

KfK 4918  
September 1991

# **Untersuchungen zum Absturz eines Endlagerbehälters mit Brennstababschnitten in ein Bohrloch hinsichtlich Aerosolfreisetzung in das Grubengebäude eines Endlagers**

S. Bantle, H. Herbe, J. Miu  
im Auftrag der  
Projektgruppe Andere Entsorgungstechniken

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
Projektgruppe Andere Entsorgungstechniken

KfK 4918

Untersuchungen zum Absturz eines  
Endlagerbehälters mit Brennstababschnitten  
in ein Bohrloch hinsichtlich Aerosolfreisetzung  
in das Grubengebäude eines Endlagers

S. Bantle, H. Herbe, J. Miu  
BTE  
Bavaria T.O.R. Engineering GmbH  
Nürnberg

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Untersuchungen wurden im Auftrag des Kernforschungszentrums Karlsruhe, Projektgruppe Andere Entsorgungstechniken, durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei den Autoren.

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

## 0. Zusammenfassung

Es werden die Auswirkungen eines unterstellten Endlagergebäude-Absturzes in ein tiefes Bohrloch untersucht, wobei der Behälter (Kokille) mit bestrahlten Brennelementabschnitten befüllt ist. Der Quellterm, der beim Gebäudeabsturz freigesetzten Aerosole wird ermittelt. Zunächst wird für den Fall einer rotationssymmetrischen Stapelung der Kokillen und danach für eine realitätsgerechte Stapelung die Anzahl der versagenden Kokillen berechnet. Aus den auf die Brennstababschnitte wirkenden Beschleunigungen wird als Maß für die Fraktionierung die gewichtsspezifische Energie ermittelt, die auf den Brennstoff wirkt.

Anhand von strömungsmechanischen Untersuchungen, die vom stationären Strömungszustand im Bohrloch infolge der Wärmeentwicklung der Kokillen sowie dem Bewetterungseinfluß ausgehen, werden die Strömungsgeschwindigkeiten errechnet. Weitere strömungsmechanische Untersuchungen werden für den instationären Fall (während und nach dem Absturz einer Kokille) sowie für die dadurch erzeugte Nachlaufströmung durchgeführt.

Als wesentliches Ergebnis zeigt sich, daß bei den zugrundegelegten Randbedingungen kein Aerosolaustrag in das Grubenwetter zu erwarten ist.

# Drop of Canistered Spent Fuel Segments into a Deep Borehole and Subsequent Aerosol Release

## 0. Summary

The consequences of an assumed waste canister drop into a deep borehole are investigated, with the canister containing pin segments of spent nuclear fuel. The source term of the released aerosols is estimated. First, the number of failing canisters is calculated for the case of an axial symmetric canister pile, and then, for the case of a "zig-zag" pile, as found in reality. The weight-specific energy acting on the fuel - a measure for the degree of fuel fractioning - is determined from the acceleration acting on the pin segments.

In the borehole prevails a steady-state flow pattern which is stimulated by the heat of the disposed waste canisters, and is also influenced by the ventilation of the drift above the borehole. Based on this stationary flow pattern flow velocities are calculated by means of fluid mechanical methods. Further investigations deal with the unsteady case which occurs during and immediately after the canister drop as well as with the wake behind the canister. The most relevant result is that under the considered boundary conditions no aerosol release from the borehole into the repository is to be expected.

# Inhaltsverzeichnis

|   |             |
|---|-------------|
| <b>1. Einleitung</b> .....                                    | <b>-1-</b>  |
| <b>2. Problembeschreibung</b> .....                           | <b>-2-</b>  |
| <b>3. Untersuchte Fragestellungen und Ergebnisse</b> .....    | <b>-3-</b>  |
| <b>3.1 Rotationssymmetrische Stapelung</b> .....              | <b>-3-</b>  |
| 3.1.1 Mindestfallhöhe für Zerstörung .....                    | <b>-3-</b>  |
| 3.1.2 Mindestschaden bei Absturz in ein leeres Bohrloch ..... | <b>-4-</b>  |
| 3.1.3 Absturz auf Stapel .....                                | <b>-4-</b>  |
| 3.1.4 Konservativer Quellterm .....                           | <b>-5-</b>  |
| <b>3.2 Realitätsgerechte Stapelung</b> .....                  | <b>-8-</b>  |
| 3.2.1 Fallunterscheidung Stapelung .....                      | <b>-8-</b>  |
| 3.2.2 Schaden durch Stapeldruck .....                         | <b>-8-</b>  |
| 3.2.3 Fallhöhenbetrachtung .....                              | <b>-8-</b>  |
| 3.2.4 Problem des Verkeilens .....                            | <b>-9-</b>  |
| 3.2.5 Konservativer Quellterm .....                           | <b>-9-</b>  |
| <b>3.3 Aerosoltransport im Bohrloch</b> .....                 | <b>-10-</b> |
| 3.3.1 Das stationäre Problem .....                            | <b>-13-</b> |
| 3.3.2 Das instationäre Problem .....                          | <b>-19-</b> |
| 3.3.3 Aerosoltransport .....                                  | <b>-23-</b> |
| <b>4. Ergebnisse</b> .....                                    | <b>-23-</b> |
| <b>Literatur</b> .....  | <b>-27-</b> |

## 1. Einleitung

Für die Direkte Endlagerung von abgebrannten Leichtwasserreaktor-Brennelementen wird u.a. eine Variante entwickelt, bei der die Abfallgebinde, Behälter mit Brennstababschnitten, in 300 m tiefe Bohrlöcher eingelagert werden. Diese Technik entspricht praktisch der, die auch zur Einlagerung von Wiederaufarbeitungsabfällen (verglaster Hochaktivabfall in Kokillen und zementierter Mittelaktivabfall in Fässern) und von Hochtemperaturreaktor-Brennelementen eingesetzt werden soll.

Um Aussagen über die zu erwartende radiologische Belastung des Betriebspersonals und u.U. auch der Bevölkerung in der Umgebung des Endlagers machen zu können, müssen Sicherheitsuntersuchungen für die Zeit während des Endlagerbetriebs durchgeführt werden, d.h. es sind nicht auszuschließende Störfälle zu untersuchen, die eine Freisetzung von Radionukliden in das Grubengebäude erwarten lassen.

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, den Störfall „Absturz eines Endlagergebändes in ein Bohrloch“ zu analysieren und zu ermitteln, welcher Brennstoffanteil dabei fraktioniert freigesetzt wird (Aerosol-Quellterm) bzw. welche Untermenge davon zum Bohrlochmund transportiert und in das Grubenwetter freigesetzt werden kann.

## 2. Problembeschreibung

Die Handhabung der Behälter mit Brennstababschnitten, im folgenden Kokillen genannt, erfolgt im Grubengebäude nur in innerbetrieblichen Abschirmbehältern. Zusammen mit diesen werden die Typ B(U)-Anforderungen der Gefahrgutverordnung Straße (GGVS) /19/ erfüllt. Damit erübrigt sich die Untersuchung von Abstürzen im Grubengebäude. Beim Absenken der Kokille aus dem Abschirmbehälter in das Bohrloch läßt sich jedoch das Versagen des Greifwerkzeuges, mit dem die Kokille hinabgelassen wird, nicht absolut ausschließen, was ein Abstürzen der Kokille in das leere Bohrloch oder auf bereits eingelagerte Kokillen zur Folge hätte. Dies kann zu Aerosolfreisetzen führen, deren Ausmaß abzuschätzen ist.

Den Absturzuntersuchungen wird die POLLUX-Kokille zugrundegelegt (Abb. 2.1), ein auf einen Gebirgsdruck von 300 bar ausgelegter Behälter, bestehend aus dem Stahl 15 MnNi 6.3. In diesen werden die Brennstababschnitte eines halben Druckwasserreaktor-Brennelementes verpackt. Die POLLUX-Kokille ist gasdicht verschweißt und wiegt beladen 1.135 kg.

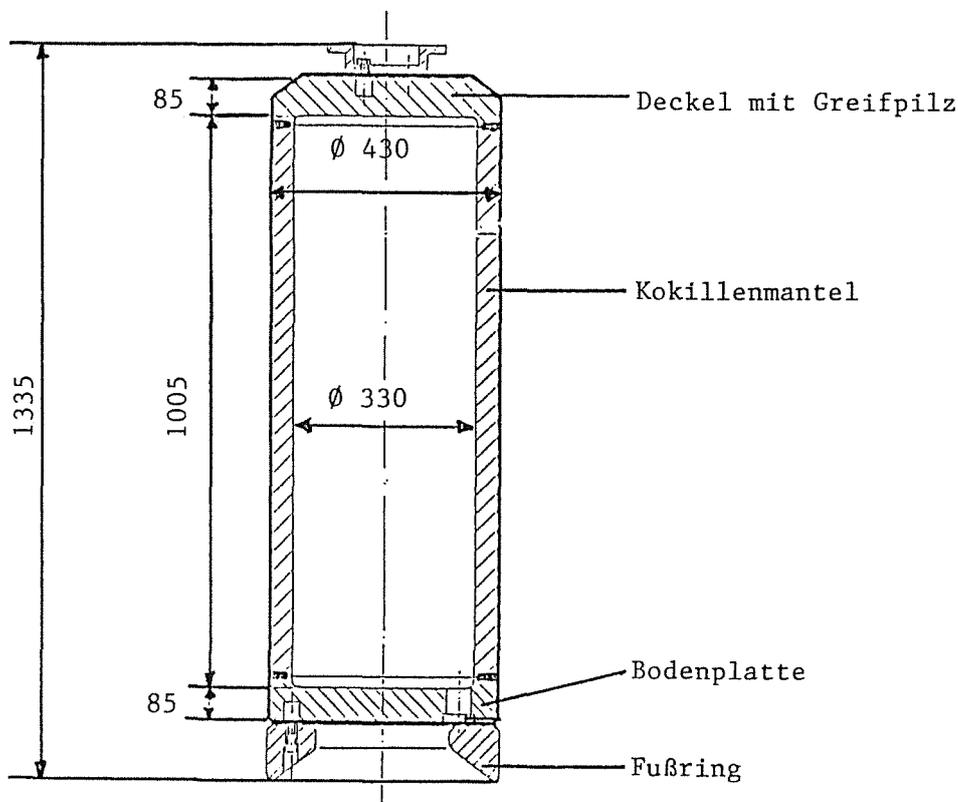


Abb. 2.1: POLLUX-Kokille (Quelle: DWK)

Das Bohrloch hat einen Durchmesser von 70 cm. Es wird als lotrecht mit 300 m Teufe angenommen.

Konservativ wird beim Absturz der POLLUX-Kokille unterstellt, daß kein Energieabbau durch Wandreibung stattfindet.

### 3. Untersuchte Fragestellungen und Ergebnisse

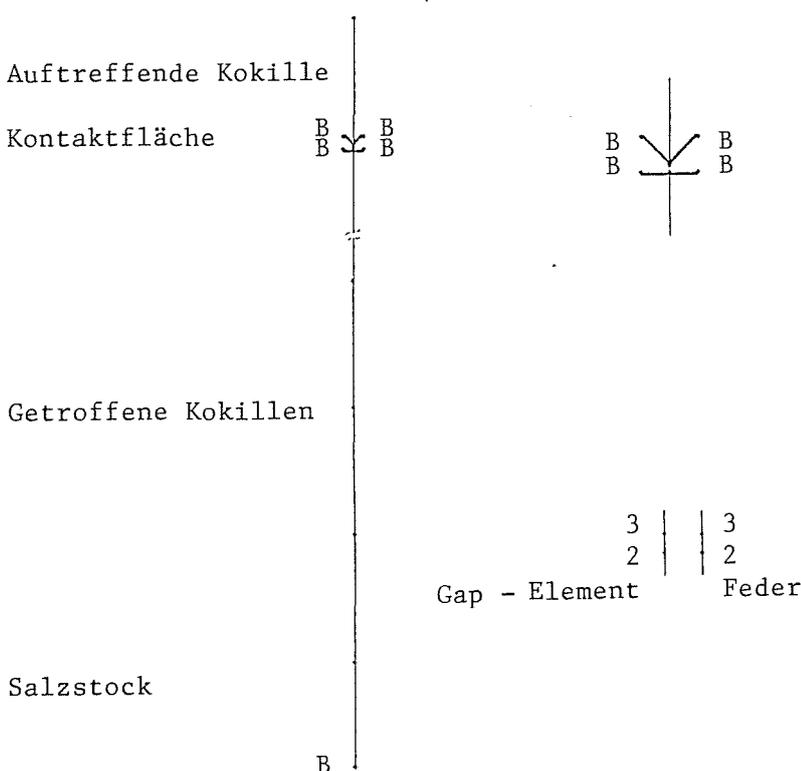
Die Lösung des Problems erfolgte in drei aufeinander aufbauenden Stufen. Zunächst wurde anhand von strukturmechanischen Berechnungen (s. Kap. 3.1 und 3.2) das Versagen der POLLUX-Kokillen untersucht und der Quellterm bestimmt. Anschließend wurde mittels strömungsmechanischer Berechnungen der Aerosoltransport im Bohrloch (s. Kap. 3.3) betrachtet. Freisetzung von Spaltgasen bzw. Aerosoltransport im Grubengebäude selbst waren dabei nicht Gegenstand der Untersuchung.

