



Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH

GRS-Bericht

Sensitivitätsstudie zum thermomechanischen Verhalten des Steinsalzes bei der Einlagerung radioaktiver Abfälle

Golam Mohd. Mohiuddin

GRS-49 (Juli 1982)

Anmerkung:

Dieser Bericht wurde im Rahmen der Vorhaben SR 122, A.5.6 bzw. SR 274, A.1.3 des Bundesministers des Innern erstellt. Er ist inhaltsgleich mit dem Auftragsbericht GRS-A-619 (Juli 1981). Die darin enthaltenen Arbeitsergebnisse müssen nicht mit der Auffassung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren:

Endlagerung - Steinsalzkenwerte - In-situ-Experimente - Programmtechnik - Verifizierung

Kurzfassung

Die Rechnungen, die in dieser Arbeit durchgeführt wurden, zeigen, daß das Rechenprogramm STEALTH für die Berechnungen der Temperatur- und Spannungsfelder in einem Salzstock, in dem radioaktive Abfälle lagern, geeignet ist. Bei der hier verwendeten Fassung von STEALTH handelt es sich um die von Wahi et al. (Wa et al. 78) erweiterte Version, in der das von Maxwell et al. (Ma et al. 78) entwickelte Kriechmodell eingearbeitet ist, so daß sie auch die Konvergenz der Grubenräume zu bestimmen vermag. Diese STEALTH-Version wurde in (Sa, Ba 79) zur Nachrechnung des Temperaturfeldversuches erfolgreich angewendet.

Festgestellt wird, daß die berechnete Konvergenz (z.B. die Bohrlochkonvergenz im Temperaturfeldversuch 3 in Asse) fast ausschließlich aus Kriechdeformation besteht. Da diese wiederum stark von der Temperatur und Spannung abhängt, ist die Voraussetzung für eine bessere Übereinstimmung der Rechnungen mit den Experimenten eine genauere Kenntnis des Kriechmechanismus im Salz sowie die Formulierung eines geeigneteren Kriechansatzes.

Abstract

Calculations performed in this study have shown that the STEALTH code is suitable for the prediction of temperature and stress field in a salt dome where radioactive wastes are stored. The STEALTH version used here has been extended by Wahi et al. (Wa et al. 78) and includes the creeping model developed by Maxwell et al. (Ma et al. 78), thus allowing to determine the closure of the caverns too. GRS (Sa, Ba 79) has successfully used this STEALTH version for post-calculations of the temperature field experiment.

It has been found that the calculated closure (e.g. the closure of borehole in the temperature field experiment no. 3 in Asse) results almost solely from the creep deformation. As creep deformation depends very much on the temperature and the stress, a better knowledge of the creep mechanism in salt as well as the formulation of a suitable creep law are the prerequisites for a better agreement between calculations and experiments.

I N H A L T

	Seite
1. Einleitung	1
2. Bisherige Untersuchungen zur Kriechverformung des Steinsalzes	1
3. Einflußparameter	5
4. Simulation des Temperaturfeldversuches TV3	6
5. Ergebnisse	8
Schrifttum	11
Verzeichnis der Abbildungen	13

1. EINLEITUNG

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle ist seit einigen Jahren Gegenstand intensiver Studien, wobei von verschiedenen Ländern unterschiedliche Lösungswege angegangen werden. In der Bundesrepublik Deutschland sind mehrere Institute mit der Untersuchung von Problemen befaßt, die bei der Errichtung einer Lagerstätte im Salzstock zu erwarten sind. Solche Fragen können sein:

- Stabilität und Konvergenz der Grubenräume während des Einlagerungszeitraums,
- Einhaltung von Temperaturgrenzen,
- Standsicherheit von Pfeilern,
- Einfluß einer sequenziellen Einlagerungsplanung,
- Langzeitverhalten des Salzstocks,
- induzierte Bewegungen im Nebengestein,
- Bewegung der Erdoberfläche oberhalb des Salzstockes.

Zur Klärung dieser Fragen ist es notwendig, geeignete Rechenmethoden zu entwickeln und diese anhand vorliegender Versuchsergebnisse zu verifizieren.

Im Rahmen eines Auftrages des Bundesministers des Innern wurde in der GRS (Sa, Ba 79) das Programm STEALTH für die Nachrechnung von zwei In-situ-Versuchen zur Einlagerung radioaktiver Abfälle (Project Salt Vault, Kansas, USA; Temperaturfeldversuch 3 im Salzbergwerk Asse) erfolgreich angewendet.

Die für solche Untersuchungen erforderlichen Materialdaten unterliegen einer Streubreite. Ziel dieser Untersuchung ist es, Parameter zu identifizieren, die geeignet sind, die Ergebnisse empfindlich zu beeinflussen. Dazu wurde, ausgehend von den Untersuchungen in (Sa, Ba 79), eine Sensitivitätsstudie durchgeführt. Die Ergebnisse geben Hinweise auf Problemkreise, die besonders aufmerksam verfolgt werden müssen.

2. BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN ZUR KRIECHVERFORMUNG DES STEIN-SALZES

Die in einer Lagergrube auftretende Deformation der Wände sowie der Decke und des Bodens setzt sich aus thermischen, elastischen und plastischen Verformungen zusammen. Sie umfaßt neben der bleibenden Dehnung, die sofort nach Aufbringen der Belastung eintritt, wenn diese die Streckgrenze des Materials überschreitet, auch die langsame, zeitlich abhängige Kriechverformung. Für die Endlagerung ist die irreversible, plastische Deformation, insbesondere die Kriechverformung von großer Bedeutung, da es sich hierbei um eine sehr lange Zeitspanne handelt.

Im Rahmen des amerikanischen Projektes Salt Vault wurden umfangreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen durchgeführt (Lo 71), die zum Verständnis des Kriechmechanismus von Salz beitragen. Aus den experimentellen Daten konnte ein empirisches Gesetz für das Kriechen des Salzes hergeleitet werden. Dabei wurden Proben verschiedener Herkunft (darunter auch Proben aus Asse) untersucht. Es ergab sich, daß die Kriechverformung der Salzproben aus den meisten Bergwerken unter Einwirkung einer bestimmten einaxialen Spannung ($\sigma \approx 27,56 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$) und einer Raumtemperatur von $T = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ vergleichbar ist, bei einer erhöhten Temperatur ($T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$) sich die Proben jedoch stark unterschiedlich verhalten. Eine Erklärung über dieses unterschiedliche Verhalten konnte von den Autoren nicht gegeben werden. Ihre Messungen zeigten, daß die Dehnung sowohl von der Form der Proben (Zylinder, Quader) als auch von dem Verhältnis Durchmesser zu Höhe d/h (bei Quader: Breite zu Höhe) abhängt. Bei einer Versuchsdauer von 1000 Stunden ist die Dehnung eines Quaders gegenüber der Dehnung eines Zylinders vom gleichen d/h unter gleicher Spannung und bei gleicher Temperatur etwa 40 % höher. Die niedrigere Festigkeit des Quaders wird dadurch verursacht, daß an den Ecken wegen der Spannungskonzentration Risse entstehen und sich somit der effektive Querschnitt, der die Belastung aufnimmt, verringert. Versuche mit zylinderförmigen Proben von unterschiedlichem d/h , jedoch bei gleicher Spannung, Temperatur und Versuchsdauer ergaben, daß mit steigendem d/h die Dehnung abnimmt, Meßergebnisse mit Proben mit und ohne Schmierung der Kontaktflächen Probe/Druckstempel zeigten, daß die Dehnung bei den geschmierten Proben um ein Vielfaches höher ist als die Dehnung bei ungeschmierten. Wird die Probe etwa auf halber Höhe getrennt und anschließend dort geschmiert, die Kontaktflächen (Probe/Druckstempel) jedoch ungeschmiert gelassen, so stellt man fest, daß die Dehnungen dieser Probe von einer gänzlich ungeschmierten sich kaum unterscheiden.

Bei einer Reihe durchgeführter Messungen wurde sowohl die Spannung als auch die Temperatur über weite Bereiche variiert. Die Meßdauer betrug teilweise mehr als 3 Jahre. Es zeigte sich, daß die Temperaturänderung einen vielfach höheren Einfluß auf die Dehnung besitzt als die Spannungsänderung. Dies geht auch aus dem angegebenen empirischen Ansatz, der die Messungen gut anpaßt, hervor (Lo 71). Der nachfolgend angegebene Ansatz gilt für zylinderförmige Proben von $d/h = 4$.

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon} &= 1,022 \cdot 10^{-50} T^{9,5} \sigma^3 t^{-0,7} \\ \epsilon &= 3,41 \cdot 10^{-50} T^{9,5} \sigma^3 t^{0,3}\end{aligned}\tag{1}$$

wobei

- ϵ = Dehnung
- $\dot{\epsilon}$ = Dehngeschwindigkeit pro Sekunde
- T = Temperatur in Kelvin
- σ = mittlere Spannung in N/m^2
- t = Zeit in Sekunde

In den Gleichungen (1) sind nur die Zahlenwerte der Variablen T , σ , t einzusetzen. Für die Herleitung des Kriechgesetzes wurden die Dehnungen ab der 2. Minute nach der Lastaufbringung berücksichtigt, so daß die empirische Formel die Anfangsdehnung nicht betrachtet. Wahi et al. (Wa et al. 77) extrapolierten diesen Ansatz für schlanke Proben ($d/h \rightarrow 0$). Maxwell et al. (Ma et al. 78) erweiterten den Ansatz schließlich derart, daß die Berechnung der Kriechdeformation auch bei einer sprunghaften Änderung der Temperatur und Spannung während des Kriechvorgangs möglich wurde. In dieser modifizierten Form ist der Ansatz unabhängig von der Geometrie der Probe (siehe z.B. Ma et al. 78). In der Nachrechnung des Temperaturfeldversuches TV3 (Sa, Ba 79) wurden mit folgendem Ansatz gute Ergebnisse erzielt:

$$\langle e_v^{Kr} \rangle = 5,37 \cdot 10^{-49} [t - \lambda(t)]^{0,3} T^{9,5} \langle s_v \rangle^3 \quad (2)$$

wobei

$\langle e_v^{Kr} \rangle$ = Vergleichsdehnung

$\langle s_v \rangle$ = Vergleichsdeviatorspannung

λ = Parameter der Dimension der Zeit (hier: Sekunde)

Die genaue Bedeutung der obigen Parameter ist in (Sa, Ba 79) zu finden.

Neben diesem empirischen Ansatz existiert ein weiteres Kriechgesetz, das von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) entwickelt wurde (siehe z.B. (Hu 79; Hu 80)). Dieses Gesetz ist physikalisch begründet und bezieht die im Kristallgitter und an den Kristallgrenzen sich abspielenden Deformationsprozesse ein. In der BGR wurden umfangreiche Messungen an zylinderförmigen und würfelförmigen Probekörpern des älteren Steinsalzes aus verschiedenen Tiefen des Salzstockes Benethe durchgeführt. Dabei kam der in der Metallverarbeitung gebräuchliche Ansatz, wonach das Fließen von der Verformungsrate $\dot{\epsilon}$, mechanischen Spannung σ , Temperatur T und Vorgeschichte des Materials abhängig ist, zur Anwendung. Die Mechanismen, die den Kriechvorgang bestimmen, sind im wesentlichen Versetzungsgleiten, Versetzungsklettern und Diffusion. Ausführliche Diskussionen über diese Vorgänge sind z.B. in (Hu 79), (Hu 80) sowie in (Il 73) zu finden.

