

**Wasserzutritt durch Einlagerungsmaßnahmen,
Transport in die Biosphäre**

von **H.-H. Jürgens, 1980***)

Auszug aus dem Öko-Bericht Nr. 9
vom Februar 1980, (dort ab Seite 113) :

**PROBLEME UND RISIKEN
DER ENDLAGERUNG
RADIOAKTIVER ABFÄLLE
oder
Entsorgung heute ---
die Sorgen morgen**

****)**

anlässlich der derzeit anstehenden Entscheidungen
zur Schließung der durch Ersaufen gefährdeten
Atommülldeponie Salzbergwerk Asse II

-- Es kann schon lange niemand mehr sagen,
er/sie hätte es nicht gewusst --

*) 1980: Dipl.-Ing. an der TU Braunschweig
Anschrift des Verfassers (Februar 2008):
Dr.-Ing. Hans-Helge Jürgens
Vor der Warf 32
26725 Emden

***) Herausgeber: Öko-Institut für angewandte Ökologie e.V.
Schönauer Straße 3
Freiburg im Breisgau
Arbeitsstelle Hannover
Immengarten 31
Hannover, im Februar 1980

WASSERZUTRITT DURCH EINLAGERUNGSMASSNAHMEN; TRANSPORTMÖGLICHKEITEN IN DIE BIOSPHÄRE

von H.-H. Jürgens, 1980

	Seite
1. Wechselwirkung zwischen Grundwasser und Salzlagerstätte	1
2. Löslichkeit von Salzgesteinen	2
3. Radioaktive Abfälle im Endlager und Auslaugverhalten	3
3.1 Radioaktive Abfälle im Endlager	3
3.2 Auslaugverhalten	4
4. Wasserzutritt und Ausbreitung von Radionukliden im Grubengebäude	5
4.1 Möglichkeiten des Zutrittes von Lösungen	5
4.2 Strömungsursachen und Ausbreitung von Radioaktivität im Grubengebäude	9
5. Transport radioaktiver Substanzen außerhalb der Salzlagerstätte	17
6. Zusammenfassung	20
7. Literatur	21

1. Wechselwirkung zwischen Grundwasser und Salzlagerstätte

Ohne auf die Entstehungsgeschichte von Salzdiapirismus näher einzugehen, kann man sagen, daß Salzstöcke in einem scheinbaren chemisch-physikalischen Gleichgewicht zu ihren Umgebungsgesteinen stehen, die aufgrund ihrer Porosität allgemein als mehr oder weniger wasserspeichernd bzw. wasserleitend zu bezeichnen sind.

Wieweit sich die Lösungsfähigkeit des Grundwassers auf den Bestand eines Salzstockes auswirkt, hängt davon ab, ob ein großflächiger und großvolumiger Austausch salzgesättigter mit ungesättigten Grundwässern im hydrologischen System eines zu betrachtenden Salzstockes möglich ist. Die Existenz des überwiegend horizontalen sogenannten Salzspiegels als Grenze zwischen dem wasserführenden Gipsstut und dem darunterliegenden massiven Salzgestein ist ein Beweis für die Unbeständigkeit des Salzstockes gegenüber dem lösungsfähigen Grundwasser. Als Ursache für derartige Auflösungs Vorgänge ist die Diffusion (selbstständige Durchmischung von Stoffen) in stagnierendem und strömendem Grundwasser (Konvektion) zu nennen und als bremsende Kraft ist u.a. die Schwerkraft anzusehen, die sich auf die Dichtedifferenz zwischen dem schwereren Salzwasser und dem leichteren Süßwasser auswirkt.

Durch den bergbaulichen Eingriff des Menschen kann das oben genannte natürliche Momentangleichgewicht der Salzlagerstätte mit ihrer Umgebung empfindlich gestört werden, wenn hydraulische Verbindungen zwischen dem Salzspiegel und selbst vergleichsweise tiefliegenden Grubenräumen entstehen. Denn auch innerhalb der Salzstöcke gibt es Gesteinsschichten (Anhydritgesteine und Tone), die blättrig und klüftig sind und auf Fugen Wasser beispielsweise aus dem Bereich des Salzspiegels bis tief in das Salzmassiv hineinführen können, vgl. HATZFELD, HIRSCH, KOLLERT, 1979, S.154/155: MAUTHE / DWK.

In der Geschichte des deutschen Kali- und Steinsalzbergbaues sind zahlreiche Schachtanlagen wegen zusitzenden Wassers ertrunken (vgl. SPACKELER, 1950, S.352), das im Salz viel gefährlicher ist als in anderen Gesteinen,

weil es seine Zulaufwege kontinuierlich vergrößert. Nach GIMM, 1968, S. 431, beträgt die Summe der erbohrten Schächte 88 von 255 in Deutschland geteufte Schächten. Als jüngstes Beispiel sei das Ersaufen der Schachanlage Ronnenberg bei Hannover im Jahre 1975 nicht vergessen, vgl. GSF, 1976, S. 46.

2. Löslichkeit von Salzgesteinen

Aus ihrer Entstehungsgeschichte ableitbar, sind Salzgesteine die wasserlöslichsten Bestandteile der Erdkruste überhaupt. Während ein Kubikmeter Süßwasser immerhin in der Lage ist, etwa $0,14 \text{ m}^3$ Steinsalz (NaCl) bis zur Sättigungskonzentration in sich aufzulösen, gibt es auch Salzgesteinsarten, die weit empfindlicher beim Kontakt mit Wasser reagieren. Dazu zählt das Carnallitflöz Staßfurt, das in der Salzfolge die für die Endlagerung gesuchten massiven Partien des jüngeren Steinsalzes Na 3 der Leine-Serie vom älteren Steinsalz Na 2 der Staßfurt-Serie trennt.

Nach GIMM, 1968, weist das Carnallitflöz Staßfurt im mitteldeutschen Kalirevier im Durchschnitt folgende Zusammensetzung auf:

55%	Carnallit
26%	Steinsalz
17%	Kieserit
2%	Anhydrit und Tonbestandteile.

Carnallit, mit der chemischen Formel $\text{K Cl} \cdot \text{Mg Cl} \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$, ist wegen seines großen Kristallwassergehaltes der wasserlöslichste und mechanisch besonders mobile Bestandteil dieses Flözes, das in aufgefalteten Salzsätteln und Salzstöcken in Mächtigkeiten bis zu mehreren Zehnermetern vorkommt.

