

KfK 3790
August 1984

Modellrechnungen zur Untersuchung der Spannungs- und Verformungsfelder im Steinsalz in der Umgebung von beheizten Bohrlöchern

A. Pudewills
Institut für Nukleare Entsorgungstechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Nukleare Entsorgungstechnik

KfK 3790

Modellrechnungen zur Untersuchung der Spannungs- und
Verformungsfelder im Steinsalz in der Umgebung
von beheizten Bohrlöchern

A. Pudewills

Die Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit der Kommission der Europäischen Gemeinschaften im Rahmen des indirekten Aktionsprogramms "Bewirtschaftung und Lagerung von radioaktiven Abfällen", Vertrag Nr. 385-83-7 WASD, durchgeführt.

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Die Endlagerung verfestigter hochradioaktiver Abfälle in Salzformationen hat thermomechanische Auswirkungen zur Folge, die eine wichtige Rolle für die Auslegung des Lagerkonzeptes spielen.

Der Standsicherheitsnachweis für ein Endlagerbergwerk kann nur durch Kombination verschiedener in situ-Untersuchungen und thermomechanischer Rechnungen gelingen. Wegen der zu betrachtenden großen Zeiträume gewinnt die Anwendung der Rechenmodelle eine besondere Bedeutung.

In diesem Bericht werden Modellrechnungen mit Hilfe des Finite-Elemente Programms ADINA zu einem im Salzbergwerk Asse durchgeführten Temperaturversuch (TV 3) dargestellt. Dieser Versuch stellt aufgrund der großen Temperaturgradienten einen interessanten Prüfstein für die Rechenverfahren dar und bietet gleichzeitig die Möglichkeit zur Überprüfung der verwendeten Stoffgesetze für Steinsalz.

Die berechneten Bohrlochkonvergenzen zeigen eine bemerkenswerte Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Die Sensitivität der Rechenergebnisse gegenüber der Variation von verschiedenen Parametern des Stoffgesetzes wurde ebenfalls untersucht.

Im zweiten Teil dieses Berichts werden die Rechnungen zum thermomechanischen Verhalten des Nahbereiches einer HAW-Lagerbohrung dargestellt. Dabei wurde sowohl der Fall der trockenen Bohrung als auch der Fall eines hypothetischen Laugeneinbruches behandelt.

Die angenommene Geometrie und die Randbedingungen des Rechenmodells (Einheitszelle) gehen von einer regelmäßigen und symmetrischen Bohrlochordnung im Lagerbereich aus. Der Anfangsspannungszustand wurde als lithostatisch angenommen. Der hydrostatische Laugendruck von 12 MPa wurde als Normaldruck an der inneren Bohrlochwand vorgegeben.

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen sind die Bohrlochkonvergenzen bis zum Schließen des Luftspaltes zwischen Salz und Abfallblöcken sowie die Spannungsfelder im umgebenden Salzgestein.

Model Calculations of Stresses and Deformations in Rock Salt in the Near Field of Heated Boreholes

Abstract

In the final storage of high level radioactive wastes (HLW) in rock salt the thermomechanical effects caused by the temperature rises play an important role for the elaboration of the repository concept.

With respect to the geomechanical safety of a HLW repository a systematic experimental and computational investigation is essential. In order to predict the long-term thermomechanical effects in the near and far fields of radioactive waste disposal the use of numerical model computations is very important.

With the help of the finite element computer code ADINA thermally induced borehole closure and stress distribution in the salt were investigated by the example of the 'Temperature Test 3' performed in the Asse mine during which the temperature and the borehole closure were measured.

The aim of the calculations has been the assessment of the capabilities of the ADINA code to solve complex thermomechanical problems and to verify the available thermomechanical material laws for rock salt.

In these computations the modulus of elasticity and the creep law of salt were varied in order to assess the influence exerted by these material parameters. The computed borehole closures are in good agreement with the measured data.

In the second part of this report the model computations of thermomechanical phenomena around a 300 m deep borehole are presented for a HLW repository with and without brine, respectively.

The finite element investigations are carried out for a periodical and symmetrical disposal field configuration with an equivalent radius of 28 m of the cylindrical unit cell. The initial state of stress was assumed to be lithostatic. A hydrostatic fluid pressure of 12 MPa was chosen for the case of accidental flooding of the repository field shortly after emplacement of the waste canisters.

The essential results of this thermomechanical analysis are the borehole closure and the stresses in rock salt in the near field of the repository borehole.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Verwendete Rechenprogramme	2
3. Stoffverhalten und Materialparameter	3
4. Thermomechanische Modellrechnungen zum Temperatur- versuch 3 in der Asse	5
4.1 Beschreibung des Rechenmodells	5
4.2 Rechenergebnisse und Diskussion	6
5. Spannungen und Verformungen im Steinsalz in der Umgebung einer HAW-Lagerbohrung	9
5.1 Beschreibung des Rechenmodells	9
5.2 Rand- und Anfangsbedingungen	10
5.3 Rechenergebnisse und Diskussion	11
5.3.1 Freie Bohrlochkonvergenz	11
5.3.2 Bohrlochkonvergenz bei Laugenzutritt	11
5.4 Ausblick	12
6. Literatur	13

1. Einleitung

Das in der Bundesrepublik Deutschland verfolgte Entsorgungskonzept sieht für die hochradioaktiven Abfälle eine Endlagerung in Salzformationen vor. Dazu sollen die bei der Wiederaufarbeitung der abgebrannten Brennelemente in flüssiger Form anfallenden hochradioaktiven Abfälle in einer festen Matrix aus Borosilikatglas fixiert werden. Nach einer gewissen übertägigen Zwischenlagerzeit sollen die Behälter mit verglastem hochradioaktivem Abfall in tiefen Bohrlöchern eingelagert werden, die in etwa 800-1100 m Tiefe in einem Salzstock niedergebracht werden /1/.

Aufgrund der relativ starken Wärmeentwicklung dieser Abfälle sind im umgebenden Salz beträchtliche Temperaturerhöhungen zu erwarten, deren Ausmaß sowie räumliche und zeitliche Verteilung von der gewählten Einlagerungsgeometrie, d.h. von der Länge und dem gegenseitigen Abstand der einzelnen Bohrlöcher abhängen /2/. Diese Temperaturerhöhungen führen zu thermischen Volumenänderungen sowie zu Änderungen des mechanischen Stoffverhaltens des Salzes. Die daraus resultierenden Spannungen und Verformungen können auf unterschiedliche Weise für die Sicherheit des Endlagers von Bedeutung sein.

Dabei sind sowohl großräumige Effekte, die die Integrität und Standsicherheit der geologischen Formation und des Grubengebäudes betreffen, als auch die Vorgänge im Nahbereich der eingelagerten Abfälle für die Auslegung des Lagerkonzeptes von Bedeutung.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind Untersuchungen der thermisch induzierten Spannungen und Verformungen im Steinsalz in der Umgebung von beheizten Bohrlöchern, d.h. von Vorgängen wie sie im Nahbereich von eingelagerten hochradioaktiven Abfällen (HAW) erwartet werden.

Für die thermomechanischen Rechnungen wurde eine erweiterte Version des kommerziellen Finite Elemente Programms ADINA verwendet /3/.

Die Temperaturverteilung in der Umgebung der Wärmequellen (Erhitzer oder Abfallblöcke) wurde mit Programmen, die speziell für die Temperaturlausbreitung bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle entwickelt worden waren, berechnet /2/.

Am Beispiel eines im Salzbergwerk Asse durchgeführten Simulationsversuchs mit elektrischen Erhitzern werden im ersten Teil dieser Arbeit Modellrechnungen zur thermisch induzierten Bohrlochkonvergenz sowie zur Sensitivität der Rechenergebnisse gegenüber der Variation von verschiedenen Parametern des Stoffgesetzes beschrieben.

Im zweiten Teil werden die Ergebnisse von Rechnungen zu den thermomechanischen Vorgängen im Nahbereich einer HAW-Lagerbohrung des Endlagerkonzeptes für Gorleben dargestellt, wobei sowohl der Fall der trockenen Lagerbohrung als auch ein hypothetischer Störfall durch Laugenzutritt betrachtet wurde.

2. Verwendete Rechenprogramme

Für die thermomechanischen bzw. gebirgsmechanischen Untersuchungen wurde 1981 das kommerzielle Finite Elemente Programm ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis) gekauft /3/.

Dieses Computerprogramm zur Berechnung von linearen und nichtlinearen Problemen aus Statik und Dynamik verfügt über eine große Zahl von Elementsorten, wie z.B. eindimensionale Elemente (Truss), zweidimensionale Elemente für ebene und rotationssymmetrische Geometrie und allgemeine dreidimensionale Elemente.

Zur Beschreibung des Stoffverhaltens können lineare und nichtlineare Materialmodelle verwendet werden. Das Stoffverhalten des Steinsalzes läßt sich in ADINA näherungsweise mit Hilfe eines thermoelastisch-plastischen Materialmodells mit sekundärem Kriechen beschreiben.

Die im Programm vorgesehene Formulierung des stationären Kriechens wurde für die Erfassung der Temperaturabhängigkeit der Kriechrate erweitert.

Die benötigten Temperaturfelder für die thermomechanischen Rechnungen wurden mit dem Programm ASYTE/KA /2/ berechnet. Mit Hilfe eines Interpolationsprogramms wurden die entsprechenden Temperaturwerte für die Knotenpunkte des Finite Elemente Netzes bei den entsprechenden Zeitpunkten ermittelt.

Für die Erzeugung der Eingabedaten (Knotenpunktkoordinaten und die Nummerierung der Elemente) sowie für die graphische Darstellung der Rechenergebnisse werden die im KfK verfügbaren Programme FEMGEN /4/ und FEMVIEW eingesetzt /5/.

3. Stoffverhalten und Materialparameter

Steinsalz weist ein Materialverhalten mit ausgeprägt nichtlinearer Abhängigkeit von der Belastung, der Temperatur und der Zeit auf. Es kann durch eine instantane Deformation (elastisch-plastisch) und drei Stadien des reversiblen und irreversiblen Kriechens (primäres, sekundäres und tertiäres Kriechen) beschrieben werden.

Zur Bestimmung des Zeit-Verformungs-Verhalten des Steinsalzes bei erhöhten Temperaturen und Drücken wurden im Labor und in situ Experimente durchgeführt /6/, /7/ und /8/.

Die zur Zeit verfügbaren Meßwerte zeigen starke Unterschiede. Dies ist einmal auf das Salz selbst zurückzuführen (Deformationsvorgeschichte, Verunreinigungen, Korngrößenverteilung, Inhomogenitäten), zum anderen aber auch auf die sehr verschiedenen Meßmethoden.

Bei der Anwendung der Rechenmodelle erscheint es deshalb sinnvoll, Parameterstudien durchzuführen, um den Einfluß der einzelnen Stoffparameter auf die gesuchten Spannungen und Verformungen zu ermitteln.

Das komplexe Stoffverhalten des Steinsalzes wurde in ADINA näherungsweise mit Hilfe eines thermoelastisch-plastischen Materialmodells mit sekundärem Kriechen beschrieben.

Das elastisch-plastische Kurzzeitverhalten, basierend auf der von Mises Fließregel, wurde dabei durch eine einfache bilineare Beziehung beschrieben, die jedoch die Versuchsergebnisse /6/ gut approximiert.

