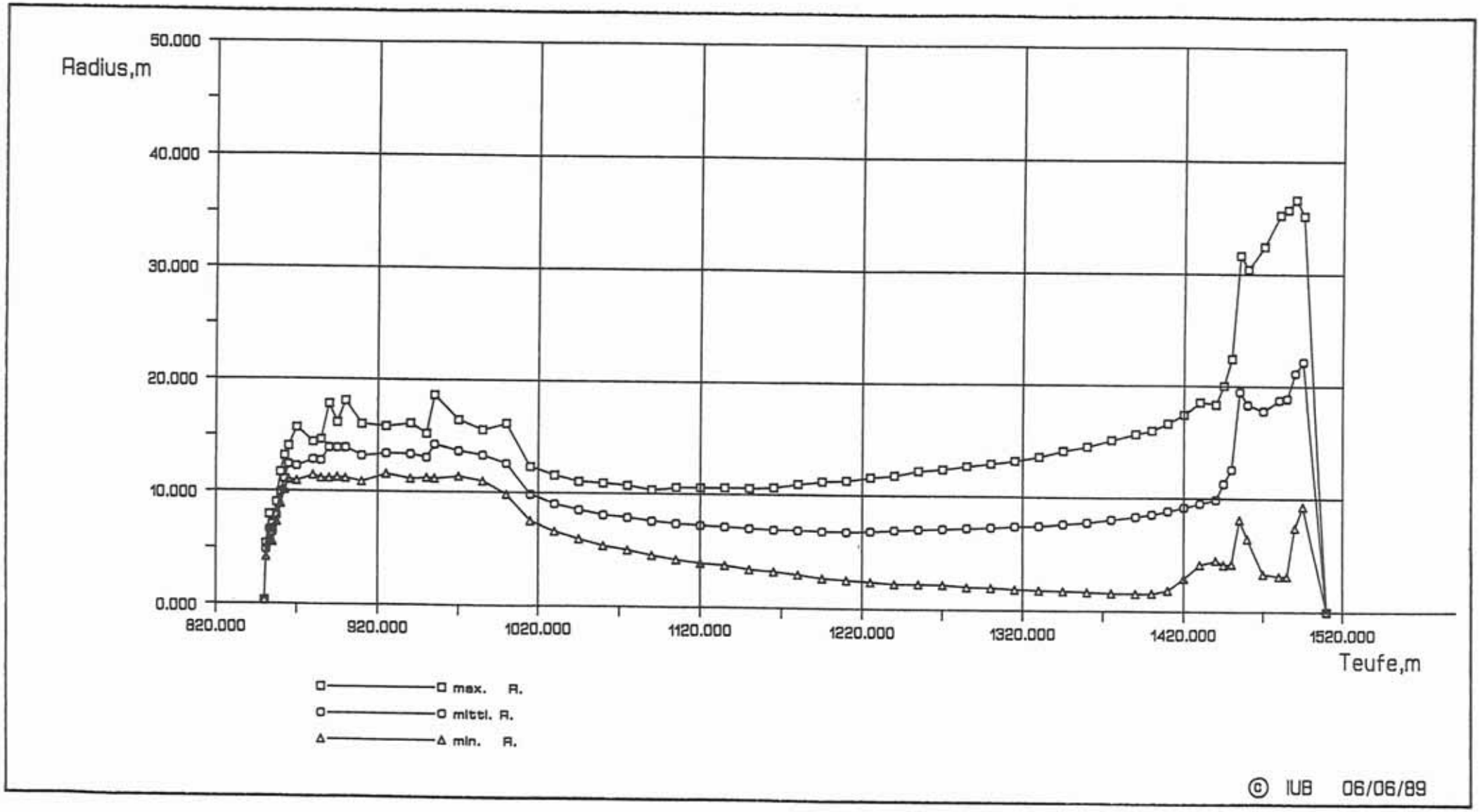
Flächen- und Volumenprotokoll
nach [1]

Bild 4.4

TIEFE	RADIUS(mittel)	RADIUS(max) [m]	RADIUS(min) [m]	DURCHMESSER(max) [m]	DURCHMESSER(min)
851.0m	4.82m	5.32/ 75°	4.15/290°	10.36/ 60<>240°	9.03/110<>290°
853.0m	6.60m	7.91/ 55°	5.66/275°	13.94/ 55<>235°	12.52/110<>290°
855.0m	6.33m	7.03/ 40°	5.48/300°	13.47/ 45<>225°	11.82/ 95<>275°
857.5m	7.82m	8.99/ 70°	7.27/250°	16.40/ 75<>255°	15.17/155<>335°
860.0m	9.92m	11.61/ 45°	8.86/210°	21.20/ 70<>250°	18.90/130<>310°
862.5m	11.06m	13.16/ 29°	10.09/280°	23.76/ 29<>209°	20.78/130<>310°
865.0m	12.39m	14.02/ 70°	11.02/300°	26.45/ 70<>250°	23.55/130<>310°
870.0m	12.23m	15.67/ 65°	10.91/290°	27.50/ 65<>245°	23.03/130<>310°
880.0m	12.83m	14.39/ 80°	11.42/315°	27.10/ 69<>249°	24.32/165<>345°
885.0m	12.75m	14.62/ 80°	11.15/300°	26.36/ 80<>260°	24.15/135<>315°
890.0m	13.89m	17.77/170°	11.15/305°	29.66/ 19<>199°	24.78/ 24<>204°
895.0m	13.88m	16.13/105°	11.24/310°	28.74/ 25<>205°	26.24/130<>310°
900.0m	13.89m	18.05/ 70°	11.15/315°	30.12/ 70<>250°	25.73/135<>315°
910.0m	13.18m	16.00/ 70°	10.88/320°	27.92/ 70<>250°	25.09/150<>330°
925.0m	13.40m	15.82/ 75°	11.56/310°	28.99/ 75<>255°	25.31/ 15<>195°
940.0m	13.35m	16.09/ 85°	11.15/309°	28.26/ 90<>270°	25.37/175<>355°
950.0m	13.05m	15.18/ 80°	11.25/305°	27.53/ 80<>260°	25.13/ 0<>180°
955.0m	14.22m	18.60/105°	11.19/315°	30.22/105<>285°	26.14/ 40<>220°
970.0m	13.65m	16.41/ 95°	11.38/310°	28.39/ 95<>275°	26.11/175<>355°
985.0m	13.30m	15.55/150°	10.97/315°	27.24/ 70<>250°	25.61/ 20<>200°
1000.0m	12.57m	16.14/155°	9.82/325°	26.20/155<>335°	23.18/ 19<>199°
1015.0m	9.84m	12.29/145°	7.50/305°	19.89/ 85<>265°	18.55/ 20<>200°
1030.0m	9.04m	11.56/120°	6.60/310°	18.25/120<>300°	17.07/ 20<>200°
1045.0m	8.52m	11.02/135°	5.94/295°	17.15/ 85<>265°	16.01/ 25<>205°
1060.0m	8.08m	10.91/140°	5.34/315°	16.34/140<>320°	14.86/ 15<>195°
1075.0m	7.86m	10.71/135°	4.98/320°	15.74/135<>315°	14.37/ 20<>200°
1090.0m	7.55m	10.32/150°	4.52/310°	14.94/150<>330°	13.62/ 15<>195°
1105.0m	7.36m	10.56/115°	4.15/315°	14.81/115<>295°	13.18/ 20<>200°
1120.0m	7.23m	10.55/135°	3.84/300°	14.43/135<>315°	12.82/ 15<>195°
1135.0m	7.11m	10.56/135°	3.70/305°	14.32/135<>315°	12.40/ 20<>200°
1150.0m	6.98m	10.53/130°	3.38/310°	13.95/135<>315°	12.07/ 25<>205°
1165.0m	6.89m	10.62/125°	3.20/305°	13.85/130<>310°	11.63/ 25<>205°
1180.0m	6.86m	10.93/120°	2.96/300°	13.92/125<>305°	11.12/ 40<>220°
1195.0m	6.79m	11.17/125°	2.65/305°	13.92/130<>310°	10.35/ 39<>219°
1210.0m	6.77m	11.27/120°	2.51/300°	13.83/125<>305°	9.84/ 40<>220°
1225.0m	6.86m	11.58/120°	2.38/310°	14.05/125<>305°	9.87/ 35<>215°
1240.0m	6.98m	11.76/130°	2.23/320°	14.15/124<>304°	10.02/ 44<>224°
1255.0m	7.05m	12.19/124°	2.23/320°	14.48/130<>310°	9.78/ 39<>219°
1270.0m	7.11m	12.37/125°	2.20/299°	14.61/125<>305°	9.57/ 35<>215°
1285.0m	7.20m	12.68/130°	2.01/300°	14.74/130<>310°	9.47/ 45<>225°
1300.0m	7.29m	12.92/130°	1.96/310°	14.89/135<>315°	9.20/ 45<>225°
1315.0m	7.42m	13.20/129°	1.83/310°	15.03/135<>315°	9.02/ 39<>219°
1330.0m	7.48m	13.57/135°	1.77/310°	15.40/135<>315°	8.84/ 39<>219°
1345.0m	7.67m	14.12/134°	1.74/315°	15.86/134<>314°	8.80/ 40<>220°
1360.0m	7.82m	14.52/135°	1.68/320°	16.27/135<>315°	8.62/ 39<>219°
1375.0m	8.08m	15.13/135°	1.59/304°	16.78/135<>315°	8.51/ 35<>215°
1390.0m	8.33m	15.68/135°	1.55/300°	17.24/135<>315°	8.38/ 45<>225°
1400.0m	8.54m	16.00/140°	1.59/305°	17.65/140<>320°	8.47/ 44<>224°
1410.0m	8.85m	16.64/140°	1.87/319°	18.51/140<>320°	9.52/ 49<>229°
1420.0m	9.18m	17.43/139°	2.93/315°	20.37/139<>319°	10.91/ 45<>225°
1430.0m	9.56m	18.53/145°	4.16/325°	22.70/145<>325°	11.91/ 55<>235°
1440.0m	9.90m	18.35/135°	4.53/315°	22.88/135<>315°	11.28/ 34<>214°
1445.0m	11.30m	20.04/134°	4.16/289°	24.26/134<>314°	10.73/ 45<>225°
1450.0m	12.55m	22.48/195°	4.22/244°	33.34/ 14<>194°	12.60/ 70<>250°
1455.0m	19.50m	31.66/154°	8.16/320°	39.92/154<>334°	30.23/ 60<>240°
1460.0m	18.35m	30.41/145°	6.46/310°	37.11/145<>325°	27.20/ 64<>244°
1470.0m	17.81m	32.49/155°	3.34/340°	35.88/155<>335°	18.72/ 49<>229°
1480.0m	18.77m	35.28/140°	3.15/325°	38.49/140<>320°	17.38/ 55<>235°
1485.0m	18.91m	35.74/145°	3.15/305°	39.08/145<>325°	21.24/ 60<>240°
1490.0m	21.17m	36.62/130°	7.43/324°	44.37/130<>310°	28.12/ 69<>249°
1495.0m	22.19m	35.19/150°	9.30/304°	45.38/150<>330°	35.89/ 45<>225°
1500.0m	20.69m	0.00/ 1°	0.00/ 0°	0.00/ 0<>180°	0.00/ 0<>180°
1505.0m	17.11m	0.00/ 1°	0.00/ 0°	0.00/ 0<>180°	0.00/ 0<>180°

Radius- und Durchmesserprotokoll
nach [1]

Bild 4.5



Echometrische Vermessung vom 17.04.89 - Kaverne K102
Maximaler, mittlerer und minimaler Radius

Bild 4.6

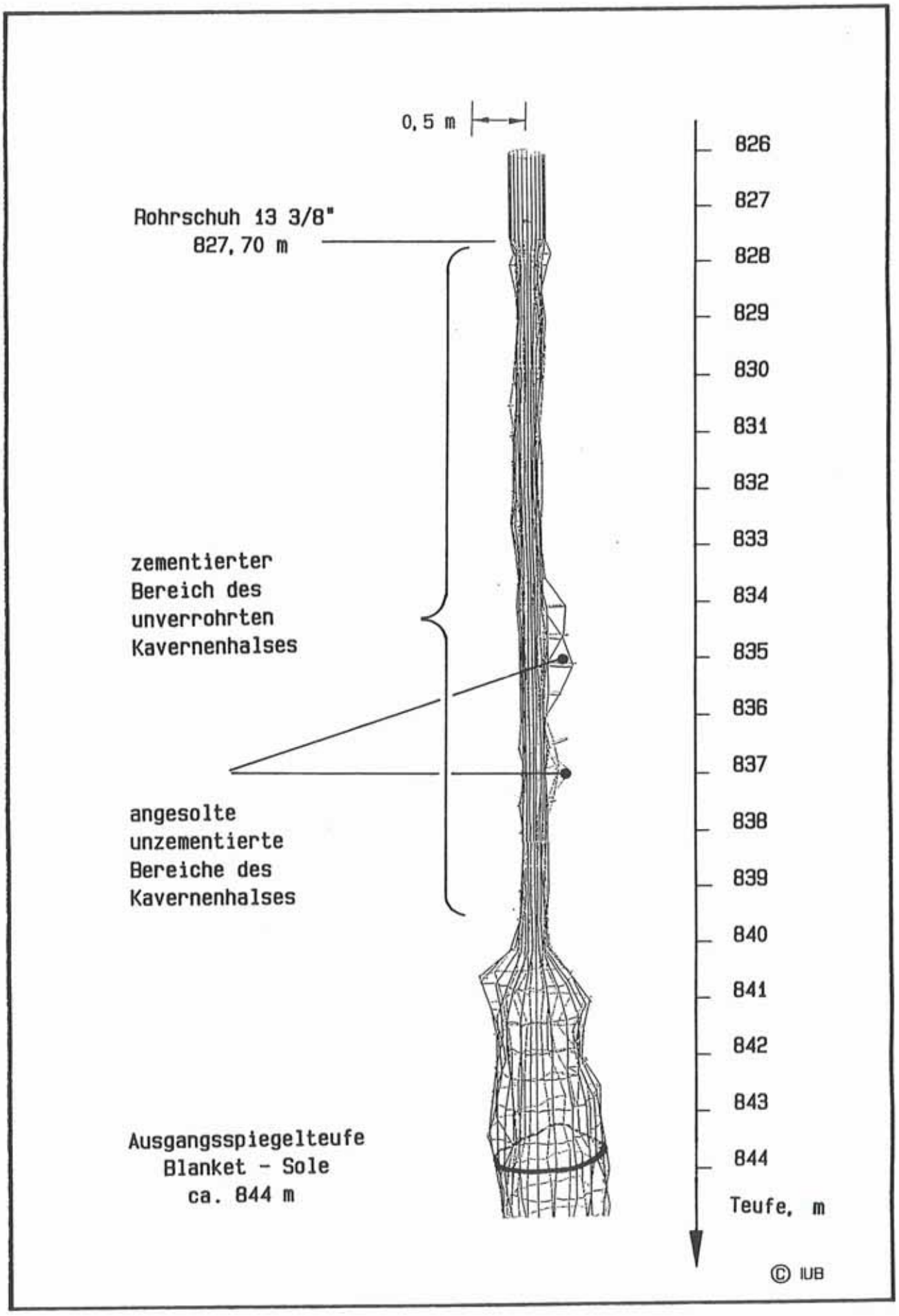
Teufe von 1 210 m, um dann wieder gleichmäßig anzusteigen. In einer Teufenlage von ca. 1 450 m erreicht der Radius ungefähr das Maß des Daches. Daran schließt sich eine sprunghafte Aufweitung des Sumpfbereiches bis zu einem Radius von ungefähr 20 m an.

In Bild 4.6 sind der maximale, mittlere und minimale Radius über die Teufe dargestellt. Die Entwicklung der Kaverne folgt danach der in [1] angegebenen Bohrlochabweichung. Sie ist für die Teufenlage des Rohrschuhs (827,70 m) mit 4,5 m (72,5°) und für die Teufe von 1 523,5 m (106°) mit 12,70 m angegeben.

4.2.2 Halsbereich der Testkaverne K102

Da für den Druckaubautest ein Kontrollspiegel (Blanket-Sole-Spiegel) im Kavernenhals vorgesehen war, ist parallel zur echometrischen Vermessung im Jahr 1989 eine exakte Vermessung des Halsbereiches der Testkaverne oberhalb des Kavernendaches (850 m) erfolgt. In Bild 4.7 ist die Geometrie des Kavernenhalses als dreidimensionale Darstellung für den Teufenbereich von ca. 825 m bis 845 m zu finden. Die Teufenlage des Rohrschuhs der 13 ³/₈"-Verrohrung (827,70 m) ist darin deutlich zu erkennen. Der o.g. Rohrschuh dient als Einhängepunkt für alle Spiegelmessungen, die innerhalb des Druckaufbautests durchgeführt wurden. Unterhalb des Rohrschuhs der 13 ³/₈"-Verrohrung ist ein schmaler Halsbereich bis zur Teufe von ca. 840 m zu erkennen, der als zementierter Bereich des unverrohrten Kavernenhalses angesehen wird (aus dem Zementationsprozeß der 13 ³/₈"-Verrohrung verbliebene Zementschale, die nicht durch Schneidwerkzeuge ("Unterschneiden des Rohrschuhs") entfernt worden ist). Innerhalb dieses zementierten Halsbereiches können einzelne Aufweitungen ausgemacht werden, die als angesolte Bereiche (abgelöste Zementschale) interpretiert wurden. Unterhalb einer Teufe von 840 m weitet sich der Kavernenhals bis zu einem Durchmesser von ca. 1 m auf.

Die zu wählende Ausgangsteufe des Blanket-Sole-Spiegels mußte folgende Anforderungen erfüllen: Es wurde eine Minimierung der im unverrohrten Halsbereich anstehenden Blanketmenge angestrebt. Des weiteren sollte der Blanket-Sole-Spiegel bei Druckerhöhung nicht in den Verrohrungsbereich zurückweichen, um evtl. Soleverluste oder Solezuflußmengen registrieren zu können. Als Ausgangsspiegelteufe wurden ca. 844 m gewählt, da in diesem Bereich außerdem eine annähernd zylindrische Form vorliegt.



Geometrie des Kavernenhalses

Bild 4.7

5. Versuchsaufbau und geplante Versuchsdurchführung

5.1 Verrohrung

Die Wiederverwendung der Kaverne K102 als Kohlenwasserstoff-Produktenspeicher mußte nach Abschluß des Druckaufbautests gewährleistet sein. Deshalb mußte die bestehende Kavernenverrohrung 28" / 18 5/8" / 13 3/8" durch zusätzliche Untertageausrüstungen derart verstärkt werden, daß der während des Druckaufbautests angestrebte max. Soledurckgradient G = 0,320 bar/m am 13 3/8"-Rohrschuh in 827,7 m Teufe erreicht werden konnte, ohne die ursprüngliche Verrohrung zu beschädigen.

Um die 13 3/8" -Rohrtour insbesondere im oberen Bereich, wo der Gebirgsdruck ständig abnimmt, gegen den Testdruck zu schützen, wurde eine 7 5/8"-Schutzrohrtour eingebaut und mit einem am unteren Ende der 13 3/8"-Rohrtour abgesetzen Packer verbunden.

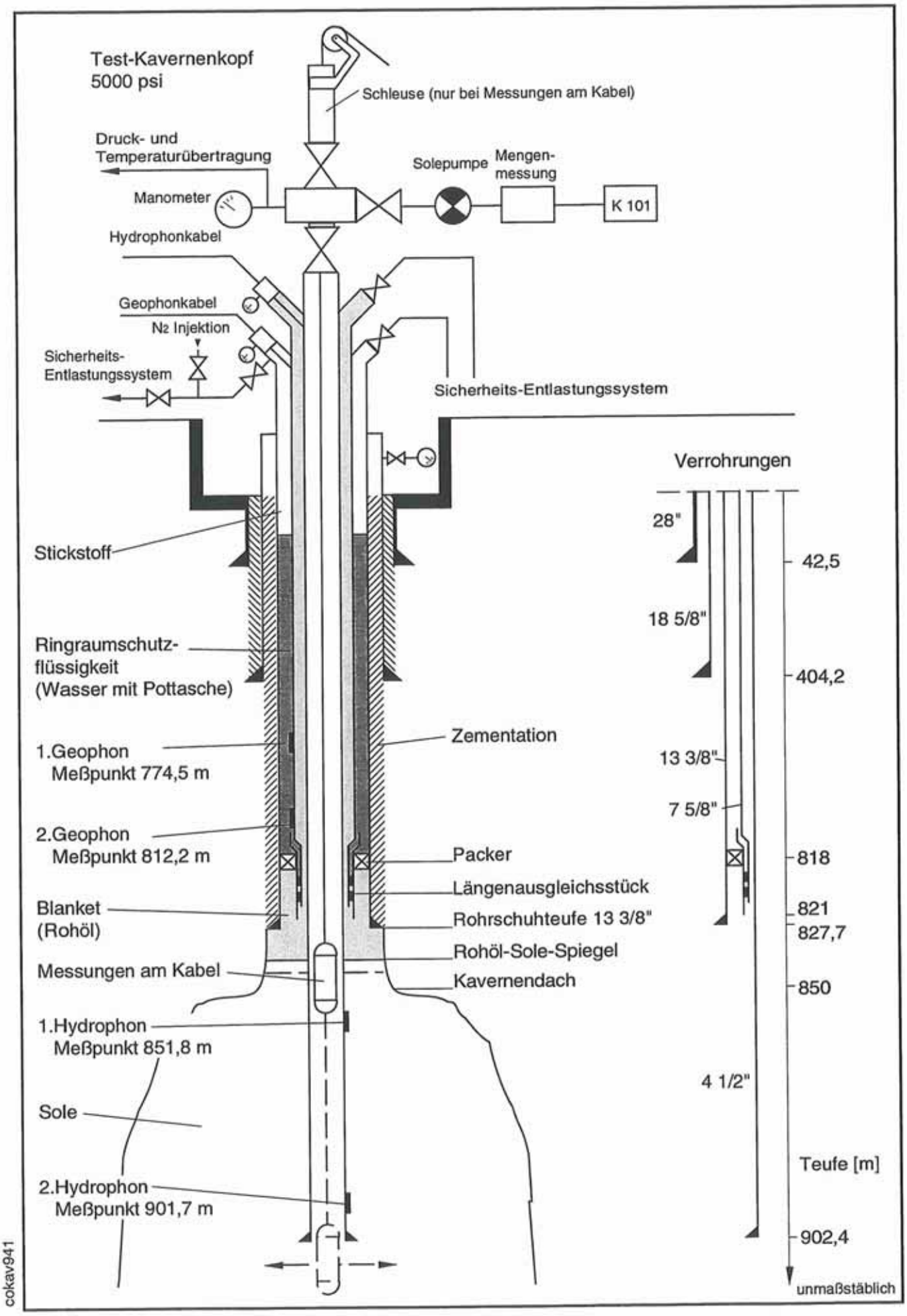
Um außer den Druckkräften zusätzliche Axialkräfte (durch Ballooning und Kolbenwirkung der 7 5/8"-Rohrtour) auf den Packer zu vermeiden, wurde das untere Ende der 7 5/8"-Rohrtour mit einem axial beweglichen, abdichtenden Längenausgleichstück versehen, welches in den Packer eingefahren wurde.

In die 7 5/8"-Rohrtour wurde die 4 1/2"-Solesteigleitung eingebaut, die zur Druckbeaufschlagung der Kaverne mit Sole und für die Messungen am Kabel verwendet wurde.

In Bild 5.1 ist die technische Ausrüstung dargestellt. In den 7 5/8"-4 1/2"-Ringraum wurde als Blanket Rohöl eingebracht. Der Spiegel Rohöl-Sole wurde unterhalb des zementierten Bereiches im Kavernenhals bei ca. 844 m eingestellt.

Noch bevor diese Ausrüstungen im November/Dezember 1989 in die K102 eingebaut wurden, hat im August 1988 bei der Packerhersteller-Firma OTIS in Dallas/USA ein Test mit dem Ziel stattgefunden, zu ermitteln, welcher max. Druck unter dem gesetzten Packer zulässig ist, ohne eine Beschädigung des 13 3/8"-Casings und damit eine Undichtheit des Packers hervorzurufen. Durch die Verwendung eines einzigen Packer-Keilsystems, wodurch die gesamte Axialkraft darauf konzentriert wurde, sowie eines 13 3/8"-Testrohres mit der geringsten nach API noch zulässigen Wandstärke und Streckgrenze wurde der ungünstigste Fall simuliert. Außerdem war der Außendruck auf dem Testrohr der atmosphärische Druck, wodurch die Testbedingungen noch ungünstiger gegenüber dem Realfall wurden.

Die Axialkraft auf das Keilsystem wurde mit Hilfe hydraulischer Stempel in ca. vier Stunden stufenweise bis auf max. 250.000 lbs (113,25 Tonnen) erhöht. Dabei wurden die Spannungen über Dehnstreifen laufend gemessen.



Technische Ausrüstung für den Druckaufbautest

Bild 5.1

Nach Beendigung des Tests und Demontage der Anlage wurden keine Beschädigungen des Keilsystems oder des Testrohres festgestellt. Das Testergebnis wurde positiv bewertet, da Berechnungen ergaben, daß beim angestrebten Soledruckgradienten $G_{max} = 0{,}320$ bar/m und einem Stickstoffdruck am Testkopf im 13 3/8" - 7 5/8"-Ringraum von 10 bar die von unten auf den Packer gerichtete Kraft 101 Tonnen nicht überschreitet.

Durch Erhöhung des Stickstoffdrucks im 13 3/8" - 7 5/8"-Ringraum hätte der Soledruckgradient bis auf ca. G = 0,400 bar/m gesteigert werden können, ohne die 13 3/8"-Verrohrung und den Packersitz zu gefährden. Die Salzformation müßte bei einem weit geringeren Soledruckgradienten durchlässig werden, was dann auch eingetreten ist. Auch die übrigen Bohrlochausrüstungen hätten Soledruckgradienten von bis zu 0,400 bar/m zugelassen.

Im Ringraum 13 3/8" - 7 5/8", der nach unten hin durch den Packer abgeschlossen war, wurde über einer Ringraumschutzflüssigkeit (wäßrige Pottaschelösung) ein Kontrollstickstoffpolster eingebracht. Über die 4 1/2"-Verrohrung wurde mit Hilfe von ein bis zwei Dosierpumpen bzw. durch Überströmen Sole eingepreßt, um die vorgesehenen Druckstufen aufzubauen. Zur Kontrolle diente ein am Kavernenkopf installiertes Feinmeßmanometer bzw. die durch die Druckmeßumformer digital in die Meßwarte übertragenen Druckwerte sämtlicher Ringräume.

Um das Volumen der eingebrachten Sole, die als gesättigte Sole einer anderen Kaverne entnommen wurde, zu messen, wurden in Abhängigkeit vom eingesetzten Verfahren (Überströmen, eine bzw. zwei Dosierpumpen) verschiedene Ovalradzähler eingesetzt.

Zur Erfüllung der technischen Versuchsrandbedingungen von 0,320 bar/m mußte darüber hinaus ein anderer Kavernenkopf (5 000 psi) installiert werden.

Damit sich im Falle einer Undichtheit der 7 5/8"-Rohrtour oder der Untertageausrüstung der Testdruck auf die Kaverne nicht voll auf den Ringraum auswirken kann (da sonst eine Beschädigung der 13 3/8"-Rohrtour durch Überschreitung des kritischen Innendrucks zu befürchten war), wurde übertage ein automatisches, auf Grenzdruck reagierendes Sicherheitsentlastungssystem für die Ringräume 13 3/8" - 7 5/8" und 7 5/8" - 4 1/2" gebaut (siehe Bild 5.1).

Eine Überwachung der Ringräume durch Druckmessung (Sicherheitskontrolle), insbesondere des 13 3/8" - 7 5/8"-Ringraums, konnte Indizien für z.B. Undichtigkeiten durch den Packer (Verluste von Rohöl in den Ringraum 13 3/8" - 7 5/8") anzeigen. Alle Ringräume wurden kontinuierlich überwacht, indem der Kopfdruck in die Meßwarte übermittelt wurde. Zusätzlich war für jeden Ringraum am Kavernenkopf ein Manometer vorgesehen.

Darüber hinaus konnten geeignete Maßnahmen - Druckbeaufschlagung im Ringraum 13 3/8" - 7 5/8" über Stickstoff/Süßwasser - bei Störungen (Verschieben des Packers) eingeleitet werden bzw. ein Nachdosieren von Rohöl durchgeführt werden.

5.2 Meßtechnik

5.2.1 Meßtechnische Instrumentierung

In Bild 5.2 sind die meßtechnische Ausstattung und die durchgeführten vorbereitenden Untersuchungen für den Druckaufbautest dargestellt.

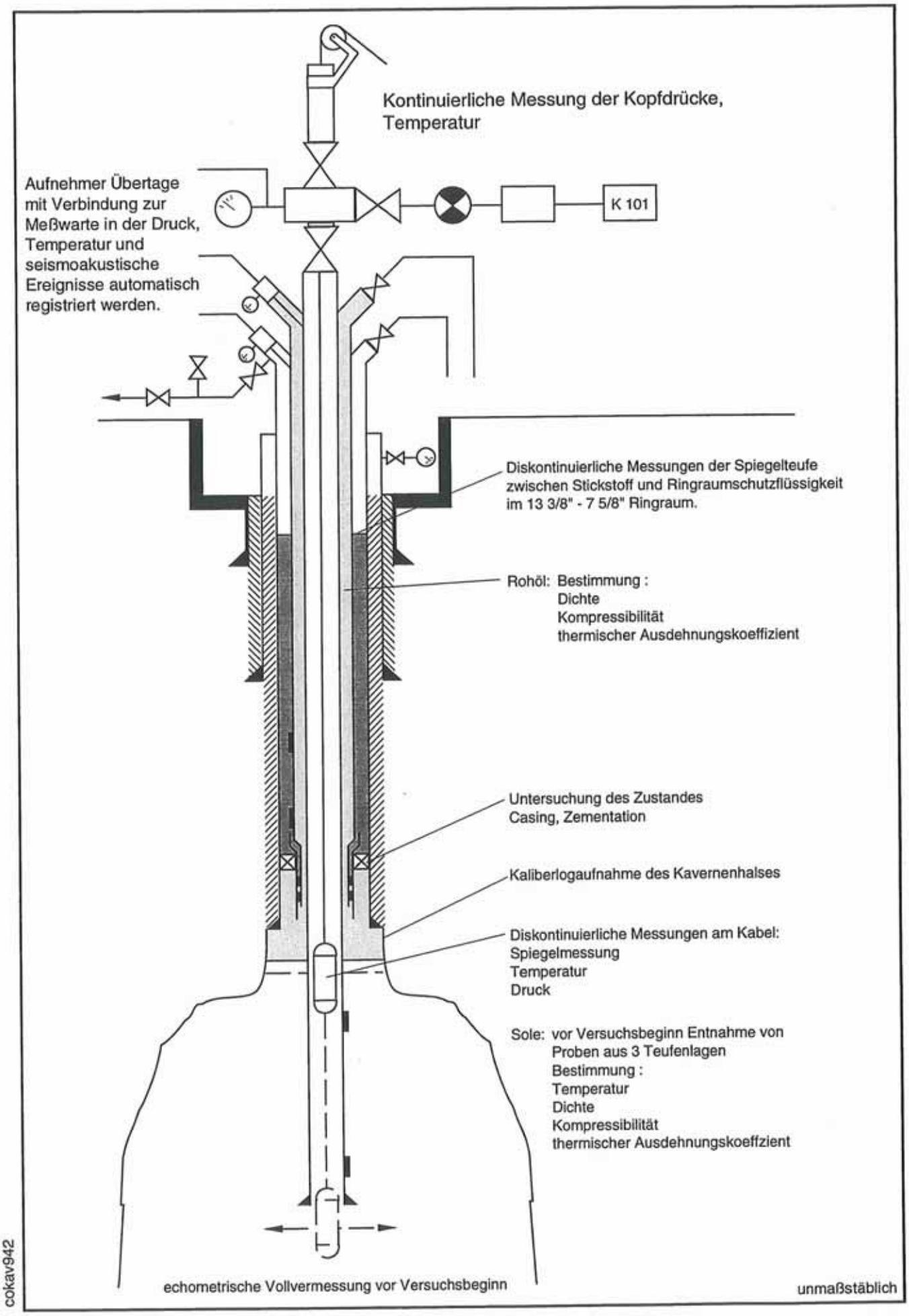
- Durchflußmengenmesser (Ovalradzähler)

  Zur Bestimmung des eingebrachten Solevolumens wurden an die jeweilige Technik des Verpumpens oder Überströmens angepaßte Systeme angekoppelt.

- Messung der Drücke und der Temperatur am Kopf

  Für die Druckmessung wurde eine Meßgenauigkeit von 0,1 bar gefordert. Hierzu wurde ein Feinmeßmanometer eingesetzt. Neben der kontinuierlichen Kopfdruckmessung über Druckmeßumformer ist durch Ablesung des Kopfdruckes direkt am Manometer eine Kontrolle der digitalen Übertragung in die Meßwarte möglich (Ausdruck der Meßwerte über Drucker in der Meßwarte, Alarmierung bei Überschreiten von Grenzwerten). Eine erforderliche Eichung wurde nach Bedarf durchgeführt (Druckwaage mit einer Genauigkeit von 0,001 bar).

  Die Meßgenauigkeit für eine Temperaturmessung sollte am Kavernenkopf 0,5 °C betragen. Wie die Kopfdrücke wurden die Temperaturmeßwerte (Steigleitung 4 1/2" (Sole)) in die Meßwarte übertragen und auf einem Datenträger der wissenschaftlichen Versuchsbegleitung und der seismoakustischen Überwachung zur Auswertung zur Verfügung gestellt.



Meßtechnische Ausstattung für den Druckaufbautest

Bild 5.2

- Geophysikalische Ausstattung

  Für seismoakustische Beobachtungen in der Versuchskaverne wurden zwei Geophone und zwei Hydrophone installiert. Die Hydrophone wurden an der Außenseite des 4 ½"-Rohrstranges angekoppelt. Das erste Hydrophon wurde in Höhe des Kavernendaches (Teufe 850 m) abgesetzt. Das zweite Hydrophon wurde in einer Teufe von ca. 900 m in einem Abstand von 50 m unterhalb des ersten Hydrophons angebracht.

  Die zwei Geophone wurden im 13 ⅜" - 7 ⅝"-Ringraum an der Außenfläche der 7 ⅝"-Verrohrung oberhalb des Packers befestigt. Eines davon wurde in der Nähe des Packers bzw. des Rohrschuhs der 13 ⅜"-Verrohrung (ca. 6 m oberhalb des Packers) angebracht. Ein weiteres Geophon wurde ca. 37 m höher installiert.

  Um in der Kaverne von Ereignissen ausgehende akustische Emissionen, die von außen über die Verrohrung aufgenommen werden könnten, unterscheiden zu können, wurden zwei Einkomponenten-Geophone (Beschleunigungsaufnehmer) übertage angeordnet. Die Geophone an der Verrohrung waren mit drei Signalaufnehmern ausgestattet (Dreikomponentengeophon).

  Für die zwei Hydrophone ist das System aus Aufnehmern und Verstärkern (Verstärker in der Sonde integriert) doppelt vorgesehen. Nach Ausfall einer Konfiguration könnte übertage auf das Ersatzsystem umgeschaltet werden. Dieser Fall trat jedoch innerhalb des gesamten Versuchszeitraums nicht ein.

  Mit den Aufnehmern übertage ergab sich zusammen eine 10-Kanal-System, für das ein Datenerfassungssystem auf der Kavernenanlage eingerichtet wurde.

  Die Aufnehmersonden waren vor Einbau in die Kaverne unter dem Druck von 500 bar auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft worden.

5.2.2 Kontinuierliche Messungen

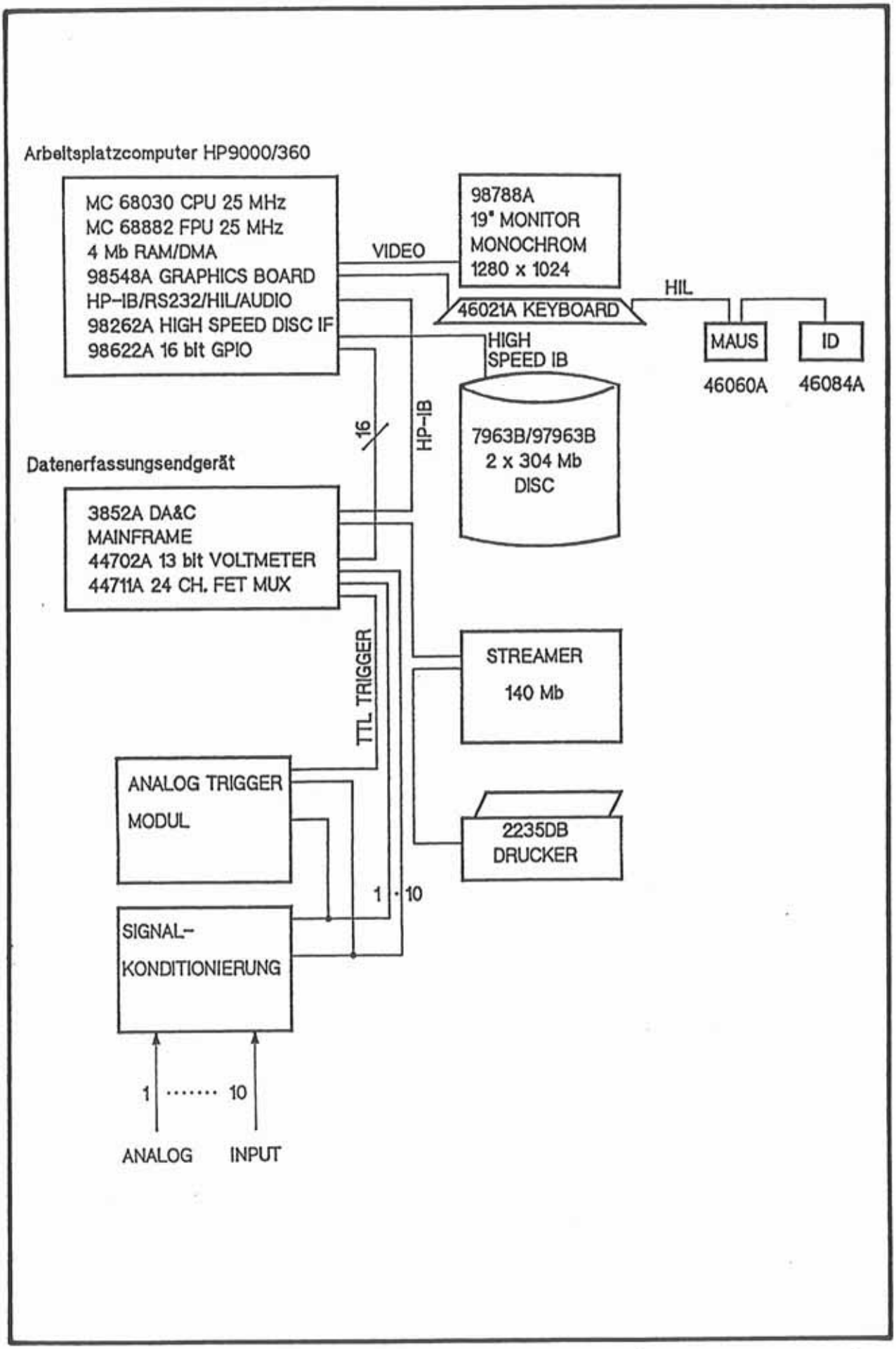
Die Messung des Kopfdruckes wurde kontinuierlich unter Einsatz eines Druckmeßumformers durchgeführt.

Die geophysikalischen Messungen wurden ebenfalls kontinuierlich durchgeführt und aufgezeichnet.

In Bild 5.3 ist die Konfiguration des Datenerfassungssystems für die geophysikalische Überwachung dargestellt. Um das ständige Grundgeräusch in der Kaverne von den eigentlich

akustischen Ereignissen unterscheiden zu können, mußte ein Schwellwert für die Aufzeichnung festgelegt werden. Als Kriterium für die Aufzeichnung eines Ereignisses mit Vor- und Nachgeschichte galt, daß mindestens zwei Dreikomponenten-Geophone oder -Hydrophone auf ein Ereignis gleichzeitig reagieren müssen.

Es wurde bei der Planung angenommen, daß die Laufzeitdifferenzen der Geophone und Hydrophone die Lokalisierung von seismoakustischen Ereignissen (z.B. bei Rissen) bezüglich der Teufenlage ermöglicht. Über die genaue Lage in radialer Richtung könnte möglicherweise mit diesem vertikal angeordneten System keine genaue Aussage gemacht werden. Eine zur Richtungsorientierung der drei Komponentengeophone durchgeführte Ringseismik konnte hierzu keine weiteren Erkenntnisse beitragen, da das gesamte Verrohrungssystem (an dem die Dreikomponenten-Geophone und -Hydrophone befestigt waren) in starke Schwingungen geriet, wodurch die direkten Wellen maskiert wurden.



Konfiguration des Meßdatenerfassungs-
systems geophysikalischer Messung

Bild 5.3

5.2.3 Diskontinuierliche Messungen

Vor Versuchsbeginn ist eine echometrische Vollvermessung durchgeführt worden. Parallel hierzu wurden aus drei Teufenlagen Soleproben entnommen, an denen Dichte, Kompressibilität und der thermische Ausdehnungskoeffizient bestimmt wurden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Bild 5.4 dargestellt. Darüber hinaus wurden die Temperatur und der Druck in der Kaverne gemessen.

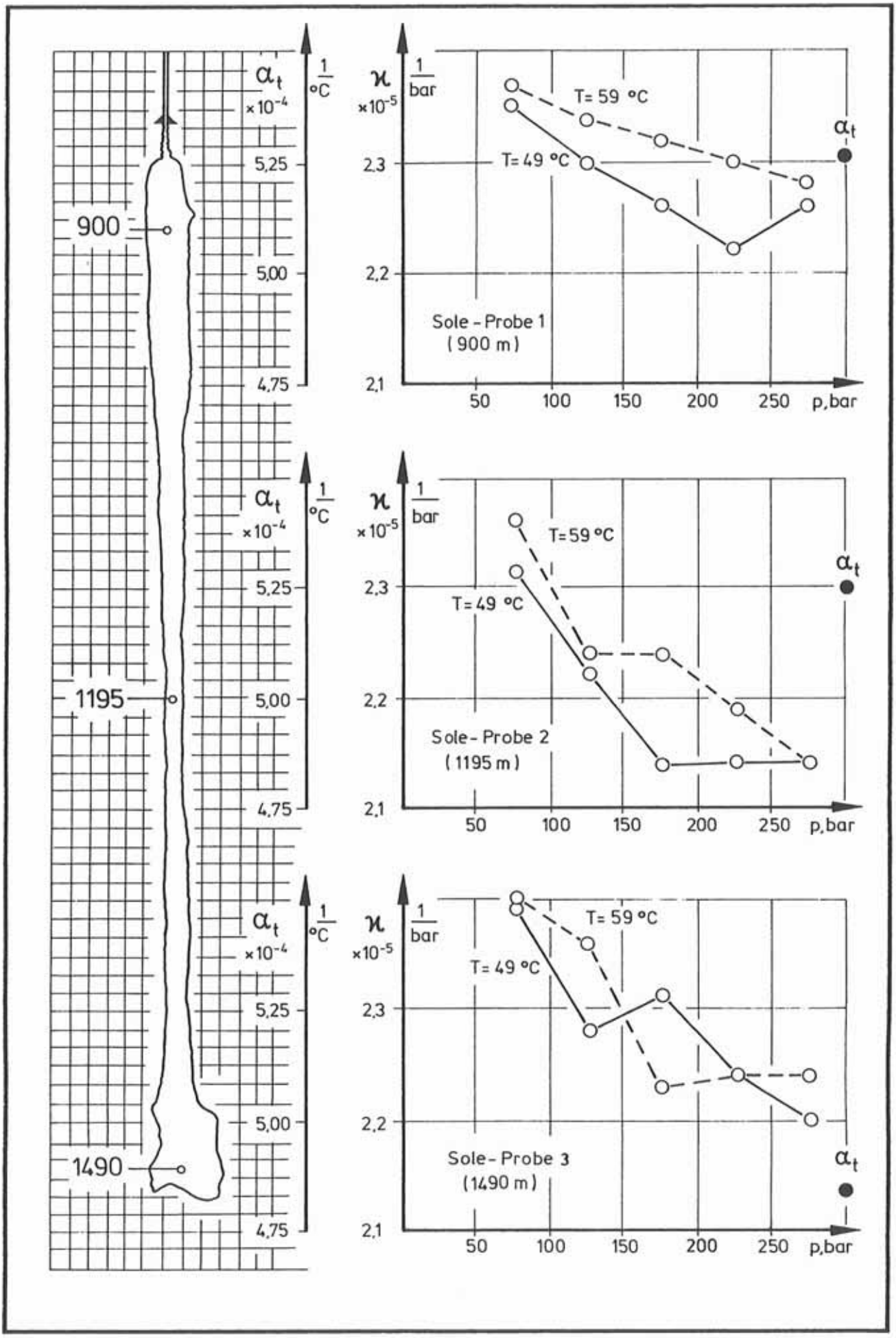
Für den Kopfdruck von Null ergaben die in drei Teufenlagen durchgeführten Druck- und Temperaturmessungen folgende Werte:

	Teufe	Temperatur	Druck
	m	°C	bar
Soleprobe 1	900	48,68	108
Soleprobe 2	1195	48,95	143
Soleprobe 3	1490	49,36	179

Während des Druckaufbautests konnte der Spiegel zwischen Blanket und Sole durch eine Gamma-Sonde bestimmt werden. Die Meßgenauigkeit wurde von Seiten der ausführenden Firma Prakla-Seismos (SOCON) mit ca. 10 cm angegeben. Jeweils vor und nach einem Lastwechsel (Druckstufe) sollten diese Messungen durchgeführt werden. Zusätzlich war vorgesehen, daß vier bis sechs Messungen im gesamten Versuchszeitraum des Druckaufbautestes nach Bedarf durchgeführt werden konnten.

Am Kabel wurden parallel zur Spiegelmessung Druck und Temperatur in der Kaverne gemessen. Die Meßintervalle entsprechen denen der Spiegelmessungen.

Für die Druckmessung wurde eine Genauigkeit von einem Zehntel bar empfohlen. Die Messung der Temperatur sollte eine relative Genauigkeit von einem Zehntel Grad Celsius erreichen.



Kompressibilität κ und
thermischer Ausdehnungskoeffizient α_t

Bild 5.4

5.3 Geplanter Versuchsverlauf

Der geplante zeitliche Verlauf des Druckaufbautestes entspricht im wesentlichen der in der Anlage 5 angegebenen Kurve des Sonderbetriebsplanes für die Kaverne K102, der vom Bergamt Meppen in Abstimmung mit dem Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld genehmigt wurde. Auf eine ursprünglich geplante Phase eines natürlichen Druckaufbaus für den Druckaufbautest, ausgehend von einem Kopfdruck gleich Null, wurde verzichtet, da für einen solchen Fall (solegefüllte Kaverne mit natürlichem Druckaufbau) Betriebsdaten der Kaverne K102 vorlagen.

Für den Fall einer solegefüllten Kaverne können die Betriebsdaten für den Zeitraum April 1983 bis etwa August 1986 herangezogen werden. Soleseitig erreicht der Kopfdruck im April 1985 vor einer nachfolgend durchgeführten Kopfdruckentlastung für eine echometrische Vermessung ein Maximum von etwa 60 bar. Die enthaltenen Restmengen an Rohöl bzw. Rohbenzin, die den differierenden ölseitigen Kopfdruck verursachen, können vernachlässigt werden.

Seit Ende Januar 1987 ist die Kaverne K102 wiederum als nur mit Sole gefüllt - trotz einer geringfügigen Einlagerung im August 1987 - anzusehen. Zu Umrüstungsarbeiten im März 1988 ist die Kaverne auf Solekopfdruck 0 bar entlastet worden. Hierbei ist das Rohöl aus der Kaverne K102 vollständig ausgelagert worden. Unbedeutende Restölmengen konnten im April 1989 im Rahmen der echometrischen Vollvermessung vor Versuchsbeginn des Druckaufbautests noch aufgefangen werden.

Ein Maximum erreicht der soleseitige Kopfdruck Ende Februar 1988 mit 69,5 bar. Ein hieraus zu ermittelnder Teufengradient, bezogen auf Rohrschuhteufe der 13 $^3/_8$"-Verrohrung, entspricht in etwa einem Gradienten von 0,205 bar/m. Da zu diesem Zeitpunkt die Kaverne vollständig mit Sole gefüllt war, ist davon auszugehen, daß ein dem Teufengradient von 0,205 bar/m entsprechender Spannungszustand der Kaverne "bekannt" ist, so daß als erste Druckstufe ein Gradient von 0,205 bar/m - bezogen auf Rohrschuhteufe 13 $^3/_8$" - gewählt werden kann, ohne daß möglicherweise der gesamte Versuchsablauf und damit die erzielten Ergebnisse des Druckaufbautests entscheidend beeinflußt werden.

Darüber hinaus wird hierdurch erreicht, den zeitlichen Rahmen des Versuchs einzuhalten und im Bereich oberhalb des Primärspannungszustandes kleinere Stufen im Teufengradientenzuwachs zu fahren, um ein angestrebtes genaues Ergebnis eines möglicherweise eintretenden Versagensmechanismus erfassen zu können.

Der Zeitraum für diese Belastungsphase wie für alle weiteren Druckerhöhungsphasen wird auf einen Monat festgelegt. Damit ergeben sich Belastungsraten von ca. 2,4 bar/d für die

erste Druckaufbauphase auf die Druckstufe 0,205 bar/m; für die folgenden drei Druckaufbauphasen bis zum Gradienten von 0,250 bar/m können Raten von etwa 0,4 bar/d angegeben werden. Hierbei beträgt die Differenz der Teufengradienten 0,015 bar/m.

Diese Differenz wird für die sich an den Gradienten von 0,250 bar/m anschließenden Gradienten auf 0,010 bar/m reduziert.

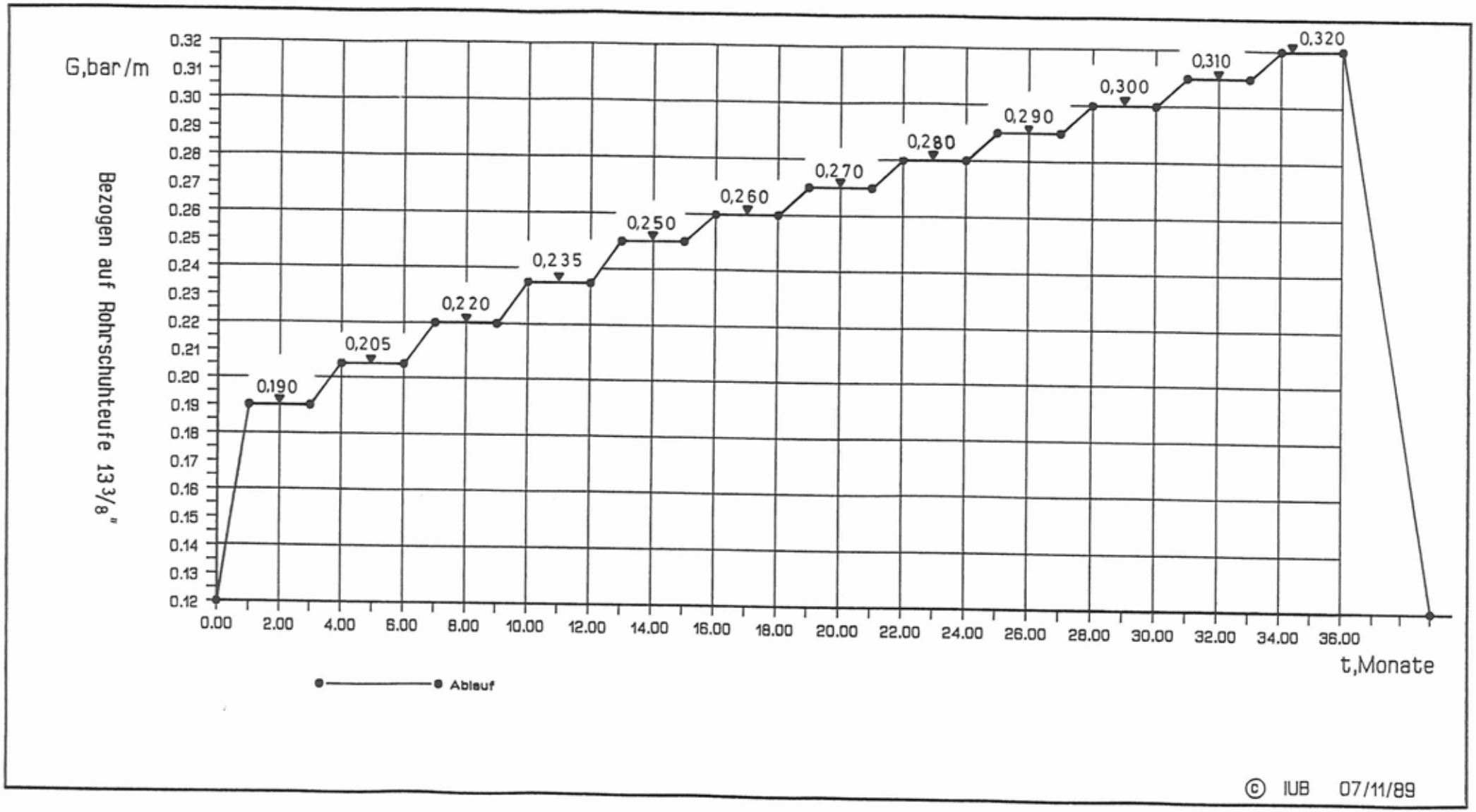
Einheitlich für alle geplanten Druckstufen wird ein Beobachtungszeitraum von zwei Monaten gewählt, so daß sich für auf einen Gradienten von 0,320 bar/m ausgelegten Versuch eine Gesamtversuchszeit von 36 Monaten ergibt. Eingeschlossen ist darin eine Druckabsenkungsphase bis zu einem Solekopfdruck von 0 bar bei Versuchsende nach Erreichen eines Gradienten von 0,320 bar/m. Bei einem Eintreten eines Versagens unterhalb des Gradienten von 0,320 bar/m sollte auf eine kontrollierte langsame Absenkung Wert gelegt werden. Hierfür wird eine Rate von 1,8 bis 2 bar/d empfohlen.

In den Druckstufen, die unterhalb des Primärspannungszustandes liegen, wird ein Druckanstieg durch die Konvergenz der Kaverne zugelassen.

Bei Annahme einer Dichte von 2,5 t/m³ für das Deckgebirge und einer Dichte von 2,2 t/m³ für das die Kaverne K102 umgebende Steinsalz ergibt sich ein auf die Rohrschuhteufe bezogener Teufengradient von 0,241 bar/m für den Primärspannungszustand.

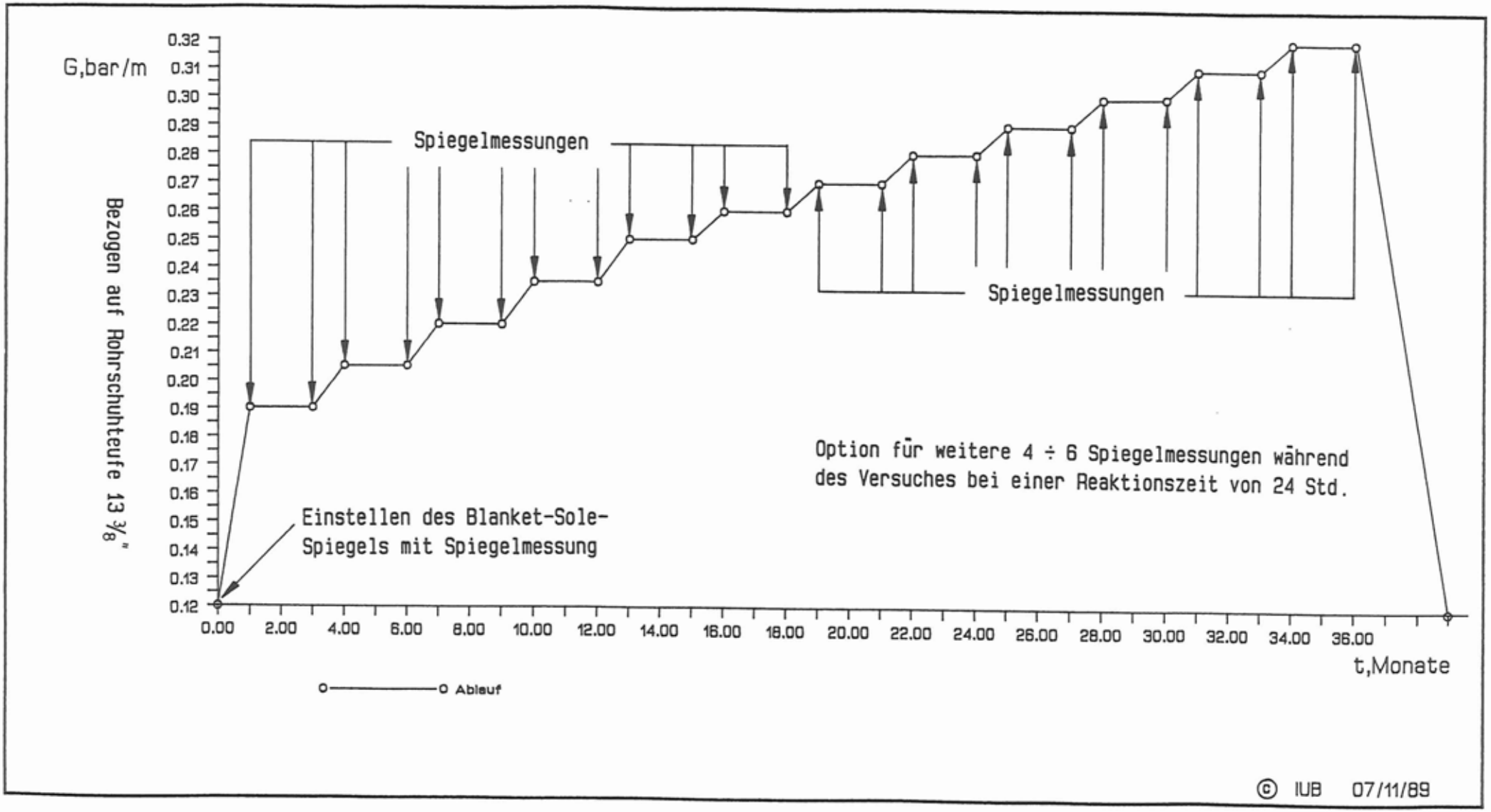
Wie in Kapitel 3 gezeigt werden konnte, ist der für das Steinsalz angenommene Wert von 2,2 t/m³ als realistischer Wert für das anstehende Steinsalz anzusetzen. Für das Deckgebirge kann eine nachvollziehbare Berechnung nicht durchgeführt werden, da im Rahmen der Kavernenbohrung K102 keine Kerne aus dem Deckgebirge gewonnen wurden.