Bei einer Umgebungstemperatur von 25°C ist ein Kubikmeter Wasser in der Lage, etwa $1,70 \text{ m}^3$ Carnallit zu zersetzen, wobei rund $0,95 \text{ m}^3$ Festgestein in Lösung gehen und $0,75 \text{ m}^3$ als mürbe Rückstandsmasse verbleibt, die kein tragfähiges Gestein mehr darstellt. Trifft statt Süßwasser gesättigte Na Cl-Lauge auf Carnallit, so werden immerhin noch $1,46 \text{ m}^3$ Festgestein zersetzt, wobei $0,81 \text{ m}^3$ gesättigte Mg Cl_2 -Lauge entsteht.

Die bergmännische Erstellung von zwangsläufig wasseraufnahmefähigen Hohlräumen im Salz birgt grundsätzlich die Gefahr in sich, daß zusätzliche Hohlräume gleicher Größenordnung durch Auflösungsvorgänge in besonders leichtlöslichen Salzgesteinen entstehen können. Der Aufschluß von Carnallit in einem aufzufahrenden Erkundungsstreckennetz eines Endlagerbergwerkes dürfte nicht gänzlich zu vermeiden sein, vgl. MAUTHE, 1979, S.28.

Als Beispiele dafür, daß großräumige Auflösungen im Carnallit langfristig nicht verhindert werden können, sind die Erdfälle über den ersoffenen Schachtanlagen Vienenburg (HOFRICHTER, 1973) und Teutonia bei Schreyahn / Lüchow (HOFFMANN, 1972) zu nennen.

3. Radioaktive Abfälle im Endlager und Auslaugungsverhalten

3.1 Radioaktive Abfälle im Endlager

Entsprechend dem Bericht der DWK, 1977, sollen die radioaktiven Abfälle in jedem Fall in verfestigter Form und von unterschiedlichen Behältern umschlossen, im Endlager deponiert werden.

Als Verfestigungsmittel dienen bei schwachaktivem Abfall Zement und Bitumen, bei mittelaktivem Abfall zusätzlich PVC, bei hochaktivem Abfall Zement und Glas (Borosilikatglas).

Als Behälter kommen in Frage:

- 200-l-Stahlblechfässer, in Verbindung mit diesen u.U. Plastiksäcke und 400-l-Stahlblechfässer für schwach- und mittelaktiven Abfall.
- Abschirmbehälter, die 2-m³-Stahlcontainer mit hochaktivem Abfall umhüllen
- Stahlkokillen, die 70-l-Glasblöcke mit hochaktivem Abfall umschließen.

Im Versuchsendlager Salzbergwerk Asse II ist im großtechnischen Maßstab lediglich ein Teil der genannten Abfallkonditionierungsformen angewendet worden, so daß nicht ohne weiteres die chemische und physikalische Stabilität der angestrebten Abfallbehälter vorausgesetzt werden kann.

Auch die von der DWK und PTB propagierten Einlagerungs-

techniken sind noch nicht alle erprobt, beispielsweise die Kranbahn-Stapelkammer-Technik. Insbesondere ist zu befürchten, daß auch nach dem angestrebten Verfüllen der Zwischenräume zwischen den Abfallbehältern bis zu den Firsten der Einlagerungskammern mehr als 25 % Porenraum, bezogen auf das eingelagerte Abfallvolumen erhalten bleiben. Rechnet man die Versorgungsstrecken, die nach Meinung der DWK (DWK, 1977, S.248) nicht verfüllt zu werden brauchen, hinzu, so vergrößert sich der durch die Einlagerungsmaßnahme im Salzstock entstehende Hohlraum auf mehr als 45 % des Abfallvolumens.

3.2 Auslaugverhalten

"Rollreifenfässer bieten gegenüber der Auslaugung nur so lange einen Schutz, wie sie nicht durch Korrosion zerstört werden. Dahingehende Erfahrungen lassen erwarten, daß bei Verwendung der bisher üblichen Blechstärken ($\approx 1,5$ mm) schon weniger als in einem halben Jahr die Zerstörung von in Salzlösung lagernden Fässern beginnt. ..Für die drei genannten Methoden der Verfestigung flüssiger Abfälle stellt die sogenannte Auslaugrate ein Maß für die Widerstandsfähigkeit der Verpackung gegenüber einem Lösungsmittel dar. Bei Kontakt mit Wasser liegen die Auslaugraten nach KÖRNER, W., DAGEN, A., 1971, bei

in der Größenordnung von

Zementierung	10^{-2}	g/cm ² d
Bituminierung	10^{-4}	g/cm ² d
Einschmelzen in Glas	10^{-6}	g/cm ² d

Es ist jedoch möglich, daß sich die Auslaugraten bei einem Kontakt der Abfälle mit Salzlauge ändern...."

(aus: H. FRANKE, 1972)

"Grundsätzlich kann festgestellt werden, daß die Kontamination der Lösungen mit steigender Abfallmenge, mit größer werdender spezifischer Aktivität der Abfälle, mit wachsendem Anteil langlebiger Spaltprodukte und mit der Unbeständigkeit der Verpackung zunimmt."

Um dagegen der Verpackung radioaktiver Abfälle quantitativ angebbare Barrierefunktionen zuschreiben zu können, müßten Versuche unter realistischen Bedingungen durchgeführt werden, beispielsweise im Hinblick auf die Porosität des umgebenden Gesteins (Füllmaterials), die unterschiedliche chemische Beschaffenheit von Lösungen, den Einfluß der Radioaktivität auf die Verpackung und das Umgebungsmedium, die Auslaugung der radioaktiven Abfälle unter Strömungsbedingungen und bei Stagnation und weitere

zu erwartende physikalische und chemische Effekte bei Kontakt von Lösungen mit dem endgelagerten radioaktiven Abfall. Derartige Untersuchungen müssen vor dem nicht auszuschließenden Ersaufen eines Endlagers im Salz abgeschlossen sein, um die Ergebnisse berücksichtigen zu können. Beispielsweise ist bereits bekannt, daß Wasserdampf die Borosilikatgläser, die z.Z. als Schmelzmedium für hochaktive Abfälle vorgesehen sind, "unter den bei der Endlagerung auftretenden Temperaturen von mehr als 100°C und bei höheren Drücken offensichtlich bereits nach wenigen Wochen zersetzen" kann (RINGWOOD, 1978; HERRMANN, 1979 a).