Die elastischen Eigenschaften des als homogen und isotrop angenommenen Steinsalzes wurden wie folgt gewählt:

$$\text{Elastizitätsmodul: } E(T) = (20/(T-273))^{0,1} \cdot 7000 \text{ MPa}$$

$$T = \text{Temperatur (K)}$$

$$\text{Querdehnungszahl: } \nu = 0,3$$

$$\text{Thermischer Ausdehnungskoeffizient: } \alpha = 4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}.$$

Das in Abb. 1 dargestellte Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird durch die folgenden Parameter beschrieben:

$$\begin{aligned} \text{Fließspannung } \sigma_y &= 11 \text{ MPa} & \text{für } T &= 293 \text{ K} \\ &= 7 \text{ MPa} & \text{für } T &= 543 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\text{Tangentenmodul } E_T = 0,1 \cdot E(T)$$

Für das sekundäre Kriechen wurde ein von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) aus Labordaten abgeleitetes Kriechgesetz /7/ verwendet:

$$\dot{\epsilon}_c = A \sigma^5 \exp(-Q/RT)$$

$$\dot{\epsilon}_c = \text{stationäre Kriechgeschwindigkeit (1/d)}$$

$$\sigma = \text{effektive Spannung (MPa)}$$

$$T = \text{Temperatur (K)}$$

$$A = 0.18 \text{ MPa}^{-5} \text{ d}^{-1}$$

$$Q = 54.21 \text{ kJ/mol}$$

$$R = 8.314 \cdot 10^{-3} \text{ kJ/mol/K}$$

Das primäre Kriechen wurde nicht berücksichtigt, weil zur Zeit nur unzureichende Meßdaten zur Verfügung stehen.

4. Thermomechanische Modellrechnungen zum Temperaturversuch 3 in der Asse

Die kleinräumigen Effekte, insbesondere das Konvergenzverhalten einzelner beheizter Bohrlöcher bieten sich für eine systematische experimentelle und rechnerische Untersuchung an, um damit die verfügbaren Rechenverfahren und Stoffgesetze für Steinsalz zu überprüfen. Zu diesem Zweck wurden im Salzbergwerk Asse mehrere Erhitzerversuche durchgeführt /9/, /10/, bei denen die Temperatur im Steinsalz und die Bohrlochkonvergenz gemessen wurden.

In diesem Kapitel werden die Modellrechnungen zur Untersuchung der thermisch induzierten Spannungen und Verformungen in der Umgebung des im Jahre 1976 in dem Salzbergwerk Asse durchgeführten Temperaturversuchs 3 dargestellt /9/.

Für diesen Versuch wurde in der Asse auf der 750 m-Sohle eine zunächst 50 m tiefe Bohrung mit einem Durchmesser von 0,32 m angelegt. Das untere Teilstück von etwa 22,7 m wurde anschließend mit Salzgrus verfüllt und danach eine 5,4 m hohe Erhitzersäule mit ca. 8 kW Gesamtleistung ins Bohrloch eingebracht. In Abb. 2 ist die schematische Anordnung des Versuches dargestellt. Das Experiment wurde nach 90 Tagen beendet, als die Bohrlochkonvergenz im erhitzten Bereich zum Einklemmen des Erhitzers zu führen drohte.

4.1 Beschreibung des Rechenmodells

Das angenommene Modell stellt einen rotationssymmetrischen Ausschnitt aus dem Salzgebirge dar, wobei die Symmetrieachse der Bohrlochachse entspricht.

Wegen der angenäherten Vertikalsymmetrie des berechneten (bzw. gemessenen) Temperaturfeldes und der Versuchsgeometrie wurde nur eine Hälfte des gesamten Feldes betrachtet.

Die Vertikalausdehnung des Modells beträgt damit nur 20 m. Der äußere Radius wurde mit 10 m angenommen. Die Geometrie, das Elemente-Netz und die Randbedingungen sind in Abb. 3 dargestellt. Das Netz besteht aus 252 isoparametrischen Viereckelementen mit 8 Knoten.

Die sehr feine radiale Unterteilung am Innenrand des Modells war aufgrund großer Temperaturgradienten in der unmittelbaren Bohrlochumgebung erforderlich. Abb. 4 zeigt den berechneten Radialverlauf der Temperatur auf halber Erhitzerhöhe für verschiedene Zeitpunkte nach Versuchsbeginn.

Als Randbedingungen wurde an der oberen Begrenzungsfläche des Rechenmodells eine Vertikalkomponente der Gebirgsspannung von 16 MPa (entsprechend 750 m Tiefe) vorgegeben, an der Außenfläche wurde ein Druck von ebenfalls 16 MPa angenommen.

Die Untersuchung der zeitabhängigen Spannungen und Verformungen in der Umgebung des Temperatur-Versuchsfeldes 3 erfolgte in mehreren Rechenschritten. Nach dem Aufbringen des Gebirgsdrucks wurde die Temperaturerhöhung vorgegeben und das thermomechanische Verhalten des Modells berechnet.

4.2 Rechenergebnisse und Diskussion

Es wurden verschiedene Rechnungen unter Variation des Elastizitätsmoduls und des sekundären Kriechgesetzes durchgeführt.

In Abb. 5 ist der zeitliche Verlauf der Bohrlochkonvergenz auf halber Höhe der Wärmequelle für mehrere der betrachteten Parameterkombinationen dargestellt.

Die Kurve 1 zeigt die berechnete Bohrlochkonvergenz für das oben dargestellte Modell bei der Annahme eines Elastizitätsmoduls von 7000 MPa für Steinsalz bei Raumtemperatur und einer Poisson-Zahl von 0,3.

In diesem Fall wurde eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Rechnung erreicht. Die berechneten Bohrlochkonvergenzen liegen nur um etwa 3-5% niedriger als die gemessenen Werte.

Bei den ersten Untersuchungen wurde der Einfluß des Elastizitätsmoduls auf die Rechenergebnisse betrachtet, wobei die Druckrandbedingungen von 16 MPa beibehalten wurden. Die Kurve 2 stellt die zeitliche Änderung des Bohrlochdurchmessers dar, die sich für einen Elastizitätsmodul von 15000 MPa (bei Raumtemperatur) ergibt. Die Wahl eines höheren Elastizitätsmoduls für Steinsalz zeigt in der Anfangsphase des Experimentes (bis etwa 20 Tage) eine sehr gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten. Mit zunehmender Versuchsdauer ergibt sich eine deutlich schnellere Zunahme der berechneten Konvergenzen. Die Bohrlochkonvergenzen liegen jetzt um etwa 25% höher als in dem Fall mit dem Elastizitätsmodul von 7000 MPa.

Dieses Ergebnis läßt sich aufgrund der höheren thermoelastischen Spannungen, die einen größeren Beitrag zur Bohrlochkonvergenz zur Folge haben, erklären.

Bei den weiteren Untersuchungen wurde der Proportionsfaktor A im Kriechgesetz um einen Faktor 2 erhöht. Die Labormesswerte der sekundären Kriechgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Temperatur und Spannung für Asse-Steinsalz zeigen eine starke Streuung, so daß die Annahme eines Faktors 2 im Kriechgesetz nicht unrealistisch ist. Die berechnete Bohrlochkonvergenz liegt in diesem Fall um etwa 15% höher als die gemessenen Werte (s. Kurve 3).

Zur weiteren Illustration der Rechenergebnisse sind in Abb. 6 die gemessenen und die berechneten Konvergenzen entlang der Bohrlochwand zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt.

Die Finite Elemente Berechnung des Temperaturversuchsfeldes 3 erbrachte neben den oben diskutierten Ergebnissen einige wichtige Erkenntnisse über die Spannungsfelder in der Umgebung eines beheizten Bohrlochs.

In Abb. 7 sind die effektiven Spannungen auf halber Höhe der Wärmequelle als Funktion vom Radius zur Zeit $t = 0$ sowie 22,3 und 67,9 Tage nach Beginn des Experimentes dargestellt.

In der Anfangsphase der Aufheizung steigt die effektive Spannung an der Wärme front. Dieser Anstieg wird später (nach etwa 20 Tagen) durch das Kriechen des Salzes in Richtung Bohrloch langsam abgeschwächt.

Aufgrund des starken Spannungsabbaus wurde trotz der hohen Temperaturen und Temperaturgradienten in unmittelbarer Nähe des Bohrlochs keine Überschreitung der Bruchfestigkeit des Gesteins festgestellt.

Anhand der durchgeführten thermomechanischen Rechnungen zum Temperaturversuchsfeld 3 und des Vergleichs mit den Meßergebnissen lassen sich zusammenfassend folgende Erkenntnisse festhalten:

- Das Elastizitätsmodul hat einen relativ großen Einfluß auf die Bohrlochkonvergenz, was auf die davon abhängigen thermoelastischen Spannungen zurückzuführen ist.
- Das sekundäre Kriechverhalten des Salzes hat ebenfalls einen wesentlichen Einfluß auf die Konvergenzrate.
- Die gesamten Rechenergebnisse, die unter der Annahme von hydrostatischen Druckrandbedingungen erhalten wurden, zeigen eine bemerkenswerte Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen, so daß die Auswahl dieser Druckrandbedingungen als realistisch angesehen werden kann.

Insgesamt zeigen die Untersuchungen zum Temperaturversuch 3, daß mit den verwendeten Rechenmodellen und Stoffgesetzen eine Beschreibung der thermisch induzierten Bohrlochkonvergenz im Steinsalz in guter Näherung möglich ist.

5. Spannungen und Verformungen im Steinsalz in der Umgebung einer HAW-Lagerbohrung

In dem für den Salzstock Gorleben vorliegenden Endlagerkonzept sollen die Behälter mit den hochradioaktiven Abfällen in 300 m tiefen Bohrungen gelagert werden, die in 800 bis 1100 m Tiefe in einem regelmäßigen quadratischen Raster mit 50 m Bohrlochabstand angeordnet sind. Die Wärmeleistung pro Stapel bzw. pro Bohrloch soll zum Beginn der Einlagerung 216 kW betragen.

Die durchgeführten Modellrechnungen zu den thermomechanischen Vorgängen im Nahbereich der eingelagerten Abfallblöcke sollten erste Ergebnisse zu folgenden Fragen bringen:

- Die Konvergenz einer Lagerbohrung bis zum Schließen des Luftspalts zwischen Abfallblöcken und Bohrlochwand.
- Die Konvergenz einer Lagerbohrung bei einem angenommenen Störfall durch Laugenzutritt nach Beginn der Einlagerung der HAW-Kokillen.

5.1 Beschreibung des Rechenmodells

Ausgehend von einer symmetrischen und periodischen Anordnung der Wärmequellen im Lagerbereich wurde für die thermomechanischen Modellrechnungen eine einzige Bohrung innerhalb einer zylindrisierten Einheitszelle betrachtet.

Wegen der angenäherten Vertikalsymmetrie des berechneten Temperaturfeldes (ohne Berücksichtigung des geothermischen Gradienten) wurde zunächst nur die obere Hälfte der Lagerbohrung untersucht.