#### 3.1 Rotationssymmetrische Stapelung

Für diesen Problemkreis wurde unterstellt, daß die bereits im Bohrloch eingelaagerten Kokillen alle so übereinander gestapelt sind bzw. die abstürzende Kokille so fällt, daß die Rotationsachsen aller Kokillen eine lotrechte Gerade bilden.

##### 3.1.1 Mindestfallhöhe für Zerstörung

Zur Klärung der Frage, wie tief eine POLLUX-Kokille fallen kann, ohne daß es zu einem Versagen kommt, wurden mittels der Finite-Elemente-Methode dynamische Berechnungen unter Einbeziehung elasto-plastischer Werkstoffgesetze durchgeführt (Programm ADINA /1/).



Das Rechenmodell bestand aus Stabelementen für die Kokillen, Kontaktelementen zur Berücksichtigung der Reflexion der Schockwelle zwischen den Kokillen sowie einem Federelement zur Modellierung des unverritzten Salzfeldes (Abb. 3.1). Die Steifigkeiten der POLLUX-Kokille bei Längsdruckbeanspruchung wurde mittels rotationssymmetrischer Finite-Elemente-Berechnungen /1/ bestimmt. Als Grenzwert für die linearisierte Zugdehnung,

**Abb. 3.1:** Finite-Elemente-Modell des Kokillenstapels mit Kontakt- und Federelementen

bei der Versagen einsetzt, wurden in Anlehnung an die Regeln des ASME Code, Case N47, 2% festgelegt. Bruchmechanische Aspekte blieben unberücksichtigt. Die so ermittelte Grenzabsturzhöhe betrug rund 33 m.

### 3.1.2 Mindestschaden bei Absturz in ein leeres Bohrloch

Für die Untersuchung des Falles einer POLLUX-Kokille in das noch leere Bohrloch wurde unterstellt, daß eine 10 m mächtige Schicht aus Salzgrus im Bohrloch ansteht. Auf diese trifft die Kokille mit einer Geschwindigkeit von 72,7 m/s. Die Bremswirkung durch die Luft kann bei der Absturzhöhe von 300 m noch vernachlässigt werden.

Die Berechnung ergab, daß die POLLUX-Kokille ca. 8 m in den Salzgrus eindringt ohne zu versagen.

### 3.1.3 Absturz auf Stapel

Ziel der Untersuchungen war es, herauszufinden, bei welcher Absturzhöhe die größte Anzahl der Kokillen versagt und wie der Versagensmechanismus aussieht.

Zunächst wurde in dem unter 3.1.1 beschriebenen Rechenmodell für diese Betrachtung die Anzahl der im Bohrloch gestapelten POLLUX-Kokillen zwischen 2 und 15 variiert. Abbildung 3.2 zeigt die plastischen Dehnungen in Abhängigkeit

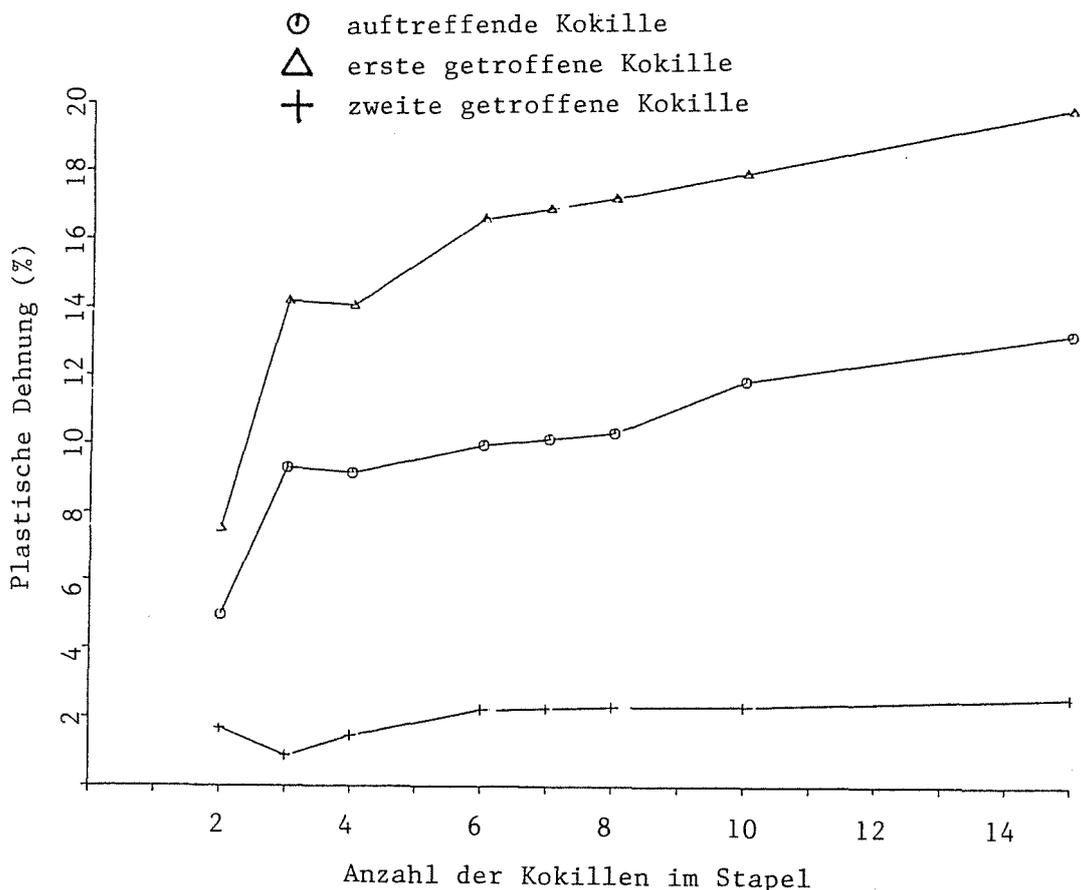


Abb. 3.2: Plastische Dehnungen in den ersten Kokillen in Abhängigkeit von der Stapelhöhe

von der Stapelhöhe. Es zeigte sich, daß neben der ankommenden die beiden obersten Kokillen im Stapel versagen. Dabei werden in der zweiten Kokille im Stapel die 2% Zugdehnung gerade erreicht, bei der dritten Kokille liegen die Dehnungen erheblich niedriger. Nur in dem Falle, bei dem der Stapel aus drei Kokillen besteht, ergeben sich in der zweiten Kokille infolge der Reflexion und Überlagerung der Schockwellen Zugdehnungen unterhalb von 2%.

Zur Bestimmung des Versagensmechanismus wurden rotationssymmetrische dynamische Berechnungen mit elasto-plastischem Werkstoffgesetz mit der Finite-Elemente-Methode durchgeführt (Abb. 3.3) /1/, wobei während der Berechnung Elemente mit mehr als 2% Dehnung automatisch passiviert wurden. Dabei konnte, bei Variation der Anzahl der getroffenen Kokillen, das Ergebnis bestätigt werden, daß drei Kokillen versagen. Während die ankommende Kokille erwartungsgemäß im Bodenbereich versagt, ergeben sich bei der obersten Kokille im Stapel Leckagen sowohl im Deckel als auch im Boden. Die zweite Kokille im Stapel wird im Bodenbereich infolge des Greifpilzes der dritten Kokille noch so hoch beansprucht, daß auch hier Leckage auftritt. Ab der dritten Kokille sind dann keine Undichtheiten mehr zu erwarten.

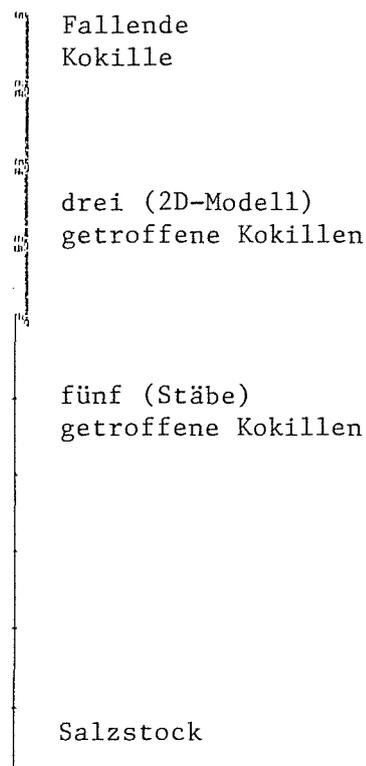


Abb. 3.3: Rotationssymmetrisches Finite-Elemente-Modell zur Bestimmung des Versagensmechanismus

### 3.1.4 Konservativer Quellterm

Die Berechnungen zur Bestimmung des Versagensmechanismus (Kap. 3.1.3) lieferten auch die Beschleunigungszeitverläufe am Boden der Kokillen. Das Maximum lag am Rand der zweiten getroffenen Kokille (Abb. 3.4). Mit dieser Belastung wurden Finite-Elemente-Modelle der Brennstababschnitte in vertikaler und geneigter Lage untersucht.

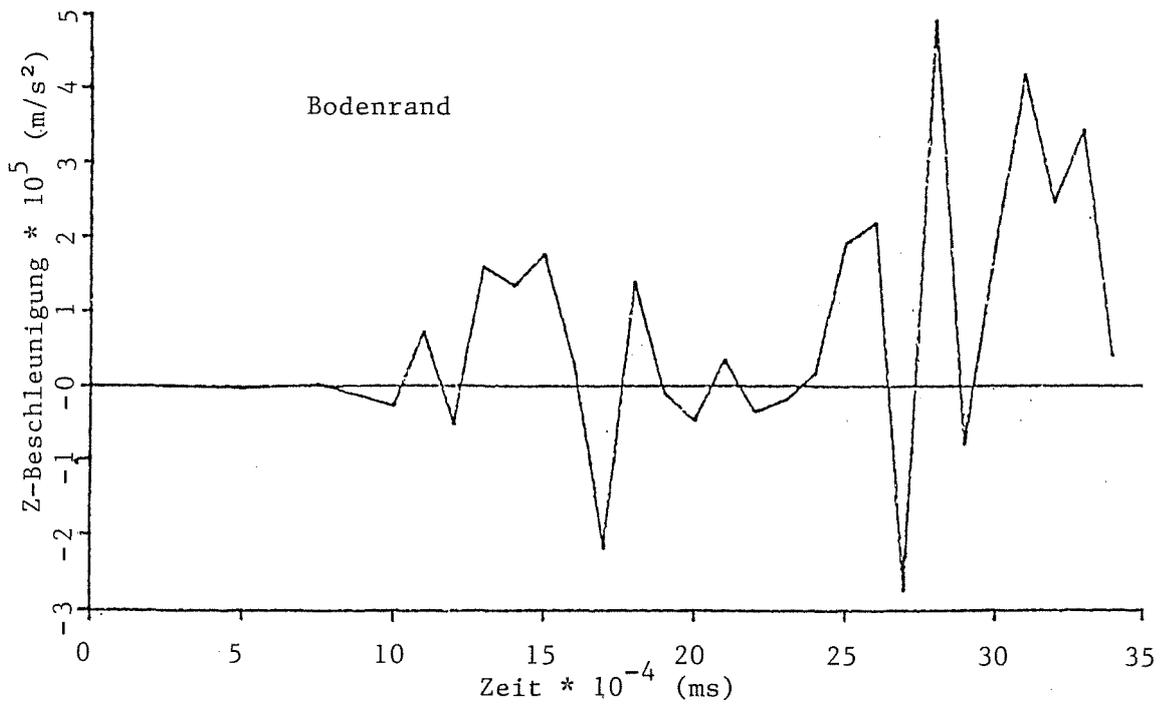
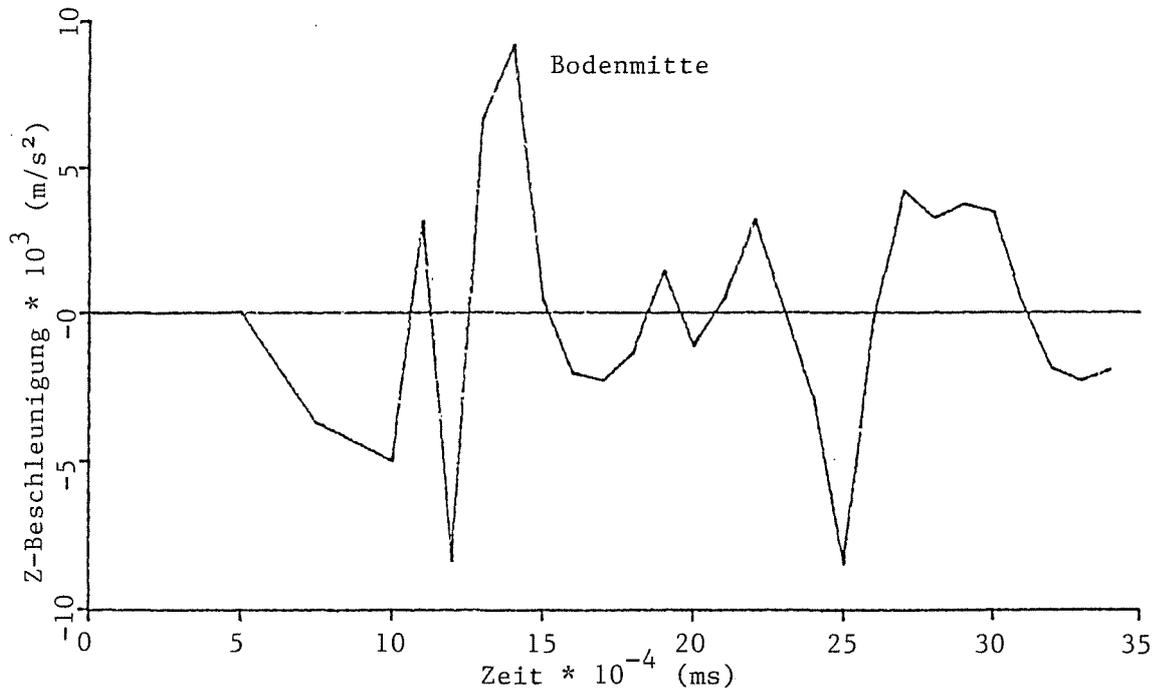