4. Wasserzutritt und Ausbreitung von Radioaktivität im Grubengebäude

4.1 Möglichkeiten des Zutrittes von Lösungen

Anhand der Spurenelementanalyse hat HERRMANN, 1961, nachgewiesen, daß Wasser aller Art "sowohl aus dem Liegenden wie aus dem Hangenden in die Salzablagerungen eindringen können." Es ist auch während der Zeitdauer für die Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe nicht auszuschließen, daß über "Systeme von Rissen und schmalen Klüften für Lösungen auch in Zukunft Wegsamkeiten zwischen der Lagerstätte und dem Nebengestein entstehen" (HERRMANN, 1979 b)

Als mögliche Herkunft der in Kali- und Steinsalzbergwerken vorkommenden Lösungen sind zu nennen (HERRMANN, 1978) :

Oberflächen- und Grundwässer, Formationswässer aus dem Deck- und Flankengebirge (Salzhang) des Salzstockes sowie vom Basisgestein her, weiterhin Schachtlösungen, Bewetterungslösungen, Versatz- und Bohrlösungen, Metamorphoselösungen.

Wie schon anfänglich erwähnt, führen wasserleitende Anhydrit- und Tonschichten, die vom Salzspiegel gekappt wurden und die deshalb mit dem Grundwasser des Deckgebirges und weiterhin mit wasserführenden Flankengesteinen in Verbindung stehen können, oft tief ins Innere des Salzstockes hinein. Wird eine derartige Schicht im Endlagerbereich angefahren oder angebohrt, so fließt infolge der Druckentlastung sofort mehr oder weniger gesättigte

Lauge in den Grubenbau, wobei das entstehende Defizit anderenorts durch zunächst ungesättigtes Wasser ersetzt werden kann. Gefürchtet sind im Salzbergbau die ungesättigten Tageslaugen, die wegen ihres starken Lösungsvermögens die Zuflußwege erweitern, was wiederum größere Zuflußmengen zur Folge haben kann.

Trotz der vielerwähnten technischen Erfahrungen lassen sich Laugeneinbrüche auch heutzutage - selbst im Endlagerbereich - nicht vermeiden. Beispielsweise traf am 1.3.1979 eine Bohrmannschaft im Versuchsendlager Salzbergwerk Asse II bei einer Explorationsbohrung tief im Kern des Salzsattels (850 m Teufe) auf ein Laugenvorkommen, wobei bis zur Verpressung der Bohrung nach 1,5 h etwa 3 m^3 Lösung ausflossen. Die Bohrung sollte Aufschluß darüber bringen, welcher Teil des Asse-Salzsattelkernes zur Versuchsendlagerung hochradioaktiver Glasblöcke geeignet sei.

Angesichts der geplanten regen bergbaulichen Abbautätigkeit von jährlich mehr als $110\,000 \text{ m}^3$ Steinsalz, entsprechend einer Bruttogrundfläche von mehr als $45\,000 \text{ m}^2$ pro Jahr, besteht für das zukünftige Endlager die Gefahr, daß trotz bergmännischer Erfahrung unerwünschte Gesteinschichten angefahren oder freigelegt und dadurch Laugenzuflüsse hervorgerufen werden.

Beim Auffahren neuer Hohlräume entstehen zwangsläufig Konvergenzen an den Bergfesten. Von der PTB wird behauptet, daß bei einem bestimmten Abstand der Lagerkammern vom Salzstockrand ($\approx 200 \text{ m}$) Klüfte und Risse im massiven Salzgestein nicht bis zu wasserleitenden Schichten vordringen. Die Konvergenzbewegungen sind außer von der Temperatur vom primären (ursprünglichen) und sekundären Gebirgsspannungszustand (nach der Hohlraumerstellung) abhängig, der jedoch im Salzgestein bis heute nicht zuverlässig gemessen werden kann, vgl. G. STAUPENDAHL et al., 1974, S. 43). Weiterhin lassen sich das gebirgsmechanische Verhalten des Deck- und Flankengebirges und die tektonischen Zusatzbeanspruchungen aus vergangenen Gebirgsbildungsvorgängen sowie infolge gegenwärtiger Erdkrustenbewegungen und möglicher Erdbeben, vgl. GRIMMEL, 1978, durch Meß- und Berechnungsmethoden bisher nicht annähernd

ausreichend erfassen. Der Einfluß von stationären (zeitlich gleichbleibenden) sowie instationären Temperaturfeldern auf die Spannungs- und Verformungszustände im Salzgebirge wird gerade erst untersucht ("TU aktuell" 6/79, TU Braunschweig). Mit der durch die hochaktiven Abfälle einzulagernden Erwärmung nimmt die Plastizität und damit die Kriechgeschwindigkeit des Salzgesteins beträchtlich zu. Die Standsicherheit und insbesondere die Langzeitstandsicherheit eines Endlagers im Salz ist in dieser Hinsicht, überlagert von den Auswirkungen der fortwährenden Abbautätigkeit, bisher nicht exakt angebar, so daß während und auch nach der Endlagerbetriebsphase ein Wassereintritt letztlich nicht auszuschließen ist.

Das schon erwähnte, im Carnallitgestein enthaltene Kristallwasser wird bei 1 bar Umgebungsdruck und 85°C teilweise und ab 110°C weitgehend freigesetzt (HERRMANN, 1979 a). Gleichzeitig nimmt die Standfestigkeit des umgebenden Gebirges ab.

Ein mit Wasserzulauf verbundener Defekt der Schachtröhre soll nach den Angaben in DWK, 1979, S.232, durch außerhalb der Schächte befindliche Gefriersysteme gesichert werden. Fällt jedoch insbesondere während eines ersten Wassereintrittes durch die Schachtröhre das Gefriersystem aus oder wird dieses zu spät wirksam, so könnte der einmal entstandene Wasserzufluß u.U. nicht mehr aufzuhalten sein.