Das Rechenmodell entspricht einem 160 m langen Hohlzylinder mit einem Außenradius von 28 m und einem Innenradius von 0,2 m. Der Luftspalt zwischen Bohrlochwand und den eingelagerten Gebinden beträgt am Anfang 0,05 m.

Die Geometrie und die Finite Elemente Diskretisierung sind in Abb. 8 dargestellt. Das Elemente-Netz besteht aus 130 isoparametrischen Viereckelementen mit 8 Knoten und 9 Integrationspunkten.

5.2 Rand- und Anfangsbedingungen

Wie aus Abb. 8 hervorgeht, wurde die Oberfläche des Modells mit dem lithostatischen Druck belastet, welcher in 1000 m Tiefe etwa 21 MPa beträgt. Die Außenfläche wurde in radialer Richtung fest eingespannt (Verschiebung, $u_r = 0$), nachdem die Horizontalspannung von ebenfalls 21 MPa aufgebracht worden war.

An der unteren Grenzfläche werden wegen der angenommenen Symmetriebedingungen keine Bewegungen in vertikaler Richtung zugelassen ($u_z = 0$). Für diese Randbedingungen wird der Anfangsspannungs- und Verformungszustand in 100 Lastschritten (etwa 10 Tage) berechnet. Danach wurde die thermische Belastung vorgenommen.

Für die Berechnung der Bohrlochkonvergenz bei einem hypothetischen Störfall durch Laugenzutritt gleich nach der Einlagerung der HAW-Kokillen wird angenommen, daß das existierende Restvolumen im Verlauf von 40 Tagen vollständig mit Salzlauge gefüllt wird. Der hydrostatische Laugendruck von 12 MPa (entsprechend einer Tiefe von 1000 m) wird als Normaldruck am inneren Bohrlochwand vorgegeben.

Eine der wesentlichen Eingabegrößen für die Spannungs- und Verformungsrechnung ist die zeit- und ortsabhängige Temperaturverteilung im umgebenden Salzgebirge. Die Temperaturfelder wurden mit dem Programm ASYTE/KA /2/ berechnet. Abb. 9 zeigt den radialen Temperaturverlauf auf halber Höhe der Wärmequelle für verschiedene Zeitpunkte. Ein Überblick über die Temperaturrechnungen findet sich in /11/.

5.3 Rechenergebnisse und Diskussion

Als wichtigste Ergebnisse dieser Rechnungen sind die Bohrlochkonvergenzen bis zum Schließen des Luftspalts zwischen Salz und Abfallblöcken sowie die Spannungsfelder im umgebenden Salzgestein anzusehen.

5.3.1 Freie Bohrlochkonvergenz

In Abb. 10 ist der zeitliche Verlauf der thermisch induzierten Bohrlochkonvergenz auf halber Höhe der Wärmequelle (Abfallstapel) dargestellt.

Der Luftspalt von 5 cm wird auf diesem Niveau nach etwa 170 Tagen geschlossen.

Die Entwicklung des Spannungsfeldes um das Bohrloch wird in den Abbildungen 11 und 12 gezeigt. Die drei Normalspannungen (σ_r , σ_z , σ_θ) sind in Abhängigkeit vom Abstand von der Bohrlochwand zu Beginn der Einlagerung und nach 110 Tagen dargestellt. Der Spannungszustand nach 110 Tagen zeigt gegenüber dem Anfangszustand ($t = 0$) einen Abbau aller Komponenten in der Nähe der Bohrlochwand.

Zu diesen Ergebnissen ist noch zu bemerken, daß durch die gewählten Modellannahmen die tatsächlichen vertikalen Verteilungen der Spannungen und der Bohrlochkonvergenz noch nicht korrekt beschrieben werden. In Wirklichkeit ist die horizontale Druckrandbedingung über die große Höhe des Bohrlochs nicht konstant sondern variiert von etwa 17 MPa bis 24 MPa. Dies bedeutet, daß sich der Luftspalt unterhalb der Mittelebene schneller, oberhalb jedoch langsamer schließen würde.

5.3.2 Bohrlochkonvergenz bei Laugenzutritt

Die Konvergenz einer HAW-Lagerbohrung bei einem angenommenen Störfall wird durch den an der Bohrlochwand wirksamen Laugengegendruck von 12 MPa wesentlich verzögert.

In Abb. 13 ist die berechnete Bohrlochkonvergenz als Funktion der Zeit dargestellt. Der Ringspalt (Luftspalt) zwischen Bohrlochwand und eingelagerten Abfallblöcken wird in diesem Fall auf halber Bohrlochhöhe erst nach 2,5 Jahren geschlossen.

In den Abbildungen 14 und 15 sind jeweils für die Zeitpunkte 40 Tage (Laugendruck voll wirksam) und 2 Jahre die Radial-, Vertikal- und Tangentialspannungen im Salz als Funktion des Zellenradius dargestellt.

Hier ist allerdings zu beachten, daß in Wirklichkeit durch die Anwesenheit von Lauge Konvektions- und Umlösevorgänge in dem Ringspalt auftreten würden, so daß die tatsächlichen Geometrieänderungen anders ausfallen würden als die hier durch thermomechanische Analysen ermittelten.

5.4 Ausblick

Die oben beschriebenen Rechenmodelle zu thermomechanischen Vorgängen im Nahbereich der eingelagerten hochradioaktiven Abfälle befinden sich noch in der Entwicklungsphase. Zur Verfeinerung dieser Modelle müssen die gesamte Geometrie (300 m tiefe Bohrungen) sowie die genauere Z-Abhängigkeit der horizontalen Druckrandbedingungen berücksichtigt werden.

Für die Rechnungen über größere Zeiträume muß außerdem berücksichtigt werden, daß sich die Druckrandbedingungen für die Einheitszelle aufgrund der großräumigen Erwärmung und Verspannung des gesamten Lagerbereiches zeitlich verändern.

6. Literatur

- /1/ Röthemeyer, H.
Site Investigations and Conceptual Design for the Mined Repository
in the German Nuclear "Entsorgungs-Zentrum".
IAEA-SM-243/48, Helsinki 1979
- /2/ Ploumen, P.; Strickmann, G.; Winske, P.; Dürr, K.;
Korthaus, E.; Donath, P.
Untersuchungen zur Temperaturentwicklung bei der Endlagerung hoch-
radioaktiver Abfälle, Teil I und II ATW, Nr. 2, Feb. 1979
- /3/ ADINA
A Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental
Nonlinear Analysis, Report AE 81-1
ADINA-Engineering, Inc., 71 Elton Avenue Watertown,
Mass. 02172
- /4/ FEMGEN
A General Finite Element Mesh Generator 1980
IKO-Software Service GmbH, Albstadtweg 10, 7000 Stuttgart 80
- /5/ FEMVIEW-Handbuch
IKO-Software Service GmbH, Albstadtweg 10, 7000 Stuttgart 80
- /6/ Menzel, W.; Schreiner, W.; Weber, D.
Zum geomechanischen Verhalten von Steinsalz bei erhöhten
Gebirgstemperaturen.
Neue Bergbautechnik 6., Jan. 1976, S. 442 - 446
- /7/ Wallner, M.; Caninenberg, C.; Gonther, H.
Ermittlung zeit- und temperaturabhängiger mechanischer
Kennwerte von Salzgesteinen.
Proc. 4. Int. Congr. Rock Mech., Montreux 1979, Vol. 1,
S. 313 - 318

- /8/ Hunsche, U.; Plischke, I.; Nipp, H.-K.; Albrecht, H.
An in situ Creep Experiment Using a Large Rock-Salt Pillar,
Sixth. Int. Symp. on Salt, Toronto May 1983
- /9/ Dürr, K.
Temperaturversuchsfeld 3, Versuchsbericht,
Clausthal-Zellerfeld, GSF-T 73
- /10/ Pudewills, A.; Müller, R.; Korthaus, E.; Köster, R.
Thermomechanical in situ-Experiments and Finite Element Com-
putations.
Proc. 5th Int.Symp. on the Sci. Basis for Rad.Waste Management
7. - 10. Juni, Berlin 1982, S. 477 - 486
- /11/ Closs, K.D. (Hrsg.)
Vergleich der verschiedenen Entsorgungsalternativen und
Beurteilung ihrer Realisierbarkeit.
Studie "Entsorgungsalternativen", KfK-3000, 1980

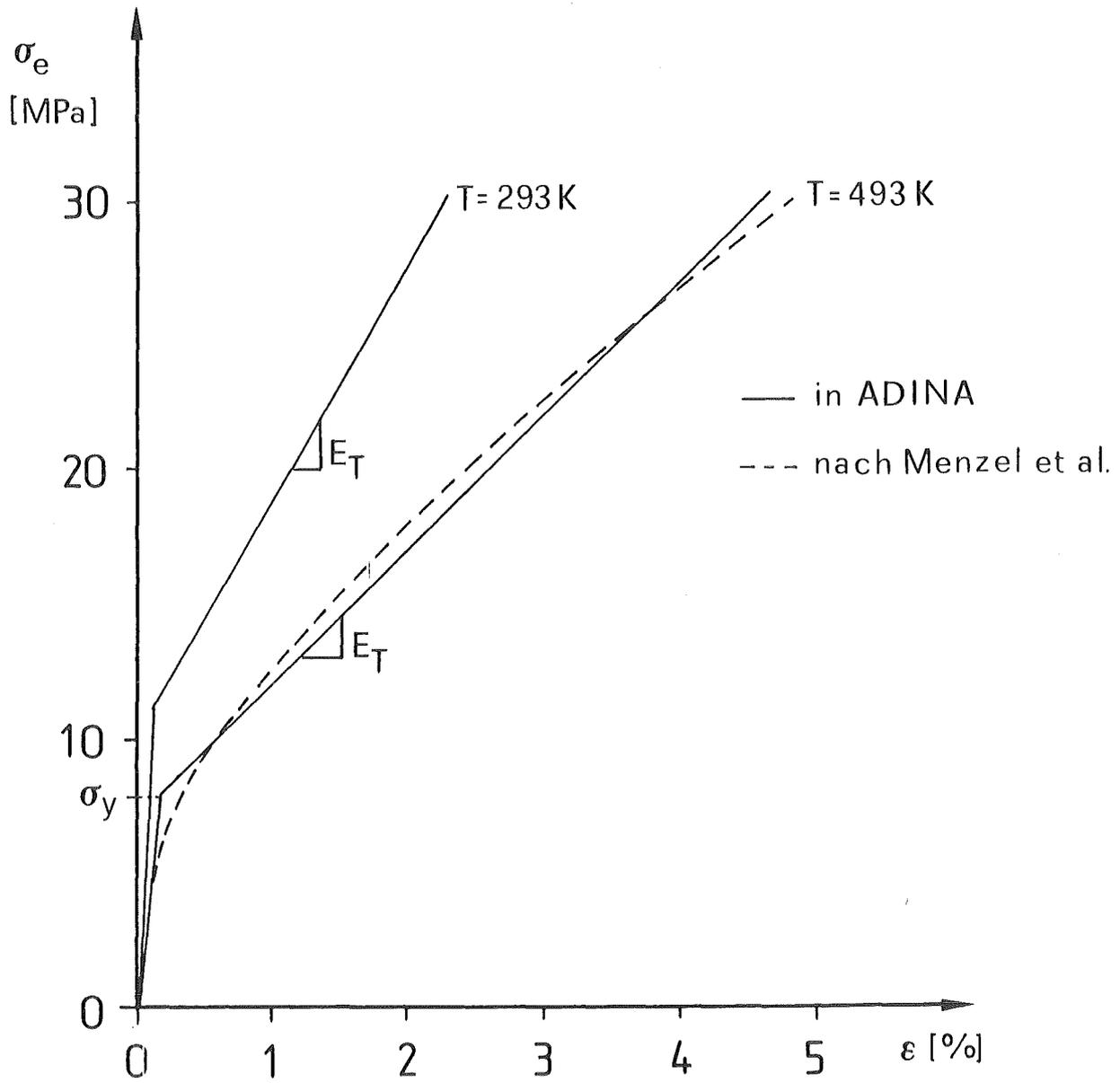


Abb. 1 Spannungs - Verformungskurve für Steinsalz
Theoretischer Ansatz für ADINA : _____
Messwerte nach Menzel et al. /6/ : - - - -