Die Kriechverformung läßt sich in 3 Bereiche unterteilen: primäres Kriechen (Übergangskriechen), sekundäres Kriechen (stationäres Kriechen) und tertiäres Kriechen, das schließlich zum Bruch führt. Vor dem Eintreten der zeitabhängigen Dehnung wird eine Anfangsdehnung, die sich aus einem elastischen und einem plastischen Anteil zusammensetzt, festgestellt. Diese Anfangsdehnung ist bei Experimenten schwer abzugrenzen. Aus diesem Grunde wird die gemessene Dehnung in den ersten Minuten (bei Projekt Salt Vault z.B. in den ersten 2 Minuten) nach der Lastaufbringung der Anfangsdehnung definiert. Die anfänglich große Geschwindigkeit, mit der der Kriechvorgang einsetzt, nimmt im Übergangsbereich ab. Diese Abnahme wird durch die gegenseitige

Blockierung der im Kristallkorn wandernden Versetzungen und durch die damit verbundene Verfestigung des Werkstoffs verursacht. Dem primären Kriechen schließt sich das stationäre Kriechen an. In dieser Phase bleibt die Kriechgeschwindigkeit konstant. Für Langzeitkriechen ist dies der wichtigste Kriechbereich. Die Verfestigungsvorgänge und Erholungsvorgänge laufen mit gleicher Geschwindigkeit ab; sie stehen miteinander im Gleichgewicht. Die Erholungsvorgänge können als Klettern von Versetzungen, Diffusion von Leerstellen, Polygonisierung, Wandern von Feinkorngrenzen, Rekristallisation verstanden werden (siehe z.B. (Hu 79)). Bei genügend großen Spannungen oder auch bei ausreichend hohen Temperaturen beschleunigt sich die Kriechgeschwindigkeit, bis schließlich der Bruch im tertiären Bereich eintritt. Diese Fälle sind in Bild 1 schematisch dargestellt.

Der gesamte Kriechvorgang wird durch folgenden Ansatz beschrieben:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_t (1 - e^{-mt}) + \dot{\varepsilon}_s t \quad (3)$$

Der erste Term auf der rechten Seite von Gleichung (3) stellt die Anfangsdehnung dar. Der mittlere Term beschreibt das primäre Kriechen. Die Größe des Parameters m gibt an, nach welcher Zeit t der Klammerausdruck gleich 1 gesetzt werden kann, so daß weitere Verformungen vom sekundären Kriechen getragen werden. Der Parameter ε_t ist eine Funktion der vorliegenden Spannung und Temperatur. Er läßt sich durch einen Arrhenius-Ansatz ausdrücken (Il 73).

$$\varepsilon_t = B \exp\left(-\frac{Q_t}{RT}\right) \sigma^n \quad (4)$$

Hunsche (Hu 80) konnte seine Meßergebnisse mit den Ansätzen (3) und (4) anpassen. Für die einzelnen Parameter gibt er folgende Werte an:

$$\begin{aligned} B &= 0,21 \text{ MPa}^{-5} \\ Q_t &= 10,7 \text{ kcal/mol} \\ R &= 1,986 \cdot 10^{-3} \text{ kcal/(kmol K)} \\ n &= 5 \\ m &= 0,35 \text{ d}^{-1} \end{aligned}$$

Formelmäßig läßt sich auch das stationäre Kriechen durch einen Arrhenius-Ansatz ausdrücken.

$$\dot{\varepsilon}_s = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \sigma^n \quad (5)$$

Die Größe des präexponentiellen Faktors A und der Aktivierungsenergie Q wurde ebenfalls von Hunsche (Hu 80) durch graphische Auswertung der Meßergebnisse ermittelt.

$$\begin{aligned} A &= 0,18 \text{ Mpa}^{-5} \text{ d}^{-1} \\ Q &= 12,9 \text{ kcal/mol} \end{aligned}$$

Zu der Anfangsdehnung ε_0 wird in (Hu 80) festgestellt, daß diese von der gleichen Größenordnung ist wie die Dehnung durch das primäre Kriechen. Bei der theoretischen Berechnung der Kriechverformung (z.B. Nachrechnung der Druckversuche der BGR) muß daher die Anfangsdehnung gesondert betrachtet werden.

3. EINFLUSSPARAMETER

Die wesentlichen Einflußparameter, die bei der Berechnung der Konvergenz des Bohrloches oder der Grubenräume eine Rolle spielen, sind einerseits Größen, mit denen die elastische Eigenschaft des Materials beschrieben wird (Kompressionsmodul K , Gleitmodul G , Querkontraktionszahl ν und Elastizitätsmodul E) und andererseits die Parameter, die die Größe der Kriechdehnung bestimmen. Daneben ist der Streckgrenzenwert wichtig, bei dessen Überschreitung die plastische Dehnung einsetzt. Da die Temperatur sehr stark in die Kriechgesetze eingeht, sind die thermischen Größen (spezifische Wärmekapazität c_p , Wärmeleitkoeffizient λ), die über die Energiebilanz die Größe der Temperatur bestimmen, für die Berechnung der Konvergenz mitentscheidend. Die Größen K , G , ν und E sind durch folgende Beziehungen miteinander verknüpft, so daß durch die Wahl von zwei Größen die übrigen zwei festgelegt werden.

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (6)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (7)$$

In der Literatur angegebene Werte dieser Größen weichen stark voneinander ab. Sie sind nicht nur von den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Proben abhängig, sondern auch von den Versuchsbedingungen (Geschwindigkeit der Lastaufbringung, Behandlung der Kontaktflächen Probe/Druckstempel, z.B. Schmierung). Über die Größe der Streckgrenze findet man stark unterschiedliche Werte. Nach Baar (Ba 77) liegt die Fließgrenze innerhalb von 10 bar. Einige Autoren sind der Meinung, daß bei Salz keine ausgeprägte Streckgrenze vorhanden ist (so z.B. (Hu 79; Ke 73; St, As 73)).

In einem neueren Bericht der BGR (Wa 79) wird ein temperaturabhängiger Ansatz für den Elastizitätsmodul Steinsalz angegeben.

$$E = 15000 - 40 T; [E] = \text{MPa} \quad (8)$$

Die Temperatur ist in dieser Gleichung in $^{\circ}\text{C}$ einzusetzen. In seiner Berechnung nahm Wallner (Wa 79) für die Querkontraktionszahl $\nu = 0,45$ an, wobei Wahi et al. (Wa et al. 77) $\nu = 0,4$ verwendeten. Um die Einflüsse der elastischen Materialeigenschaften auf die Konvergenz zu prüfen, wurden eine Reihe von Rechnungen für den Temperaturfeldversuch TV3 durchgeführt. Dabei wurden folgende Sätze der Parameter verwendet:

Tab. 1:

Verwendete Parametersätze

Nr.	K	G	v	E
1	$1,11 \cdot 10^{10}$ Pa	$8,33 \cdot 10^9$ Pa	0,2	$1,5 \cdot 10^{10}$ Pa
2	$2 \cdot 10^{10}$ Pa	$7,5 \cdot 10^9$ Pa	0,33	$2 \cdot 10^{10}$ Pa
3	$3,33 \cdot 10^{10}$ Pa	$7,14 \cdot 10^9$ Pa	0,4	$4,27 \cdot 10^9$ Pa
4	$1,31 \cdot 10^{10}$ Pa	$5 \cdot 10^9$ Pa	0,33	$1,31 \cdot 10^{10}$ Pa

4. SIMULATION DES TEMPERATURFELDVERSUCHES TV3

Zur Simulation des Verhaltens eines Salzstockes bei der Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen wurden in der Schachanlage Asse 2 Versuche durchgeführt. Von der Sohle auf 750 m Tiefe wurde ein Loch von ca. 27 m Tiefe und 320 mm Durchmesser gebohrt. Mit Hilfe von 5 zylindrischen Elektroheizern (1 m Länge und 200 mm Durchmesser) wurde dieses Bohrloch beheizt. Die selbstzentrierenden Heizer waren beweglich miteinander verbunden und wurden auf der Bohrlochsohle abgesetzt. Das aufgeheizte Bohrloch wurde an seinem oberen Ende durch einen Glaswollepfropfen verschlossen. Während des Versuchsbetriebes wurden die Heizer mehrfach für kurze Zeit aus dem Bohrloch entfernt, um eine Sonde für die Konvergenzmessung einzufahren. Neben der Konvergenzmessung wurde mit Hilfe von Thermoelementen auch an verschiedenen Stellen die Temperatur gemessen. Die Temperaturmeßstellen lagen alle auf einer vertikalen Ebene. Nach 90 Tagen wurde der Versuch abgebrochen, da die Konvergenz des Bohrloches weit fortgeschritten war. Die Heizleistung, die durch kurzzeitige starke Schwankungen gekennzeichnet war, konnte durch einen exponentiell abfallenden Ansatz approximiert werden (Du et al. 79).

$$q(t) = q_0 e^{-\alpha t} \quad (9)$$

wobei

$q(t)$ = abgegebene Wärmeleistung zur Zeit t

q_0 = Anfangswärmeleistung; $q_0 = 8,9$ kW

α = Abklingkonstante; $\alpha = 1,62 \cdot 10^{-8}$ 1/s

Für die Nachrechnung des Versuches wurde ein zylindrischer Ausschnitt von 20 m Radius und 58 m Höhe betrachtet. Dieser Ausschnitt wurde in 19 senkrechte und 50 waagerechte Maschen unterteilt. Die erste senkrechte Masche hatte die Weite des Bohrloches. In dieser Masche befindet sich bis zu einer bestimmten Höhe Salzgrus, worauf die Wärmequelle abgesetzt war (Bilder 2 bis 4). Außerhalb des Bohrloches befindet sich Steinsalz.

Bereits in (Dü et al. 79) ist festgestellt worden, daß ein wesentlicher Teil der Heizleistung durch Konvektion in Bereiche oberhalb des Heizers transportiert und dort an die Wand abgegeben wurde. Vereinfachend wurde dieser konvektive Transport durch Verlagerung eines Teiles (20 %) der Heizleistung in eine Zone oberhalb der Heizer berücksichtigt. Angenommen wurde, daß der Gebirgsdruck auf einen Kreisringquerschnitt von der Abmessung 20 m Außenradius und 5 m Innenradius wirkt. Nachfolgend sind Randbedingungen für die Impuls- und Energiegleichungen angegeben (vgl. Bilder 3 und 4).

$$\begin{aligned} j = 51; \quad i = 1-10: \quad p &= 0 \\ j = 51; \quad i = 10-20: \quad p &= \sigma_y = 1,595 \cdot 10^7 \text{ Pa} \\ &\quad \text{(Gebirgsdruck)} \\ j = 51; \quad i = 1-20: \quad T &= 31 \text{ }^\circ\text{C} = \text{konst.} \\ j = 51-1; \quad i = 1: \quad \dot{x} &= 0, \quad \dot{y} = 0, \quad \frac{dT}{dx} = 0 \\ j = 1; \quad i = 1-20: \quad \dot{y} &= 0, \quad T = 31 \text{ }^\circ\text{C} = \text{konst.} \\ j = 1-51; \quad i = 20: \quad \dot{x} &= 0, \quad T = 31 \text{ }^\circ\text{C} = \text{konst.} \end{aligned}$$

Zur Zeit $t = 0$ beträgt die Temperatur des gesamten Ausschnitts $31 \text{ }^\circ\text{C}$.

Für die Berechnung der thermischen Parameter wurden die Ansätze von (Pl et al. 79) verwendet, da die in dieser Arbeit berechnete Temperatur gut mit den Experimenten übereinstimmt.