Im Übergangsbereich Salzstock / Deckgebirge treten beim Tiefkälteverfahren wegen der relativ großen Temperaturdifferenzen von mehr als 50°C erhebliche Spannungen auf, die zur Ablösung des Frostkörpers aus dem Gebirge führen können, vgl. HOFFMANN, 1972, S.102; MAUTHE, 1979. Die Schutzfunktion des Gefriersystems versagt in diesem Fall und es besteht die Gefahr, daß vom Salzspiegel her Zuflüsse bis an bzw. in die Schachtröhre gelangen. An dieser Stelle sei bemerkt, daß die DWK sogar das Sumpfen (Leerpumpen) des als ersoffen anzunehmenden Abfallendlagerbergwerkes als praktikable Lösung nennt, ohne daß jedoch angegeben ist, wohin die abgepumpten Flüssigkeitsmengen, die durchaus schon kontaminiert sein können, abgeleitet werden, (DWK, 1977, S. 232). Es wäre zu über-

prüfen, ob hier die Risiken richtig erfaßt wurden. Weitere Fragen werfen massive Betonkörper im Salzgestein auf, die als Verschlussorgane von Endlagerräumen dienen sollen, da sich Beton im Festigkeitsverhalten vom umgebenden Salz unterscheidet. Große Spannungsunterschiede zwischen Betonkörper und Salzgestein (vgl. Verringerung der aufnehmbaren Schubspannungen mit Abnahme des umgebenden Gebirgsdruckes im Salzgestein nach Versuchen von DREYER, 1969) können örtlich zu Fließbewegungen bzw. zu Kluftbildungen führen, wodurch die ursprüngliche Verschlussfunktion in Frage gestellt ist. Der Kontakt von von radioaktiven Abfällen mit Salzlösung wird auf diese Weise zwar "erschwert", aber nicht verhindert, vgl. GSF, 1975, S. 38.

Weitere Probleme ergeben sich, wenn derart eingeschlossener hochaktiver Abfall aufgrund der Aufheizung des Salzgesteins zusätzliche Temperaturspannungen erzeugt, die sich zwischen dem Einlagerungsort im Bohrloch (Bohrlocheinlagerungstechnik vgl. E. ALBRECHT, 1977; DWK, 1977) und der als eroffen anzunehmenden darüberliegenden Beschickungsstrecke sehr empfindlich auswirken können, s.u.

Aus bisherigen Temperaturfeldversuchen im Versuchsendlager Asse II (vgl. GSF, 1978; HERRMANN, 1979 a) ist bekannt, daß winzige Kristallwassertröpfchen durch das Steinsalz hindurch auf die Wärmequelle zuwandern. Nicht genauer bekannt ist, wie sich dieser Effekt in einem Temperaturfeldversuch nahe einem mit Salzlösung gefüllten Hohlraum verstärkt.

Das in den Endlagerkammern zwischen die Container und Fässer aufgefüllte und z.T. verdichtete Salz stellt wegen seines relativ großen Porenvolumens keine Sperre gegen eindringende Salzlösungen dar. Bei verschiedenen Einlagerungsmethoden scheint eine Verdichtungsmöglichkeit erschwert bzw. ausgeschlossen, vgl. Schüttwinkelbestimmung bei Absenkeinlagerung, EGT, 1979. Das Füllsalz wird überwiegend eine geringe Lagerungsdichte aufweisen und dementsprechend große Mengen Salzlösungen in sich aufnehmen können.

4.2 Strömungsursachen und Ausbreitung von Radioaktivität im Grubengebäude

Nach H. FRANKE, 1972, sind die in einer ersoffenen Grube vorherrschenden Strömungsverhältnisse " ein wesentlicher Einflußfaktor hinsichtlich der Ausbreitung der in die Lösungen übergehenden Radioaktivität. In diesem Zusammenhang wird unterschieden in

- Ausbreitung durch Diffusion
- Ausbreitung durch Konvektionsströmungen
- Ausbreitung durch Strömung infolge eines äußeren Druckgefälles.

Mit Konvektionsströmungen kann in einem ersoffenen Endlager für radioaktive Abfälle auf Grund vorhandener Temperaturgefälle oder des Anstehens von Lösungen unterschiedlicher Dichte - bedingt durch die Auflösung unterschiedlicher Salzarten - gerechnet werden. Mit Sicherheit sind Strömungsvorgänge zu verzeichnen, wenn zwischen der mit Salzlauge gefüllten Grube und wasserführenden Horizonten im Deckgebirge bzw. im Liegenden hydraulische Verbindungen bestehen. Schlußfolgernd kann eingeschätzt werden, daß in einem ersoffenen Endlager eine Verbreitung der in Lösung gehenden Radionuklide über das gesamte Grubengebäude zu erwarten ist, die zeitlich nicht durch Diffusionsvorgänge bestimmt sind."

Dagegen waren die Betreiber des bundesdeutschen Versuchsendlagers Asse II vor und nach 1975 der Meinung, "freigesetzte Radionuklide könnten sich nur durch langsame Diffusion in einer Na Cl-gesättigten Lösung bewegen. Für den Aktivitätstransport durch diese Diffusionsvorgänge läßt sich für einen Zeitraum von ca. 10 000 Jahren eine Distanz von einigen Hundert Metern abschätzen..." (GSF, 1975, S.38).

Inzwischen ergaben Feldmessungen in Schachtröhren vollgelaufener Salzbergwerke, daß sich dort mehrere Konvektionszellen von einigen Metern bis zu einigen Hundert Metern Tiefe ausbilden. Diese Konvektionszellen, in denen die vertikalen Temperaturgradienten nur etwa $1 \cdot 10^{-3}$ °C/m betragen, werden im Jahresbericht 1977 der GSF (GSF, 1978) als "Schicht" bezeichnet:

"Die Dichte und die chemische Zusammensetzung sind in den meisten Fällen innerhalb einer solchen Wasserschicht sehr ähnlich. Von einer Schicht zur darunter befindlichen ändern sich die physikalischen und chemischen Parameter sehr stark. Die Übergangszonen liegen zwischen etwa 20 cm

und 3 m Dicke mit Temperaturgradienten von 1 bis ca. $50\text{ }^{\circ}\text{C/m} \dots$

Durch weitere Arbeiten soll das Verhalten dieser Grenzschichten in Feldversuchen genauer untersucht und in Laborversuchen nachgebildet werden. Ziel der Untersuchungen sind genauere Erkenntnisse über die Entstehung solcher Grenzschichten und über ihre Rolle, welche sie bei der Ausbreitung eventuell ausgelaugter Radionuklide spielen."