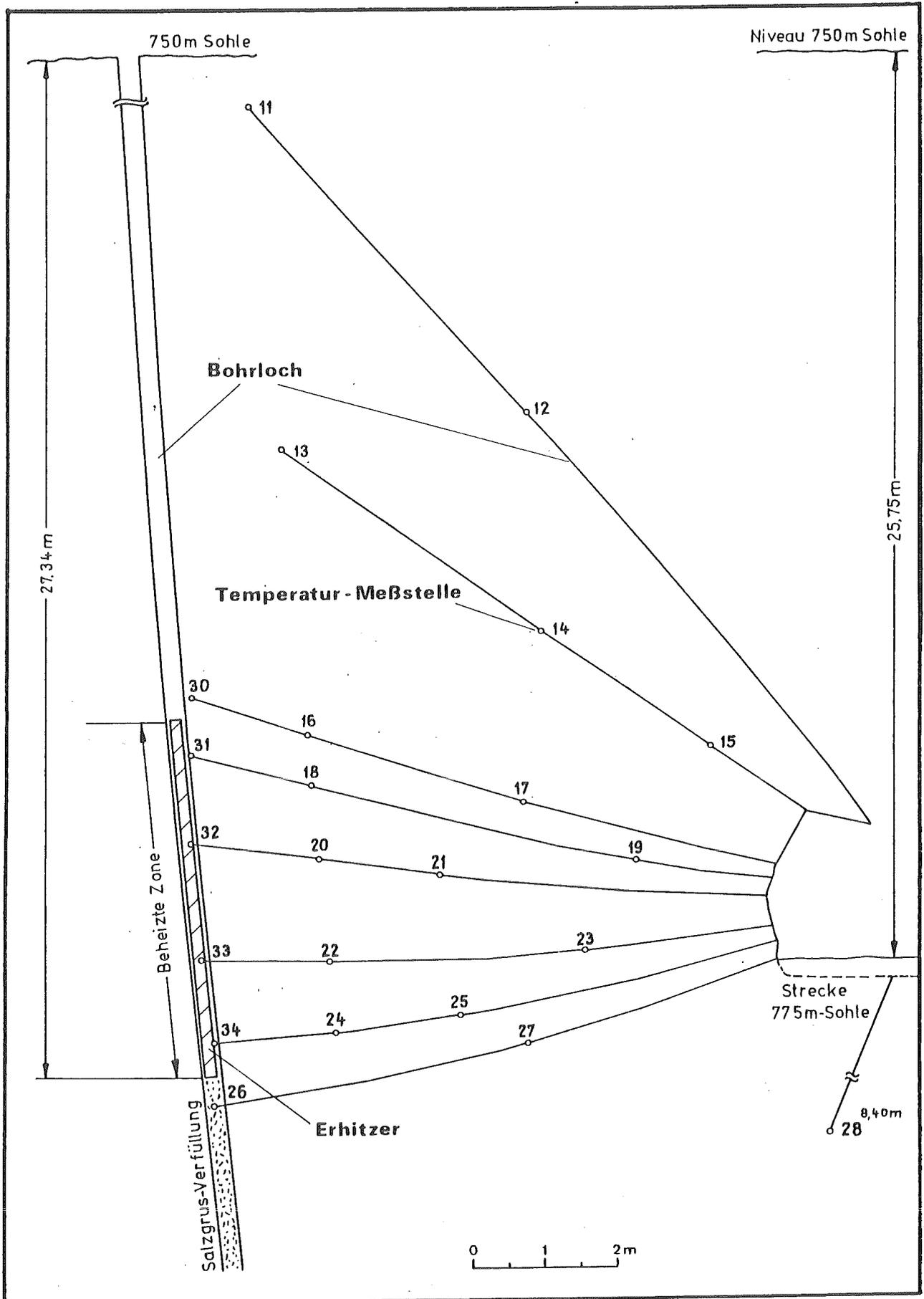


Abb. 2 Temperaturversuch 3; Schematische Darstellung der Versuchsanordnung

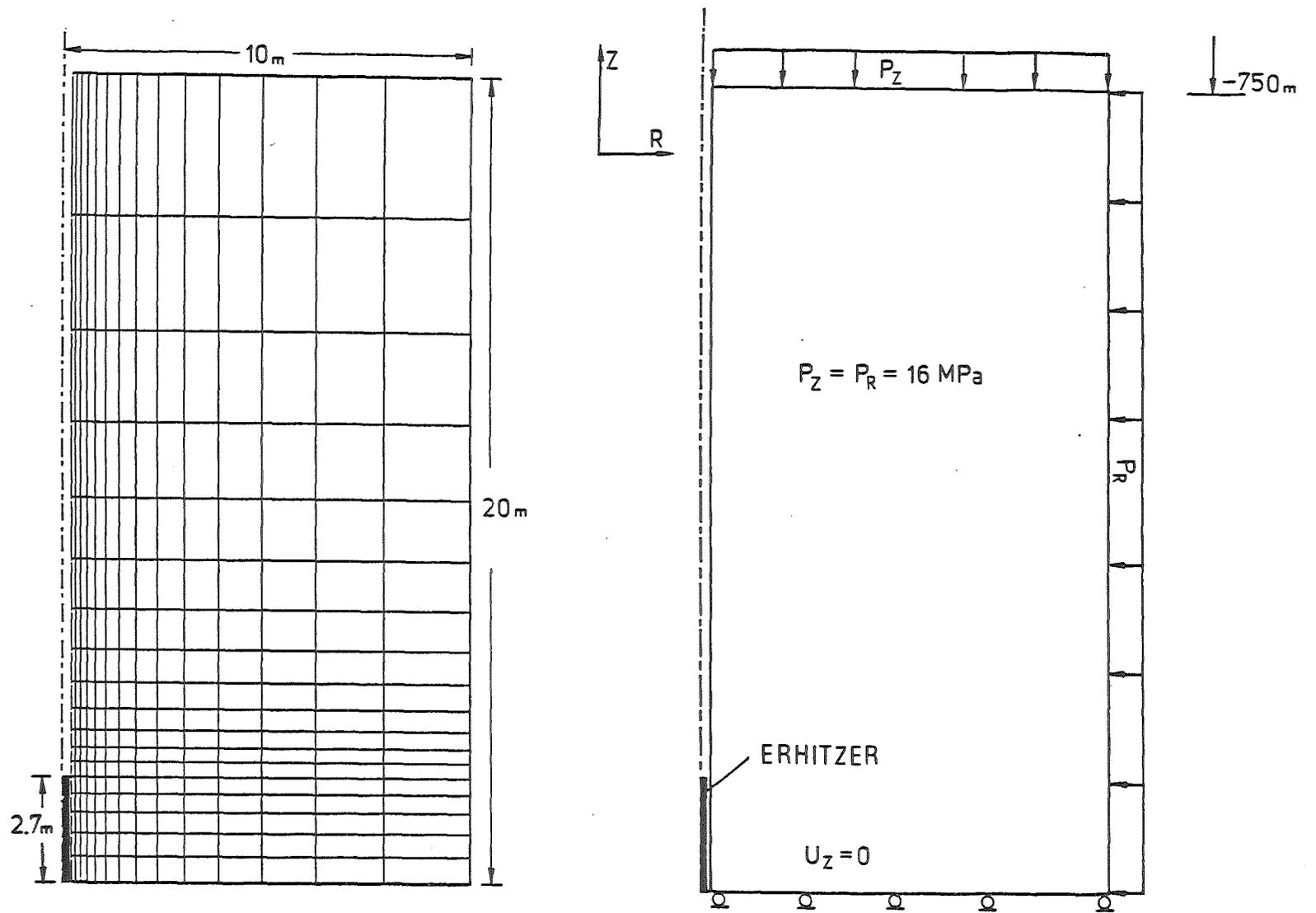


ABB.3 FINITE ELEMENTE NETZ UND DIE RANDBEDINGUNGEN FÜR DAS RECHENMODELL (TEMPERATURVERSUCH 3)

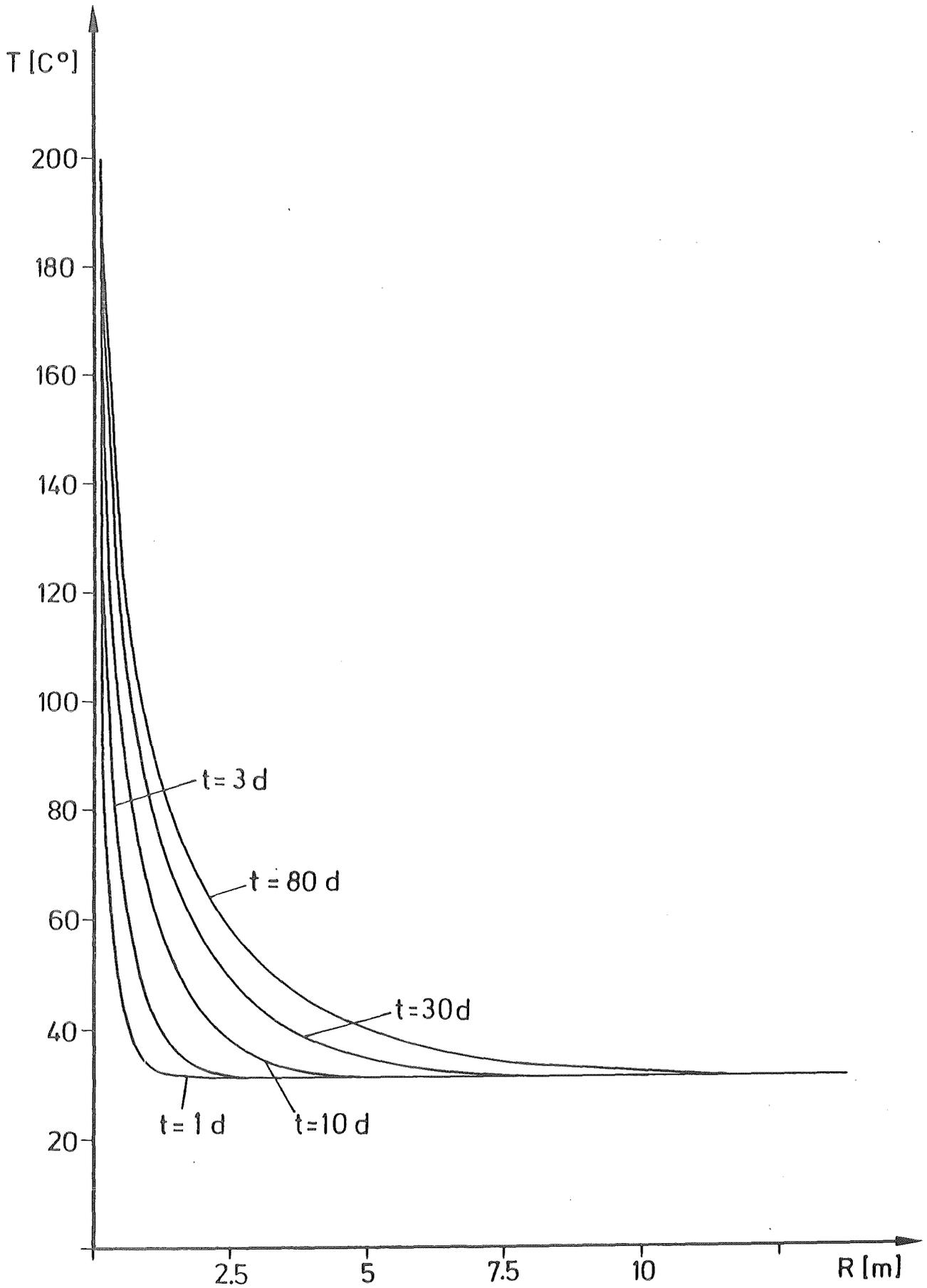


Abb. 4 Radialer Verlauf der Temperatur auf halber Wärmequellenhöhe (Temperaturversuch 3)