Steinsalz:

- Wärmeleitfähigkeit:

$$\lambda(T) = (5,734 - 1,838 \cdot 10^{-2} T + 2,86 \cdot 10^{-5} T^2 - 1,51 \cdot 10^{-8} T^3) \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$$

- Wärmekapazität:

$$c_p(T) = (1,87049 \cdot 10^6 + 1,9386 \cdot 10^2 T) \frac{\text{J}}{\text{m}^3 \text{ }^\circ\text{C}}$$

- Dichte:

$$\rho = 2164 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- volumetrischer Wärmeausdehnungskoeffizient:

$$\beta = 1,2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{K}}$$

Die verwendeten Werte für G und K sind in der Tabelle 1 enthalten.

Grus:

- Wärmeleitfähigkeit:
$$\lambda(T) = (0,3022 + 1,568 \cdot 10^{-3}T - 2,37 \cdot 10^{-6}T^2) \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$$
- Wärmekapazität:
$$c_p(T) = (1,30968 \cdot 10^6 + 1,35016 \cdot 10^2 T) \frac{J}{m^3 \cdot ^\circ C}$$
- Dichte:
$$\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$$
- volumetrischer Ausdehnungskoeffizient:
$$\beta = 0,6 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K}$$
- Schubmodul:
$$G = 0$$
- Kompressionsmodul:
$$K = 2 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

Die Berechnung mit STEALTH erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Rechenschritt wird der stationäre Zustand ermittelt. Während dieser Zeitspanne wurde keine Wärmeabgabe aus der Heizung zugelassen (d.h. die Heizer wurden nicht 'eingeschaltet'), so daß die Gleichgewichtstemperatur des gesamten Gitters 31 °C (Umgebungstemperatur) betrug. Damit wurde der Zustand des Versuchsfeldes vor Beginn des Heizereinschaltens simuliert.

Mit dem zweiten Teil beginnt die eigentliche Berechnung der plastischen Deformationen und der Temperaturentwicklung. Zu Beginn dieses Teilschrittes wurden die Heizer eingeschaltet. Um die Rechenkosten zu senken, wurde eine Zeitschrittoptimierung eingeführt. Durch diese Maßnahme wird der Zeitschritt zur Berechnung des Fließverhaltens, dessen Obergrenze durch das Courant-Kriterium gegeben ist, und der im allgemeinen bei quasistatischen Problemen gegenüber dem Zeitschritt zur Berechnung der Temperaturverteilung vielfach kleiner ist, in die Größenordnung des thermischen Zeitschritts angehoben (siehe z.B. (Sa, Ba 79) und (Wa et al. 80)). Die Streckgrenze des Salzes wurde absichtlich sehr hoch angenommen (10^8 Pa), so daß die zeitunabhängige plastische Deformation nach Aufbringung der Last unterdrückt wird, da dies den vorliegenden Anfangsbedingungen im Versuch entspricht.

5. ERGEBNISSE

Die Ergebnisse, die hier diskutiert werden sollen, lassen nach einem Vergleich mit den Versuchsergebnissen die Schlußfolgerung zu, daß mit Hilfe des Programms STEALTH die zeitliche und örtliche Spannungs- und Temperaturverteilung sowie die Deformation der Grubenwände und Pfeiler eines Endlagers für radioak-

tive Abfälle berechnet werden können. Dazu müssen die Materialdaten (mechanische, thermische) ausreichend bekannt sein. In der Tabelle 2 sind die Konvergenzen des Bohrloches in Heizerhöhe, berechnet jeweils mit den in Tabelle 1 zusammengestellten Parametersätzen, angegeben (vgl. Bild 9).

Tab. 2:

Berechnete und gemessene Bohrlochkonvergenz

Nr.	Bohrlochkonvergenz nach	
	10,4 Tagen	22 Tagen
1	19,6 mm	30,2 mm
2	20,9 mm	32,0 mm
3	22,3 mm	35,0 mm
4	18,8 mm	30,0 mm
Experiment	11,0 mm	20,0 mm

Obwohl die Materialdaten, die die elastischen Eigenschaften des Salzes beschreiben, in weiten Bereichen verändert wurden (Tabelle 1), sind die berechneten Konvergenzen alle von der gleichen Größenordnung. Sie sind größer als die gemessene Konvergenz. Diese Materialdaten haben somit auf die Konvergenz keinen wesentlichen Einfluß, wie auch von Baar (Ba 77; S. 86) berichtet wird. Diese Tatsache spricht für die Zuverlässigkeit von STEALTH. Außerdem ist feststellbar, daß bei gleichem Elastizitätsmodul E , jedoch steigender Querkontraktionszahl die Konvergenz wächst (Tabellen 1 und 2, Nr. 1, 2, 3).

Um herauszufinden, welcher Anteil der Gesamtkonvergenz von der thermoelastischen Ausdehnung herrührt, wurden zwei zusätzliche Rechnungen durchgeführt, in denen die Heizer eingeschaltet, die Berechnung der Kriechdehnung in der entsprechenden Unter-routine jedoch unterdrückt wurde.

Aus Bild 11 und 17 ist ersichtlich, daß die thermoelastische Ausdehnung nach 22 Tagen etwa 1 mm beträgt. Die in Tabelle 2 angegebenen Konvergenzen werden daher fast ausschließlich von dem Kriechmechanismus hervorgerufen. Aus den zeitlichen Verläufen von Druck p und Deviatorspannung s_{xx} für den Fall reiner thermoelastischer Deformation (Bilder 13, 14, 17, 18) kann man entnehmen, daß bei großem Kompressionsmodul K sowohl p als auch s_{xx} größer ist. Größere Deviatorspannung führt, wenn Kriechdeformation nach Gleichung (2) mitberücksichtigt werden soll, zu größeren Dehnungen. Die zeitliche Änderung der Temperaturverteilung verändert sich bei der Parametervariation nicht (Bild 8).

Nach dem in (Wa 79) angegebenen temperaturabhängigen Elastizitätsmodul (Gleichung 8) und der Querkontraktionszahl $\nu = 0,45$ erhält man für den zu erwartenden Temperaturbereich von 31 bis 100 °C den Wertebereich für Kompressionsmodul $K = 4,6 \cdot 10^{10} \text{ Pa} - 3,1 \cdot 10^9 \text{ Pa} - 3,24 \cdot 10^9 \text{ Pa}$. Größenordnungsmäßig entsprechen sie den in Tabelle 1 aufgelisteten Werten, so daß ihre Verwendung in der Rechnung keine nennenswert verbesserten Ergebnisse verspricht. Bessere Übereinstimmung der Rechnungen mit den experimentellen Ergebnissen kann man daher nur durch geeignete Modifikation des Kriechgesetzes erzielen. Das empirische Gesetz (Gleichung 1) wurde, wie bereits beschrieben, anhand von Proben verschiedener Herkunft gewonnen. Gerade bei höheren Temperaturen dehnen sich die Proben aus verschiedenen Salzstöcken unterschiedlich stark. Ein speziell für Asse-Salz hergeleitetes Kriechgesetz könnte daher noch bessere Ergebnisse liefern.

Schrifttum

- (Ba 77) Baar, C.A.:
Applied Salt-Rock Mechanics, I - The In-situ Behavior of Rocks
Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York, 1977
- (Dü et al. 79) Dürr, K., E. Korthaus und P. Donath:
Untersuchungen zur Temperaturentwicklung bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle; Teil II: Experimentelle Überprüfung der Rechenverfahren anhand von Simulationsversuchen
Atomwirtschaft (1979), S. 91/4
- (Hu 79) Hunsche, U.:
Das Fließverhalten von Steinsalz
Studie zur Extrapolation von Versuchsergebnissen auf lange Zeiträume; 2. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben SR 138
Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 1979
- (Hu 80) Hunsche, U.:
Ergebnisse der Untersuchungen zum Festigkeits- und Fließverhalten von Steinsalz
5. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben SR 138
Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 1980
- (Il 73) Ilchner, B.:
Hochtemperaturplastizität
Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer Verlag, 1973
- (Ke 73) Kertz, W.:
Die Salzstockbildung, ein weitgehend erklärbarer geotektonischer Prozeß
Jb. Akad. Wiss. Göttingen (1973), S. 56/76
- (Lo 71) Lomenick, T.F.:
Laboratory Pillar Model Experiments; Project Salt Vault: A Demonstration of the Disposal of High-Activity Solidified Wastes in Underground Salt Mines
ORNL 4555, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, 1971
- (Ma et al. 78) Maxwell, D.E., K.K. Wahi, J.E. Reaugh und R. Hofmann:
A Time-Dependent Creep Model for Salt
Proc. 5. International Symp. on Salt, Hamburg, 1978

- (Pl et al. 79) Ploumen, P., S. Strickmann und P. Winske:
Untersuchung zur Temperaturentwicklung bei
der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle;
Teil I: Berechnung der zeit- und ortsabhän-
gigen Temperaturfelder
Atomwirtschaft (1979), S. 85/91
- (Sa, Ba 79) Salz, W., und B. Baltes:
Simulation thermomechanischer Bewegungen im
Steinsalz bei der Einlagerung radioaktiver
Abfälle
GRS-23 (in Druck)
- (St, As 73) Stocker, R.L., und M.F. Ashby:
On the Rheology of the Upper Mantle
Rev. Geophys. Space Phys. 11 (1973), S. 391/426
- (Wa et al. 77) Wahi, K.K., D.E. Maxwell und R. Hofmann:
A Simulation of the Thermomechanical Response
of Project Salt Vault (Final Report)
SAI-FR-702, Science Applications, Inc., 1977
- (Wa et al. 78) Wahi, K.K., D.E. Maxwell und R. Hofmann:
Explicit Finite-Difference Simulations of Pro-
ject Salt Vault
19. Rock Mechanics Symp., Stateline, Nevada,
1978
- (Wa 79) Wallner, M.:
Thermisch induzierte Spannungen bei der End-
lagerung hochradioaktiver Abfälle
4. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben
SR 138
Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und
Rohstoffe, 1979
- (Wa et al. 80) Wahi, K.K., W. Salz und B. Baltes:
Numerical Simulation of a Thermally-Loaded
Rock Mass Surrounding a Borehole
Am. Soc. Mech. Eng., Pap. (80-HT-40), Juli
1980, S. 1/9

Verzeichnis der Abbildungen

- Bild 1: Schematische Darstellung der verschiedenen Kriechbereiche
- Bild 2: Schnitt durch das Temperatur-Versuchsfeld 3
- Bild 3: Geometrie und Randbedingungen
- Bild 4: Rechengitter für Temperaturfeldversuch 3
- Bild 5: Konvergenz des Bohrloches in Heizerhöhe; $x = 0,16$ m, $z = 32,8$ m, $K = 1,11 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 8,33 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,2$
- Bild 6: Konvergenz des Bohrloches in Heizerhöhe; $x = 0,16$ m, $z = 32,8$ m, $K = 2 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 7,5 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,33$
- Bild 7: Konvergenz des Bohrloches in Heizerhöhe; $x = 0,16$ m, $z = 32,8$ m, $K = 3,33 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 7,14 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,4$
- Bild 8: Zeitlicher Temperaturverlauf an der Stelle $x = 0,958$ m, $z = 31,8$ m, Parametersätze in der Tabelle 1
- Bild 9: Konvergenz des Bohrloches in Heizerhöhe für verschiedene Stoffparameter (Tabelle 1); $x = 0,16$ m, $z = 32,5$ m
- Bild 10: Zeitlicher Temperaturverlauf an der Stelle $x = 0,96$ m, $z = 31,8$ m bei reiner thermoelastischer Verformung
- Bild 11: Konvergenz des Bohrloches in Heizerhöhe bei reiner thermoelastischer Verformung; $K = 3,33 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 7,14 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,4$
- Bild 12: Zeitlicher Verlauf von Normalspannung σ_{xx} an der Stelle $x = 0,549$ m, $z = 32,52$ m bei reiner thermoelastischer Verformung; $K = 3,33 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 7,14 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,4$
- Bild 13: Zeitlicher Verlauf der deviatorischen Spannung s_{xx} an der Stelle $x = 0,549$ m, $z = 32,52$ m bei reiner thermoelastischer Verformung; $K = 3,33 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 7,14 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,4$
- Bild 14: Zeitlicher Druckverlauf an der Stelle $x = 0,549$ m, $z = 32,52$ m bei reiner thermoelastischer Verformung; $K = 3,33 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 7,14 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,4$
- Bild 15: Konvergenz des Bohrloches auf der Heizerhöhe bei reiner thermoelastischer Verformung; $K = 1,31 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 5 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,33$