Diese ursprüngliche Empfehlung für die zeitliche Planung wurde nach Abstimmung mit den Gutachtern in der Weise geändert, daß als erste Druckstufe für den Druckaufbautest die Druckstufe G = 0,190 bar/m gewählt wurde. Die sich hieraus ergebende endgültige Versuchsplanung ist in Bild 5.5 dargestellt. In Bild 5.6 sind die geplanten Spiegelmessungen für den geplanten Versuchsablauf zu finden.



Geplanter zeitlicher Ablauf des Druckaufbautestes

Bild 5.5



Geplanter zeitlicher Ablauf des Druckaufbautestes
- Spiegelmessungen -

Bild 5.6

6. Durchgeführter Versuchsverlauf

Das Konsortium Druckaufbautest, vertreten durch die Industrieverwaltungsgesellschaft AG (IVG), führte an der Kaverne Etzel K102 in der Zeit von September 1990 bis Juni 1993 einen Langzeitversuch in situ mit dem Ziel durch, gebirgsmechanische und technische Kenndaten für die Auslegung eines dauerhaften sicheren Abschlusses flüssigkeitsgefüllter Salzkavernen und damit für einen genehmigungsfähigen Abschlußbetriebsplan zu liefern.

Das Institut für Unterirdisches Bauen (IUB) der Universität Hannover wurde im September 1988 mit der wissenschaftlichen Projektbegleitung beauftragt. Im Dezember 1989 legte IUB ein mit dem Technischen Ausschuß Druckaufbautest der Bergbehörde und den Gutachtern abgestimmtes Versuchsprogramm vor (siehe Abschnitt 5.3, Bild 5.5).

Im Zeitraum November bis Dezember 1989 wurde die Kaverne K102 für die Versuchsdurchführung umgerüstet, gleichzeitig wurden geophysikalisch-seismoakustische Überwachungseinrichtungen unter- und übertage installiert. Zur geophysikalischen Betreuung des Versuchs und seismoakustischen Auswertung der erfaßten Signale wurde im August 1990 ein Auftrag an Pipeline Engineering GmbH (PLE) vergeben.

6.1 Erste Druckaufbaustufe
(03.09. - 28.11.1990)

Am 03.09.1990 wurde mit der Druckbeaufschlagung der Testkaverne durch Überströmen von Sole aus der Nachbarkaverne begonnen. Gemäß täglich vorgegebener Sollwerte für die Druckerhöhung konnte diese Vorgehensweise bis zum 23.09.1990 durchgeführt werden. Daran anschließend wurde bis zum 02.10.1990 (Ende der Druckaufbauphase mit Erreichen des entsprechenden soleseitigen Kopfdrucks für die Gradientenstufe G = 0,190 bar/m) mit einer betriebseigenen Pumpe der IVG die Druckerhöhung durchgeführt. Insgesamt wurden in der ersten Druckaufbauphase ca. 500 m^3 Sole in die Testkaverne verpreßt.

Innerhalb der sich anschließenden Beobachtungsphase konnte ein leichter Druckabfall festgestellt werden [2].

6.2 Zweite Druckaufbaustufe
(29.11.1990 - 19.03.1991)

Im Anschluß an die Messung des Blanket-Sole-Spiegels begann am 29.11.1990 die Soleverpumpphase zur 2. Druckaufbaustufe. Ziel der über einen Zeitraum von 35 Tagen ausgelegten Pumpaktivität war eine Druckerhöhung von G = 0,190 bar/m auf G = 0,205 bar/m entsprechend einer Kopfdrucksteigerung (P_{Sole}) von 56,7 bar auf 70,1 bar.

Die Sole zur Druckbeaufschlagung wurde, wie bereits in der zweiten Hälfte der 1. Druckaufbauphase praktiziert, mit einer betriebseigenen Kolbenpumpe über das Feldleitungssystem von der Kaverne K101 in die Kaverne K102 gepumpt. Entsprechend der Pumpenleistung von ca. 130 l/min wurde ein diskontinuierlicher Pumpbetrieb von durchschnittlich einer halben Stunde pro Tag gefahren, um den Druckaufbau mit einer täglichen soleseitigen Kopfdruckerhöhung um jeweils 0,36 bar nicht zu überschreiten [3]. Insgesamt wurden in der zweiten Druckaufbauphase ca. 134,4 m^3 Sole in die Testkaverne verpreßt.

Am 02.01.1991 wurde die 2. Druckaufbauphase bei einem Kavernenkopfdruck (Sole) von 70,0 bar abgeschlossen und am folgenden Tag der Blanket-Sole-Spiegel im Kavernenhalsbereich gemessen (844,40 m).

Die am 27.02.1991 durchgeführte Spiegelkontrollmessung bildete das Ende der Beobachtungsphase und damit der zweiten Druckaufbaustufe. Der Blanket-Sole-Spiegel wurde dabei in einer Teufe von 844,60 m angetroffen. Für die Beobachtungsphase bei der Gradientenstufe G = 0,205 bar/m konnte kein Druckverlust festgestellt werden.

Im Zeitraum Januar und Februar 1991 wurden Planungen durchgeführt und betriebliche Vorbereitungen getroffen, die den ab der 3. Druckaufbaustufe vorgesehenen Einsatz einer Dosierpumpenausrüstung erlaubten. Darüber hinaus wurde ein Soleentlastungssystem (Sicherheitseinrichtung) an der Kaverne K102 installiert.

Für die erste und zweite Druckaufbauphase konnte die seismoakustische Überwachung während der diskontinuierlich durchgeführten täglichen Druckerhöhung wegen der starken Störgeräusche nicht eingesetzt werden.

6.3 Dritte Druckaufbaustufe

(20.03. - 22.07.1991)

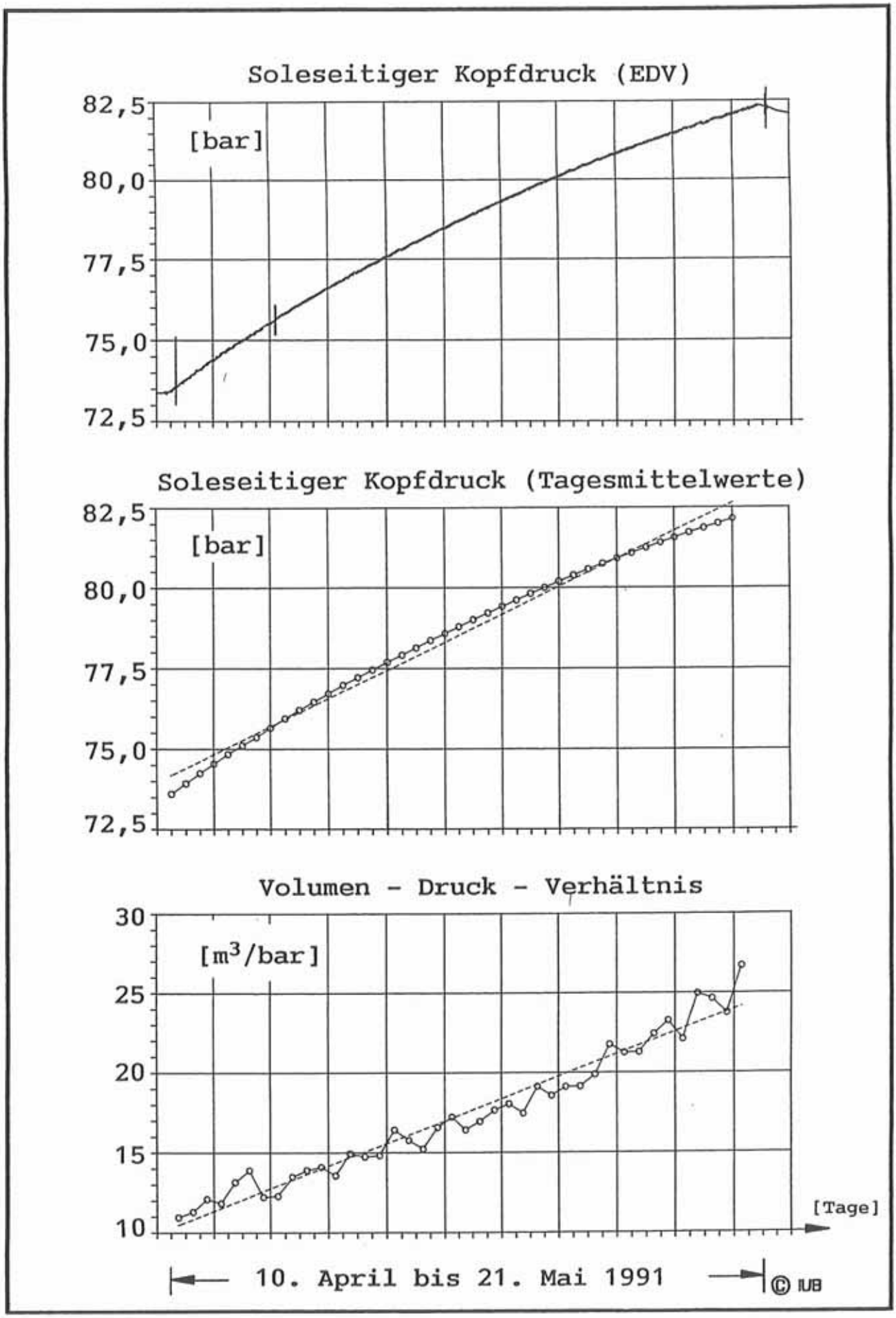
Bedingt durch die anlagentechnische Abstimmung des Dosierpumpensystems auf die speziellen wissenschaftlichen Anforderungen des Versuchs, insbesondere hinsichtlich der kontinuierlichen mikroseismischen Signalerfassung, ergaben sich zeitliche Verzögerungen im Ablauf, so daß mit der Druckaufbauphase zur 3. Druckstufe (G = 0,220 bar/m) erst am 20.03.1991 begonnen werden konnte.

Im Gegensatz zu den diskontinuierlichen Verpumparbeiten der vorangegangenen Druckaufbauphasen wurde in der dritten Druckaufbauphase, ausgehend von einem soleseitigen Kopfdruck von 70,4 bar (P_{Sole}) mit einer konstanten Injektionsrate von ca. 148 l/h (= 3,5 m^3/d), Sole in die Kaverne verpreßt. Innerhalb der Pumpphase begann sich das Volumen/Druck-Verhältnis zu größeren Solemengen pro Druckeinheit zu verschieben, weshalb die 3. Druckaufbauphase erst nach ca. siebenwöchiger Pumpzeit am 21.05.1991 bei einem Solekopfdruck von 82,36 bar (G = 0,219 bar/m) abgeschlossen werden konnte. Insgesamt wurden in der dritten Druckaufbauphase ca. 179,5 m^3 Sole in die Testkaverne verpreßt. Für den Zeitraum 10.04. bis 21.05.1991 ist in Bild 6.1 der soleseitige Kopfdruck, die tägliche Drucksteigerungsrate sowie das ausgewertete Volumen/Druck-Verhältnis dargestellt [4]. Das Volumen/Druck-Verhältnis erhöht sich dabei ausgehend von einem für den Kavernenbau typischen Wert von 10 m^3/bar auf über 25 m^3/bar.

Vor Beginn der sich anschließenden zweimonatigen Beobachtungsphase wurde am 22.05.1991 eine planmäßige Spiegelkontrollmessung durchgeführt, die den Blanket-Sole-Spiegel im Kavernenhals bei 845,0 m - 0,4 m tiefer gegenüber der letzten Messung vom 27.02.1991 - antraf.

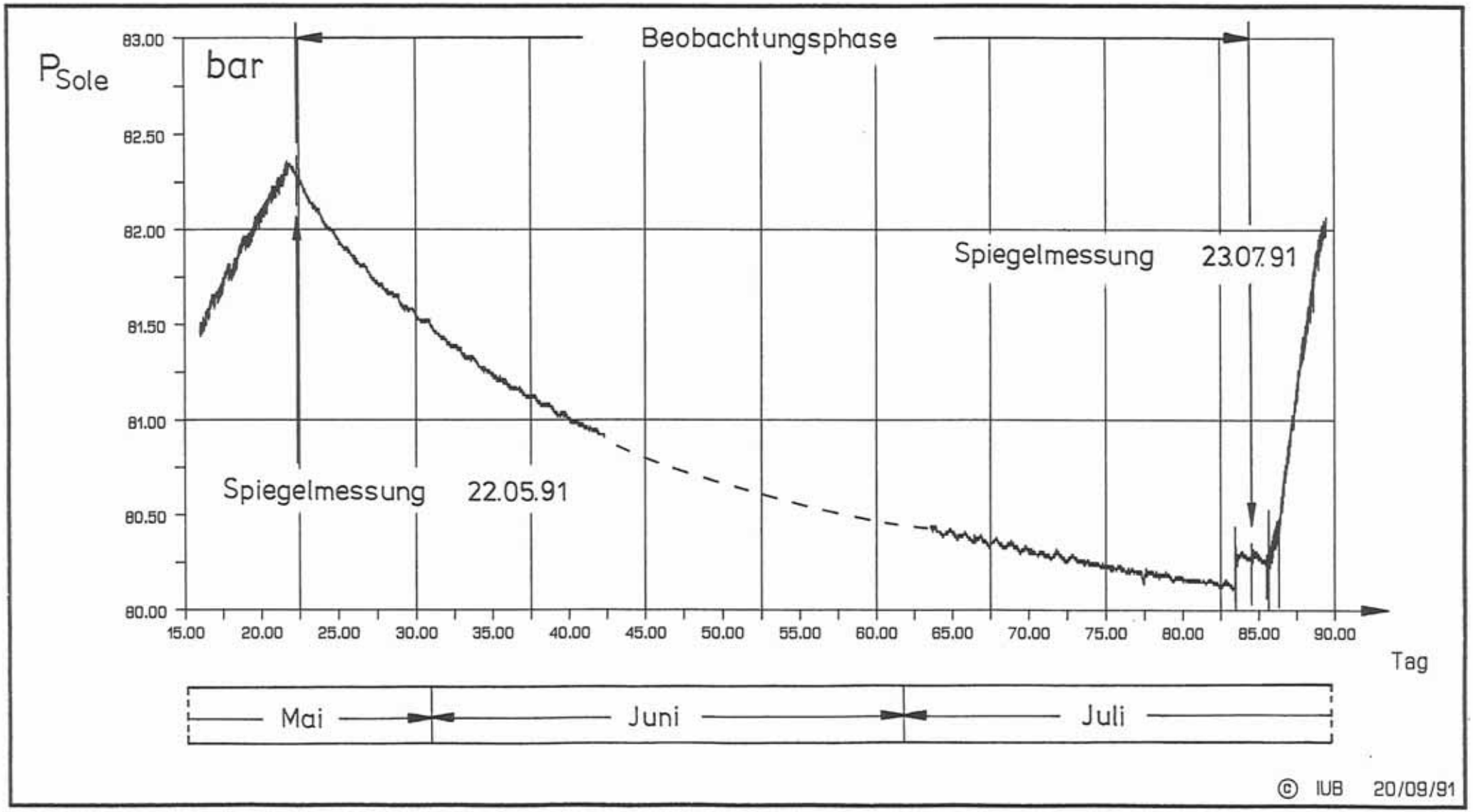
Unmittelbar nach dem Ende der Pumpphase setzte ein Abfall des Sole- bzw. Öldrucks mit einer anfänglichen Rate von ca. 100 mbar/d ein. In Bild 6.2 ist die Entwicklung des soleseitigen Kopfdruckes in der Beobachtungsphase der dritten Druckaufbaustufe dargestellt. Technische Ursachen für den Druckverlust in der Kaverne konnten nach einer Überprüfung der Übertageausrüstung ausgeschlossen werden. Eine Extrapolation auf ein stabiles Druckniveau im Bereich von 80 bar (= 0,217 bar/m) erschien plausibel.

Die am 23.07.1991 durchgeführte Spiegelkontrollmessung im Kavernenhals bildet den Abschluß der dritten Druckaufbaustufe. Der Blanket-Sole-Spiegel konnte dabei geringfügig tiefer gegenüber der Vormessung bei 845,10 m angetroffen werden.



Auswertung für die 3. Druckaufbaustufe

Bild 6.1



Soleseitiger Kopfdruck in der Beobachtungsphase der 3. Druckaufbaustufe
- 22.Mai bis 23. Juli 1991 -

Bild 6.2

6.4 Vierte Druckaufbaustufe
(23.07.1991 - 26.03.1992)

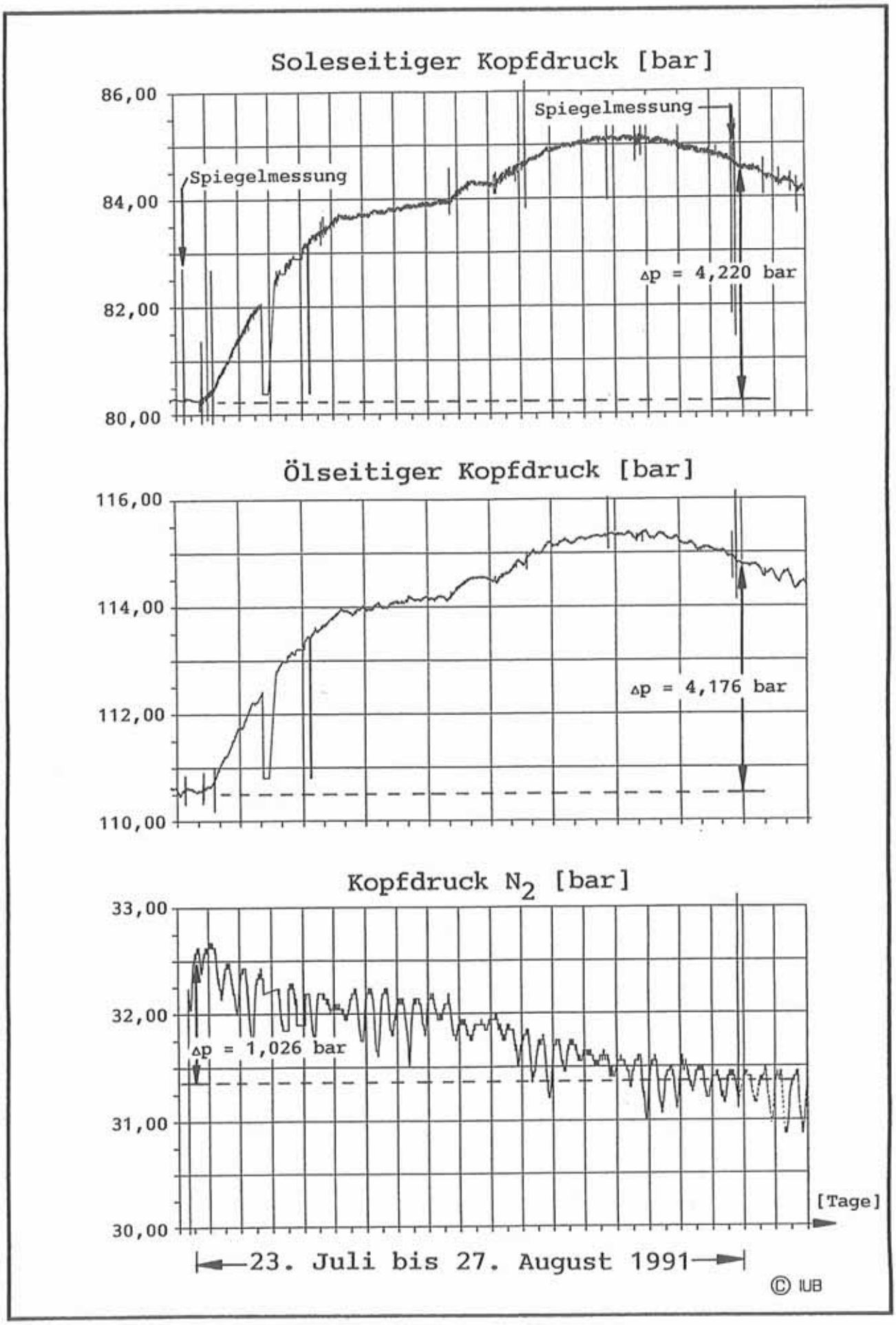
Im Anschluß an die reguläre Spiegelkontrollmessung am Ende der Beobachtungsphase wurde am 23.07.1991 der Solepumpbetrieb zur 4. Druckaufbaustufe (G = 0,235 bar/m) begonnen. Im Gegensatz zur 3. Druckstufe wurde wegen des größer gewordenen Volumens/Druck-Verhältnisses mit zwei baugleichen, parallel betriebenen Dosierpumpen und nunmehr doppelter Pumpleistung von 2 x 148 l/h (ca. 7 m^3/Tag) Sole in die Kaverne gepumpt.

Die hiermit erzielten Drucksteigerungsraten hatten in den ersten Pumptagen mit etwa 0,4 bis 0,5 bar/d (entspr. V/p: 15 - 18 m^3/bar) ein ähnlich hohes Niveau erreicht wie in den vorangegangenen beiden Druckaufbauphasen. Ab dem 30.07.1991 machte sich jedoch eine allmähliche Abnahme der täglichen Druckerhöhung bemerkbar. Ab dem 2. August führten technische Probleme an einer der beiden Dosierpumpen zu einer Reduzierung der Pumpleistung: bis zum 14. August konnte - mit Ausnahme einzelner Tage - nur mit einer Pumpe Sole in die Kaverne verpreßt werden. Der Druckanstieg fiel in dieser Zeit entsprechend auf Werte von 30 - 60 mbar/d.

Obwohl anschließend wieder beide Pumpen kontinuierlich in Betrieb waren (Injektionsvolumen: ca. 7 m^3/d), klang die Drucksteigerungsrate bis zum 20. August auf Null ab. Der maximal erreichte Kopfdruck Sole lag bei 85,16 bar (entspr. G = 0,223 bar/m). Im direkten Anschluß begann der Druck in der Kaverne trotz Soleverpumpens leicht zu fallen. Um evtl. technische Ursachen für den anhaltenden Druckverlust auszuschließen, wurde am 27.08.1991 eine außerplanmäßige Spiegelmessung im Kavernenhals durchgeführt, mit dem Ergebnis, daß sich gegenüber der letzten Messung vom Juli keine Spiegelveränderungen ergeben hatten. Für den entsprechenden Zeitraum zwischen der Aufnahme der Pumpaktivitäten im Juli 1991 (Spiegelmessung 23.07.1991) bis zur Spiegelmessung am 27.08.1991 ist in Bild 6.3 mit allen Meßgrößen des Kopfdrucks (P_{Sole}: soleseitiger Kopfdruck, $P_{Öl}$: ölseitiger Kopfdruck und Kopfdruck des technischen Ringraums P_{N2}) dargestellt.

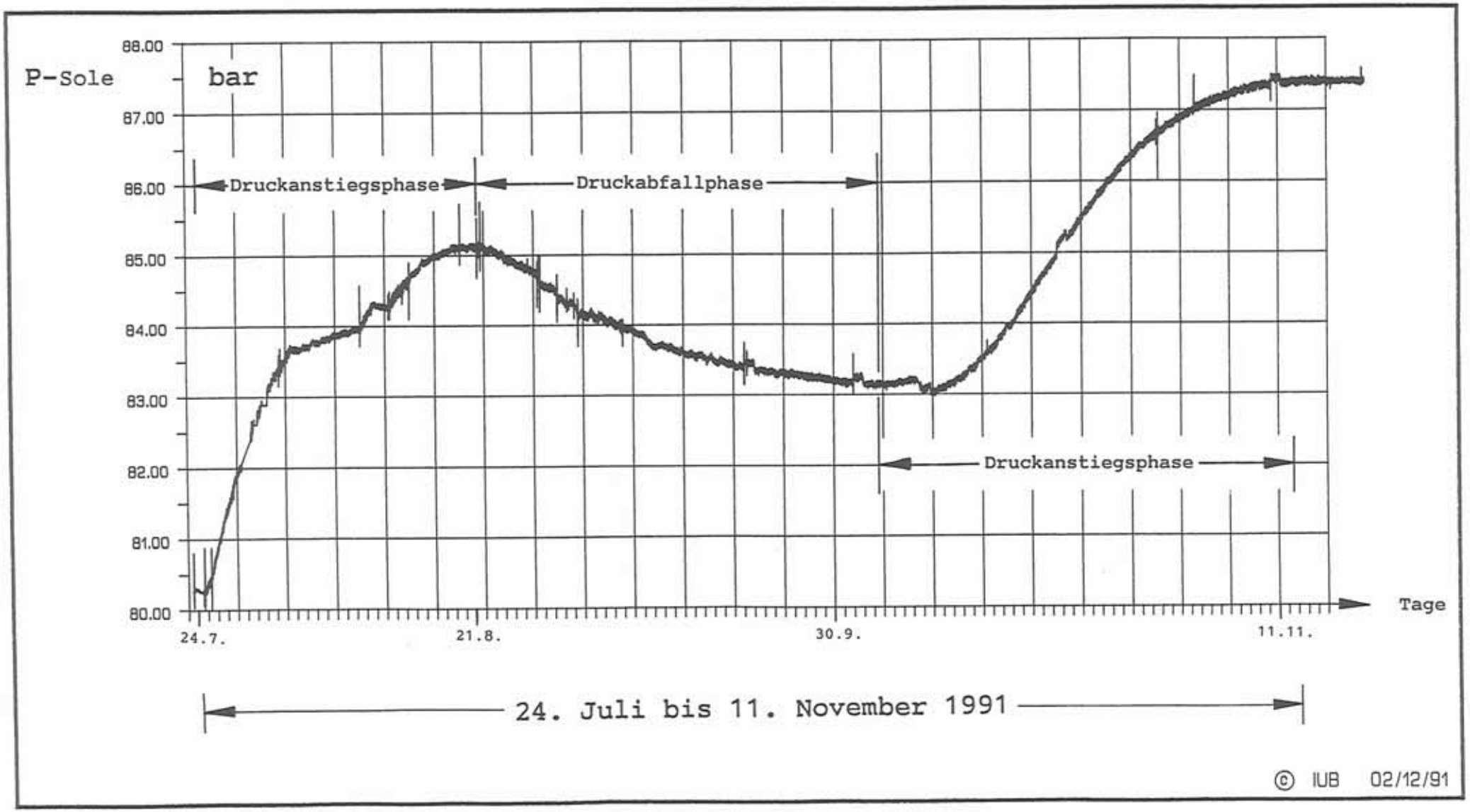
Der Druckabfall von zeitweise bis zu 150 mbar/d nahm im Verlauf des Monats September bei gleichbleibendem Pumpbetrieb allmählich ab und erreichte am 30.09.1991 bei 83,15 bar (entspr. G = 0,220 bar/m) ein Minimum.

Anfang Oktober 1991 begann der Druck in der Kaverne wieder zu steigen, anfänglich mit sehr kleiner Rate, später zum Teil mit bis zu 0,2 bar/d.



Meßgrößen des Kopfdrucks
im Juli / August 1991

Bild 6.3



Soleseitiger Kopfdruck in der 4. Druckaufbaustufe
im Zeitraum Juli bis November 1991

Bild 6.4

Ende Oktober wurden die täglichen Druckerhöhungsraten wieder kleiner und sanken auf Werte < 0,1 bar/d. Am 9. November wurde mit 87,49 bar (entspr. G = 0,226 bar/m) ein neues Druckmaximum (Sole) erreicht, das ca. 2,3 bar höher lag als der Höchstwert vom 20.08.1991. In Bild 6.4 ist die Entwicklung des soleseitigen Kopfdruckes mit den lokalen Maxima für den Zeitraum Juli bis November 1991 dargestellt.

Am 01./02.12.1991 kam es aus technischen Gründen zu einer Pumpunterbrechung. Der hierdurch verursachte Druckeinbruch um 0,5 bar erholte sich an den Folgetagen durch den wieder einsetzenden kontinuierlichen Pumpbetrieb von ca. 7 m³ Sole pro Tag. Nach einem leichten Druckanstieg bis auf 86,8 bar (Kopfdruck Sole, entspr. G = 0,225 bar/m) begann der Druck jedoch ab dem 06.12.1991 seinen zuvor gezeigten Trend zu Druckabfall wieder aufzunehmen: waren es anfänglich etwa 50 mbar/d, so steigerte sich die Druckabfallrate bis zum Jahresende auf ca. 100 mbar/d (P_{Sole} am 31.12.1991: 84,8 bar).

Ab dem 10.01.1992 nahm die Druckabfallrate allmählich ab; am 17.01.1992 wurde bei 83,7 bar (G = 0,221 bar/m) ein zweites relatives Druckminimum im Verlauf der 4. Druckaufbauphase erreicht, das im Druckniveau ca. 0,5 bar über dem ersten (vom 30.09.1991) lag. Bei weiterhin unveränderter Soleverpumprate verharrte der Kavernendruck zunächst über mehrere Tage auf diesem Tiefstand, bevor ab der letzten Januarwoche ein leichter Druckanstieg zu beobachten war. Bis in den März 1992 hinein konnte nur eine geringe Drucksteigerung um etwa 20 bis 40 mbar pro Tag erreicht werden. Kurzzeitige Pumpunterbrechungen, die zur Wartung der Dosierpumpen erforderlich wurden (am 16.02. und 08.03.1992), hatten ein spontanes Absacken des Kavernendruckes um ca. 0,3 bzw. 0,2 bar zur Folge.

Die Dosierpumpen wurden am 26.03.1992, 8.00 Uhr, abgeschaltet und die Kaverne verschlossen. Es bestand die Gefahr der Minderung der Gebrauchsfähigkeit der Kaverne K102, da durch weiteres Nachpumpen ein Eindringen von Sole in das Deckgebirge und damit das Entstehen einer nicht kontrollierbaren Situation befürchtet werden mußte. Zum Abschaltzeitpunkt betrug der Kopfdruck Sole 84,64 bar (entspr. G = 0,222 bar/m). Insgesamt wurden ca. 1 654 m³ Sole im Verlauf der 4. Druckaufbaustufe in die Kaverne verpumpt.

6.5 Versuchsphase I
(27.03. - 25.08.1992)

Im direkten Anschluß an den Abbruch des Pumpbetriebes begann der Druck mit einer anfänglichen Rate von etwa 0,4 bar/d abzufallen.

Eine am 2. April bei einem Solekopfdruck von 82,1 bar (entspr. G = 0,219 bar/m) durchgeführte Spiegelkontrollmessung im Kavernenhals ergab einen um 4,0 m höher gelegenen Öl/Sole-Spiegel (841,1 m Teufe) als bei der vorangegangenen Messung vom 27.08.1991. Aufbauend auf eine Analyse für den Zeitraum August/September 1991 bis März 1992 konnte gefolgert werden, daß sich über den genannten Zeitraum der Blanket-Sole-Spiegel kontinuierlich von der Teufenlage 845,10 m auf 841,10 m verschoben haben mußte. In Bild 6.5 sind der soleseitige Kopfdruck sowie die zur Bewertung genutzte Kopfdruckdifferenz (zwischen Sole und Rohöl) und die Kopftemperatur dargestellt.

Die zur qualitativen Teufenkontrolle der Kavernensohle angesetzte Bodenlotung zeigte keine Abweichung von dem Ergebnis der Vormessung. Im Verlauf des Monats April reduzierte sich die Druckverlustrate von anfänglich mehr als 0,2 bar/d auf weniger als 0,1 bar/d am Monatsende.

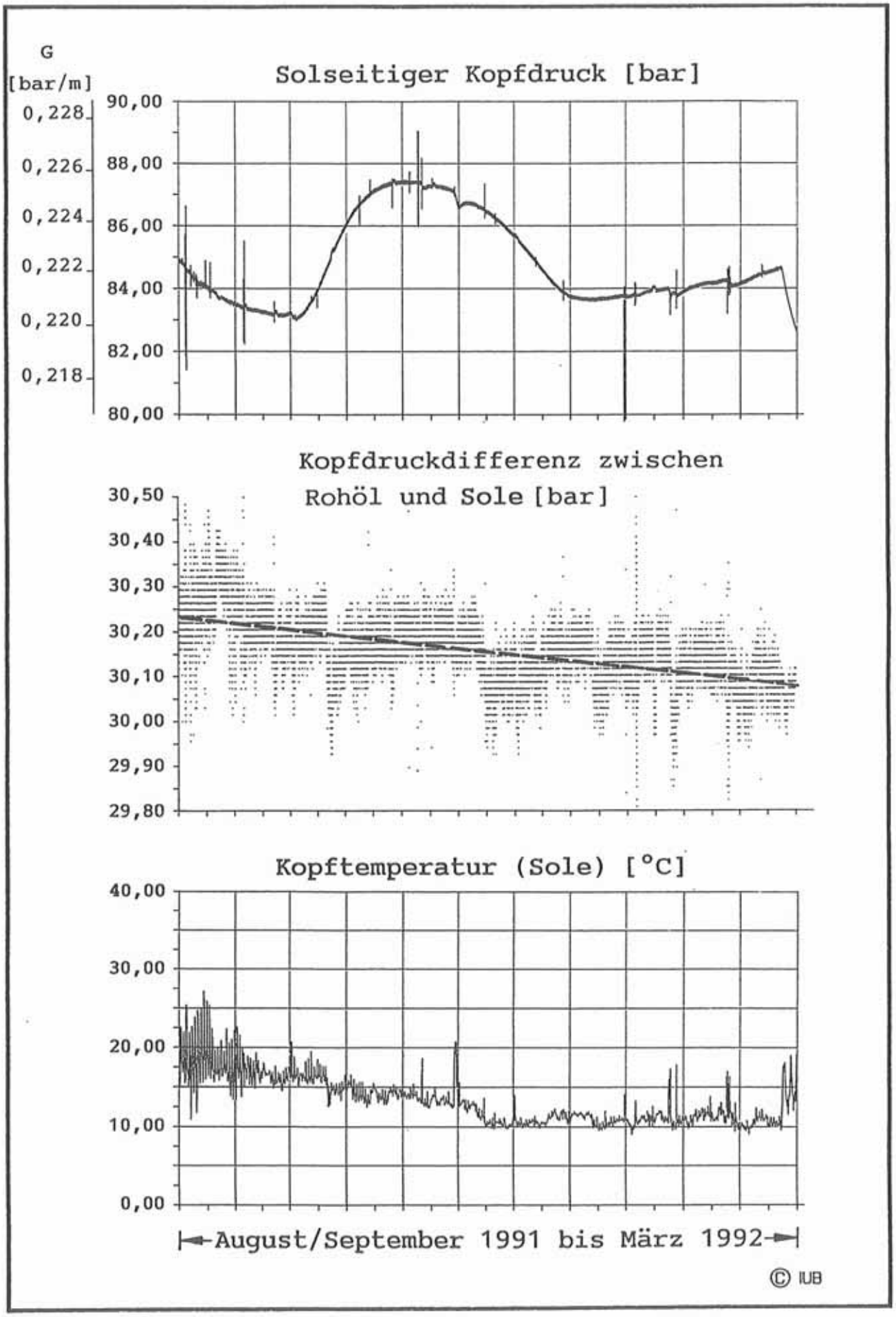
Nach vierwöchiger Beobachtungszeit wurde am 30.04.1992 bei einem Kopfdruck Sole von 78,6 bar (entspr. G = 0,215 bar/m) der Öl/Sole-Spiegel in der Kaverne K102 erneut kontrolliert: Der Spiegel lag unverändert bei 841,1 m Teufe.

Der Druckabfall setzte sich mit geringer, langsam abnehmender Rate im Mai weiter fort.

Im Juni, das Druckniveau in der Kaverne war inzwischen unter 77 bar (Kopfdruck Sole) gefallen, beharrte der Druckabfall nahezu konstant bei etwa 30 mbar pro Tag. Erst zum Monatsende machte sich eine weitere Reduzierung der Druckverlustrate bemerkbar.

Im Juli setzte sich der geringe Druckabfall unterhalb von 76 bar mit schwankender Rate von 0 - 30 mbar/d weiter fort.

Zusammen mit dem Ausklingen des Druckabfalls war seit Mai ein deutlicher Rückgang der mikroseismischen bzw. seismoakustischen Aktivität in der Kaverne zu beobachten, so daß über Wochen hinweg nur einzelne Signale registriert wurden.



Auswertung für den Zeitraum
August / September 1991 bis März 1992

Bild 6.5

Aufgrund des inzwischen sehr geringen Druckverlustes wurde die Beobachtungsphase bei einem asymptotisch auslaufenden Ruhedruck von 75,4 bar (Kopfdruck Sole, entspr. G = 0,211 bar/m) am 25.08.1992 beendet. Am selben Tag wurde eine Spiegelkontrollmessung im Kavernenhals durchgeführt, die die Teufenlage des Öl/Solespiegels bei 841,7 m feststellte, was eine Absenkung um 0,4 m gegenüber der letzten Messung vom 10.06.1992 bedeutete. Die gesamte Entwicklung des Druckabbaus für den als Versuchsphase I bezeichneten Zeitraum von März 1992 bis August 1992 ist mit den Spiegelmessungen und deren Ergebnissen in Bild 6.6 dargestellt.

6.6 Versuchsphase II zur Prüfung des Druckniveaus (26.08.1992 - 01.02.1993)

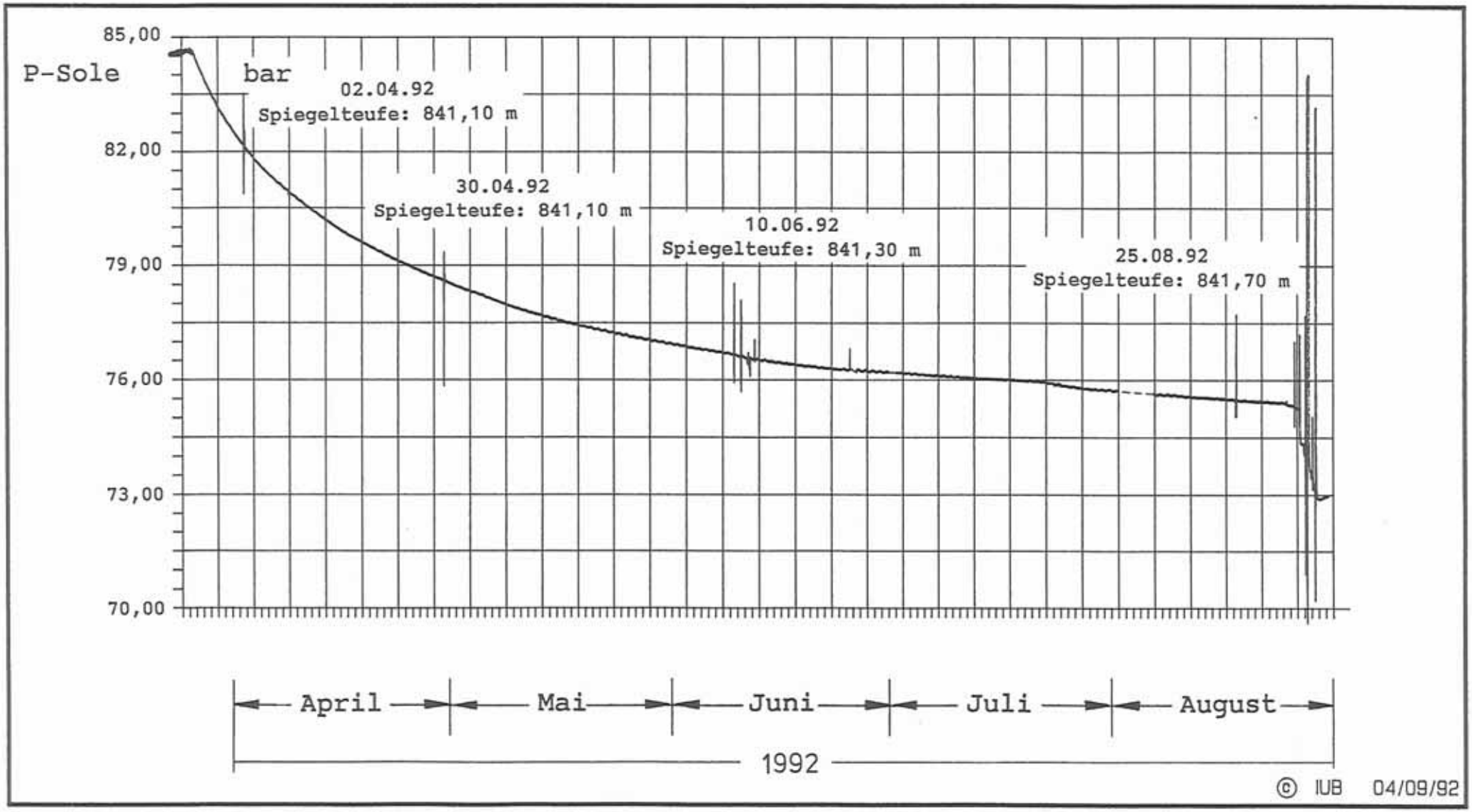
Entlastungsphase (1):

Entsprechend einer von der wissenschaftlichen Versuchsbegleitung ausgearbeiteten Empfehlung für weitere Versuchsphasen, die mit dem Technischen Ausschuß Druckaufbautest sowie mit Gutachter und Bergbehörde abgestimmt worden war, wurde im Zeitraum 27. - 29.08.1992 der Kavernendruck durch Soleentlastung mit einer angestrebten Rate von 1 bar/d auf 73,0 bar (Kopfdruck Sole, entspr. G = 0,209 bar/m) abgesenkt. Die Soleentlastung erfolgte anlagenbedingt diskontinuierlich in sieben Schritten, wobei insgesamt 20,1 m^3 Sole abgelassen wurden. Die Versuchsplanung bis zum Ende des Druckaufbautests ist in Bild 6.7 dargestellt.

1. Beobachtungsphase (2):

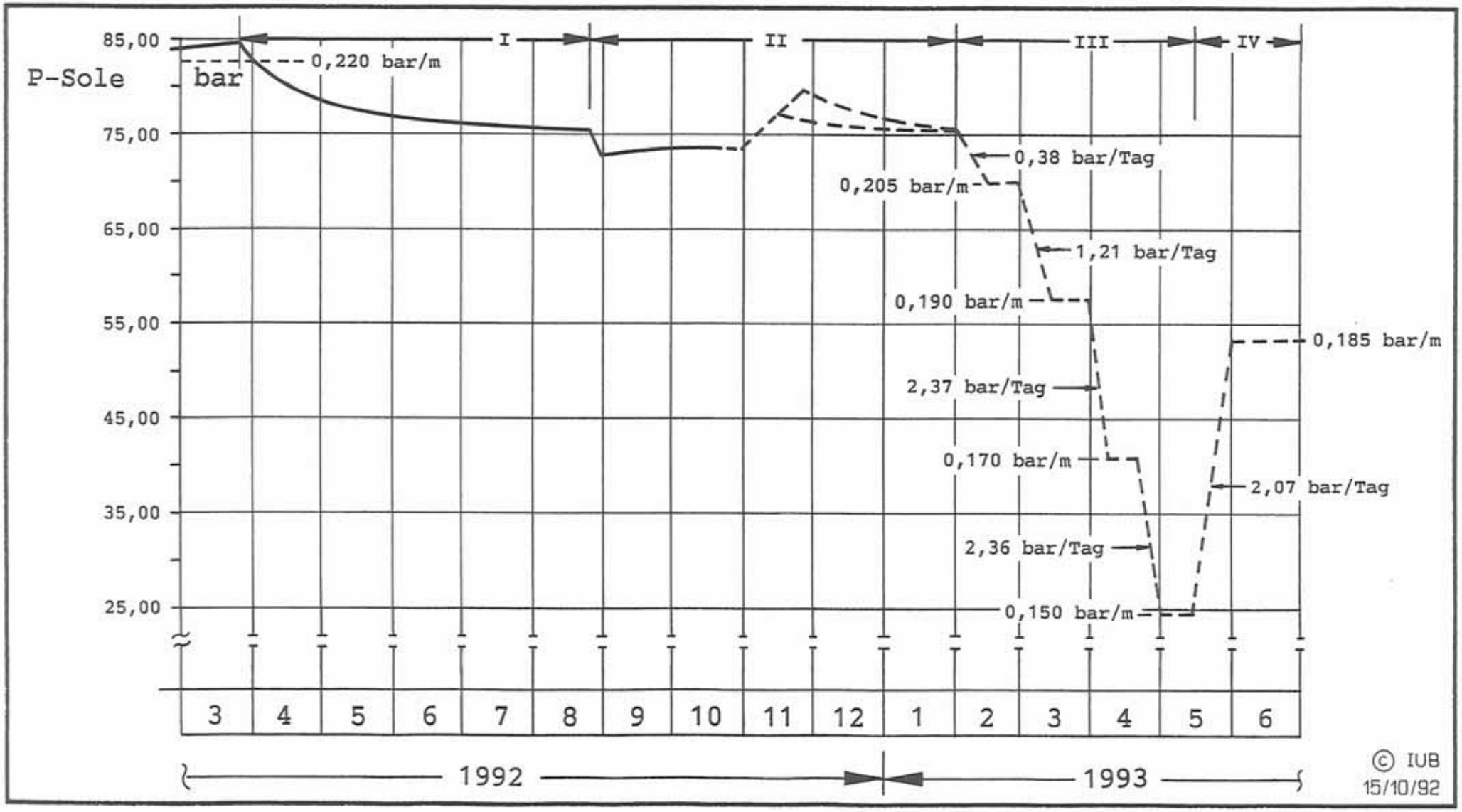
Im Anschluß an die Druckentlastung wurde die Kaverne verschlossen und eine mehrwöchige Beobachtungsphase eingeleitet. Schon nach kurzer Zeit machte sich ein leichter natürlicher Druckanstieg von 10 - 30 mbar pro Tag bemerkbar, der im Verlauf des Monats September wieder abklang. Ende September hatte sich ein Ruhedruck um 73,64 bar (Kopfdruck Sole, G = 0,209 bar/m) eingestellt.

Bei einer Spiegelkontrollmessung am 16.10.1992 wurde der Öl/Solespiegel im Kavernenhals bei 842,0 m Teufe angetroffen, was einer Spiegelabsenkung um 0,3 m gegenüber der Vormessung vom 25.08.1992 entspricht.



Kopfdruck (Sole) und Spiegelmessungen - Beobachtungsphase -

Bild 6.6



Kopfdruck (Sole) und Versuchsplanung bis zum 30.06.1993

Bild 6.7

Druckaufbauphase (3):

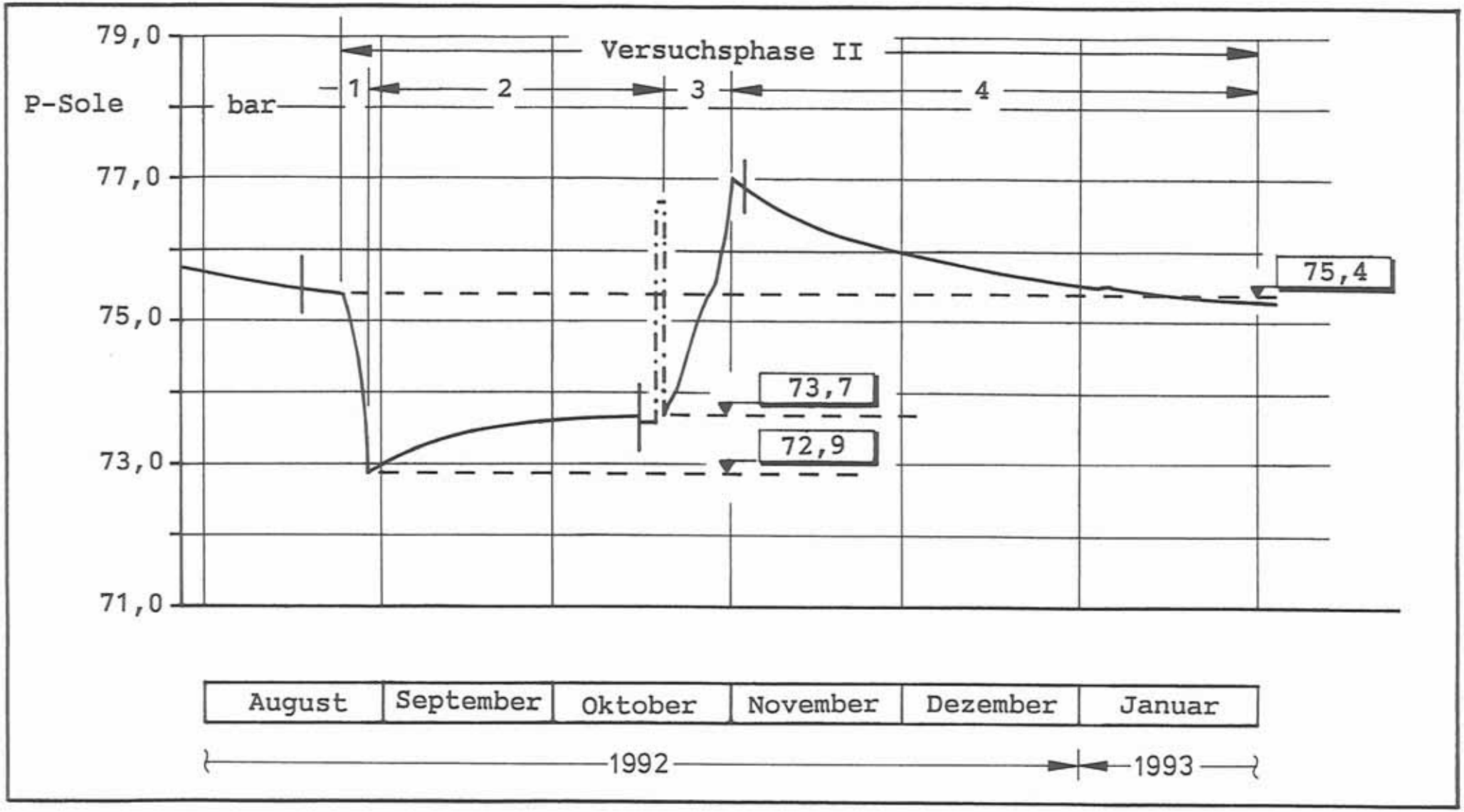
Am 19.10.1992 wurde entsprechend dem Versuchsprogramm begonnen, den Druck in der Kaverne mit einer Dosierpumpe im kontinuierlichen Betrieb (Förderleistung: ca. 3,5 m^3/d) auf 77 bar (G = 0,213 bar/m) zu erhöhen. Mit diesem Vorgehen sollte das Druckaufbauverhalten, wie es unter gleichen technischen Bedingungen bereits bei der 3. Druckaufbaustufe im April 1991 beobachtet wurde, überprüft werden.

Die Spiegelmessung am 03.11.1992 ergab keine Veränderungen gegenüber der Messung vom 16.10.1992.

2. Beobachtungsphase (4):

Bereits kurze Zeit nach dem Abschalten der Solepumpe begann der Druck langsam zu fallen: Nachdem Anfang November Druckabfallraten von bis zu 60 mbar/d beobachtet wurden, nahm der Druckverlust bis zum Jahresende auf Werte < 15 mbar/d ab. Bis Ende Januar 1993 hatte sich ein nahezu konstanter Druckzustand eingestellt, so daß die Ruhephase am 01.02.1993 bei einem Kopfdruck Sole von 75,31 bar (G = 0,211 bar/m) beendet wurde.

Die am selben Tag durchgeführte Spiegelkontrollmessung zeigte den Öl/Solespiegel im Kavernenhals bei 842,2 m Teufe (0,2 m tiefer gegenüber der vorausgegangenen Messung). In Bild 6.8 ist der soleseitige Kopfdruck der Versuchsphase II dargestellt.



Versuchsphase II
Druckaufbautest K102

Bild 6.8

6.7 Versuchsphase III (Stufenweise Druckentlastung) (02.02. - 17.05.1993)

Gemäß Versuchsprogramm wurde Anfang Februar mit der stufenweisen Entlastung der Kaverne begonnen:

In der **1. Entlastungsphase** vom 03. - 19.02.1993 auf die Gradientenstufe **0,205 bar/m** wurden durch Einzelentlastungen von 3 x 1, später 3 x 1,5 m^3/d insgesamt 54,1 m^3 Sole aus der Kaverne abgelassen. Der Kopfdruck Sole (p_{KS}) sank dabei mit einer Rate 0,3 - 0,5 bar/d auf zuletzt 70,05 bar (G = 0,205 bar/m) (Δp = 5,2 bar). Das Volumen/Druck-Verhältnis bei der Entlastung betrug 10,4 m^3/bar.

Während der anschließenden 16tägigen Ruhephase stieg der Druck allmählich um ca. 0,7 bar auf p_{KS} = 70,73 bar (G = 0,205 bar/m).

In der **2. Entlastungsphase** vom 08. - 22.03.1993 auf die Gradientenstufe **0,190 bar/m** wurden durch Einzelentlastungen, die von 3 x 3, später 3 x 3,5 m^3/d insgesamt 147,6 m^3 Sole abgelassen. Der Kopfdruck Sole sank dabei im Durchschnitt um 0,9 bar/d auf zuletzt 57,96 bar (G = 0,190 bar/m) (Δp = 12,8 bar). Das Volumen/Druck-Verhältnis bei der Entlastung stieg leicht auf 11,5 m^3/bar.

Im Verlauf der anschließenden neuntägigen Ruhephase setzte ein Druckaufbau um ca. 3,0 bar auf p_{KS} = 61,0 bar (G = 0,194 bar/m) ein.

In der **3. Entlastungsphase** vom 01. - 10.04.1993 auf die Gradientenstufe **0,170 bar/m** sind durch Einzelentlastungen, die von 3 x 6 m^3/d allmählich auf 3 x 10 m^3/d erhöht wurden, insgesamt 231 m^3 Sole aus der Kaverne abgelassen worden. Der Kopfdruck Sole sank dabei mit einer Rate zwischen 1,9 und 2,5 bar/d auf 41,1 bar (G = 0,170 bar/m) (Δp = 19,9 bar). Das Volumen/Druck-Verhältnis bei der Entlastung blieb mit 11,5 m^3/bar unverändert.

Während der anschließenden zwölftägigen Ruhephase stellte sich ein deutlicher Druckanstieg um ca. 7,1 bar auf p_{KS} = 48,19 bar (G = 0,178 bar/m)ein.

In der **4. Entlastungsphase** vom 23.04. - 02.05.1993 auf die Gradientenstufe **0,150 bar/m** wurden in regelmäßigen Einzelschritten von 3 x 10 m^3/d insgesamt 270 m^3 Sole aus der Kaverne abgelassen. Der Kopfdruck Sole sank dabei mit einer Rate, die von 3,1 auf ca. 2 bar/d abnahm, auf 24,52 bar (G = 0,150 bar/m) (Δp = 23,7 bar). Das Volumen/Druck-Verhältnis bei der Entlastung blieb mit 11,4 m^3/bar nahezu konstant.

Am 03.05.1993 wurde der Öl/Sole-Spiegel im Kavernenhals vermessen und (gegenüber der Vormessung vom 01.02.1993) 0,3 m tiefer, d.h. bei 842,5 m Teufe angetroffen.

Während der anschließenden Ruhephase bis zum 17.05.1993 stieg der Solekopfdruck um 5,7 bar auf zuletzt 30,25 bar (G = 0,156 bar/m).

6.8 Versuchsphase IV (Druckprüfung unter Maximaldruckniveau) (18.05. - 28.06.1993)

Zur Überprüfung des Druckverhaltens der Kaverne unter maximalen Speicherdruckverhältnissen (für den Ölbetrieb $G_{zul.} = 0{,}180$ bar/m) sollte die Kaverne in der letzten Versuchsphase nochmals mit Druck beaufschlagt werden.