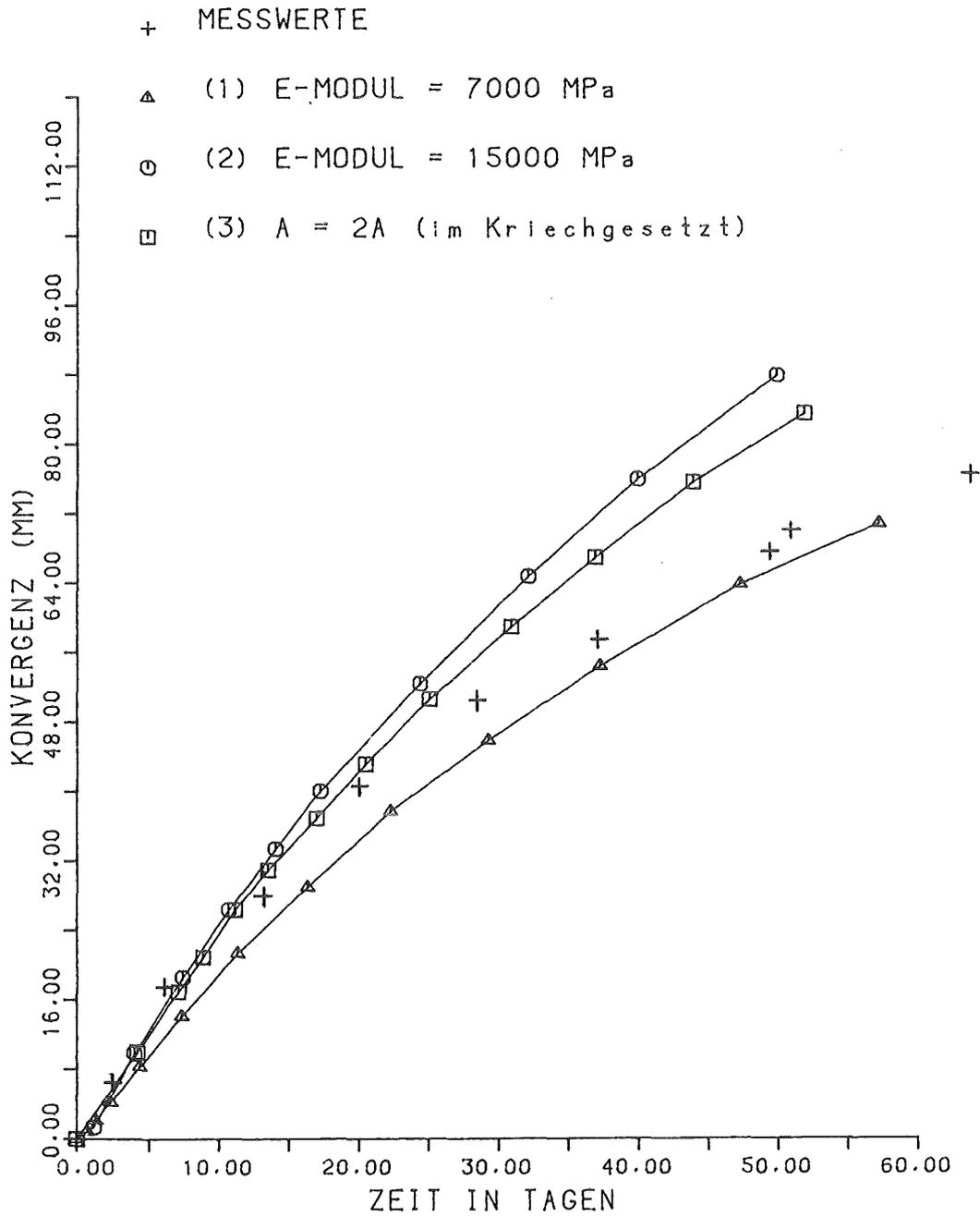


Abb. 5 Zeitliche Änderung des Bohrlochdurchmessers für verschiedene Stoffparameter (Rechnung mit ADINA)

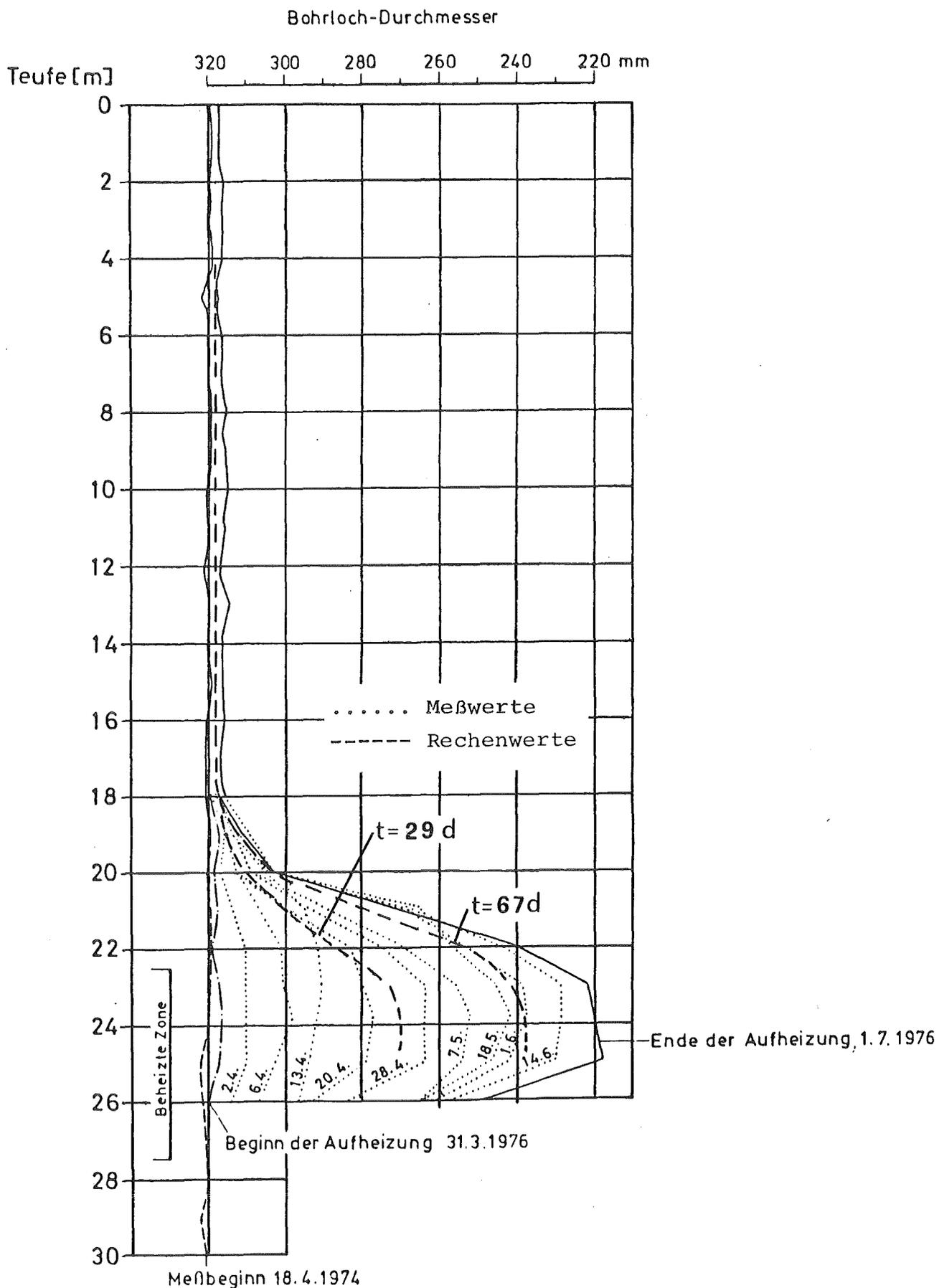


Abb. 6 Vertikaler Verlauf der berechneten und gemessenen Bohrlochkonvergenz (Messwerte nach /3/)