- Bild 16: Zeitlicher Verlauf von Normalspannung an der Stelle $x = 0,549$ m, $z = 32,52$ m bei reiner thermoelastischer Verformung; $K = 1,31 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 5 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,33$
- Bild 17: Zeitlicher Verlauf der deviatorischen Spannung s_{xx} an der Stelle $x = 0,549$ m, $z = 32,52$ m bei reiner thermoelastischer Verformung; $K = 1,31 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 5 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,33$
- Bild 18: Zeitlicher Druckverlauf an der Stelle $x = 0,549$ m, $z = 32,52$ m bei reiner thermoelastischer Verformung; $K = 1,31 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 5 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,33$

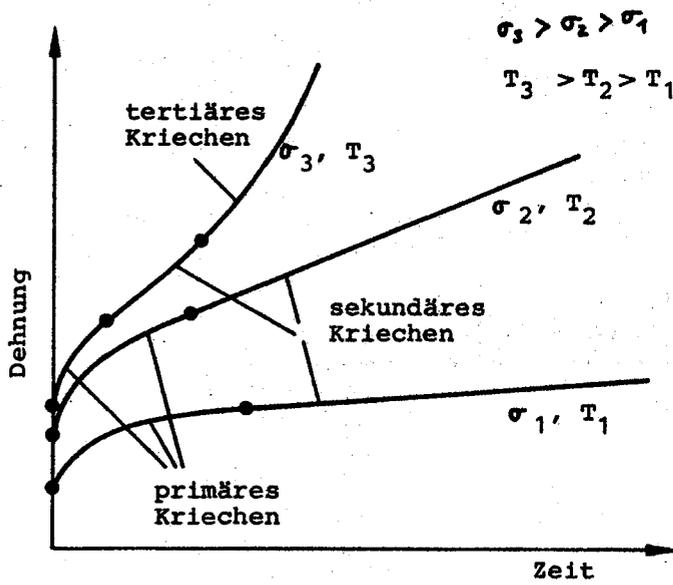


Bild 1:
Schematische Darstellung der verschiedenen Kriechbereiche

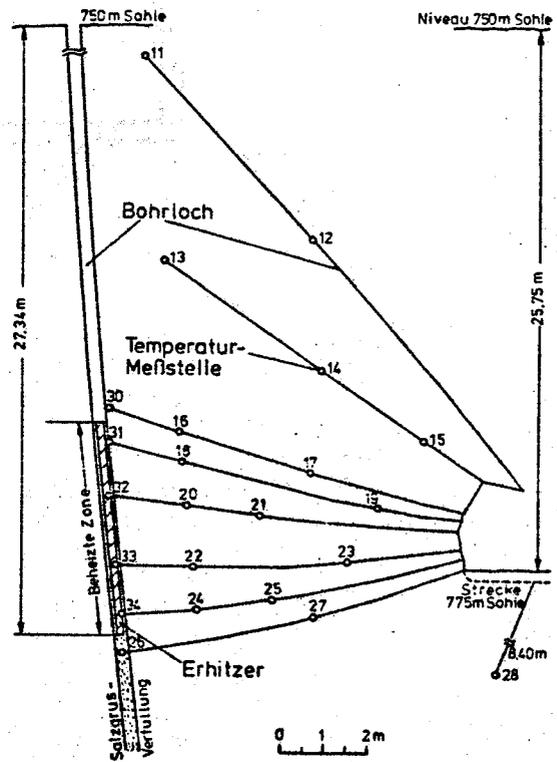


Bild 2:
Schnitt durch das Temperatur-Versuchsfeld 3

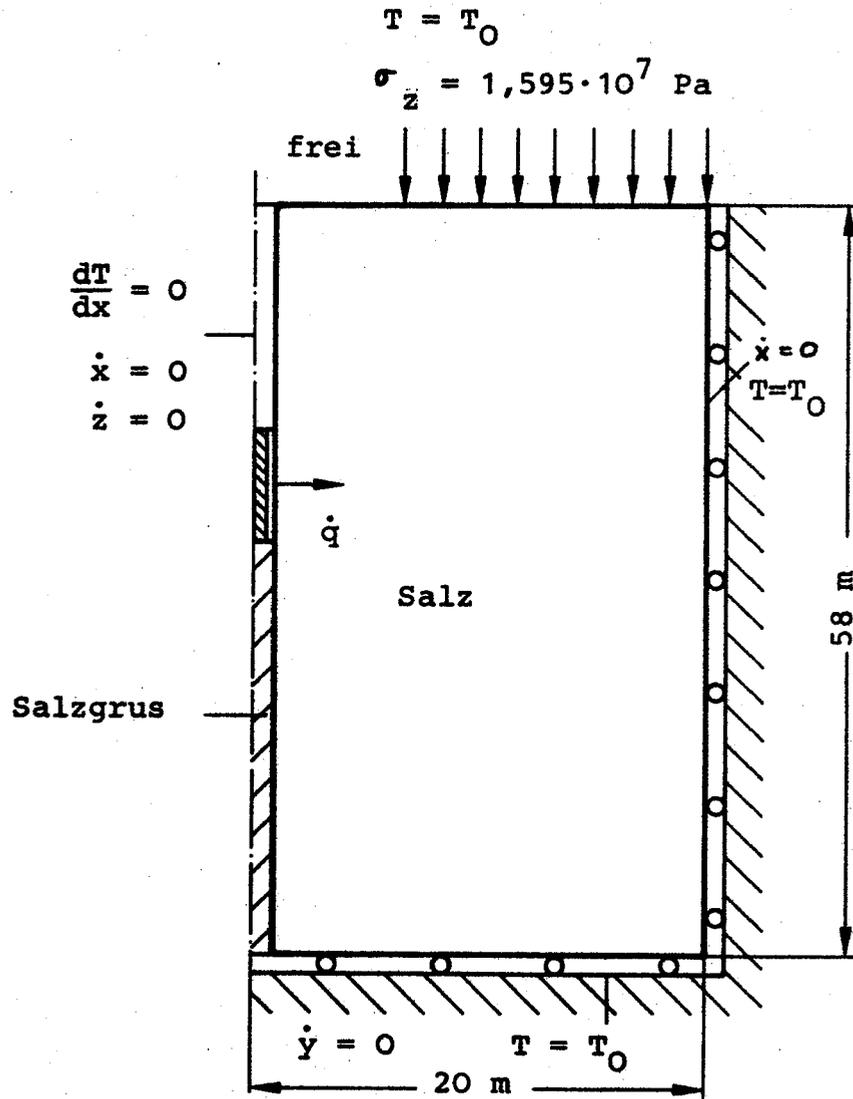


Bild 3:
Geometrie und Randbedingungen

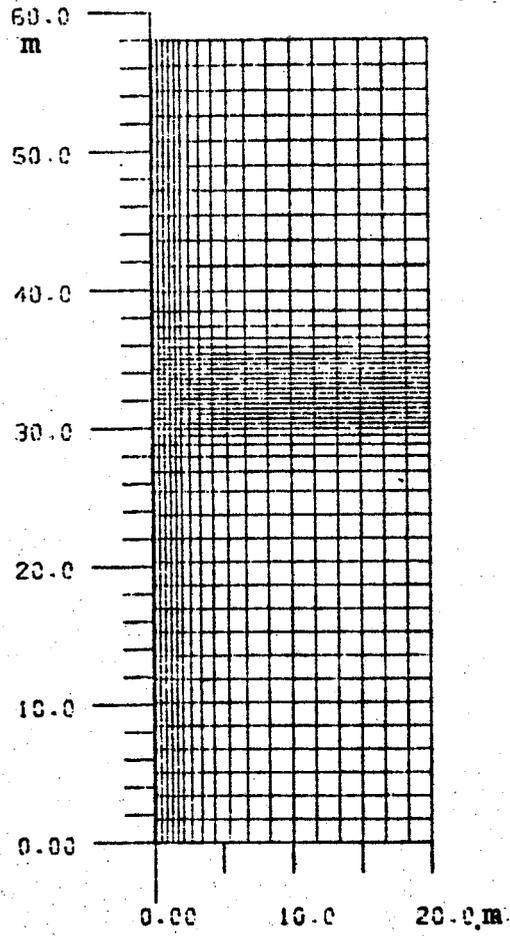


Bild 4:

Rechengitter für Temperatur-
feldversuch 3

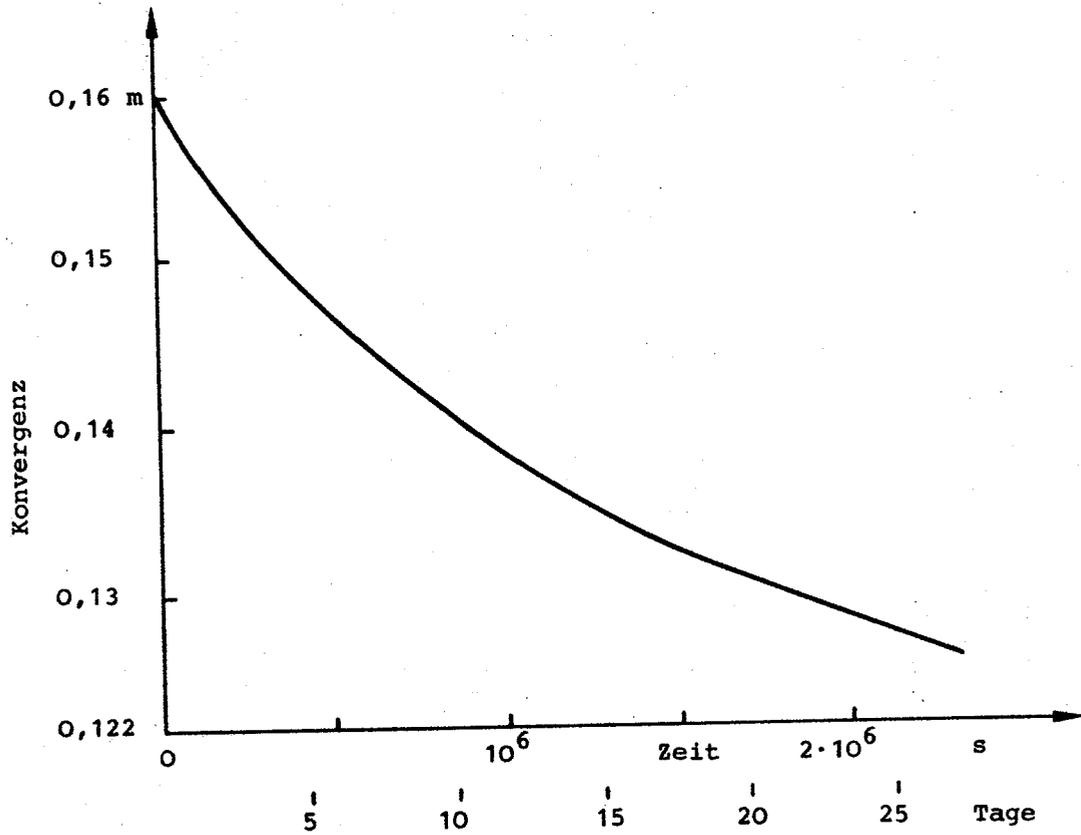


Bild 5:

Konvergenz des Bohrloches in Heizerhöhe; $x = 0,16 \text{ m}$,
 $z = 32,8 \text{ m}$, $K = 1,11 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$, $G = 8,33 \cdot 10^9 \text{ Pa}$, $\nu = 0,2$

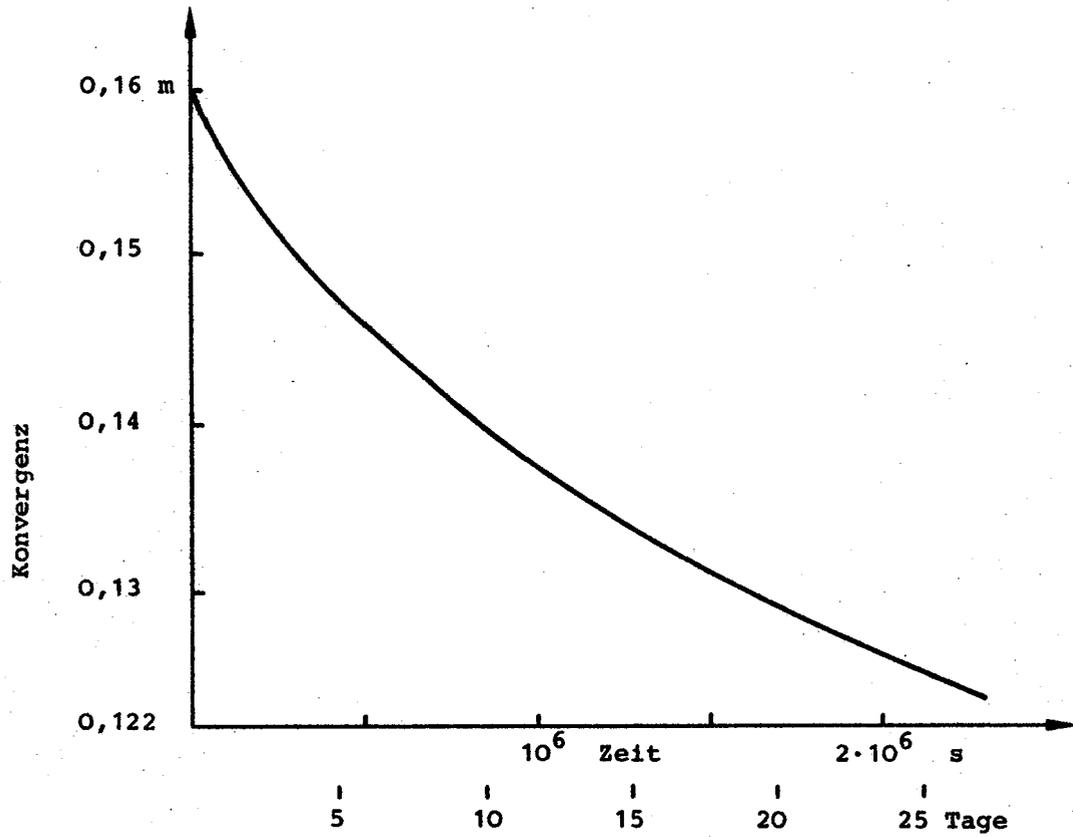


Bild 6:

Konvergenz des Bohrloches in Heizerhöhe; $x = 0,16$ m,
 $z = 32,8$ m, $K = 2 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 7,5 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,33$

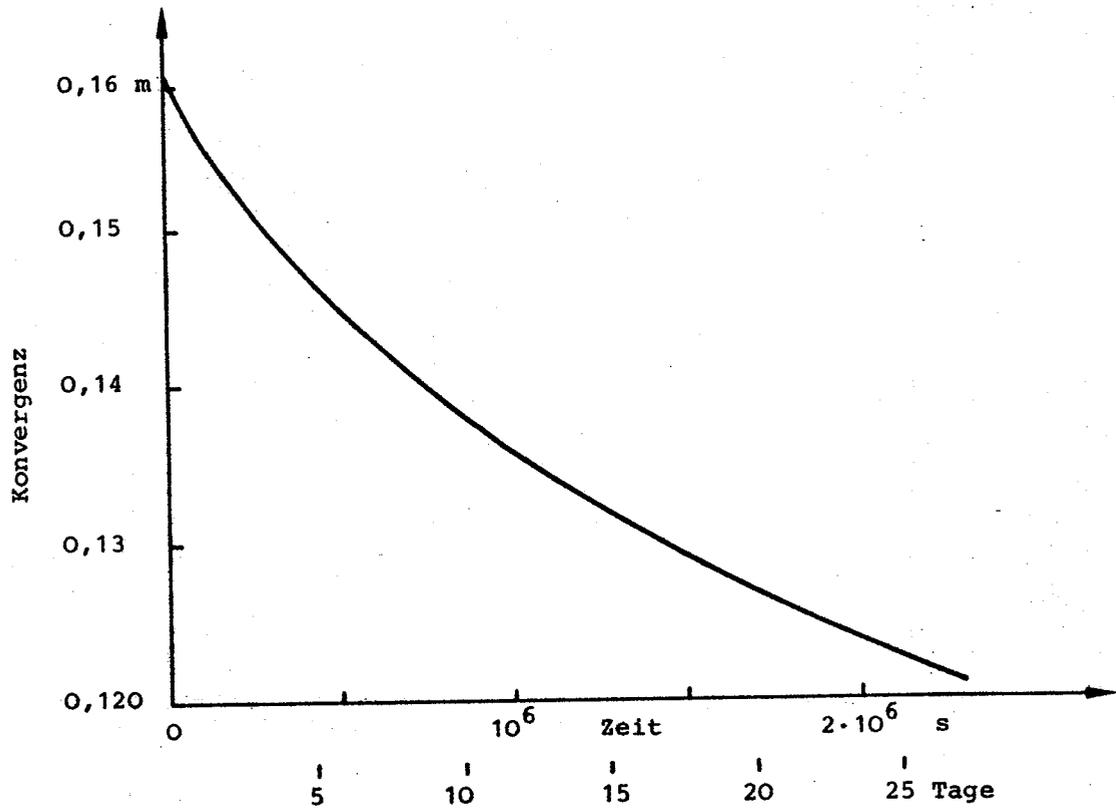


Bild 7:

Konvergenz des Bohrloches in Heizerhöhe; $x = 0,16$ m,
 $z = 32,8$ m, $K = 3,33 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 7,14 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,4$

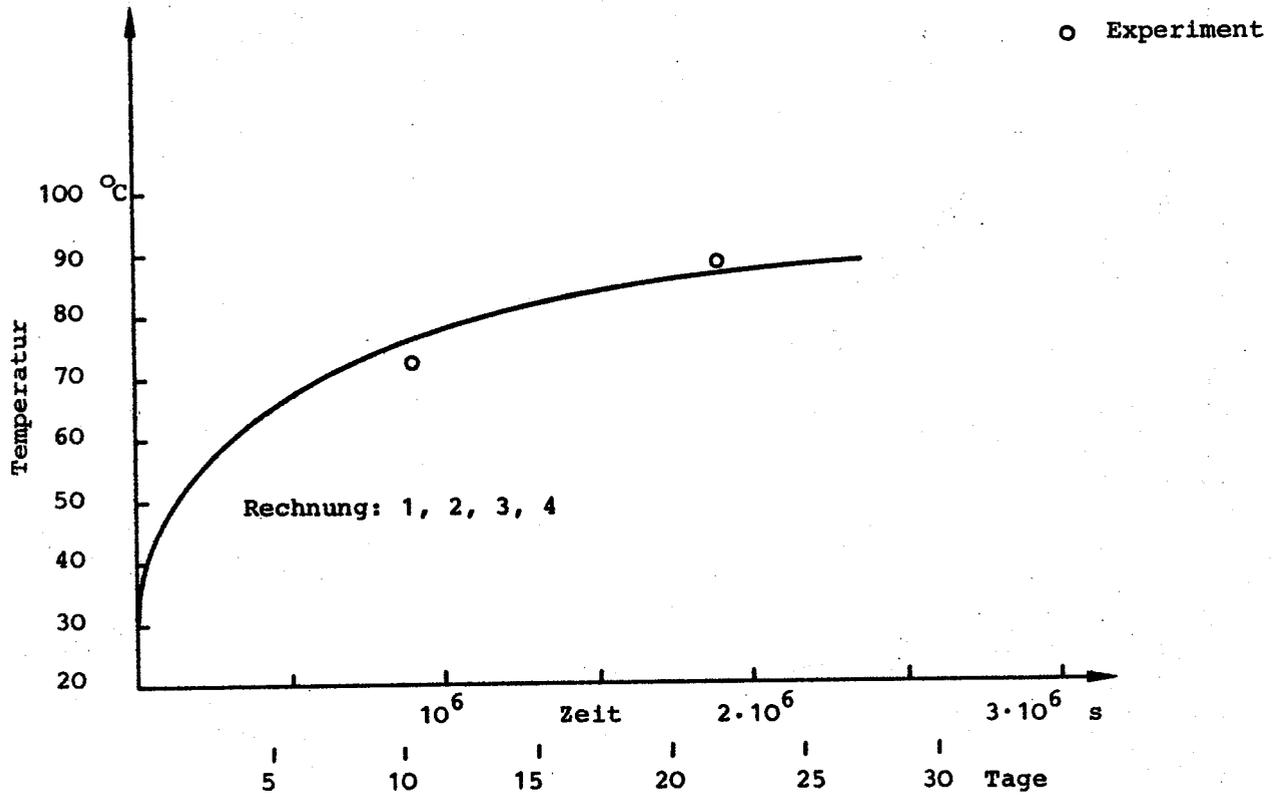


Bild 8:

Zeitlicher Temperaturverlauf an der Stelle $x = 0,958$ m,
 $z = 31,8$ m, Parametersätze in der Tabelle 1