Abb. 3.4: Vertikale Beschleunigungszeitverläufe am Boden der zweitobersten Kokille im Stapel bei rotationssymmetrischer Stapelung

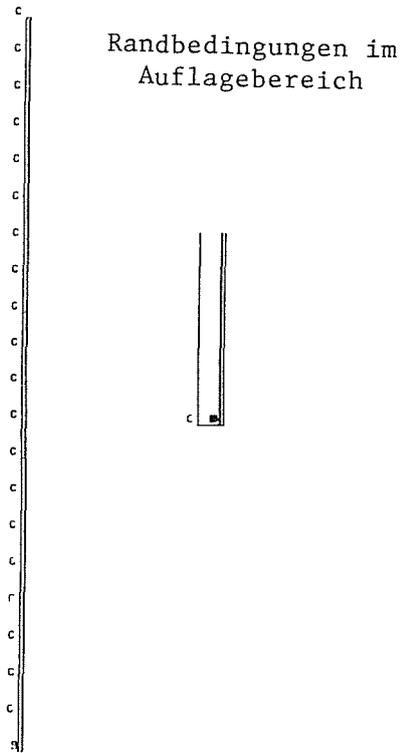


Abb. 3.5 zeigt das Modell für die vertikale Lage, die sich als abdeckend erwies. Der am Hüllrohr haftende Brennstoff wurde mit abgebildet. Wird eine bestimmte Haftkraft zwischen Hüllrohr und Brennstoff überschritten, so kann Brennstoff aus dem Hüllrohr freigesetzt werden. Das entsprechende nichtlineare Werkstoffgesetz wurde aus Nachrechnungen von Versuchen /2/ gewonnen.

Die dynamischen Berechnungen ergaben, daß sich die gesamte Brennstoffsäule vom Hüllrohr nach 1,75 ms gelöst hat. Bei einer mittleren Geschwindigkeit des losgelösten Brennstoffs von 6,7 m/s errechnete sich die gewichtsspezifische Energie zu 0,022 Nm/g.

Dieser Wert ist die Eingangsgröße in Abb. 3.6 aus /2/ zur Ermittlung der Massenprozentanteile in Abhängigkeit von den Korngrößen. Es zeigt sich, daß durch den niedrigen Wert der gewichtsspezifischen Energie nur vernachlässigbare Prozente an Feinanteilen unter 300 µm fragmentiert werden.

Abb. 3.5: Finite-Elemente-Modell zur dynamischen Analyse eines Brennstababschnittes

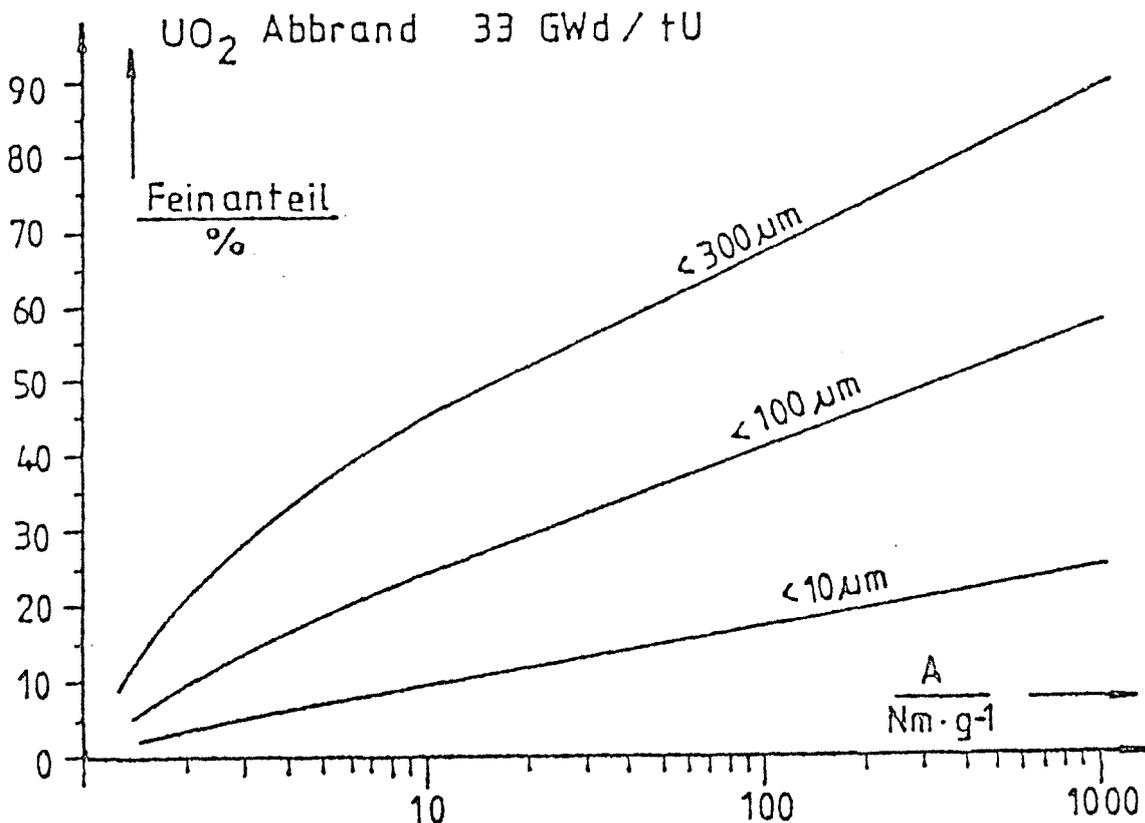


Abb. 3.6: Feinanteile von infolge mechanischer Einwirkung fragmentiertem Kernbrennstoff in Massenprozentanteilen als Funktion der gewichtsspezifischen Belastungsenergie (A = Zerkleinerungsarbeit)

## 3.2 Realitätsgerechte Stapelung

### 3.2.1 Fallunterscheidung Stapelung

Die Abmessungen der Kokille sowie der Durchmesser des Bohrloches lassen Stapel- und Aufprallkonfigurationen zu, die von den unter Kap. 3.1 angenommenen abweichen. Diese nichtrotationssymmetrischen, realitätsgerechten Stapelmöglichkeiten wurden mittels eines Modelles im Maßstab 1:10 auf ihre Relevanz untersucht. Dabei stellten sich zwei als näher zu betrachtend heraus. Abb. 3.7 und 3.8 zeigen die entsprechenden Finite-Elemente-Modelle.

Aus der Beurteilung der Spannungsverteilung infolge Eigengewicht ergab sich, daß der Stapelfall gemäß Abb. 3.8 maßgebend war.

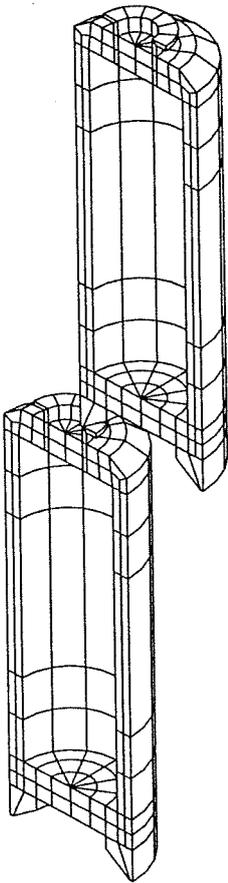


Abb. 3.7

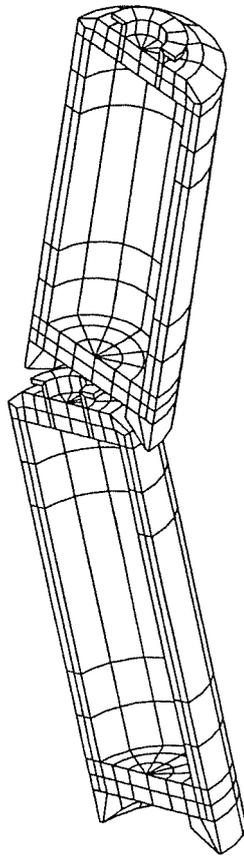


Abb. 3.8

Finite-Elemente-Modelle der realitätsgerechten Stapelung

### 3.2.2 Schaden durch Stapeldruck

Die Ergebnisse der Berechnungen mit dem dreidimensionalen Finite-Elemente-Modell der Abb. 3.8 zeigten, daß bereits im statischen Fall der Stapelung durch das Eigengewicht nicht mehr als 38 POLLUX-Kokillen übereinanderstehen können, damit die Grenzdehnung von 2% (s. Kap. 3.1) nicht überschritten wird.

### 3.2.3 Fallhöhenbetrachtung

Zur Untersuchung des Einflusses der Absturzhöhe wurde ähnlich wie unter Kap. 3.1.1 beschrieben, ein Finite-Elemente-Modell aus Stabelementen erstellt, deren Steifigkeiten aus dem Modell gemäß Abb. 3.8 gewonnen wurden.

Die Anzahl der durch die Stabelemente repräsentierten POLLUX-Kokillen wurde mit acht beginnend auf achtunddreißig als maximal mögliche Anzahl im Hinblick auf den zulässigen Stapeldruck (Kap. 3.2.1) gesteigert. Dabei zeigte sich als Versa-

gensmechanismus, daß stets alle Kokillen undicht werden. Damit lag die maximale Anzahl der versagenden POLLUX-Kokillen für alle Stapelhöhen bei 38, vorausgesetzt, daß eine Mindestabsturzhöhe nicht unterschritten wird.

### 3.2.4 Problem des Verkeilens

Die Stapelkonfiguration gemäß Abb. 3.8 wurde ergänzend unter dem Gesichtspunkt betrachtet, daß sich beim Auftreffen der fallenden Kokille die oberste Kokille im Stapel im Salz verkeilen könnte. Dadurch würden zwar die darunterliegenden entlastet, bei der obersten sowie der ankommenden könnte dies jedoch zu höheren gewichtsspezifischen Energieeinträgen in den Brennstoff führen.

In analytischen Untersuchungen wurden iterativ verschiedene Eindringtiefen der Kokille in das Salz angenommen und die jeweils zugehörige Tiefe des Ausbruchkegels errechnet. Als Materialkennwerte für Salz wurden die eines Betons der Güte B15 verwendet. Unter Zugrundelegung einer Festigkeit von  $15 \text{ N/mm}^2$  für Reißbeginn ergab sich für die maximale Aufschlagkraft von 14 MN vertikal eine Tiefe des Ausbruchkegels von 2 cm. Berücksichtigt man, daß wegen der Form der Kokille beim Eindringen die Belastungsfläche zunimmt, dann ergibt sich ein noch kleinerer Wert. Zudem wurde konservativ die Aufschlagkraft einer Kokille auf den Salzfels, also nicht auf den Kokillenstapel, angesetzt.

Ein Verkeilen konnte folglich ausgeschlossen werden.