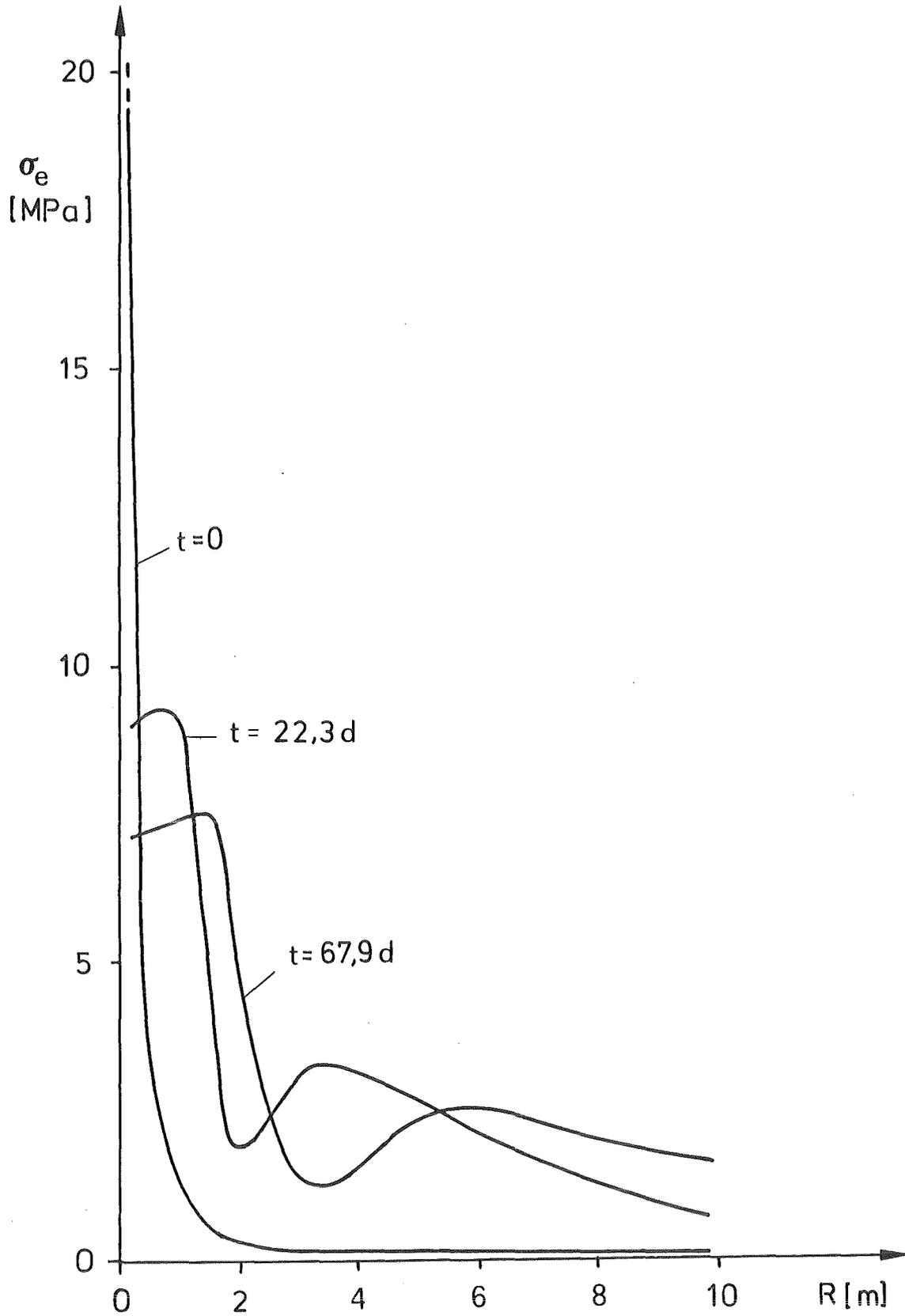


Abb. 7 Radialer Verlauf der effektiven Spannungen auf der Erhitzelebene zu unterschiedlichen Zeitpunkten

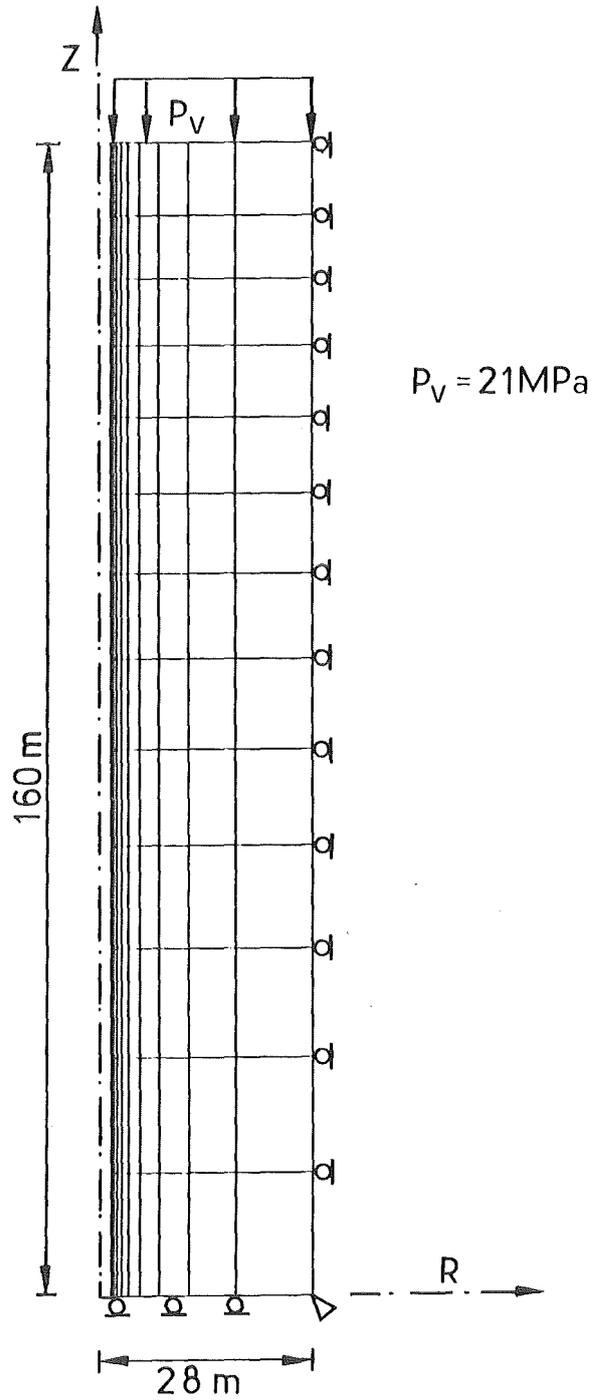
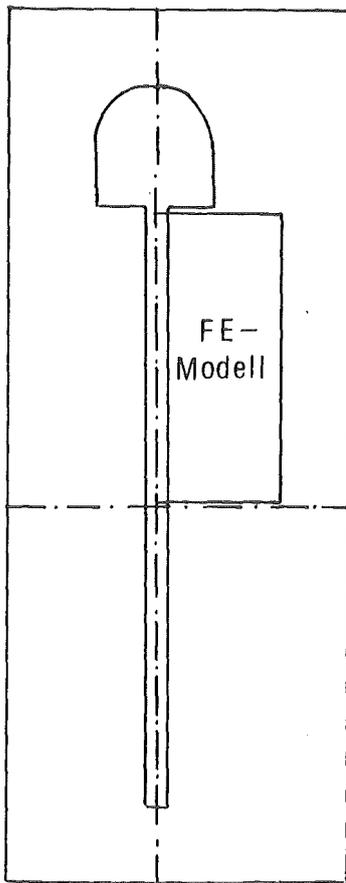


Abb. 8 Geometrie, Finite Elemente Diskretisierung und Randbedingungen des Rechenmodells für das HAW-Bohrloch

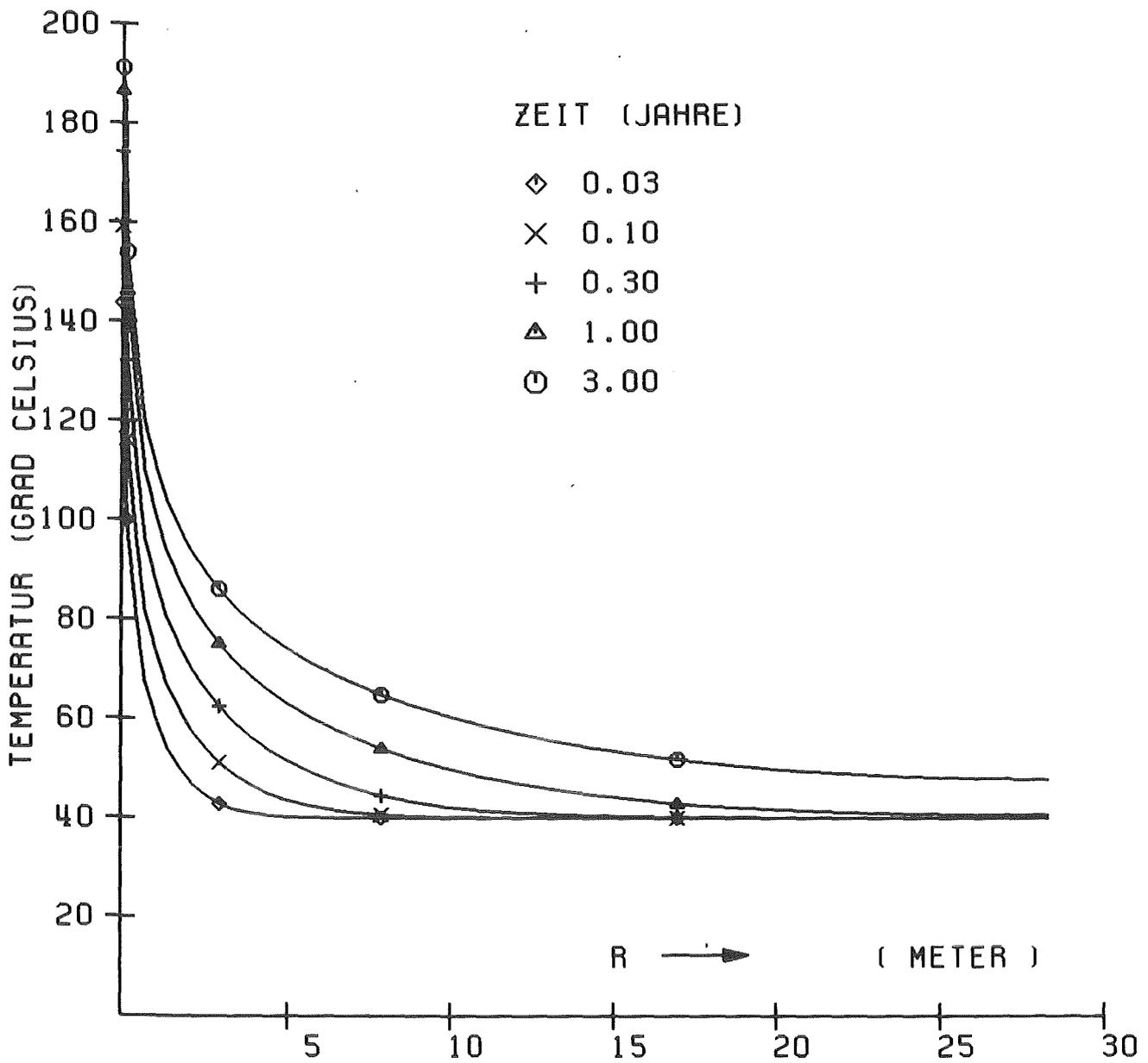


Abb. 9 Mit dem Programm ASYTE/KA berechneter radialer Verlauf der Temperatur auf halber Wärmequellenhöhe (HAW-Lagerbohrung)