Eine Konvektionszelle, in der sich beispielsweise reine Na Cl-Lauge befindet, bildet sich infolge des vertikalen Temperaturgefälles vom Erdinnern zur Erdoberfläche und aus dem Grunde, daß wärmere Na Cl-Lauge (im unteren Zellenteil) trotz größerer Sättigungskonzentration eine geringere Dichte besitzt als kältere Na Cl-Lauge im oberen Zellenteil, vgl. JÜRGENS, 1979, S.30 . Nach dem Prinzip der Schwerkraftzentralheizung setzt sich der Dichteunterschied in Konvektionsströmung mit Fließgeschwindigkeiten um, die um etliche Größenordnungen höher liegen als die Ausbreitungsgeschwindigkeit durch Diffusion. Als gewiß nicht zu niedrig bestimmt ist die vertikale mittlere Austauschgeschwindigkeit von vergleichsweise rund $1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ anzunehmen, die aufgrund von Konvektion für den Fall der als ersoffen anzunehmenden Eisenerzschachtanlage Konrad von der GSF überschlägig errechnet wurde (≈ 38 Jahre für 1200 m Teufe des zukünftigen Endlagers für schwach- und u.U. mittelradioaktive Abfälle, vgl. EGT, 1979, S.78; auch bei Konrad können stark versalzene Wässer eine Rolle spielen, vgl. GSF, 1975).

Eine bedenkliche Zunahme der Konvektionsströme in einem als ersoffen anzunehmenden Endlager ist mit Sicherheit unvermeidlich, wenn das natürliche vertikale und horizontale Temperaturgefälle vom Salzlagerstättenkern zu dessen Nebengesteinen durch die Wärmeabgabe des in der Tiefe eingelagerten hochaktiven Abfalls überlagert wird.

Dieser plausible Gefährdungsfall wurde auch von R. PROSKE, 1977, in seiner Risikoanalyse eines Endlagers für hochaktive Abfälle erfaßt. In dieser Risikoanalyse wird geschlußfolgert, daß ein gebirgsmechanischer Störfall und das Ersaufen der Grube den größtanzunehmenden Unfall (GAU) für das Endlager darstellen. Um diesem größten Risiko zu begegnen, wird von R. PROSKE gefordert, das Endlager so zu errichten, daß die Lagerräume langfristig standsicher bleiben und ein Wassereintrich nicht statt-

findet. Die Erfüllung dieser Forderung ist jedoch mit großer Ungewißheit verbunden, solange ein derartiges Endlager existieren wird.

Wie schon erwähnt, kann sich die in Lösung übergehende Radioaktivität weiterhin durch Strömungsvorgänge ausbreiten, die durch "äußeres Druckgefälle" verursacht werden. Dieses Druckgefälle kommt dann zustande, wenn mehrere Verbindungswege vom Endlager zu örtlich unterschiedlichen Grundwasserhorizonten im Deck- und Flankengebirge des Salzstockes vorhanden sind. Die Entstehungsweise derartiger Verbindungswege wurde oben erwähnt. Neu in der Geschichte der Salzstöcke ist, daß etwa seit Beginn des Industriezeitalters in ihnen Hohlräume geschaffen werden, die die Bildung von "Rissen und schmalen Klüften" fördern können. Örtliche Höhendifferenzen der Grundwasserhorizonte rühren von unterschiedlichen ober- und unterirdischen Abflußverhältnissen her, die in der Topographie, im tektonischen Aufbau sowie in häufig wechselnden Durchlässigkeitseigenschaften der Boden- und Gesteinsarten begründet sind. Die acht hydrogeologischen Bohrungen, die im ersten Halbjahr 1979 nahe dem Gorleben-Rambower Salzstock niedergebracht wurden, haben nach vorläufiger Auswertung (VIEHL, 4.6.1979) ergeben, daß es in diesem Gebiet "mindestens drei Grundwasserstockwerke" gibt, vgl. auch WOSNIK, 31.8.1979, geohydrologische Bohrprofile GOHY 10 und GOHY 50. Ohne Kenntnis der exakten geohydrologischen Verhältnisse darf in diesem Fall dennoch nicht ausgeschlossen werden, daß sich hier ein hydraulisches System herausbilden könnte, bei dem das nukleare Endlager aufgrund eines äußeren Druckgefälles durchströmt wird.

An einem Beispiel sei erläutert, mit welcher Strömungsgeschwindigkeit v Salzlösungen aus einer spaltartigen Austrittsöffnung an der als klüftig angenommenen Salzstockoberfläche fließen können. Der Spalt habe Kontakt mit dem radioaktiven Endlager und ziehe sich mit einer Länge $\Delta L = 1000$ m bis zu einer Einlauföffnung an einer anderen Stelle der Salzstockoberfläche hin, wobei sich eine angenommene Druckdifferenz $\Delta p = 10^5$ N/m² ($\hat{=} 1$ bar) zwischen Ein- und Auslauf in Geschwindigkeitsenergie umsetze.

Stellt man sich die Kluft aus lauter parallelen engen Röhrrchen mit dem Durchmesser D von nur 5 mm (0,005 m) vor, so ergibt sich die mittlere Strömungsgeschwindigkeit v nach der Beziehung (Hagen-Poiseuilles) für laminares Fließen

$$v = \frac{\Delta p}{\rho \Delta L} \cdot \frac{D^2}{32 \cdot \nu} \quad \text{in m/s} \quad (1)$$

mit ρ = Dichte der gesättigten Salzlösung ($\approx 1200 \text{ kg/m}^3$) und ν = kinematischer Viskosität ($1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, temperaturabhängig). Oberhalb der Reynolds-Zahl

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \approx 500$$

tritt der turbulente Fließzustand ein, in dem die Strömungsgeschwindigkeit überschlägig

$$v = \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta L} \cdot \frac{8 F}{\lambda \cdot \rho \cdot U}} \quad \text{in m/s} \quad (2)$$

beträgt. Dabei bedeuten

F = Querschnittsfläche des Spaltes in m^2

U = Umfang des Spaltes in m

λ = Widerstandsbeiwert, u.a. abhängig von Re, hier $\lambda \approx 0,07$ geschätzt, und

$$Re = \frac{v \cdot F}{\nu \cdot U}$$

Bei einer angenommenen Spaltlänge von 10 m und einer auf 10 mm aufgeweiteten Spaltbreite ergibt sich mit $v \approx 0,2 \text{ m/s}$ hier etwa der dreifache Betrag der Strömungsgeschwindigkeit wie bei dem engeren Spalt. Das Beispiel soll lediglich die Größenordnung möglicher Fließbewegungen für den Fall eines "äußeren Druckgefälles" vermitteln, wobei die Beträge der angenommenen Druckdifferenz, Fließweglänge und Spaltabmessungen in der Realität nach oben und unten hin variieren können.