### 3.2.5 Konservativer Quellterm

Wie bereits in Kap. 3.1.4 beschrieben, wurden wiederum die Beschleunigungszeit-Verläufe aus Kap. 3.2.3 (s. Abb. 3.9) als Belastung auf das Finite-Elemente-Modell des Brennstababschnittes (Abb. 3.5) aufgebracht und die gewichtsspezifische Energie berechnet. Es wurde ein Wert von  $2,73 \text{ Nm/g}$  gefunden. Aus Abb. 3.6 /2/ ergeben sich daraus folgende Feinanteile in Massenprozent des  $\text{UO}_2$ :

- 26% bis zu  $300 \mu\text{m}$ ,
- 13% bis zu  $100 \mu\text{m}$ ,
- 5% bis zu  $10 \mu\text{m}$ .

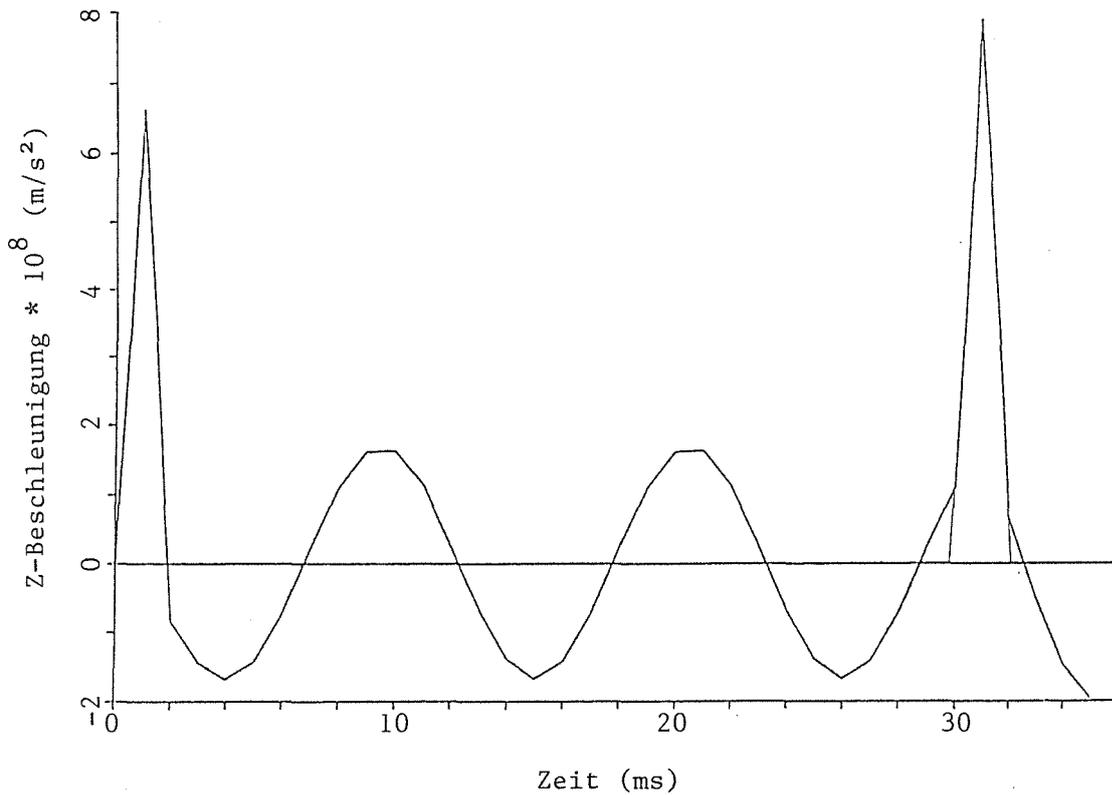


Abb. 3.9: Beschleunigungs-Zeit-Verlauf bei realitätsgerechter Stapelung mit maximaler Beschleunigung

### 3.3 Aerosoltransport im Bohrloch

Die den strömungsmechanischen Untersuchungen zugrundegelegten Temperaturfelder sind in den Abbildungen 3.10 und 3.11 wiedergegeben. Die dargestellten Kurven wurden vereinfachend durch Treppenkurven im unteren und oberen Bohrlochbereich angenähert /5/. Die Randflächen der Einlagerungstrecke wurden als adiabatisch angenommen. Zur Berechnung des Aerosoltransports wurde der konservative Fall eines zum Grubengebäude offenen Bohrlochs zugrundegelegt. Damit wird auch der Einfluß der Bewetterung bezüglich eines möglichen Energie- bzw. Massenaustausches zwischen Einlagerungstrecke und Bohrloch erfaßt. Als Bewetterungsgeschwindigkeit wurde 0,2 m/s angenommen.

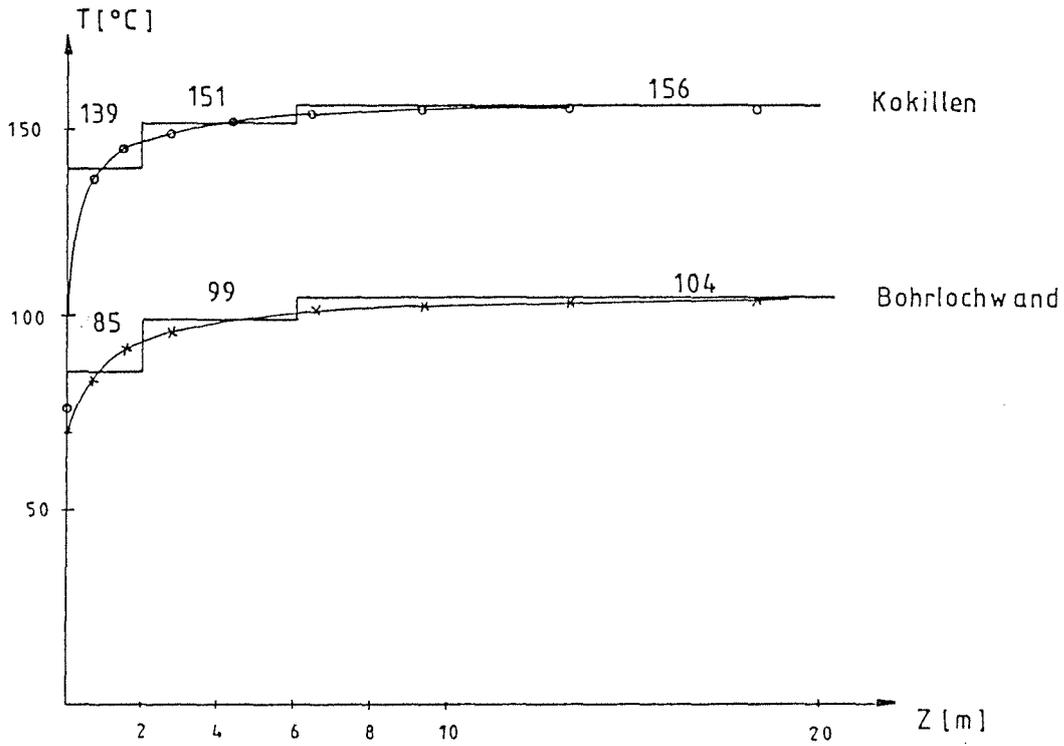


Abb. 3.10: Axiale Wandtemperaturen im unteren Bohrlochbereich nach /5/

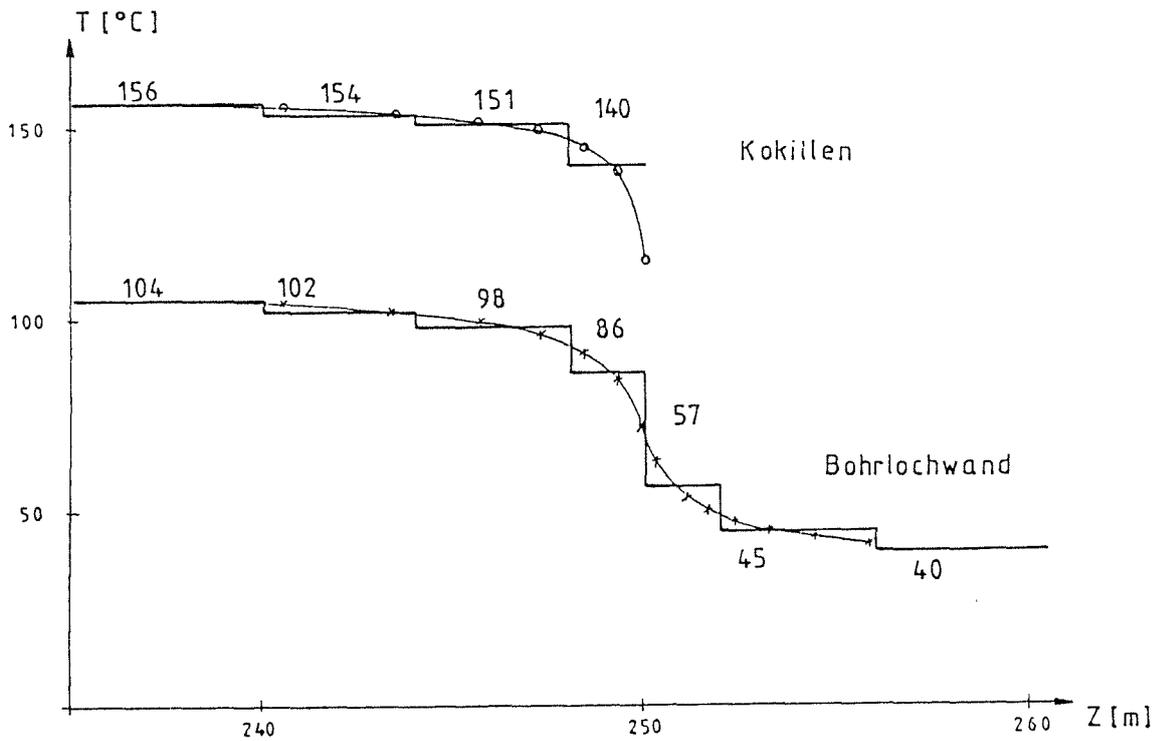


Abb. 3.11: Axiale Wandtemperaturen am oberen Ende eines Kokillenstapels von 250 m Höhe nach /5/

Die Untersuchung erfolgt in den wesentlichen Teilen:

- stationäres Problem mit den Schritten:
  - freie Konvektion
  - Einfluß der Bewetterung
- instationäres Problem (Behälterabsturz) mit den Schritten:
  - Fall
  - Nachlaufströmung
- Aerosoltransport mit den Schritten:
  - Schweben-(Sink)-Geschwindigkeit
  - stationärer Fall
  - instationärer Fall.

Für das Behälterabsturzproblem wurde eine Fallhöhe von 33 m gewählt. Das entspricht dem konservativen Fall der minimalen Fallhöhe, bei der eine Kokille undicht wird. Folgende Vereinfachungen wurden vorgenommen:

Allgemeine Vereinfachungen:

1. Idealierte Geometrie  
Bohrloch senkrecht mit Kreisquerschnitt; Kokillen coaxial, zentrisch
2. Hydraulisch glatte Wände
3. Bohrloch zum Grubengebäude offen
4. Newtonsches zähes Fluid (Luft ohne Aerosol)
5. Inkompressibles Fluid oder homochore Bewegung
6.  $\kappa$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodell /4, 6/
7. Vorgegebene invariante Wandtemperaturen.

Für das stationäre Problem gilt zusätzlich:

- Partielle Berücksichtigung der Kompressibilität des Fluids /9, 13/
- 2-D-Modell /8, 9, 10, 13, 15/
- Vollkommene Beruhigung des Fluids nach dem Kokillenabsturz.

Für das instationäre Problem:

- Axialsymmetrisches Modell
- Kein stationäres Strömungs- bzw. Temperaturfeld vorhanden.

### 3.3.1 Das stationäre Problem

Als stationäres Problem wurde der Strömungszustand im Bohrloch mit eingelagerten Kokillen sowie in der Strecke in der unmittelbaren Umgebung des Bohrlochmundes untersucht. Dazu wird der Fall einer stationären, zweidimensionalen konvektiven, reibungsbehafteten Bewegung eines inkompressiblen zähen Gases betrachtet /7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15/.

Eine erste Abschätzung ergab, daß die Ergebnisse für einen Längsschnitt durch die Bohrlochachse bei 2-D- und 3-D-Betrachtung nur um ca. 5-10% voneinander abweichen. Wegen der wesentlich kürzeren Rechenzeiten wurde deshalb nur der 2-D-Fall untersucht /7, 9, 13/.