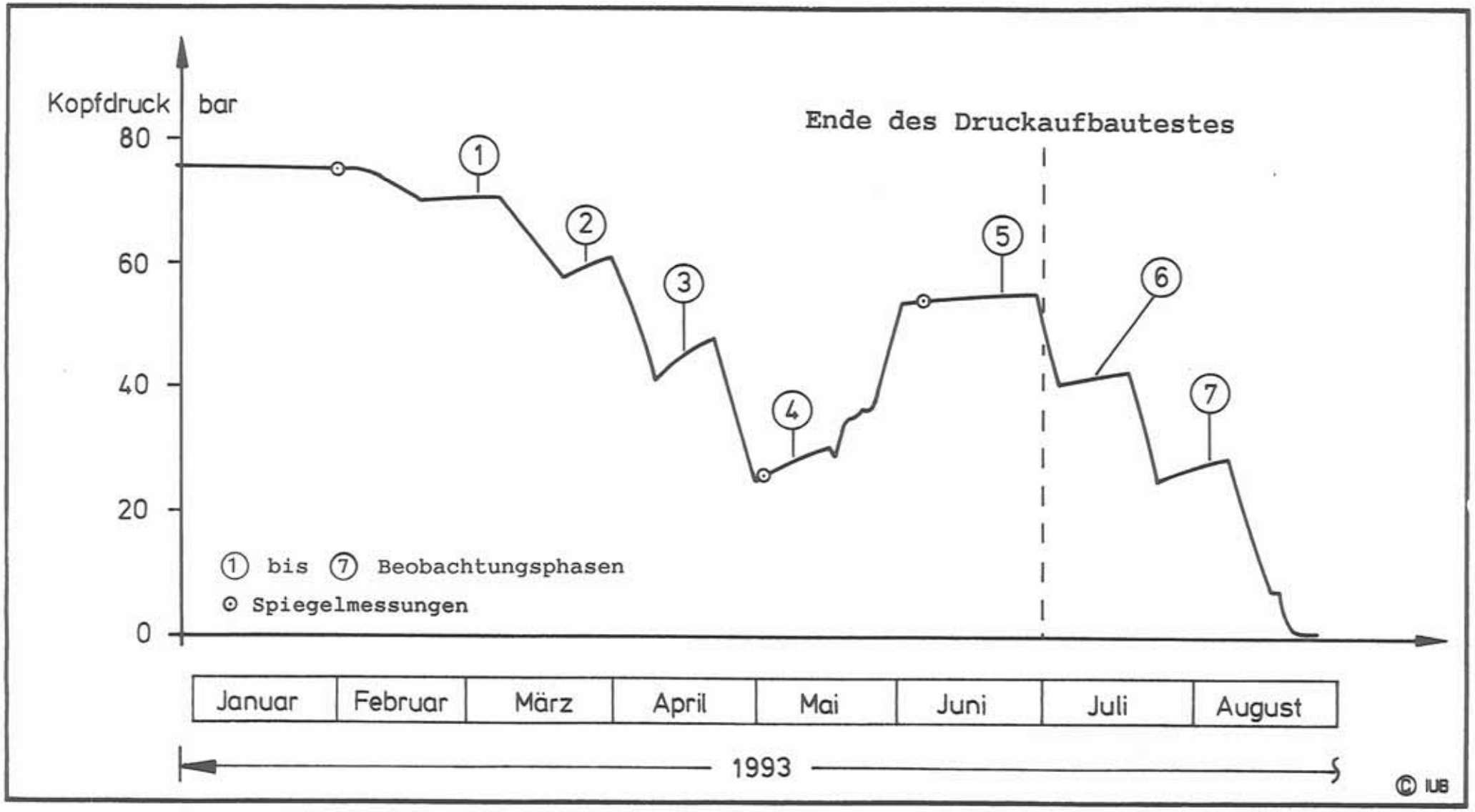
In der Zeit vom 18. - 20.05.1993 wurde hierzu der Druck zunächst durch Überströmen von Sole aus der Nachbarkaverne K101 aufgebaut. Nach einer kurzen technischen Unterbrechung wurde ab dem 24.05.1993 Sole mittels einer HD-Pumpe in die K102 verpumpt. Um einen langsamen und gleichmäßigen Druckaufbau zu gewährleisten, wurden diskontinuierlich, d.h. viermal täglich in ca. einstündigen Pumpaktionen jeweils 6 m^3 Sole (= 24 m^3/d entsprechend einer Aufbaurate von ca. 2,6 bar/d) verpumpt. Am 01.06.1993 war der geplante Druckgradient 0,185 bar/m bei $p_{KS} = 53{,}6$ bar erreicht. Insgesamt wurden 219 m^3 Sole für den Druckaufbau benötigt, das Volumen/Druck-Verhältnis betrug 9,5 m^3/bar.

In der nachfolgenden Ruhephase fand am 07.06.1993 die letzte Spiegelkontrolle statt. Der Öl/Sole-Spiegel wurde bei 842,7 m Teufe gemessen, 0,2 m tiefer als bei der Vormessung vom 03.05.1993; auch hier zeigten die übrigen Meßergebnisse keine besonderen Veränderungen.

Im Verlauf der vierwöchigen Ruhephase stieg der Druck mit einer Rate um 50 mbar/d langsam an, bei einem Kopfdruck Sole von 55,3 bar (G = 0,187 bar/m).

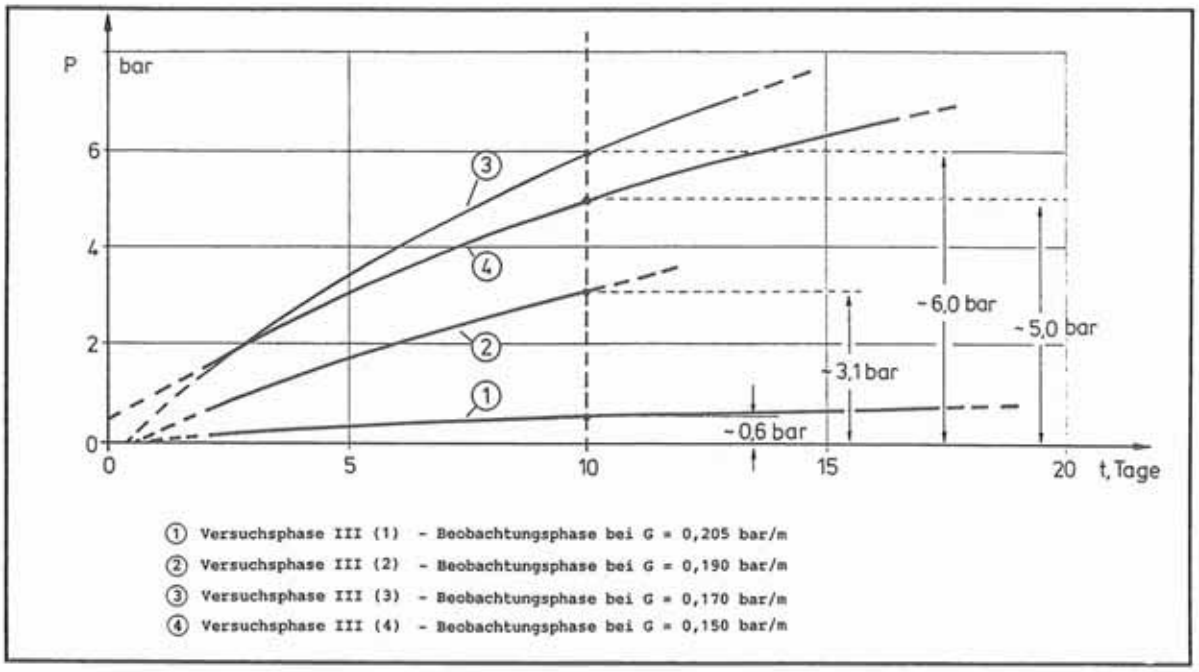
Das Versuchsprogramm fand damit zwei Tage vor dem planmäßigen **Ende des Druckaufbautestes**, dem 30.06.1993, seinen Abschluß.

Am 29.06.1993 wurde im Hinblick auf die für Mitte August geplante Rekomplettierung der Kaverne K102 (Ausbau der Testausrüstung, Umbau für den Ölspeicherbetrieb) mit der langsamen stufenweisen Druckentlastung begonnen. Eine zusammenfassende Darstellung für die Versuchsphasen III und IV sowie für die Entlastungsschritte bis zur Rekomplettierung ist in Bild 6.9 dargestellt. Aus der Analyse des Druckaufbaus in den Beobachtungsphasen kann gefolgert werden, daß sich die Testkaverne in ihrem Druckaufbauverhalten immer mehr dem einer normalen Lagerkaverne näherte (Bild 6.10).

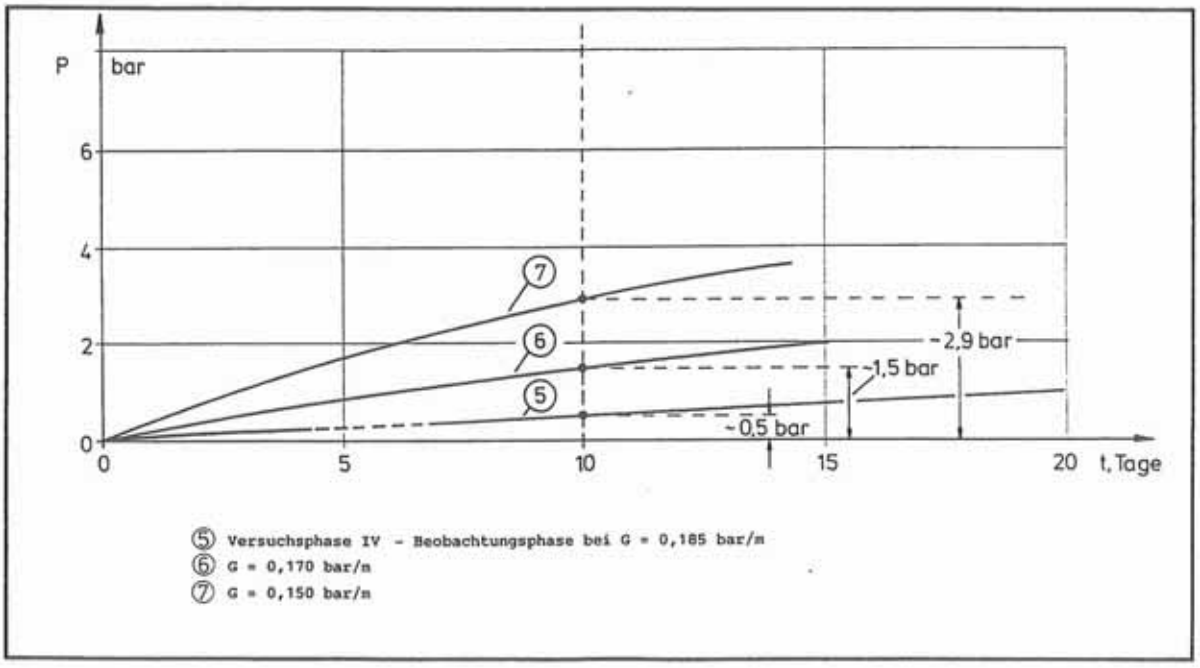


Soleseitiger Kopfdruck bis zum Beginn der Rekomplettierung

Bild 6.9



Beobachtungsphasen ① bis ④



Beobachtungsphasen ⑤ bis ⑦

© IUB

Druckaufbau in den Beobachtungsphasen

Bild 6.10

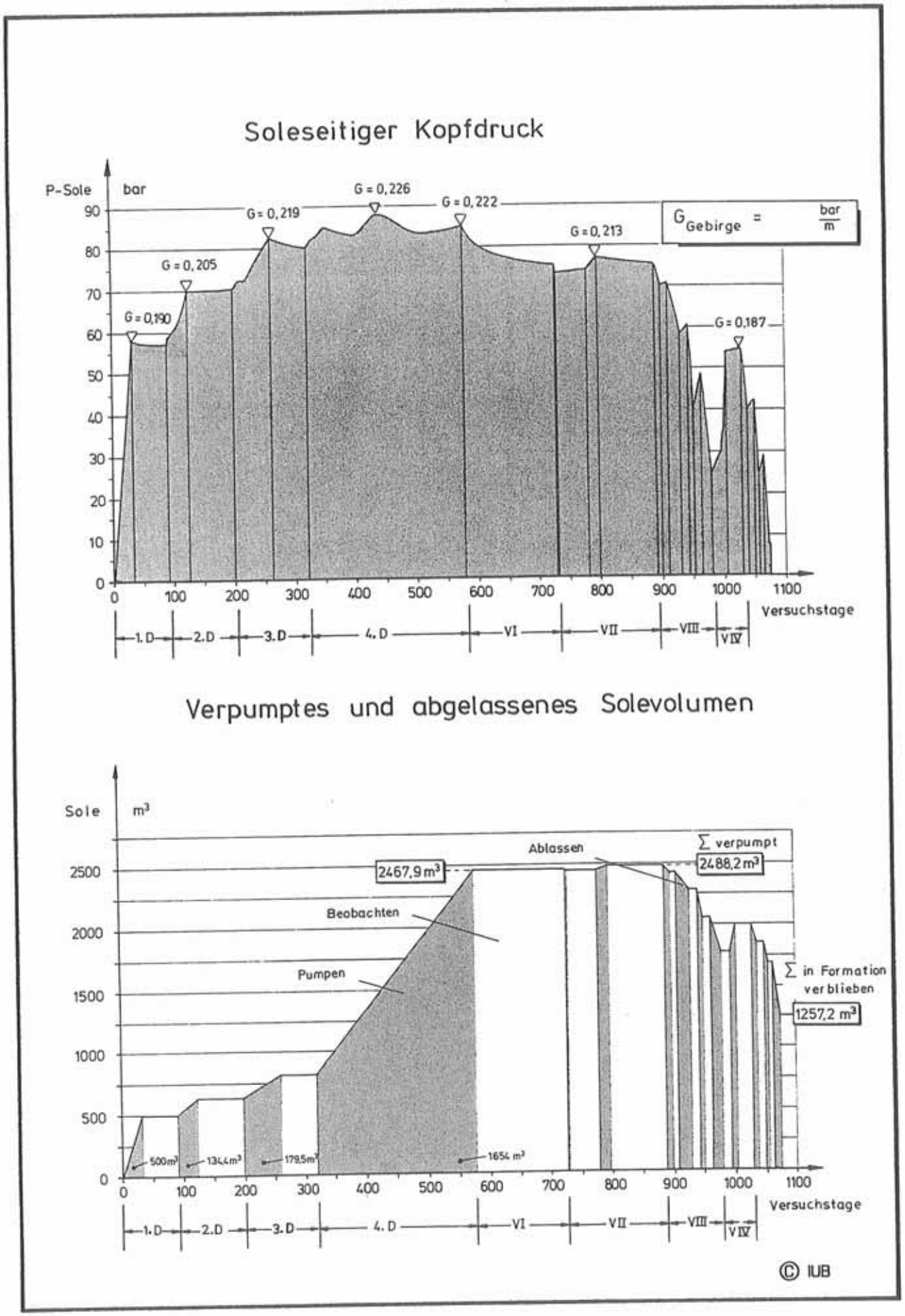
7. Zusammenfassende Darstellung und Interpretation der Versuchsergebnisse

7.1 Zusammenfassung des Versuchsverlaufs

7.1.1 Druckverlauf (soleseitiger Kopfdruck und diskontinuierliche Druckmessungen in ausgewählten Teufenlagen in der Testkaverne) und Volumenbilanz

Für den gesamten Versuchszeitraum vom September 1990 bis Juni 1993 und für die sich anschließende Entlastung der Testkaverne bis zur Rekomplettierung (August/September 1993) ist der Druckverlauf des soleseitigen Kopfdruckes im oberen Teil des Bildes 7.1 dargestellt. Als Abszissenwerte sind die laufenden Versuchstage ab September 1990 gewählt worden. Als Blöcke sind in der Darstellung die einzelnen Druckaufbauphasen sowie die zugehörigen Beobachtungsphasen kenntlich gemacht. Gleiches gilt für die nach Abbruch des Pumpbetriebes am 26.03.1992 durchgeführten Versuchsphasen I bis IV mit ihren Phasen der Soleentnahme und der Beobachtung der Druckentwicklung nach Druckreduzierung sowie für die in Versuchsphase II und Versuchsphase IV durchgeführten Druckerhöhungen mit ihren zugehörigen Beobachtungsphasen.

Im unteren Teil des Bildes 7.1 ist das verpumpte und abgelassene Solevolumen über die Versuchstage dargestellt. Die Phasen der Druckerhöhung durch Überströmen bzw. durch Verpumpen mit den Dosierpumpen sowie die Phasen der diskontinuierlichen Entnahme von Sole (mit Frischwasserinjektionen) sind als dunkle Flächen kenntlich gemacht. Für die akkumulierten Solevolumina können zum Zeitpunkt des Abbruchs des Pumpbetriebes 2.488,2 m^3 für den Maximalwert des verpumpten Solevolumens innerhalb des Druckaufbautestes angegeben werden. Nach erfolgter stufenförmiger Druckentlastung (Versuchsphase III), erneuter Druckerhöhung (Versuchsphase IV: Druckprüfung unter Maximaldruckniveau) und der abschließenden Druckentlastung für die Umrüstungsarbeiten der Testkaverne ergibt sich für die Bilanz zwischen verpumpten und abgelassenen Solemengen ein rechnerischer Überschuß von 1.257,2 m^3 (ca. 50 % des verpumpten Gesamtvolumens). Die innerhalb der Soleentlastungsmaßnahmen zur Verhinderung von Salzauskristallisation in die 4 ½"-Rohrtour eingebrachten und wieder entnommenen Frischwassermengen sind innerhalb dieser Bilanzierung nicht berücksichtigt worden, da ihr Einfluß auf die Volumenbilanz als unwesentlich angesehen wird.



Vergleich zwischen Druckverlauf und Mengenbilanz für das Solevolumen

Bild 7.1

Die Entwicklung des soleseitigen Kopfdruckes kann für die einzelnen Druckaufbaustufen/Versuchsphasen mit den diskontinuierlich durchgeführten Druckmessungen in der Testkaverne verglichen werden. Die Ergebnisse der in den Teufenlagen z = 900 m, z = 1195 m und z = 1490 m durchgeführten Messungen sind in Tabelle 7.1 zusammengestellt. (Die in Klammern angegebenen Werte sind weniger gesichert).

Datum	P_{900}	P_{1195}	P_{1490}	P_{Kopf}
Tag der Messung	Druck im Dachbereich	Druck im mittleren Bereich der Kaverne	Druck im Sumpf-bereich	Druck am Kavernen-kopf
Datum	[bar]	[bar]	[bar]	[bar]
17.04.1989	108,00	143,00	179,00	—
30.08.1990	(107,45)	—	—	—
02.10.1990	164,80	199,70	234,40	57,90
29.11.1990	164,26	199,19	234,10	56,70
03.01.1991	177,20	212,17	246,95	70,00
27.02.1991	176,44	211,35	246,36	70,00
22.05.1991	188,84	223,60	258,37	82,36
23.07.1991	185,46	220,28	254,96	80,30
27.08.1991	(192,10)	226,95	261,80	84,70
02.04.1992	(191,80)	225,95	260,91	82,10
30.04.1992	(191,20)	225,10	260,05	78,60
10.06.1992	—	—	—	76,70
25.08.1992	(184,50)	218,20	253,00	75,40
16.10.1992	181,70	216,30	250,80	73,70
03.11.1992	186,50	221,70	256,90	76,80
01.02.1993	185,60	220,90	256,30	75,31
03.05.1993	136,30	170,90	206,10	24,52
07.06.1993	167,00	202,00	237,00	53,90

Tabelle 7.1: Diskontinuierliche Druckmessungen in der Testkaverne

Diese parallel zu den Messungen des Blanket-Sole-Spiegels durchgeführten Druckmessungen können für eine nachträgliche Einordnung und kritischen Bewertung der aus den Kopfdrücken hergeleiteten Gradienten genutzt werden, da die Kopfdrücke durch witterungsbe-

dingte Temperatureinflüsse nicht die wahren Druckverhältnisse in der Testkaverne wiedergeben könnten.

7.1.2 Temperaturentwicklung in der Testkaverne über den Versuchszeitraum (diskontinuierliche Messungen)

In den ausgewählten Teufenlagen z = 900 m (Dachbereich der Testkaverne), z = 1195 m (mittlerer Bereich der Testkaverne) und z = 1490 m (Sumpfbereich der Testkaverne) sind neben den diskontinuierlichen Druckmessungen (siehe Kapitel 7.1.1) Temperaturmessungen durchgeführt worden. In der folgenden Tabelle 7.2 sind die Meßergebnisse aufgeführt.

Tag der Messung	T in 900 m	T in 1195 m	T in 1490 m
Datum	°C	°C	°C
17.04.1989	49,68	48,95	49,36
30.08.1990	(49,60)	—	—
02.10.1990	49,90	50,20	50,60
29.11.1990	49,86	50,25	50,75
03.01.1991	50,00	50,38	50,85
27.02.1991	50,03	50,43	50,86
22.05.1991	50,08	50,49	51,00
23.07.1991	50,09	50,52	50,95
27.08.1991	(50,10)	50,52	50,88
02.04.1992	(50,30)	50,76	51,18
30.04.1992	(50,30)	50,99	51,45
10.06.1992	(50,60)	51,05	51,50
25.08.1992	(50,40)	50,95	51,35
16.10.1992	50,60	51,00	51,50
03.11.1992	50,40	50,70	51,20
01.02.1993	50,10	50,50	50,90
03.05.1993	50,60	51,10	51,50
07.06.1993	50,70	51,20	51,50

Tabelle 7.2: Diskontinuierliche Temperaturmessungen in der Testkaverne

Aus den gesamten Messungen kann eine geringfügige Erhöhung der Soletemperatur in der Kaverne abgelesen werden. Auffallend ist jedoch, daß über die gesamte Kavernenhöhe (Meßhöhe) nur ein Temperaturunterschied von < 1 °C festgestellt werden konnte.

7.1.3 Entwicklung des Blanket-Sole-Spiegels

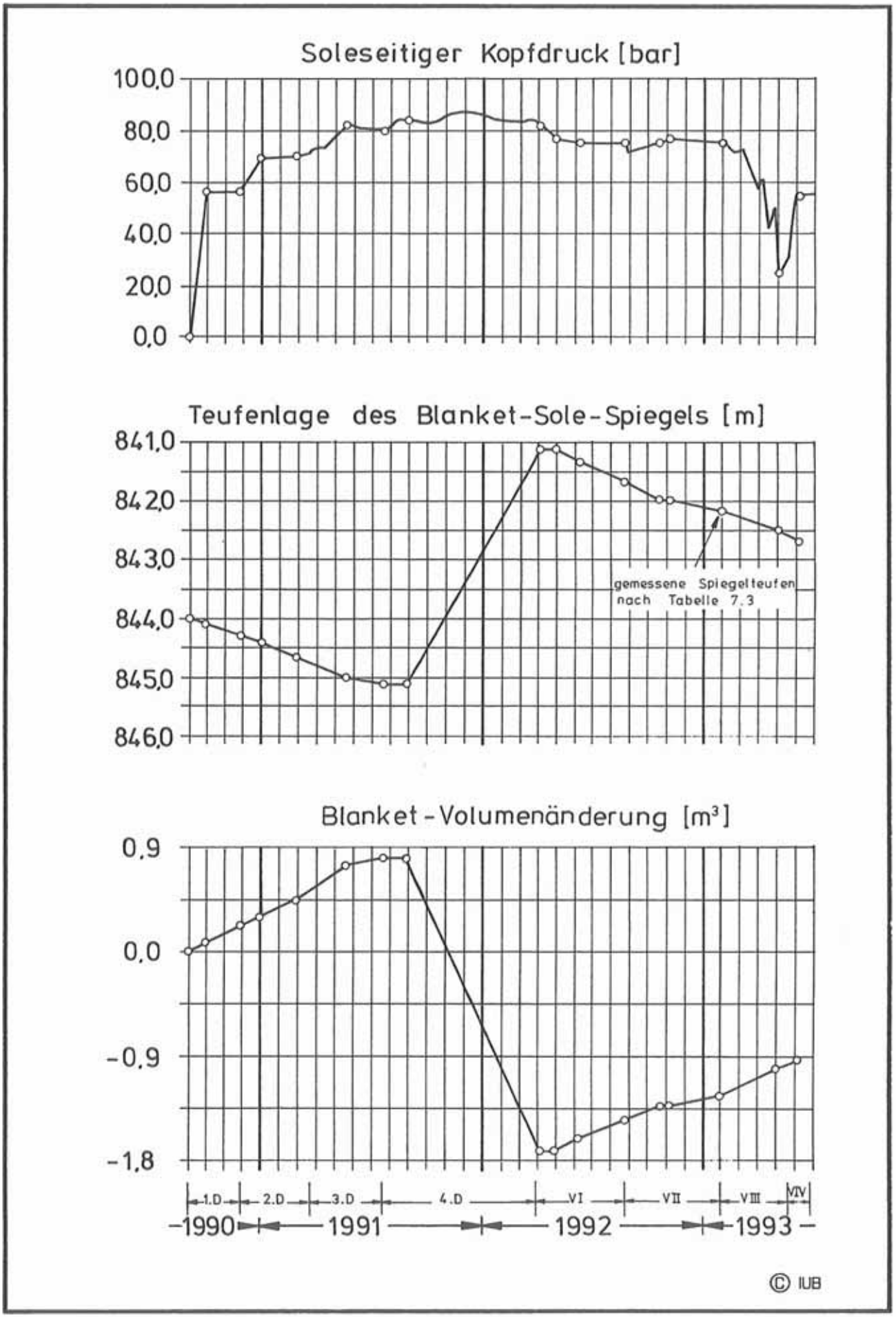
In Tabelle 7.3 sind die innerhalb des Druckaufbautests durchgeführten Messungen des Blanket-Sole-Spiegels mit den festgestellten Teufenlagen und einer Zuordnung zu den einzelnen Druckaufbaustufen bzw. Versuchsphasen aufgeführt.

Tag der Messung	Spiegel-messung	Druckaufbaustufe/Versuchsphase			
Datum	Blanket-Sole-Spiegel [m]				
30.08.1990	844,0				
02.10.1990	844,1	1.			
29.11.1990	844,3				
03.01.1991	844,4		2.		
27.02.1991	844,6				
22.05.1991	845,0			3.	
23.07.1991	845,1				4.
27.08.1991	845,1				
02.04.1992	841,1				
30.04.1992	841,1	I.			
10.06.1992	841,3				
25.08.1992	841,7				
16.10.1992	842,0		II.		
03.11.1992	842,0				
01.02.1993	842,2			III.	
03.05.1993	842,5				IV.
07.06.1993	842,7				

Tabelle 7.3: Spiegelmessungen des Blanket-Sole-Spiegels

Eine Gegenüberstellung zum Verlauf des soleseitigen Kopfdruckes bietet Bild 7.2. Darin ist im unteren Teil eine Auswertung für die aus den Spiegeländerungen resultierenden Volumenänderungen (geometrische Volumenänderung des Blankets) enthalten. Die zahlenmäßige Auswertung hierzu ist für alle Messungen, die während des Druckaufbautests durchgeführt worden sind, in der Tabelle 7.4 zusammengestellt.

Dabei wurde neben der angetroffenen Teufenlage des Blanket-Sole-Spiegels das aus der echometrischen Vermessung des Halsbereichs (Volumenprotokoll) abgeleitete Volumen sowie die Volumenänderung ausgewertet. Bei Volumenänderung (netto) ist die 4 ½"-Steigleitung berücksichtigt worden und darauf aufbauend wurde die Summe der Volumenänderung gebildet.



Entwicklung des Blanket - Sole - Spiegels

Bild 7.2

Datum der Spiegel-messung	Teufe	Volumen (Echo)	Volumen-änderung brutto	Volumen-änderung netto	Summe
	m	dm³	dm³	dm³	dm³
30.08.1990	844,0	2876,9			0,00
			+79,8	+78,77	
02.10.1990	844,1	2956,7			+78,77
			+157,0	+154,95	
29.11.1990	844,3	3113,7			+233,72
			+74,6	+73,57	
03.01.1990	844,4	3188,3			+307,29
			+149,2	+147,15	
27.02.1990	844,6	3337,5			+454,44
			+301,9	+297,80	
22.05.1991	845,0	3639,4			+752,24
			+76,0	+74,97	
23.07.1991	845,1	3715,4			+827,21
			0,00	0,00	
27.08.1991	845,1	3715,5			+827,21
			-2601,4	-2560,36	
02.04.1992	841,1	1114,0			-1733,15
			0,00	0,00	
30.04.1992	841,1	1114,0			-1733,15
			+103,2	+101,15	
10.06.1992	841,3	1217,2			-1632,00
			+182,4	+178,30	
25.08.1992	841,7	1399,6			-1453,70
			+133,3	+130,22	
16.10.1992	842,0	1532,9			-1323,50
			0,00	0,00	
03.11.1992	842,0	1532,9			-1323,50
			+88,4	+86,35	
01.02.1993	842,2	1621,3			-1237,15
			+176,4	+173,32	
03.05.1993	842,5	1797,7			-1063,83
			+123,4	+121,35	
07.06.1993	842,7	1921,1			-942,48

Tabelle 7.4: Auswertung der Volumenänderung durch angetroffene Spiegelteufen (Blanket-Sole-Spiegel)

7.1.4 Entwicklung des N_2-Süßwasser-Spiegels (Technischer Ringraum 7 5/8" - 13 3/8")

Der im technischen Ringraum anstehende Pottaschelösung-Stickstoff-Spiegel ist über den gesamten Versuchszeitraum gemessen worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.5 zusammengestellt. Da keine gravierenden Veränderungen aufgetreten sind, die nicht auf technisch bedingte Versuche zurückgeführt werden konnten (Druckerhöhungen bzw. Temperatureinfluß), kann davon ausgegangen werden, daß sich die Komplettierung über den gesamten Versuchszeitraum als funktionstüchtig und dicht erwiesen hat.

Tag der Messung	Spiegel-messung	Druckaufbaustufe/Versuchsphase			
Datum	N_2-H_2O-Spiegel				
30.08.1990	—				
02.10.1990	33,5	1.			
29.11.1990	32,8/32,5				
03.01.1991	32,90		2.		
27.02.1991	33,0/32,7				
22.05.1991	33,3/33,5			3.	
23.07.1991	33,6/33,0				4.
27.08.1991	34,3				
02.04.1992	33,8				
30.04.1992	33,6	I.			
10.06.1992	33,4				
25.08.1992	33,4/33,4				
16.10.1992	33,4		II.		
03.11.1992	33,4/33,4				
01.02.1993	33,2			III.	
03.05.1993	32,8/33,2				IV.
07.06.1993	33,6/33,6				

Tabelle 7.5: Spiegelmessungen des N_2-Süßwasser-Spiegels

7.2 Gebirgsmechanische Interpretation

Das Ziel des Druckaufbautestes war es, mit Hilfe eines Großversuchs in situ Felddaten und Felderfahrungen zu gewinnen, um damit die Grundlage für ein genehmigungsfähiges Verfahren für den Abschluß von Salzkavernen zu schaffen.

Um einerseits die Druckaufbaurate so gering wie möglich zu halten und andererseits auch die Möglichkeit offen zu lassen, einen Druckgradienten von 0,320 bar/m zu erreichen, wurde der Versuchszeitraum von drei Jahren gewählt.

Aus dem Versuchsverlauf ist das wichtigste Ergebnis, daß oberhalb eines Druckgradienten von ca. 0,220 bar/m bei einer kontinuierlichen Pumprate der Kaverneninnendruck nur bis zu einem Gradienten von 0,226 bar/m gesteigert werden konnte. Der Druckverlauf über Monate zeigte zwei Druckanstiegsphasen und ein dazwischenliegendes relatives Minimum bei etwa 0,220 bar/m. Die oberhalb dieser Druckstufe verpreßte Solemenge betrug ca. 1654 m^3.

Um die Frage beantworten zu können, ob dieses Testergebnis ein zufälliges, atypisches oder unter den gegebenen Randbedingungen repräsentatives, d.h. auf andere Kavernen übertragbares Ergebnis ist, wird im folgenden versucht, die Ergebnisse aus gebirgsmechanischer Sicht zu interpretieren.

Aus der Beobachtung, daß der Innendruck in der 4. Druckaufbaustufe trotz monatelanger Pumpphase nicht mehr gesteigert werden konnte, kann zweifelsfrei gefolgert werden, daß während dieser 4. Druckaufbaustufe das Salzgestein in der Umgebung der Testkaverne undicht geworden ist. Die Ursache hierfür kann prinzipiell entweder in der Bildung von Makrorissen liegen, die sich großflächig weit ins Salzgebirge hinein erstrecken oder in einer Erhöhung der Permeabilität des Salzgesteins im Wandbereich der Kaverne. Um diese belastungsabhängigen Phänomene erklären zu können, ist ein geeignetes Beurteilungskriterium eine notwendige Voraussetzung.

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten, Makrorisse in der Kavernenwand zu erzeugen. Zum einen kann eine Innendruckerhöhung bewirken, daß in vertikaler Richtung oder in Umfangsrichtung Zugspannungen entstehen, die unter Berücksichtigung einer zeitabhängigen Zugfestigkeit Risse erzeugen können. Zum anderen wird angenommen, daß bereits in der Kavernenwand Risse vorhanden sind und in Folge der Druckerhöhung nur erweitert werden. Im letzten Fall hängt der erforderliche Aufreißdruck von den senkrecht zur Rißfläche vorhandenen Spannungskomponenten, der Rißlänge, der Permeabilität, der Porosität und der Bruchzähigkeit des Gesteins ab. Dabei ist die Rißlänge von entscheidender Bedeutung. Je kleiner die Länge angenommen wird, desto höher ist der Druck, der zum Aufreißen des Risses erforderlich ist. Da aus der Kavernenpraxis bekannt ist, daß sich einmal erzeugte Risse im Salzgestein im allgemeinen schnell wieder schließen und verheilen, kann davon

ausgegangen werden, daß, falls offene Risse vorhanden sind, sich diese nur auf den unmittelbaren Randbereich der Kaverne beschränken können.

Die zweite Möglichkeit, das beobachtete Eindringen von Sole zu erklären, beruht auf der Vorstellung, daß infolge des erhöhten Innendruckes an der Kavernenwand Mikrorisse erzeugt werden, die zu einer Erhöhung der Permeabilität führen können. Erstmalig durchgeführte Laboruntersuchungen von FOKKER, KENTER, ROGAAR (1992) [2] zeigen, daß bei bestimmten Belastungsbedingungen zunächst impermeables Salzgestein durchaus permeabel werden kann. Diese Ergebnisse werden von BORGMEIER (1992) [1] qualitativ bestätigt. Darüber hinaus kann die Arbeit von PEACH (1991) [3] herangezogen werden, der ebenfalls das Ansteigen der Permeabilitätswerte bei Laborversuchen durch Mikrorißbildung erklärt. Allerdings sind die Laborversuche von FOKKER, KENTER, ROGAAR unter isotropen Belastungsbedingungen durchgeführt worden, so daß eine Übertragung der Ergebnisse auf die Verhältnisse des Druckaufbautestes nicht ohne weiteres vorgenommen werden kann.

Aus diesem Grunde wird angenommen, daß sich eine Infiltrationszone bilden kann, wenn der Innendruck höher ist als die senkrecht zur Druckrichtung wirkenden Hauptspannungskomponenten. Wenn dieses Beurteilungskriterium auf die Bewertung der Spannungsfelder in der Umgebung der Testkaverne angewendet wird, bedeutet dies, daß für einen bestimmten Innendruck die Werte der Hauptspannungskomponenten σ_φ und σ_3 die Ausbreitung der Infiltrationszonen im Gebirge bestimmen.

Die Berechnung des Sekundärspannungszustandes in der Umgebung der Testkaverne K102 hängt von Annahmen, Voraussetzungen und Parametern ab, die einerseits durch Messungen bekannt sind und andererseits geschätzt werden müssen, weil keine genauen Untersuchungen zur Bestimmung dieser Kennwerte vorliegen.

Die wesentlichen Eingangswerte für die Berechnung der Spannungsfelder sind die Dichten des Deckgebirges und des Salzgestein, der Seitendruckbeiwert K_o und die viskosen Materialkennwerte in Verbindung mit dem Stoffgesetz zur Beschreibung des Kriechverhaltens des Salzgesteins. Darüber hinaus haben die Berücksichtigung der Belastungsgeschichte der Kaverne und insbesondere die Annahmen über das Materialverhalten des Salzgesteins bei einer Entlastung einen entscheidenden Einfluß.

Das Stoffgesetz Lubby2, das hier verwendet wird, ist am Institut für Unterirdisches Bauen entwickelt worden. Es ist ein anerkanntes Stoffgesetz zur mechanischen Beschreibung des viskosen Kriechverhaltens von Steinsalz. Die Materialkennwerte sind aufgrund von Kriechversuchen ermittelt worden, wobei das Kernmaterial aus zwei Bohrungen stammt, die zwar auf dem Salzstock Etzel liegen jedoch nicht im maßgeblichen Einflußbereich der Testkaverne. Die Dichte des Salzgesteins kann mit $\rho = 2{,}188$ g/cm³ angenommen werden.

Da nach erfolgter Druckerhöhung der dritten Druckaufbaustufe in der nachfolgenden Beobachtungsphase ein Druckabfall festzustellen war und während der Druckerhöhungsphase eine abnehmende Tendenz der Druckaufbaurate bei kontinuierlicher Pumpleistung auftrat, wird die untere Grenze des Gebirgsdruckintervalls (im folgenden Gebirgsdruck 1 genannt) im Bereich der Gradientenstufe G = 0,205 bar/m festgelegt. Für diese Gradientenstufe konnte nach erfolgter Druckerhöhung kein Druckabfall in der nachfolgenden Beobachtungsphase gemessen werden. Als Obergrenze wird ein Gebirgsdruck (im folgenden Gebirgsdruck 2 genannt) angesetzt, der bezogen auf die Rohrschuhteufe einem Gradienten von G = 0,2325 bar/m entspricht.

Sämtlichen folgenden Berechnungsbeispielen wird ein Seitendruckbeiwert $K_o = 1{,}0$ zugrunde gelegt, d.h., es wird ein isotroper Primärspannungszustand vorausgesetzt.

Bei der Planung des Druckaufbautests sind die vorgesehenen Druckstufen auf den im Kavernenbau üblichen Gradienten bezogen worden. Für die gewählten Druckaufbaustufen bis zu einem Gradienten von G = 0,235 bar/m sind in der folgenden Tabelle 7.6 die soleseitigen Kopfdrücke sowie die am Rohrschuh und am Kavernendach anstehenden Druckverhältnisse ausgewertet worden.

Darüber hinaus ist eine Aufstellung der notwendigen Druckerhöhungen und die Summe der Druckerhöhungen bezogen auf einen soleseitigen Kopfdruck von Null in der Tabelle 7.6 vorhanden.

G	P_{Sole}	$P_{z_{RS}}$	P_{Dach}	Δp	$\Sigma\Delta p$
Gradientenstufe	Kopfdruck (soleseitig)	Druck in Rohrschuhteufe (827,70 m)	Druck im Kavernendachbereich (850 m)	Druckerhöhung	gesamte Druckerhöhung
[bar/m]	[bar]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,1195	~ 0	9,8910	10,1575	—	—
0,1900	~ 58,4	15,7263	15,9928	5,8353	5,8853
0,2050	~ 70,8	16,9679	17,2343	1,2415	7,0768
0,2200	~ 83,2	18,2094	18,4759	1,2416	8,3184
0,2350	~ 95,6	19,4510	19,7174	1,2415	9,5599

Tabelle 7.6: Druckverhältnisse bezogen auf gewählte Gradientenstufen

Hierbei wurde von einem Solegradienten von $G_{Sole} = 0{,}1195$ bar/m ausgegangen. Im Vergleich zu den ausgewerteten Gradienten aus den soleseitigen Kopfdrücken für den Ver-

suchsverlauf ergeben sich auf dieser Basis geringfügig höhere Kopfdruckwerte, deren Einfluß im Rahmen der folgenden Untersuchungen vernachlässigbar ist.

Vor Beginn des Druckaufbautestes lagen die Kopfdrücke der solegefüllten Testkaverne zwischen Null und 69,5 bar. Um einen einigermaßen wirklichkeitsnahen Ausgangsspannungszustand zu bestimmen, wird in der folgenden Untersuchung angenommen, daß über einen Zeitraum von 1800 Tagen bei einem soleseitigen Kopfdruck von 0 MPa der Innendruck in der Kaverne konstant bleibt. Nach einer derartig langen Zeitdauer kann davon ausgegangen werden, daß der Spannungsumlagerungsprozeß abgeklungen ist und sich ein quasi stationärer Ausgangsspannungszustand eingestellt hat.

Erfahrungen aus Laborversuchen zeigen, daß Salzgestein bei Entlastung ein anderes Kriechverhalten aufweist als in den Belastungsphasen. Je größer die Entlastungsdifferenz ist, desto länger dauert die Phase, in der ein Kriechen des Salzgesteins wieder einsetzt. Darüber hinaus ist bekannt, daß bei Deviatorspannungen unter 5 MPa die Kriechraten sehr klein werden. Entweder sind sie so klein, daß die Meßgenauigkeit der Prüfinstrumente nicht ausreicht, die Werte zu erfassen, oder die Zeit, in der ein meßbares Kriechen registriert werden könnte, ist zu kurz. Im Hinblick auf die Übertragung dieser Erfahrungen auf die Verhältnisse während des Druckaufbautestes wird daher angenommen, daß während der Druckerhöhung ein elastisches Materialverhalten des Salzgesteins den Berechnungen zugrunde gelegt werden kann.

Im Hinblick auf das angestrebte Ziel, nämlich das Testergebnis auf die Verhältnisse anderer Kavernen mit anderen geologischen Randbedingungen übertragen zu können, wurde nicht die tatsächlich vorhandene geometrische Form im Berechnungsmodell simuliert, sondern die umhüllende Konfiguration mit einem entsprechend größeren Radius von 35 Metern und einer idealen Dachform. Ein weiterer Grund für die Abweichung von der tatsächlichen Form liegt darin, daß sich die bisherigen und auch zukünftig für die Genehmigungsbehörde maßgebenden Aussagen über die Standsicherheit, die Konvergenz und die Sicherheit gegen Aufreißen bzw. gegen den Verlust der Gebrauchsfähigkeit auf eine Kaverne beziehen, deren geometrische Form stets der Umhüllenden der tatsächlich gesolten Kavernenform entspricht.

Aufgrund der geringen Porosität des Salzgesteins in situ ist der Einfluß des Porendruckes auf die Spannungsverteilung im Salzgebirge vernachlässigbar. Darüber hinaus kann bei Belastungszuständen, die mehrere Jahre dauern, nicht davon ausgegangen werden, daß das Salzgestein eine Zugfestigkeit besitzt.

In den Bildern 7.3 bis 7.5 sind die Hauptspannungskomponenten σ_φ, σ_1 und σ_3 des Ausgangsspannungszustandes unter Zugrundelegung einer relativ niedrigen Deckgebirgsdichte (Gebirgsdruck 1) dargestellt. Die folgenden Bilder 7.6 bis 7.8 geben die Hauptspannungsfelder wieder, wenn eine relativ hohe Deckgebirgsdichte (Gebirgsdruck 2) im Berech-

nungsmodell angenommen wird. Sämtliche Darstellungen zeigen, daß an jeder Stelle im Gebirge im Einflußbereich der Kaverne die kleinste Hauptspannungskomponente betragsmäßig größer ist als 14 MPa. Um im Wandbereich Zugspannungen zu erzeugen, müßte der Innendruck um mindestens diesen Betrag erhöht werden. Tatsächlich betrug die Druckerhöhung nur ca. 9 MPa, so daß für beide angenommenen Deckgebirgsdichten ein Aufreißen des Salzgesteins aufgrund von Zugspannungen ausgeschlossen werden kann.

7.3 Berechnungsergebnisse und Schlußfolgerung

In den Bildern 7.9 bis 7.12 sind für einen Innendruck, der in der Teufe des Rohrschuhs einem Gradienten von 0,220 bar/m entspricht, die Differenzen dargestellt, die sich ergeben, wenn von den Hauptspannungskomponenten der der Teufenlage entsprechende Innendruck subtrahiert wird. Die Spannungskomponente σ_φ ist in jedem Fall Hauptspannung, da ein rotationssymmetrischer Spannungszustand vorliegt. Die Hauptspannungskomponente σ_3 ist im Dachbereich überwiegend senkrecht zum radial wirkenden Innendruck ausgebildet, im höher gelegenen Schwebenbereich entspricht sie überwiegend der horizontalen Komponente des Spannungstensors, während sie im zylindrischen Teil der Kaverne der vertikalen Komponente entspricht. Die zeichnerische Darstellung erfolgt in Form von Linien gleicher Spannungsdifferenz, so daß die Zonen, in denen der Innendruck um 1, 2 oder 3 MPa höher liegt als die jeweils vorhandene Hauptspannungskomponente, zu erkennen sind. Zusätzlich erfolgt eine flächenhafte Darstellung dieser Spannungsdifferenzen.

Bei dem Gebirgsdruck 1, der bei einer angenommenen Deckgebirgsdichte von $\rho = 2{,}06\ g/m^3$ mit 0,204 bar/m im Bereich der Gradientenstufe G = 0,205 bar/m liegt, sind die Hauptspannungskomponenten im gesamten Schwebenbereich einige MPa niedriger als der Innendruck. Die Nullinie kennzeichnet dabei den Übergang zu einer Gebirgszone, in der die maßgebenden Hauptspannungskomponenten größer sind. Wenn das o.g. Beurteilungskriterium zugrunde gelegt wird, ist eine Infiltration der Sole nicht auf einen begrenzten, nahe der Kavernenwand befindlichen Bereich beschränkt, sondern bis zum Deckgebirge kann rechnerisch keine Zone ermittelt werden, die ein Eindringen der Sole verhindern könnte. Dieses Berechnungsergebnis steht in keinem Widerspruch zum Testergebnis.

Da der primäre Gebirgsdruck allerdings noch nicht bekannt ist und im vorgenannten Beispiel der Wert wahrscheinlich zu niedrig angenommen wurde, wird in einem zweiten Beispiel unter Beibehaltung sämtlicher anderer Parameter der Gebirgsdruckgradient auf 0,233 bar/m (Gebirgsdruck 2) erhöht. Die flächenhafte Darstellung der Spannungsdifferenzen sowie die entsprechenden Isolinien sind in den Bildern 7.13 bis 7.16 dargestellt. Sie zeigen eine Reduzierung der Zonen, in denen der Innendruck höher liegt als die jeweilige Hauptspannungskomponente. Der wesentliche Unterschied im Ergebnis zum vorangegangenen Beispiel liegt darin, daß im Schwebenbereich Zonen ermittelt werden, in denen die Hauptspannungskomponenten größer sind als der Innendruck. Diese beginnen erst in einer bestimmten Entfernung hinter der Kavernenwand. Das Berechnungsergebnis steht ebenfalls nicht im Widerspruch zu der Beobachtung, daß oberhalb eines Druckgradienten von 0,220 bar/m eine wesentliche Druckerhöhung nicht mehr erreicht werden konnte.

Da bei der 2. Druckstufe entsprechend dem Druckgradienten von 0,205 bar/m der Druck über die Beobachtungsphase nicht abgefallen war, wird in einem dritten Beispiel unter Zu-

grundelegung des höheren Gebirgsdruckes 2 (0,233 bar/m) der Spannungszustand im Salzgebirge bei einem Innendruck, der bezogen auf die Rohrschuhteufe einem Gradienten von 0,205 bar/m entspricht, ermittelt. Die Bilder 7.17 bis 7.20 zeigen in der gleichen Darstellungsform auch bei dieser Druckstufe das Vorhandensein von Infiltrationszonen im Kavernenwandbereich. Sie sind zwar wesentlich kleiner als im vorangegangenen Beispiel, aber dennoch vorhanden. Dieses Berechnungsergebnis steht im Widerspruch zum Testergebnis, wenn die beobachtete Druckkonstanz bei dieser Druckstufe bedeutete, bei dem ermittelten Spannungszustand dürften keine Infiltrationszonen auftreten.

Da im letzten Beispiel keine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen einem Teilergebnis des Druckaufbautestes und der numerischen Untersuchung erzielt werden konnte, stellt sich die Frage, welchen Einfluß die viskosen Materialparameter auf den Sekundärspannungszustand haben.

Daher wird im folgenden Beispiel angenommen, daß das viskose Verformungsverhalten des Salzgesteins einem Material mit einem wesentlich höheren Kriechverhalten entspricht als das bisher angenommene. Die Materialdaten liegen innerhalb unseres Erfahrungsbereichs.

In den Bildern 7.21 bis 7.24 sind die Infiltrationszonen dargestellt, die sich bei dem höheren primären Gebirgsdruck 2 und einem Innendruckgradienten von 0,220 bar/m ergeben. Der Einfluß ist vernachlässigbar gering, wie der Vergleich zu den Bildern 7.13 bis 7.16 erkennen läßt. Der Grund liegt darin, daß die unterschiedlichen Parameter nur den Ausgangsspannungszustand beeinflussen. Die Simulation der anschließenden Druckerhöhung auf die jeweilige Innendruckstufe erfolgt unter der Annahme eines elastischen Verhaltens und ist somit von der Wahl der viskosen Parameter unabhängig.

Da der Einfluß vernachlässigbar ist, werden in den folgenden Untersuchungen die bisherigen Materialkennwerte beibehalten.

Um den Einfluß des Primärspannungszustandes auf den Sekundärspannungszustand in der Umgebung der Kaverne wirklichkeitsnäher erfassen zu können, wird im 5. Beispiel ein aus unserer Sicht mittlerer Wert angenommen, der sich dadurch ergibt, daß für das Deckgebirge eine Dichte von $\rho = 2{,}15$ g/cm³ (entspricht einem Gradienten von $G = 0{,}2115$ bar/m) gewählt wird. Dieser Gebirgsdruck wird im folgenden mit Gebirgsdruck R bezeichnet. Für einen Innendruckgradienten von 0,220 bar/m sind die entsprechenden Spannungsdifferenzen in den Bildern 7.25 bis 7.28 dargestellt. Erwartungsgemäß werden sowohl im oberen Dachbereich der Kaverne als auch im oberen Schwebenbereich Infiltrationszonen berechnet. Da bereits im dritten Beispiel unter Zugrundelegung des Gebirgsdruckes 2 bei einem Innendruckgradienten von 0,205 bar/m Infiltrationszonen am Kavernenrand berechnet wurden, kann davon ausgegangen werden, daß bei der Annahme des niedrigeren Gebirgsdruckes R vergrößerte Infiltrationszonen ermittelt werden. Der oben genannte Widerspruch bleibt somit bestehen.

Da der Druckaufbautest über drei Jahre gedauert hat, kann ein gewisser Einfluß des Kriechens des Salzgesteins nicht ausgeschlossen werden. Es wird daher im 6. Beispiel - ausgehend von einem Kopfdruck von p_{ks} = 0 MPa - der Druck kontinuierlich innerhalb von 30 Tagen auf eine Gradientenstufe von 0,205 bar/m erhöht und angenommen, daß während dieser Phase und einem anschließenden Zeitraum von zwei Jahren das Kriechverhalten des Salzgesteins mit den aus Belastungsversuchen ermittelten Parametern und dem Stoffgesetz Lubby2 simuliert werden kann. Nur in der letzten Stufe von 0,205 auf 0,220 bar/m wird elastisches Verhalten angenommen, da diese geringe Druckdifferenz die Annahme eines viskosen Materialverhaltens nicht gerechtfertigt erscheinen läßt. Die Infiltrationszonen und die entsprechenden Isolinien sind in den Bildern 7.29 bis 7.32 dargestellt. Es zeigt sich deutlich, daß sich diese Annahme zum Materialverhalten nur unterhalb des Kavernendaches auswirkt. Im gesamten Schwebenbereich kann jedoch nach wie vor keine Zone ermittelt werden, in der die maßgebenden Hauptspannungskomponenten größer sind als der Innendruck. Dieses Berechnungsergebnis steht nicht im Widerspruch zum Testergebnis.

Wenn bei diesem Beispiel der Spannungszustand im Salzgebirge bei der Gradientenstufe von 0,205 bar/m betrachtet wird (die letzte Druckerhöhung auf einen Gradienten von 0,220 bar/m wird nicht simuliert), so zeigt sich, daß die Annahme eines viskosen Materialverhaltens einen nicht unwesentlichen Einfluß auf die Ausbreitung der Infiltrationszonen hat. Wie in den Bildern 7.33 bis 7.36 zu erkennen ist, sind sie jetzt nur noch im unmittelbaren Dachbereich vorhanden und deutlich kleiner als in dem Fall, bei welchem ein elastisches Materialverhalten während der Druckerhöhung angenommen wird.

Obwohl das Ergebnis der numerischen Berechnung mit der Beobachtung übereinstimmt, kann die Berechnung nicht als Bewertungsgrundlage herangezogen werden, da aufgrund der verwendeten Materialparameter aus unserer Erfahrung das Kriechverhalten des Salzgesteins bei derartig niedrigen Deviatorspannungen überschätzt wird. Daher bleibt der Widerspruch zwischen einer theoretisch ermittelten Infiltrationszone bei dem Druckgradienten 0,205 bar/m und der beobachtenden Druckkonstanz bei dieser Druckstufe bestehen.

Wenn man allerdings die Belastungsgeschichte der Testkaverne K102 vor Beginn des Druckaufbautestes betrachtet, fällt auf, daß der Innendruck 1988 bei der vollständig mit Sole gefüllten Kaverne einen Wert erreicht hatte, der bezogen auf die Rohrschuhteufe einem Gradienten von 0,205 bar/m entspricht. Das Salzgestein in der Umgebung der Kaverne ist bereits vor Versuchsbeginn in gleicher Weise beansprucht worden. Es kann daher davon ausgegangen werden, daß sich bei dem erstmaligen Anfahren auf dieses Druckniveau eine Infiltrationszone gebildet hat. Im März 1988, also im darauffolgenden Monat, ist der Kopfdruck auf 0 MPa abgesenkt worden.

Die Beobachtungen aus den Druckabsenkungsphasen des Druckaufbautestes lassen den Schluß zu, daß bei einer Druckstufe, bei der Sole ins Salzgestein eingepreßt wurde, nur ein Teil dieser Sole nach einer Druckabsenkung auch wieder in die Kaverne zurückfließt. Der überwiegende Teil bleibt im Gebirge. Wenn der Innendruck wiederum auf den vorigen Wert erhöht wird, ist bereits eine Infiltrationszone geschaffen worden. Ein weiteres Eindringen kann erst erfolgen, wenn der Innendruck über dieses Maß hinaus gesteigert wird.

Unter Berücksichtigung der Vorgeschichte der Testkaverne besteht daher kein Widerspruch zwischen den Ergebnissen der numerischen Untersuchungen und der Beobachtung, daß der Innendruck bei der Druckstufe 0,205 bar/m konstant blieb.

Den anschließenden Untersuchungen wird der Gebirgsdruck R (Deckgebirgsdichte $\rho = 2{,}15$ g/cm³) zugrunde gelegt. Ohne Berücksichtigung des Kriechverhaltens des Salzgesteins in der Druckaufbauphase ergeben sich für die Druckgradientenstufe 0,205 bar/m die in den Bildern 7.37 bis 7.40 dargestellten Infiltrationszonen. Sie sind zwar in der Kavernenwand deutlich ausgeprägt, jedoch können außerhalb dieser Infiltrationszonen Bereiche ermittelt werden, in denen ein Eindringen von Sole theoretisch ausgeschlossen werden kann. Zum Vergleich sind die Infiltrationszonen im folgenden Berechnungsbeispiel unter Beibehaltung aller übrigen Parameter und Annahmen die Druckerhöhung bis zu einer Gradientenstufe von 0,190 bar/m berechnet worden. Wie in den Bildern 7.41 bis 7.44 zu erkennen ist, sind diese wesentlich kleiner und nur auf den unmittelbaren Kavernenwandbereich beschränkt. Die Kaverne ist trotzdem als technisch dicht zu betrachten.

Die hier vorgestellten Ergebnisse stehen nicht im Widerspruch zu den praktischen Erfahrungen, daß bei den bisher zugelassenen Maximaldrücken die Salzkavernen dicht sind und ihre Gebrauchsfähigkeit als Untergrundspeicher erfolgreich nachgewiesen werden konnte. Allerdings kann nicht in jedem Fall davon ausgegangen werden, daß die Dichtheitszone direkt an der Kavernenwand beginnt, sondern je nach Belastungsgeschichte und projektspezifischen Randbedingungen kann diese Zone erst in einiger Entfernung vom Kavernenrand im Gebirge anfangen.

Für die Übertragung der Schlußfolgerung aus dem Druckaufbautest auf andere Kavernen ist die Frage zu beantworten, ob bei einem Innendruck, der bezogen auf die Rohrschuhteufe dem Gebirgsdruck entspricht, eine die Kaverne umhüllende Gebirgszone berechnet werden kann, in der ein Eindringen von Sole mit ausreichender Sicherheit auszuschließen ist. Dieser Nachweis ist aus ingenieurmäßiger Sicht unter Berücksichtigung ungünstiger Parameterkombinationen und wirklichkeitsnaher Annahmen und Voraussetzungen zu führen. Die besondere Schwierigkeit in der Beantwortung dieser Frage liegt zweifellos in der Problematik, inwieweit eine ausreichende Sicherheit gegen den Verlust der Dichtigkeit definiert werden kann.

