

KfK 5014
April 1992

Untersuchung der thermomechanischen Effekte im Nahbereich des Endlagerkonzepts SL3*

A. Pudewills
Institut für Nukleare Entsorgungstechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Kernforschungszentrum Karlsruhe
Institut für Nukleare Entsorgungstechnik

K f K 5014

**Untersuchung der thermomechanischen
Effekte im Nahbereich des
Endlagerkonzepts SL3***

Alexandra Pudewills

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Kurzfassung

Im Rahmen des F + E Programms "Direkte Endlagerung" wurden mehrere Varianten für die gemeinsame Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen in Salzformationen untersucht. Eine von diesen Endlagervarianten ist die reine Streckenlagerung auf drei Sohlen. Bei diesem Konzept werden die Brennelemente und HAW-Kokillen in POLLUX-Behältern verpackt und in Strecken eingelagert. Abschließend erfolgt die Versetzung der Lagerstrecken mit Salzgrus. Durch die erhöhten Temperaturen und die höheren Gebirgsdrücke in der Tiefe der unteren zwei Einlagerungssohlen (auf ca. 1020m und 1170m) und die dadurch verursachten schnelleren Konvergenzen, sind bei diesem Endlagerkonzept zusätzliche Stabilitätsprobleme der Richt- und Lagerstrecken zu erwarten.

Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen zur Temperaturentwicklung in Steinsalz sowie zur thermisch induzierten Konvergenz der Richt- und Lagerstrecken. Im Hinblick auf das Langzeitverhalten der Lagerstrecken wurden die Porosität des Versatzmaterials und die Entwicklung des Kompaktierungsdrucks im Versatz ermittelt. Die Rechnungen wurden mit Finite Elemente Programmen, die speziell für die Untersuchung der Endlagerstruktur entwickelt wurden, unter Berücksichtigung des nichtlinearen, zeit- und temperaturabhängigen Stoffverhaltens von Steinsalz und Versatzmaterial durchgeführt.

Die Rechenergebnisse zeigen, daß die Wärmeentwicklung in den Lagerfeldern und die Einlagerungstiefe, d.h. der herrschende lithostatische Primärspannungszustand einen maßgeblichen Einfluß sowohl auf die Konvergenz der Richt- und Lagerstrecken als auch auf das Kompaktierungsverhalten des Versatzmaterials haben.

INVESTIGATION OF THERMOMECHANICAL EFFECTS IN THE NEAR FIELD OF A DRIFT EMPLACEMENT REPOSITORY

Abstract

Within the framework of the "Research and Development Program on the Direct Disposal" several repository concepts for storage in salt formations of both waste from reprocessing (HLW) and spent fuel elements have been investigated. According to the 3-level drift emplacement concept, large self-shielded containers (POLLUX-casks) will be emplaced on the floor of the disposal drifts at different levels down to 870 m in rock salt. Subsequently, the drifts will be backfilled with crushed salt. The increase in temperature in the disposal field will affect the thermomechanical behaviour of the surrounding rock salt. Furthermore, due to the high lithostatic pressure in the lowest disposal horizon new problems may arise in the stability of the drifts.

In this paper, temperature fields in the disposal area, thermally induced main drift and disposal drift closures, the long-term compaction of the backfill material and the pressure buildup on the stored containers are estimated numerically. The calculations were performed with finite element codes specifically developed for the investigation of repository structures, taking into account the nonlinear, temperature and time dependent behaviour of rock salt and backfill material.

The results of the analyses show that the thermal load causes a clearly higher closure rate of the main drift and disposal drift. Finally, the influence of the emplacement depth on the drift closures and the compaction of backfill material is quite strong.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Verwendete Rechenmodelle	2
2.1 Modell zur Untersuchung der Richtstrecke	3
2.2 Modelle zur Untersuchung einer BE-Lagerstrecke	4
3. Verwendete Stoffmodelle und Materialparameter	5
4. Rechenergebnisse	7
4.1 Großräumige Temperaturentwicklung für das Endlagerkonzept SL3*	7
4.2 Konvergenz der Richtstrecken	8
4.3 Konvergenz einer BE-Lagerstrecke während der Kaltphase	8
4.4 Langzeitverhalten der verfüllten BE-Lagerstrecke	9
5. Zusammenfassung	10
6. Literatur	11

1. Einleitung

Im Rahmen des F + E Programms "Direkte Endlagerung" wurden mehrere Varianten für die gemeinsame Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen (HAW) und abgebrannten Brennelementen (BE) in Salzformationen erarbeitet /1/. Eine von diesen Endlagervarianten ist das Konzept der reinen Streckenlagerung auf mehreren Sohlen. Bei dem Konzept der dreisöhligen Streckenlagerung (SL3*) werden die LWR-Brennelemente, HTR-Brennelemente und HAW-Kokillen in POLLUX-Behältern verpackt und in Strecken eingelagert. Um das Steinsalzvolumen im Salzstock optimal auszunutzen, wurde die Streckenlagerung auf drei Sohlen mit einem gegenseitigen vertikalen Abstand von 150 m konzipiert.

Das Auffahren von Zugangs- und Lagerstrecken bzw. Hohlräumen hat eine Störung des bestehenden Gleichgewichtszustandes im Salz zur Folge. Aus gebirgsmechanischer Sicht müssen die Strecken während der Betriebszeit eine gute mechanische Stabilität behalten, d.h. es dürfen nicht zu große Konvergenzen und Abschalungen auftreten, die zu einer Behinderung des Transports oder des Einlagerungsvorgangs führen können. Durch die erhöhten Temperaturen und die höheren Gebirgsdrücke auf dem Niveau der unteren zwei Einlagerungssohlen (ca. 1020m und 1170m) und die dadurch verursachten schnelleren Konvergenzen ist bei diesem Endlagerkonzept verstärkt mit Stabilitätsproblemen bei den Zugangs- und Lagerstrecken zu rechnen.

Im Rahmen der numerischen Untersuchungen wurde zuerst die großräumige Temperaturentwicklung im Steinsalz unter Berücksichtigung der zeitlich gestuften Einlagerung auf den drei Sohlen berechnet. Bei den thermomechanischen Rechnungen wurde die Konvergenz der Richtstrecke im Bereich der Einlagerungsfelder während der Betriebszeit einer Sohle ermittelt. Die thermomechanischen Auswirkungen der bereits befüllten unteren Einlagerungssohle auf die Richtstreckenkonvergenz der darüber liegenden Sohle wurden ebenfalls untersucht.

Die Konvergenz einer Brennelement (BE)-Lagerstrecke im Inneren des Lagerfeldes und das Kompaktierungsverhalten des Versatzes in der Strecke wurden separat analysiert. Da die Konvergenzen nicht nur vom Gebirgsdruck (d.h. von der Einlagerungstiefe) sondern auch von der Pfeilerbreite stark abhängig sind, wurden Rechnungen durchgeführt, bei denen die Pfeilerbreite variiert wurde. Im Hin-

blick auf das Langzeitverhalten der verfüllten BE-Lagerstrecke wurden die Porosität des Versatzmaterials sowie der Aufbau des Kompaktierungsdruckes im Versatz ermittelt.

Diese Ergebnisse sind für die Langzeitanalyse des Endlagers von Bedeutung, denn ein eventueller Laugenzutritt mit nachfolgender möglicher Auspressung dieser zugetretenen Lauge wird durch die genannten thermomechanischen Effekte (Porositätsabnahme und Konvergenz) wesentlich beeinflusst.

Für die Berechnung der Temperaturfelder wurde das Finite Elemente Programm ADINA-T /2/ und das speziell zur Untersuchung der Streckenlagerung entwickelte Programm FAST-BEST /3/ verwendet. Die thermomechanischen Rechnungen wurden mit dem Programm MAUS /4/ durchgeführt, das geeignete Stoffmodelle für Steinsalz und Versatzmaterial enthält.

2. Verwendete Rechenmodelle

Im Rahmen der Arbeiten zur "Systemanalyse Mischkonzept" /1/ wurde bereits das Grubengebäude des standortunabhängigen Endlagerkonzepts SL3* geplant. Es ist in Abb.1 schematisch dargestellt. Die Einlagerungssohlen in den Tiefen 870, 1020 m und 1170 m werden nacheinander aufgefahren und befüllt. Die Betriebsdauer einer Sohle beträgt ca. 17 Jahre.

Um die numerische Analyse der Richtstreckenkonvergenzen auf drei Sohlen mit einem vertretbaren Rechenaufwand durchzuführen, wurden die folgenden Annahmen hinsichtlich des Zeitablaufs des Einlagerungsbetriebs getroffen:

- Die Einlagerung von POLLUX-Behältern in den Lagerstrecken auf einer Sohle erfolgt instantan nach einer "kalten" Vorphase von 5 Jahren.
- Das Auffahren von Richtstrecken und die Befüllung der drei Sohlen erfolgt zeitlich gestuft gemäß folgenden Zeitplan:

0 Jahre: Auffahren der Richtstrecke auf der 1170m-Sohle ("Richtstrecke 1")

5 Jahre: Instantane Einlagerung auf Sohle 1

17 Jahre: Verfüllen der Richtstrecke 1 und Auffahren der Richtstrecke 2

22 Jahre: Instantane Einlagerung auf der Sohle 2

34 Jahre: Verfüllen der Richtstrecke 2 und Auffahren der Richtstrecke 3

39 Jahre: Instantane Einlagerung auf der Sohle 3

50 Jahre: Ende der Betriebszeit

Bei den Nahbereichsrechnungen zur BE-Lagerstrecke in der Mitte des Einlagerungsfeldes wurde eine gleichzeitige Erstellung aller Strecken sowie eine Einlagerung der POLLUX-Behälter (Wärmequellen) und das Verfüllen der Lagerstrecken mit Salzgrus 0.7 Jahre nach Streckenerstellung angenommen.

2.1 Modell zur Untersuchung der Richtstrecke

Unter Berücksichtigung der Symmetrieeigenschaften des Grubengebäudes (bzw. der Lagerfelder) und der oben getroffenen Annahmen konnte ein Modell in zweidimensionaler Geometrie (ebene Dehnung) entwickelt werden. Der Vertikalschnitt stellt einen 330 m breiten und 604 m tiefen Gebirgsbereich senkrecht zu den Einlagerungsfeldern und Richtstrecken dar. Bei den zweidimensionalen, großräumigen Temperaturrechnungen mit dem Programm ADINA-T wurde die Folge von BE-, HAW- und MAW-Lagerfeldern nicht explizit modelliert sondern als räumlich homogenisiert angenommen.

Die Richtstrecken mit einem Querschnitt 4m x 7m bleiben während der Betriebszeit der jeweiligen Sohle (17 a) offen, d.h. befahrbar und bewettert. Aufgrund der Spannungskonzentration um die Hohlräume und der größeren Temperaturgradienten in den Lagerfeldern wurden die Salzgebiete in der unmittelbaren Umgebung der Richtstrecken und der Einlagerungsfelder besonders fein diskretisiert. Das gesamte Finite-Elemente-Modell mit den verwendeten Randbedingungen ist in Abb. 2 dargestellt. Die Lagerstrecken für die POLLUX-Behälter werden nicht explizit modelliert. Der Anfangsspannungszustand im Salz wurde als tiefenabhängiger lithostatischer Druck angenommen. Der Ausbruch der Richtstrecken

wird rechnerisch in einem Schritt zu den Zeitpunkten 0, 17 bzw. 34 Jahren vorgenommen und die Verfüllung mit trockenem Salzgrus jeweils 17 Jahre später.