#### Freie Konvektion /9, 11, 12, 13, 14, 19/

Im folgenden wird die Strömung im oberen Bohrlochbereich betrachtet, der von der Oberkante des Kokillenstapels bis zum Bohrlochmund reicht. Sie wird zum einen vom unteren Bereich beeinflusst, der vom Ringspalt zwischen Bohrlochwand und Kokillenstapel gebildet wird und dessen Temperatur- und mittlere Geschwindigkeitsverteilung in Abb. 3.12 dargestellt sind. Diese Verteilungen liefern die wesentlichen Randbedingungen für den oberen Bereich. Weiterhin wird die Strömung im oberen Bohrlochbereich durch die Bewetterung der Einlagerungsstrecken beeinflusst, die die Symmetrie stört. Die Geschwindigkeitsverteilung im oberen Bohrlochbereich ist für den ungestörten Fall in Abb. 3.13 dargestellt. Die dargestellten Eigenströmungsformen gelten sowohl im laminaren als auch im turbulenten Bereich. Für letzteren stellen die Kurven normierte, mittlere Geschwindigkeitsverteilungen dar. Abb. 3.14 zeigt die Übergangsströmungsformen. Tatsächlich ist die Strömung im oberen Bohrlochbereich durch die o.g. Einflüsse gestört. In beiden Bohrlochbereichen ist die Konvektionsströmung jedoch stabil und völlig turbulent /7, 9, 13/.

#### Einfluß der Bewetterung /7, 8, 9, 15, 18/

Die Bewetterung erzeugt im Bohrloch ein alternierendes Wirbelsystem, das ungefähr dem Gesetz der konstanten Wirbelintensität folgt.

Infolge des Energieverlustes ist die Wirkung der Bewetterung nur oben beherrschend. Diese Wirkung sinkt rasch, ungefähr exponentiell, und infolge Zirkulationskonservierung wird die Wirbellänge immer größer (vgl. auch Abb. 3.15 aus der numerischen Berechnung). Die numerischen Rechnungen wurden mit Hilfe des Finite-Elemente-Programmes FIDAP durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 3.15 (Stromlinien), Abb. 3.16 (Temperaturfeld), Abb. 3.17 (Isotachen) und Abb. 3.18 (Geschwindigkeitsvektoren) dargestellt und stimmen im wesentlichen mit

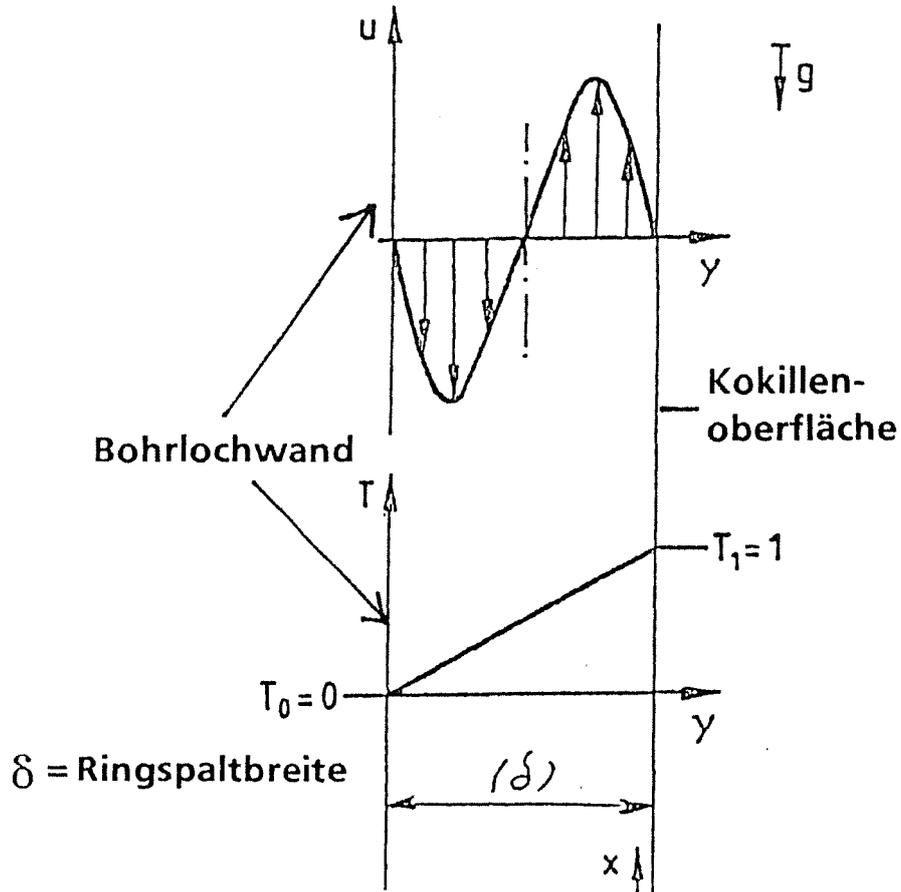


Abb. 3.12: Temperatur- und normiertes mittleres Geschwindigkeitsprofil in einem Spalt nach /13/

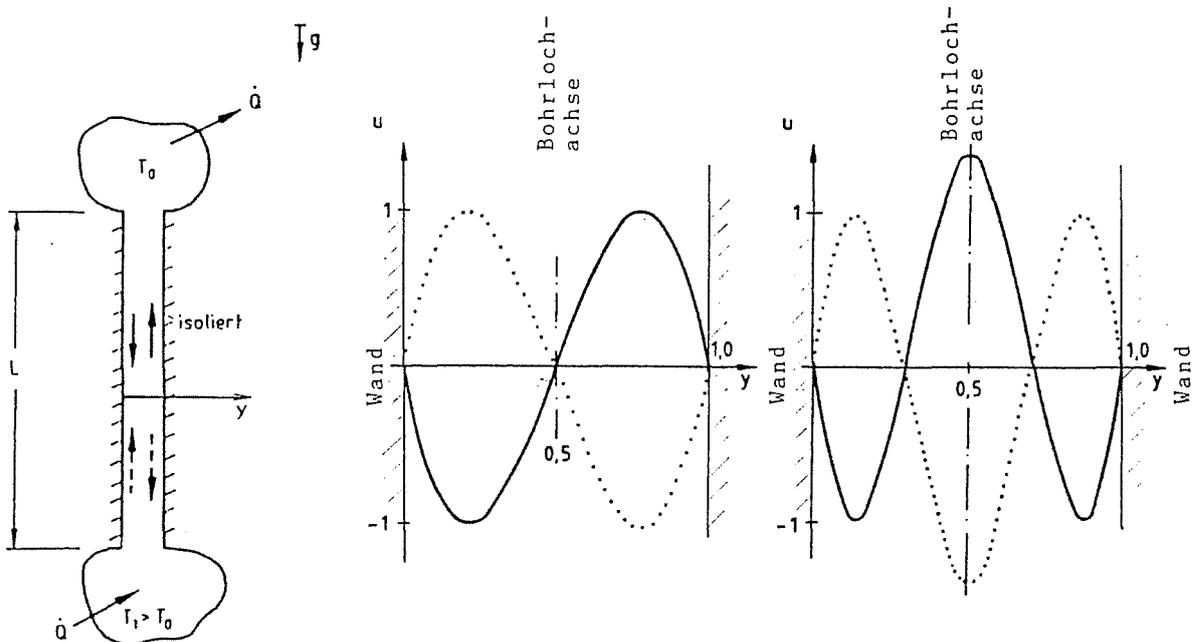


Abb. 3.13: Normierte mittlere Geschwindigkeitsverteilungen für die Eigenströmungsformen in einem senkrechten Kanal zwischen zwei Behältern unterschiedlicher Temperatur nach /13/

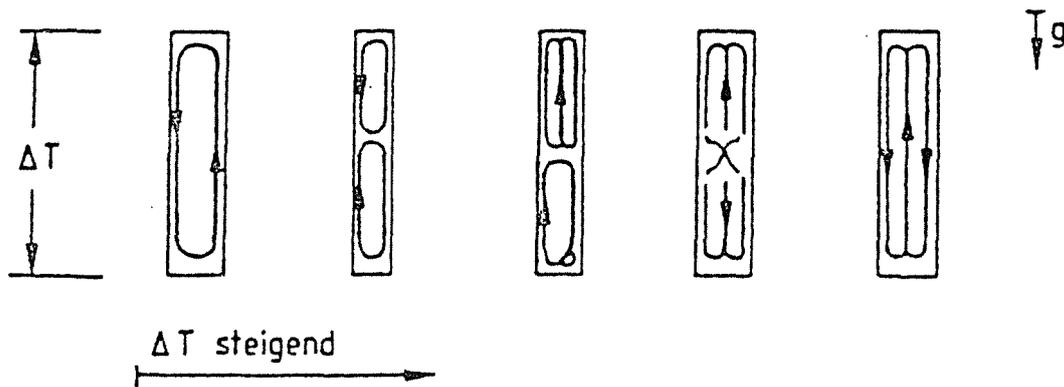


Abb. 3.14: Übergang von der 1. Eigenströmungsform zur nächsthöheren

den analytischen Betrachtungen und den experimentellen Ergebnissen aus der Literatur überein /4, 7, 8, 9, 10, 13, 18/.

Man kann das oben erwähnte Wirbelsystem erkennen, das sowohl Energie- (Impuls-) als auch Massenaustausch zwischen der Einlagerungsstrecke und dem Bohrloch bewirkt.

Die maximalen errechneten Strömungsgeschwindigkeiten in der Luftsäule sind:

- im unteren Bereich (Ringspalt): 0,886 m/s
- im oberen Bereich (Bohrloch über Kokillenstapel):
  - bis ca. 3 Bohrlochdurchmesser ab Bohrlochmund: 0,13 m/s
  - im Mittelbereich: 0,015 m/s
  - bis ca. 3 Bohrlochdurchmesser über Kokillenstapel: 0,35 m/s.

Eine Untersuchung des Luftpartikelpfades (Abb. 3.19) zeigt, daß die Wanderzeit von unten nach oben bei ungefähr 28 Min. liegt.

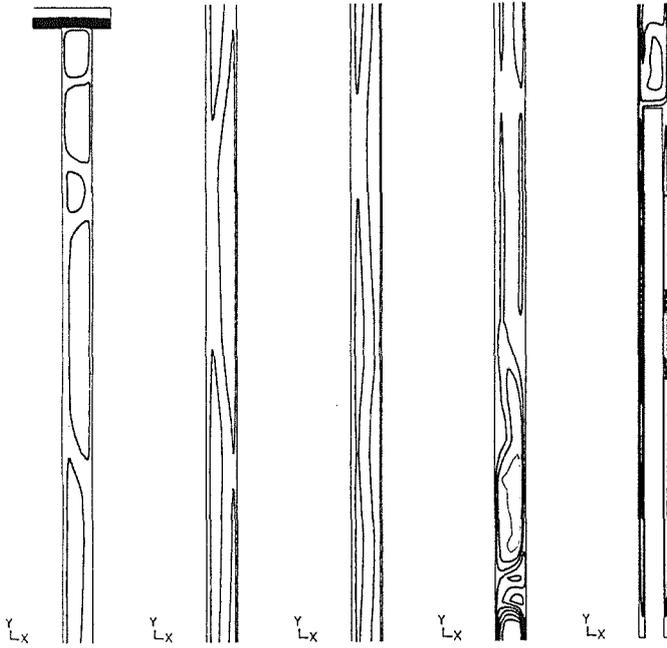


Abb. 3.15: Abschnittsweise Darstellung der Stromlinien im Bohrloch

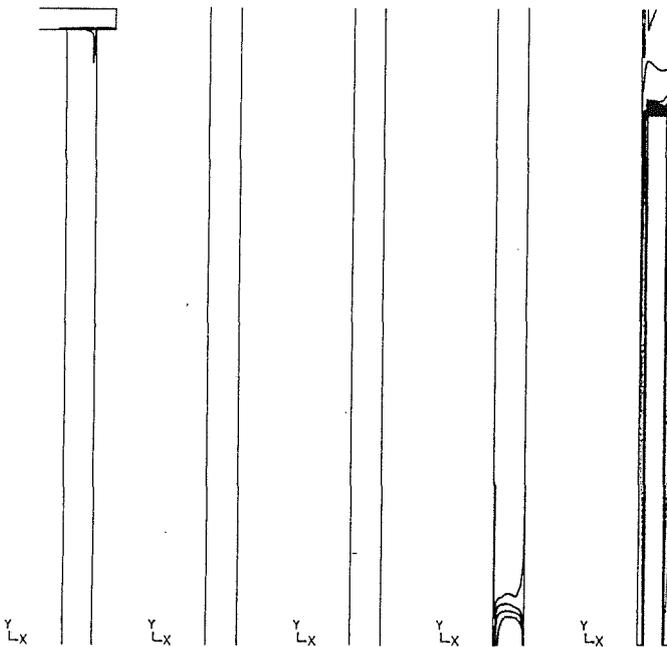


Abb. 3.16: Abschnittsweise Darstellung der Isolinien der Temperaturen im Bohrloch