Zum jetzigen Zeitpunkt kann der Primärspannungszustand höchstens mit einer Genauigkeit von einigen Prozent ermittelt werden. Die Berechnung des Spannungszustandes im Salzgebirge in der Umgebung der Kaverne ist eine Näherungslösung, wobei die Abweichung von einer exakten Lösung nicht quantifiziert werden kann, da aufgrund der mathematisch komplizierten Materialgesetze und der komplexen Berechnungsmodelle eine exakte Lösung nicht existiert. Darüber hinaus gibt es z.Z. keine allgemein anerkannten Modellvorstellungen, mit deren Hilfe sich die Mikrorißbildung widerspruchsfrei erklären ließe. Aus phänomenologischer Sicht ist es daher notwendig, wenn das o.g. Beurteilungskriterium herangezogen werden soll, daß für den Fall einer endverschlossenen Kaverne Gebirgsbereiche um die Kaverne nachgewiesen werden können, in denen die maßgebende Hauptspannungskomponente um einige MPa größer ist als der zu erwartende auftretende Innendruck.

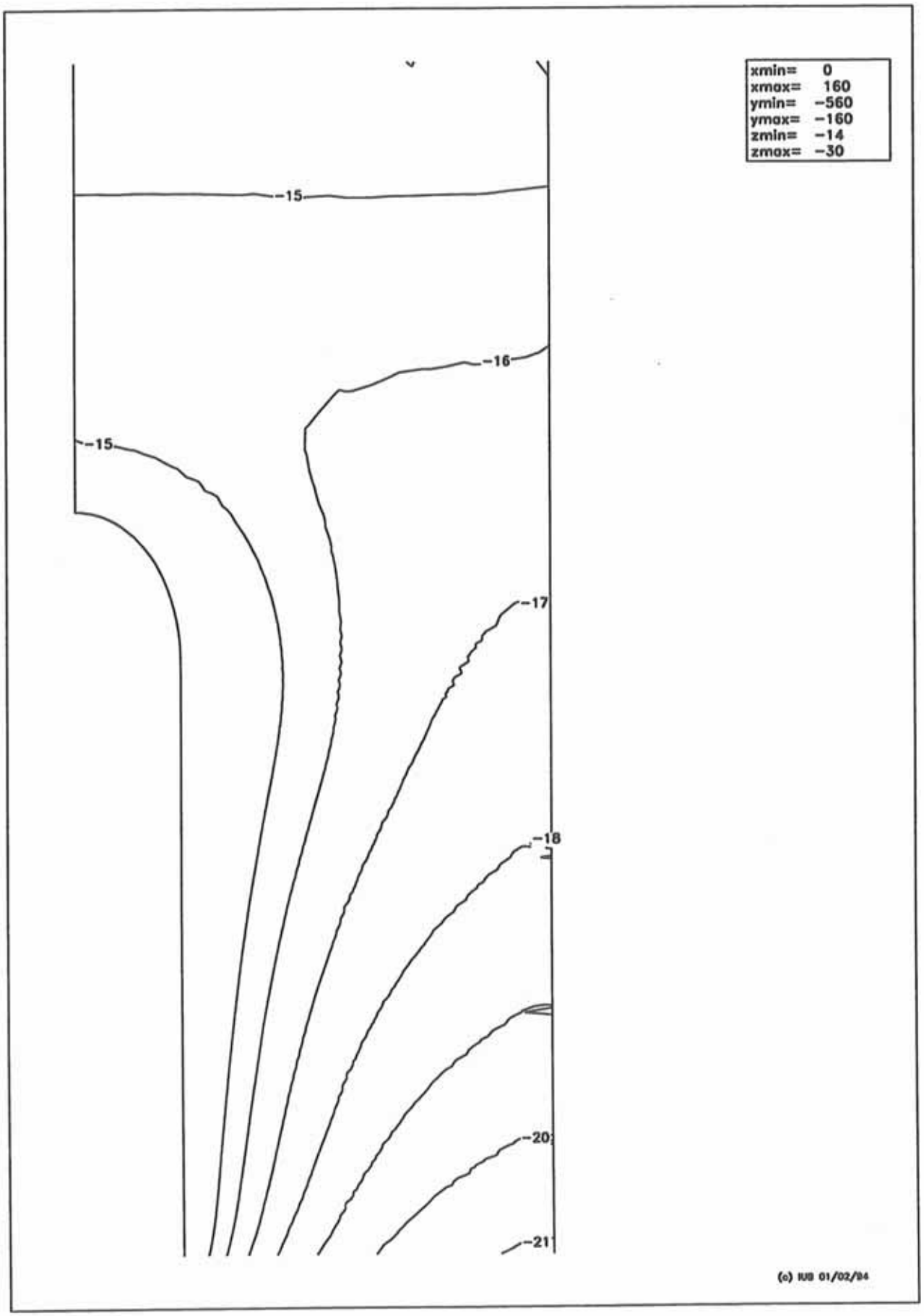
Aus diesem Grunde ist in den folgenden Berechnungsbeispielen der Spannungszustand ermittelt worden, der sich bei einem Druckaufbau über einen Zeitraum von 100 Jahren im Salzgestein einstellt, wenn der Innendruck auf eine Druckgradientenstufe steigt, die bezogen auf die Rohrschuhteufe der Gradientenstufe des Gebirgsdruckes 1 entspricht. Der Zeitraum von 100 Jahren ist gewählt worden, um einen quasi stationären Spannungszustand zu erreichen. Während der Druckaufbauphase wird angenommen, daß das Kriechverhalten auch in dieser Phase mit dem Stoffgesetz Lubby2 beschrieben werden kann. Es wird also nicht ausgeschlossen, daß sich die Spannungsdifferenzen durch das Kriechverhalten des Salzgesteins im Laufe der Zeit verringern.

Die in den Bildern 7.45 bis 7.47 dargestellten Hauptspannungskomponenten zeigen, daß oberhalb der Kaverne der Spannungsumlagerungsprozeß abgeschlossen ist, durch das Kriechverhalten des Salzgesteins sich die Spannungsdifferenzen abgebaut haben und der Primärspannungszustand in diesem Bereich wieder erreicht wird. Dies gilt nicht für den zylindrischen Teil der Kaverne, da nach wie vor die Druckdifferenz zwischen dem Gebirgsdruck und dem Innendruck in der Kaverne existiert. Aufgrund dieser numerischen Untersuchungen ist davon auszugehen, daß sich bei sehr langsamem Druckaufbau bis zu einem Wert, der im Dachbereich der Kaverne dem Gebirgsdruck entspricht, der primäre Spannungszustand im Schwebenbereich wieder einstellt. Die entsprechenden Spannungsdifferenzen sind in den Bildern 7.48 bis 7.53 dargestellt. Jede weitere Druckerhöhung erzeugt im Dachbereich der Kaverne Zonen, in denen die maßgebenden Hauptspannungskomponenten kleiner sind als der Innendruck. Die Sole kann in den Dachbereich infiltrieren. Wegen der Dichteunterschiede zwischen dem Salzgestein und der Sole wächst die Druckdifferenz in Richtung des Deckgebirges, so daß bei konstantem Innendruck das Eindringen in vertikaler Richtung immer weniger behindert wird.

Um den Einfluß der Deckgebirgsdichte auf dieses Ergebnis abschätzen zu können, wird im folgenden Beispiel der Berechnung der Gebirgsdruck 2 zugrunde gelegt. In den Bildern 7.54 bis 7.56 sind die Hauptspannungskomponenten und in den Bildern 7.57 bis 7.62 sind die Spannungsdifferenzen dargestellt. Da sich auch hier der Primärspannungszustand im Dachbereich wieder einstellt, kann gefolgert werden, daß bei jeder weiteren Druckerhöhung Sole in den Schwebenbereich eindringen kann.

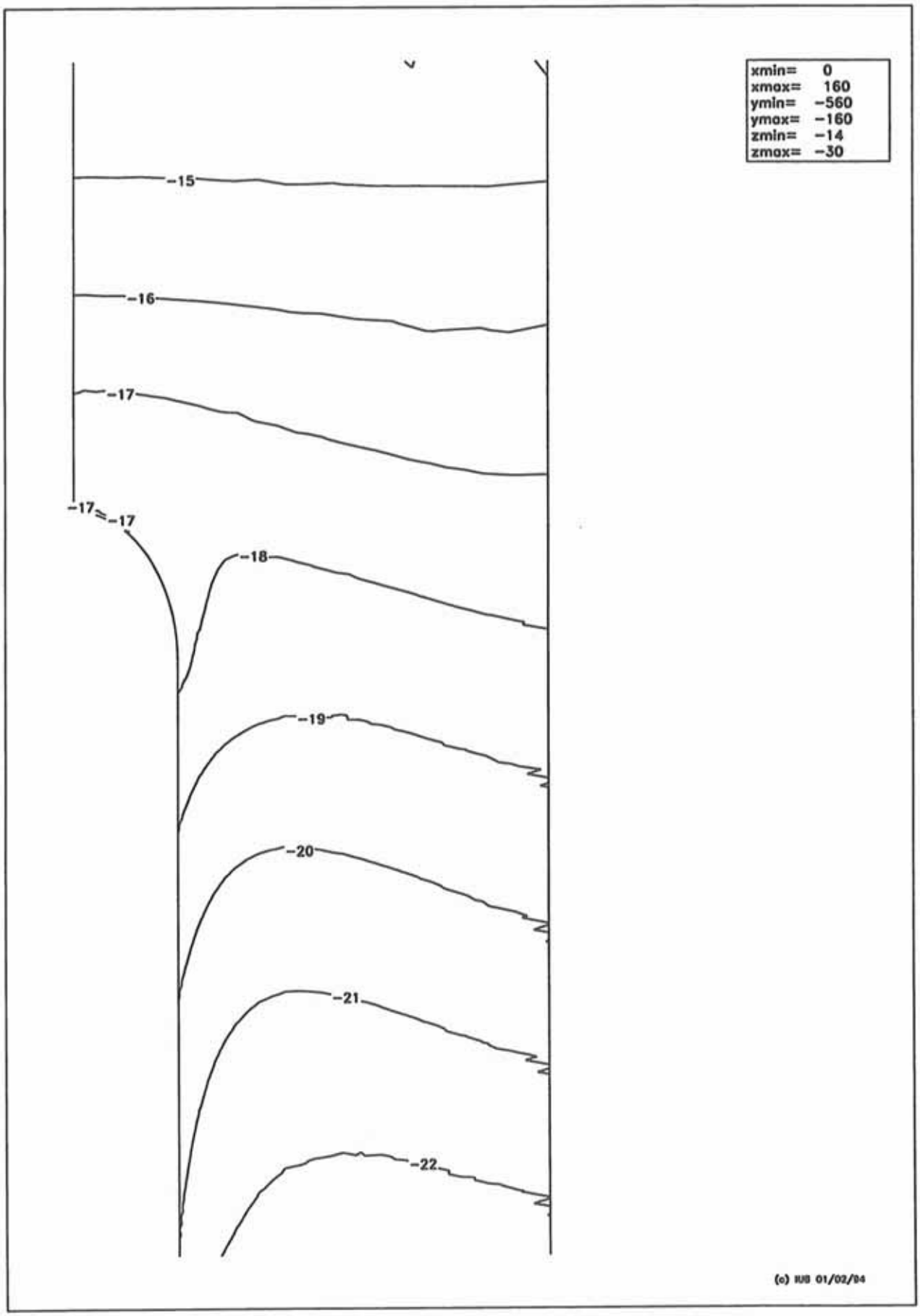
In den letzten beiden Beispielen wird ein Spannungszustand berechnet, der sich ergibt, wenn sich nach 100 Jahren der Druckaufbau weiter fortsetzte. Es wird weiterhin angenommen, daß die Druckerhöhung bezogen auf den Innendruck in Rohrschuhteufe 3,5 bar beträgt. Die maßgebenden Spannungsdifferenzen nach 105 Jahren zeigen, daß im gesamten Schwebenbereich Infiltrationszonen ermittelt werden (Bilder 7.63 bis 7.68). Im letzten Beispiel werden die Spannungsdifferenzen nach 110 Jahren und einer weiteren Innendruckerhöhung um 3,5 bar berechnet. Wie aus den Bildern 7.69 bis 7.74 hervorgeht, erstrecken sich die Infiltrationszonen in diesem Fall über den gesamten oberen Kavernenbereich.

Es soll an dieser Stelle betont werden, daß sich die Ergebnisse der letzten Beispiele nur ergeben, wenn für Salzgestein keine Kriechgrenze bzw. Fließspannung angenommen wird. Es entspricht dem derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand, daß von einigen Fachleuten eine Kriechgrenze von ca. 1 MPa vermutet wird, jedoch bis heute kein allgemein anerkanntes Verfahren vorliegt, in welcher Weise diese zuverlässig gemessen oder berechnet werden könnte. Im Hinblick auf die Notwendigkeit, eine Dichtheitszone mit ausreichender Sicherheit für den Endzustand nachzuweisen, muß daher davon ausgegangen werden, daß es keine Kriechgrenze für Salzgestein gibt. Dies bedeutet gleichzeitig, daß das Ergebnis der theoretischen Untersuchungen nicht von projektspezifischen Kriechparametern abhängt, da diese nur den Zeitraum beeinflussen können, wann der primäre Spannungszustand oberhalb der Kaverne erreicht wird. Somit kann auf der Grundlage der Ergebnisse des Druckaufbautestes in Verbindung mit den vorgelegten theoretischen Untersuchungen nur die Schlußfolgerung gezogen werden, daß bei endverschlossenen flüssigkeitsgefüllten Kavernen Flüssigkeit in den Schwebenbereich eingepreßt wird, wobei der Zeitraum noch nicht bestimmt werden kann.



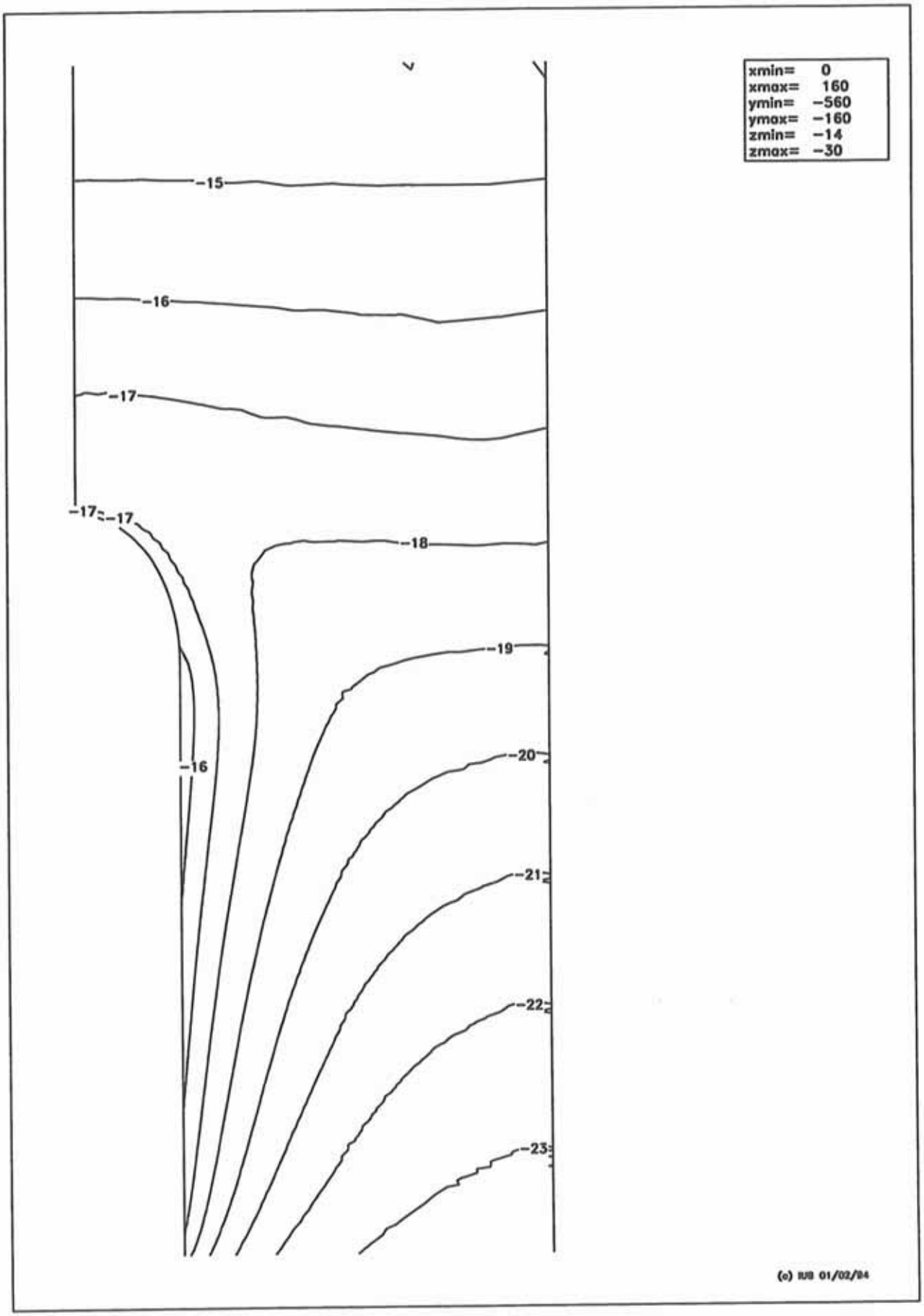
Ausgangszustand Versuchsbeginn – Kopfdruck 0 MPa – Gebirgsdruck 1 – Material 1
Hauptspannung 1

Bild 7.3



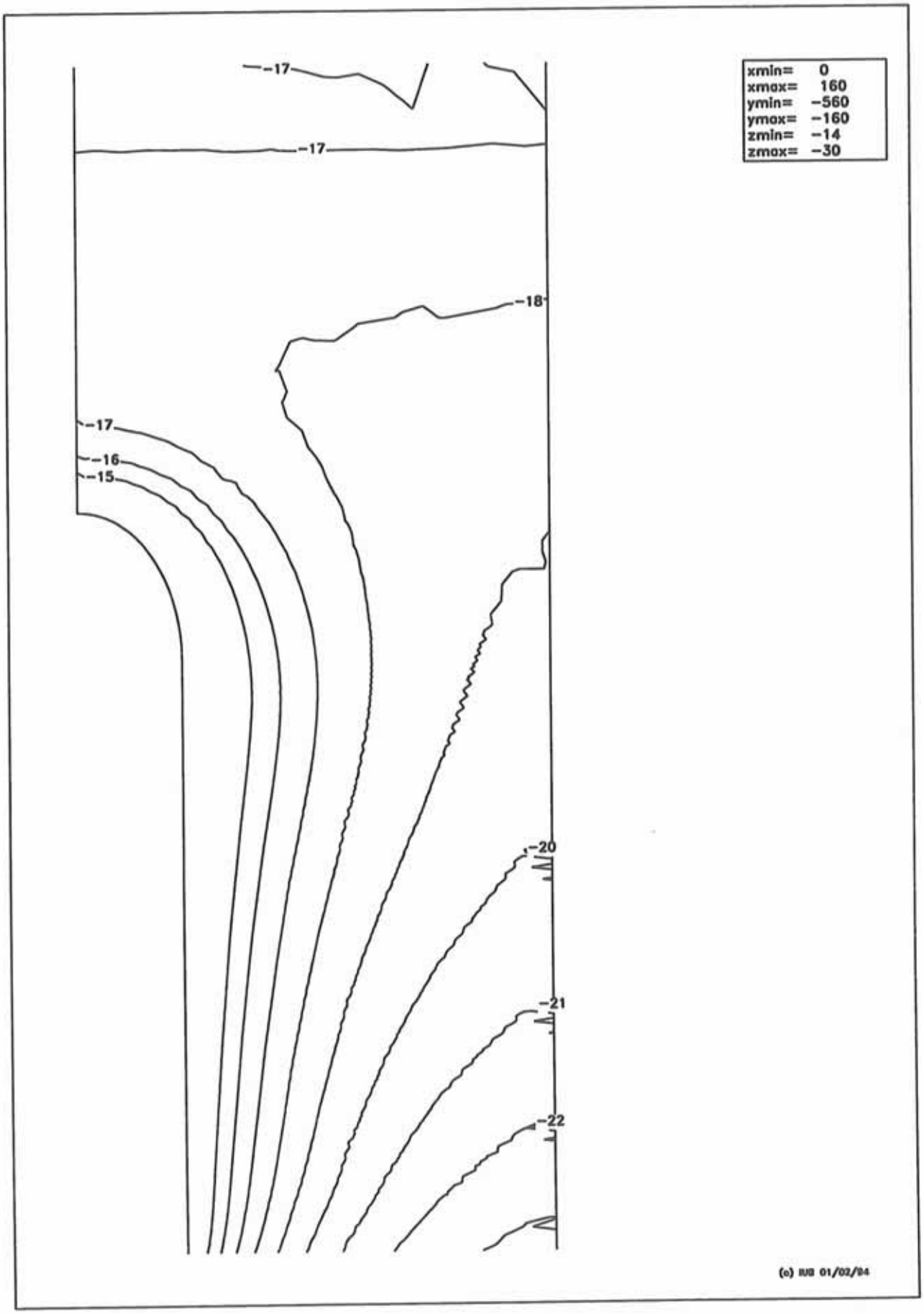
Ausgangszustand Versuchsbeginn– Kopfdruck 0 MPa – Gebirgsdruck 1 – Material 1
Hauptspannung Phi

Bild 7.4



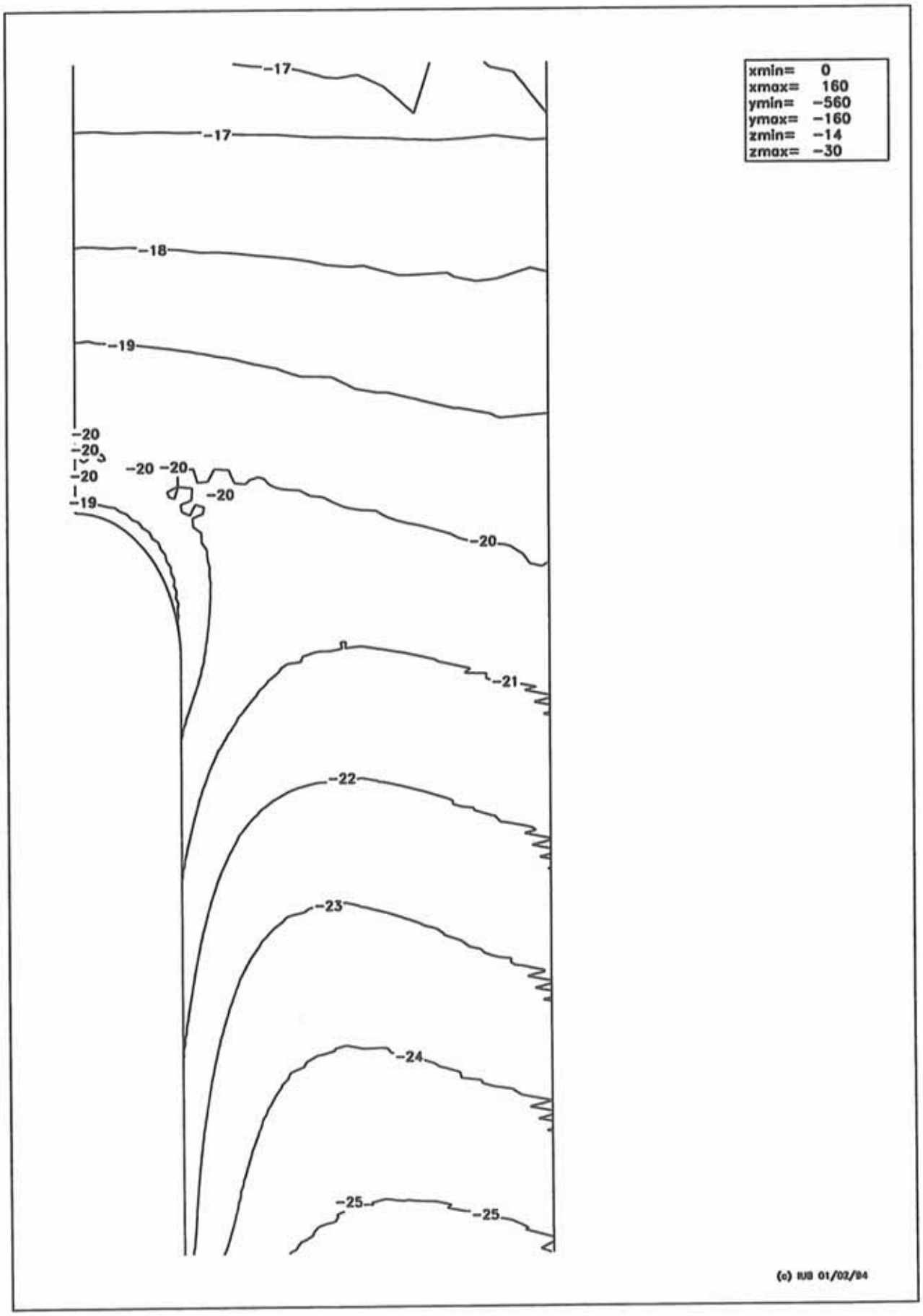
Ausgangszustand Versuchsbeginn – Kopfdruck 0 MPa – Gebirgsdruck 1 – Material 1
Hauptspannung 3

Bild 7.5



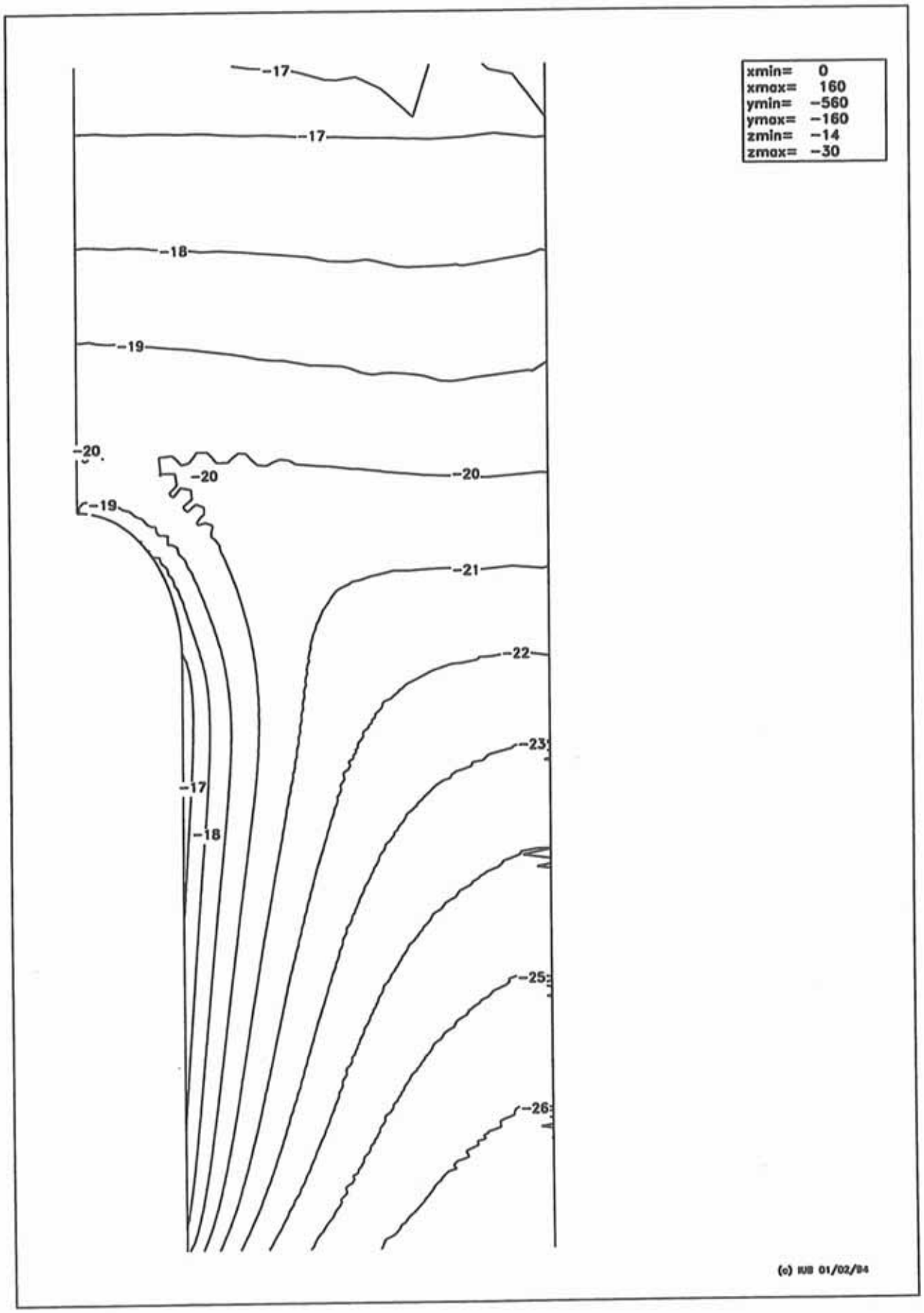
Ausgangszustand Versuchsbeginn – Kopfdruck 0 MPa – Gebirgsdruck 2 – Material 1
Hauptspannung 1

Bild 7.6



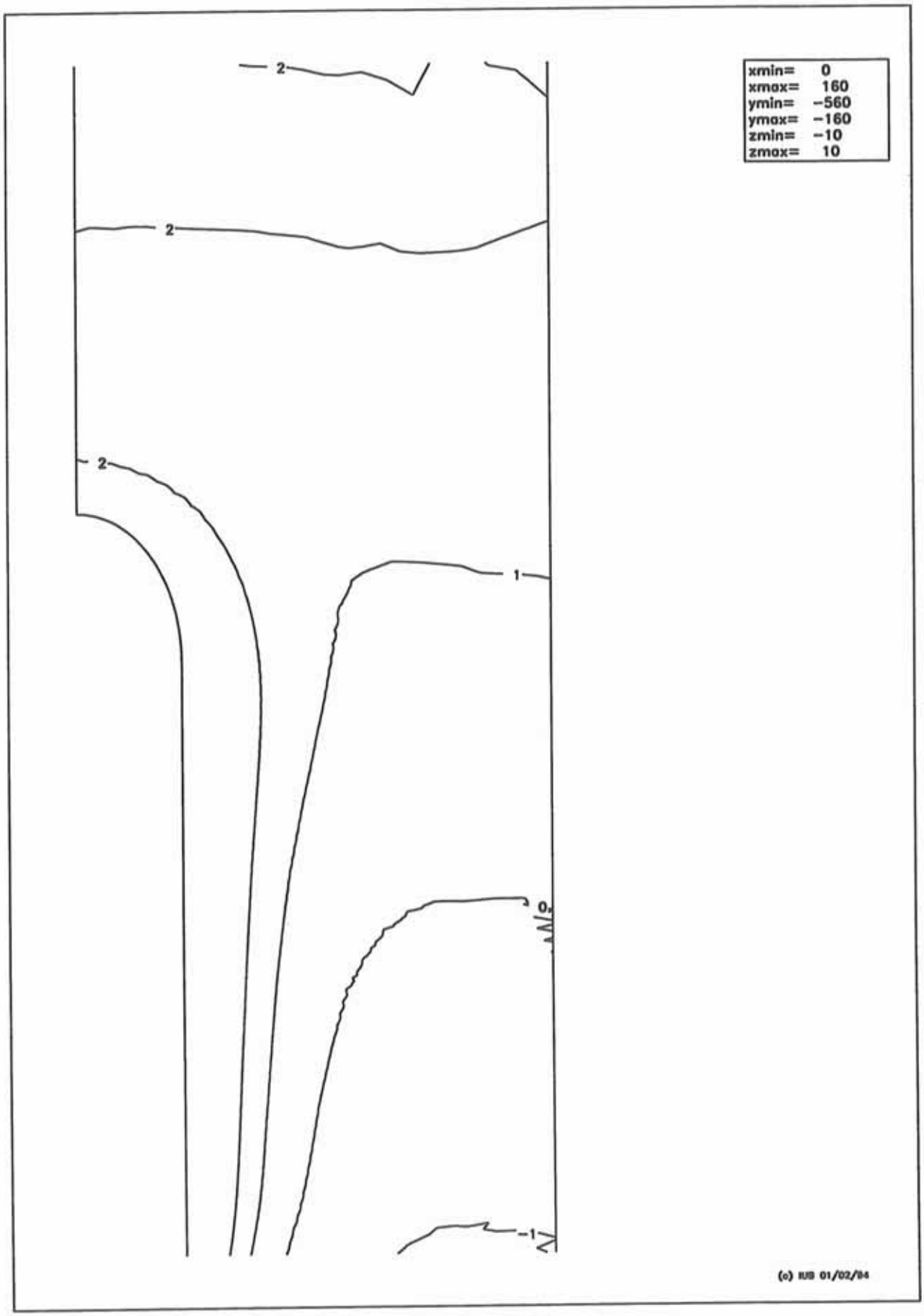
Ausgangszustand Versuchsbeginn – Kopfdruck 0 MPa – Gebirgsdruck 2 – Material 1
Hauptspannung Phi

Bild 7.7



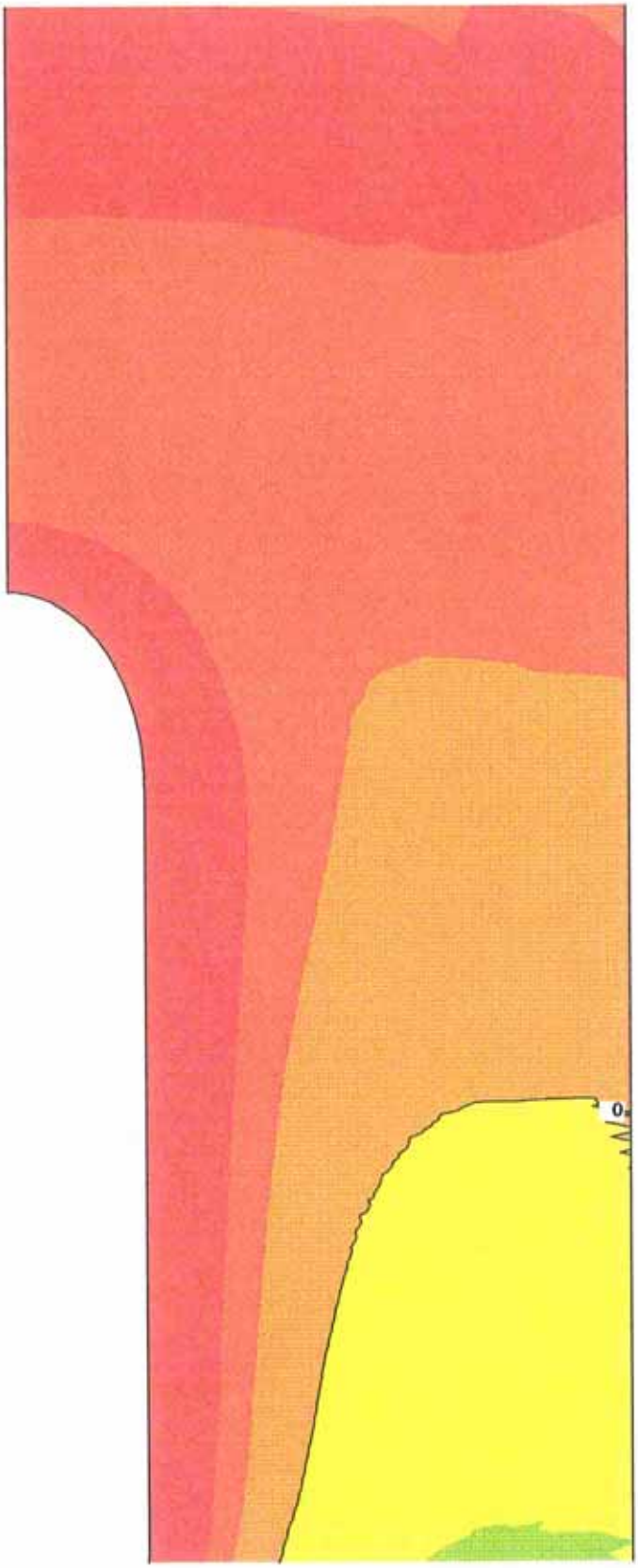
Ausgangszustand Versuchsbeginn – Kopfdruck 0 MPa – Gebirgsdruck 2 – Material 1
Hauptspannung 3

Bild 7.8



Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 1 – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.9



xmin= 0
xmax= 160
ymin= −560
ymax= −160
zmin= −10
zmax= 10

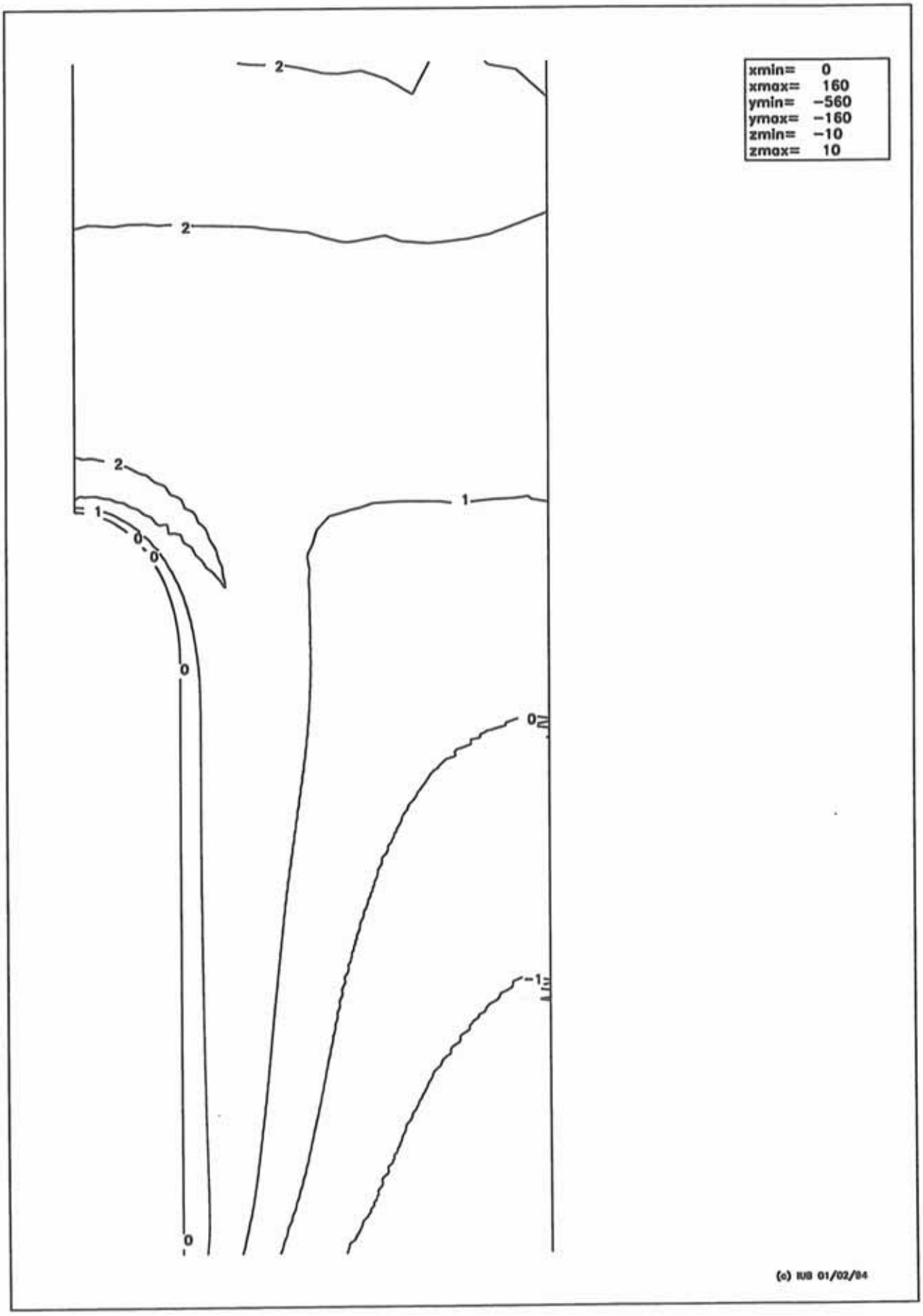
Legende

−4
−3
−2
−1
0
1
2

(c) IUB 01/02/94

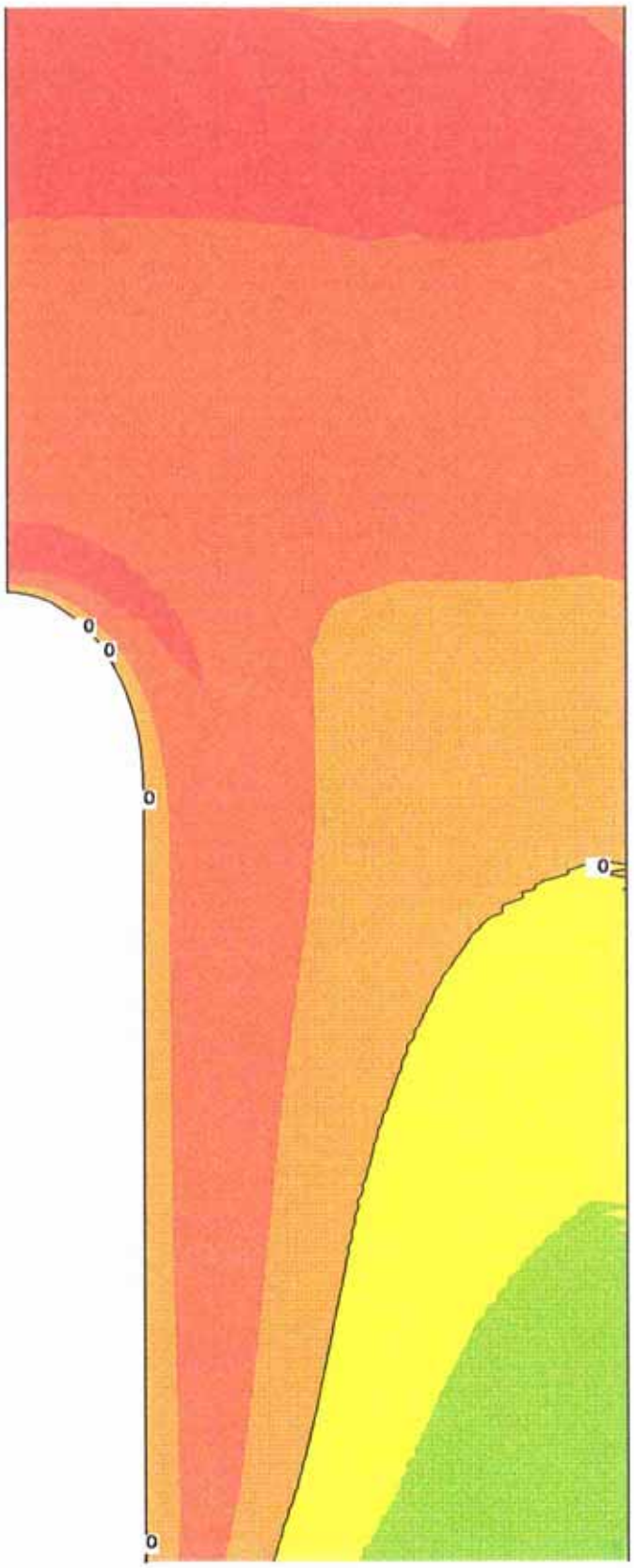
Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 1 – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.10



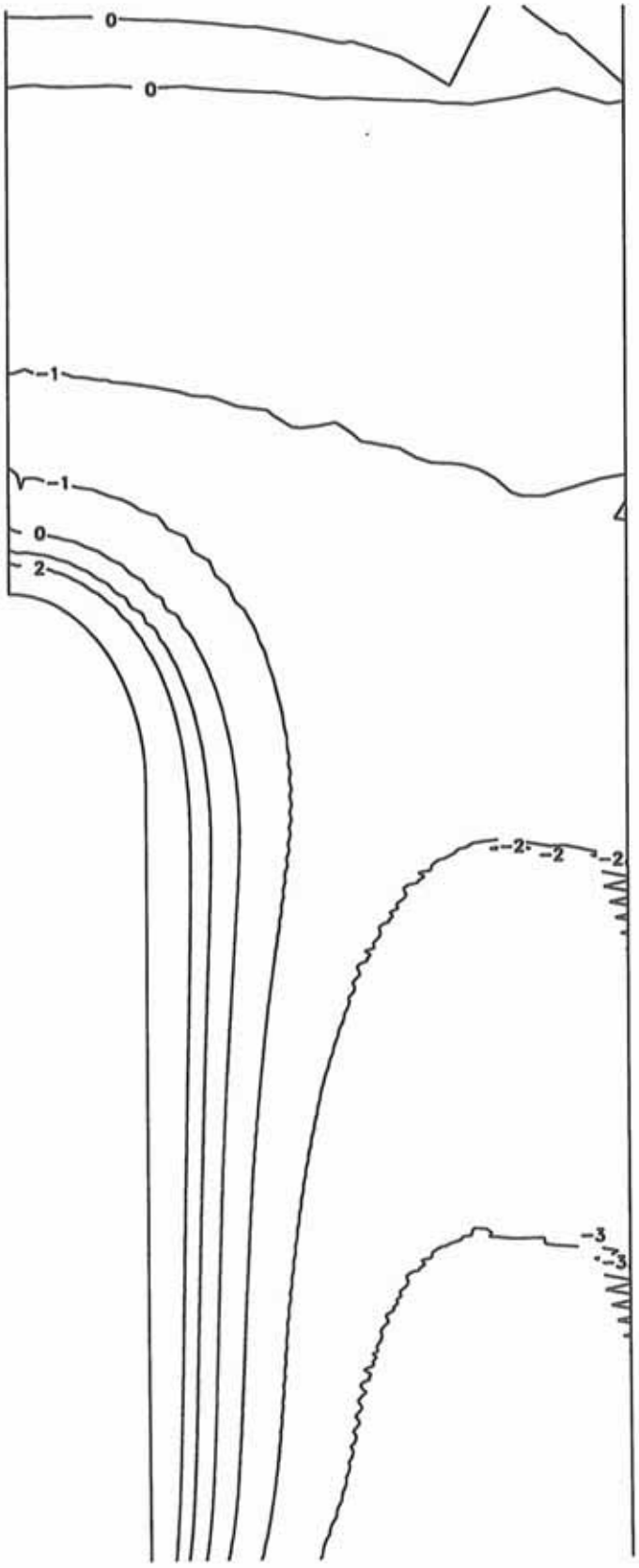
Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 1 – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.11



Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 1 – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.12

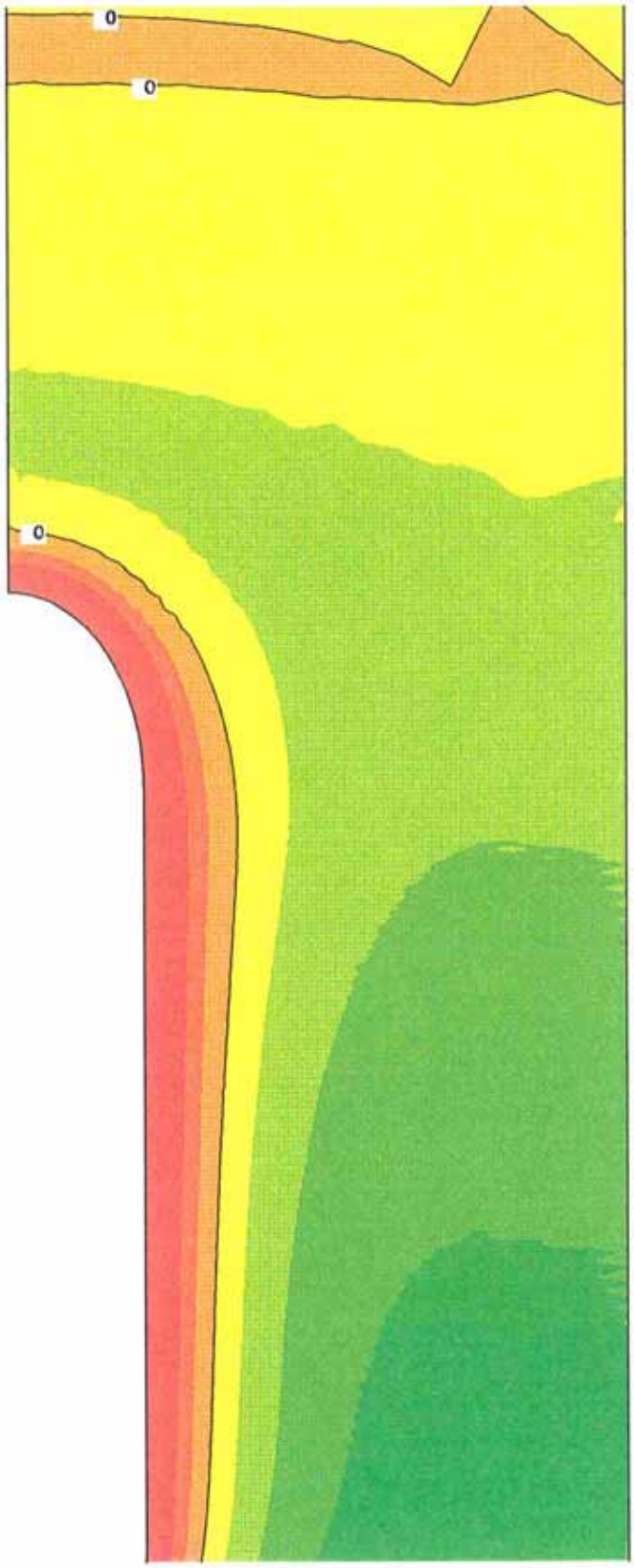


xmin= 0
xmax= 160
ymin= -560
ymax= -160
zmin= -10
zmax= 10

(c) IUB 01/02/94

Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 2 – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.13



xmin= 0
xmax= 160
ymin= -560
ymax= -160
zmin= -10
zmax= 10

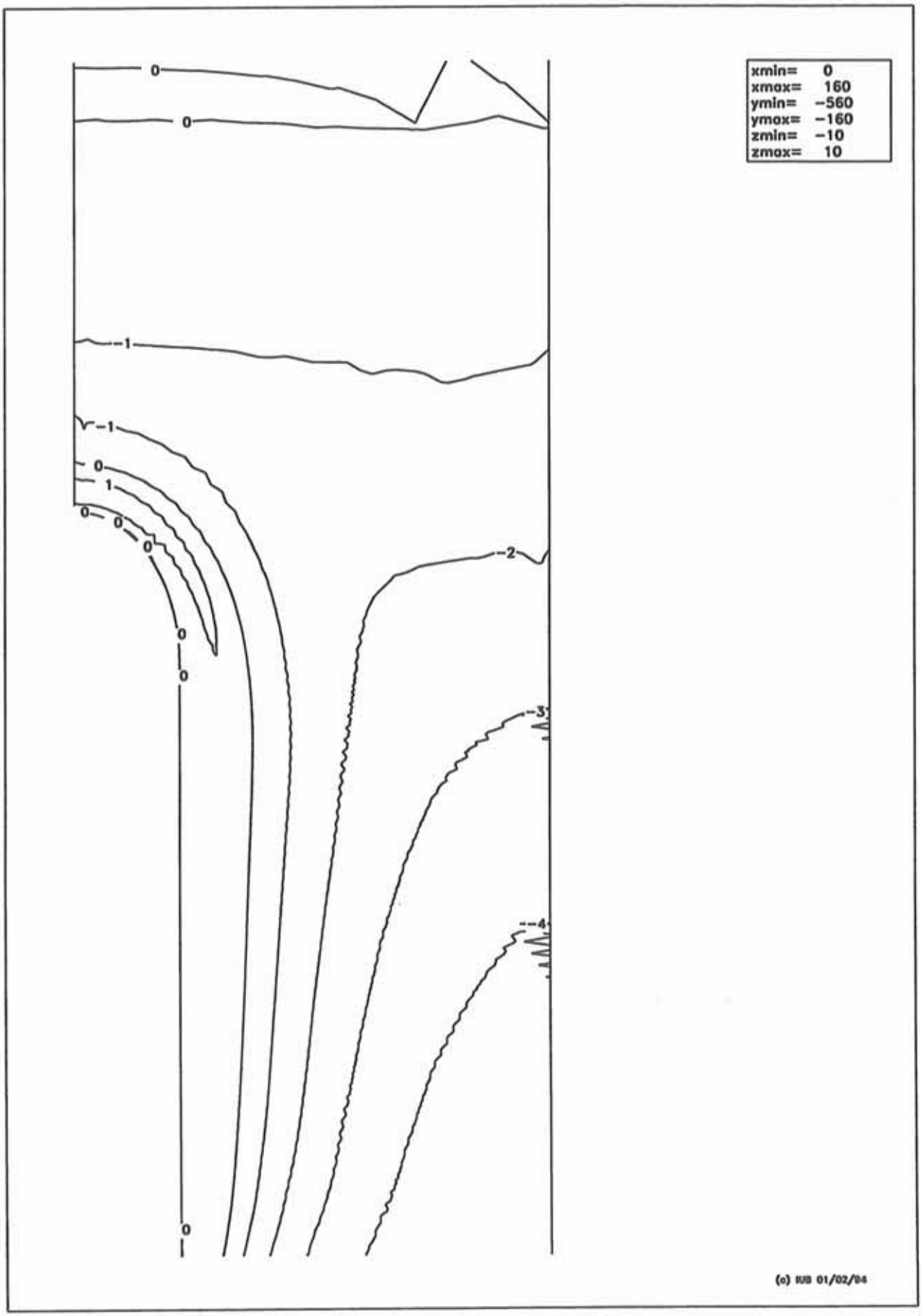
Legende

-4
-3
-2
-1
0
1
2

(c) IUB 01/02/94

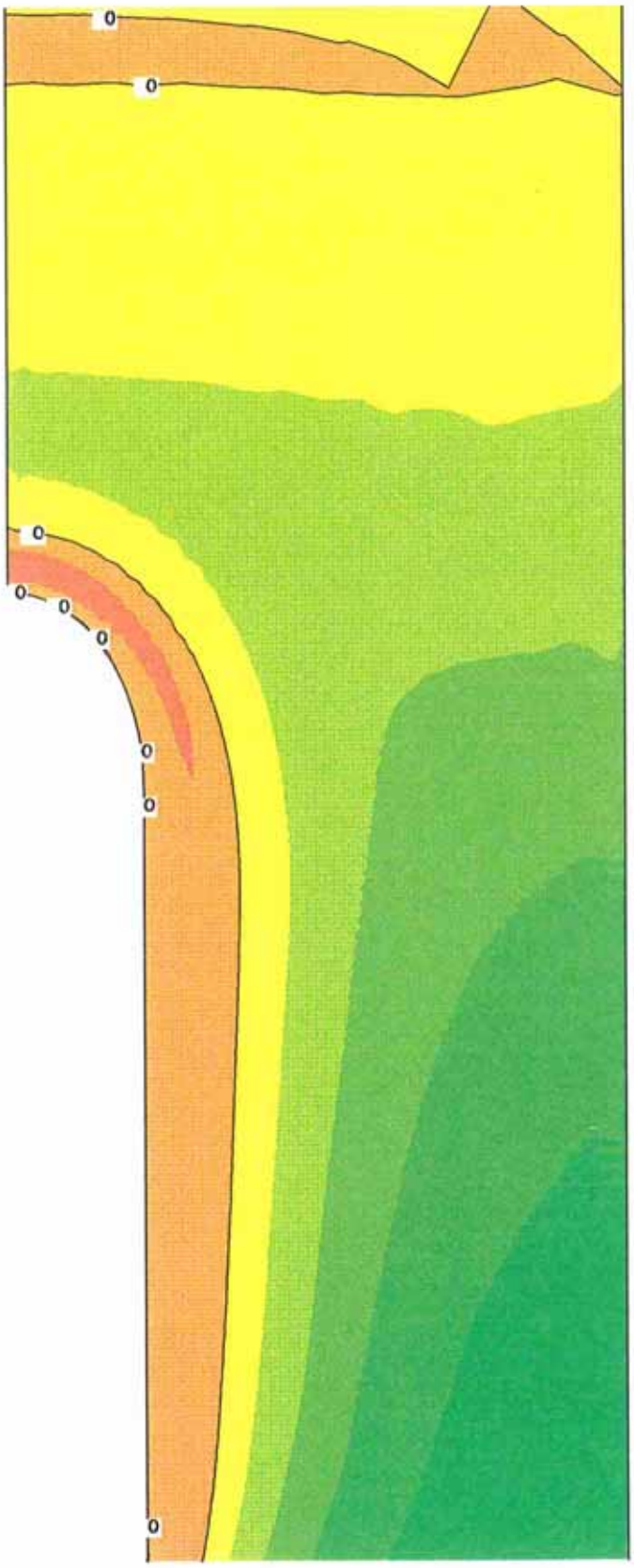
Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 2 – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.14



Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 2 – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.15



xmin= 0
xmax= 160
ymin= −560
ymax= −160
zmin= −10
zmax= 10

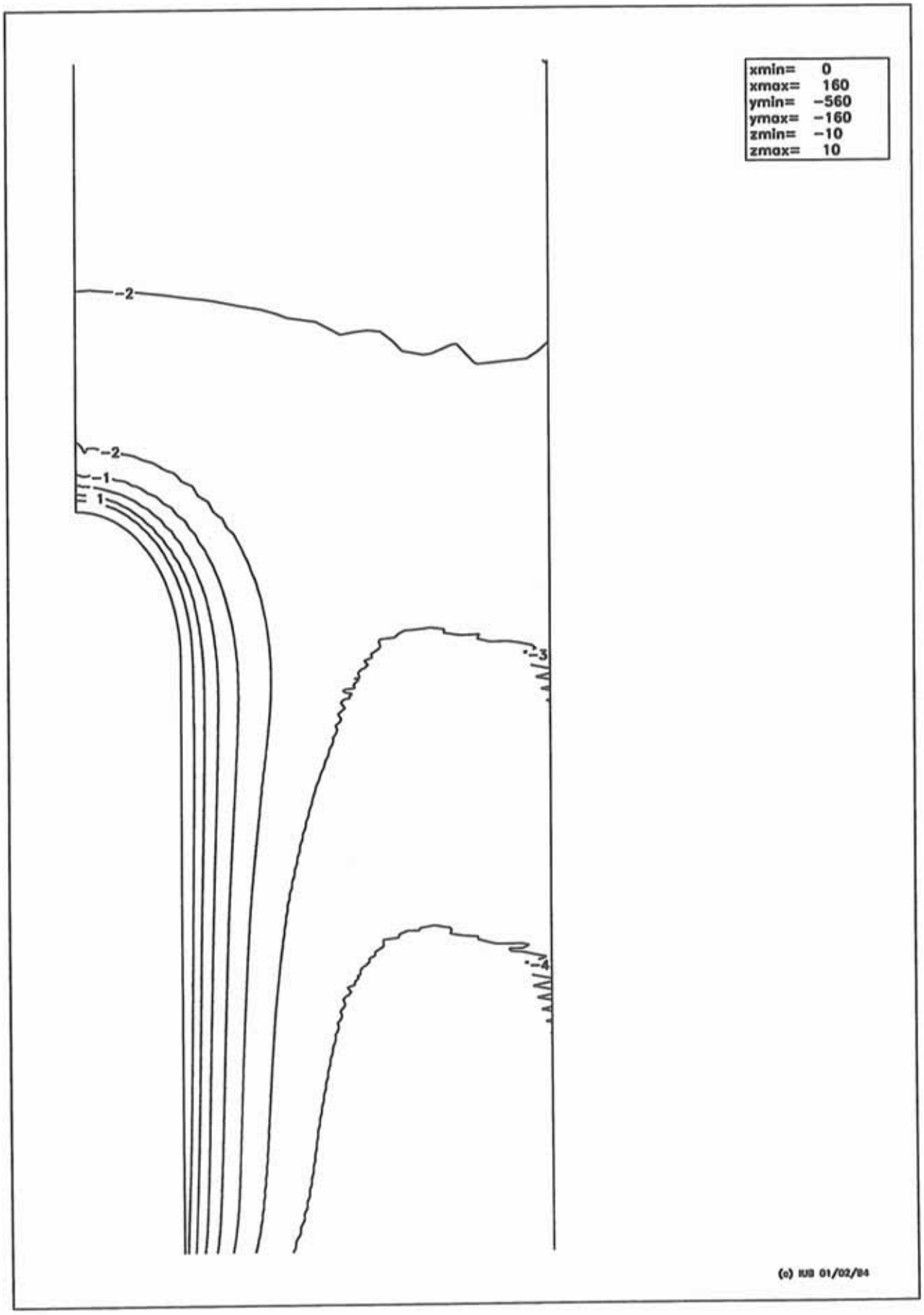
Legende

−4
−3
−2
−1
0
1
2

(c) IUB 01/02/94

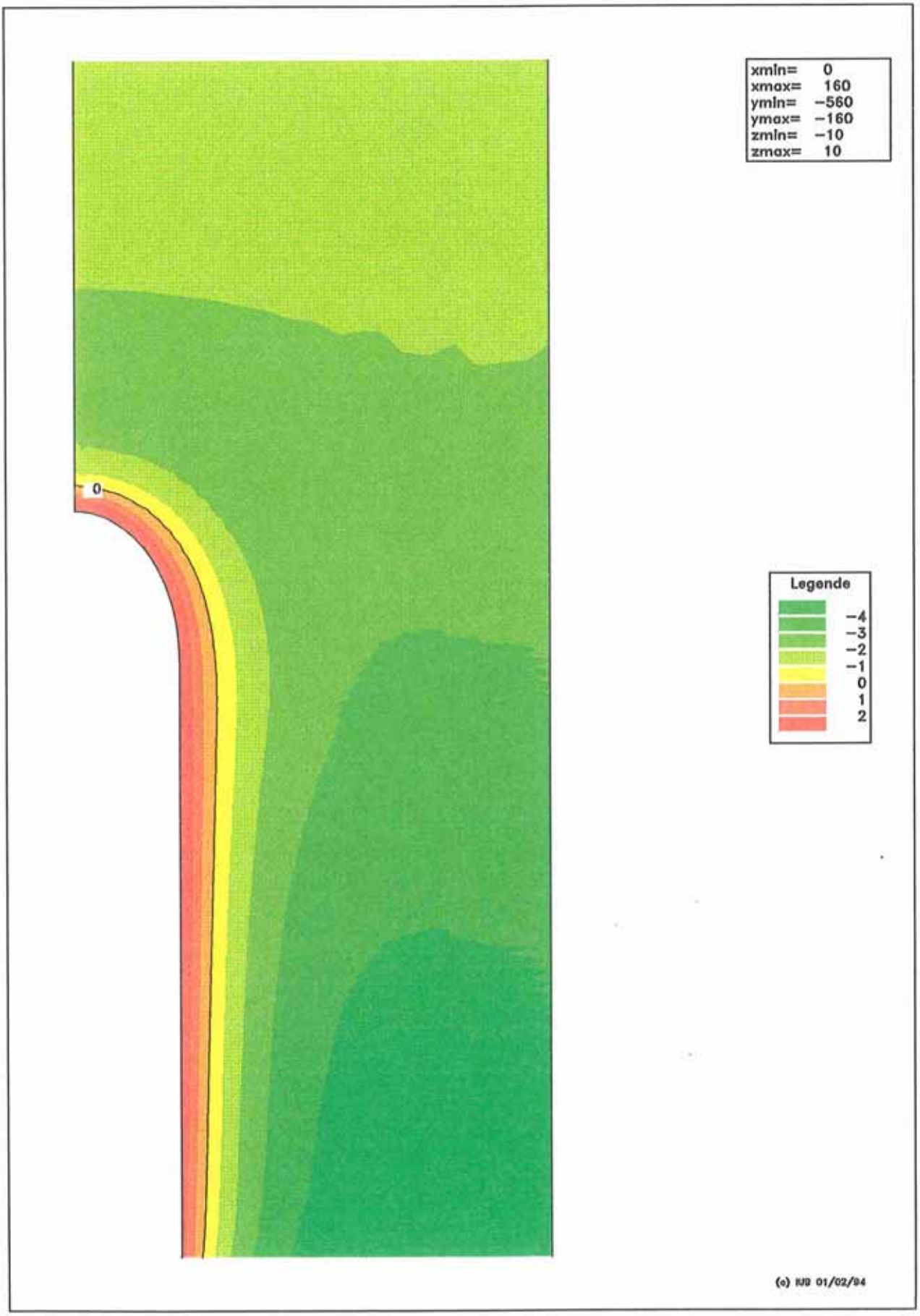
Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 2 – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.16



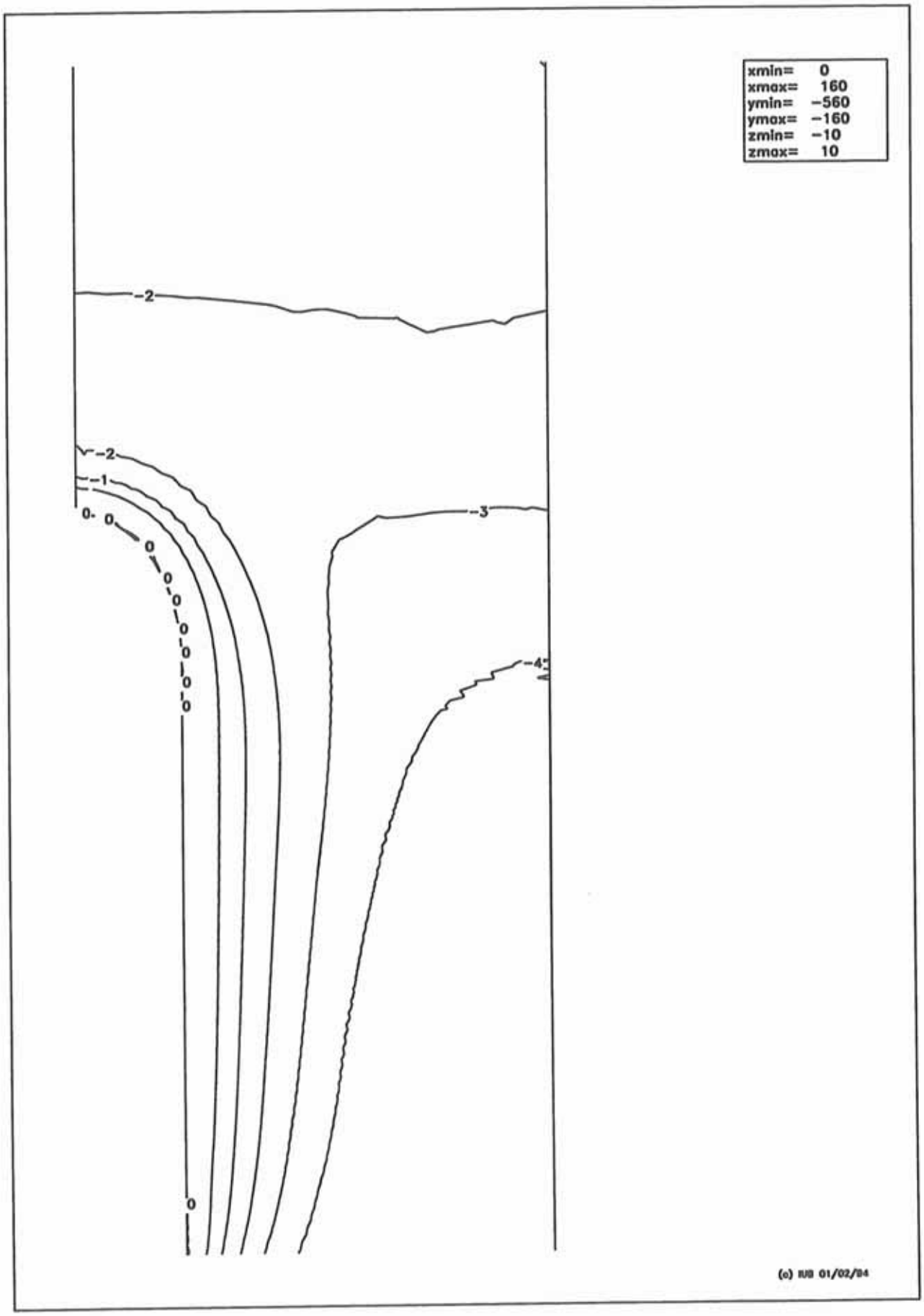
Druckgradientenstufe G = 0.205 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 2 – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 16.9679 MPa

Bild 7.17



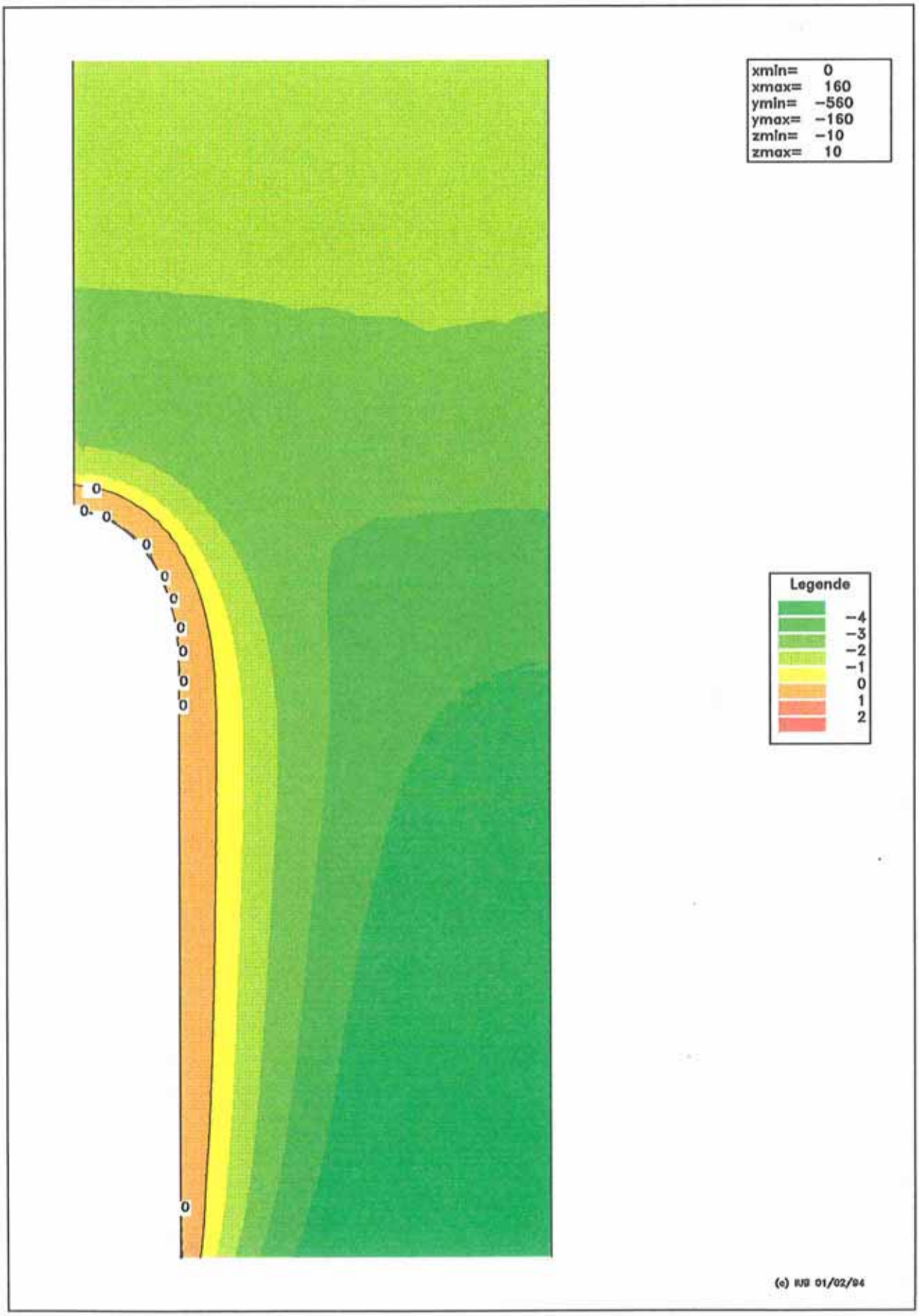
Druckgradientenstufe G = 0.205 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 2 – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 16.9679 MPa

Bild 7.18



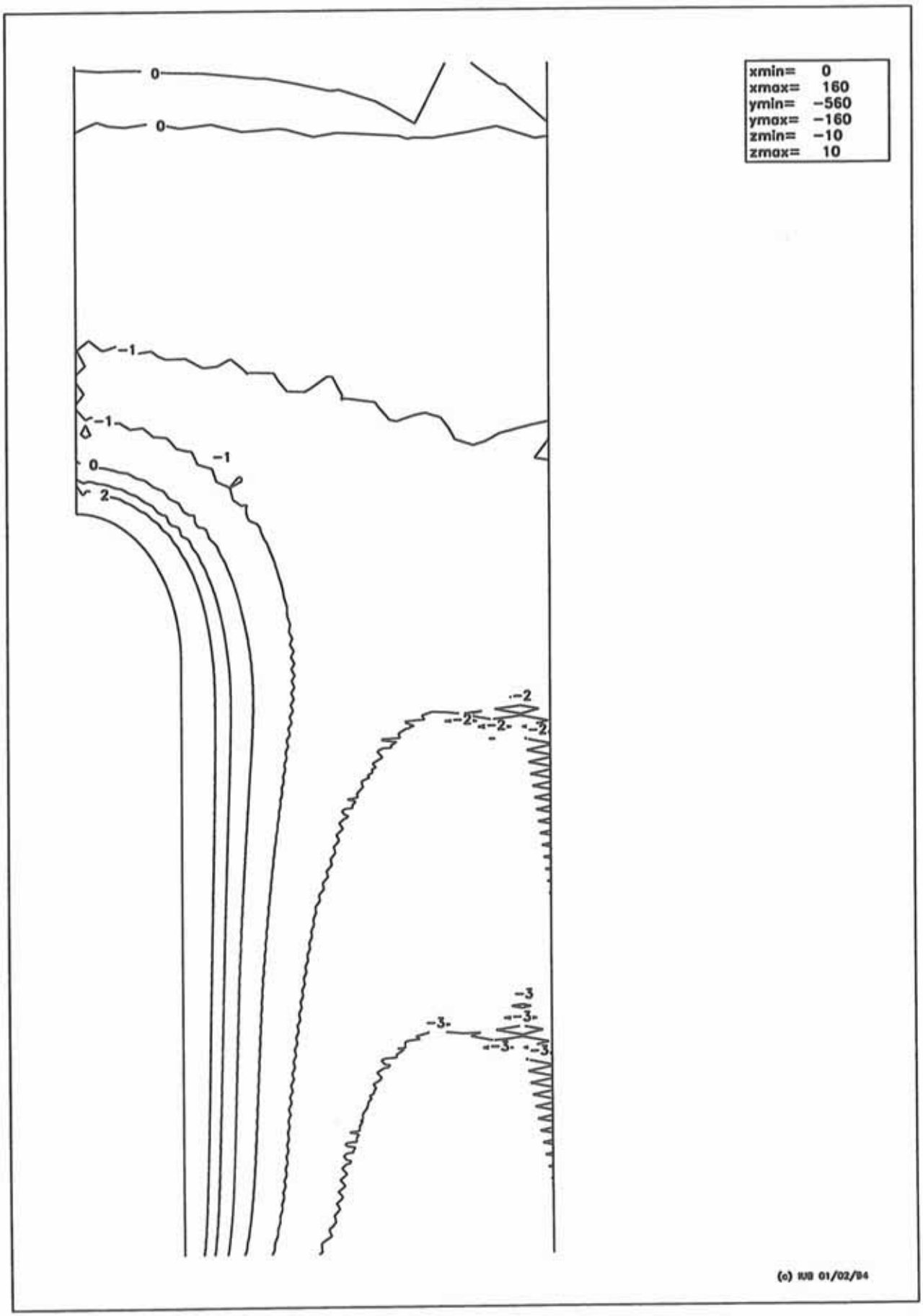
Druckgradientenstufe G = 0.205 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 2 – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 16.9679 MPa

Bild 7.19



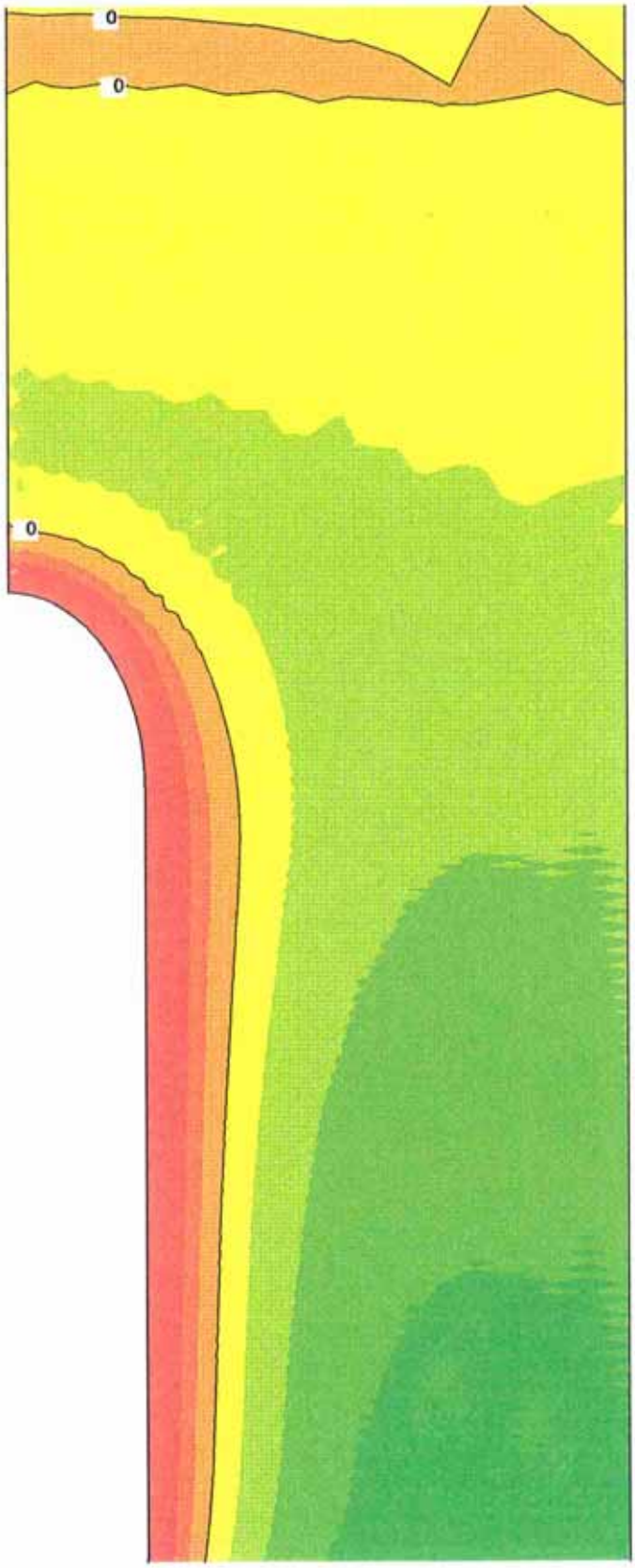
Druckgradientenstufe G = 0.205 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 2 – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 16.9679 MPa

Bild 7.20



Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 2 – Material 2
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.21



xmin= 0
xmax= 160
ymin= −560
ymax= −160
zmin= −10
zmax= 10

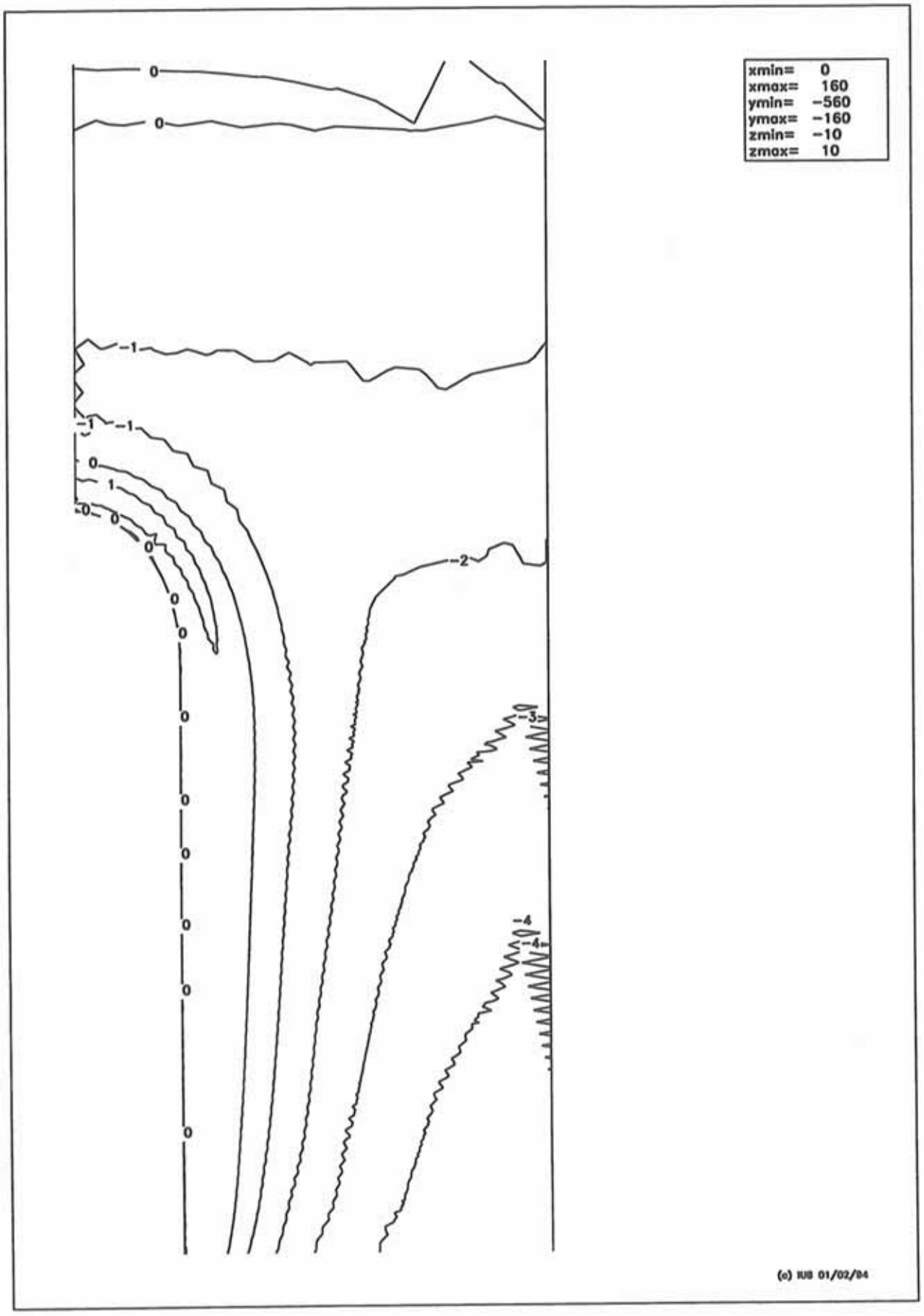
Legende

−4
−3
−2
−1
0
1
2

(c) IUB 01/02/04

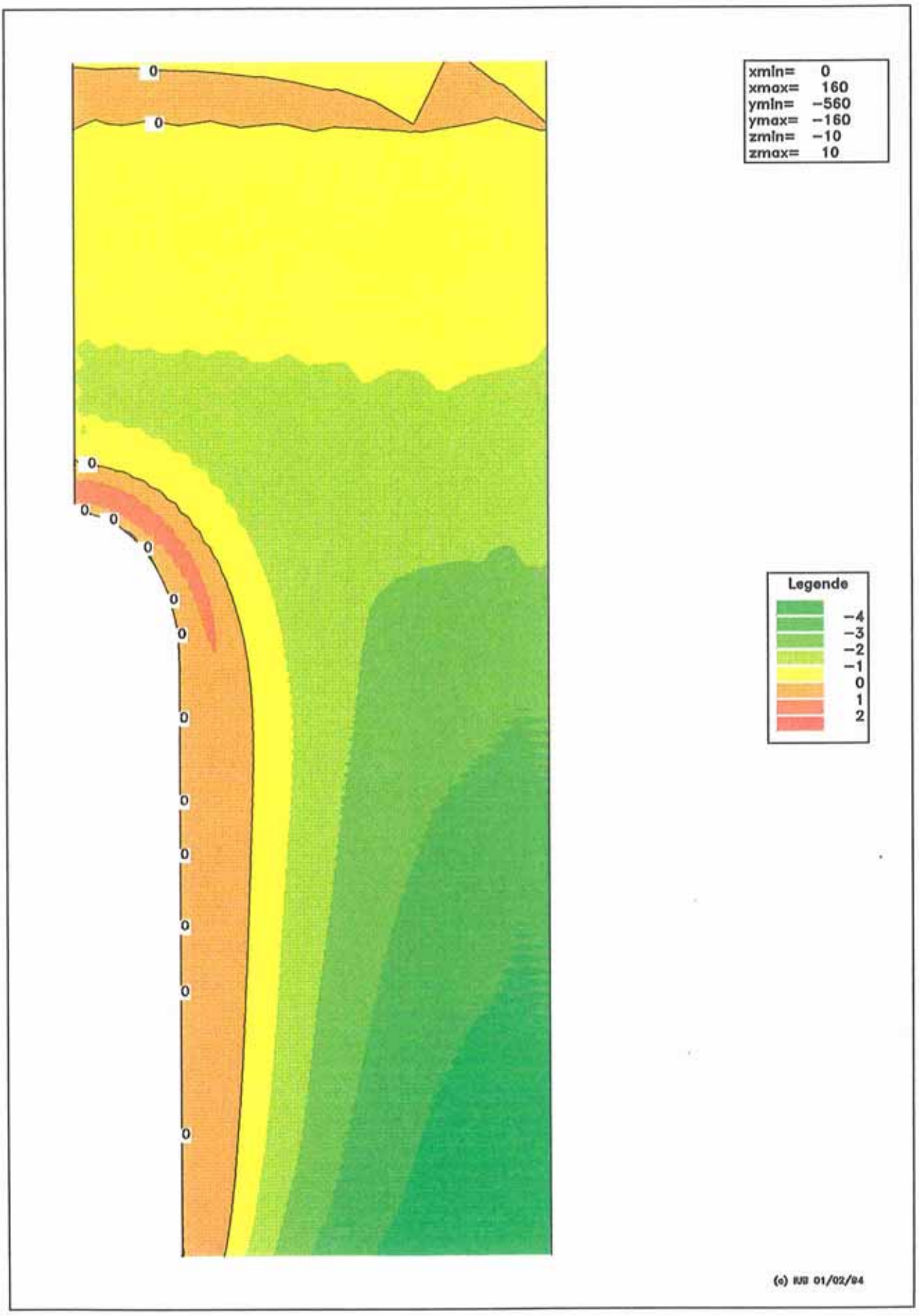
Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 2 – Material 2
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.22



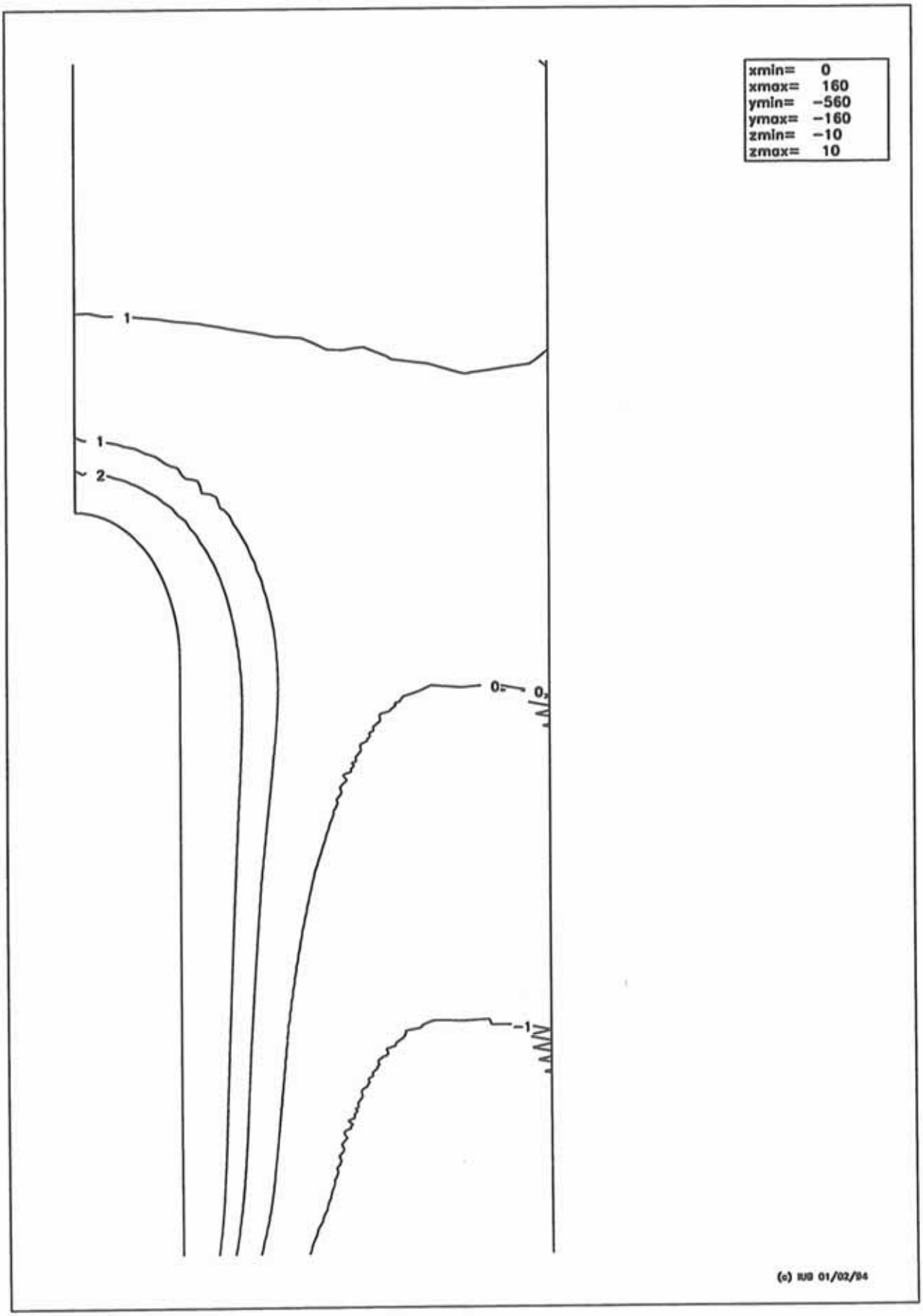
Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 2 – Material 2
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.23



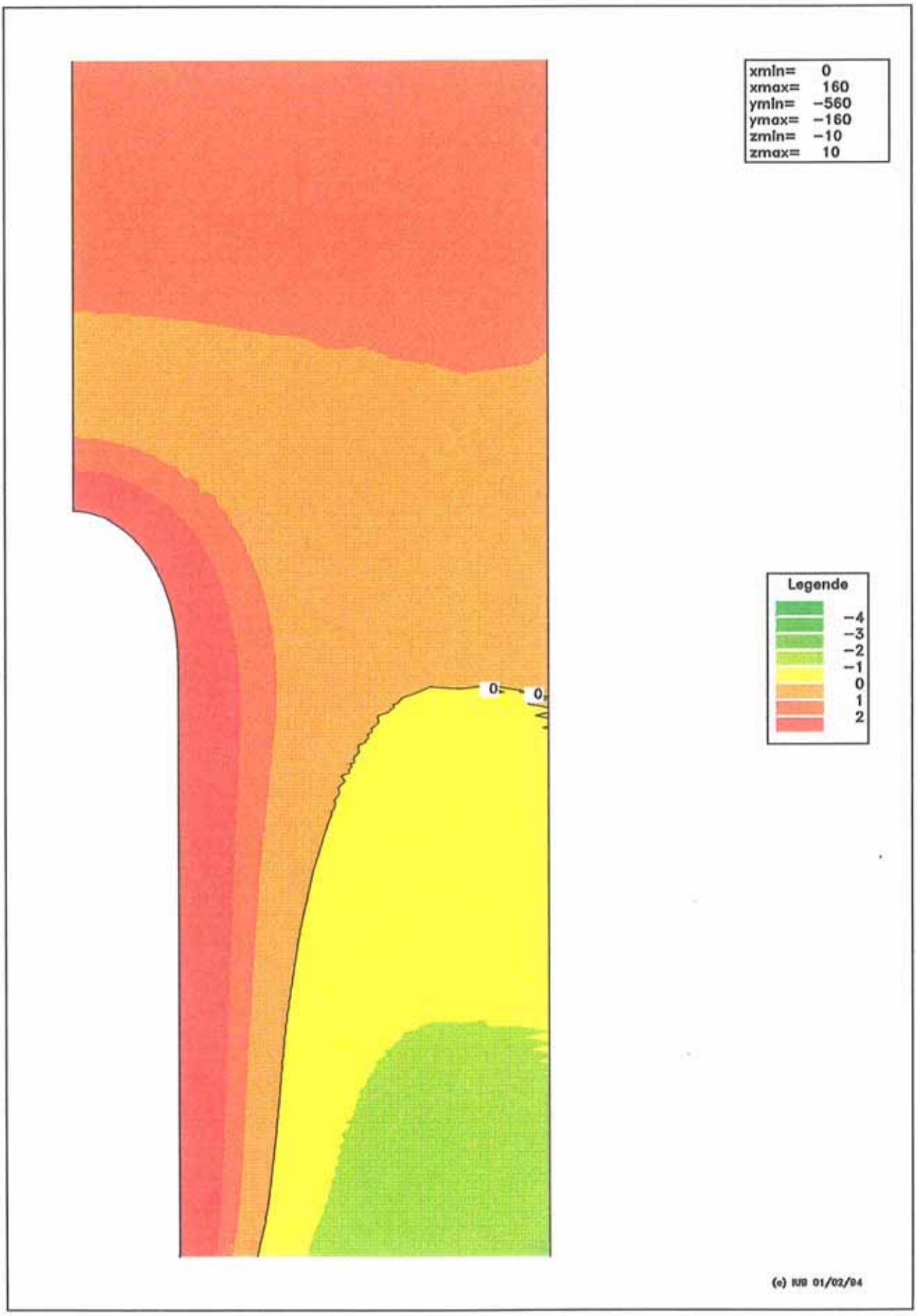
Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck 2 – Material 2
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.24



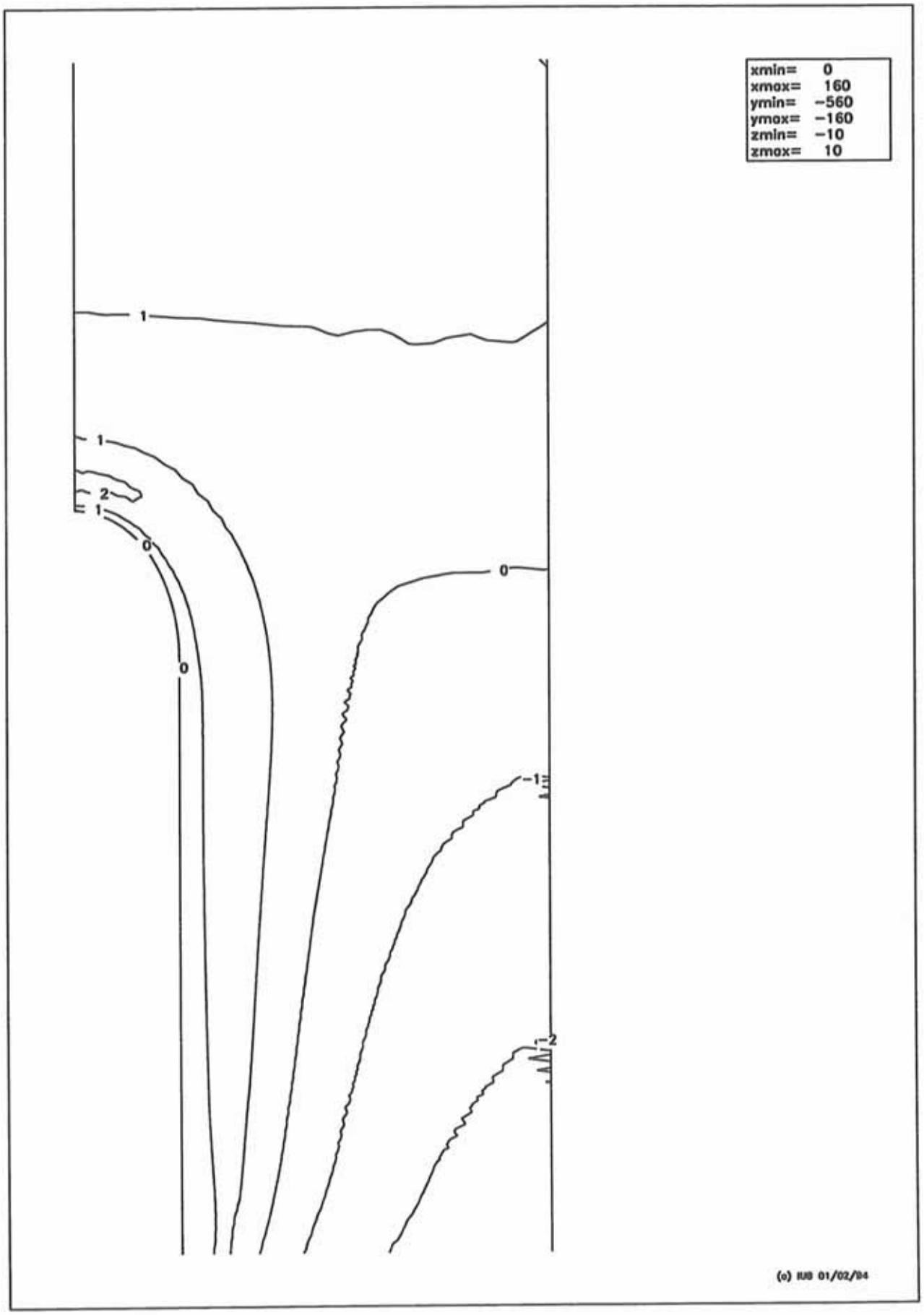
Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.25



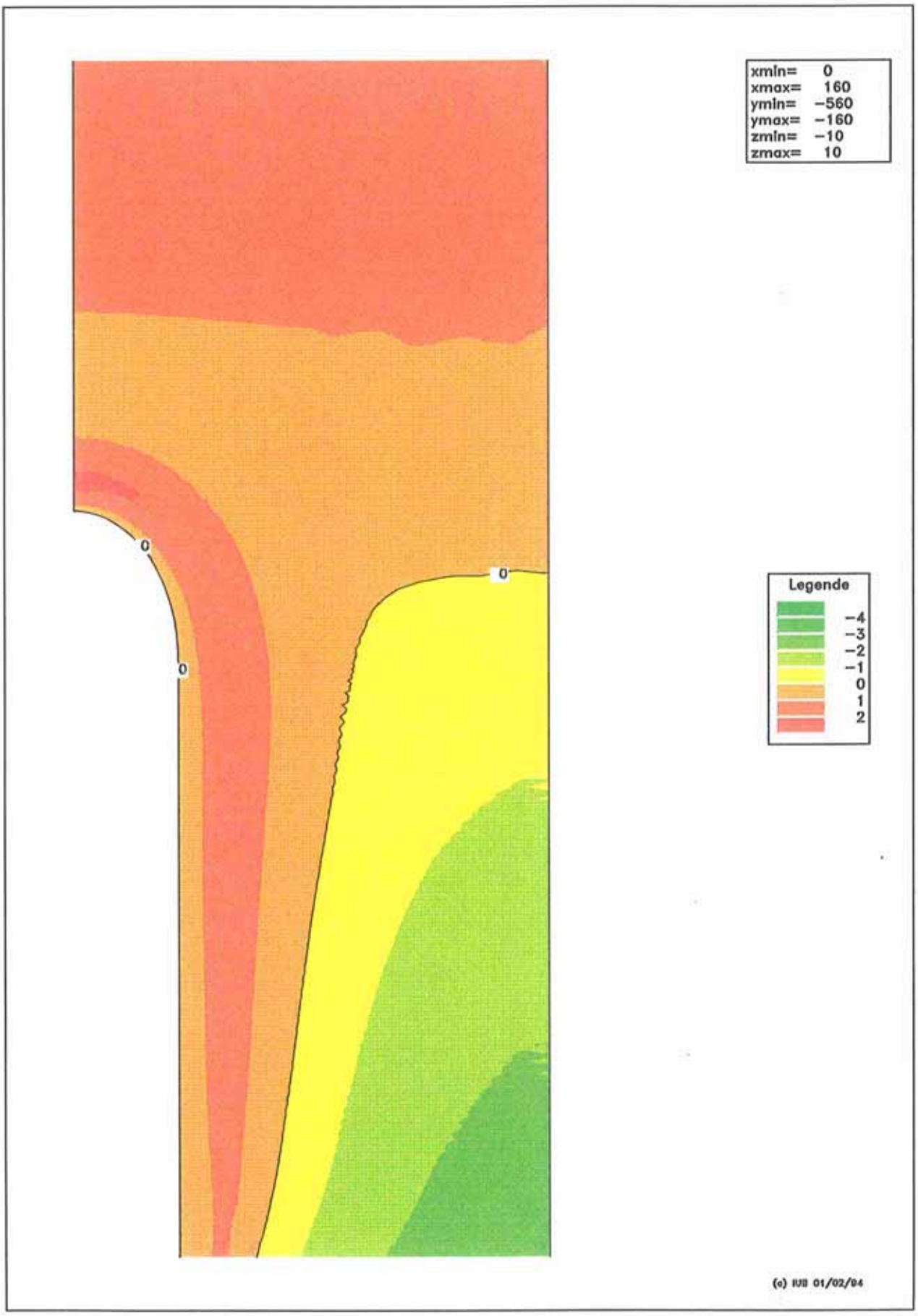
Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.26



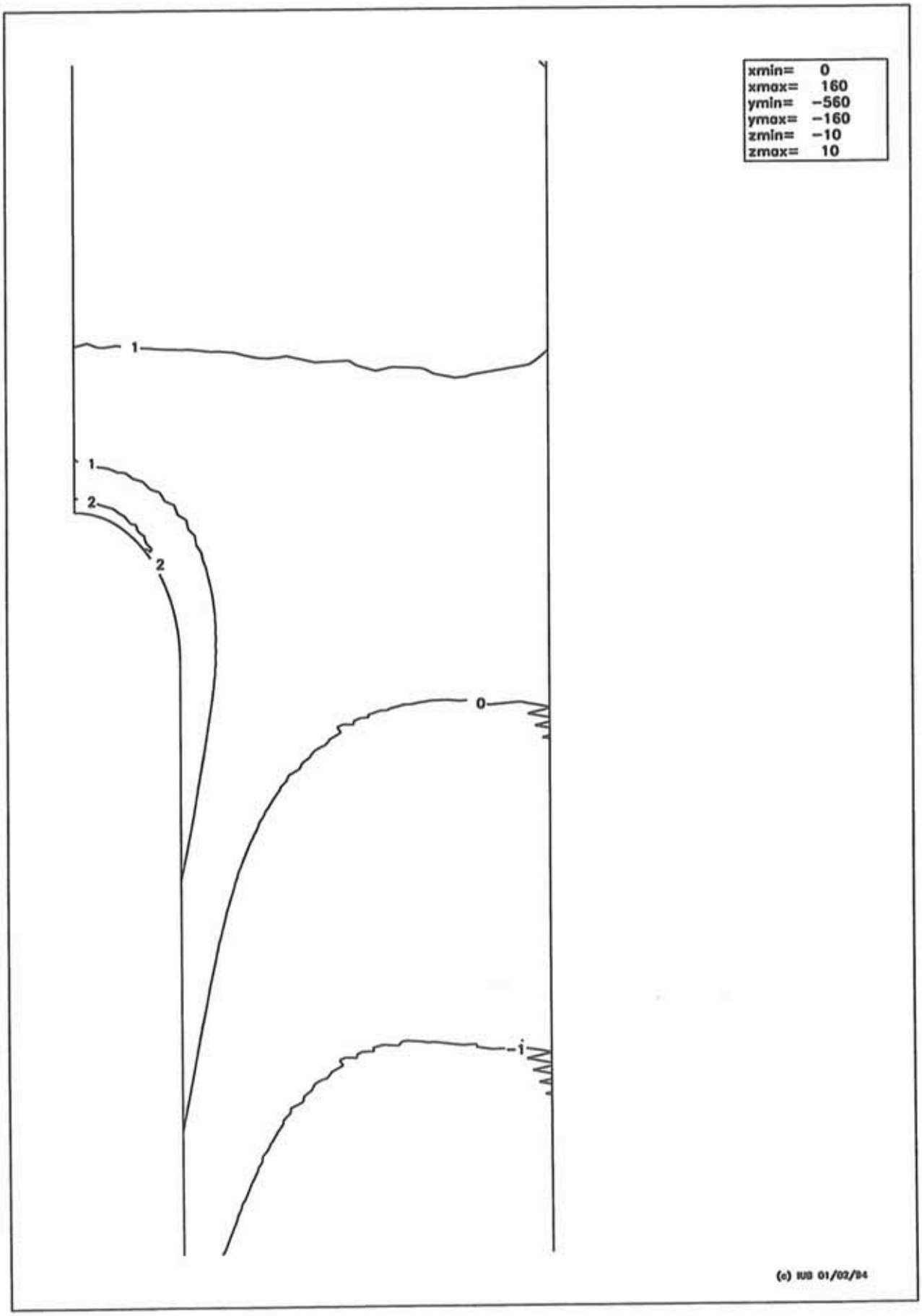
Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.27



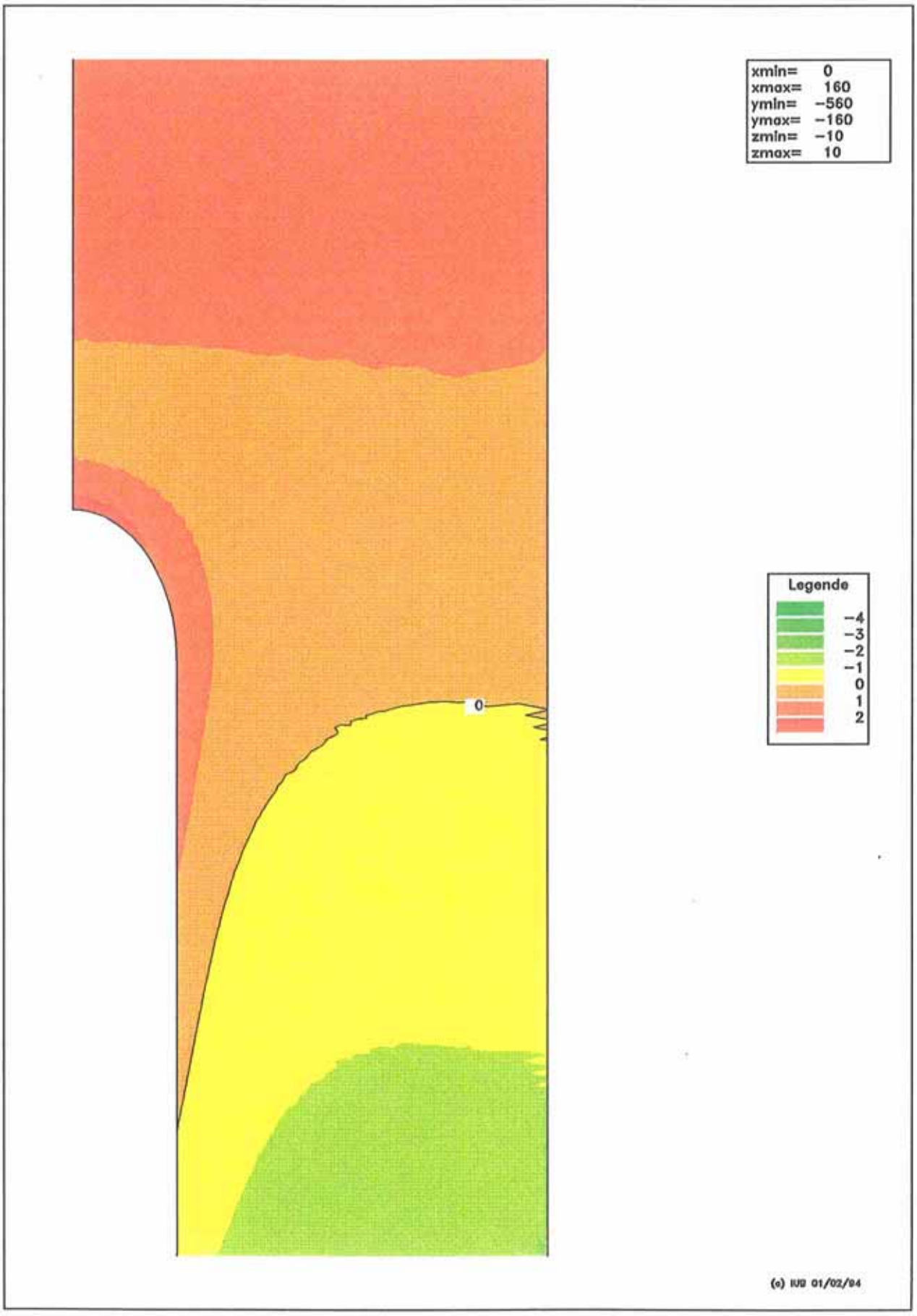
Druckgradientenstufe G = 0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.28



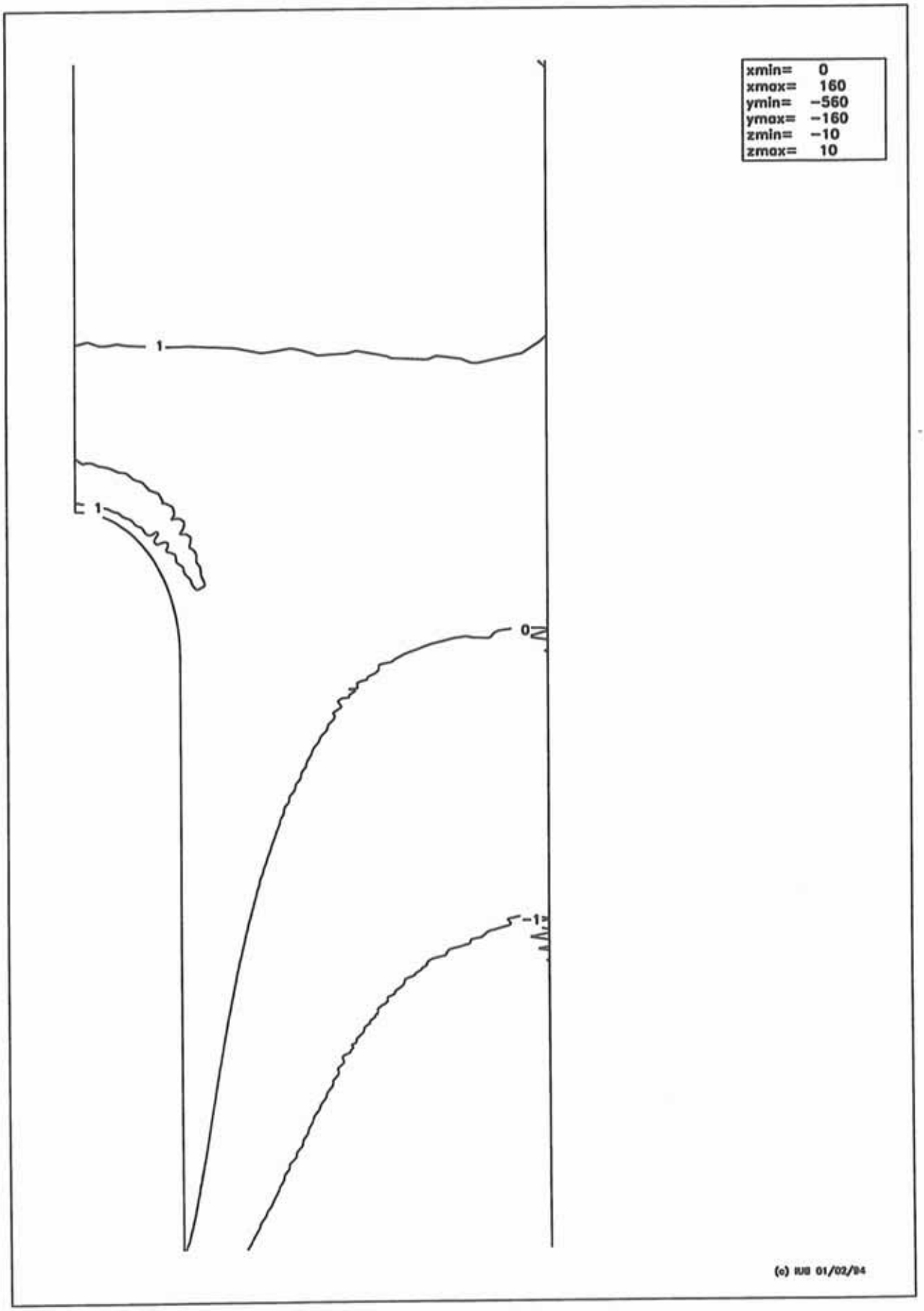
G= 0.205 bar/m (viskos)-0.220 bar/m (elast.) - Gebirgsdruck R - Material 1
Differenz Hauptspannung Phi - rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.29