2.2 Modelle zur Untersuchung einer BE-Lagerstrecke

Die zeit- und ortsabhängige Temperaturentwicklung in der Strecke und im umgebenden Salz wurde mit dem dreidimensionalen Programm FAST-BEST berechnet. Das Rechenmodell geht von mehreren in einer Strecke hintereinander liegenden POLLUX-Behältern aus. Für eine Auslegungstemperatur von 200°C (an der Kontaktfläche Salz/Behälter) beträgt der Abstand zwischen zwei Behältern 5m bei einem Streckenabstand von 17 m. Weiterhin wird angenommen, daß die Nachbarstrecken links und rechts ebenfalls befüllt sind. Bedingt durch diese Geometrie wurde ein dreidimensionales Modell verwendet, wobei aus Symmetriegründen nur ein Viertel des POLLUX-Behälters und des Zwischenraumes explizit modelliert werden mußte. In Abb.3 ist das Finite Elemente Netz als Vertikalschnitt in der XZ- und der YZ - Ebene dargestellt. Die Anfangstemperatur wurde bei allen Rechnungen konstant mit 35°C angenommen. Die Temperaturen für die zweidimensionalen thermomechanischen Rechnungen werden aus einem XZ-Schnitt durch den Mittelpunkt des Modells entnommen.

Ausgehend von den früheren Ergebnissen /5/ zum Endlagerkonzept der reinen Streckenlagerung auf einer Sohle wurde für die thermomechanischen Untersuchungen lediglich ein zweidimensionales Modell gewählt. Es stellt einen Vertikalschnitt mitten durch einen POLLUX-Behälter (XZ-Ebene bei den Temperaturrechnungen) dar. In Y-Richtung wird die betrachtete Strecke und der POLLUX-Behälter als unendlich lang angesehen. Abb.4 zeigt das Rechenmodell mit der Finite-Elemente Diskretisierung, den Abmessungen und den verwendeten Randbedingungen. Am linken und rechten Rand sind Symmetrierandbedingungen angenommen. Die Oberkante des Modells wurde mit dem Gebirgsdruck von jeweils 25, 22 und 18 MPa (entsprechend der Tiefe der drei Einlagerungssohlen) belastet.

3. Verwendete Stoffmodelle und Materialparameter

Das thermomechanische Verhalten von Steinsalz wurde bei allen Rechnungen als thermoelastisches Materialmodell mit sekundärem Kriechen beschrieben /6/.

- Elastische Eigenschaften des Steinsalzes:

Elastizitätsmodul : $E = 24000 \text{ MPa}$

Poisson Zahl: $\nu = 0.25$

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

- Kriechgesetz:

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

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

σ_{eff} = Effektivspannung (MPa)

T = Temperatur (K)

A = $0.18 \text{ MPa}^{-5} \text{ d}^{-1}$ Q = 54.21 kJ/mol

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

Bei den Rechnungen zur Richtstreckenkonvergenz wurde das Verhalten des Versatzmaterials (Salzgrus) mit einem einfachen, temperaturunabhängigen Stoffmodell für hydrostatische Kompaktierung beschrieben /5/. Die Anfangsporosität (η_0) beträgt 31%. Für die Langzeitanalyse einer BE-Lagerstrecke wurde eine neu entwickelte Stoffgesetzformulierung für das temperaturabhängige Kompaktierungsverhalten von Salzgrus berücksichtigt /7/. Dieses Stoffmodell wird im Rahmen der Prognoserechnungen zum TSS-Versuch verwendet /8/. Es wurde an neueste Laborversuche der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) bei Temperaturen bis 200°C angepasst. Die Kompaktierungsrate wird mit folgender Beziehung beschrieben:

$$\dot{K} = c_1 (\eta_0 - K)^{c_2} (P - c_3 K^{c_4})^{c_5}$$

$$c_1(T) = c_1 \exp(c_6 / 393K - c_6 / T)$$

$$c_3(T) = c_3(c_7 + c_8 (T - 273K) + c_9(T - 273K)^2)$$

\dot{K} = Kompaktierungsrate (1/d)

P = Kompaktierungsdruck (MPa)

T = Temperatur (K)

$$c_1 = 170 \text{ (1/d)} \quad c_6 = 4000K$$

$$c_2 = 6 \quad c_7 = 2.6$$

$$c_3 = 160 \quad c_8 = -0.021/K$$

$$c_4 = 1.8 \quad c_9 = 5 \cdot 10^{-5}/K^2$$

$$c_5 = 2$$

Diese Formulierung stellt eine transiente Kriechkompaktierungsrate dar. Bei den hier auftretenden niedrigen Raten in der Größenordnung von $\dot{K} = 10^{-9} /s$ wird damit die Beziehung $P = c_3(T) K^{c_4}$ für den Versatzwiderstand angenähert.

Die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität von Steinsalz und Versatzmaterial wurden wie in /5/ angenommen und sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Stoffdaten für die Temperaturrechnungen

	T (°C)	0	50	100	150	200	250
Salz	λ (W/mK)	6.10	5.02	4.19	3.57	3.11	2.78
	ρc_p (J/m ³ K)			$1.90 \cdot 10^6$			
Salzgrus	λ (W/mK)	0.55	0.75	0.90	0.99	1.03	1.01
	ρc_p (J/m ³ K)			$1.37 \cdot 10^6$			
POLLUX- Behälter	λ (W/mK)	-	-	50.0	-	-	-
	ρc_p (J/m ³ K)			$3.50 \cdot 10^6$			

4. Rechenergebnisse

Die durchgeführten Temperatur- und thermomechanischen Modellrechnungen führen zu einer großen Menge an Ergebnissen, die unterschiedlich wichtig für die Beurteilung des Einlagerungskonzepts SL3* sind. Um eine übersichtliche Darstellung und Interpretation der Resultate zu ermöglichen, werden zunächst nur die Temperaturfelder und die Konvergenzen der Richt- und Lagerstrecken gezeigt.

Im Hinblick auf das Langzeitverhalten der BE-Lagerstrecke werden die Entwicklung der Porosität und des Kompaktierungsdrucks im Versatzmaterial für die drei Einlagerungstiefen dargestellt.

4.1 Großräumige Temperaturentwicklung für das Endlagerkonzept SL3*

Die gesamte Wärmefreisetzung des Abfallinventars wurde von früheren Arbeiten übernommen /1/, wobei eine Referenz-Kühlzeit von 40 Jahren für den HAW und 30 Jahren für die Brennelemente berücksichtigt wurde. In Abb. 5 bis 7 sind die Temperaturentwicklungen entlang einer Horizontaltraverse in 1170m, 1020m und 870m Tiefe, entsprechend den drei Einlagerungssohlen, dargestellt. Die Temperaturen in vertikaler Richtung entlang einem Schnitt durch die Mitte der Lagerfelder sind in der Abb.8 aufgetragen.

Um den thermomechanischen Einfluß der Wärmeentwicklung in der unteren Sohle auf das Konvergenzverhalten der Richtstrecke 2 aufzuzeigen, wurden zusätzliche Temperaturrechnungen durchgeführt, bei denen die Wärmequelle auf der Sohle 1 nicht berücksichtigt wurde. Für diesen Fall ist die Temperaturentwicklung in Form einer Vertikaltraverse für drei Zeitpunkte in Abb.9a dargestellt. In Abb.9b sind die Temperaturen entlang einem Horizontalschnitt auf dem Niveau der zweiten Einlagerungssohle angegeben.

4.2 Konvergenz der Richtstrecken

In Abb.10 sind die maximalen Konvergenzen der drei Richtstrecken dargestellt. Abbildung 11 zeigt die Volumenkonvergenz der Richtstrecken 1 bis 3 während der Betriebszeit der entsprechenden Sohlen. Diese Ergebnisse bestätigen die bereits in früheren Modellrechnungen ermittelten Konvergenzen der Richtstrecken /9/. Es wird damit gezeigt, daß die Einlagerungstiefe (bzw. der Gebirgsdruck) einen maßgebenden Einfluß auf die Hohlraumkonvergenzen hat.

Ein wichtiges Ergebnis ist auch die Verformung und insbesondere die Hebung der Richtstreckensole während der Betriebszeit. Zur Illustration sind in Abb.12 die Hebungen der Richtstreckensole nach 10 Jahren Betriebszeit dargestellt. Abbildung 13 stellt zum gleichen Zeitpunkt die resultierende Verschiebungen der Richtstrecken gegenüber dem Anfangszustand dar. Aufgrund der Temperaturerhöhung in dem unteren Einlagerungsfeld und der thermisch induzierten Ausdehnung des Steinsalzes wird eine gleichmäßige Vertikalverschiebung der Sohle 2 und 3 verursacht.

Bei den weiteren Rechnungen wurde der Einfluß der Wärmeentwicklung in der Einlagerungssole 1 auf die Konvergenz der darüber liegenden Richtstrecke untersucht. In Abb.14 sind zum Vergleich die Volumenkonvergenzen der Richtstrecken 2 ohne die Berücksichtigung der Temperaturerhöhung auf der unteren Sohle und die bereits in Abb.11 gezeigten Konvergenzen dargestellt. Die Sohlenhebung in den beiden betrachteten Fällen stellt Abb.15 dar. Der Hebungsbetrag erreicht nach 10 Jahren ca. 0.2 m in beiden Fällen.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Wärmeentwicklung auf der unteren Sohle nur eine geringe Erhöhung der Volumenkonvergenz, jedoch eine großräumige Verformung des gesamten Salzgebietes bewirkt.

4.3 Konvergenz einer BE-Lagerstrecke während der Kaltphase

Die Konvergenz einer BE-Lagerstrecke im Inneren eines Einlagerungsfeldes auf drei Sohlen wurde zuerst während der "Kaltphase" von 0.7 Jahren untersucht. Als

Kaltphase wird die Zeit von der Auffahrung der Strecke bis zu ihrer Befüllung mit POLLUX-Behältern und Versatzmaterial bezeichnet. Ausgehend von der vorgegebenen Pfeilerbreite von 12.5 m wurde die Konvergenz einer BE-Lagerstrecke in der Mitte des Einlagerungsfeldes ermittelt. In Abb.16 sind die Volumenkonvergenzen der Lagerstrecke in 1170m, 1020m und 870m Tiefe während der Kaltphase dargestellt. Die Ergebnisse für die unteren Einlagerungssohlen erreichen Konvergenzwerte bis zu 20% bereits nach 0.7 Jahren. Diese großen Konvergenzen sind einerseits durch den hohen Gebirgsdruck, andererseits durch die geringe Pfeilerbreite bedingt.