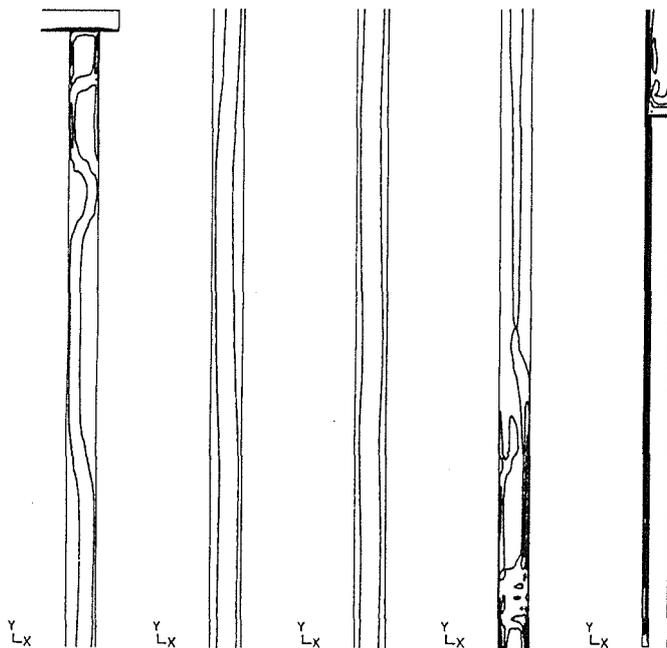


Abb. 3.17: Abschnittsweise Darstellung der Isolinien der Geschwindigkeiten im Bohrloch

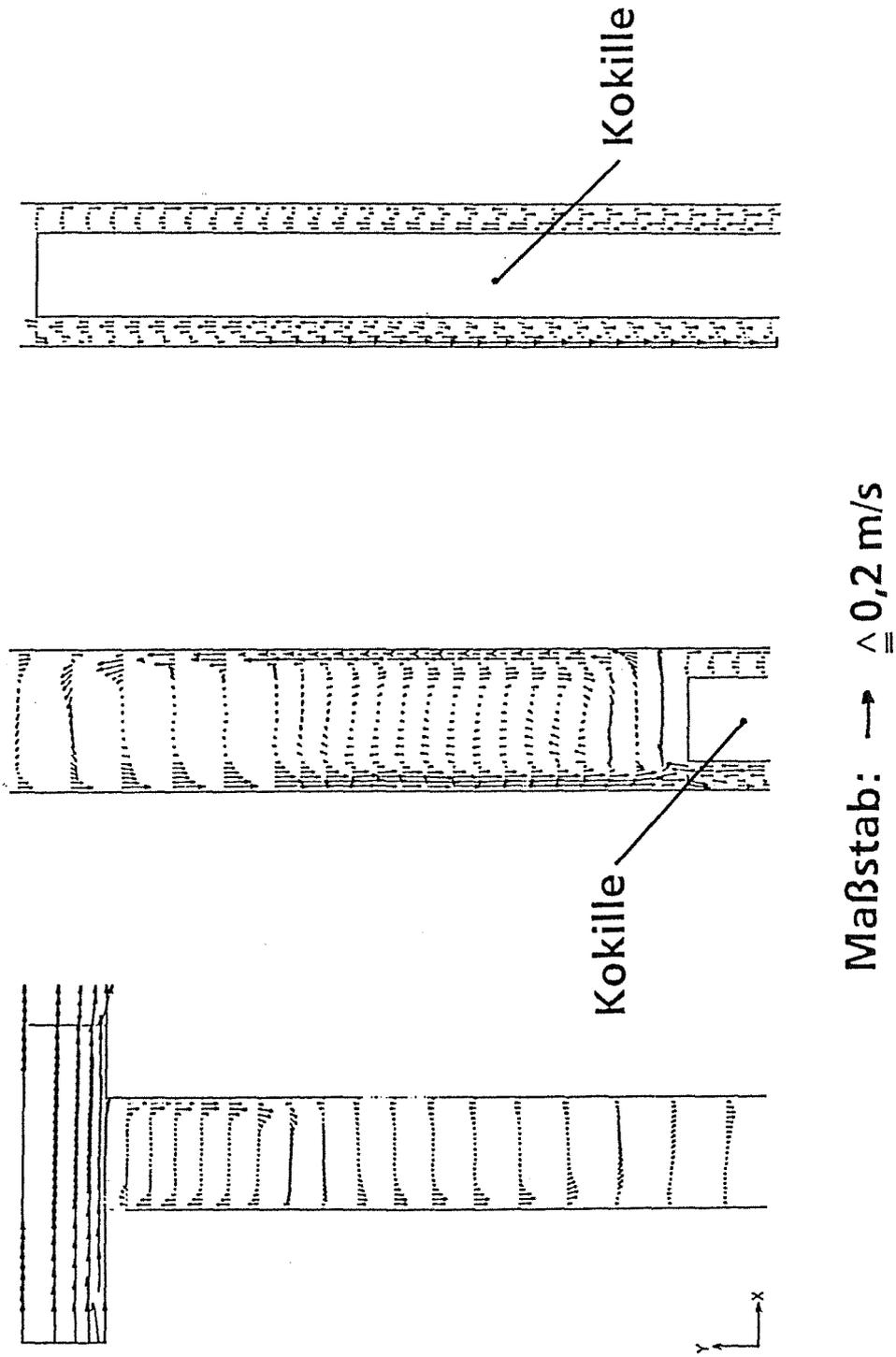
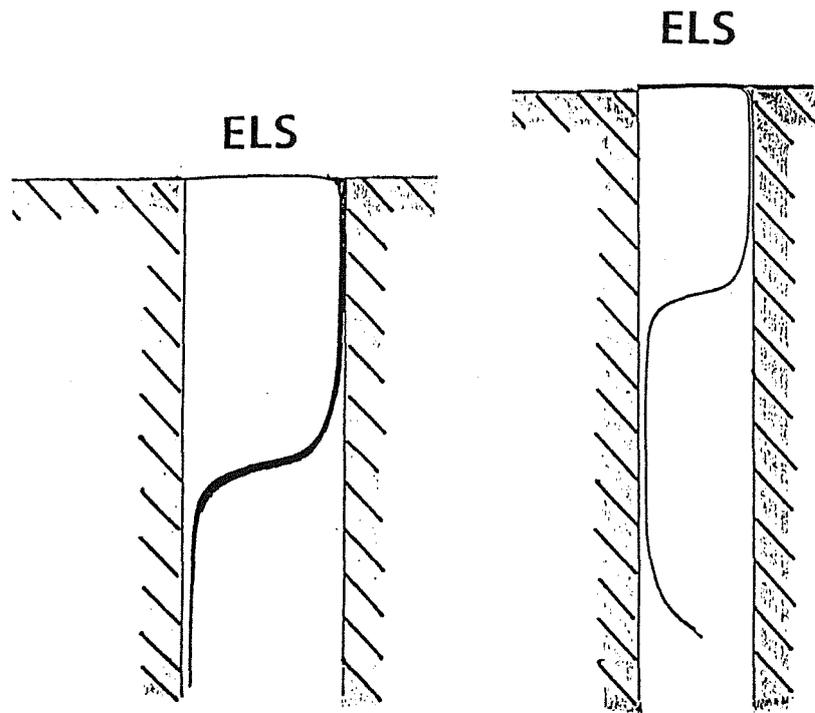


Abb. 3.18: Abschnittsweise Darstellung der Geschwindigkeitsvektoren



**ELS = Einlagerungsstrecke**

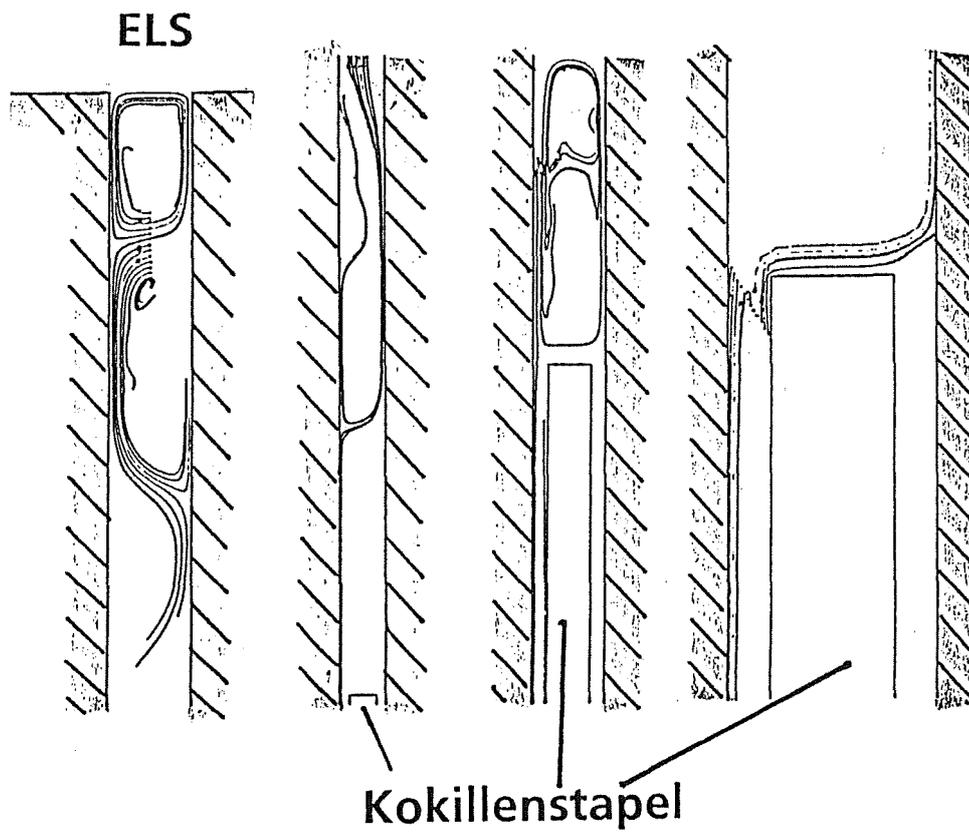


Abb. 3.19: Abschnittsweise Darstellung einiger Partikelpfade

### 3.3.2 Das instationäre Problem

Hier wird nur der Kokillenfall untersucht, ohne das stationäre Problem zu berücksichtigen, da die mittleren Geschwindigkeiten etwa 100-mal größer als im stationären Fall sind.

#### Kokillenabsturz

Die Geometrie, die Abmessungen und das mechanische Modell des Falles sind in Abb. 3.20 dargestellt.

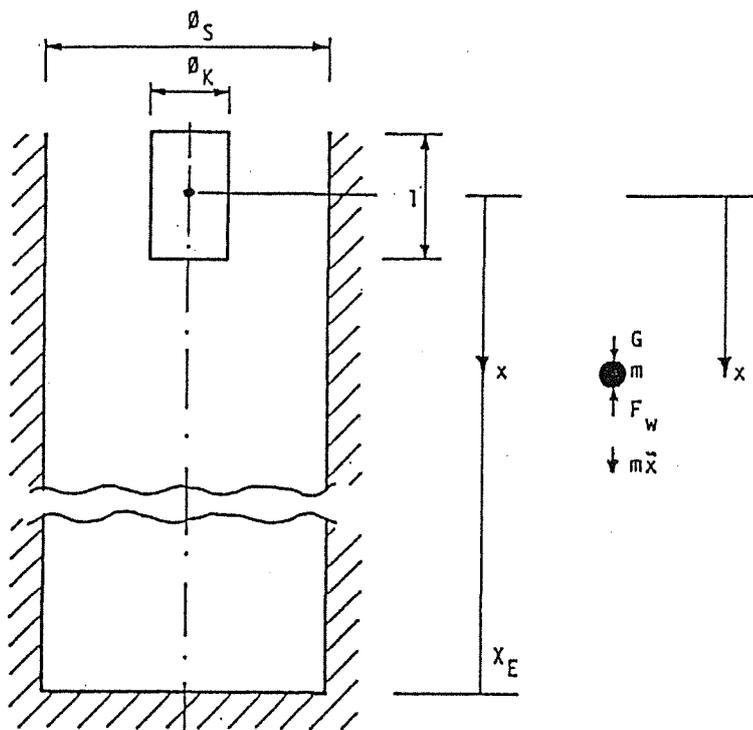


Abb. 3.20: Mathematisches Modell des Fallvorganges

Als erster Schritt wurde das Problem des Falles in ein unendlich tiefes Bohrloch unter Berücksichtigung des Luftwiderstandes untersucht. Die Abbildungen 3.21-3.23 stellen grafisch die allgemeinen (dimensionsfreien) Bewegungsgesetze dar. Hier ist  $U_s$  die Schweb- oder Sinkgeschwindigkeit, also die maximal von der Kokille erreichbare Geschwindigkeit, die zu ca. 178 m/s errechnet wurde.