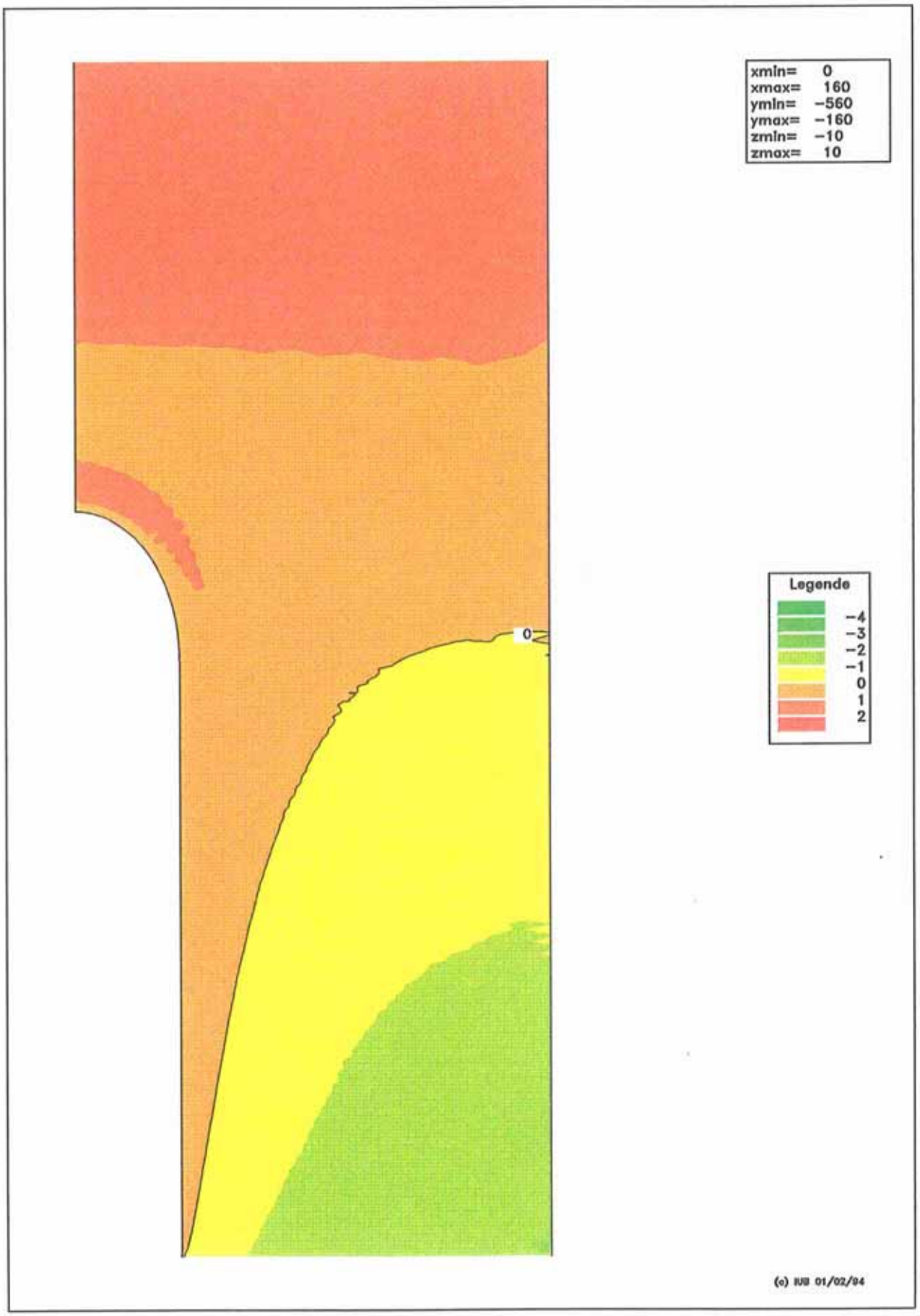
G= 0.205 bar/m (viskos)-0.220 bar/m (elast.) - Gebirgsdruck R - Material 1
Differenz Hauptspannung Phi - rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.30



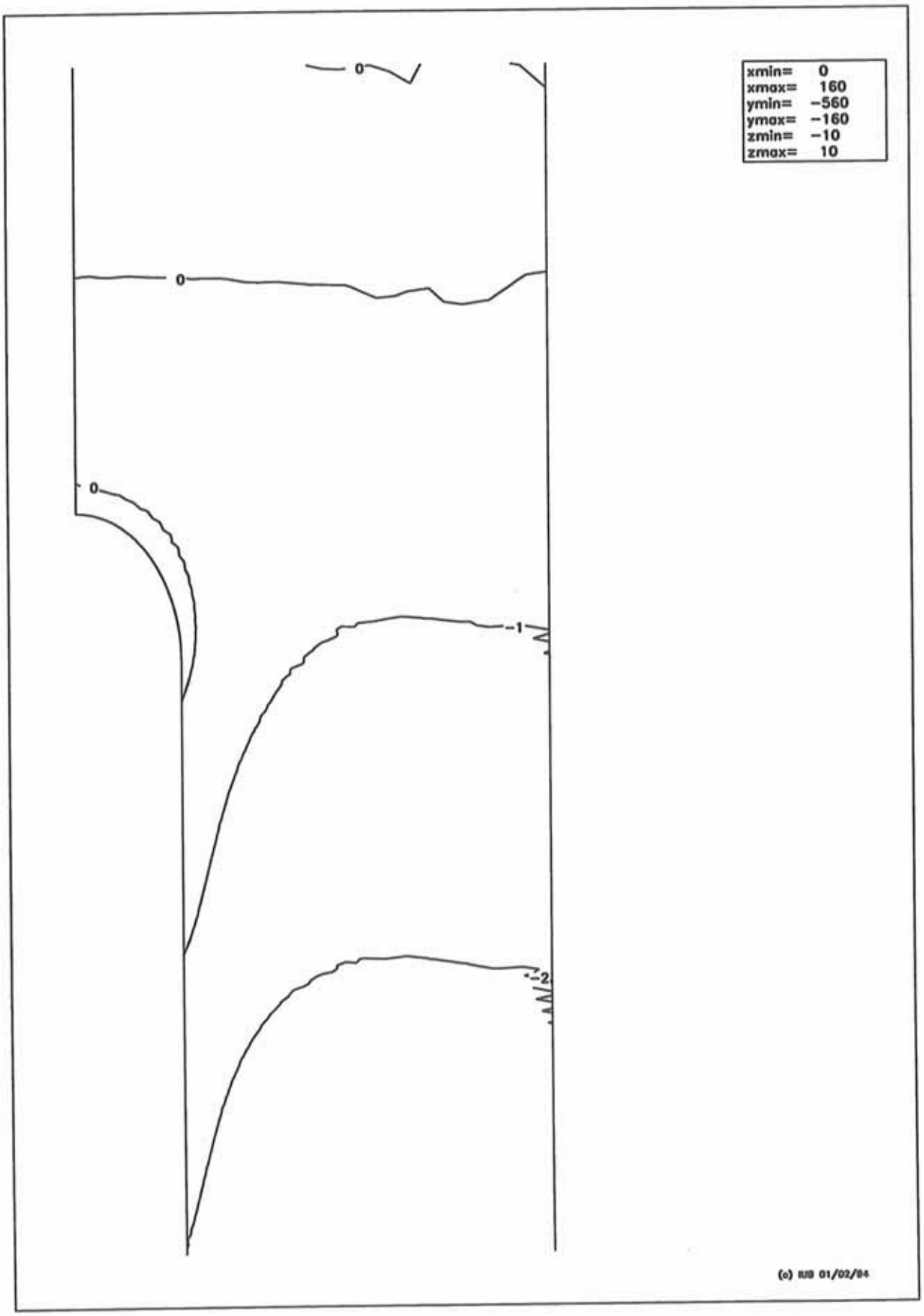
G= 0.205 bar/m (viskos)-0.220 bar/m (elast.) - Gebirgsdruck R - Material 1
Differenz Hauptspannung 3 - rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.31



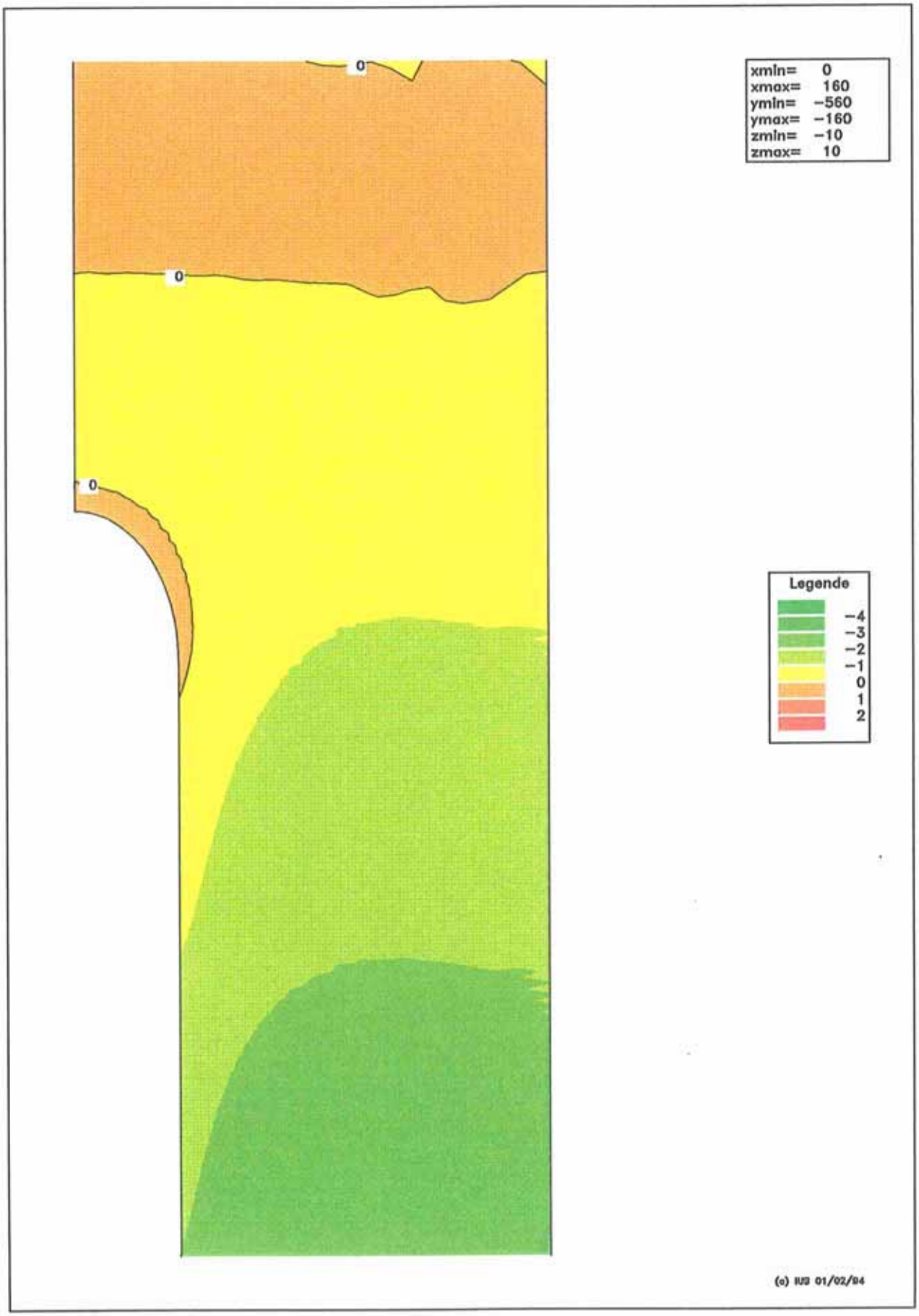
G= 0.205 bar/m (viskos)-0.220 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 18.2094 MPa

Bild 7.32



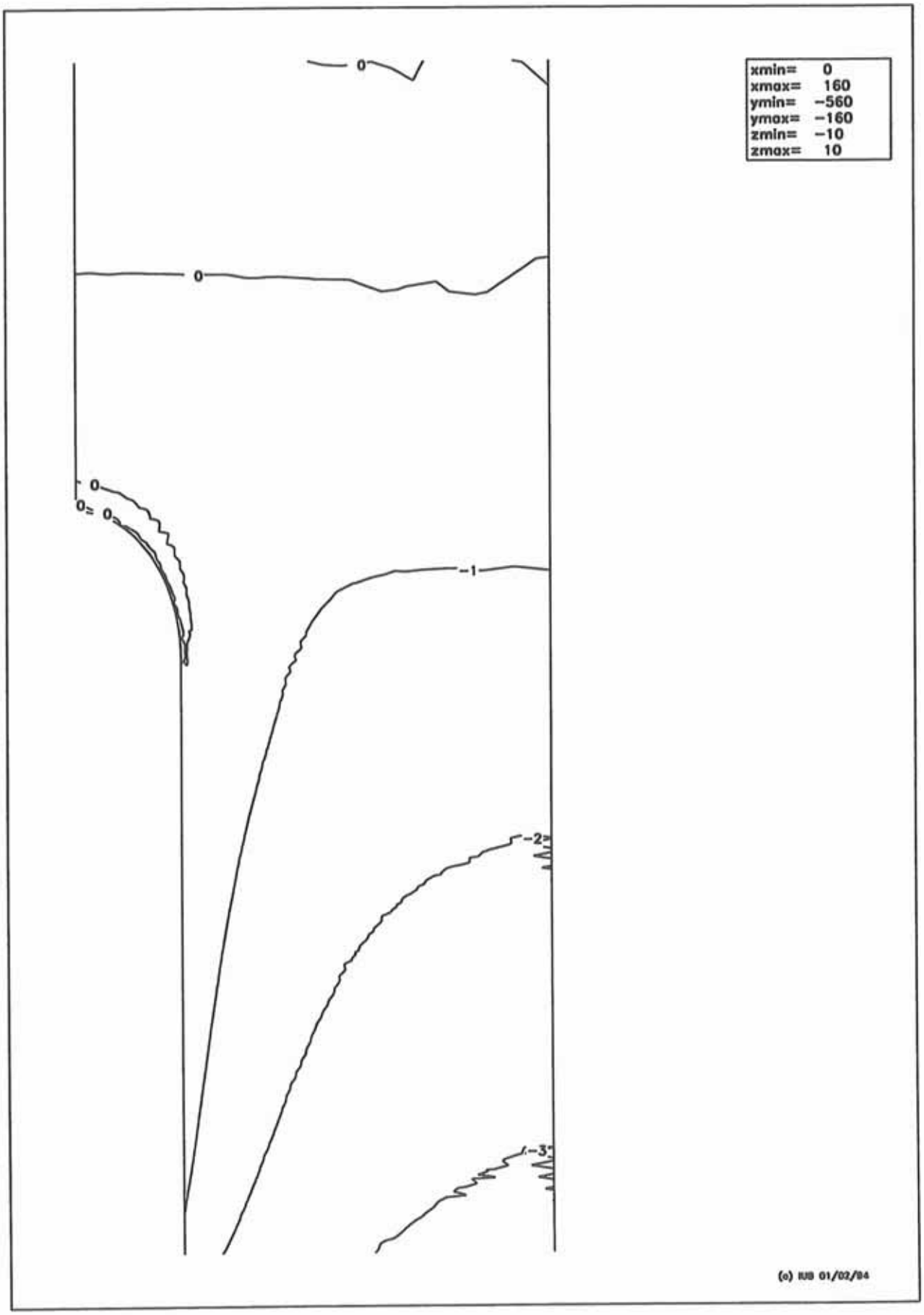
G= 0.205 bar/m (viskos) – 2560 d – Gebigsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 16.9679 MPa

Bild 7.33



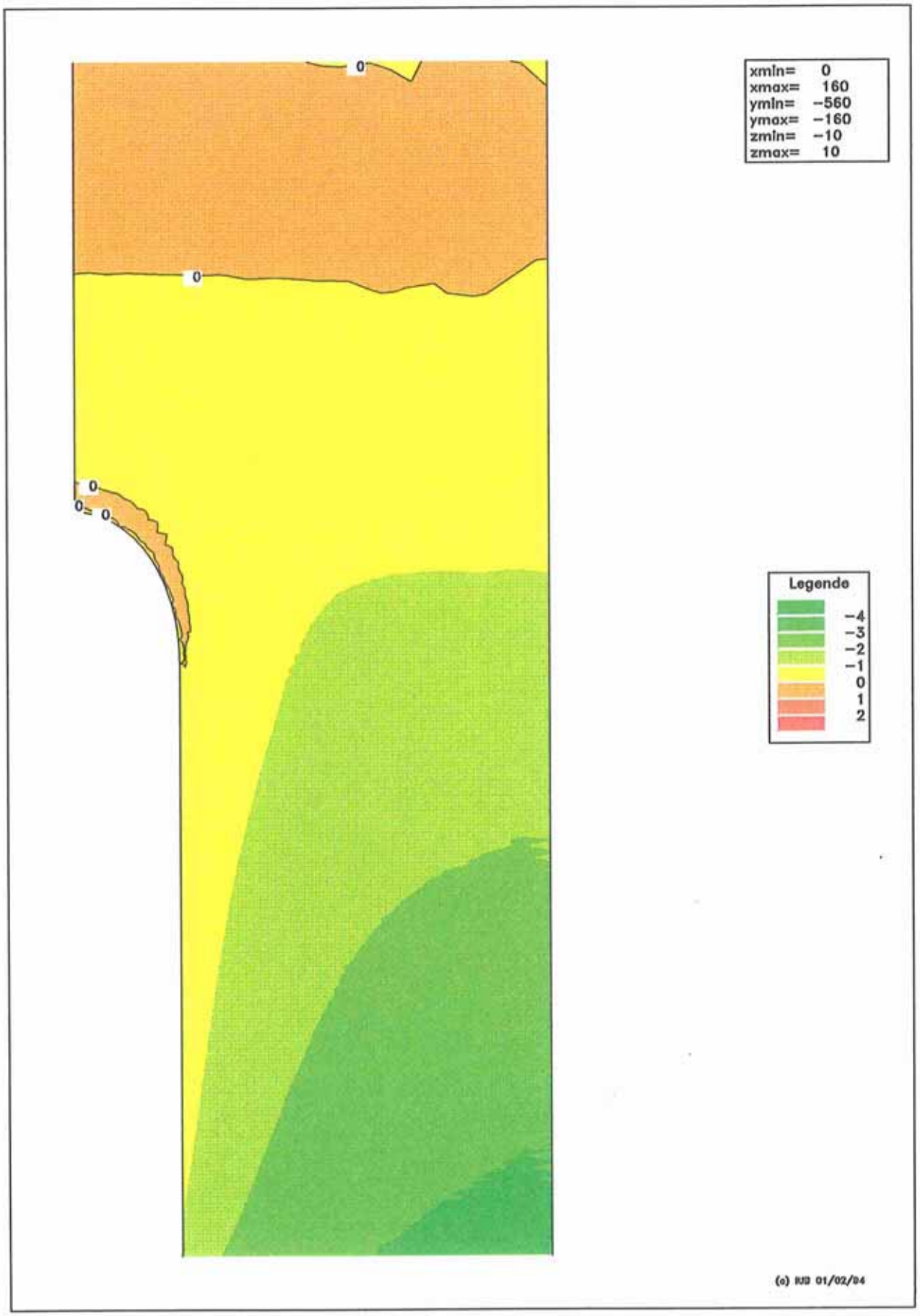
G= 0.205 bar/m (viskos) – 2560 d – Gebigsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 16.9679 MPa

Bild 7.34



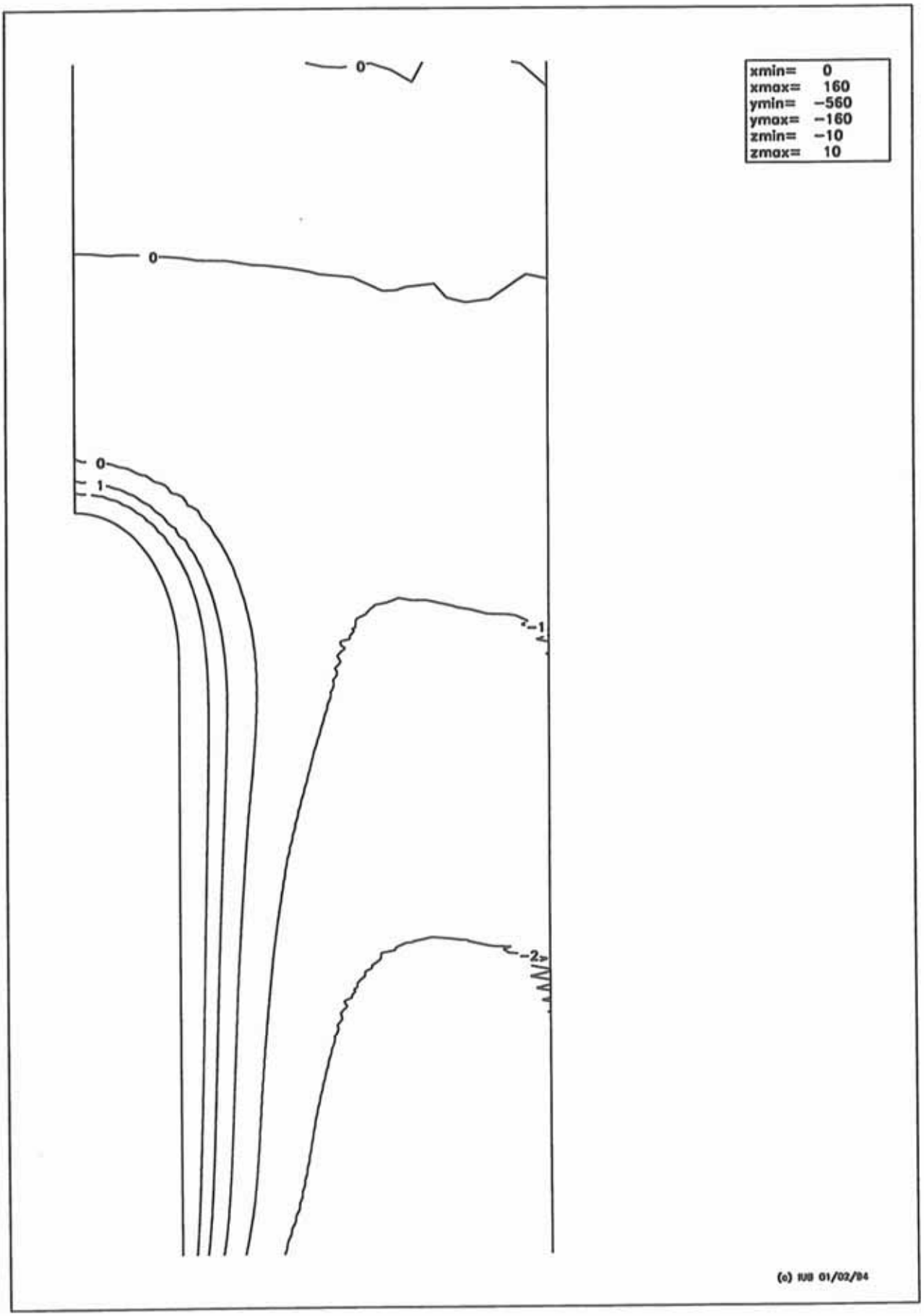
G= 0.205 bar/m (viskos) – 2560 d – Gebigsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 16.9679 MPa

Bild 7.35



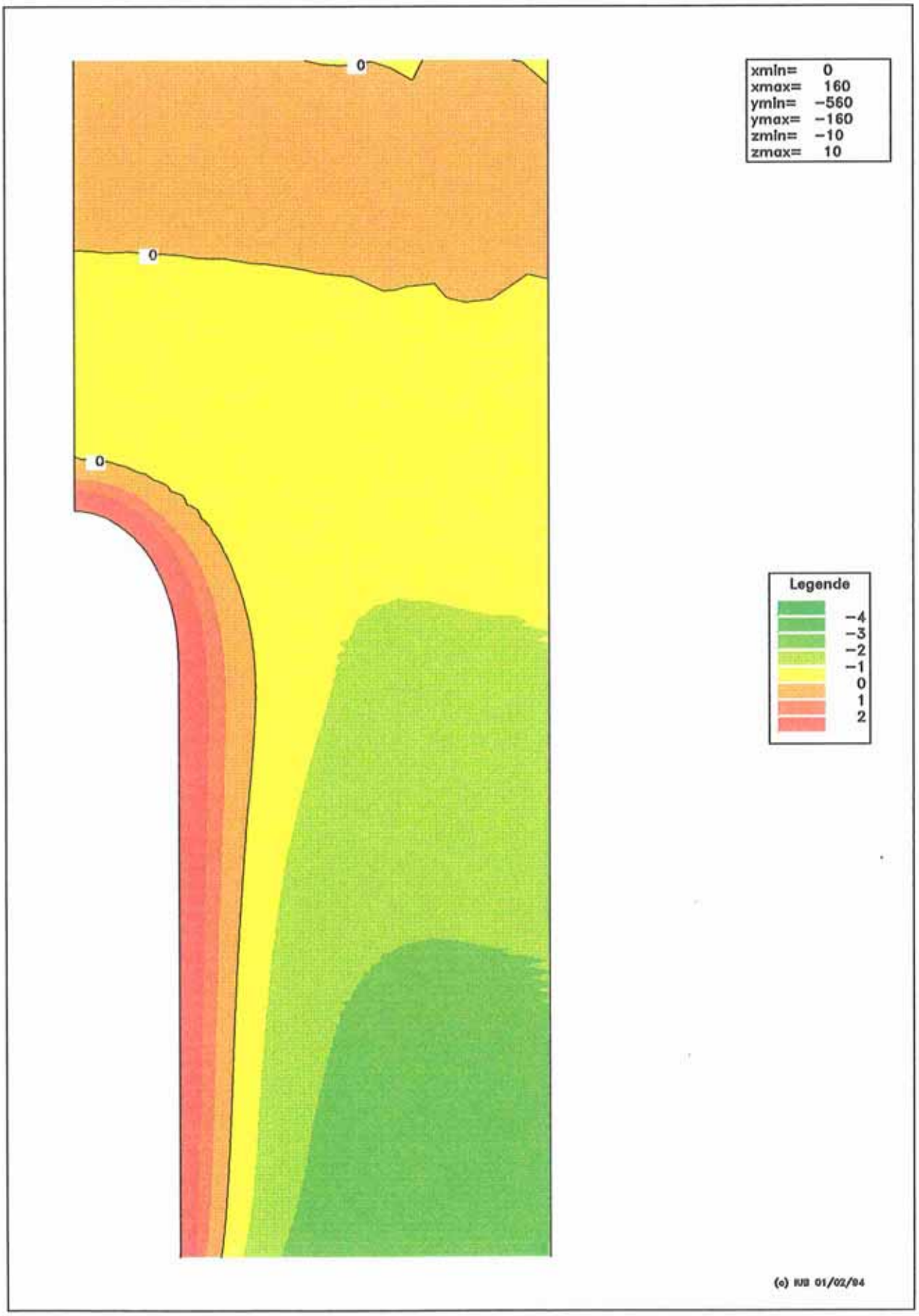
G= 0.205 bar/m (viskos) – 2560 d – Gebigsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 16.9679 MPa

Bild 7.36



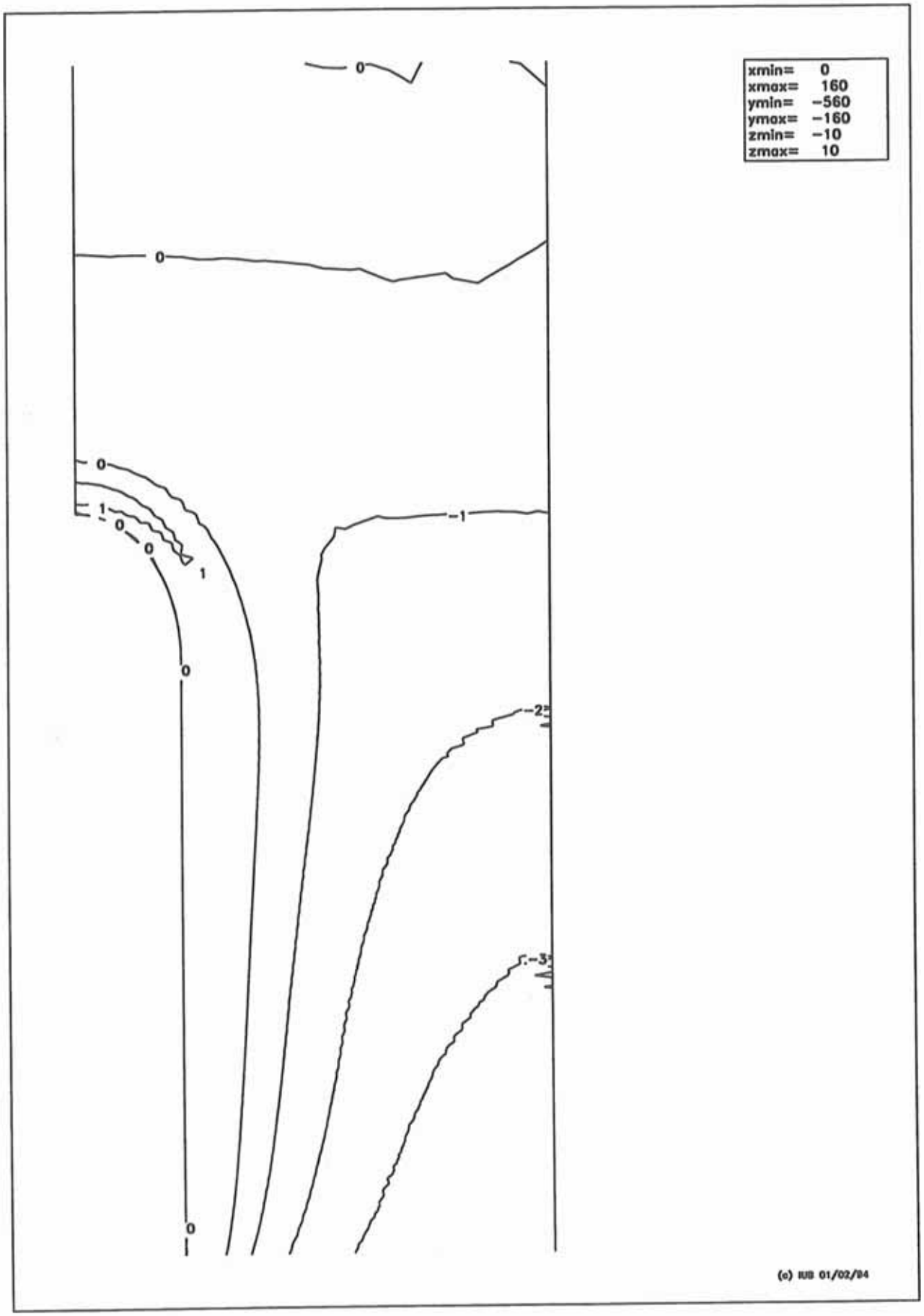
Druckgradientenstufe G = 0.205 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 16.9679 MPa

Bild 7.37



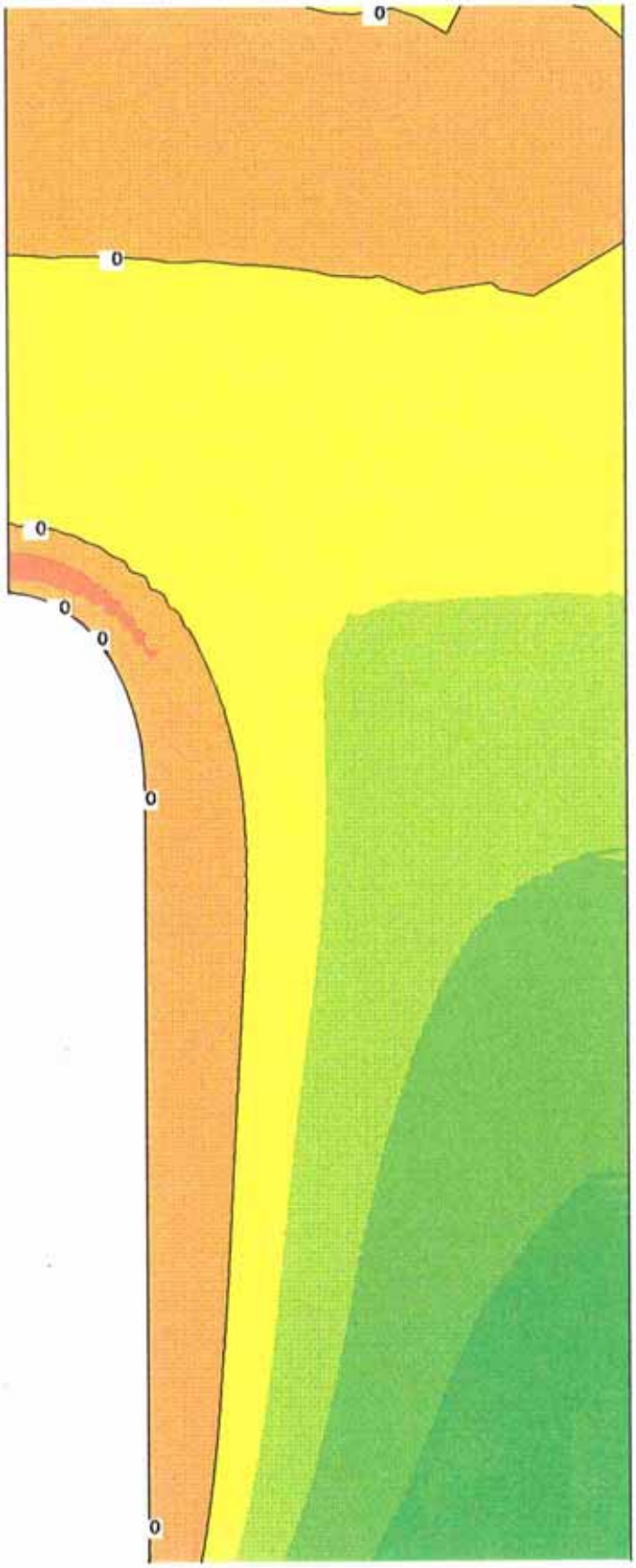
Druckgradientenstufe G = 0.205 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung Phl – rel. Soledruck zu RST 16.9679 MPa

Bild 7.38



Druckgradientenstufe G = 0.205 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 16.9679 MPa

Bild 7.39



xmin= 0
xmax= 160
ymin= −560
ymax= −160
zmin= −10
zmax= 10

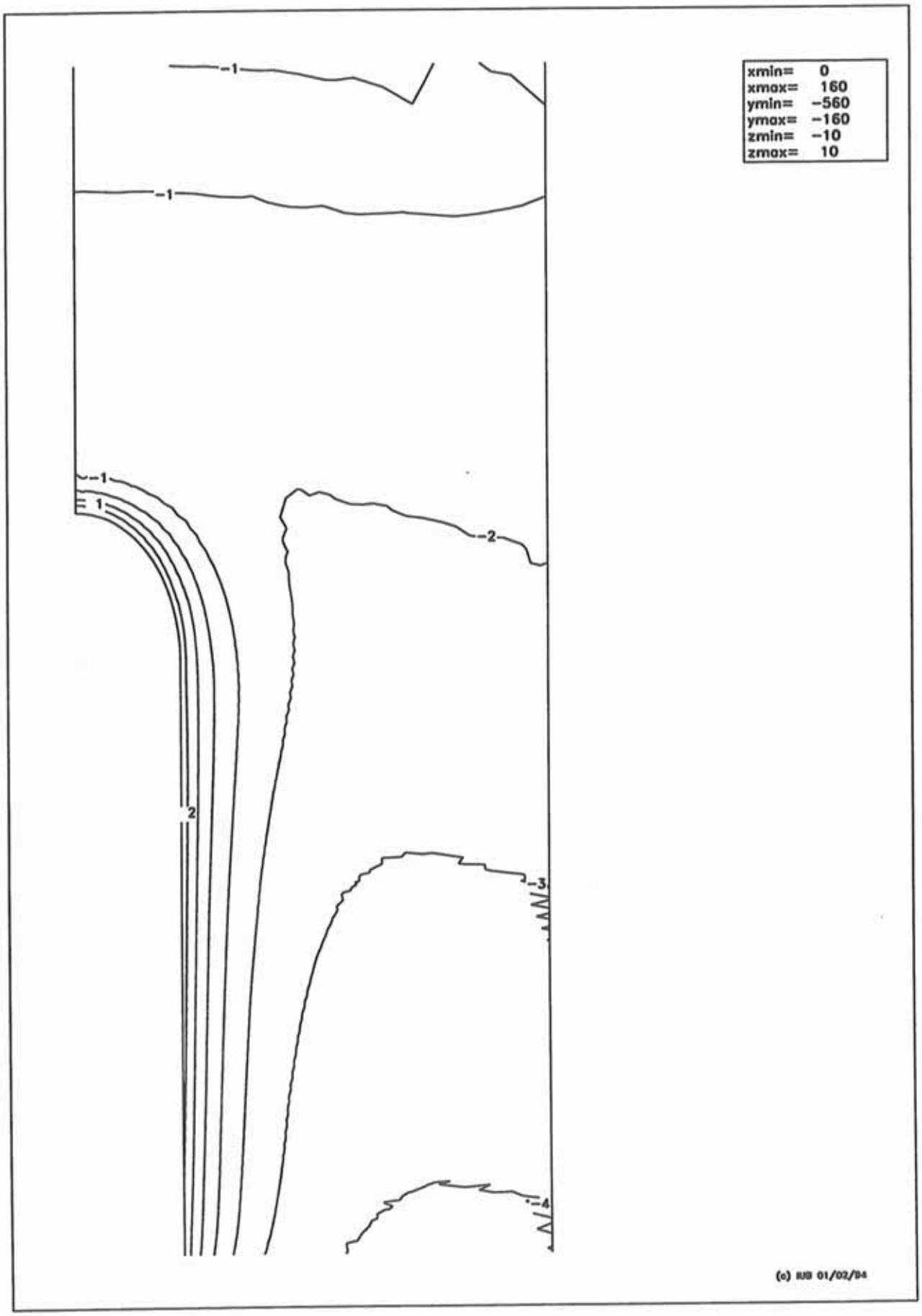
Legende

−4
−3
−2
−1
0
1
2

(c) IUB 01/02/94

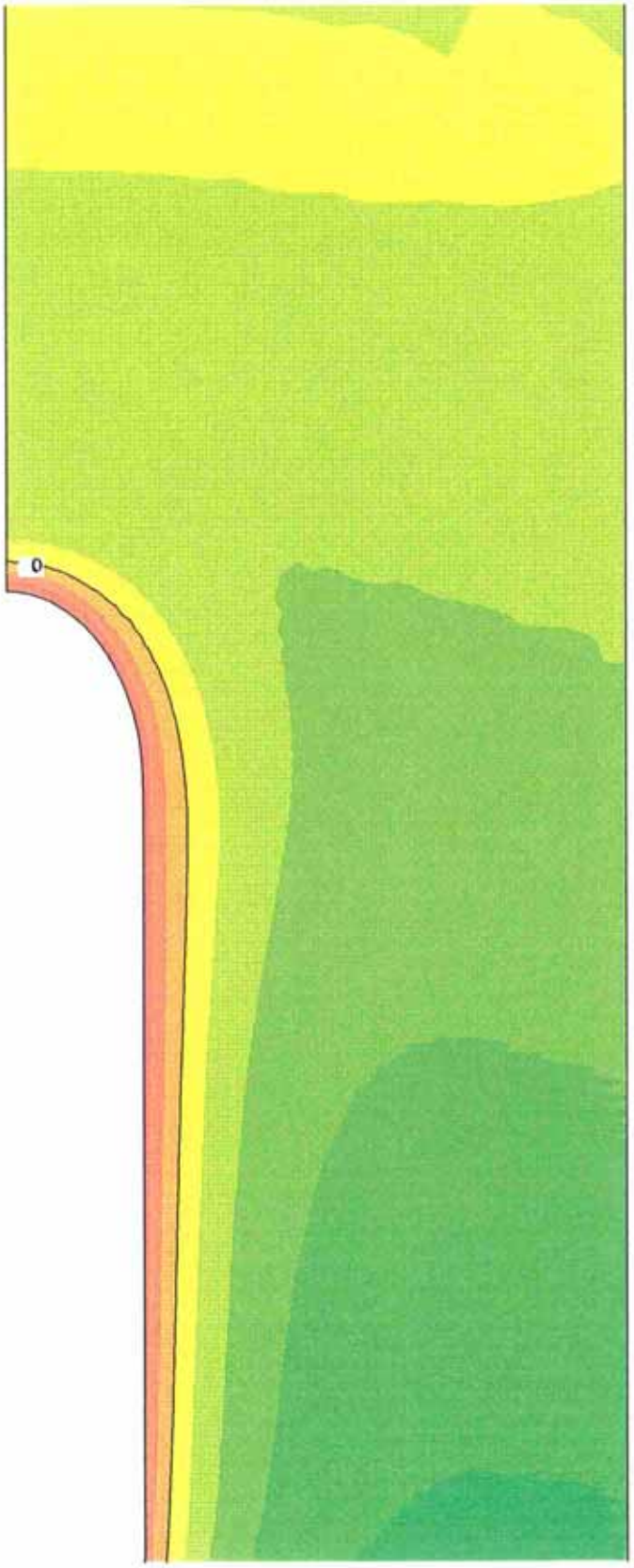
Druckgradientenstufe G = 0.205 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 16.9679 MPa

Bild 7.40



Druckgradientenstufe G = 0.190 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 15.7263 MPa

Bild 7.41



xmin= 0
xmax= 160
ymin= −560
ymax= −160
zmin= −10
zmax= 10

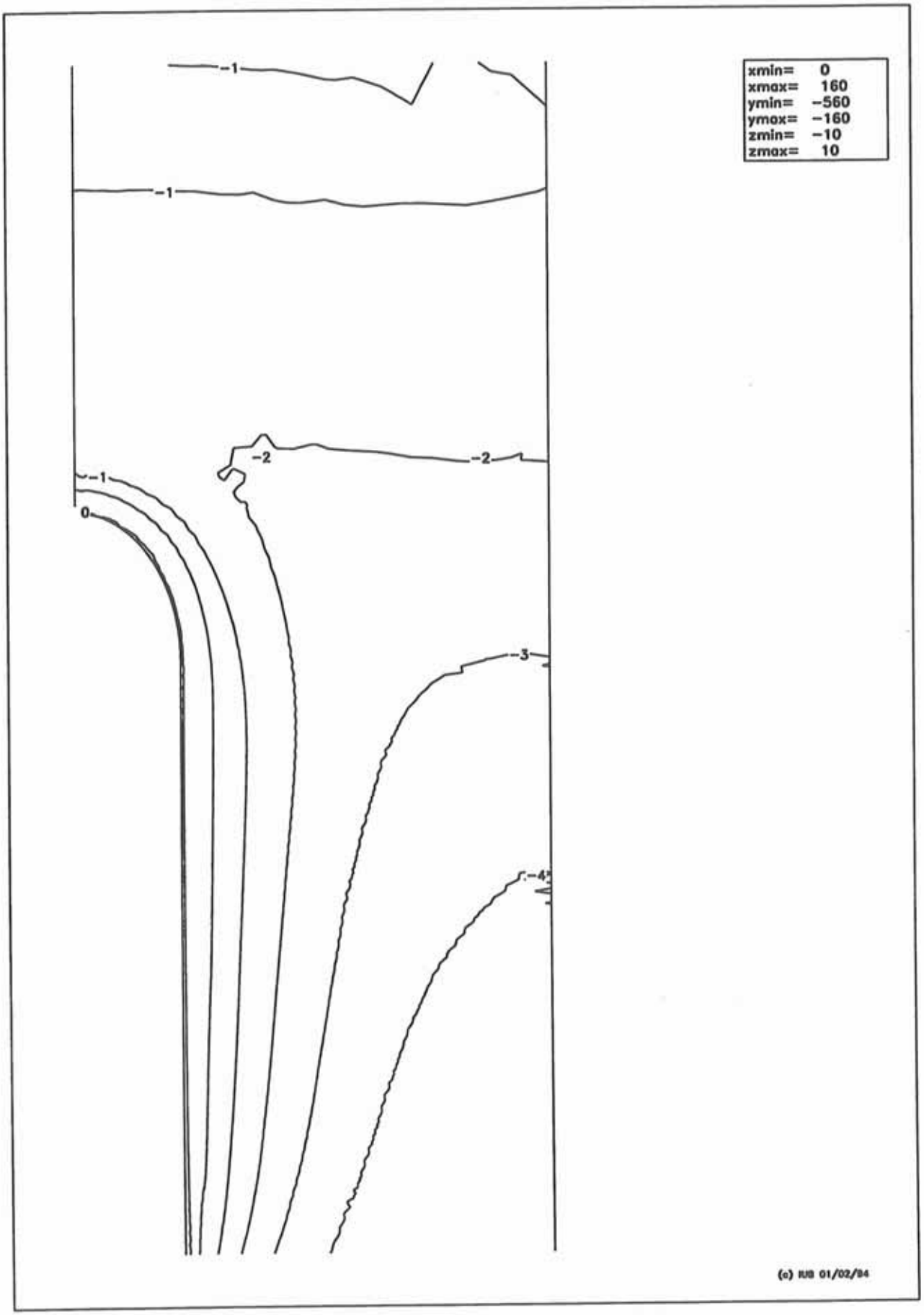
Legende

−4
−3
−2
−1
0
1
2

(c) IUB 01/02/94

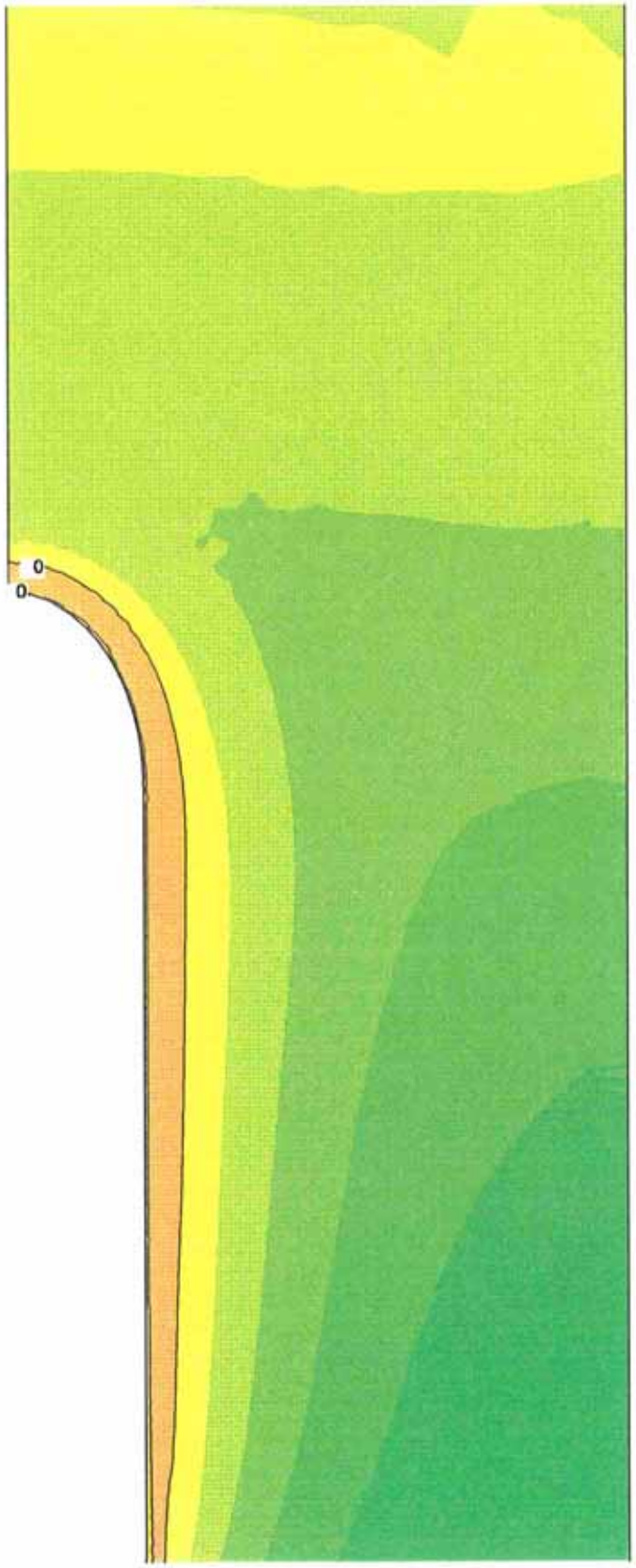
Druckgradientenstufe G = 0.190 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 15.7263 MPa

Bild 7.42



Druckgradientenstufe G = 0.190 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 15.7263 MPa

Bild 7.43



xmin= 0
xmax= 160
ymin= −560
ymax= −160
zmin= −10
zmax= 10

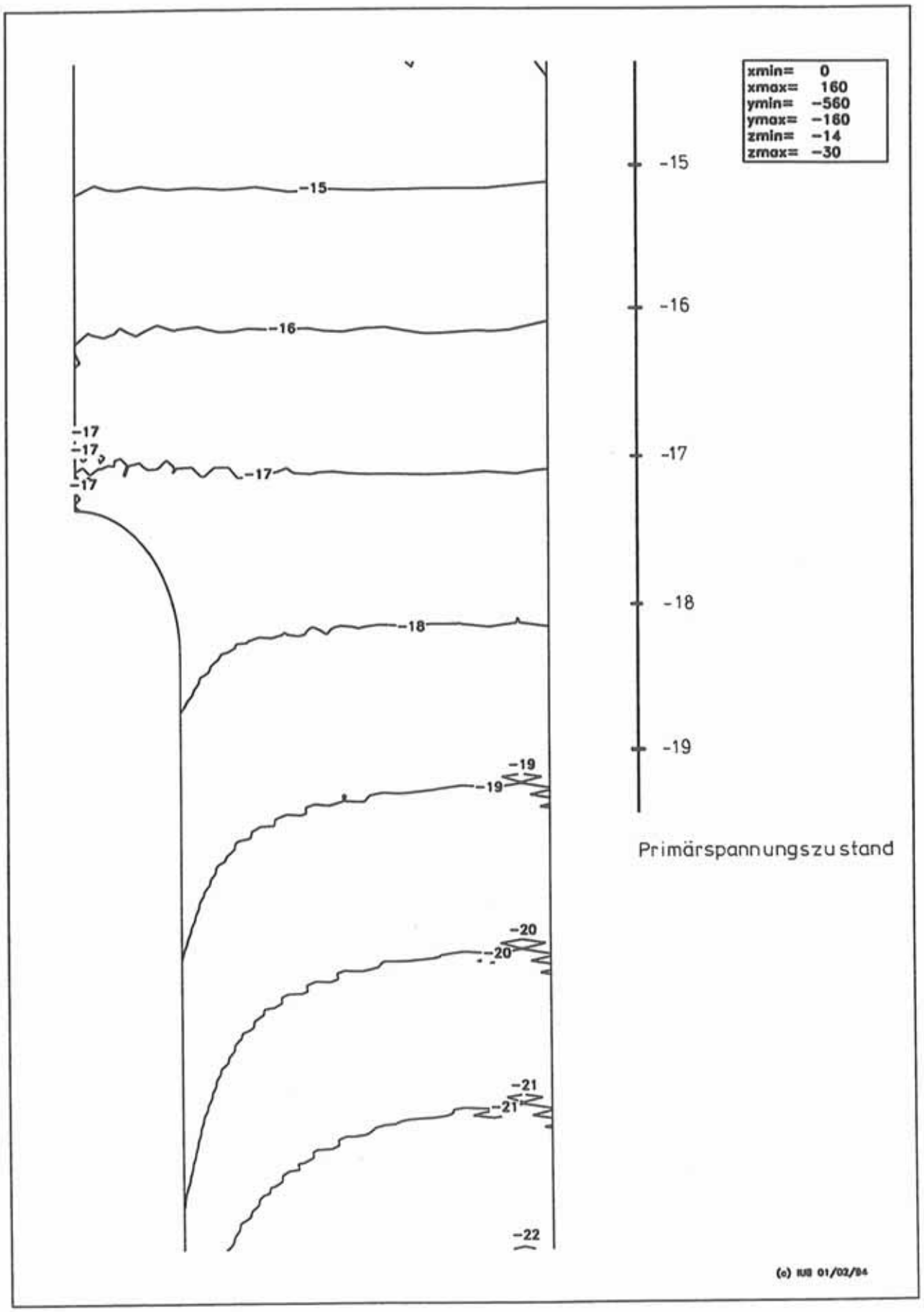
Legende

−4
−3
−2
−1
0
1
2

(c) IUB 01/02/94

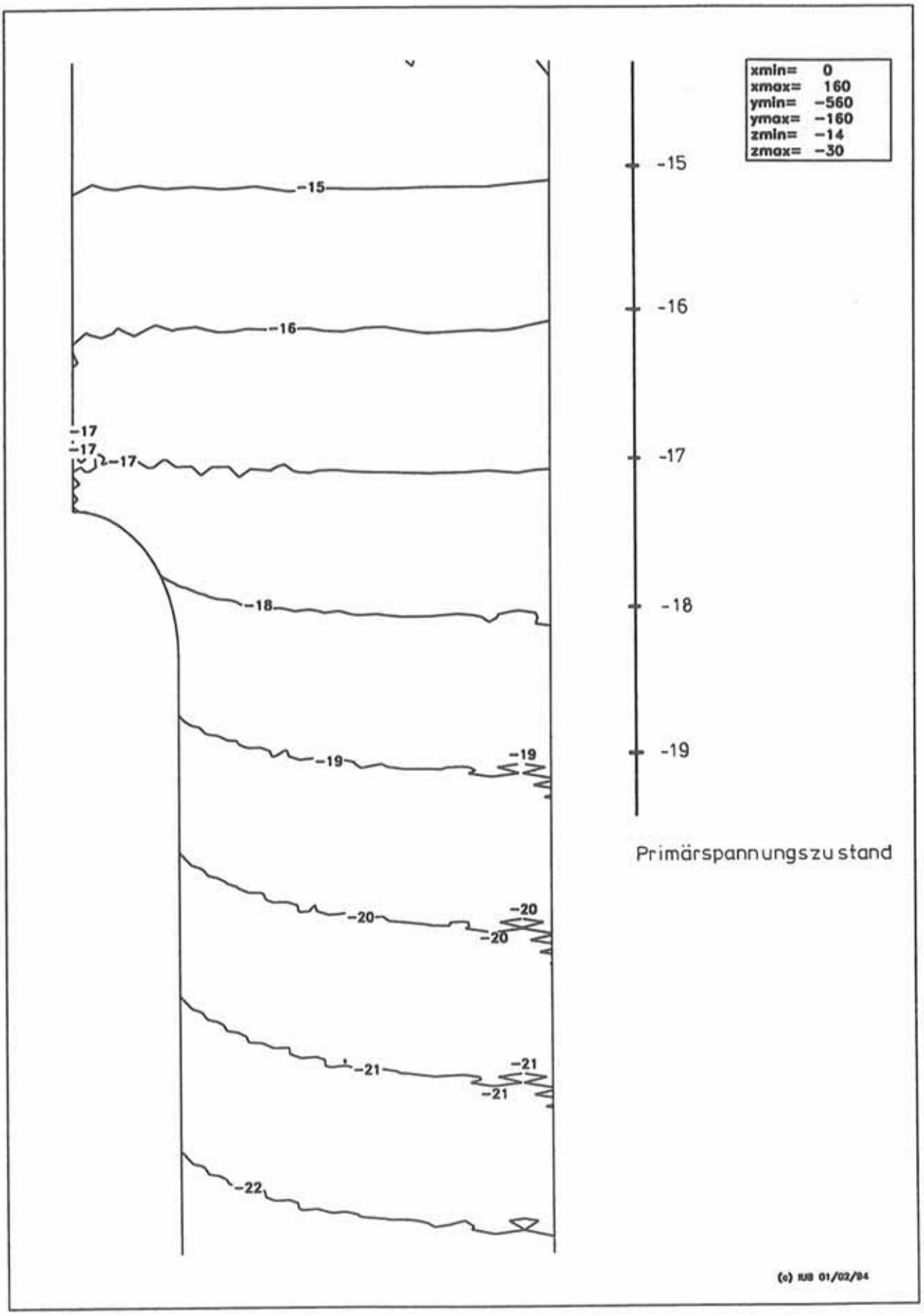
Druckgradientenstufe G = 0.190 bar/m (elast.) – Gebirgsdruck R – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 15.7263 MPa

Bild 7.44



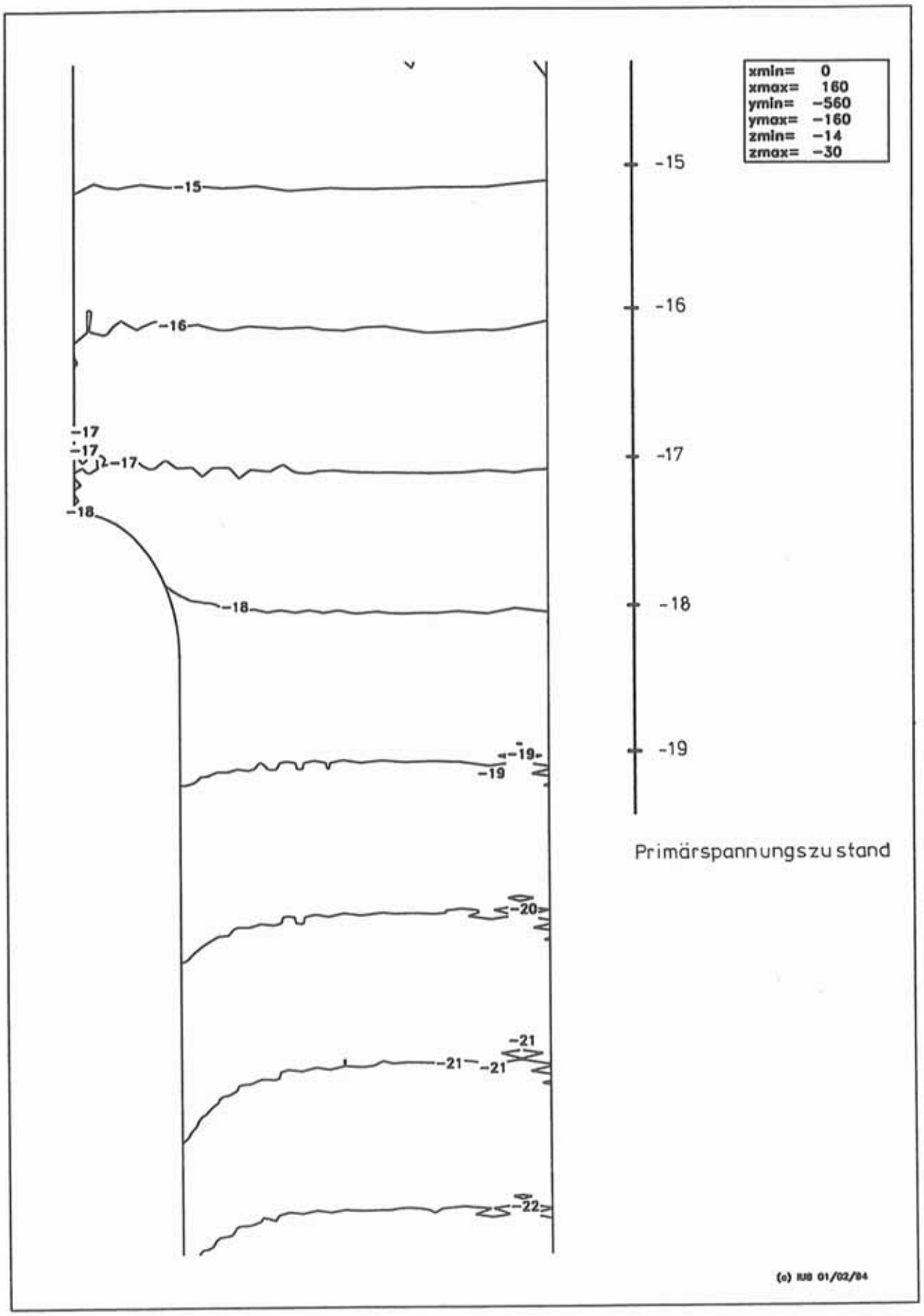
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 1 in RST – Material 1
Hauptspannung 1