Zur Untersuchung des Einflusses der Pfeilerbreite auf die Streckenkonvergenz wurden weitere Modellrechnungen durchgeführt. Es wurde die Breite von 12.5m (Referenzfall) auf 20, 40 und 100m (quasi unendlich) vergrößert. Die Entwicklung der Volumenkonvergenzen für eine BE-Lagerstrecke in 1170m Tiefe und für die verschiedenen Pfeilerbreiten zeigt Abb.17. Die Konvergenzen als Funktion der Pfeilerbreite für zwei Einlagerungstiefen (1170m und 870m) sind in Abb.18 dargestellt. Die berechneten Volumenkonvergenzen für eine angenommene Pfeilerbreite von 20m oder größer liegen gegenüber dem Referenzfall deutlich niedriger (Faktor 0.5).

4.4 Langzeitverhalten der verfüllten BE-Lagerstrecke

Nach dem Einbringen von POLLUX-Behältern und Verfüllung der Lagerstrecke mit Versatz wird die Volumenkonvergenz und damit die Versatzkompaktierung maßgeblich von der Temperaturentwicklung und vom thermomechanischen Verhalten des Versatzes bestimmt. Dadurch werden schnellere Kriechverformungen im Steinsalz und auch im Versatz hervorgerufen. Für den Referenzfall mit einer Pfeilerbreite von 12.5 m sind in Abb.19 die mit dem Programm FAST-BEST berechneten Temperaturen an 3 charakteristischen Punkten als Funktion der Zeit dargestellt. In Abb.20 sind die Volumenkonvergenzen für die drei Einlagerungstiefen dargestellt. Die über den Streckenquerschnitt gemittelte Porositätsabnahme des Versatzes ist in Abb.21 gezeigt. Die Entwicklung der Porosität in der Strecke in 850m Tiefe und die entsprechenden Temperaturen 5 Jahre nach Einlagerungsbeginn sind in Abb. 22 als Isolinien geplottet. Abbildung 23 zeigt die zeitliche Entwicklung des Kompaktierungsdruckes im Versatz. Der Einfluß der Einlagerungstiefe (d.h. des Gebirgsdruckes) ist auch hier sehr deutlich erkennbar.

5. Zusammenfassung

Die durchgeführten Rechnungen zum Endlagerkonzept der dreisöhligen Streckenlagerung (SL3*) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Konvergenzen der Richtstrecken und der Lagerstrecken sind maßgeblich von der Einlagerungstiefe, d.h. von dem herrschenden lithostatischen Primärspannungszustand abhängig. Aus den Rechenergebnissen geht hervor, daß die Konvergenzen in 1170m Tiefe etwa vierfach höher als in 870m Tiefe sind. Zur Beurteilung der höheren Konvergenzen auf den unteren zwei Sohlen sind jedoch keine Kriterien verfügbar.
- Die Wärmeentwicklung in den Lagerfeldern hat ebenfalls einen deutlichen Einfluß auf die Konvergenz der benachbarten Richtstrecken. Dagegen hat die Temperaturerhöhung in der unteren Sohle nur einen relativ geringen Einfluß auf die Konvergenz der darüber liegenden Richtstrecke. Dies läßt sich durch die unterschiedlichen Entfernungen der Wärmequellen zur Richtstrecke erklären.
- Die Konvergenz einer BE-Lagerstrecke während der Betriebsphase (Kaltphase) ist zusätzlich von der Breite des Pfeilers stark beeinflusst. Zum Beispiel wird durch die Verdoppelung der vorgegebenen Pfeilerbreite von 12.5m die Konvergenz der Lagerstrecke auf den halben Betrag reduziert.
- Die Ergebnisse zum Langzeitverhalten der BE-Lagerstrecke zeigen, daß bereits nach wenigen Jahren eine wesentliche Abnahme der Porosität im Versatz auftritt. Durch die Erhöhung des Kompaktierungsdrucks verbessert sich die Tragwirkung des Versatzes und damit findet eine Entlastung im Salz statt.

6. Literatur

- /1/ Bechthold W., Braun W., Brückner C., Closs K. D., Knapp U., Papp R.:
Systemanalyse Mischkonzept, Hauptband, KWA-2190 A1, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Dez. 1989

- /2/ ADINA-T
A Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis, Report ARD 84-3, ADINA-Engineering Inc., 71 Elton Av. Watertown, MA. 02172, USA, 1984

- /3/ Ploumen, P.:
Numerische Langzeitrechnung dreidimensionaler Temperaturfelder mit Hilfe eines speziellen Finite-Element-Verfahrens am Beispiel der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salzgestein, Dissertation an der RWTH Aachen, Febr. 1980

- /4/ Albers, G.:
MAUS - A Computer Code for Modelling Thermomechanical Stresses in Rocksalt, in Computer Modelling of Stresses in Rock, Proc. of a Technical Session Held in Brussels, EUR 9355 EN, Dec. 6-7, 1983

- /5/ Korthaus E., Bechthold W., Closs K. D., Pudewills A.:
Thermische und thermomechanische Analysen des Endlager- Nahbereichs und Ermittlung des Flächenbedarfs des Endlagers, Systemanalyse Mischkonzept, Abschlußbericht, Tech. Anhang 5, KWA-Nr. 2190 A1, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Dez. 1989

- /6/ Wallner M., Caninenberg C., Gonther H.:
Ermittlung zeit- und temperaturabhängiger mechanischer Kennwerte von Salzgestein, Proc. 4. Int. Congr. Rock Mech., Montreux, Switzerland, Sept. 2-8, 1979, Vol.1, S. 313-318, Rotterdam, Balkema, 1979

- /7/ Korthaus E.:
Persönliche Mitteilung, 1991

- /8/ Bechthold W., Heusermann S., Schrimpf C., Gommlich G.E.:
Large-scale test on in situ backfill properties and behavior under reference repository conditions, Joint NEA/CEC Workshop on Sealing of Radioactive Waste Repositories, Braunschweig, May 22-25, 1989
- /9/ Pudewills A.:
Thermomechanical analysis of the main drift in the vicinity of a nuclear waste disposal area, Proc. of the Int. Symp. Rock at Great Depth, Pau, F, Aug.28-31, 1989, Maury, V. (Herg.), S. 419-424, Rotterdam, Balkema, 1989
- /10/ Systemanalyse Mischkonzept, Planung der Grubengebäude,
Technischer Anhang 2, Herausgeber Wildt K.H., Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH, KWA-Nr 5131B5,
Okt.1989

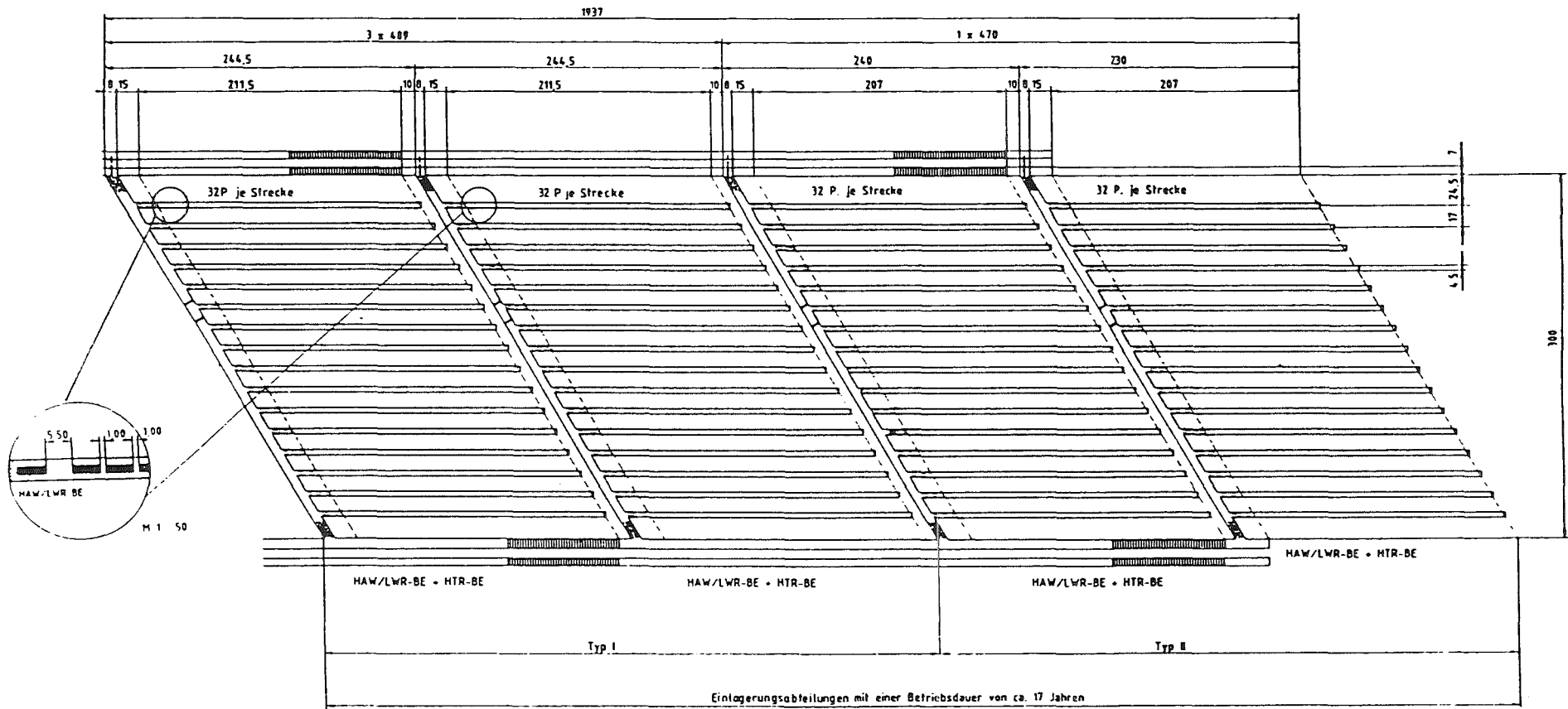


Abb.1 Schematische Darstellung des Einlagerungskonzepts SL3*
(nach /10/)