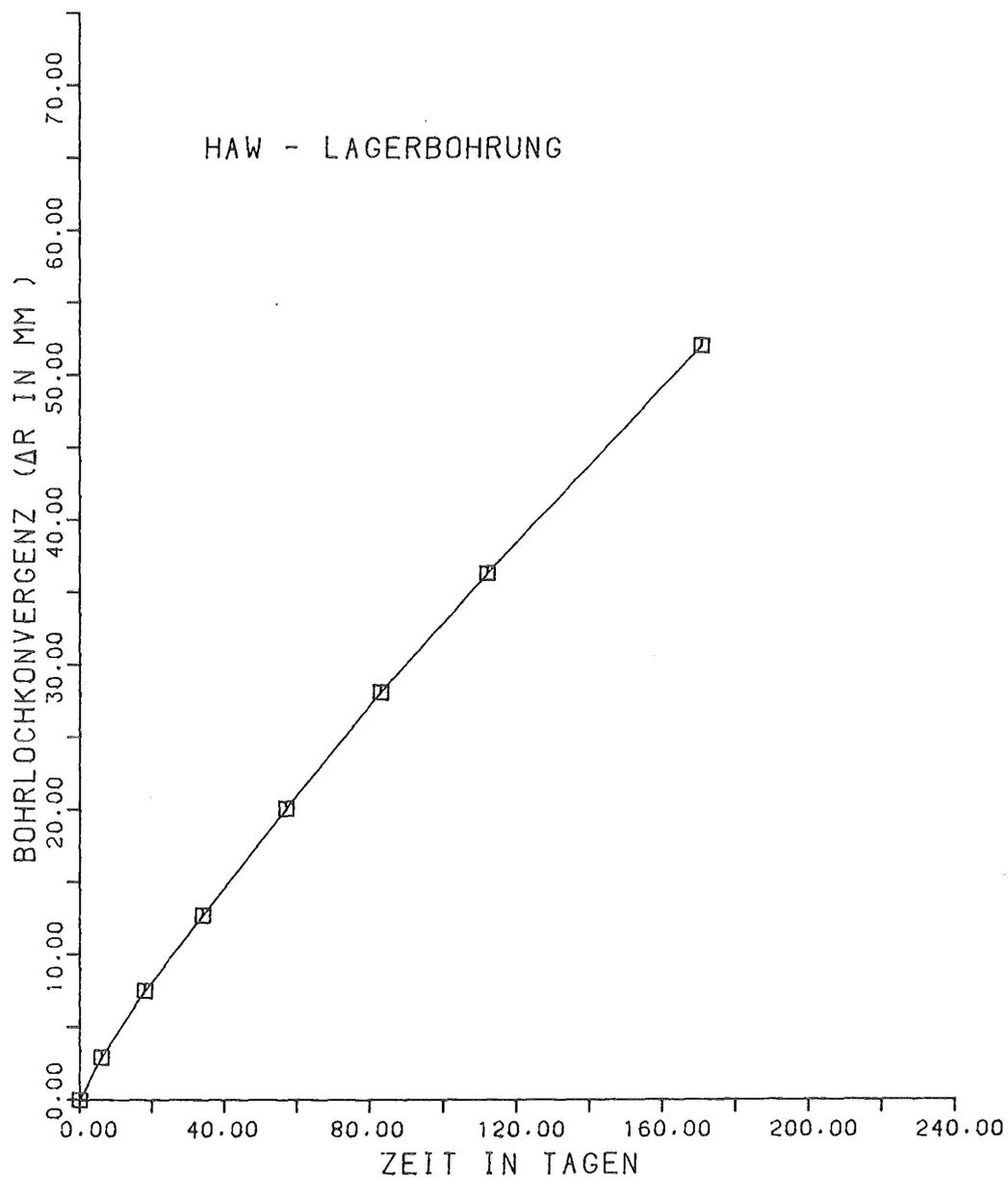


ABB.10 ZEITLICHER VERLAUF DER BOHRLOCHKONVERGENZ (RECHNUNG MIT ADINA)

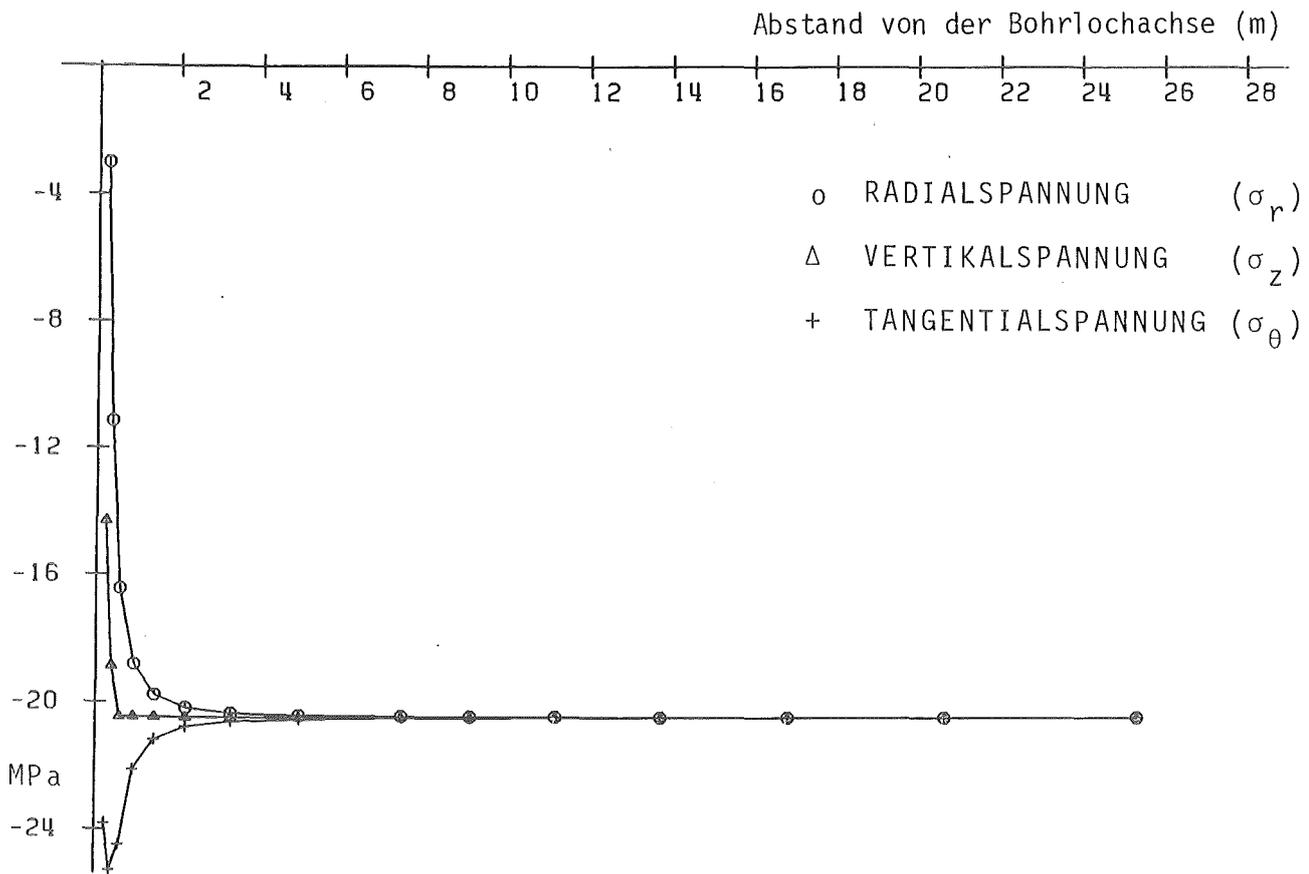


ABB. 11 MIT DEM PROGRAMM ADINA BERECHNETER RADIALER VERLAUF DER VERTIKAL-, TANGENTIAL- UND RADIALSPANNUNGEN ZUM ZEITPUNKT $t = 0$

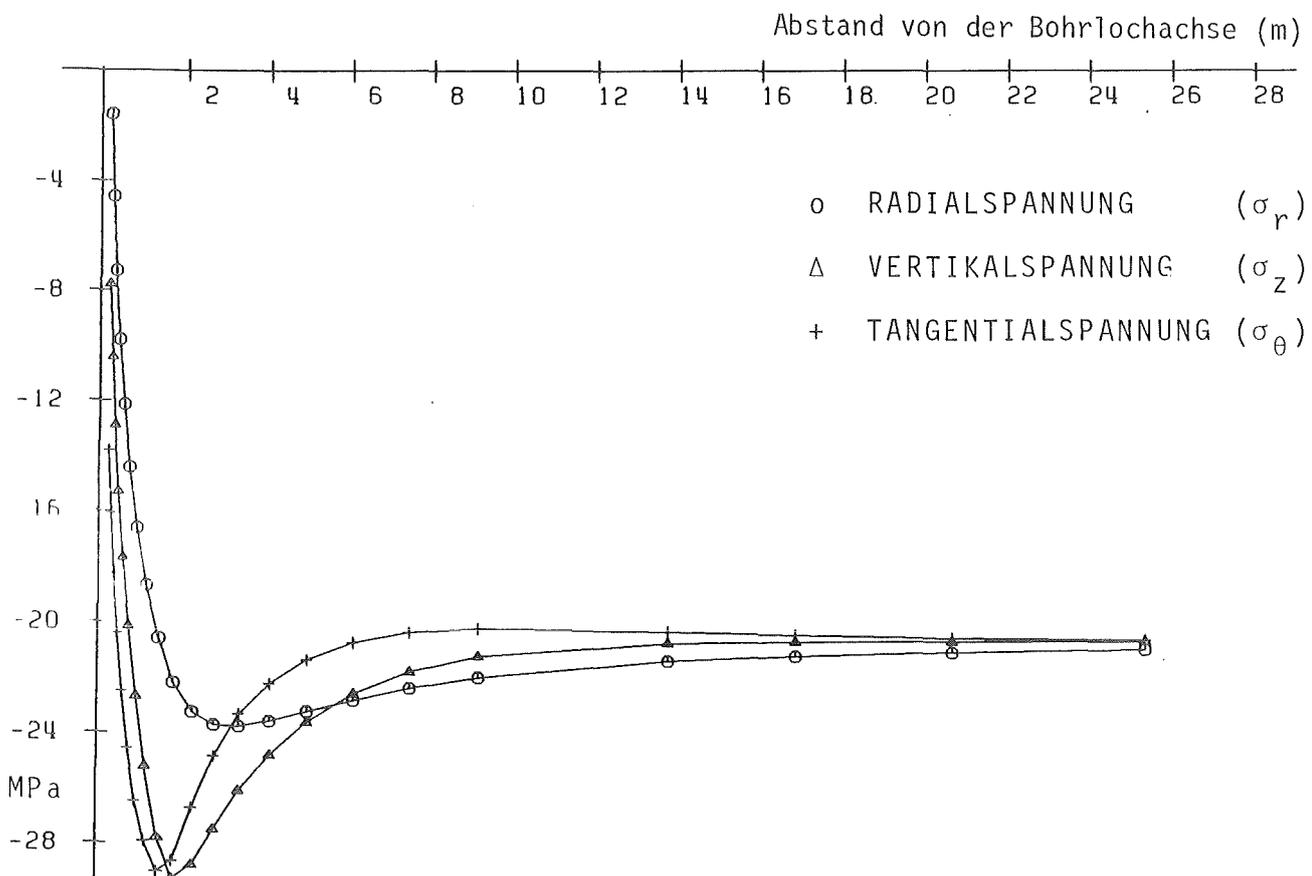


ABB. 12 MIT DEM PROGRAMM ADINA BERECHNETER RADIALER VERLAUF DER VERTIKAL-, TANGENTIAL- UND RADIALSPANNUNGEN NACH 110 TAGEN