Bild 7.45



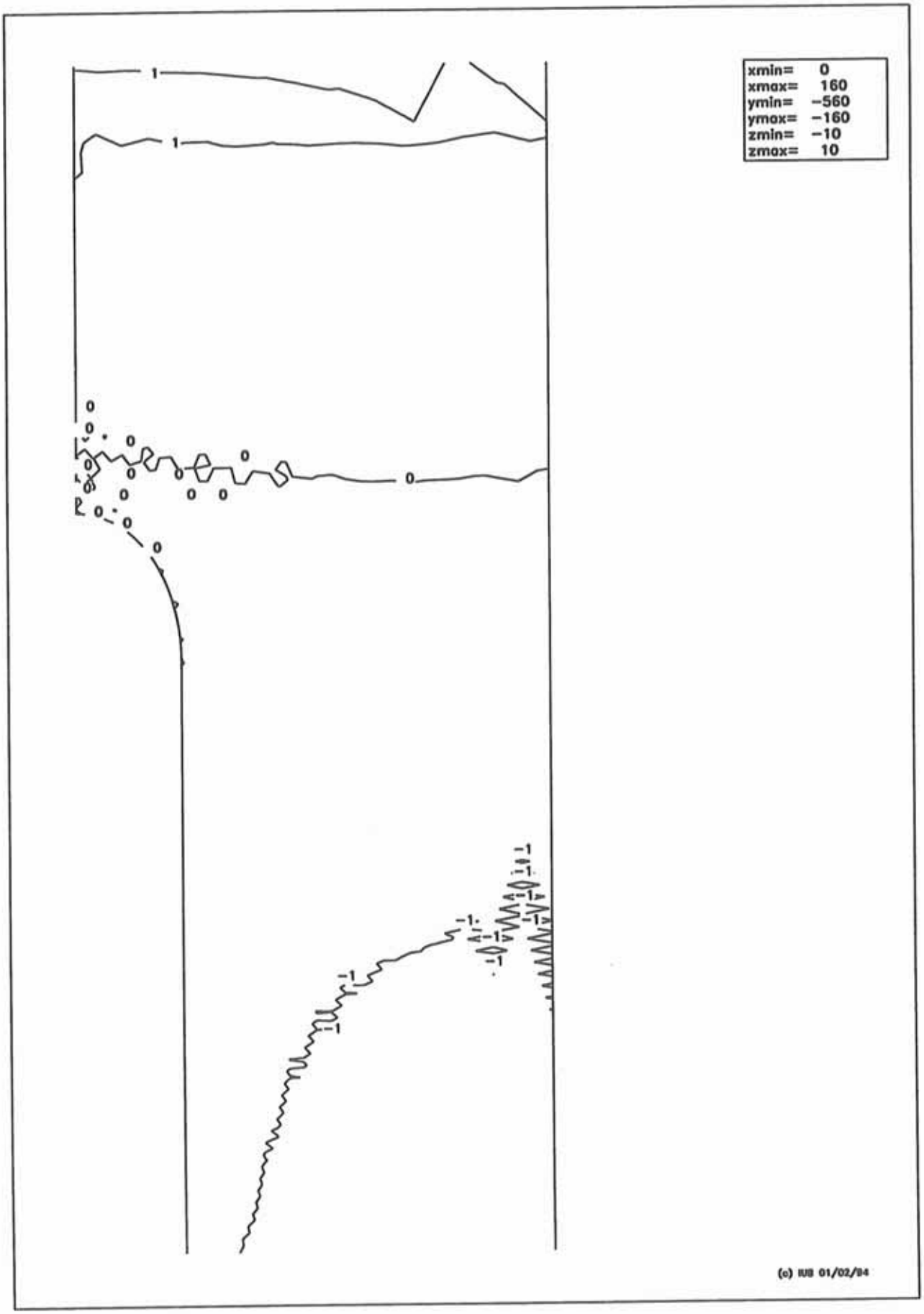
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 1 in RST – Material 1
Hauptspannung Phi

Bild 7.46



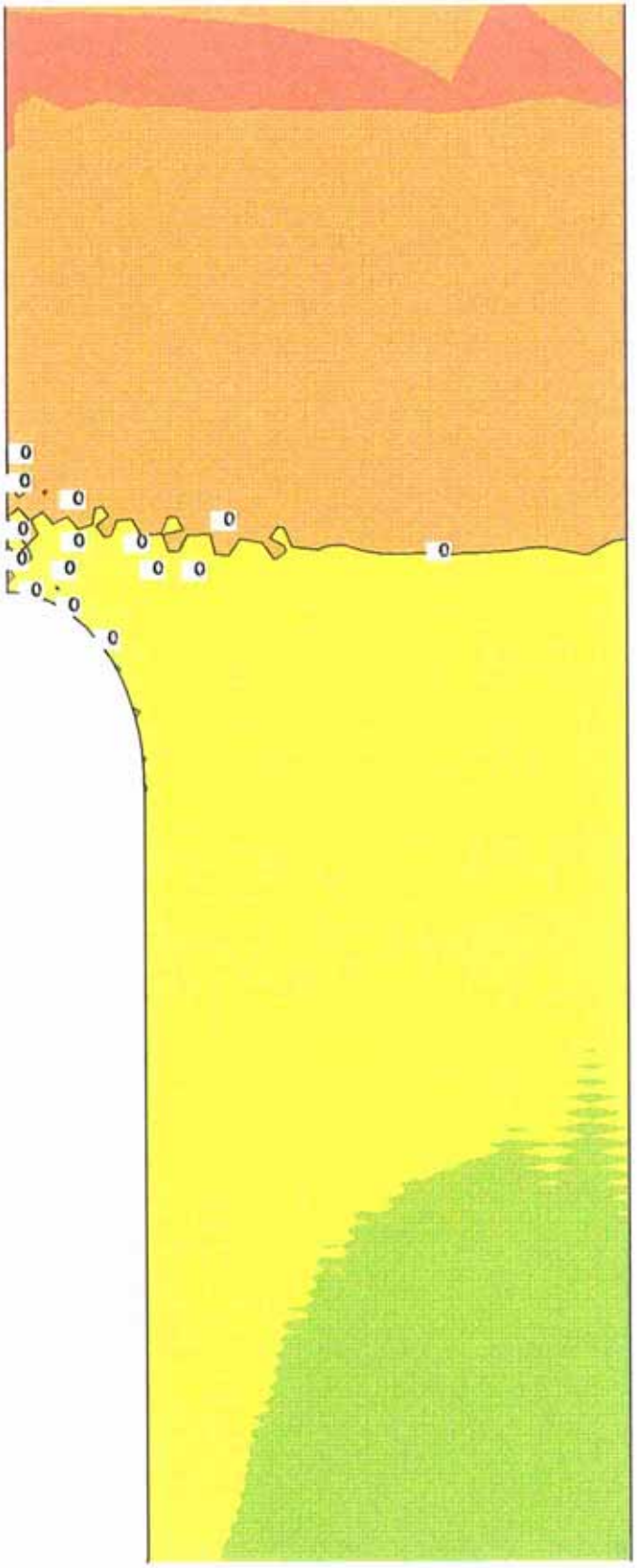
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 1 in RST – Material 1
Hauptspannung 3

Bild 7.47



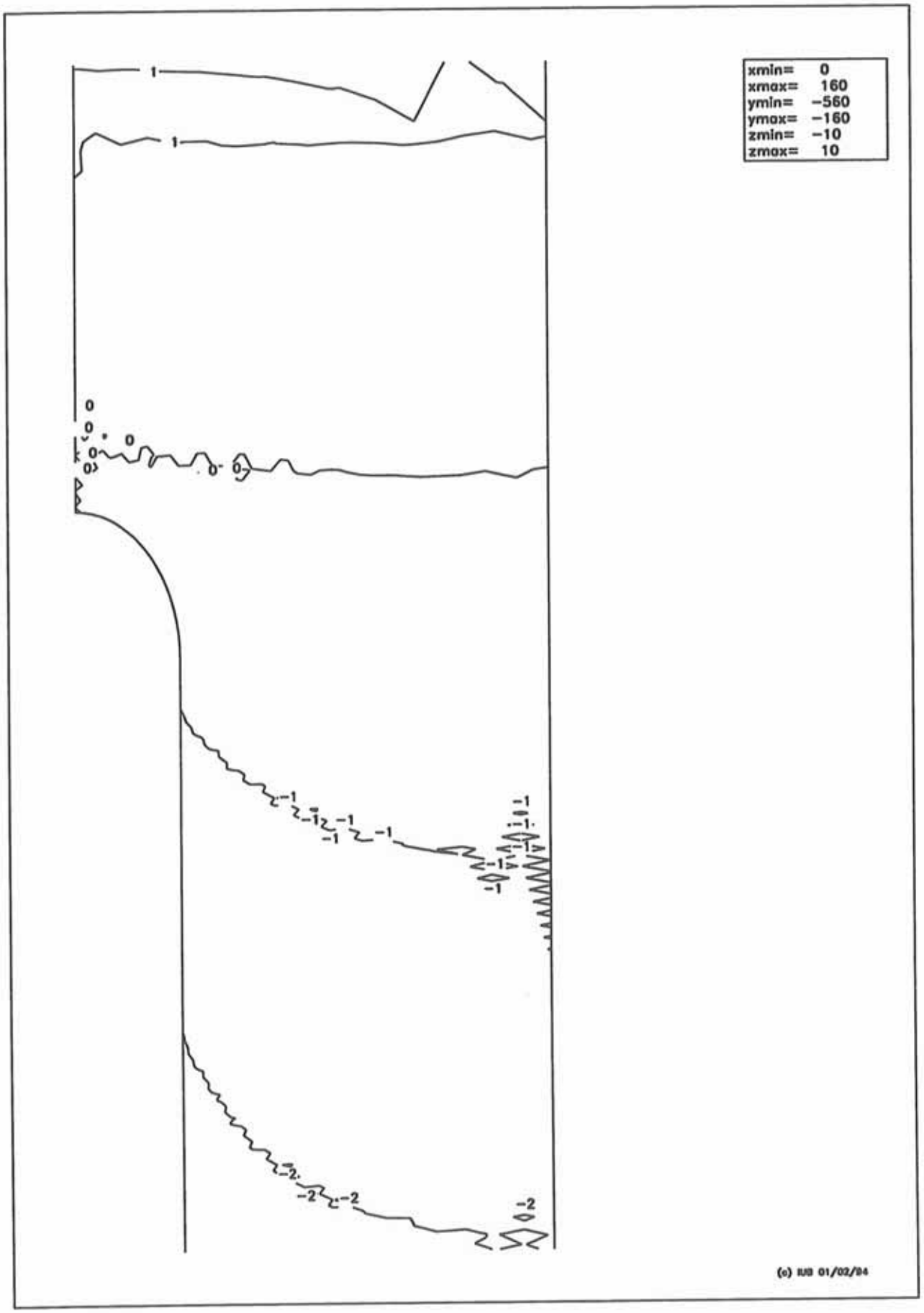
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 1 in RST – Material 1
Differenz Hauptspannung 1 – rel. Soledruck zu RST 16.8875 MPa

Bild 7.48



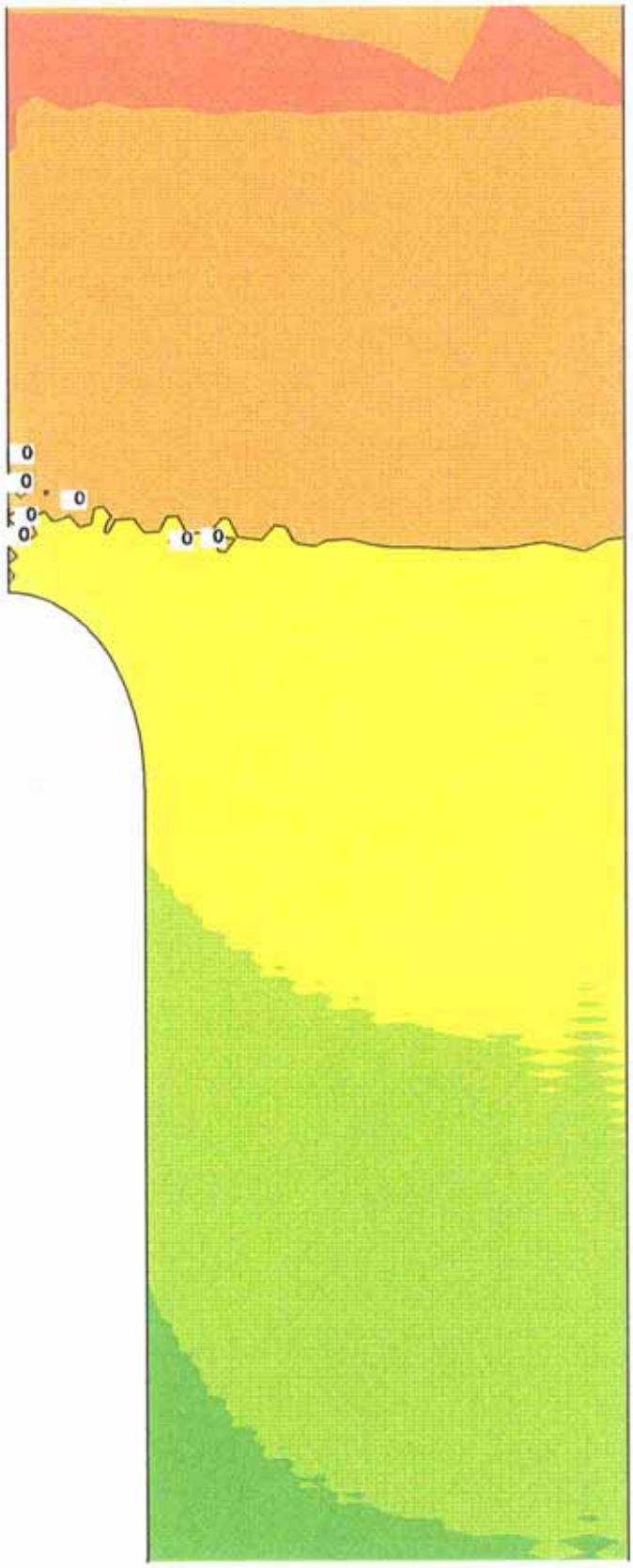
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 1 in RST – Material 1
Differenz Hauptspannung 1 – rel. Soledruck zu RST 16.8875 MPa

Bild 7.49



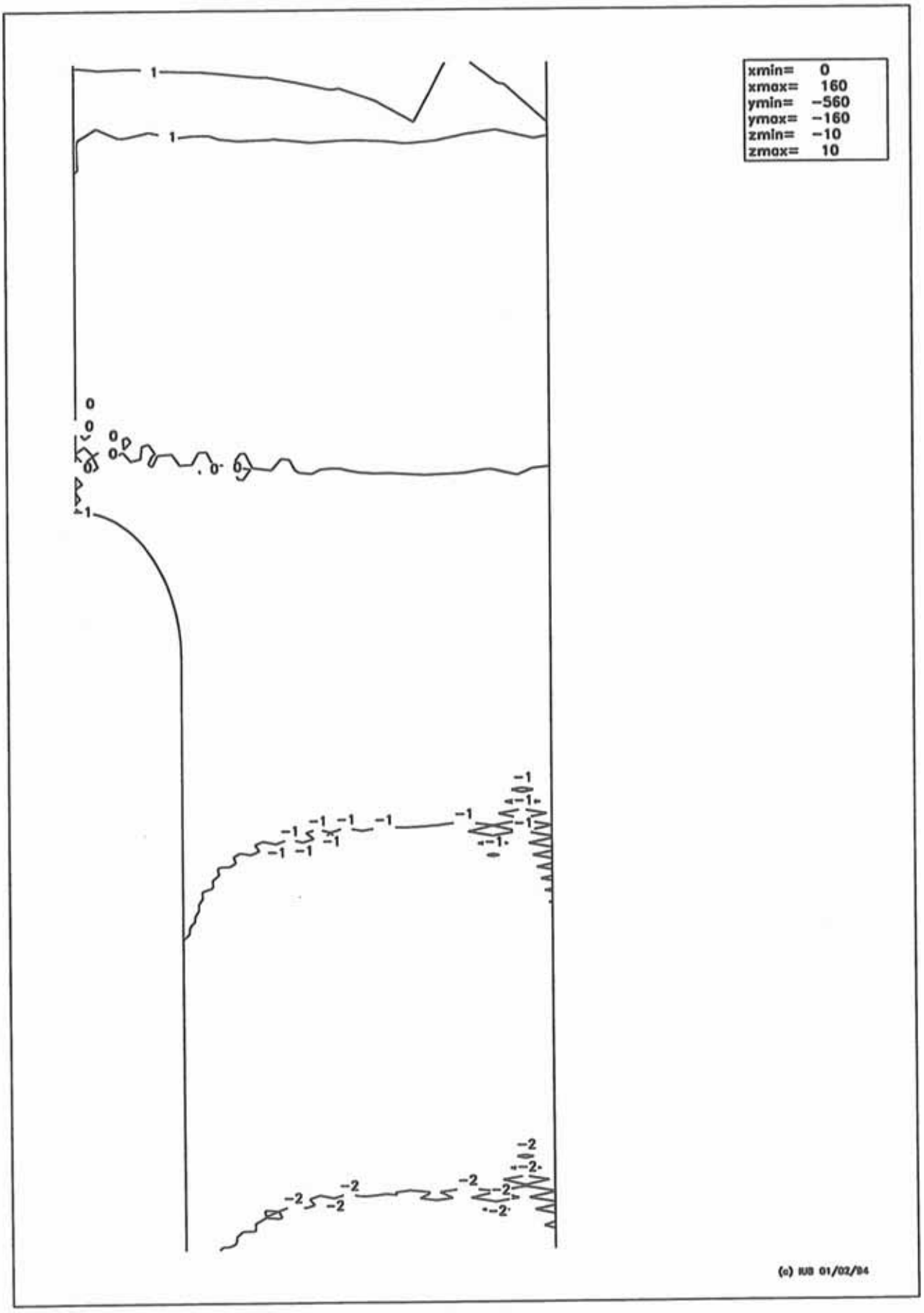
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 1 in RST – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 16.8875 MPa

Bild 7.50



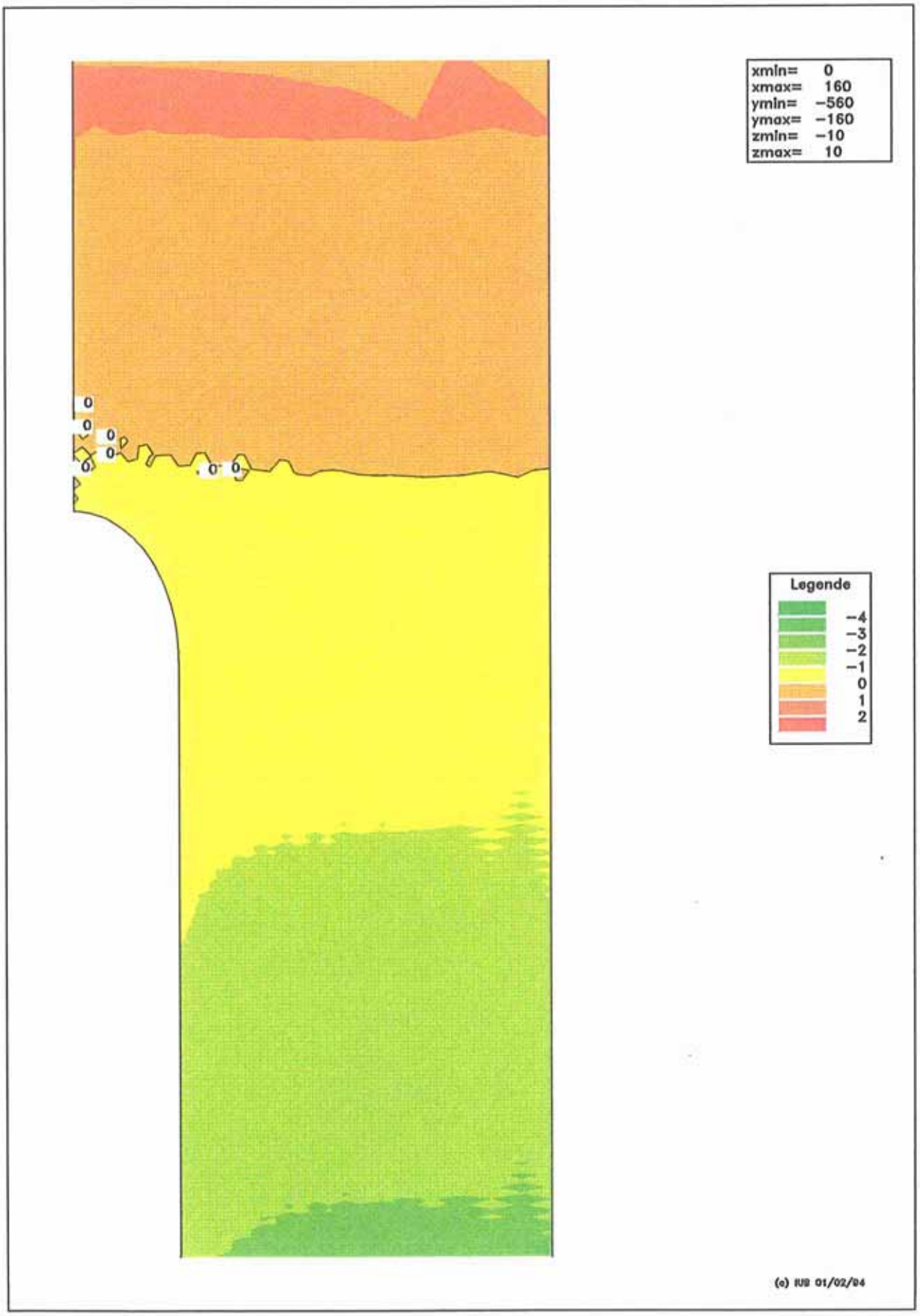
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 1 in RST – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 16.8875 MPa

Bild 7.51



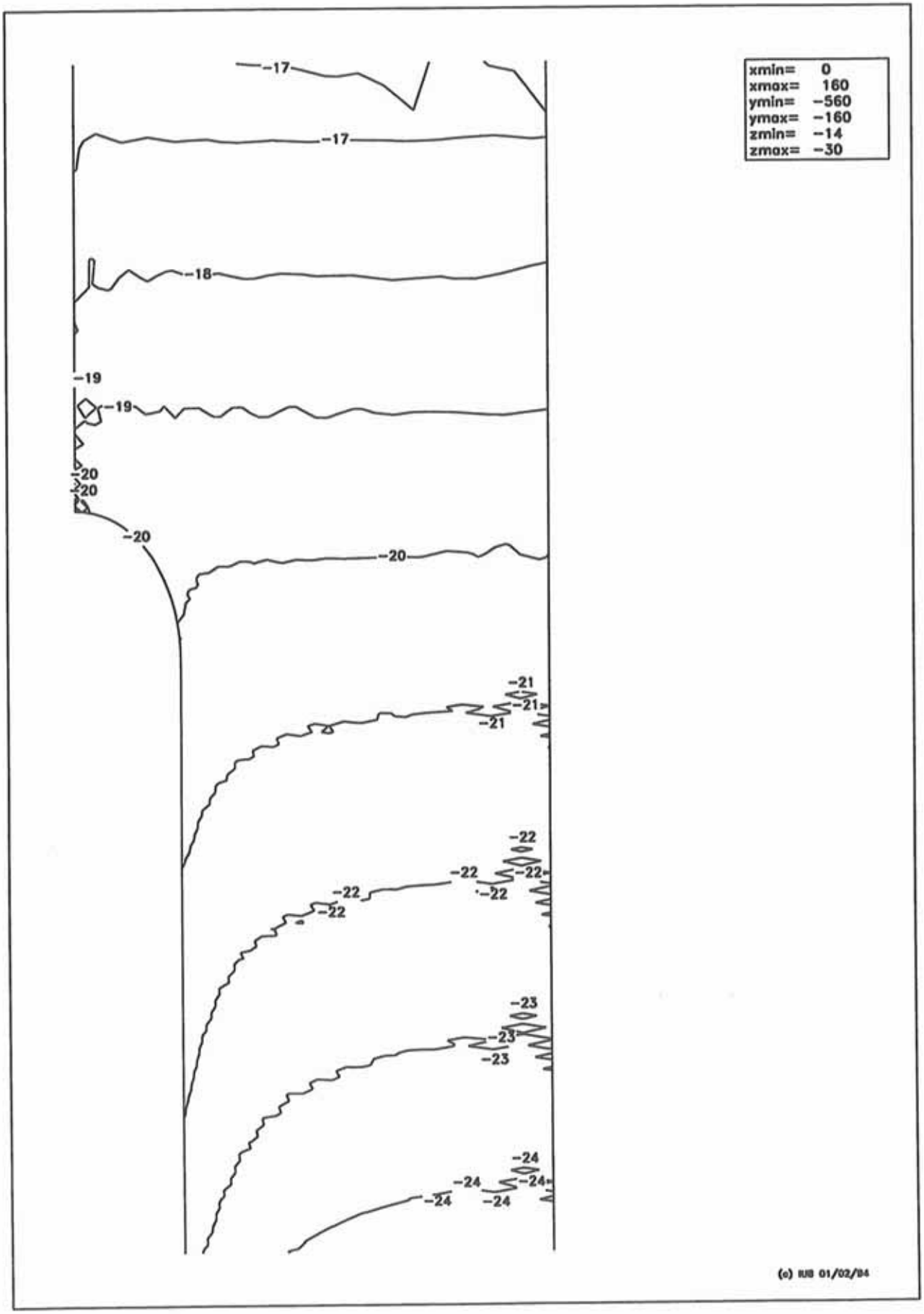
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 1 in RST – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 16.8875 MPa

Bild 7.52



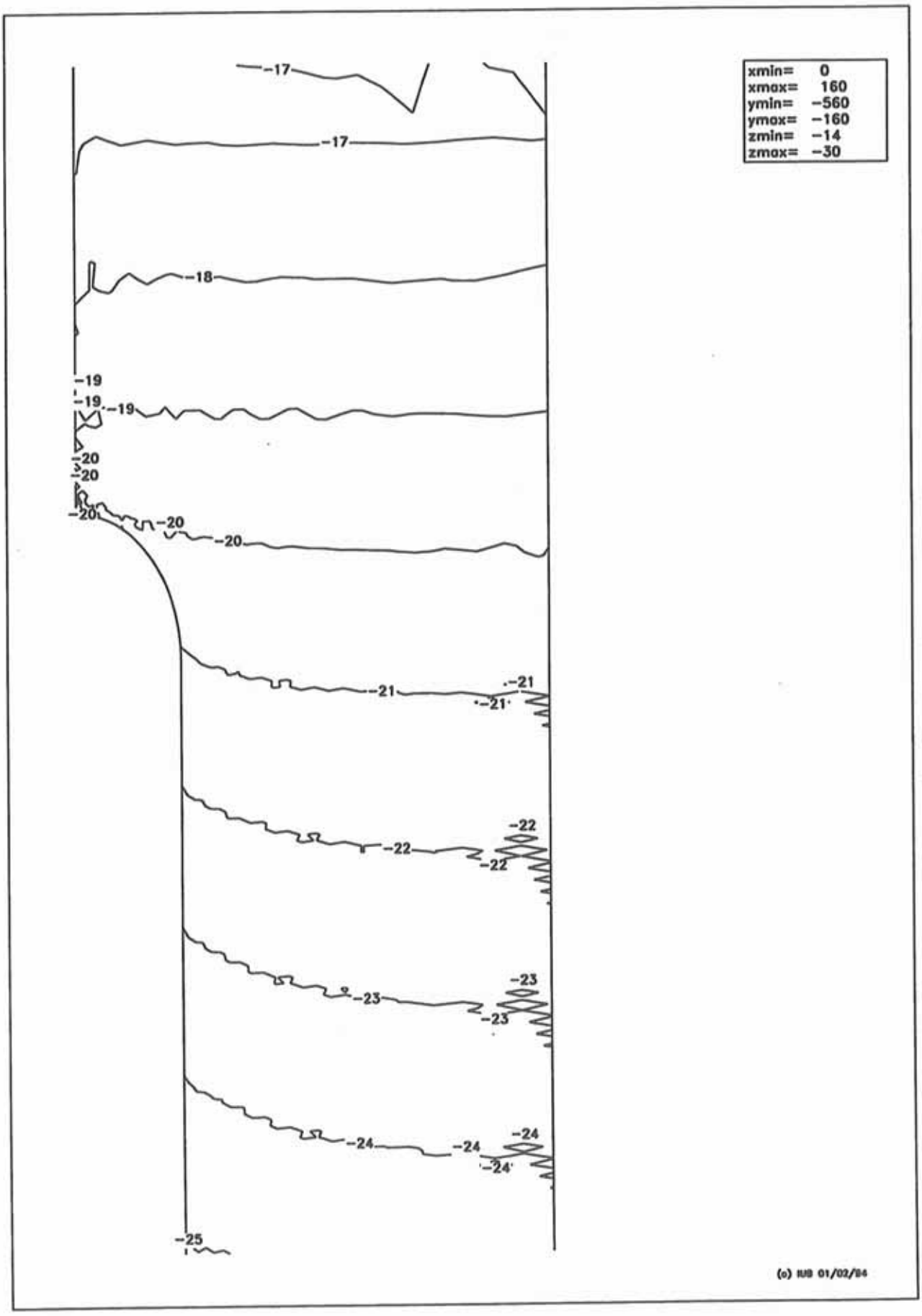
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 1 in RST – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 16.8875 MPa

Bild 7.53



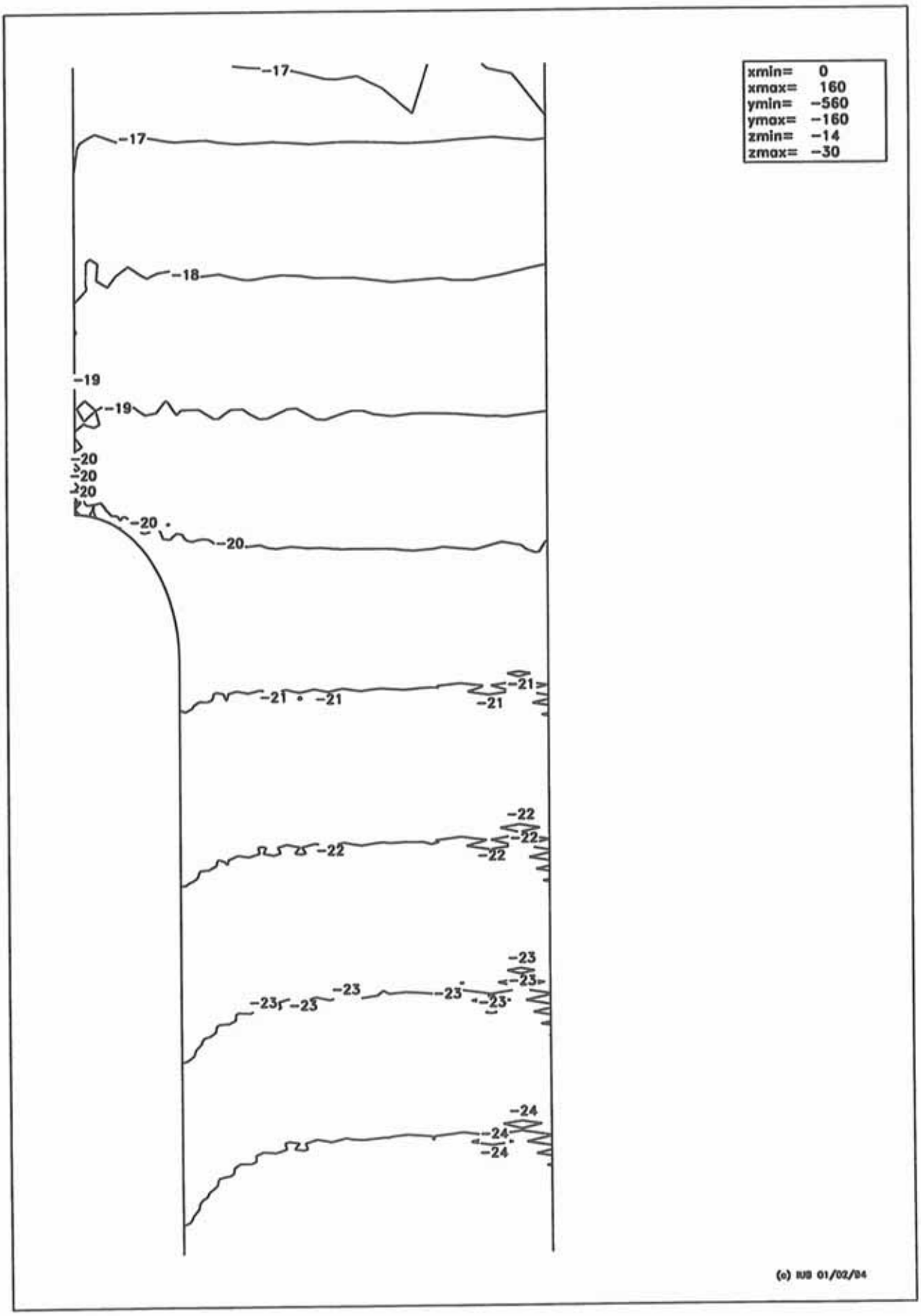
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 2 in RST – Material 1
Hauptspannung 1

Bild 7.54



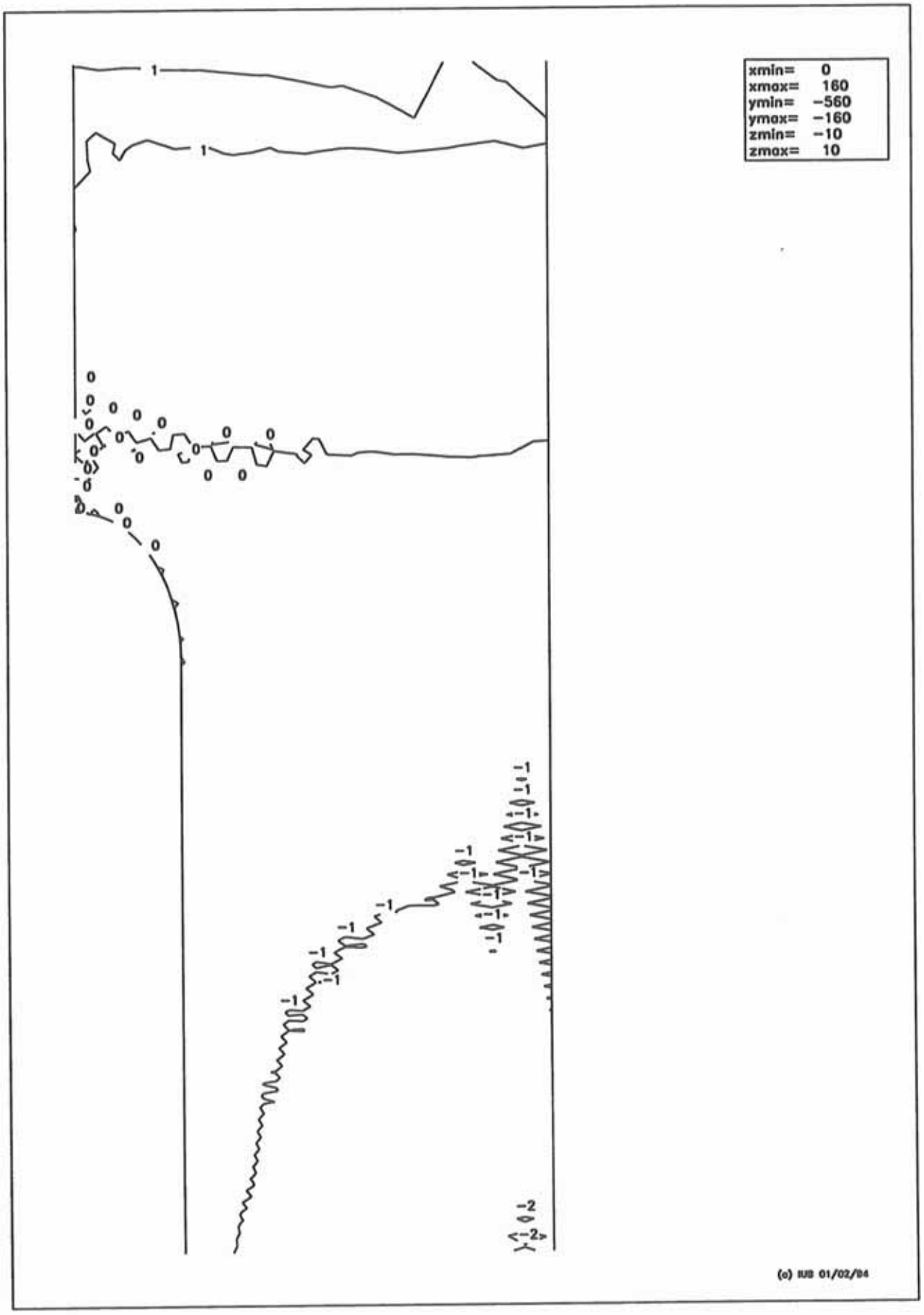
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 2 in RST – Material 1
Hauptspannung Phi

Bild 7.55



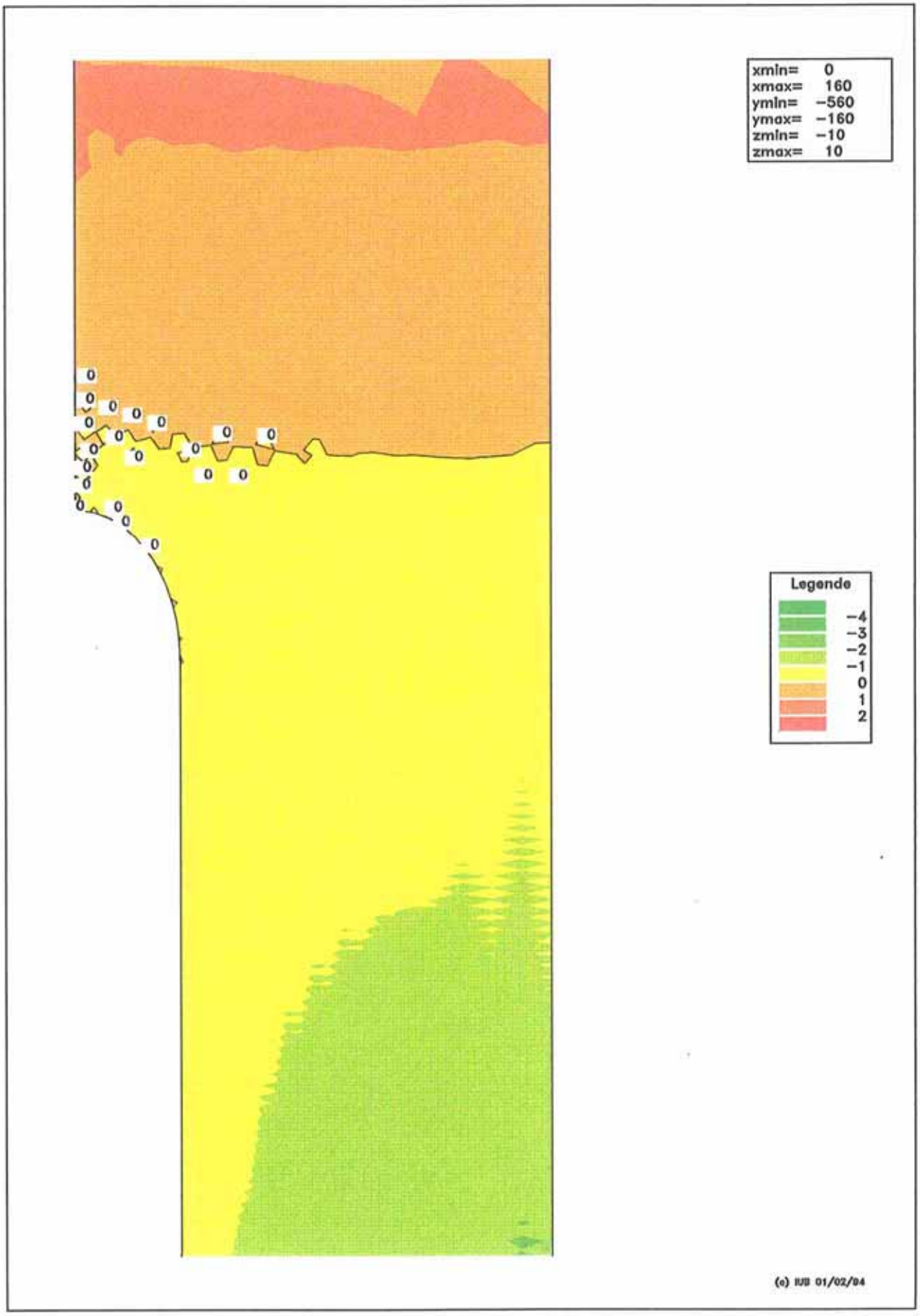
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 2 in RST – Material 1
Hauptspannung 3

Bild 7.56



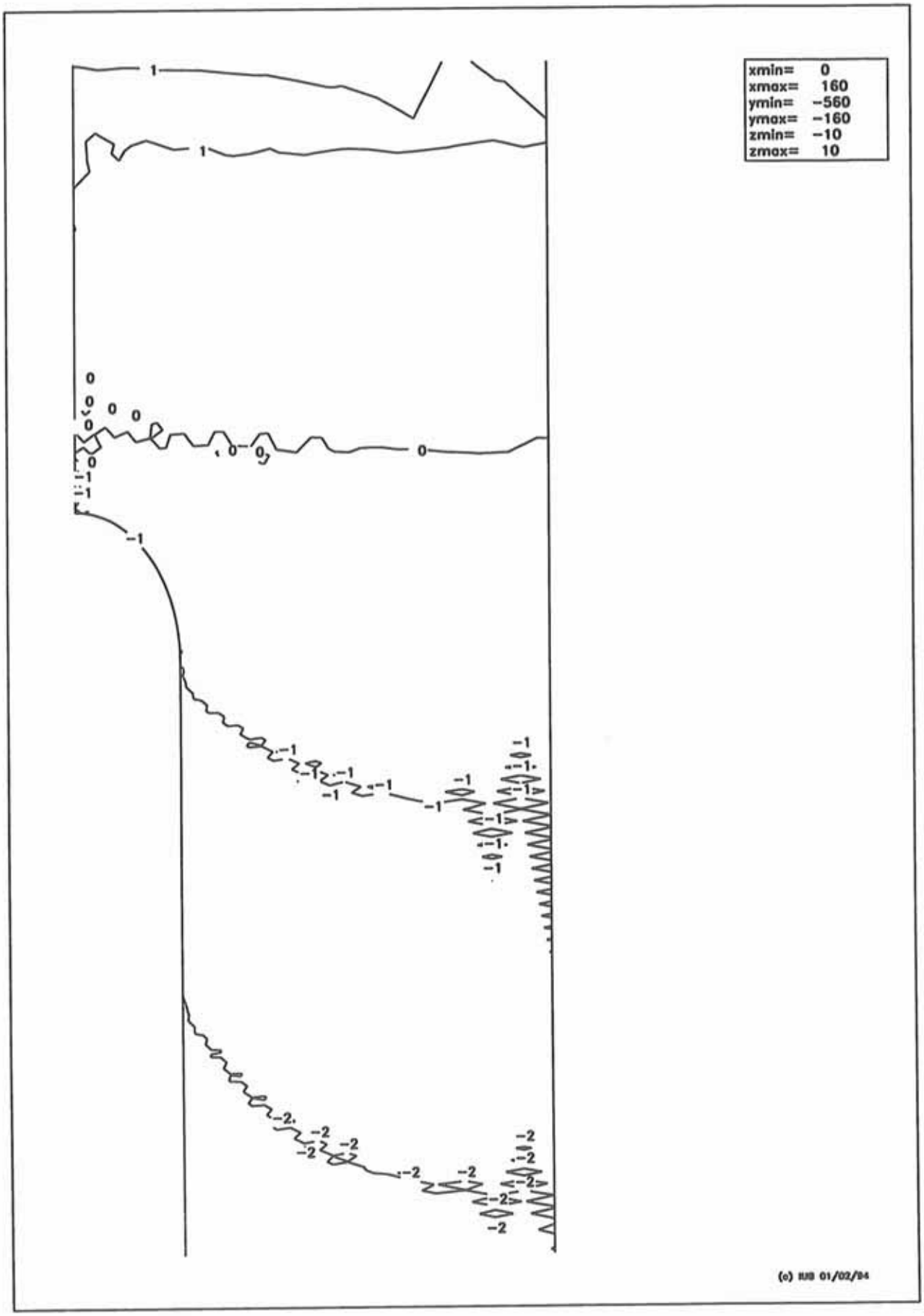
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 2 in RST – Material 1
Differenz Hauptspannung 1 – rel. Soledruck zu RST 19.2444 MPa

Bild 7.57



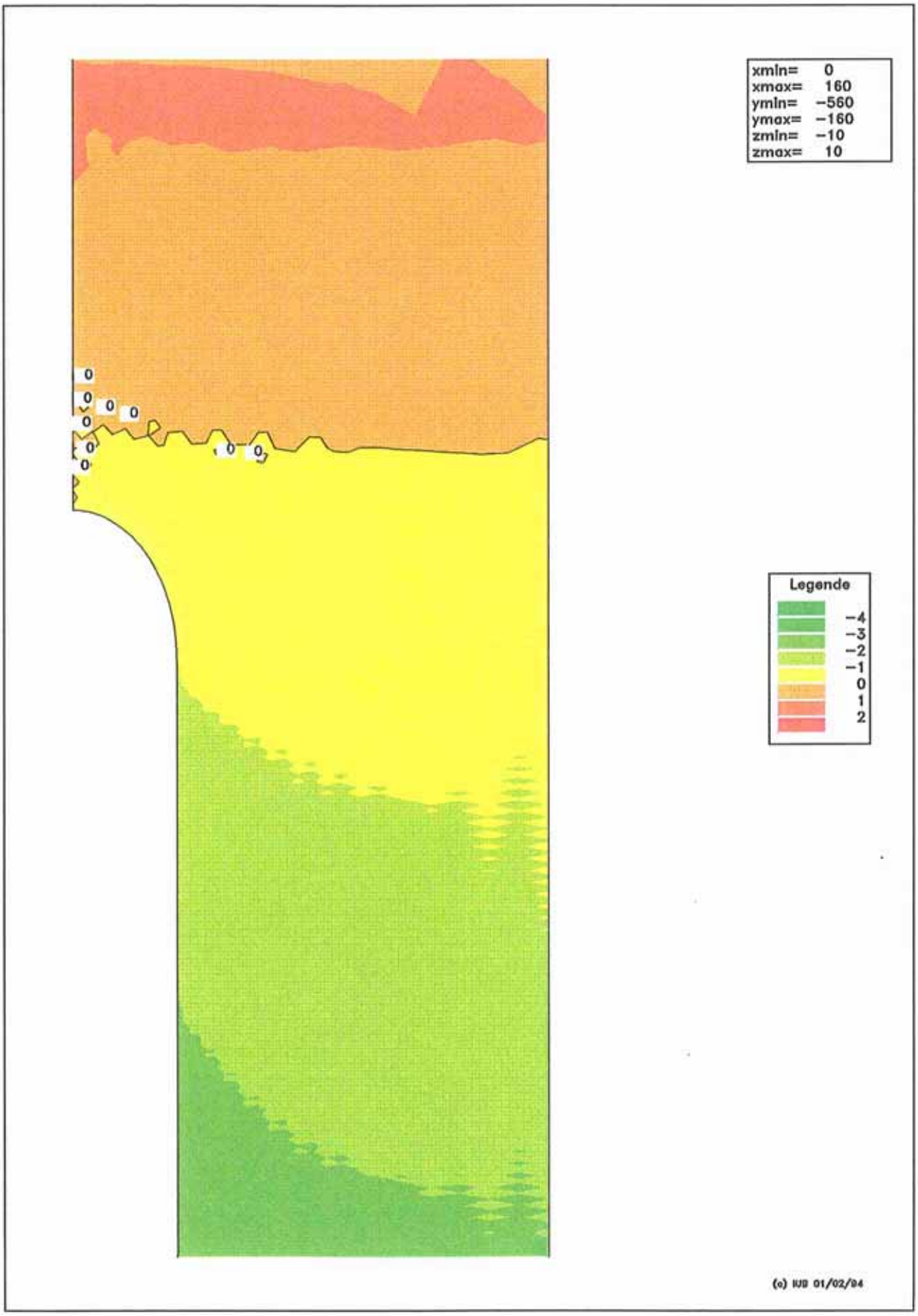
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 2 in RST – Material 1
Differenz Hauptspannung 1 – rel. Soledruck zu RST 19.2444 MPa

Bild 7.58



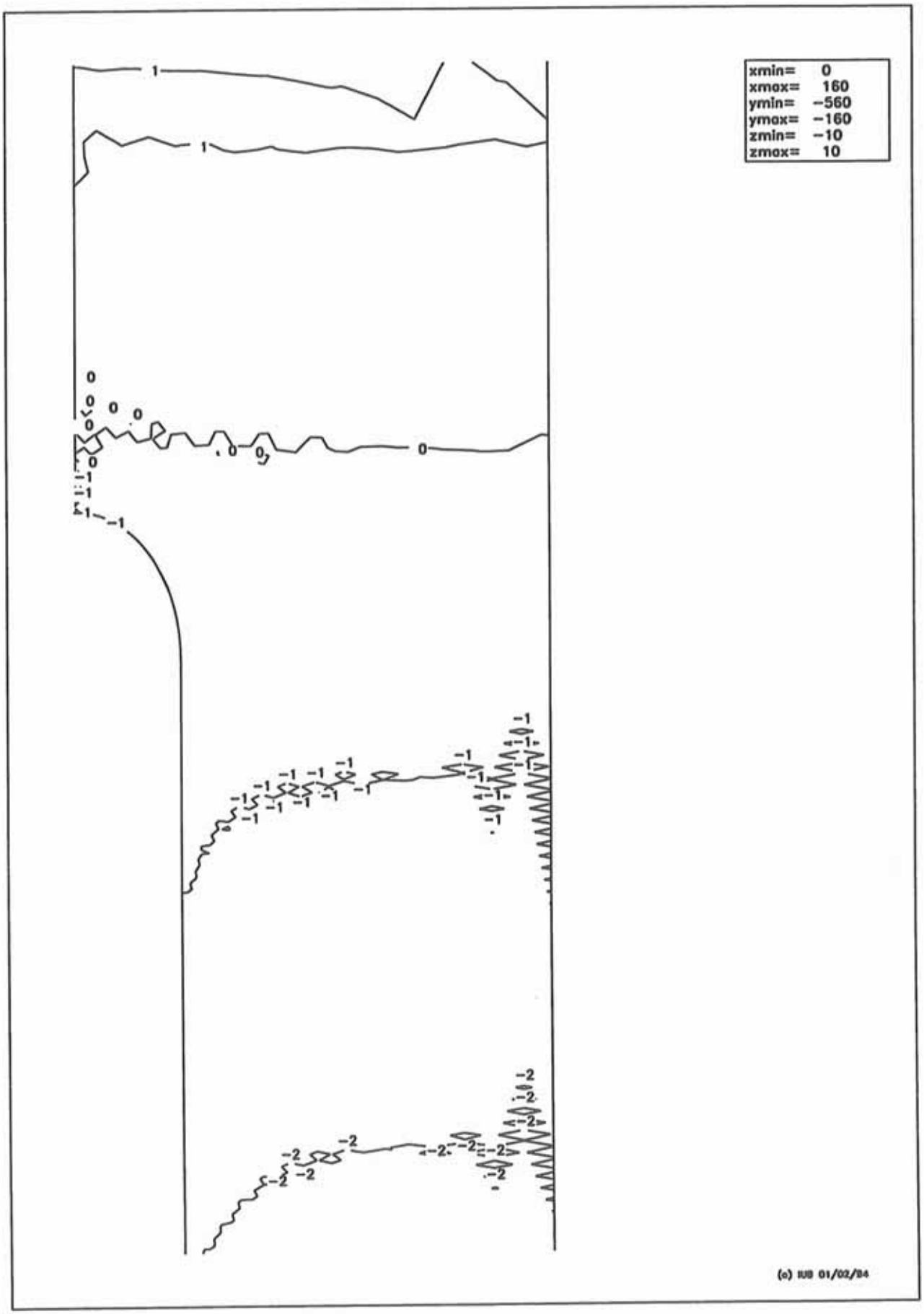
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 2 in RST – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 19.2444 MPa

Bild 7.59



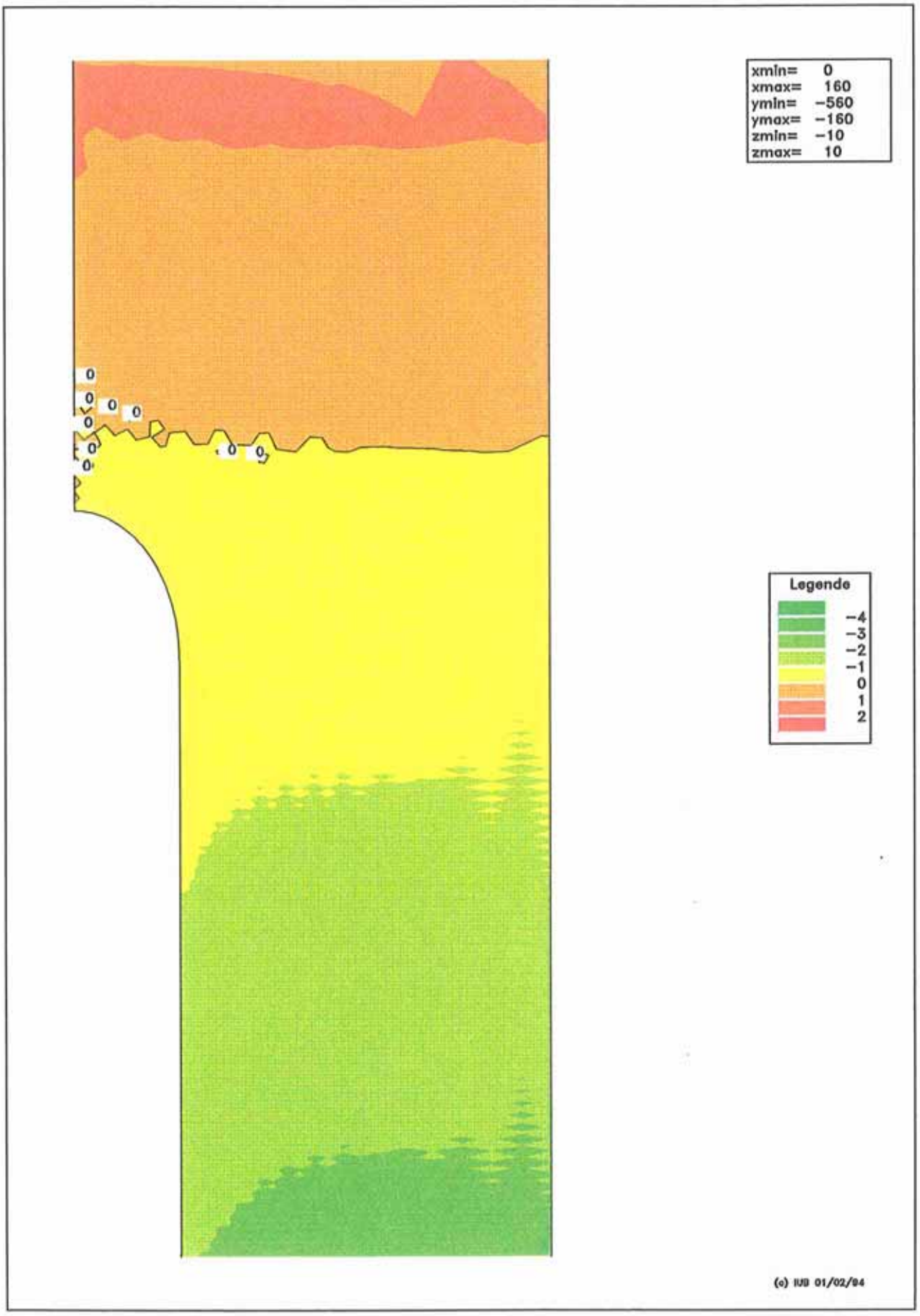
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 2 in RST – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 19.2444 MPa