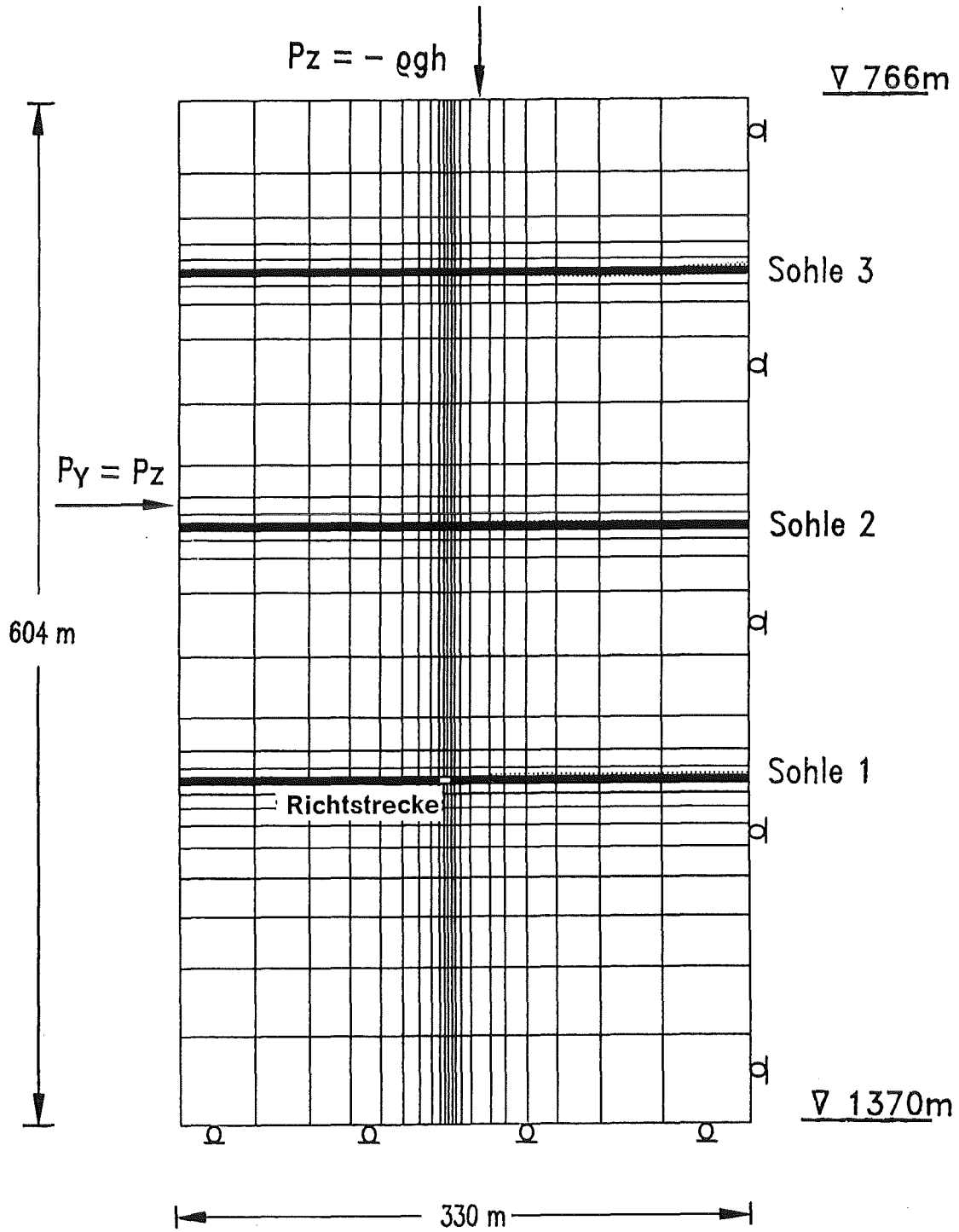


Abb.2 Finite-Elemente Modell und die Randbedingungen für die thermomechanische Analyse des Konzepts SL3*

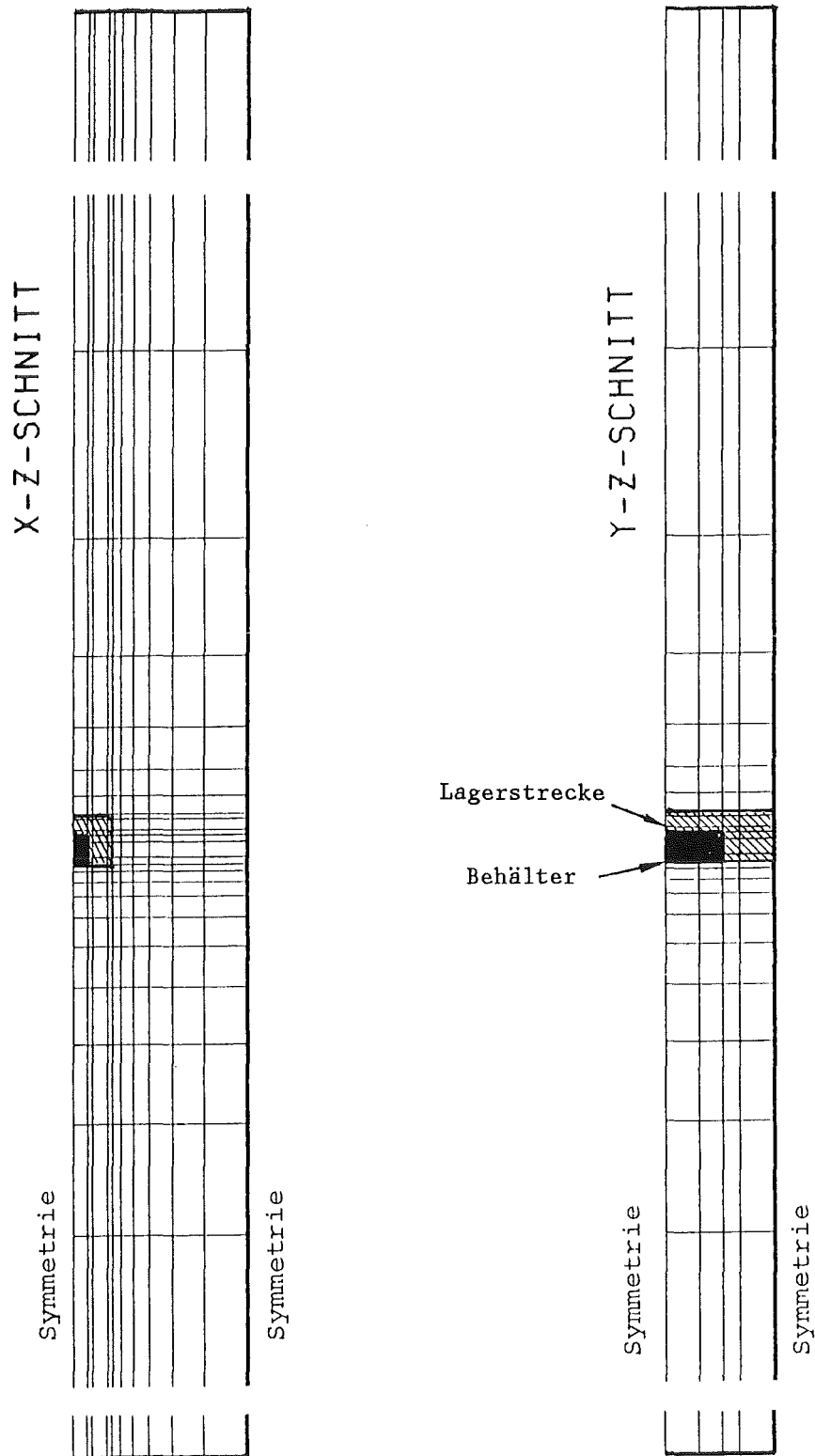


Abb.3 Finite-Elemente Modell und die Randbedingungen für die Temperaturrechnungen zur BE-Lagerstrecke

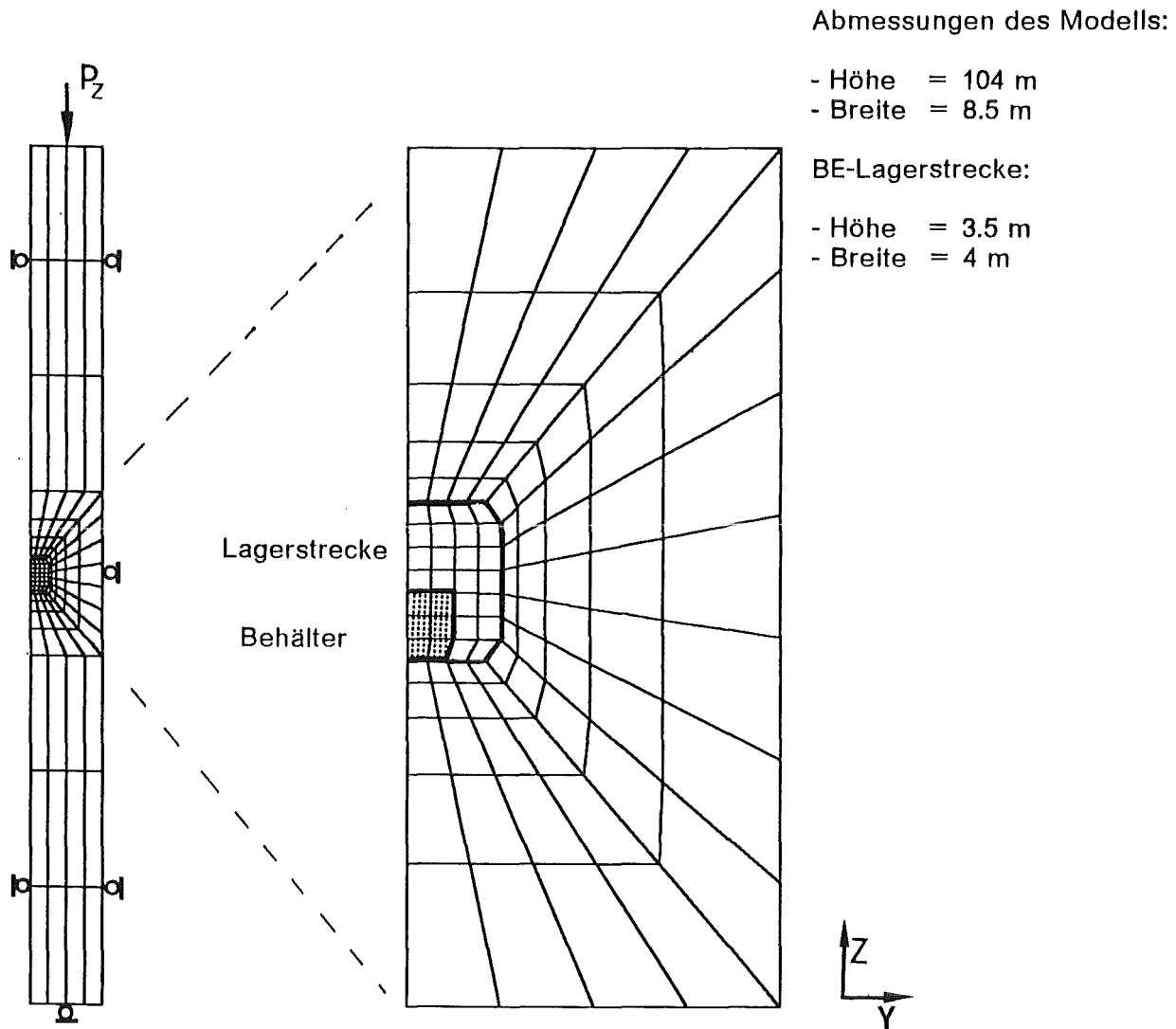
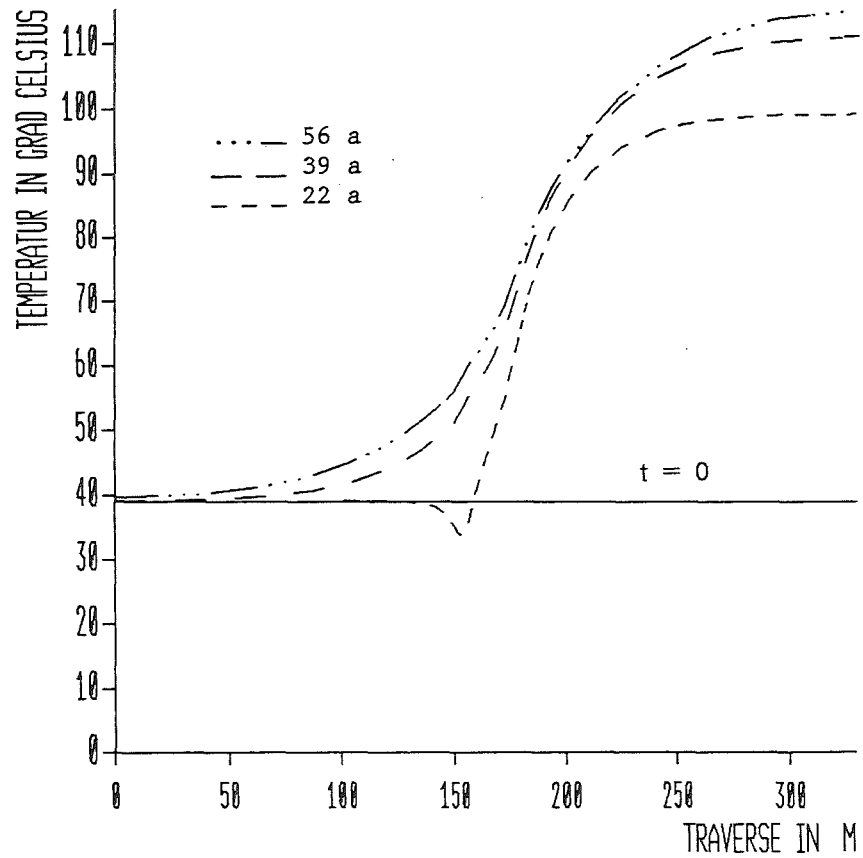
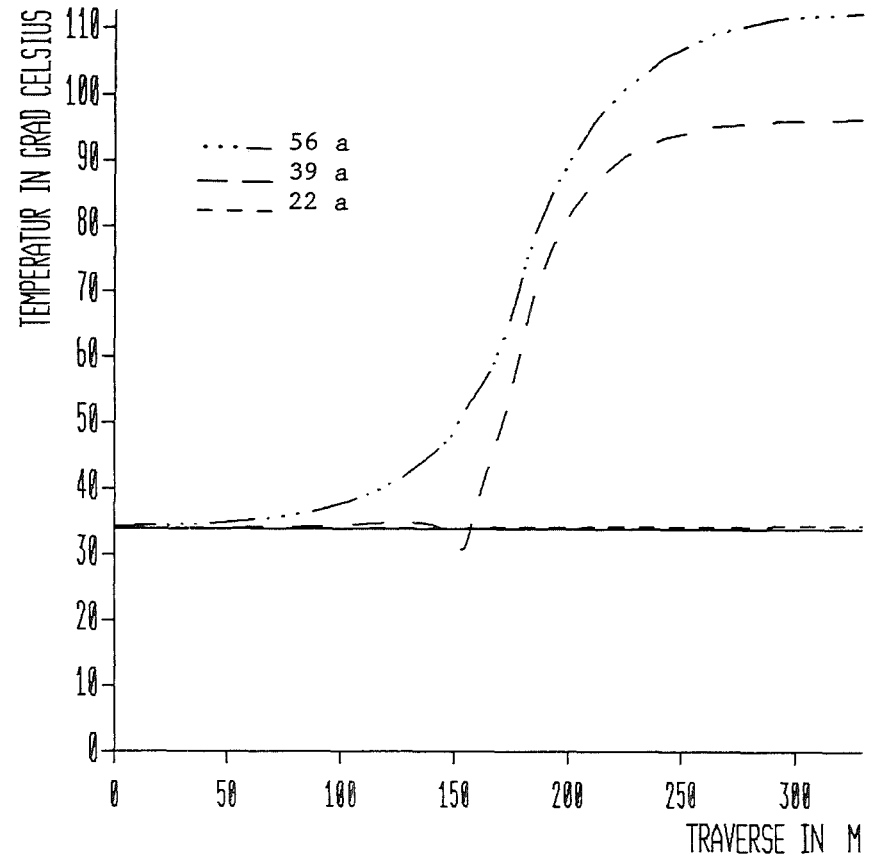