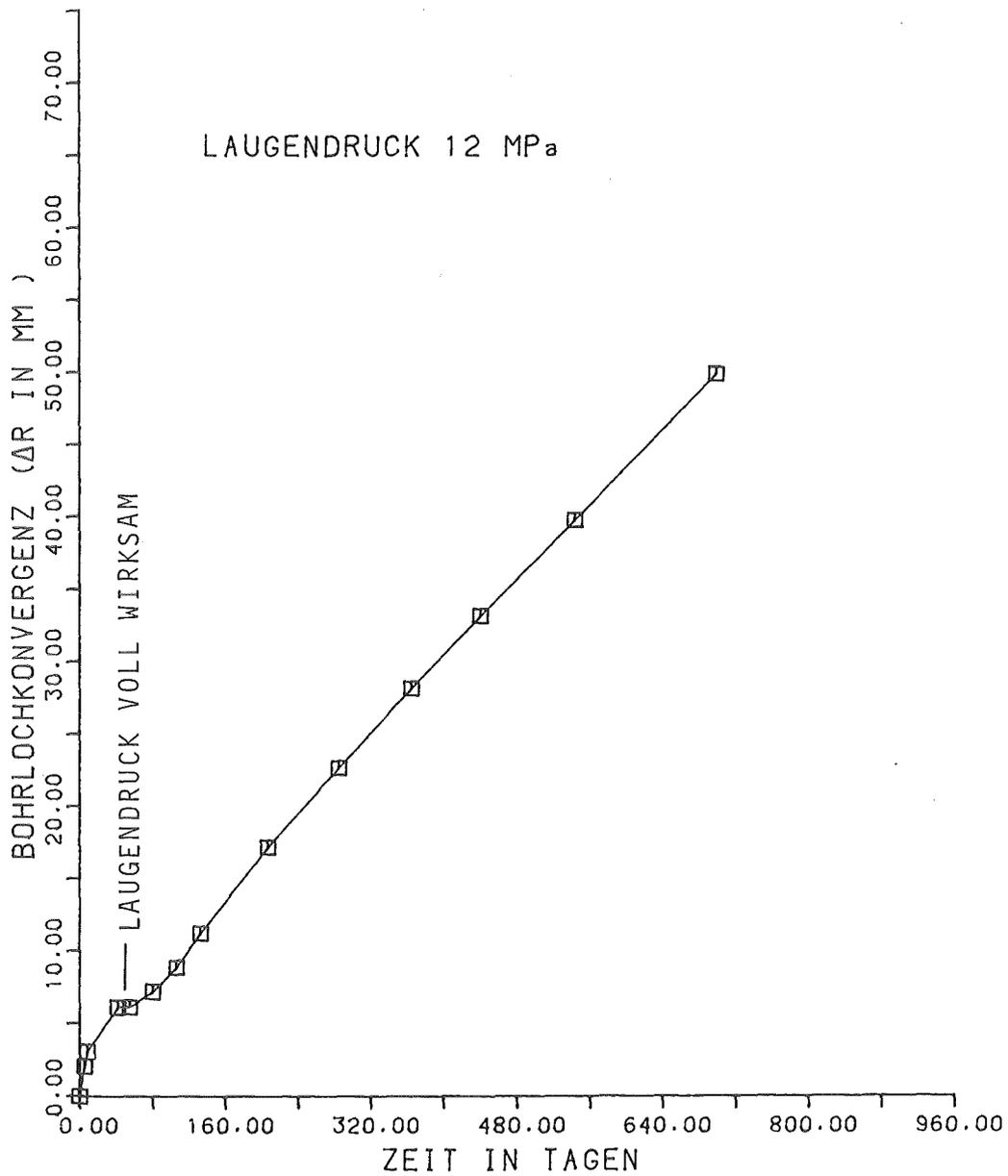


ABB 13 ZEITLICHER VERLAUF DER BOHRLOCH-
KONVERGENZ BEI LAUGENZUTRITT
(RECHNUNG MIT ADINA)

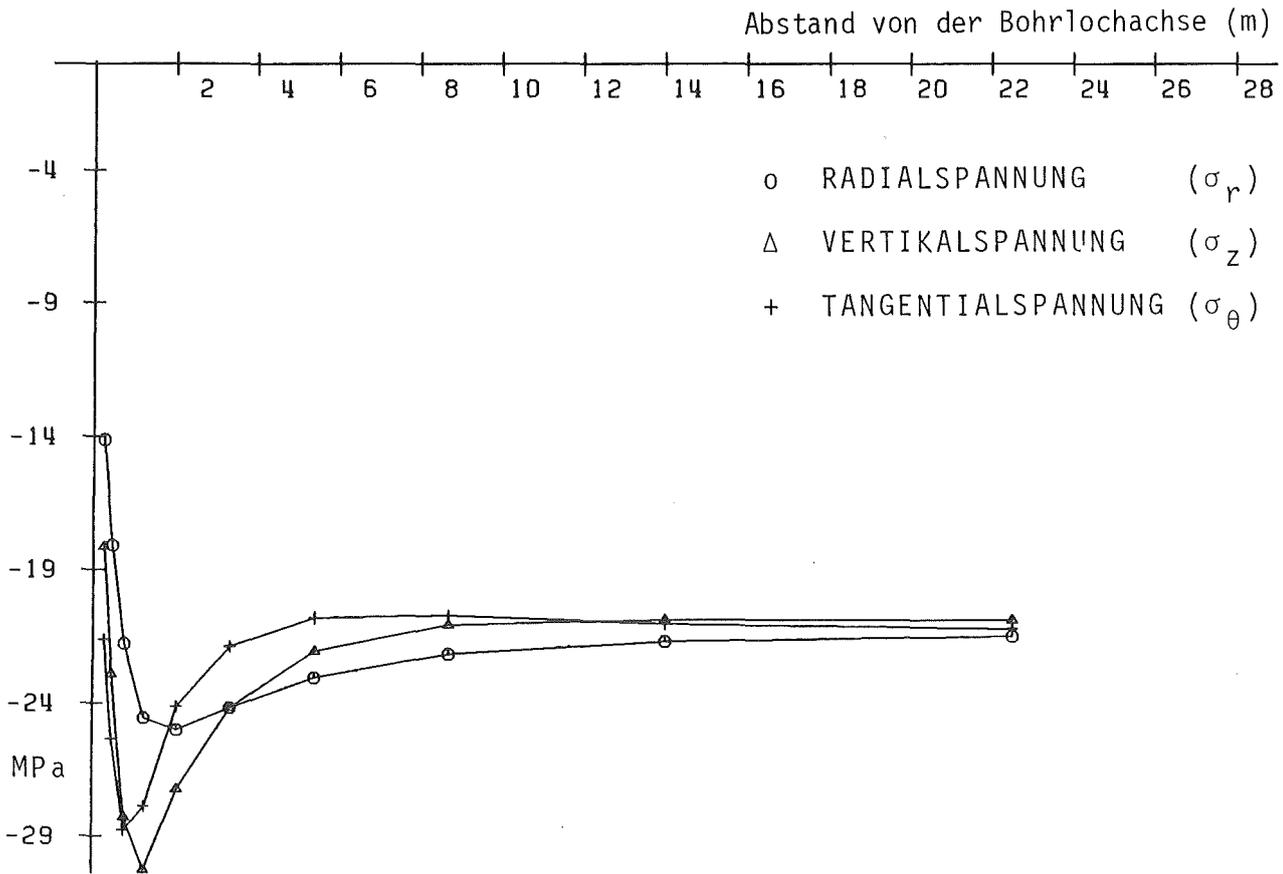


ABB. 14 MIT DEM PROGRAMM ADINA ERMITTELTEN RADIALER VERLAUF DER VERTIKAL-, TANGENTIAL- UND RADIALSPANNUNGEN NACH 40 TAGEN

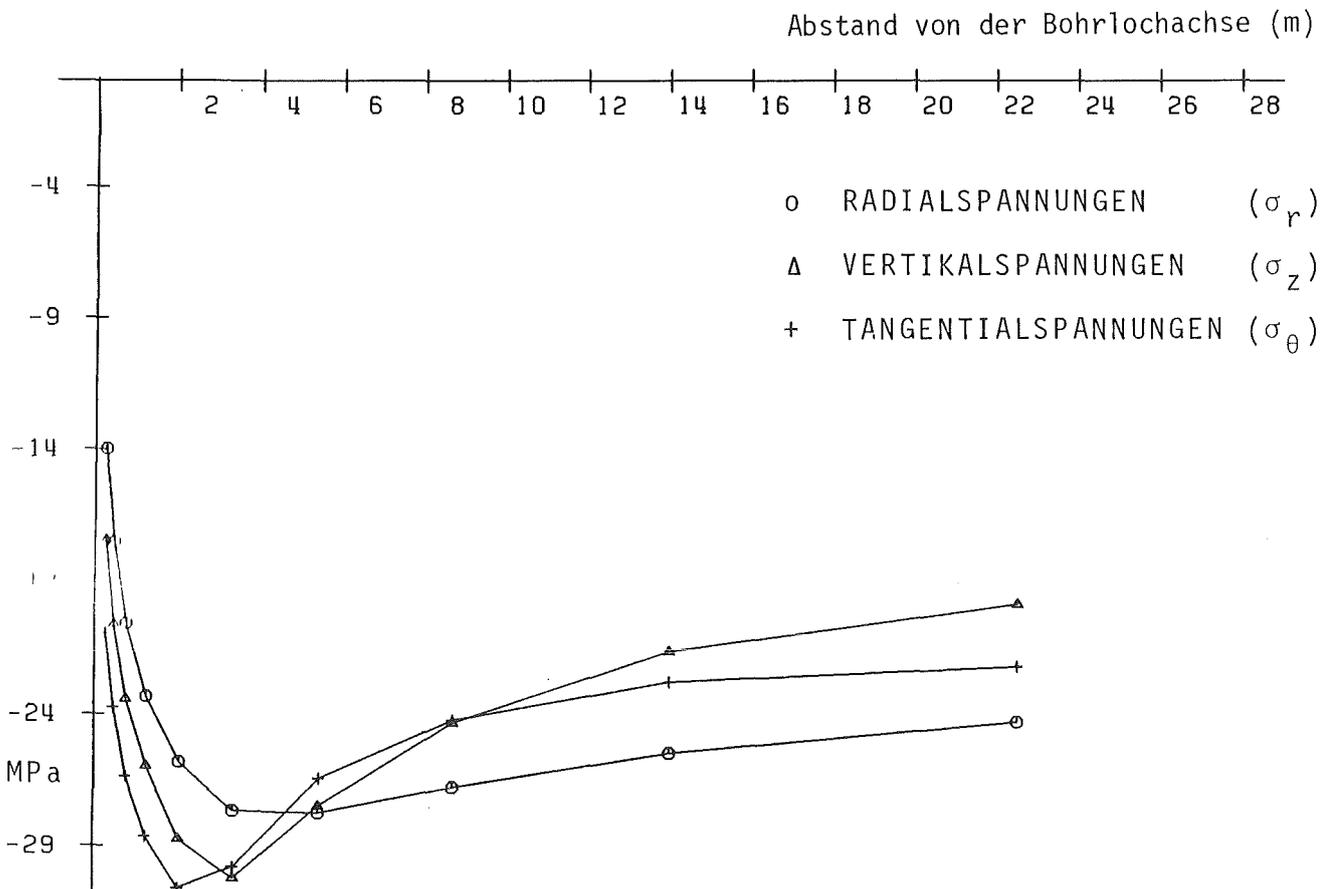


ABB. 15 MIT ADINA ERMITTELTEN RADIALER VERLAUF DER VERTIKAL-, TANGENTIAL- UND RADIALSPANNUNGEN NACH 2 JAHREN