Bild 7.60



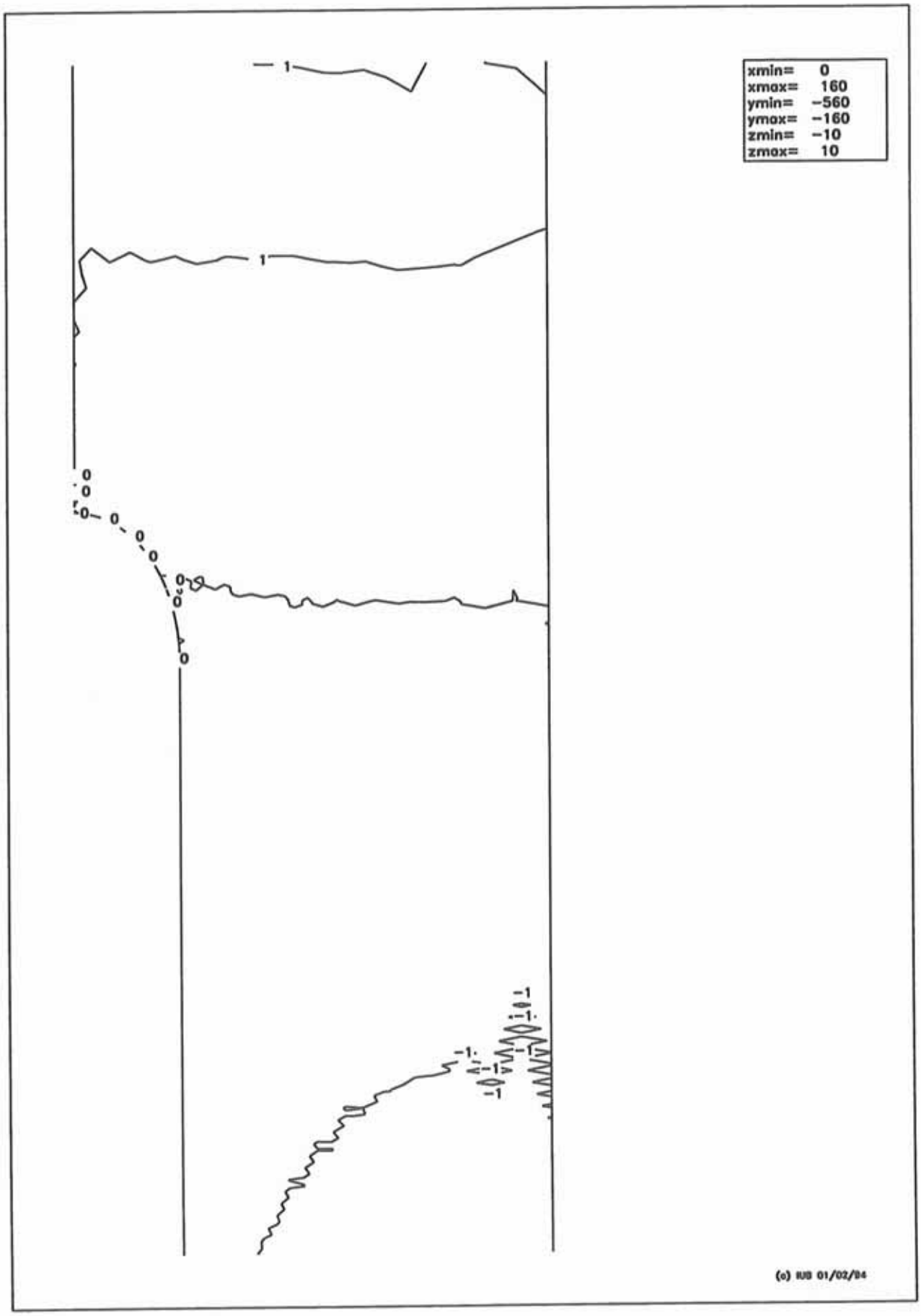
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 2 in RST – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 19.2444 MPa

Bild 7.61



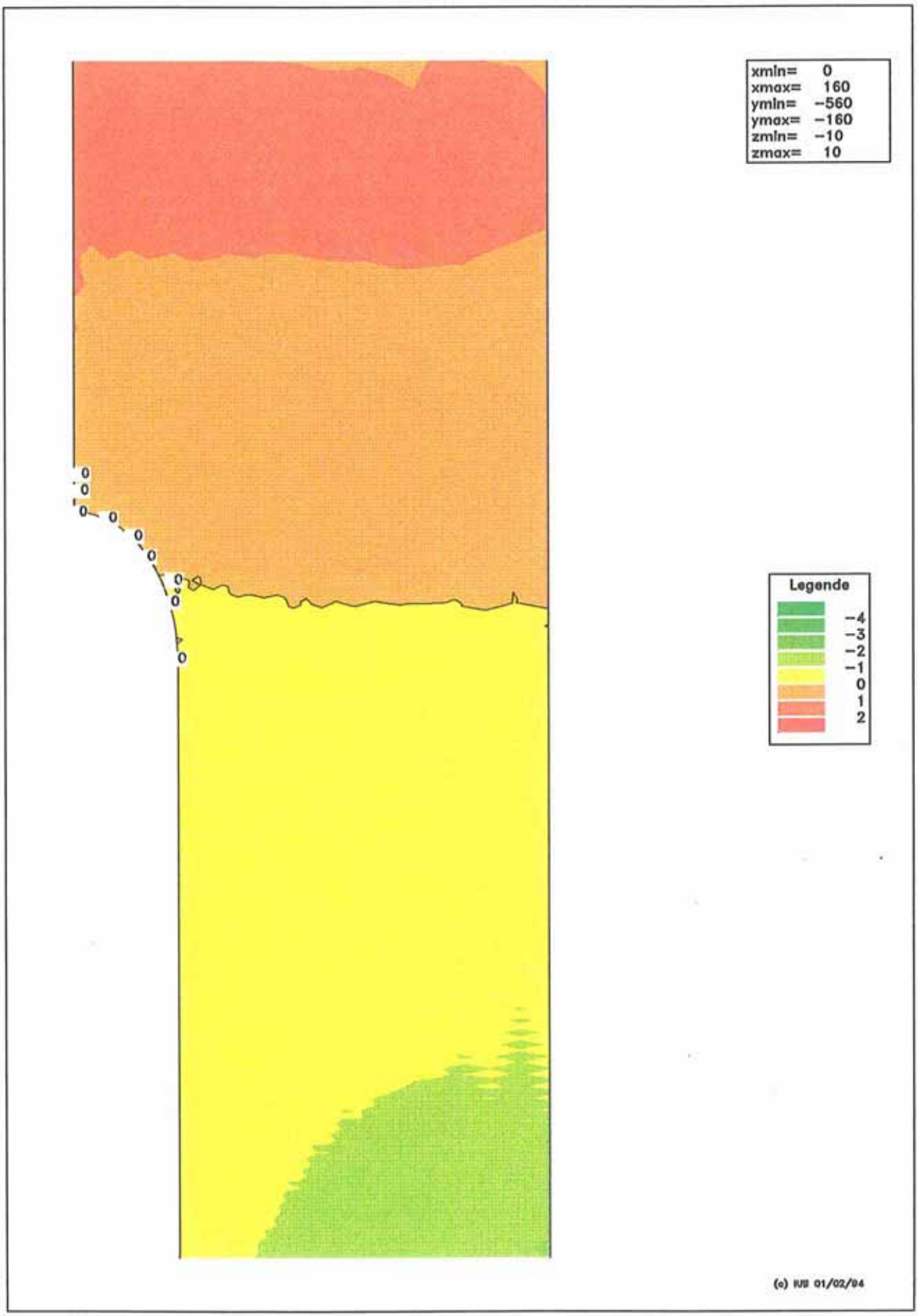
Druckaufbau in 100 Jahren auf Gebirgsdruck 2 in RST – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 19.2444 MPa

Bild 7.62



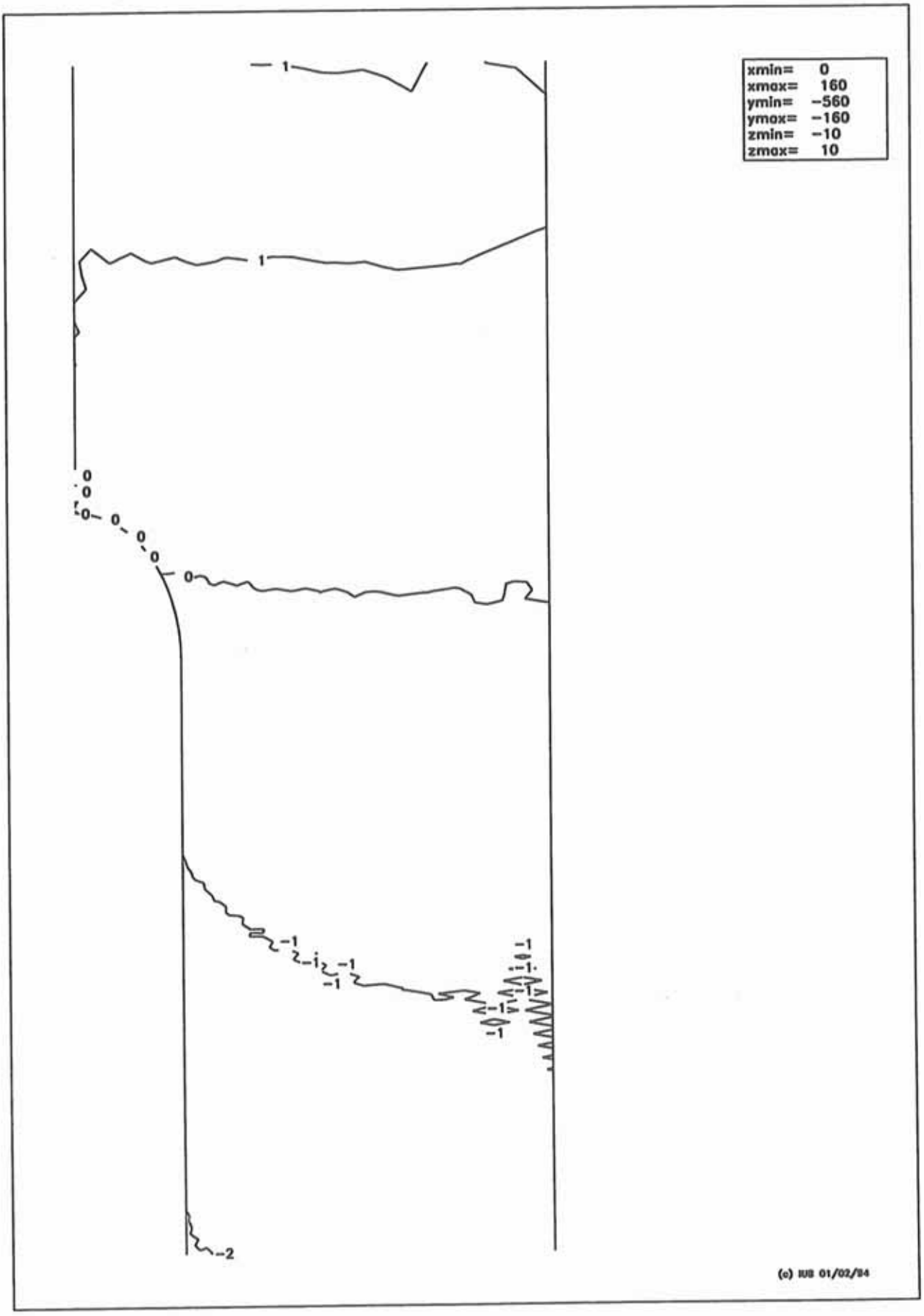
Druckaufbau in 105 Jahren auf Gebirgsdruck 1 im Dach – Material 1
Differenz Hauptspannung 1 – rel. Soledruck zu RST 17.2373 MPa

Bild 7.63



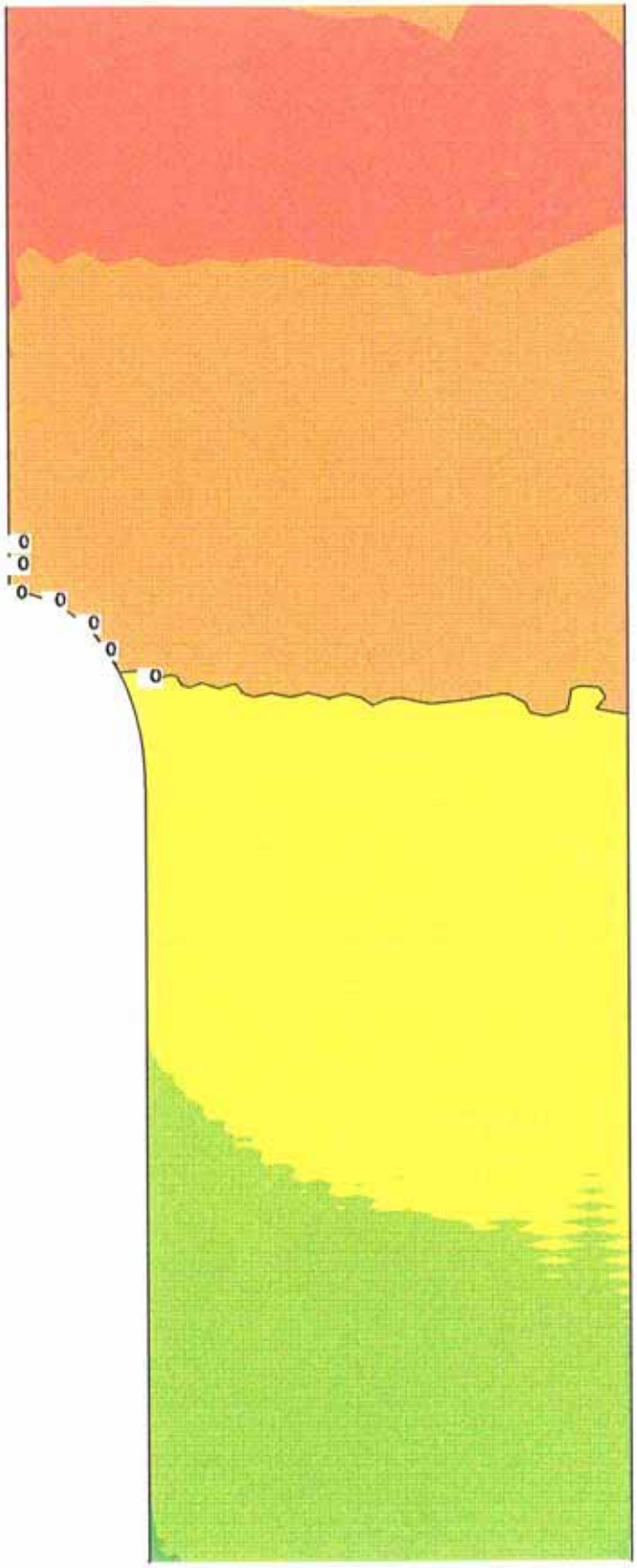
Druckaufbau in 105 Jahren auf Gebirgsdruck 1 im Dach – Material 1
Differenz Hauptspannung 1 – rel. Soledruck zu RST 17.2373 MPa

Bild 7.64



Druckaufbau in 105 Jahren auf Gebirgsdruck 1 im Dach – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 17.2373 MPa

Bild 7.65



xmin= 0
xmax= 160
ymin= −560
ymax= −160
zmin= −10
zmax= 10

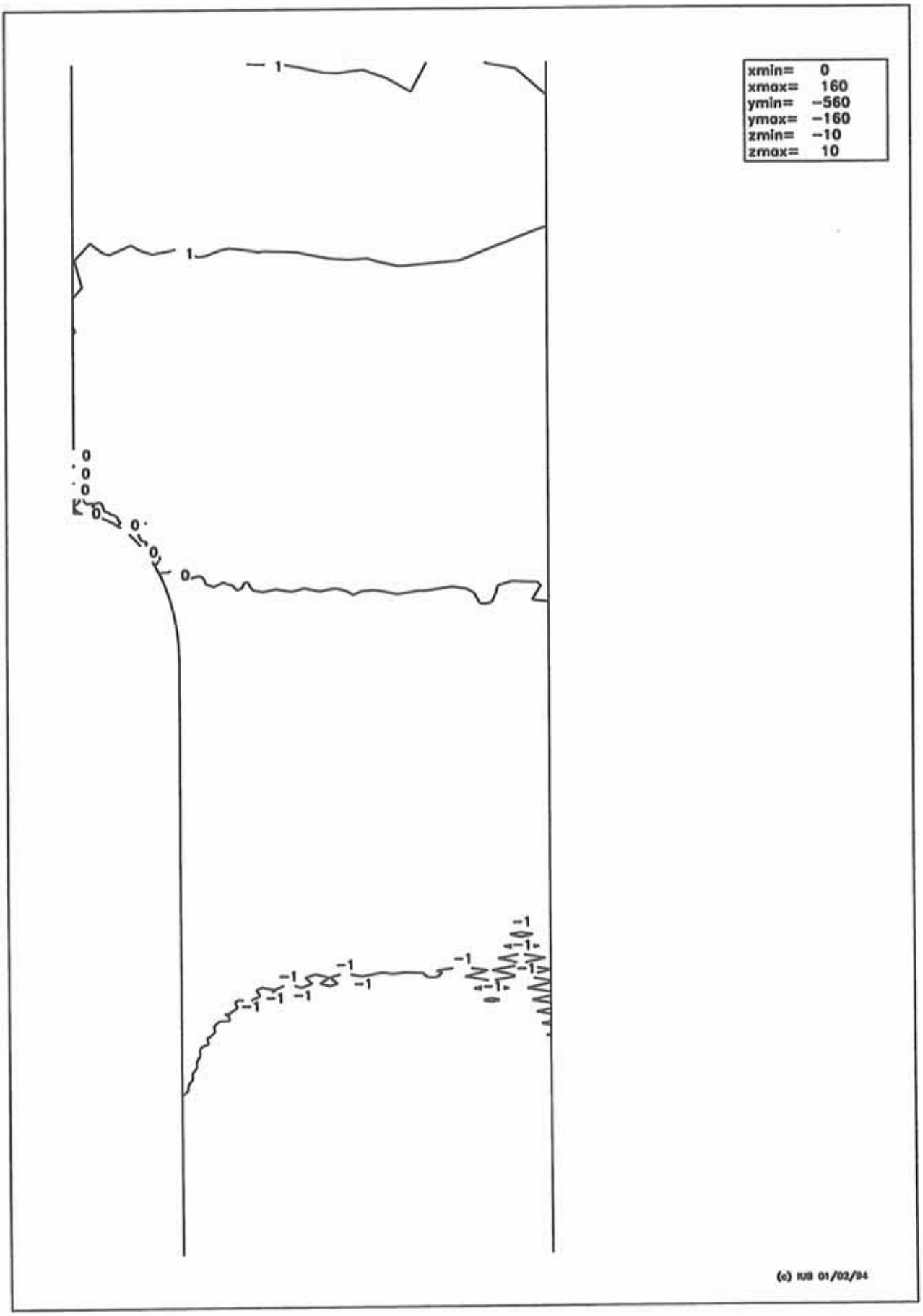
Legende

−4
−3
−2
−1
0
1
2

(c) IUB 01/02/94

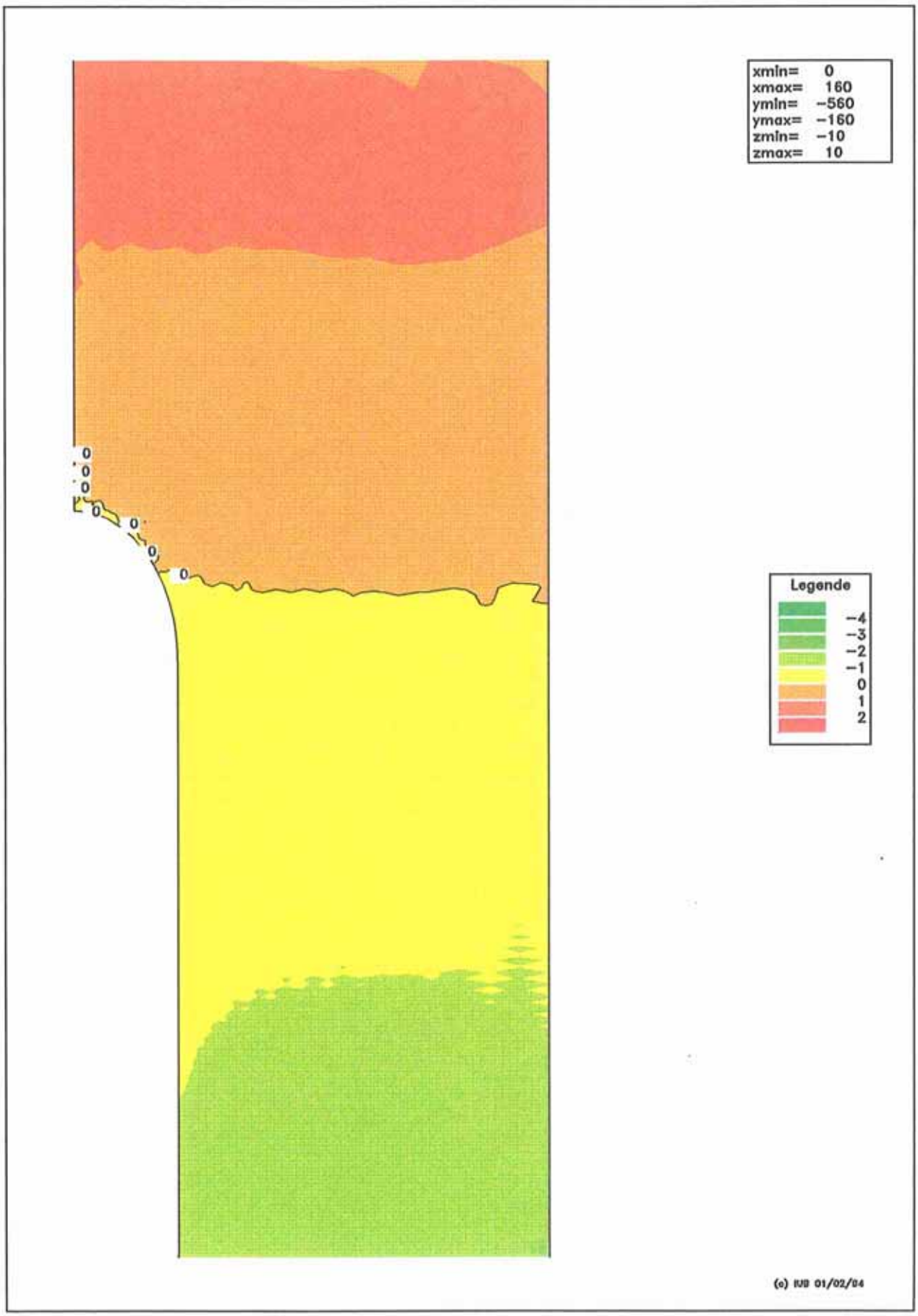
Druckaufbau in 105 Jahren auf Gebirgsdruck 1 im Dach – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 17.2373 MPa

Bild 7.66



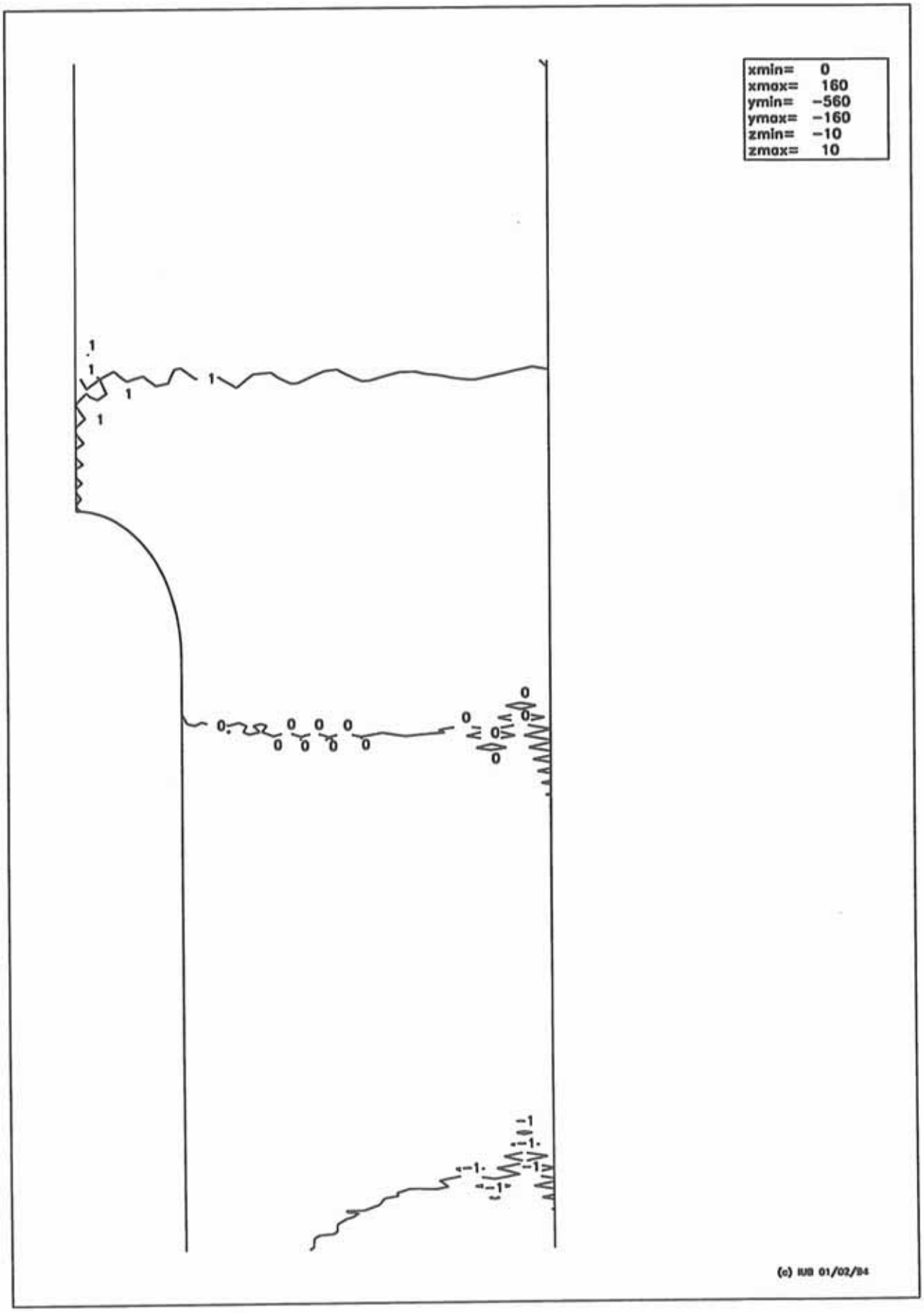
Druckaufbau in 105 Jahren auf Gebirgsdruck 1 im Dach – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 17.2373 MPa

Bild 7.67



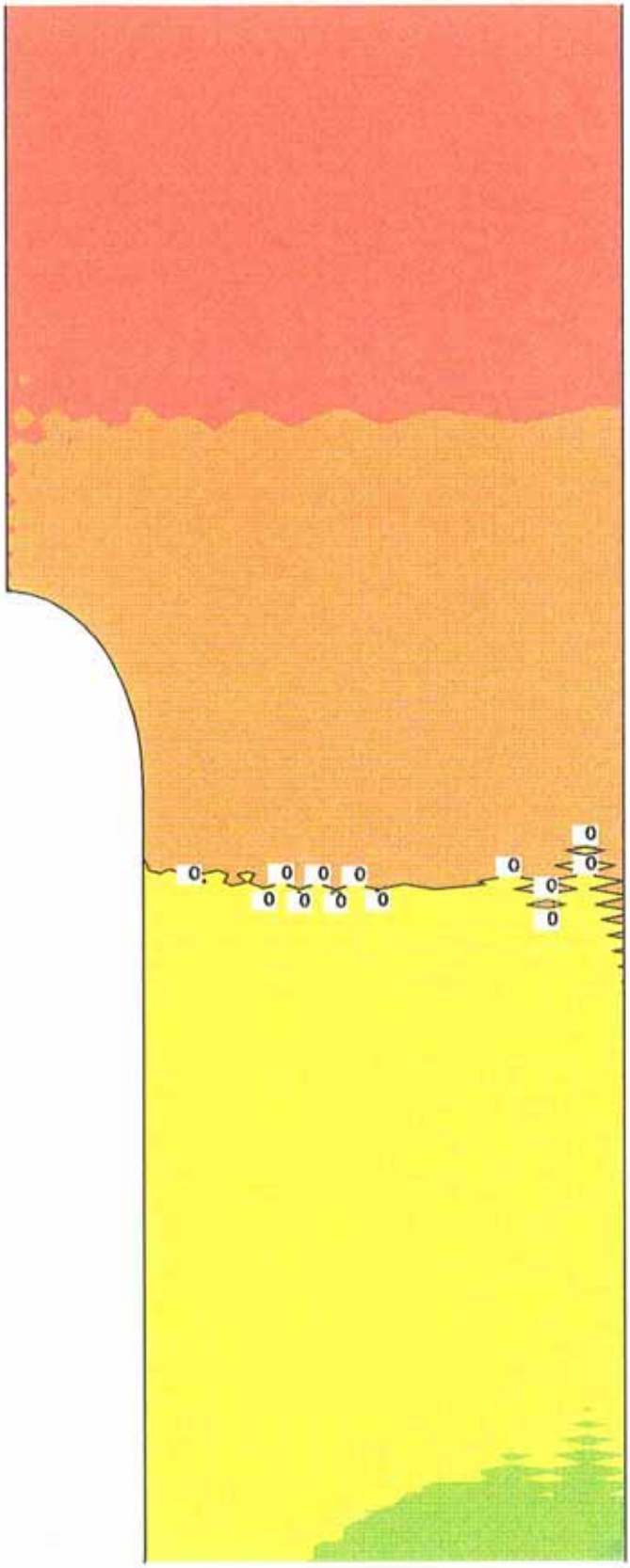
Druckaufbau in 105 Jahren auf Gebirgsdruck 1 im Dach – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 17.2373 MPa

Bild 7.68



Druckaufbau in 110 Jahren auf Gebirgsdruck 1 im Zyl.– Material 1
Differenz Hauptspannung 1 – rel. Soledruck zu RST 17.5872 MPa

Bild 7.69



xmin= 0
xmax= 160
ymin= −560
ymax= −160
zmin= −10
zmax= 10

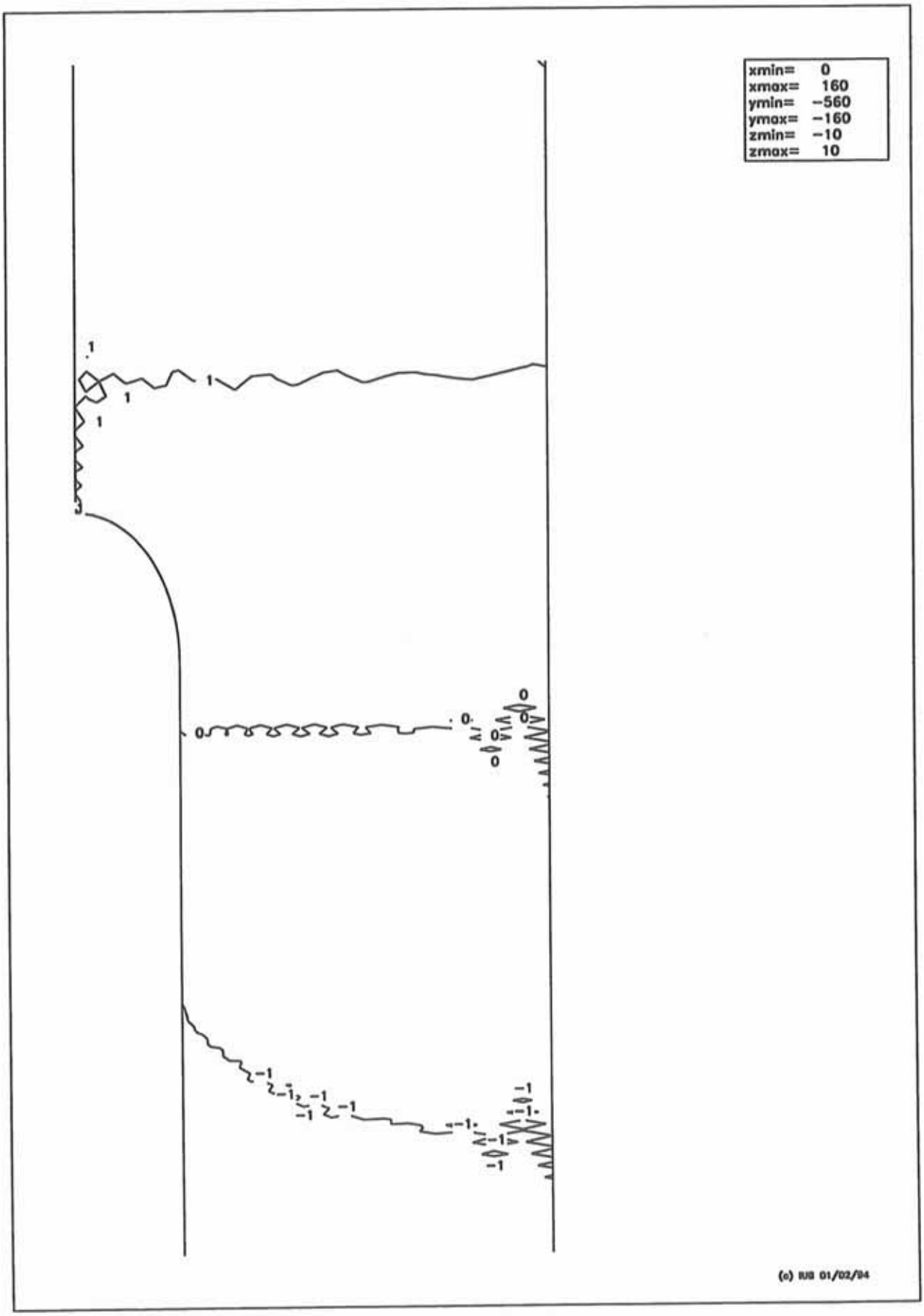
Legende

−4
−3
−2
−1
0
1
2

(c) IUB 01/02/94

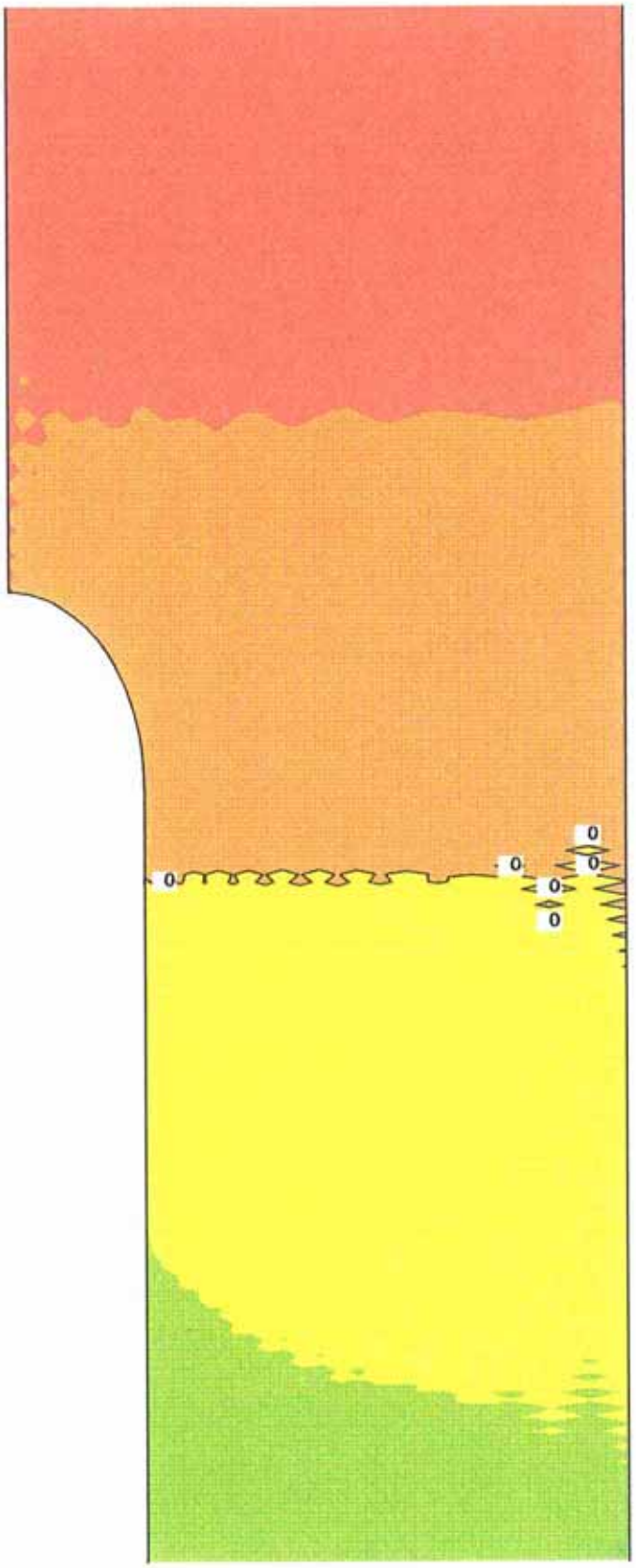
Druckaufbau in 110 Jahren auf Gebirgsdruck 1 im Zyl. – Material 1
Differenz Hauptspannung 1 – rel. Soledruck zu RST 17.5872 MPa

Bild 7.70



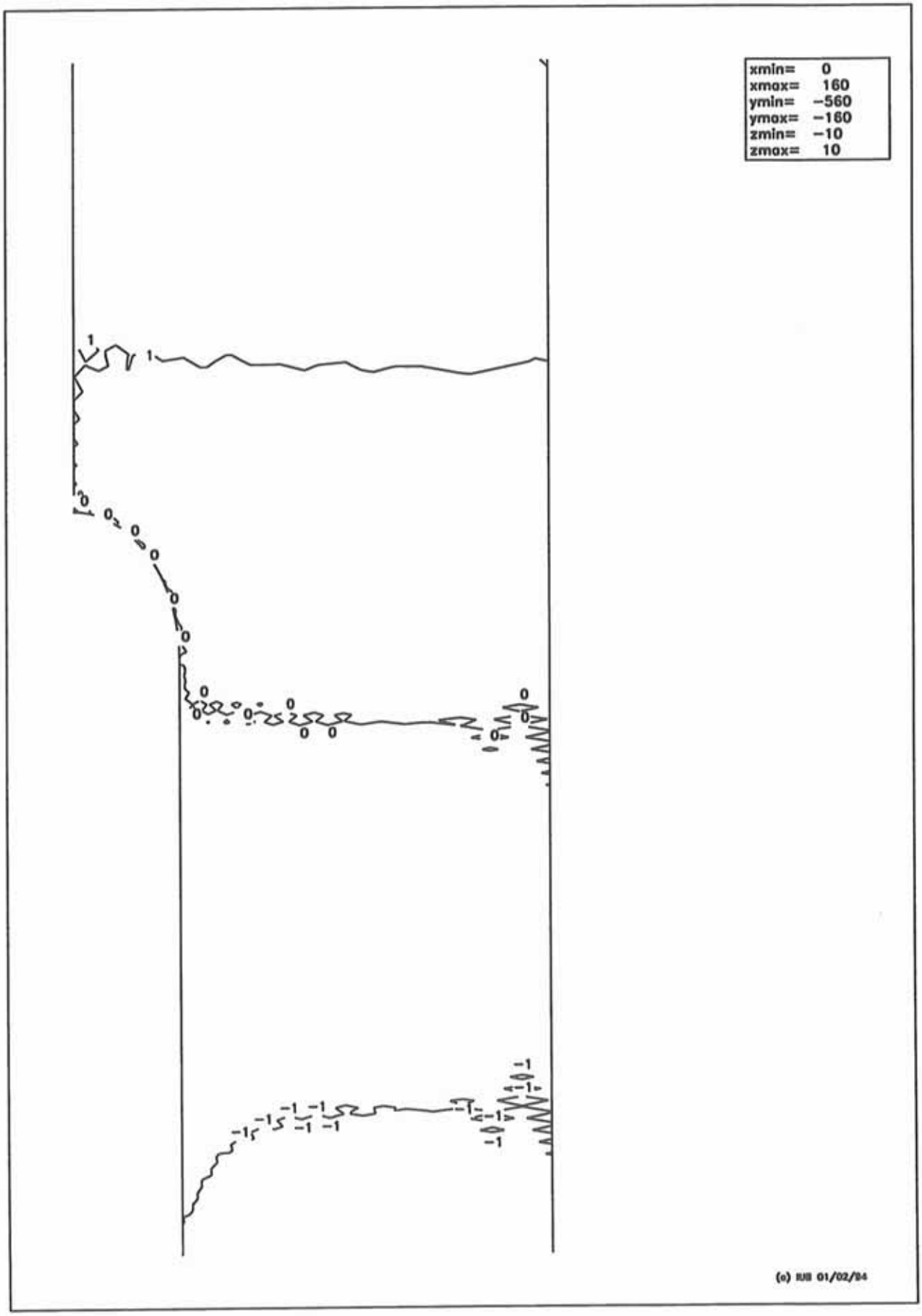
Druckaufbau in 110 Jahren auf Gebirgsdruck 1 im Zyl. – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 17.5872 MPa

Bild 7.71



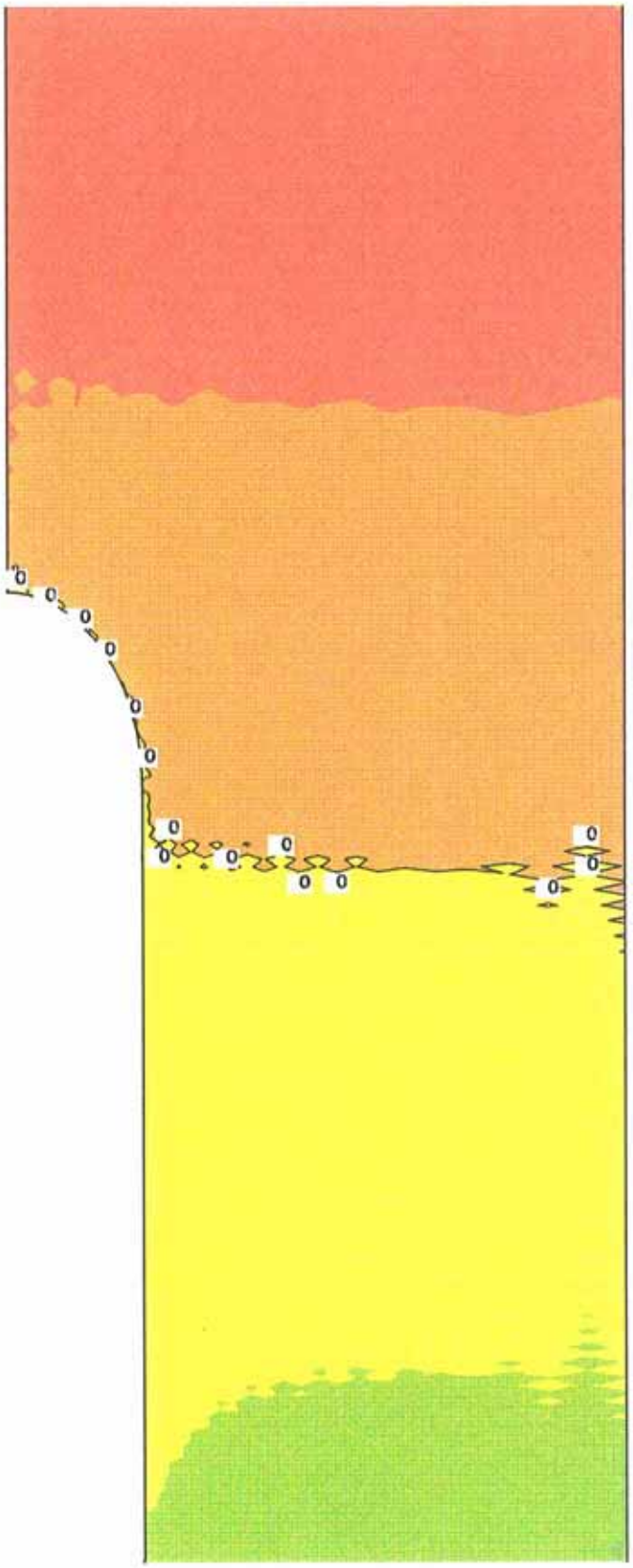
Druckaufbau in 110 Jahren auf Gebirgsdruck 1 im Zyl. – Material 1
Differenz Hauptspannung Phi – rel. Soledruck zu RST 17.5872 MPa

Bild 7.72



Druckaufbau in 110 Jahren auf Gebirgsdruck 1 im Zyl. – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 17.5872 MPa

Bild 7.73



xmin= 0
xmax= 160
ymin= −560
ymax= −160
zmin= −10
zmax= 10

Legende

−4
−3
−2
−1
0
1
2

(c) IUB 01/02/94

Druckaufbau in 110 Jahren auf Gebirgsdruck 1 im Zyl. – Material 1
Differenz Hauptspannung 3 – rel. Soledruck zu RST 17.5872 MPa

Bild 7.74

8. Zusammenfassung

Das Ziel des Druckaufbautestes in der Kaverne Etzel K102 war es, mit Hilfe eines Großversuchs in situ Felddaten und Felderfahrungen zu gewinnen, um damit die Grundlage für ein genehmigungsfähiges Verfahren für den Abschluß von Salzkavernen zu schaffen, das wirtschaftlich tragbar, technisch sinnvoll, nicht umweltbelastend und gebirgsmechanisch vertretbar ist.

Die Randbedingungen wurden so gewählt, daß sich innerhalb eines vertretbaren Zeit - Kosten - Rahmens Druckanstiegsraten ergaben, die eine Übertragung auf große Zeiträume ermöglichen sollten. Das Salztop befindet sich in Teufe 694 m. Der solegefüllte Hohlraum beträgt etwa 233.315 m³. Die Versuchsausrüstungen wurden derart ausgelegt, daß am zementierten Rohrschuh der 13 $^3/_8$''-Endverrohrung in Teufe 827,7 m ein Soledruckgradient von G = 0,320 bar/m hätte erreicht werden können. Unter Berücksichtigung eines theoretischen Überdruckes Δp, der sich im Dachbereich einer geschlossenen Kaverne über den geostatischen Druck hinausgehend aufbauen kann, hätte bei Erreichen eines Soledruckgradienten von G = 0,320 bar/m der überwiegende Teil der bestehenden Kavernen verschlossen werden können.

Am 03.09.1990 wurde mit der Druckbeaufschlagung der Testkaverne begonnen. Die Gradientenstufe G = 0,190 bar/m wurde am 02.10.1990 nach Verpumpen von ca. 500 m³ Sole in die Kaverne erreicht. Nach einer achtwöchigen Beobachtungsphase begann die 2. Druckaufbaustufe und endete am 02.01.1991 nach Verpumpen von 134,4 m³ Sole mit dem Gradientenwert G = 0,205 bar/m. Während der anschließenden Beobachtungsphase konnte kein Druckverlust festgestellt werden.

Bedingt durch die anlagentechnische Abstimmung des Dosierpumpensystems, insbesondere hinsichtlich der kontinuierlichen mikroseismischen Signalerfassung, ergaben sich zeitliche Verzögerungen, so daß die 3. Druckaufbauphase am 20.03.1991 begonnen werden konnte. Innerhalb der Pumpphase begann sich das Volumen - Druck - Verhältnis zu größeren Solemengen pro Druckeinheit zu verschieben, weshalb die 3. Druckaufbauphase erst nach ca. siebenwöchiger Pumpzeit nach Verpumpen von 179,5 m³ Sole am 21.05.1991 bei einem Solekopfdruck von 82,36 bar (G = 0,219 bar/m) abgeschlossen wurde. Technische Ursachen für den Druckverlust in der Kaverne konnten nach einer Überprüfung der Unter- und Übertageausrüstung ausgeschlossen werden. Eine Extrapolation auf ein stabiles Druckniveau im Bereich von 80 bar (entsprechend einem Soledruckgradienten von G = 0,217 bar/m) erschien plausibel.

Nach einer zweimonatigen Beobachtungsphase startete der Solepumpbetrieb zur 4. Druckaufbaustufe (geplante Gradientenstufe G = 0,235 bar/m). Obwohl im Vergleich zur 3. Druckstufe das Volumen - Druck - Verhältnis stetig stieg, sank die Drucksteigerungsrate bis zum 20.08.1991 auf Null ab. Der maximal erreichte Gradient betrug vorerst G = 0,223 bar/m.

Im direkten Anschluß begann der Druck in der Kaverne trotz Soleverpumpens leicht zu fallen. Um evtl. technische Ursachen für den anhaltenden Druckverlust auszuschließen, wurde am 27.08.1991 eine außerplanmäßige Spiegelmessung im Kavernenhals durchgeführt, mit dem Ergebnis, daß sich gegenüber der vorangegangenen Messung vom Juli keine Spiegelveränderung ergeben hatte.

Der Druckabfall nahm bei gleichbleibendem Pumpbetrieb im Verlauf des Monats September ab. Nach einem Minimum am 30.09.1991 begann der Druck wieder anzusteigen und erreichte am 09.11.1991 seinen Höchstwert mit G = 0,226 bar/m, um danach wieder abzufallen. Am 17.01.1992 wurde ein zweites Minimum über mehrere Tage beobachtet, bevor ein leichter Druckanstieg stattfand, infolgedessen ein Druck entsprechend einem Gradienten von G = 0,222 bar/m bis März 1992 festgestellt werden konnte. Da durch weiteres Nachpumpen ein Eindringen von Sole in das Deckgebirge und damit das Entstehen einer nicht kontrollierbaren Infiltration befürchtet werden mußte, wurden die Dosierpumpen am 26.03.1992 abgeschaltet und die Kaverne verschlossen. Insgesamt waren ca. 1654 m^3 Sole im Verlauf der 4. Druckaufbaustufe in die Kaverne verpumpt worden.

Im Anschluß an den Abbruch des Pumpbetriebs begann der Druck asymptotisch abzufallen und sank bis zum 25.08.1992 bis auf einen Gradienten von G = 0,211 bar/m. Danach erfolgten mehrere Versuchsphasen, die mit dem Technischen Ausschuß Druckaufbautest sowie mit den Gutachtern und der Bergbehörde abgestimmt wurden, bevor Anfang Februar mit der stufenweisen Entlastung der Kaverne begonnen wurde.

Im Anschluß an den Druckaufbautest erforderte die zur Wiederaufnahme des Ölspeicherbetriebes notwendige Umrüstung der Kaverne eine vollständige Druckentlastung. Die daraufhin erstellte Bilanz zwischen verpumpter und abgelassener Solemenge ergab, daß ca. 50% der verpumpten 2488 m^3 Sole im Salzgestein verblieben sind.

1989, vor Beginn des Druckaufbautestes, und 1993, nach seiner Beendigung, wurde die Kaverne K102 echometrisch vermessen. Die ermittelten Volumendifferenzen liegen im Bereich der Meßgenauigkeit. Technische Ursachen für den Soleverlust sind auszuschließen. Es kann davon ausgegangen werden, daß sich die Komplettierung über den gesamten Versuchszeitraum als funktionstüchtig und dicht erwiesen hat.

Aus der Beobachtung, daß der Innendruck in der 4. Druckaufbaustufe trotz monatelanger Pumpphase nicht mehr gesteigert werden konnte, kann zweifelsfrei gefolgert werden, daß während dieser 4. Druckaufbaustufe Soleinfiltrationen stattgefunden haben.

Berechnungen des Sekundärspannungszustandes in der Umgebung der Testkaverne K 102, die die Belastungsgeschichte der Kaverne, das Materialverhalten des Steinsalzes sowie möglichst realitätsnahe Werte der Dichte des Deckgebirges und des Steinsalzes berücksichtigen, bestätigen diese Schlußfolgerung. Eine Infiltration von Sole in das Salzgestein gilt hierbei als gegeben, wenn der Innendruck höher ist als die senkrecht zur Druckrichtung wirkenden Hauptspannungskomponenten. Dieses Kriterium wird bereits bei Druckgradientenstufen erfüllt, die noch unterhalb des angenommenen Primärspannungszustandes liegen. Gleichzeitig können Gebirgsbereiche nachgewiesen werden, die die Infiltrationszonen begrenzen, so daß die im Speicherbetrieb befindliche Kaverne als technisch dicht zu betrachten ist. Wenn, um Infiltrationszonen auszuschließen, die maßgebende Hauptspannungskomponente um einige MPa größer sein soll als der zu erwartende auftretende Innendruck, gelingt dieser Nachweis für eine endverschlossene Kaverne nicht.

Auf der Grundlage der Ergebnisse des Druckaufbautestes in Verbindung mit den vorgelegten theoretischen Untersuchungen kann nur die Schlußfolgerung gezogen werden, daß bei endverschlossenen flüssigkeitsgefüllten Kavernen aufgrund des temperatur- und konvergenzbedingten Druckanstiegs Flüssigkeit in den Schwebenbereich eingepreßt wird, wobei der Zeitraum noch nicht bestimmt werden kann.

Die Ergebnisse des Druckaufbautestes haben eindeutig und überzeugend Erkenntnisse erbracht, die nicht durch theoretische Untersuchungen oder Laborversuche gewonnen werden konnten, da die für theoretische Modellvorstellungen notwendigen Annahmen und Voraussetzungen stets zu einer Idealisierung des tatsächlichen langfristig auftretenden Beanspruchungszustandes einer Salzkaverne führen und im Labor nur vereinfachte Belastungsbedingungen simuliert werden können, nicht jedoch die in der Umgebung der Kavernenwand tatsächlich auftretenden Spannungszustände.

Wir bedanken uns für das uns entgegengebrachte Vertrauen und die Gelegenheit, an diesem weltweit einmaligen in-situ-Versuch mitgewirkt zu haben.

Dieser Bericht wurde unter Mitwirkung von Herrn Dr.-Ing. D. Struck und Herrn Dipl.-Ing. D. Zander-Schiebenhöfer sowie folgender Personen erstellt:

Dipl.-Ing. K. Staudtmeister

Prof. Dr.-Ing. habil. R.B. Rokahr

NETPlan doc1428

Konsortium "Druckaufbautest"
vertreten durch die
Industrieverwaltungsgesellschaft AG (IVG)

Druckaufbautest in der Kaverne Etzel K102

- Anhang -

Institut für Unterirdisches Bauen Universität Hannover

1994

Konsortium "Druckaufbautest"
vertreten durch die
Industrieverwaltungsgesellschaft AG (IVG)

Druckaufbautest in der Kaverne Etzel K102

- Anhang -

Institut für Unterirdisches Bauen Universität Hannover

1994

Anhang zum Endbericht „Druckaufbautest in der Kaverne Etzel K102“

Nachdem der Versuchsverlauf gezeigt hatte, daß der angestrebte Druckgradient von G = 0,320 bar/m, der weit über dem angenommenen Gebirgsdruckgradienten von G = 0,241 bar/m lag, nicht erreicht werden konnte, trat die Frage in den Vordergrund, ob der gemessene Maximalwert von G = 0,226 bar/m in der 4. Druckaufbaustufe bzw. der Minimalwert von G = 0,211 bar/m nach Abschalten der Pumpen oberhalb oder unterhalb des vorhandenen Gebirgsdruckgradienten liegt.

Das unerwartete Testergebnis machte es erforderlich, den Primärspannungszustand genauer als bisher zu kennen, zumal auch bereits zu Beginn des Druckaufbautestes der vorausgesetzte Gebirgsdruckgradient von G = 0,241 bar/m von allen Beteiligten als zu hoch erachtet worden war.

Da keine verwertbaren Daten zur Dichtebestimmung des Deckgebirges oberhalb der Kaverne K102 zur Verfügung standen, konnte eine genauere Abschätzung der Deckgebirgsdichte nicht vorgenommen werden. Um nicht eine Bohrung nur für diesen Versuch durchführen zu müssen, wurde im Technischen Ausschuß beschlossen, die von der IVG geplanten Bohrungen zur Erweiterung des Kavernenfeldes für eine Abschätzung der Deckgebirgsdichte heranzuziehen. Als Referenzbohrung wurde die einzige kontinuierlich vertikal verlaufende Bohrung K 211 ausgewählt. Unter Einbeziehung der zusätzlichen Aufschlußdaten aus den Bohrungen K 129, K 116 und K 110 wurden die Ergebnisse der Bohrung K 211 als Grundlage für eine Abschätzung der Dichte des im Bereich der K 102 vorhandenen Deckgebirges verwendet. Die von der KBB im Mai 1994 abgeschlossenen Untersuchungen [1] ergaben, daß für die Dichte des Deckgebirges eine Bandbreite von $\rho = 2{,}05\ g/cm^3$ bis $2{,}13\ g/cm^3$ und für das Salzgestein $\rho = 2{,}26\ g/cm^3$ angesetzt werden kann. Bezogen auf die Rohrschuhteufe und unter Berücksichtigung dieser Werte kann der Gradient für das überlagernde Gebirge mit G = 0,204 bar /m bis 0,211 bar/m eingegrenzt werden. Er steht damit nicht im Widerspruch zu den angenommenen Werten, die für die theoretischen Untersuchungen herangezogen worden sind.

Reinhard B. Rokahr

Literatur zum Anhang des Abschlußberichtes „Druckaufbautest in der Kaverne Etzel K102“:

[1] KBB: Übertragung der Deckgebirgsdichte Etzel K 211 → K 102, Hannover, Mai 1994.