Abb.4 Finite-Elemente Modell und die Randbedingungen für die thermomechanische Analyse der BE-Lagerstrecke



Y - TRAVERSE Z = 200.000

Abb.5 Horizontaler Verlauf der Temperatur auf dem Niveau der Sohle 1



Y - TRAVERSE Z = 350.000

Abb.6 Horizontaler Verlauf der Temperatur auf dem Niveau der Sohle 2

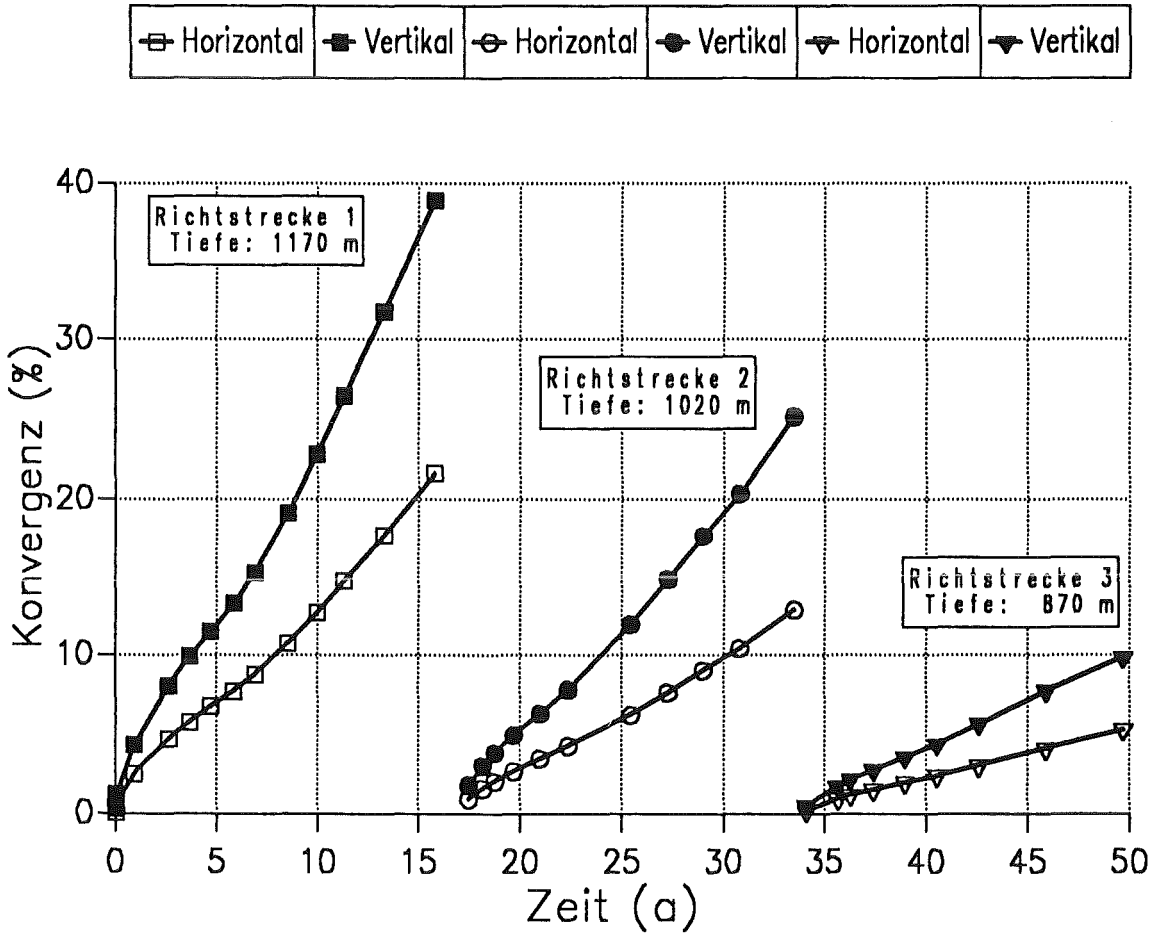


Abb.10 Zeitlicher Verlauf der Richtstreckenkonvergenz

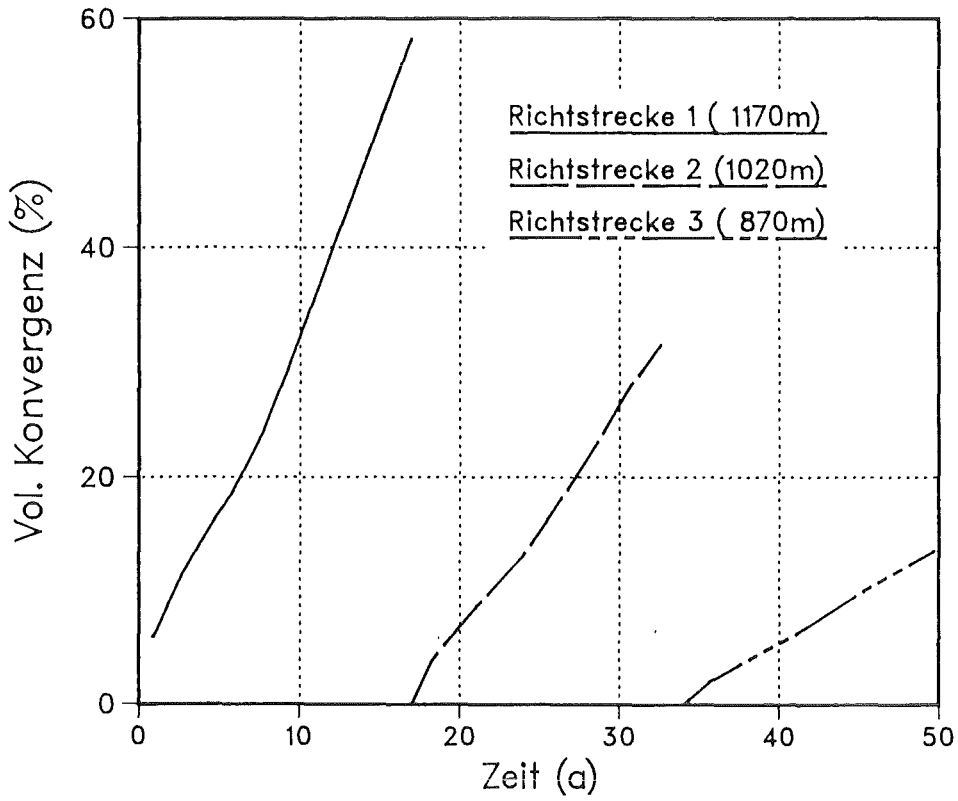


Abb.11 Volumenkonvergenz der Richtstrecken

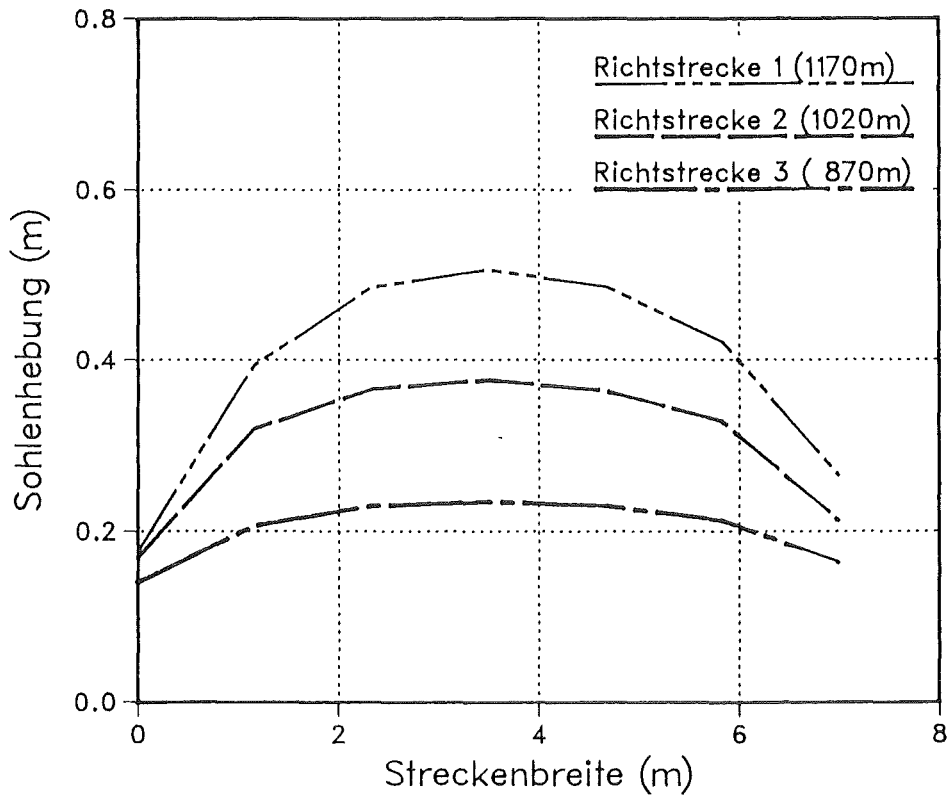


Abb.12 Hebung der Richtstreckensohlen nach 10 Jahren Betriebszeit