Wie in Kap. 3.1.1 dargelegt, beträgt die Mindestabsturzhöhe, die zur Zerstörung einer Kokille erforderlich ist, 33 Meter. Da eine längere Strecke zum Bohrlochmund für den Aerosoltransport eher hinderlich ist (siehe Kap. 3.3.3), wird im folgenden konservativ die Absturzhöhe zu 33 Metern angenommen.

Im Aufprallzeitpunkt ( $gt/U_s = 0,1335$ ) ergibt sich ein Geschwindigkeitsverhältnis  $U/U_s = 0,1414$ . Dimensionsbehaftet heißt das, daß bei einer Tiefe von 33 Metern zum Zeitpunkt  $t = 2,426$  Sekunden die fallende Kokille eine Geschwindigkeit von 25,2 m/s erreicht.

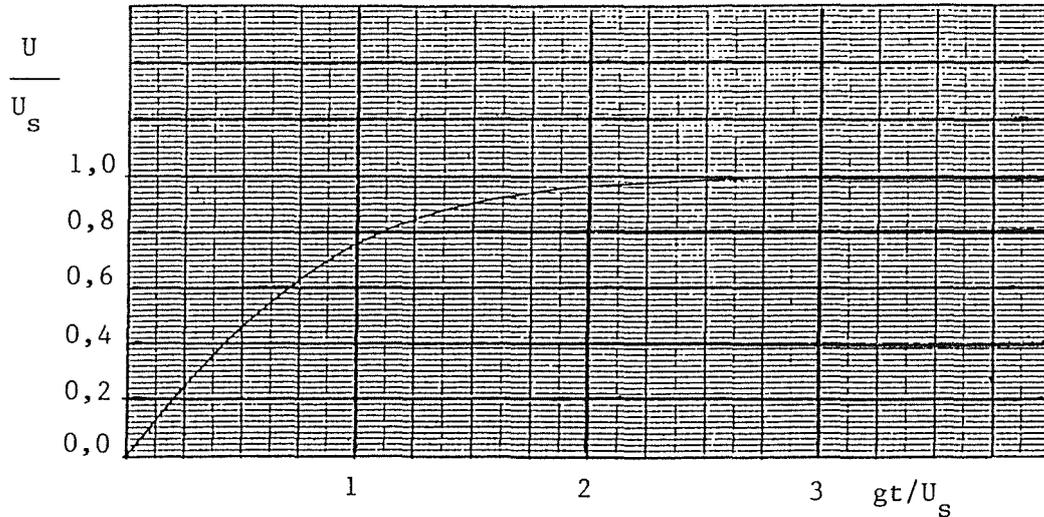


Abb. 3.21: Dimensionsloses Geschwindigkeitsgesetz

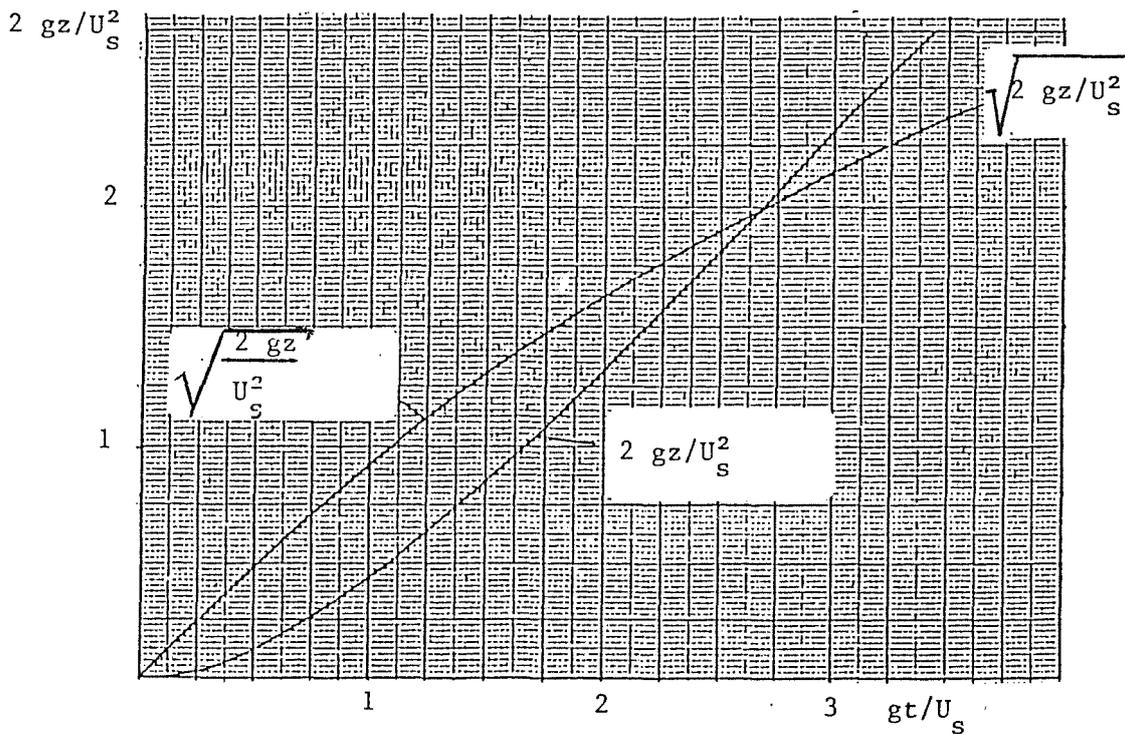


Abb. 3.22: Dimensionsloses Bewegungsgesetz

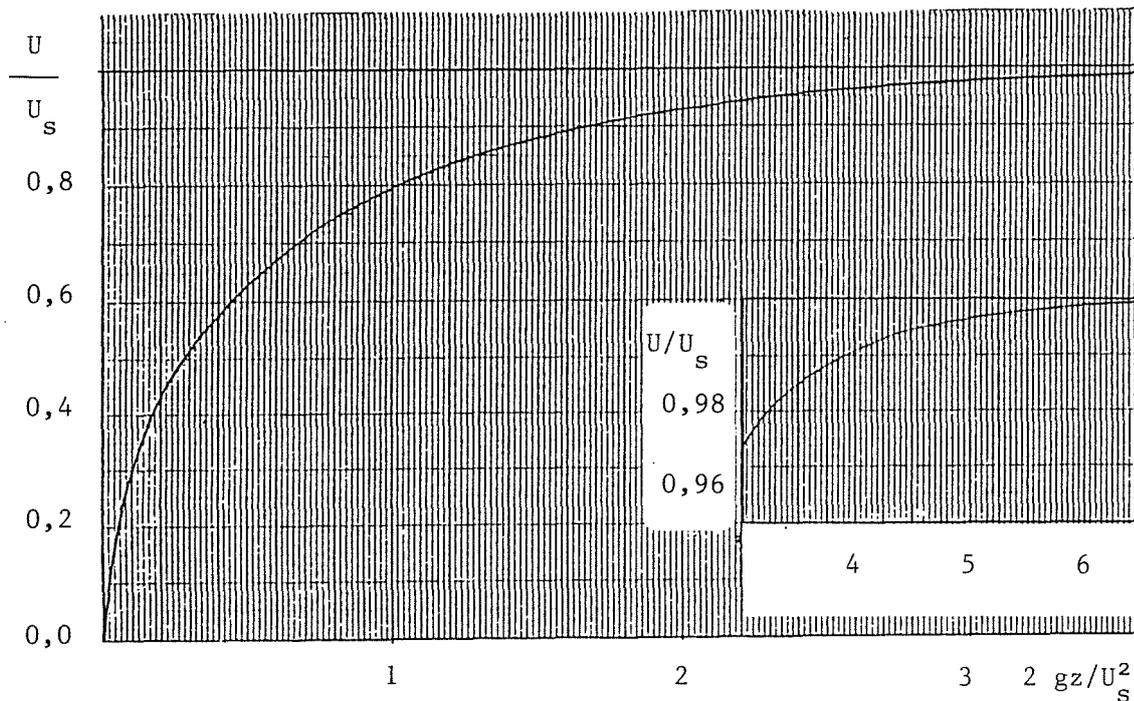


Abb. 3.23: Dimensionslose Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der dimensionslosen Tiefe

Nachlaufströmung /4, 6, 8, 9, 15, 16, 17, 18/

Während des Falles bildet sich hinter der Kokille eine Nachlaufströmung, die völlig verwirbelt, dreidimensional, instationär und reibungsbehaftet ist und sich sehr schwer mathematisch modellieren läßt. Die mathematischen Untersuchungen folgen sehr komplizierten statistischen Modellen, die allerdings nur eine approximative Lösung anbieten /4, 6, 9/.

Zwischen der sogenannten Hauptströmung (die den fallenden Behälter umströmt) und der sekundären Strömung (Nachlaufströmung) gibt es Massen- und Energieaustausch. Die Länge der Nachlaufschleppe wächst mit der Reynolds-Zahl und bestimmt - im Aufprallzeitpunkt - die Massenaustauschlänge oben ↔ unten /4, 7, 8, 9, 15, 16, 17 18/. Der unter dem fallenden Behälter wachsende Überdruck erzeugt im Aufprallzeitpunkt einen Luftstrahl und einen wandernden Wirbel, die beide über eine maximale Luftgeschwindigkeit in derselben Größenordnung wie die Behälteraufprallgeschwindigkeit verfügen /7, 9/.

Für den Absturz der Kokille wurde ebenfalls eine Finite-Elemente-Untersuchung durchgeführt /6/. Zunächst wurde das Geschwindigkeitsfeld für laminare Strömung bestimmt (Abb. 3.24). Mit diesem als Startbedingung wurde die turbulente Strömung mit sehr kleiner Zeitschrittweite bis ca. zwei Sekunden nach dem Aufprall der Kokille gerechnet (Abb. 3.25-3.26).

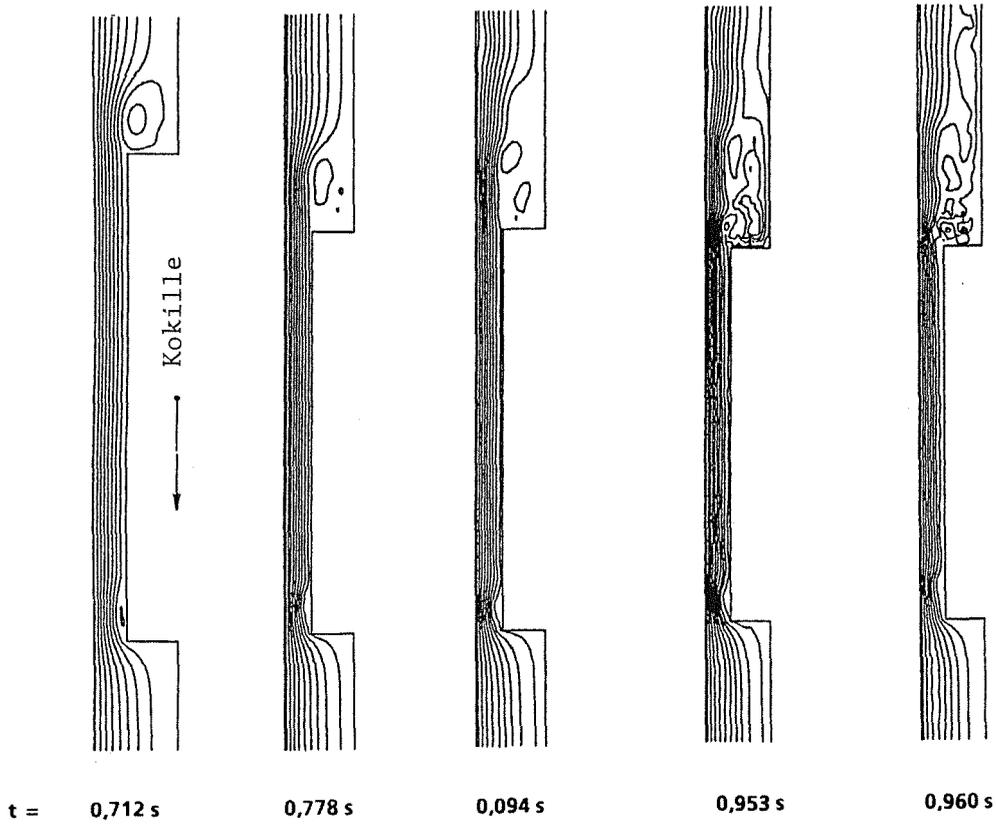


Abb. 3.24: Stromlinien zu verschiedenen Zeitpunkten des Fallvorganges aus der laminaren Berechnung