Ein äußeres Druckgefälle kann im System eines als ersoffen anzunehmenden Salzbergwerkendlagers weiterhin noch durch Konvergenzbewegungen der Hohlräume im Salzgestein entstehen. Aufgrund der Schwerkraft und der am Salzstock angreifenden tektonischen Kräfte kriechen die offengelassenen Strecken und die restlichen Kammerhohlräume und

Porenräume zusammen. Die hierin befindliche Salzlösung wird dabei wegen ihrer Eigenschaft als bewegliche Flüssigkeit (ähnlich dem Luftstrom aus einem Blasebalg) in Bereiche niedrigeren Druckes gepreßt, etwa in den Bereich des Deckgebirges. Ist eine Ausweichmöglichkeit nicht gegeben, so erhöht sich wegen der vernachlässigbaren Kompressibilität des Salzwassers der Flüssigkeitsdruck allseitig um denjenigen Druckbetrag, der für die Konvergenzbewegung des Salzes verantwortlich ist. Dieser Fall würde beispielsweise eintreten, wenn das Endlager trotz aller Vorkehrungen infolge eines Wassereinbruches aus dem oberen Teil einer Schachtröhre ersäuft und die Schächte zur vermeintlichen Sicherheit daraufhin mit Wechsellaugen von Beton und Ton vollständig verfüllt würden. Werden tektonische Zusatzspannungen zur Vereinfachung vorerst einmal außerachtgelassen, so ist infolge der Hohlraumkonvergenzen aufgrund der überlagernden Gebirgslasten entsprechend Abb. 1 folgender allseitiger Druckanstieg Δp in den flüssigkeitsgefüllten Strecken und sonstigen Hohlräumen des Endlagerbergwerkes zu erwarten:

$$\Delta p = [\alpha \cdot (\rho_{DG} \cdot t_{DG} + \rho_S (t_E - t_{DG})) - \rho_{SW} (t_E - t_W)] \cdot g$$

in N/m² (3)

mit g = Erdbeschleunigung (9,81 m/s²)

t_E = Tiefe des Endlagers unter Geländeoberkante OKG,
(≈ 800 m)

t_{DG} = Tiefe des Deckgebirges unter OKG (≈ 300 m)

t_W = Tiefe des Grundwasserspiegels GW unter OKG,
(≈ 10 m)

t_K = Entfernung eines angenommenen Kluftaustrittes vom Grundwasserspiegel (z.B. 500 m)

ρ_{SW} = Dichte des als versalzen angenommenen Grundwassers (≈ 1200 kg/m³, vereinfachte Annahme)

ρ_{DG} = Dichte des Deckgebirges ≈ 2100 kg/m³

ρ_S = Dichte des Salzgesteins ≈ 2300 kg/m³

p_W = Wasserdruck im ersoffenen Endlager (in N/m²)

α = Anteil, mit dem der Überlagerungsdruck auf die Konvergenz wirksam wird, (ungünstigstenfalls und langfristig $\alpha = 1$)

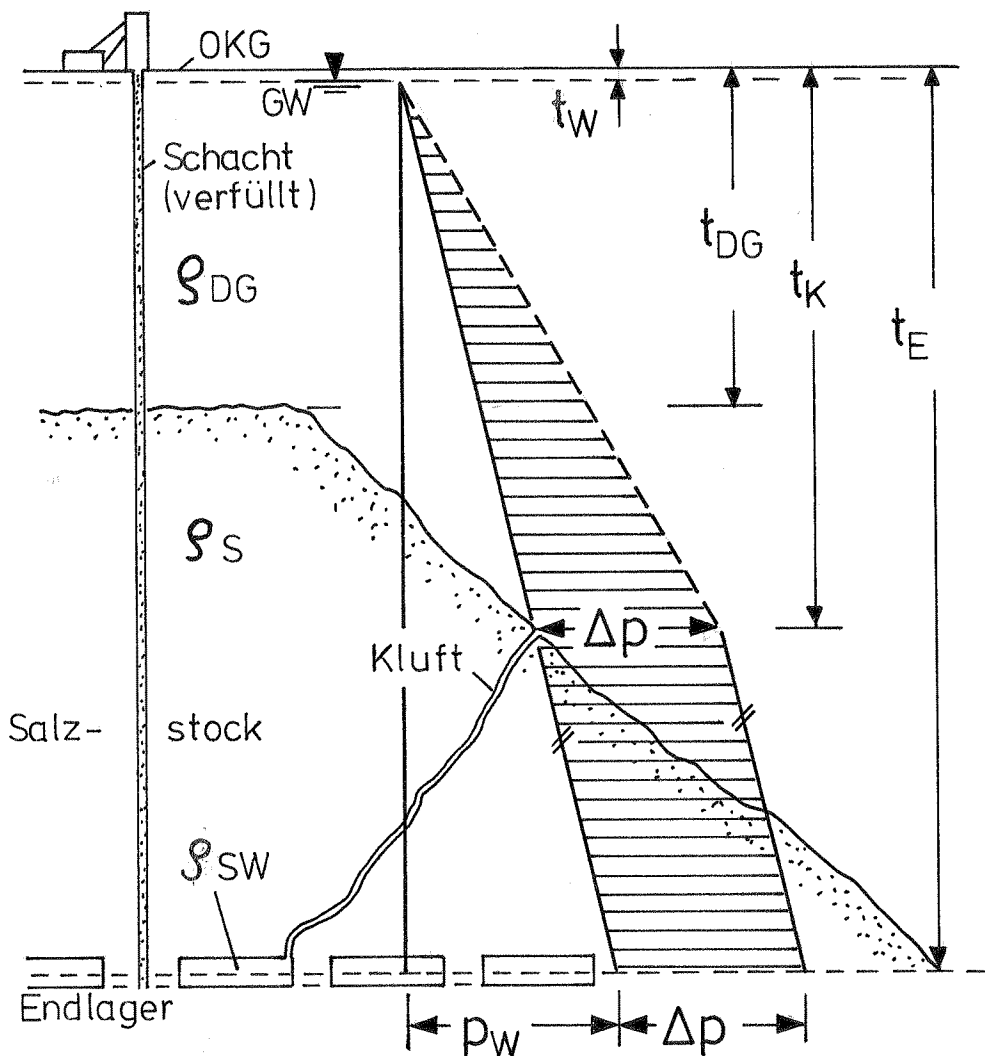


Abb. 1 Möglicher Druckanstieg Δp in den Salzlösungen des ersoffenen Endlagerbergwerkes infolge der durch Gebirgsdruck verursachten Hohlraumkonvergenzen