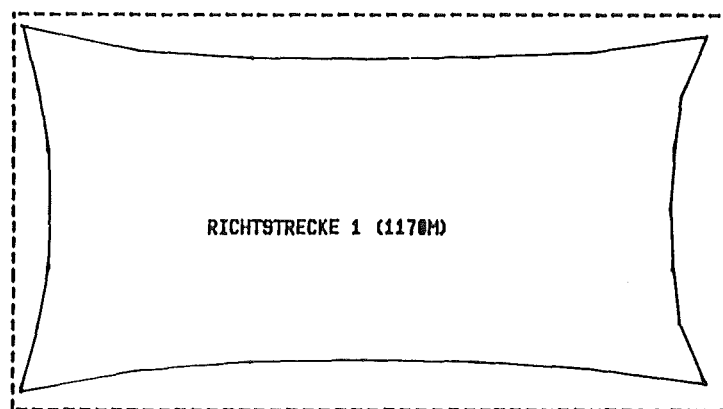
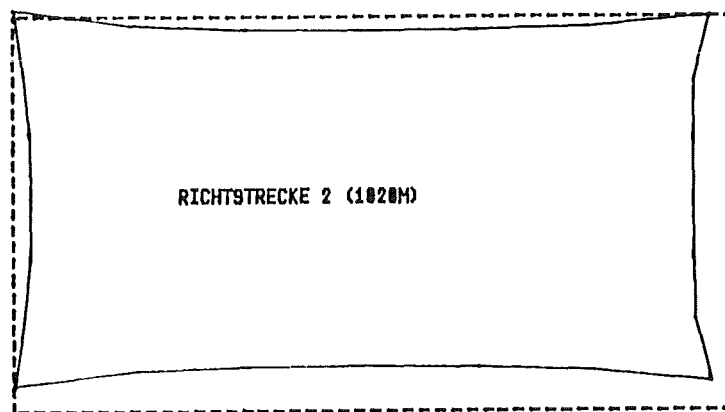
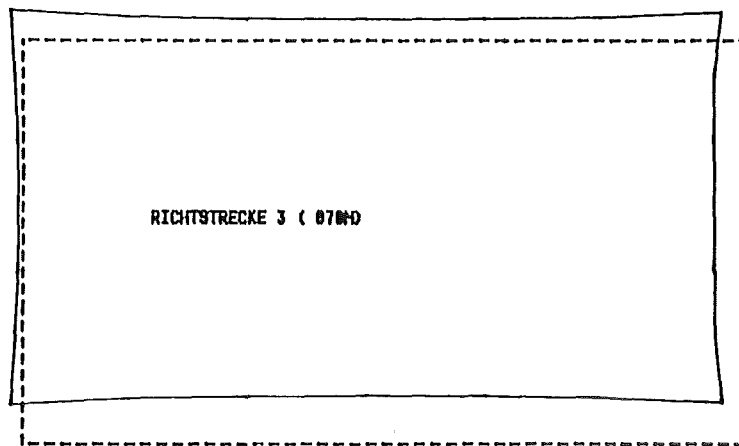


Abb.13 Verformung der Richtstrecken nach 10 Jahren im Vergleich zum ursprünglichen Querschnitt

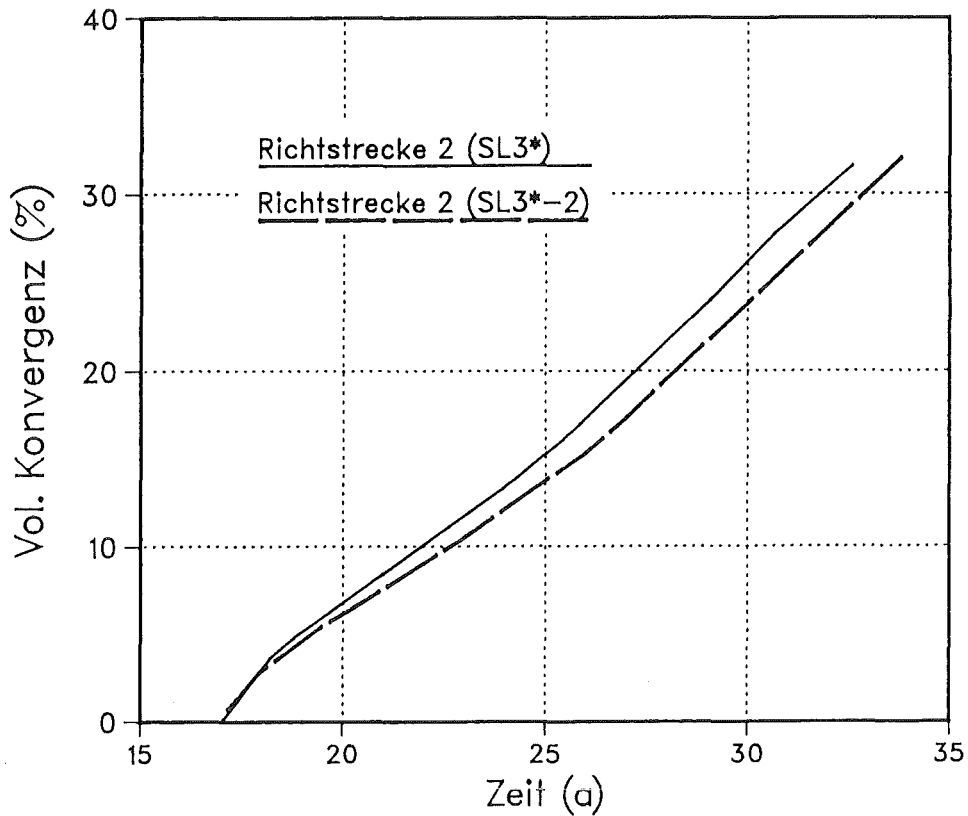


Abb.14 Vergleich der Volumenkonvergenz der Richtstrecke 2 SL3* mit therm. Auswirkung der unteren Sohle SL3*-2 ohne therm. Auswirkung der unteren Sohle

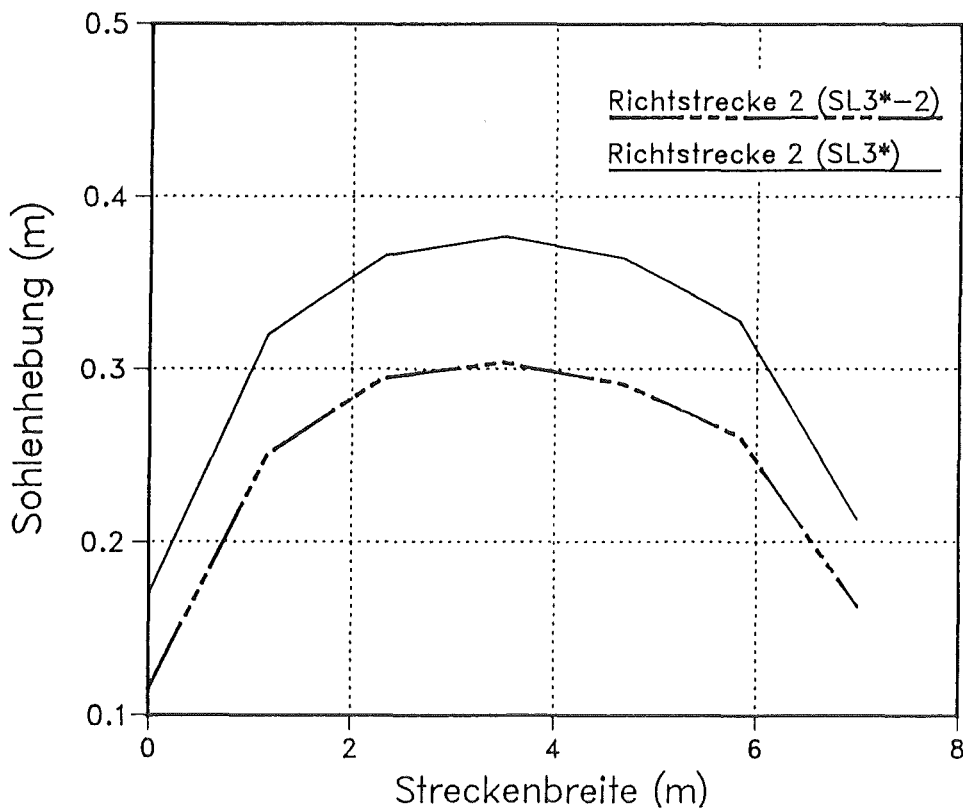


Abb.15 Vergleich der Sohlenhebung der Richtstrecke 2 für die beiden betrachteten Fälle