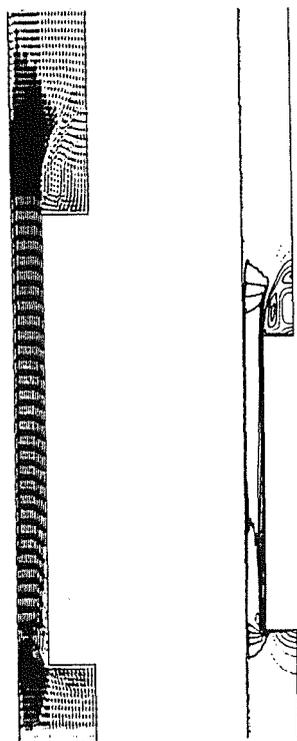


Abb. 3.25: Isolinien der Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsvektoren aus der turbulenten Berechnung zum Zeitpunkt 0,446 s nach Beginn des Fallvorganges

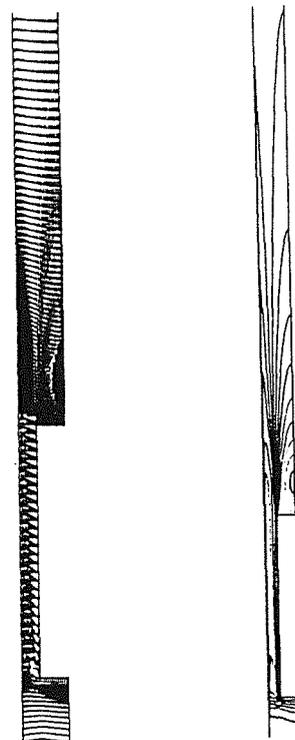


Abb. 3.26: Isolinien der Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsvektoren aus der turbulenten Berechnung zum Zeitpunkt 2,21 s nach Beginn des Fallvorganges

### 3.3.3 Aerosoltransport /7, 8, 9, 14, 15, 16, 17, 18/

Gemäß den strukturmechanischen Berechnungen (s. Kap. 3.1 und 3.2) ist die ermittelte spezifische Bewegungsenergie beim Kokillenabsturz gleich 2,73 Nm/g. Diese für den Absturz einer Kokille in ca. 300 m Tiefe ermittelte Belastungsenergie wird konservativ für den hinsichtlich der Strömungsverhältnisse und Aerosolaustrag aus dem Bohrloch ungünstigeren Abstand von 33 m zwischen Bohrlochmund und oberster Kokille zugrundegelegt.

Gemäß Kap. 3.2.5 ergeben sich die Feinanteile in Massenprozent des  $UO_2$  zu:

- 26% bis zu 300  $\mu\text{m}$ ,
- 13% bis zu 100  $\mu\text{m}$ ,
- 5% bis zu 10  $\mu\text{m}$ .

Diese Partikel können prinzipiell nach oben transportiert werden, falls ihre Sinkgeschwindigkeit kleiner als die Luftpartikel-Wandergeschwindigkeit ist (siehe Kap. 3.3.1). Andernfalls sedimentieren die Partikel im Bohrloch /7, 8, 9, 14, 15, 16, 17, 18/.

Da im Bohrloch sowohl im stationären als auch im instationären Fall nur turbulente Luftbewegungen vorliegen, wurden die Sinkgeschwindigkeiten der unterschiedlich großen Aerosolpartikel für diesen Fall ermittelt:

|                     |           |
|---------------------|-----------|
| 300 $\mu\text{m}$ : | 8,69 m/s  |
| 100 $\mu\text{m}$ : | 5,02 m/s  |
| 10 $\mu\text{m}$ :  | 1,59 m/s. |

Da im stationären Fall die Luftgeschwindigkeiten geringer sind, ist nur im instationären Fall mit Aerosoltransport nach oben zu rechnen. Die Transportlänge wurde mit drei verschiedenen Methoden errechnet /6, 7, 16/ und mit anderen experimentellen und theoretischen Ergebnissen verglichen /8, 9, 18/. Sie beträgt 25-35 Bohrllochdurchmesser.

## 4. Ergebnisse

Der Vergleich des Quellterms bei rotationssymmetrischer Lagerung mit dem bei realitätsgerechter Lagerung zeigte, daß die realitätsgerechte Lagerung ungünstiger ist. Die Nachgiebigkeit der POLLUX-Kokillen ist dabei zwar größer, d.h. die ankommende Kokille fällt weicher, andererseits sind jedoch die Dehnungen wegen der mehr lokalen Belastung der Kokillen höher. Dies führt zum Versagen von wesentlich mehr Kokillen. Die wesentlich größere Beschleunigung ergibt trotz

längerer Stoßdauer den größeren gewichtsspezifischen Energieeintrag in die Brennstababschnitte.

Die bei dieser Stapelkonfiguration beschränkte Stapelhöhe von maximal 38 Kokillen - vorausgesetzt, es wird für diesen „betrieblichen“ Fall die für Störfälle zulässige Grenze von 2% linearisierter Dehnung zugelassen - führt zu Auswirkungen auf die Einlagerungstechnik. Möglichkeiten der Gebindestapelung mit Lastabtrag, wie etwa die „schwimmende Lagerung“ wurden in /3/ aufgezeigt.

Die durchgeführten Analysen sowie die Ergebnisse der numerischen Berechnungen zeigen deutlich, daß im gesamten Bohrloch sowohl im stationären als auch im instationären Fall nur turbulente Strömungen vorliegen. Für den Aerosoltransport nach oben wird die Diskussion auf den Bereich des Bohrlochs oberhalb des Kokillenstapels konzentriert unter Berücksichtigung sämtlicher Einflüsse von Bewetterung und unterem Bereich (Ringspalt um Kokillenstapel) auf die erzeugten Luftbewegungen.

### ***Einfluß und Diskussion der Randbedingungen***

Man muß deutlich betonen, daß die vorliegenden Ergebnisse in Verbindung mit den entsprechenden Randbedingungen zu sehen sind. Die berücksichtigten Randbedingungen wurden wie folgt angenommen:

#### **Geometrische Randbedingungen**

- Bohrlochform: senkrechter Kreiszylinder
- Bohrlochdurchmesser: 0,7 m
- Bohrlochlänge: 300 m
- Kokillenstapelform: rotationssymmetrisch
- Position des Stapels: konzentrisch im Bohrloch
- Stapeldurchmesser: 0,43 m
- Stapelhöhe: 267,0 m
- Bohrloch zur Einlagerungsstrecke offen.

#### **Energetische Randbedingungen**

- Temperaturverteilung der Stapel- bzw. Bohrlochwand gemäß Abb. 3.10 und 3.11
- Randflächen der Einlagerungsstrecke adiabat
- Druck in der Einlagerungsstrecke 1 bar, Temperatur 30°C.

#### **Kinematische Randbedingungen**

- uniforme Geschwindigkeitsverteilung mit dem Wert 0,2 m/s im Bewetterungsstrom der Einlagerungsstrecke.

### Materielle Randbedingungen

- Fluid: zähe Luft mit entsprechenden temperaturabhängigen Eigenschaften gemäß /11, 14/
- physikalische Eigenschaften der Aerosole, z.B. Dichte, Größenverteilung.

Veränderungen dieser Randbedingungen können zu gänzlich anderen Ergebnissen führen. So ist z.B. die Spaltbreite zwischen der Bohrloch- und der Stapelwand von hohem Einfluß. Im stationären Fall wachsen die Rayleighzahlen und damit erhöhen sich auch die maximalen Luftgeschwindigkeiten im Spalt mit der Spaltbreite, und zwar mit der 3. Potenz. Im instationären Fall dagegen sinkt die maximale Luftgeschwindigkeit mit wachsender Spaltbreite. Daneben geht die Spaltbreite auch in die Endgeschwindigkeit der fallenden Kokille ein.

Die Bewetterung beeinflusst auch die Strömung im Bohrloch. Ohne Bewetterung (△ geschlossenem Bohrloch) ist die Sicherheitsschichtdicke größer und die Wahrscheinlichkeit, daß Aerosole in die Einlagerungsstrecke transportiert werden, verschwindet praktisch. Der Einfluß des Korngrößenspektrums ist ebenfalls wichtig, da ein enger Zusammenhang zwischen der Korngröße, seiner Dichte und dem Geschwindigkeitsfeld im Bohrloch besteht. Ist die Dichte für eine bestimmte Substanz, z.B. Brennstoff, bekannt und konstant, dann kann man für jeden Betrag der Geschwindigkeit eine maximale Korngröße errechnen, die aufwärts transportiert werden kann. Somit läßt sich das Geschwindigkeitsfeld im Bohrloch auch als Korngrößensfeld darstellen.

Die Menge an transportierten Aerosolen wird im instationären Fall wegen der höheren Beträge der Geschwindigkeiten wesentlich stärker durch Veränderungen in Korngröße und -dichte beeinflusst als im stationären Fall. Insbesondere können bei Einwirkung der entsprechenden gewichtsspezifischen Energie Partikel  $< 10 \mu\text{m}$  aus dem Bohrloch heraustransportiert werden.

Beim Einfluß der Absturztiefe auf den Aerosoltransport sind zwei gegenläufige Tendenzen festzustellen. Einerseits bedeutet eine geringere Stapelhöhe auch eine geringere Wahrscheinlichkeit, daß Aerosole nach oben gelangen. Andererseits werden die Nachlaufströmungslänge mit der Reynolds-Zahl und die Wirbelanfangsgeschwindigkeit mit der Teufe größer, d.h. die Wahrscheinlichkeit des Aerosolaustrages steigt, wobei jedoch der den Aerosoltransport behindernde Effekt im allgemeinen überwiegt.

### Abschlußbemerkung

Die teilweise im Hinblick auf den Aerosolaustrag gegenläufigen Einflüsse lassen nur schwer eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Einlagerungsverhältnisse zu. Sie müssen fallweise überprüft werden. Andererseits eröffnen sie die Möglichkeit, die jeweiligen Einlagerungsvarianten unter Quelltermgesichtspunkten abhängig von z.B. Teufe oder Bohrlochdurchmesser zu optimieren.

## Literatur

- /1/ ADINA R&D ADINA - A Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis. Version: 5.6
- /2/ \*\*\* Technischer Anhang 8 der Systemstudie AET. „Untersuchungsprogramm zum Verhalten abgebrannter Brennelemente bei starken mechanischen Einwirkungen“
- /3/ H. Brücher et.al. „Auf dem Weg zur Direkten Endlagerung von HTR-Brennelementen“, Jahresbericht 1988/1989 der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
- /4/ F. Durst u.a. Turbulenz, Kurzlehrgang, Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Erlangen-Nürnberg, Oktober 1990
- /5/ E. Korthaus  
P. Donath Investigations on temperature rise and relative disposal area requirements for LWR-waste disposal strategies in salt domes. IAEA-SM-243/15 "Underground disposal of radio-active wastes", Vol II, IAEA, Vienna, 1980
- /6/ \*\*\* FIDAP-Handbook, Revision 4.0, Fluid Dynamics International Inc., Evanston, Sept. 1987
- /7/ M. Lavrentiev  
et. B. Chabat Effects hydrodynamiques et Modèles Mathématiques, Editions MIR, Moscou, 1980
- /8/ Bruno Eck Technische Strömungslehre, 8. Auflage, Bd. 1, 2, Springer Verlag Berlin, 1978
- /9/ L. Prandtl u.a. Führung durch die Strömungslehre, Braunschweig, 1990
- /10/ Rob. A. Granger Fluid Mechanics, CBS College Publishing, New York, 1985
- /11/ Friedrich Hell Grundlagen der Wärmeübertragung, 3. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1982
- /12/ \*\*\* VDI-Wärmeatlas, VDI-Verlag, Düsseldorf
- /13/ J. Unger Konvektionsströmungen, B. G. Teubner, Stuttgart, 1988
- /14/ Horst Czichos „Hütte“ Grundlagen der Ingenieurwissenschaften, 29. Auflage, Springer-Verlag Berlin, 1989
- /15/ E. Truckenbrodt Fluidmechanik, Bd. 2, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin, 1980
- /16/ G. Bollrich u.a. Technische Hydromechanik Bd. 2, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1989
- /17/ G. Naue u.a. Technische Strömungsmechanik, 4. Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1988
- /18/ I. E. Ideljčik Handbuch der hydraulischen Widerstände (Übersetzung aus dem Russischen, 1975), Technik-Verlag, Bukarest, 1984
- /19/ \*\*\* Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Stoffe auf Straßen (Gefahrgutverordnung Straße - GGVS), BGBl. I, S. 2454-2463 (1990), in der Fassung der 3. Verordnung zur Änderung der Gefahrgutverordnung Straße (3. Straßengefahrgutänderungsverordnung) vom 18. Juni 1990 (BGBl. I, S. 1326-1328)

Frau M. Dorne danken wir für die sorgfältige Abfassung des Manuskripts.