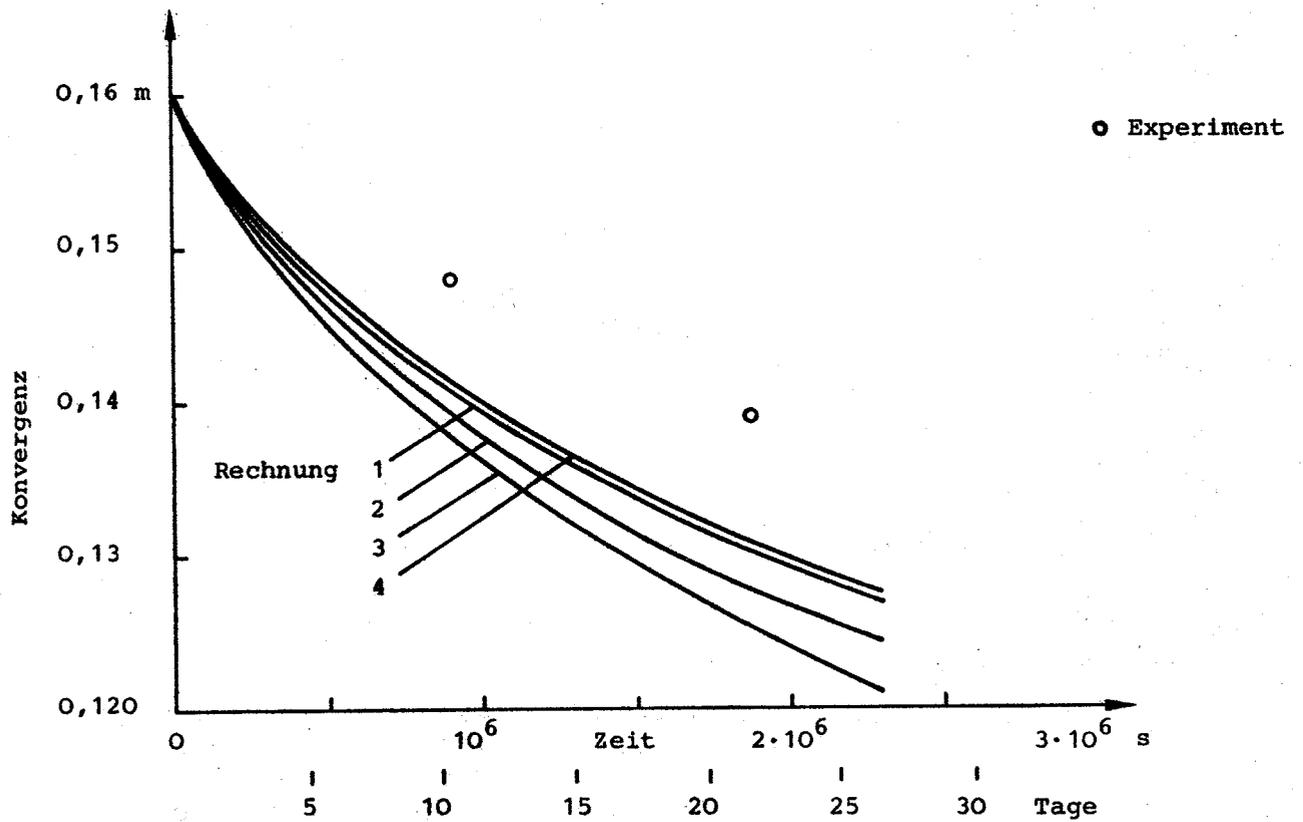


Bild 9:

Konvergenz des Bohrloches in Heizerhöhe für verschiedene Stoffparameter (Tabelle 1); $x = 0,16$ m, $z = 32,5$ m

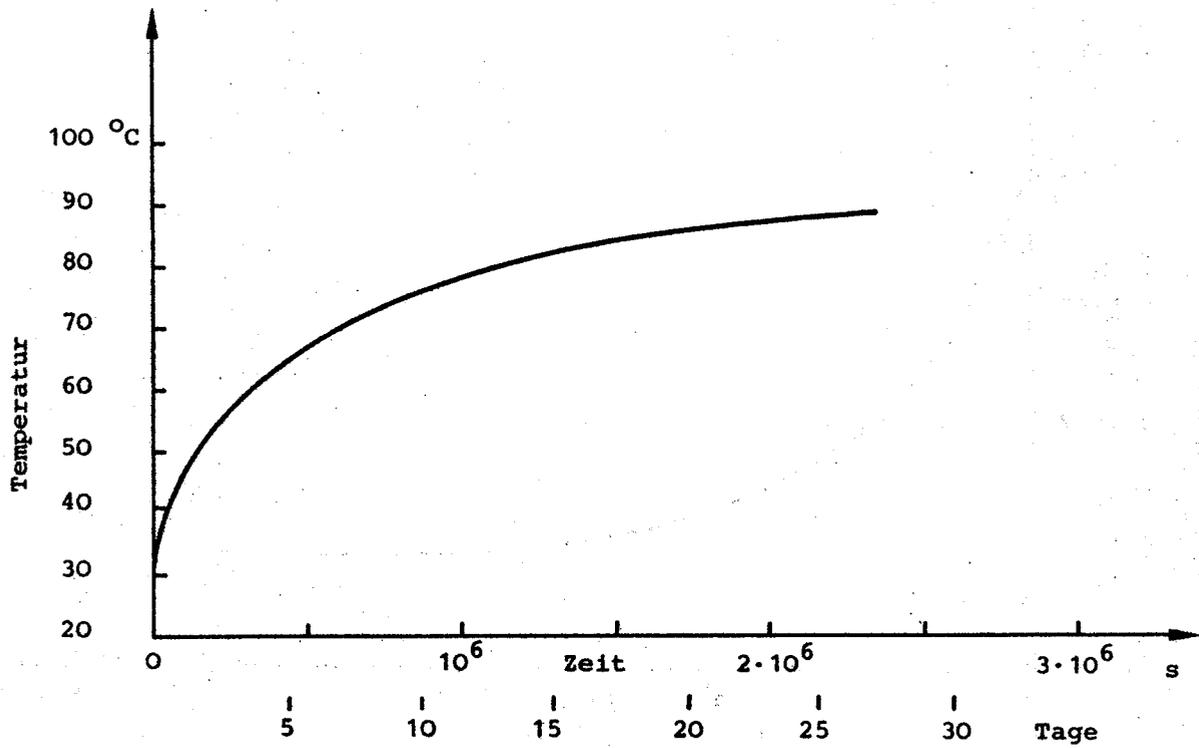


Bild 10:

Zeitlicher Temperaturverlauf an der Stelle $x = 0,96$ m,
 $z = 31,8$ m bei reiner thermoelastischer Verformung

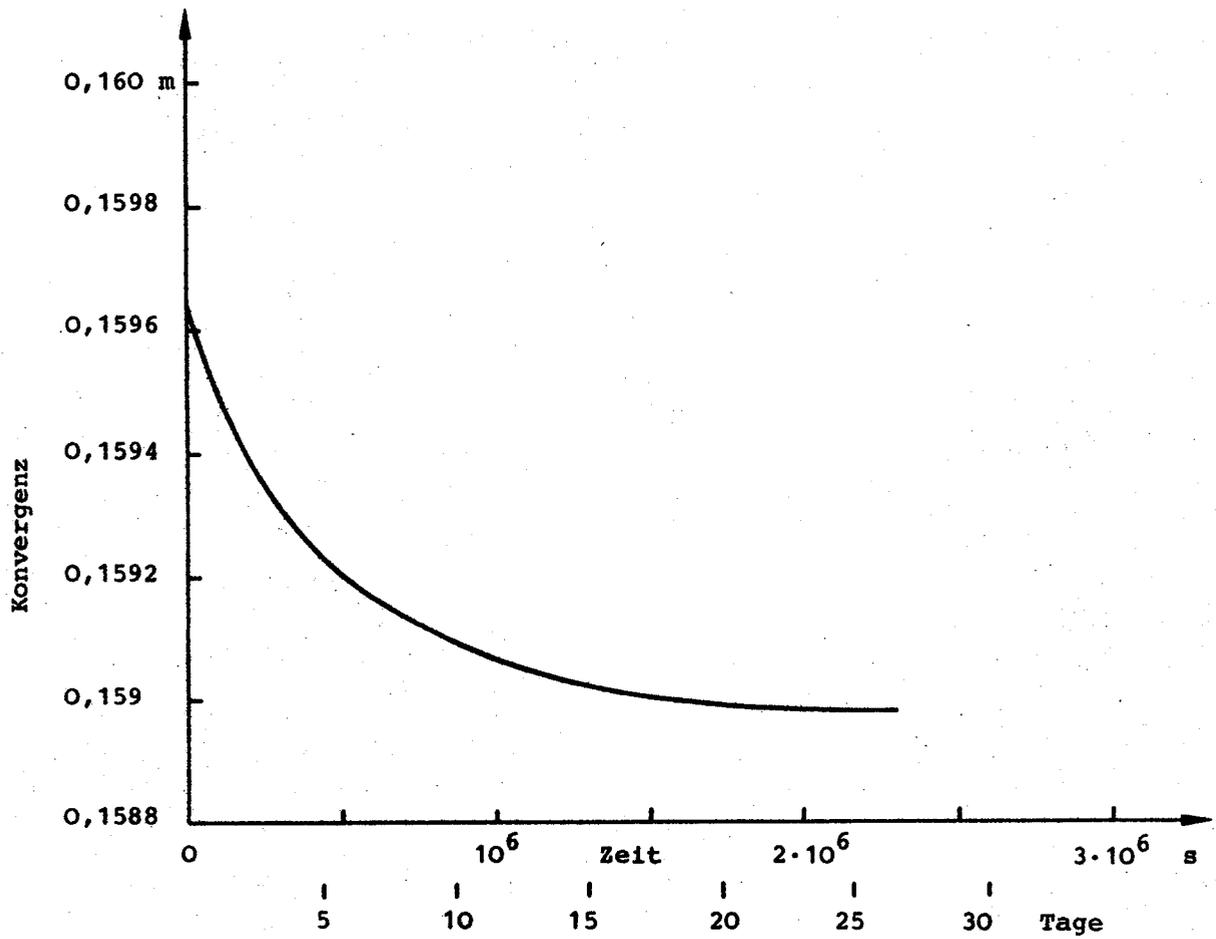


Bild 11:

Konvergenz des Bohrloches in Heizerhöhe bei reiner thermoelastischer Verformung; $K = 3,33 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 7,14 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,4$

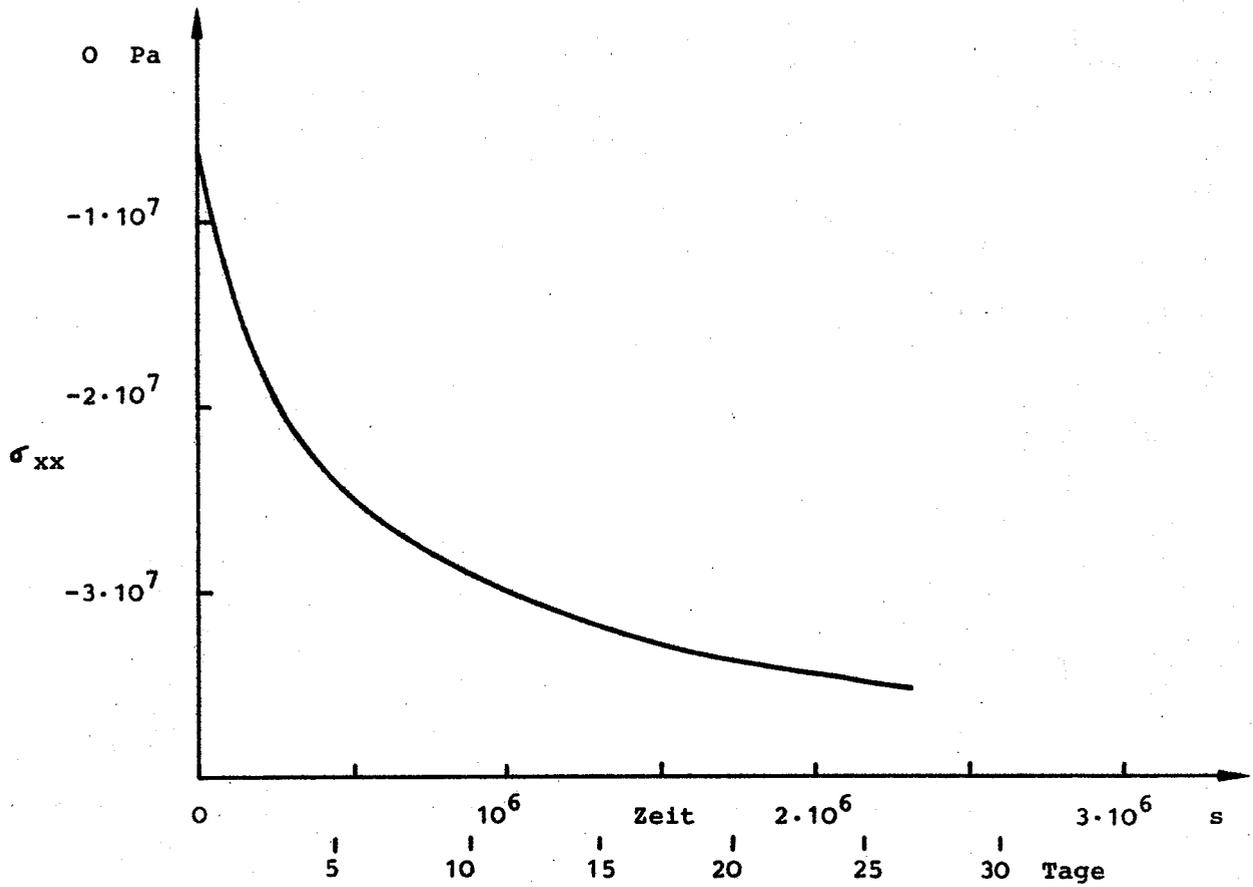


Bild 12:

Zeitlicher Verlauf von Normalspannung σ_{xx} an der Stelle $x = 0,549$ m, $z = 32,52$ m bei reiner thermoelastischer Verformung;
 $K = 3,33 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 7,14 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,4$

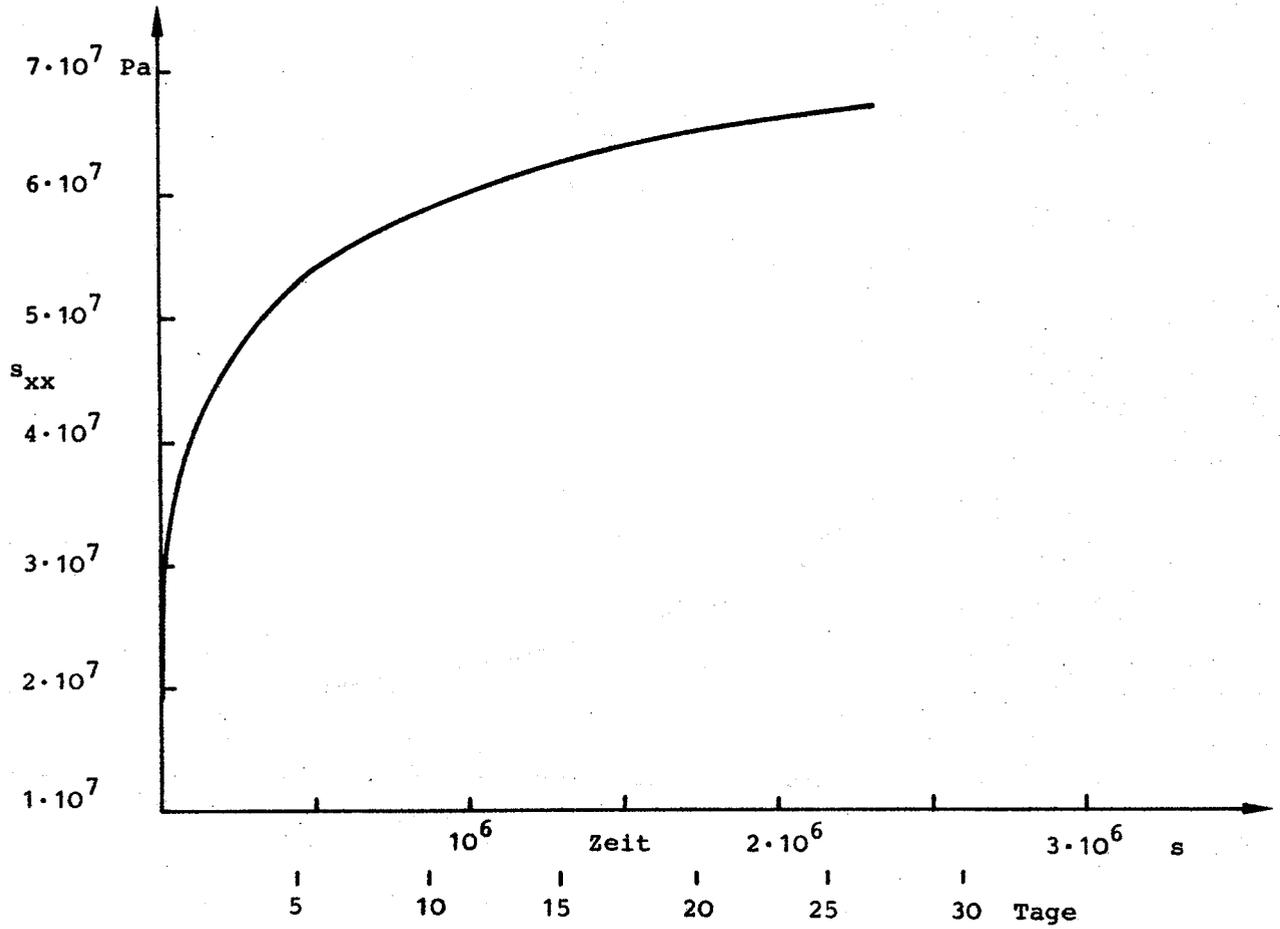


Bild 13:

Zeitlicher Verlauf der deviatorischen Spannung s_{xx} an der Stelle $x = 0,549$ m, $z = 32,52$ m bei reiner thermoelastischer Verformung; $K = 3,33 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 7,14 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,4$

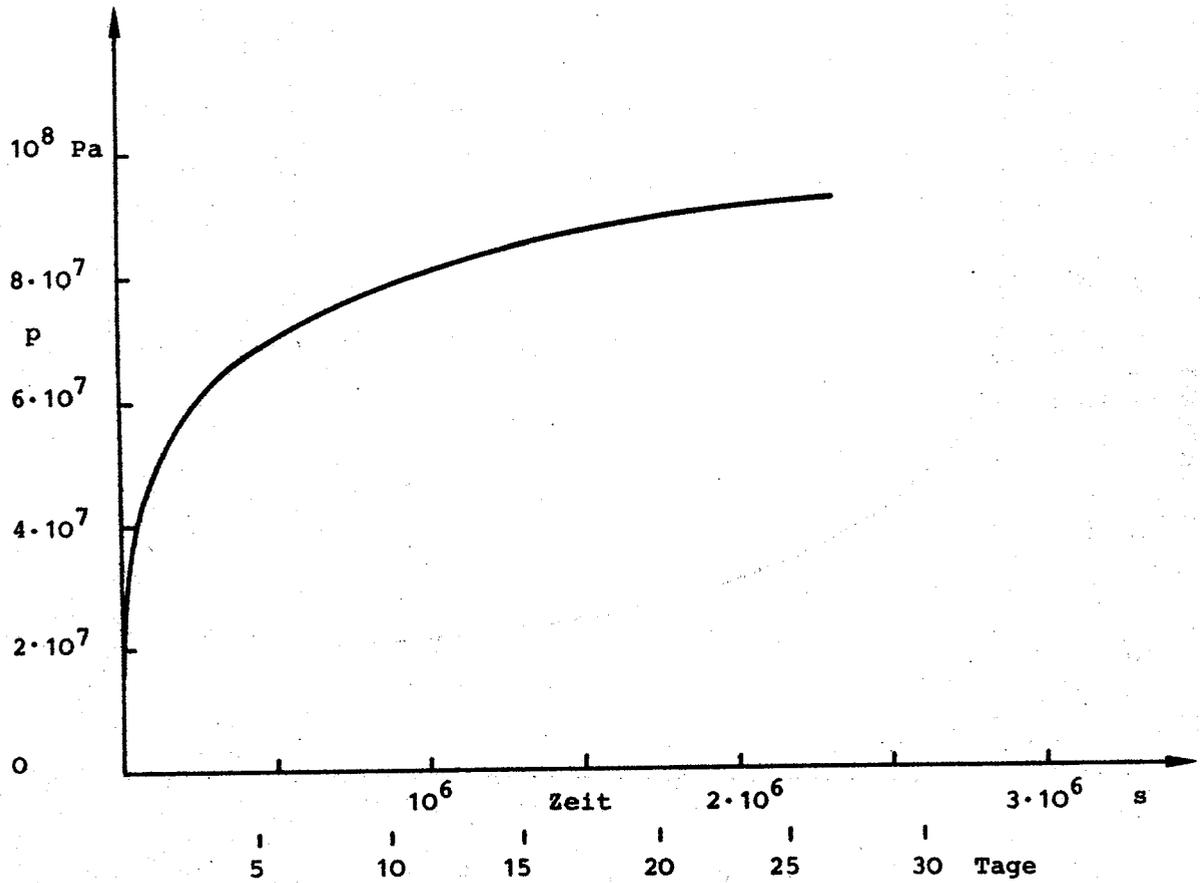


Bild 14:

Zeitlicher Druckverlauf an der Stelle $x = 0,549 \text{ m}$, $z = 32,52 \text{ m}$
bei reiner thermoelastischer Verformung; $K = 3,33 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$,
 $G = 7,14 \cdot 10^9 \text{ Pa}$, $\nu = 0,4$

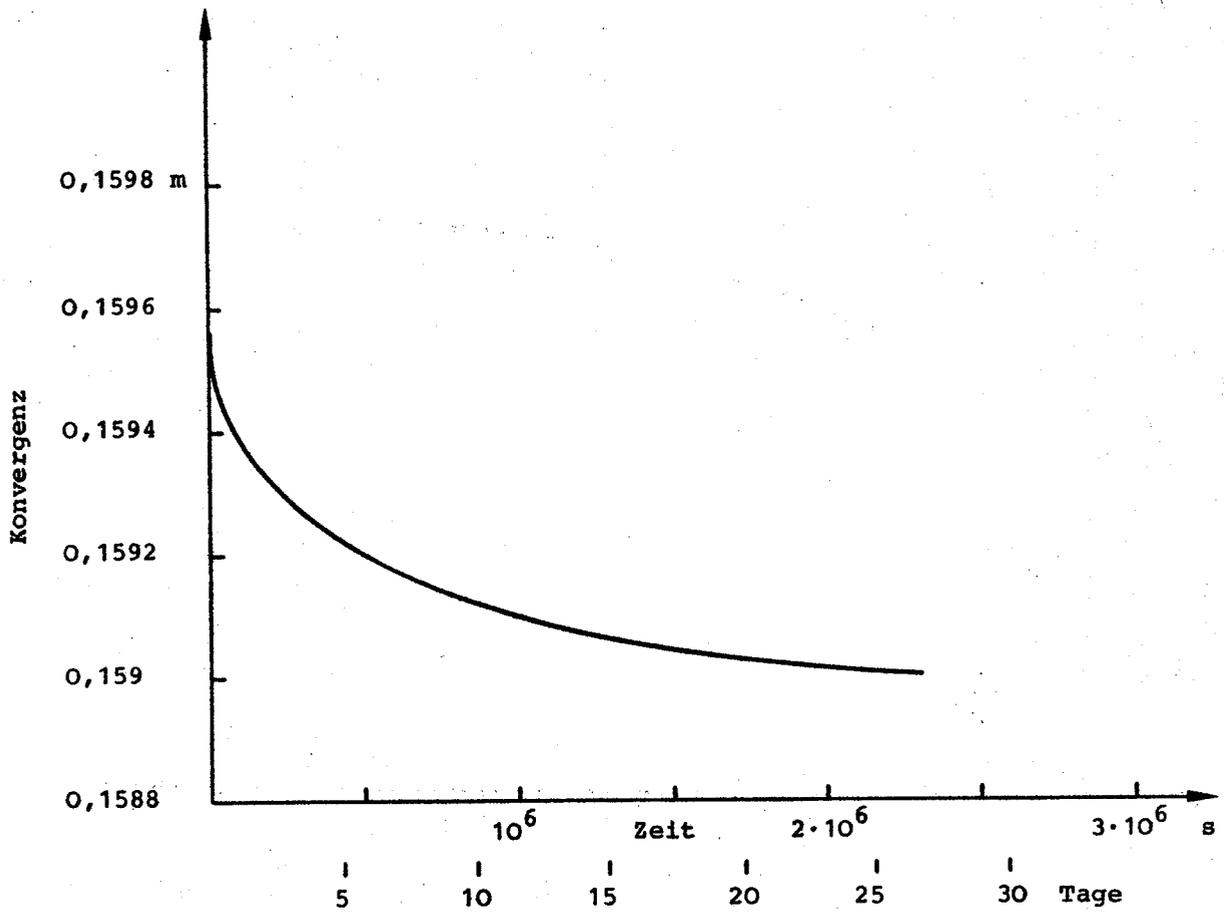


Bild 15:

Konvergenz des Bohrloches auf Heizerhöhe bei reiner thermoelastischer Verformung; $K = 1,31 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 5 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,33$

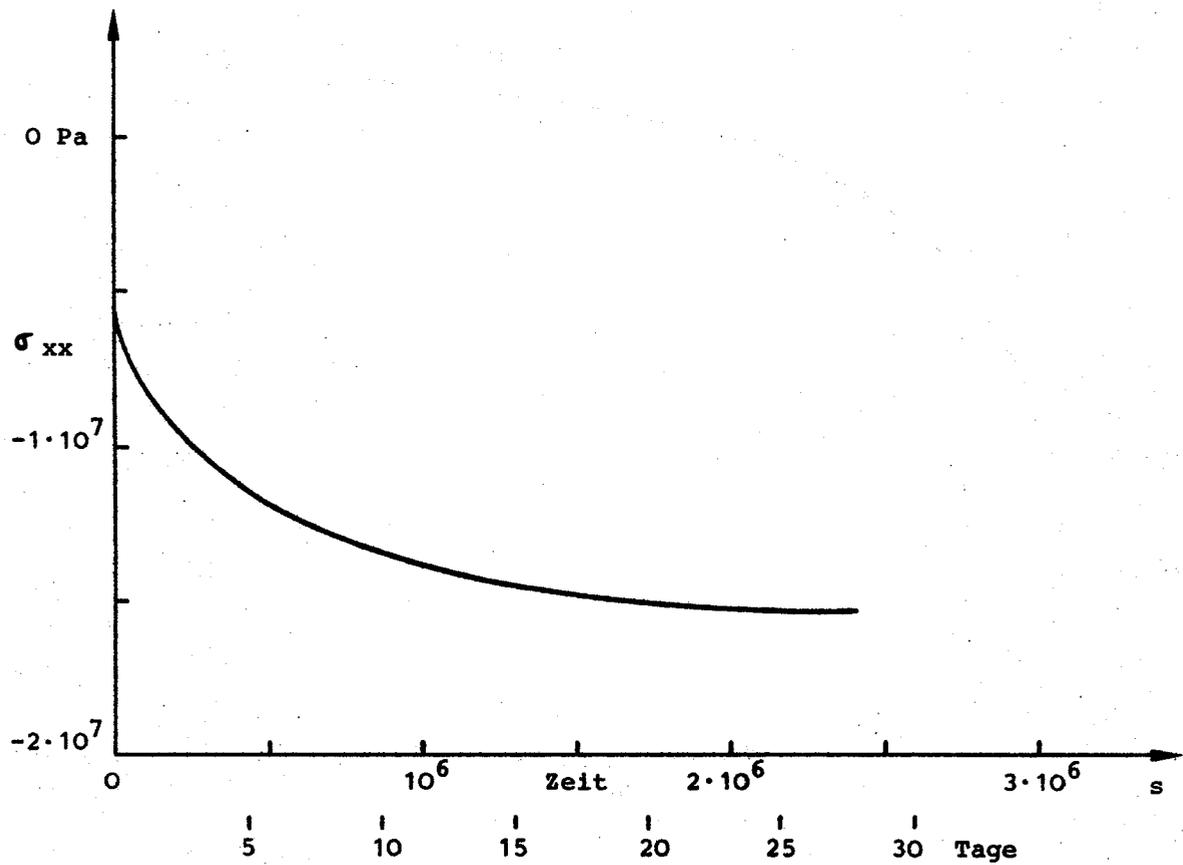


Bild 16:

Zeitlicher Verlauf von Normalspannung an der Stelle $x = 0,549 \text{ m}$,
 $z = 32,52 \text{ m}$ bei reiner thermoelastischer Verformung; $K =$
 $1,31 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$, $G = 5 \cdot 10^9 \text{ Pa}$, $\nu = 0,33$

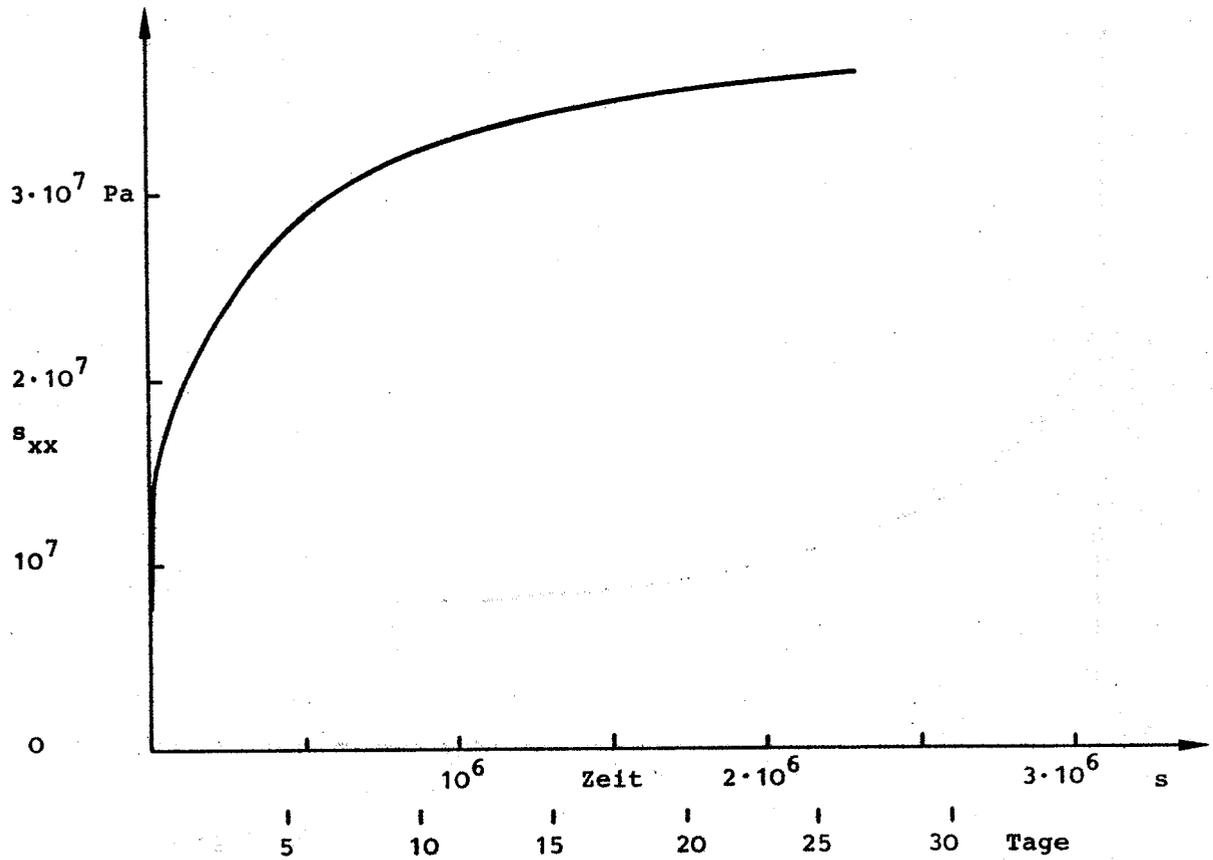


Bild 17:

Zeitlicher Verlauf der deviatorischen Spannung s_{xx} an der Stelle $x = 0,549$ m, $z = 32,52$ m bei reiner thermoelastischer Verformung; $K = 1,31 \cdot 10^{10}$ Pa, $G = 5 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,33$

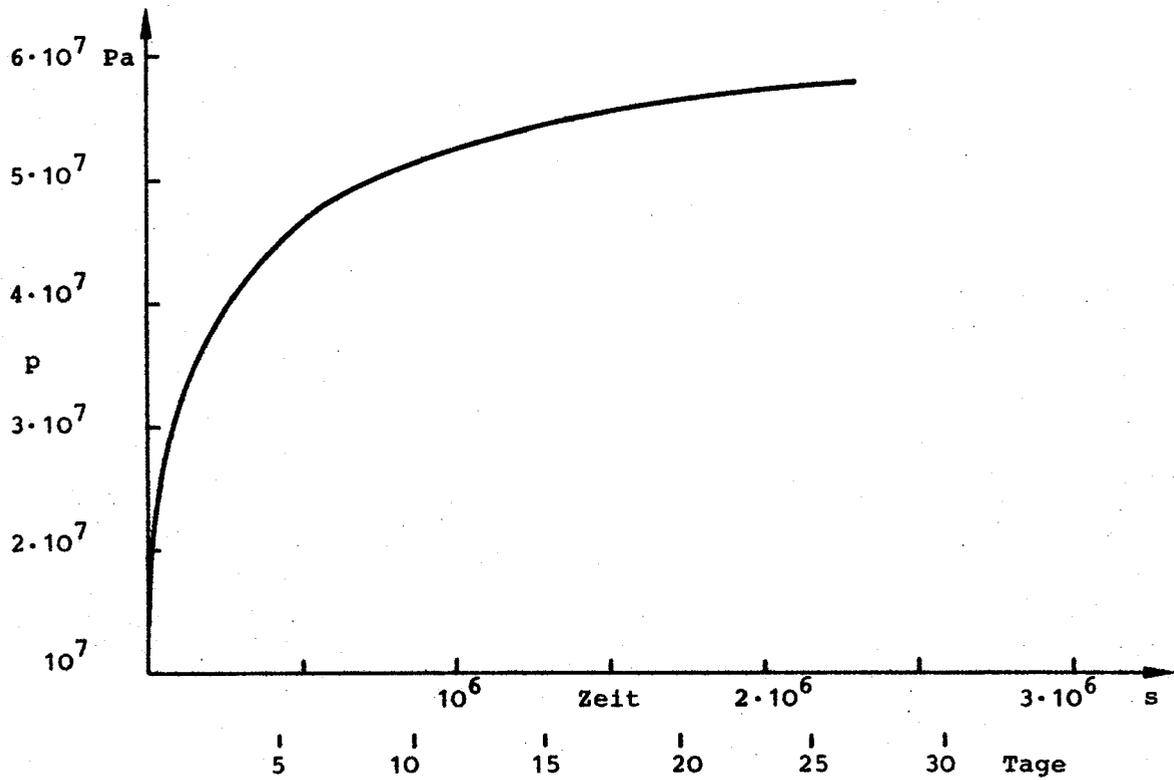


Bild 18:

Zeitlicher Druckverlauf an der Stelle $x = 0,549$ m, $z = 32,52$ m
bei reiner thermoelastischer Verformung; $K = 1,31 \cdot 10^{10}$ Pa,
 $G = 5 \cdot 10^9$ Pa, $\nu = 0,33$