Mit den eingesetzten, umseitig genannten Zahlenwerten kann Δp auf den beträchtlichen Betrag von $ca. 82 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 \equiv 82 \text{ bar}$ anwachsen. Widerstehen die Schachtverfüllungen dieser zur Erdoberfläche gerichteten Belastung (Gefährdung durch Fugenerosion), so kann sich der Druck auch durch Kluftsysteme (siehe Kluft in Abb. 1) und wasserleitende, im Salzstock befindliche Gesteinsschichten entspannen. Die Druckentlastung erfolgt durch Volumenstrom in Bereiche niedrigeren Druckes. Ersäuft das Endlager nach der Stilllegung und der Verfüllung der Schächte über eine andere Wassereintrittsstelle, die in Verbindung mit dem Deck- und Flankengebirge steht, so kann der durch die Konvergenz der Hohlräume verursachte Volumenstrom über

diese hydraulische Verbindung in die Umgebung des Salzstockes gelangen.

Die Konvergenzgeschwindigkeit bestimmt die Größe des Volumenstromes, der ähnlich wie nach dem Prinzip der hydraulischen Presse keilartig von innen aus dem Salzgebirge herausgedrückt wird. Die Gesamtmenge der aus dem Endlager verdrängten Salzlösungen entspricht im wesentlichen dem Konvergenzvolumen und könnte theoretisch gegen den Wert von rund 0,45 des eingelagerten Abfallvolumens streben (s.o.), d.h. wenn sich alle Hohlräume und Poren durch das kriechende Salz schließen. Konvergenzgeschwindigkeit und Konvergenzvolumen weisen meist in der ersten Zeit nach dem Auffahren der Hohlräume im Salz relativ große Beträge auf. Sie klingen nur bei langfristig stand-sicheren Hohlräumen allmählich ab, vgl. GIMM, 1968, S.223. Bei der gebirgsmechanisch vorteilhaften Hohlraumform der 10 000 m³-EURATOM-Kaverne im Salzbergwerk Asse II beträgt z.B. das jährliche Konvergenzvolumen z.Z. etwa 1 - 2 % des ursprünglichen Hohlraumes, vgl. EGT, 1979. Quaderartige Großraumkammern, wie sie von der DWK für das geplante Endlager vorgesehen sind, dürften sich in dieser Hinsicht wesentlich ungünstiger verhalten.

Luft, die als kompressibles Medium während des Ersaufens im Endlagerbergwerk eingeschlossen wird, beeinträchtigt das Prinzip der Lösungsverdrängung aufgrund der Konvergenzbewegung nur unwesentlich. Dabei ist anzunehmen, daß die Kompressionswärme an das Salzgestein und die Salzlösungen abgegeben wird und die Temperatur annähernd konstant bleibt. Kann während des Ersaufens keine Luft aus dem Endlager entweichen (z.B. weil die Schächte bereits verfüllt sind), so wird diese wegen der hohen statischen Drücke infolge der Wasserüberdeckung zu einem Druckluftkissen stark zusammengepreßt.

Ist V_{Lo} das Luftvolumen im noch nicht ersoffenen Grubengebäude unter Außendruck $p_o \approx 1$ bar, d.h. gleicht V_{Lo} dem gesamten Hohlraumvolumen V_o des Endlagers (Schächte verfüllt), so wirkt der volle Konvergenzdruck p_{ges} auf die eingeschlossene Luft und Lauge bereits dann, wenn der konvergierende Endlagerraum auf den Wert $\beta \cdot V_o$ zusammengeschumpft ist. Der Faktor β ergibt sich aus:

$$\beta = 1 + p_0 \left(\frac{1}{p_{\text{ges}}} - \frac{1}{p_1} \right) \quad (4)$$

mit $p_1 \hat{=} p_W + p_0$, Druck, unter dem die gesamte im Endlager eingeschlossene Luftmasse (mit dem ursprünglichen Luftvolumen $V_{L0} = V_0$) nach dem Ersaufen der Grube steht

p_W = Salzwasserdruck nach dem Ersaufen des Endlagers, vgl. Abb.1

p_0 = mittlerer absoluter Luftdruck (≈ 1 bar an der Erdoberfläche)

p_{ges} = $p_W + p_0 + \Delta p$, Druck auf das im Endlager befindliche Wasser samt eingeschlossener Luft, nachdem die Konvergenz wirksam geworden ist, vgl. Abb.1

Mit den eingesetzten Werten nach Abb.1 ergibt sich für $\beta = 0,9949$, d.h. der gesamte Hohlraum des unter Gebirgsdruck stehenden Grubengebäudes braucht nur um 0,51 % zu konvergieren, bis der auf dem Kuftkissen und den Salzlösungen lastende Druck auf den Wert von p_{ges} angestiegen ist. Die eingeschlossene Luft ist dann auf das Volumen

$$V_{L2} = \frac{p_0}{p_{\text{ges}}} V_0 \hat{=} \left(\beta + \frac{1}{p_1} - 1 \right) V_0 \quad (5)$$

komprimiert worden, nach obigem Beispiel auf $V_{L2} = 0,0057 \cdot V_0$, d.h. auf 0,57 % des Ausgangsvolumens V_0 .

Derartige Konvergenzbeträge werden in Salzbergwerken in kurzer Zeit erreicht, vgl. STAUPENDAHL et al., 1974, insbesondere bei großer Teufe der Grubenhohlräume. Zu erhöhten Konvergenzen kann es kommen, wenn tragende Teile, wie Kammerpfeiler, durch Salzauflösung geschwächt werden, vgl. auch BAAR, 1977.

H. FRANKE, 1972, nennt im Zusammenhang mit Gebirgsbewegungen während und nach dem Ersaufen des Grubengebäudes weiterhin:

- " Großräumiges, zerstörungsfreies Absenken der Firste infolge Biegebeanspruchung der hangenden Schichten
- großräumige, weit nach oben greifende Zerstörung der Hangendschichten und Hereinbrechen großer bis sehr großer Gesteinskörper in die mit Salzlösung gefüllten Grubenräume

In beiden Fällen werden anstehende und u. U. kontaminierte Salzlösungen in vorhandene Hohlräume, z.B. in den Schacht oder in neu entstandene Hohlräume verdrängt..."