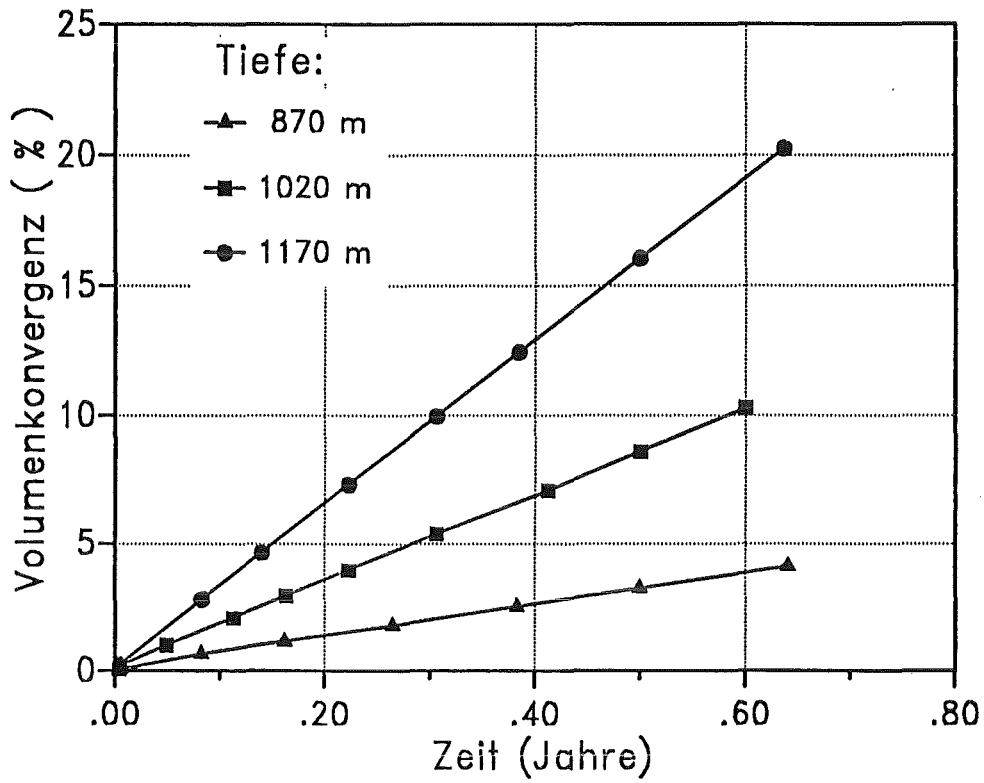


Abb.16 Volumenkonvergenz einer Lagerstrecke während der Kaltphase für drei Einlagerungstiefen

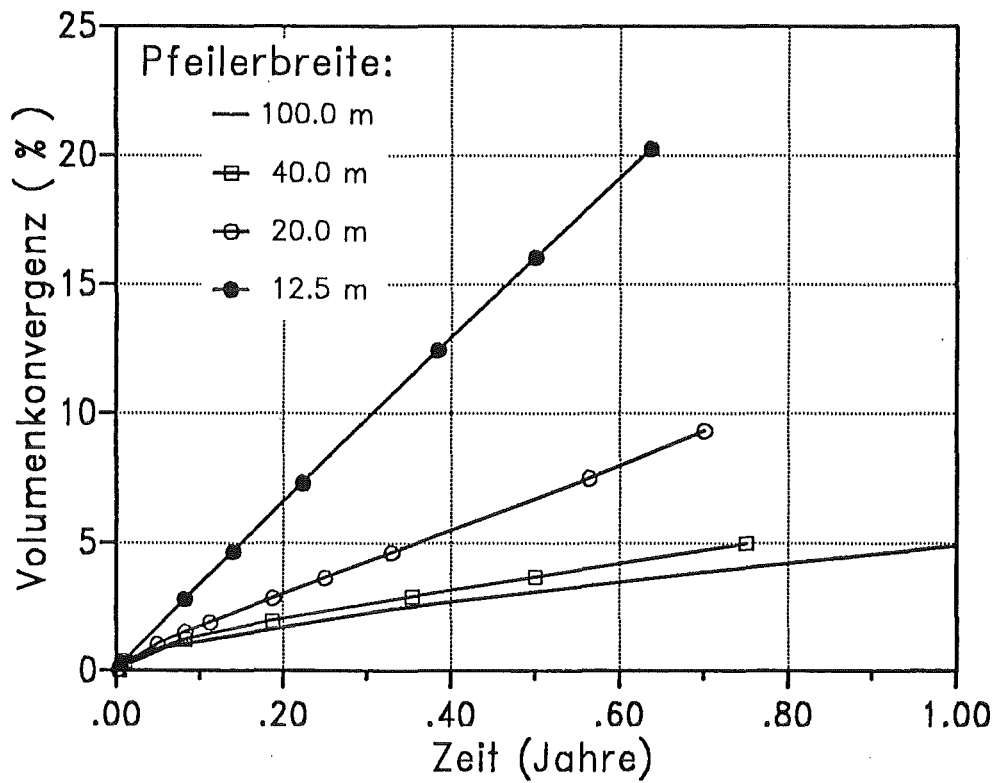


Abb.17 Volumenkonvergenz einer Lagerstrecke für verschiedene Pfeilerbreiten (Einlagerungstiefe 1170m)

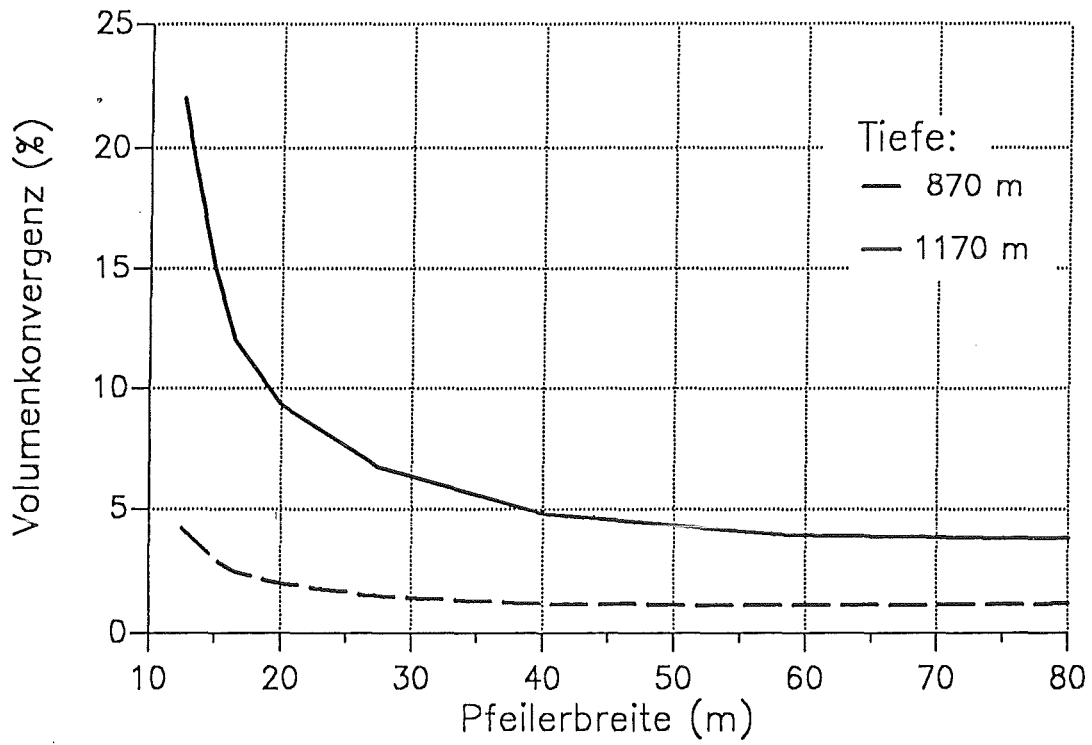


Abb.18 Volumenkonvergenz einer Lagerstrecke während der Kaltphase als Funktion der Pfeilerbreite

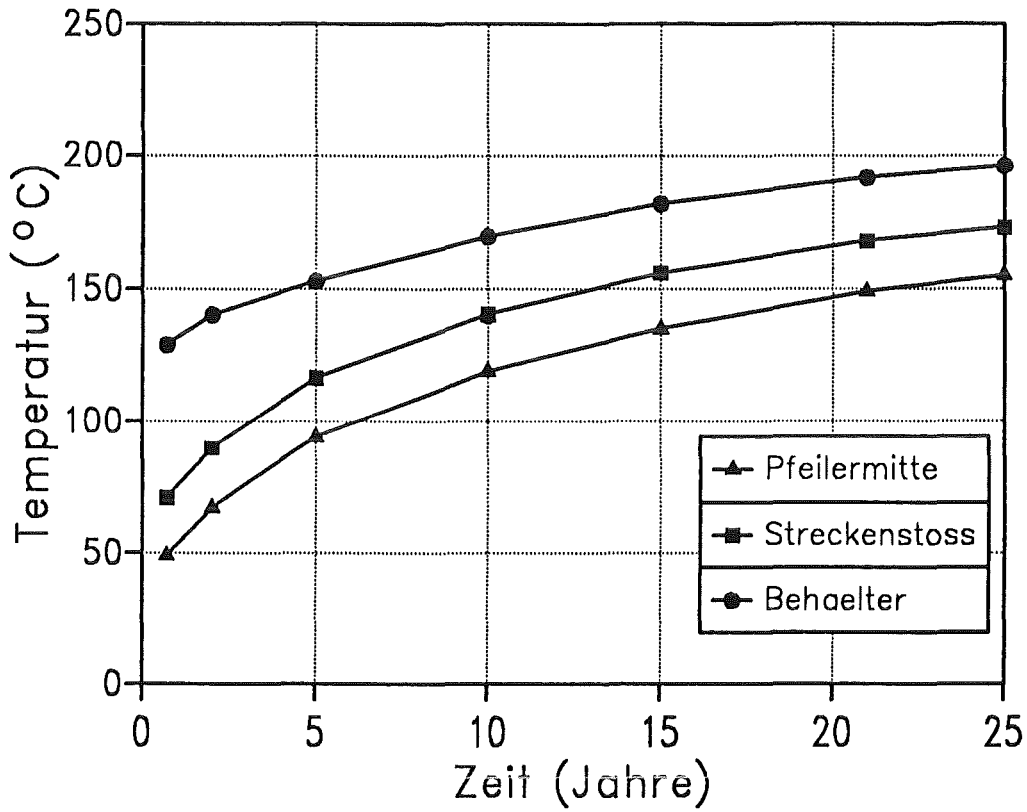


Abb.19 Temperaturverlauf an verschiedenen Positionen

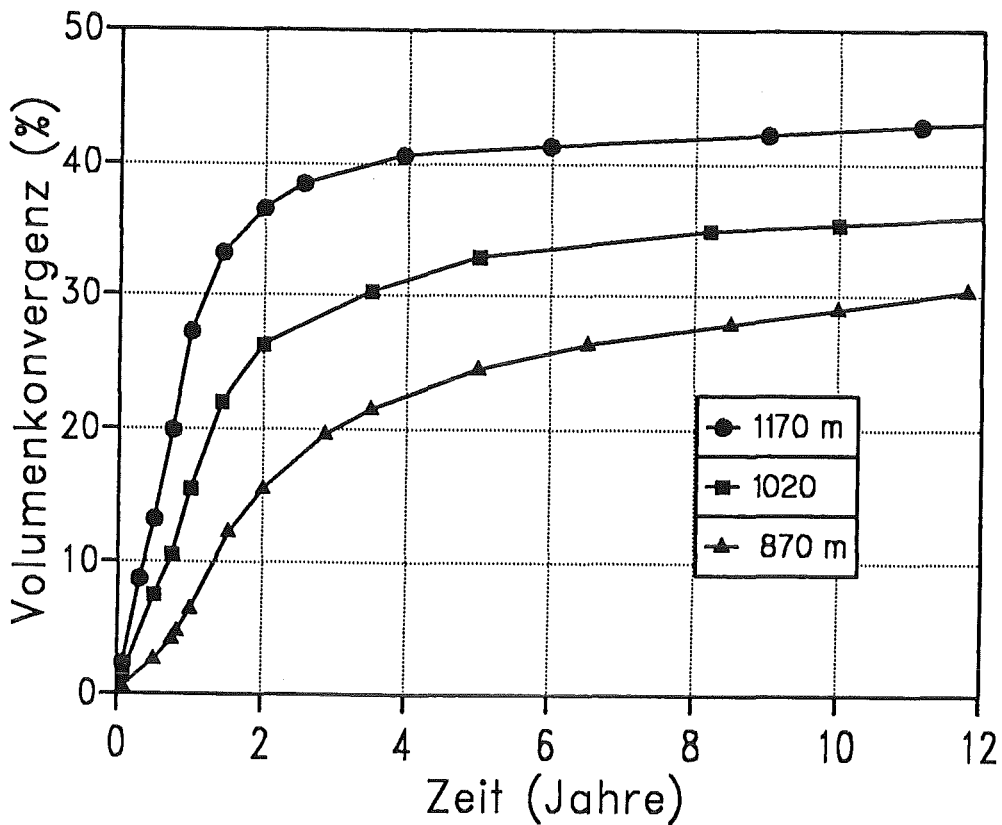


Abb.20 Volumenkonvergenz einer BE-Lagerstrecke (Streckenabstand 17m)

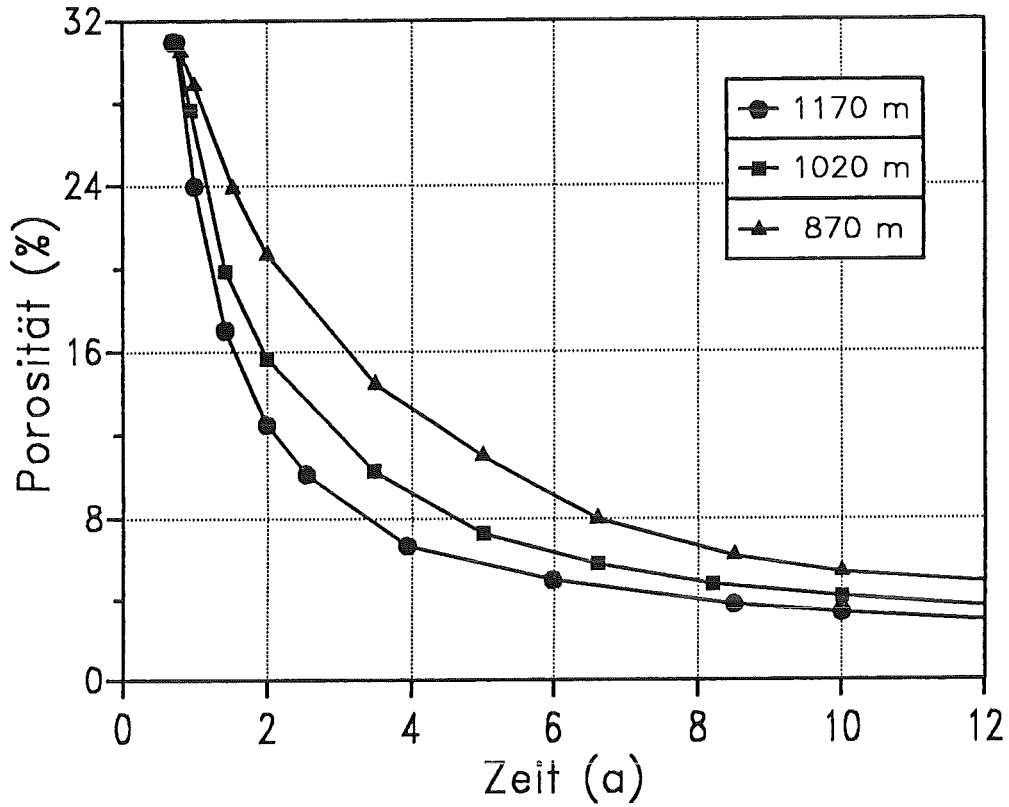


Abb.21 Zeitverlauf der mittlere Porositäet des Versatzes

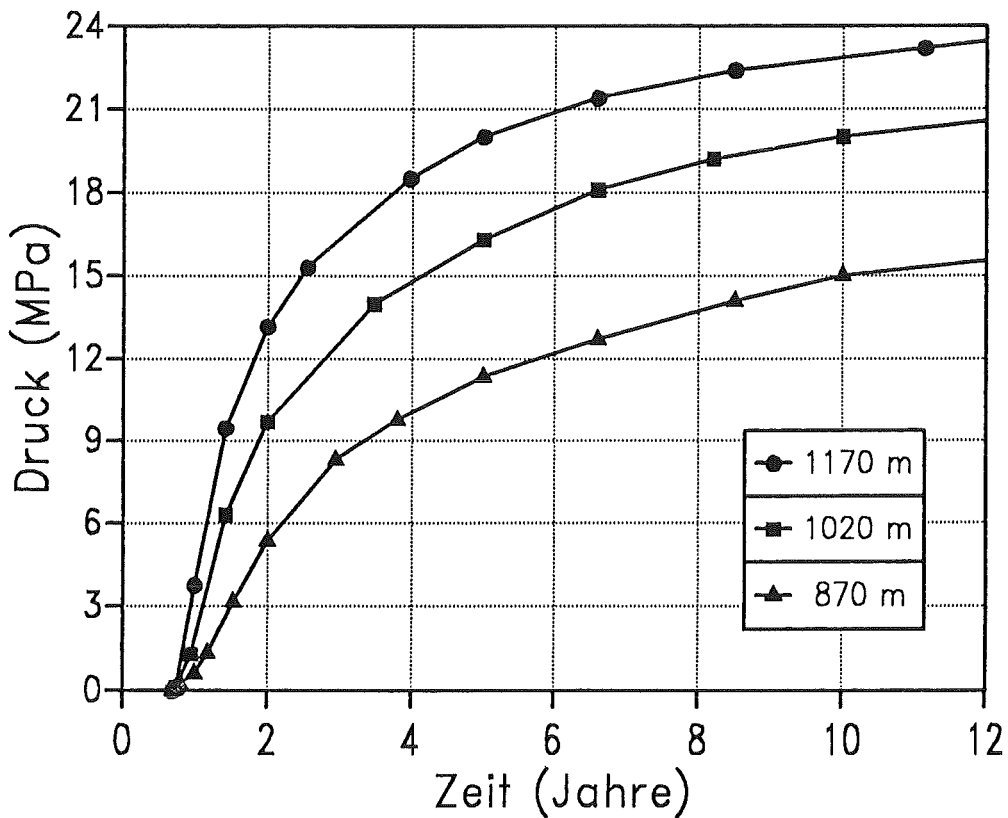


Abb.23 Entwicklung des Kompaktierungsdruckes im Versatz (Streckenabstand 17m)

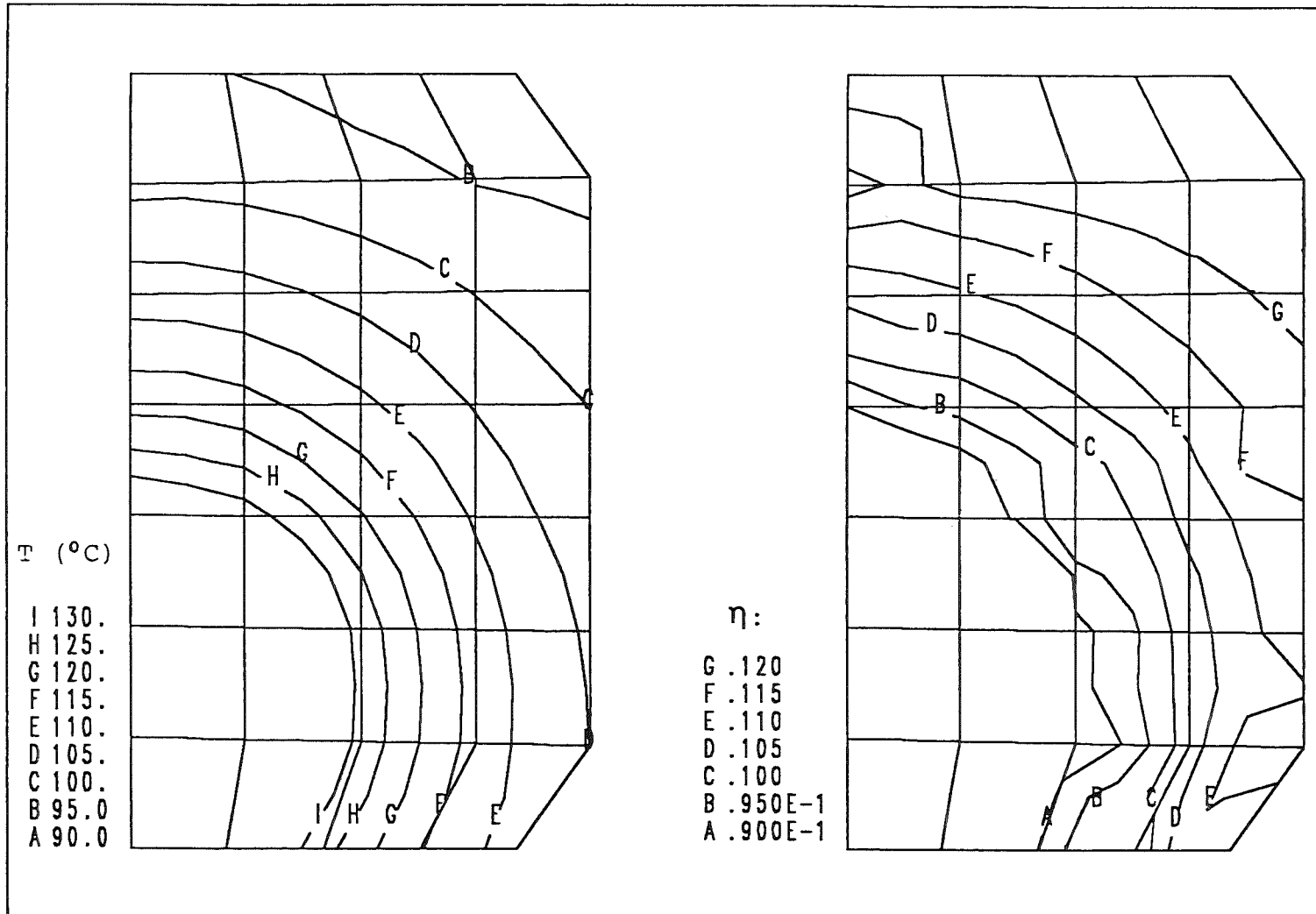


Abb.22 Isolinien der Temperatur- und Porositätsverteilung im Versatz
 nach 5 Jahren