Die Salzlösungen gelangen auf diese Weise in höhergelegene Horizonte.

5. Transport radioaktiver Substanzen außerhalb der Salz- lagerstätte

Vom Standpunkt der Sicherheit (H. FRANKE, 1972) "interessiert auch die allmähliche Herausbildung eines sogenannten Tagesbruches über der ersoffenen Grube. Es wird vorausgesetzt, daß der Tagesbruch durch mehrere Einzelbrüche in größeren Zeitabständen zustandekommt und die Salzlösungen durch den Nachfall von Gesteinsmassen in immer höhere Niveaus verdrängt werden," vgl. Tagesbrüche über den ersoffenen Kalischachtanlagen Hedwigsburg (nahe Asse II), Vienenburg, Staßfurt, Teutonia (bei Lüchow, geflutet) und andere mehr, siehe SPACKELER, 1950, S. 352. Nach FENK, 1975, wurden bei Tagesbrüchen Bruchwinkel von $66 - 90^{\circ}$ an der Tagesoberfläche im Bereich der untertägigen Abbaue registriert. Ein Tagesbruch über einem ersoffenen Endlager-Bergwerk wäre der denkbar schwerste Unfall, dessen Kontaminationsauswirkungen kaum abzuschätzen sind. Die Geschichte des Salzbergbaus zeigt, daß sich auch noch Jahrzehnte nach dem Ersaufen Tagesbrüche über den ehemaligen Grubenbauen bilden können.

Die Gefahr eines Tagesbruches über einem ersoffenen Salzbergwerk verringert sich mit zunehmender Teufe der Grubenbaue, d.h. mit wachsender Überdeckung durch massives Salzgestein. Hier scheinen quantitative Angaben zur erforderlichen Mächtigkeit des überdeckenden Gebirges lediglich auf bergmännischen Erfahrungen zu beruhen, vgl. MAUTHE, 1979, HOFRICHTER, 1973. Mit zunehmender Teufe beschleunigen sich andererseits die Konvergenzbewegungen wegen des größeren Gebirgsdruckes und der höheren Temperaturen. Somit wächst die Gefahr, daß radioaktive Salzlösungen infolge der Verdrängung durch Hohlraumkonvergenzen über hydraulische Verbindungswege in poröses und klüftiges Deck- bzw. Flankengebirge gelangen. Hervorgehoben sei nochmals, daß nach Gl.3 für derartige Strömungsvorgänge hohe Druckenergien zur Verfügung stehen, vgl. Abb. 1.

Nach dem DARCY'schen Filtergesetz (vgl. u.a. KEZDI,1969) breitet sich Grundwasser, bzw. auch Salzlauge, entsprechend einem Druckgefälle in porösen Böden und Gesteinen mit der Sickergeschwindigkeit

$$v_D = k_D \cdot \frac{\Delta p}{\rho \cdot \Delta L \cdot g} \quad (6)$$

aus, siehe auch Gl. 1.

Der Durchlässigkeitsbeiwert k_D beträgt z.B. für Feinsand 10^{-4} m/s, für stark lehmigen Sand 10^{-9} m/s und für schweren Lehm 10^{-10} m/s. In einer rund 500 m langen Röhre, die mit derartigen Erdstoffen gefüllt wäre, würden sich bei der Druckdifferenz Δp nach Abb. 1 Sickergeschwindigkeiten von entsprechend $v_D = 1,4 \cdot 10^{-4}$ m/s, $1,4 \cdot 10^{-9}$ m/s und $1,4 \cdot 10^{-10}$ m/s als eindimensionale Geschwindigkeiten einstellen. Aufgrund des unterschiedlichen Porengehaltes des Bodens erhöhen sich die tatsächlichen Fließgeschwindigkeiten in den kapillarartigen Strömungskanälen gegenüber Gl. 6 noch etwa um das 1,5- bis 20-Fache. Demnach könnten bei einem derartigen Röhrenmodell kontaminierte Salzlösungen in einer Zeitspanne von nur wenigen Wochen bis zu mehreren tausend Jahren in die Nähe der Erdoberfläche gelangen.

Nimmt man andererseits als Laugenaustrittsstelle eine punktförmige Quelle an der Salzstockflanke (siehe Abb.1) und bis zum rund 500 m darüber befindlichen horizontalen Grundwasserspiegel eine homogene, isotrope Gebirgs- bzw. Bodenmasse an, so breitet sich die herausgepreßte Salzlauge in einem dreidimensionalen Potential- und Stromlinienfeld aus, und zwar zunächst halbkugelförmig nahe der Austrittsstelle. Mit zunehmender Entfernung von der Punktquelle erhöht sich dann aber die vertikale gegenüber den horizontalen Geschwindigkeitskomponenten der Sickerströmung. Der etwa eiförmige Laugenaufnahmekörper gelangt auf diese Weise näher an die Erdoberfläche heran als ein kugelartiger Laugenkörper gleichen Inhaltes. Das Volumen des laugendurchtränkten Körpers wächst mit abnehmenden Porengehalt n des Bodens. Für $n = 0,1$ würde beispielsweise das 10-fache Volumen der verdrängten Salzlösungen beansprucht. Entsprechend dem nicht verfüllten Hohlraumanteil, der z.B. nach 30 Jahren planmäßigen Einlagerungsbe-

triebes im Endlager entsteht, ist außerhalb des Salzstockes dann ein Laugenaufnahmekörper mit Durchmesserabmessungen in der Größenordnung von mehr als 100 m zu erwarten. Genauere Angaben über Filtrationsgeschwindigkeiten, -zeiten und Ausdehnungen können mit Hilfe von Rechenprogrammen, insbesondere auch bei komplizierteren Randbedingungen, gewonnen werden. Selbst wenn man berücksichtigt, daß feinporige Böden und Gesteine (z.B. Ton) radioaktive Substanzen z.T. absorbieren, vgl. H. FRANK, 1974, stellt die Annahme eines theoretisch homogenen Flankengebirges insofern keinen zu verharmlosenden Fall eines von radioaktiven Substanzen durchströmten Erdkörpers dar, weil dieser Grundwasserströmen ausgesetzt sein kann, die insbesondere in der Nähe wasserstauender Salzstöcke vorkommen.

Darüberhinaus sind Deck- und Flankengebirge von Salzstöcken häufig stark von Störungen durchzogen, die vom Grundwasser als Migrationswege bevorzugt werden, siehe SEEDORF 1955, TRUSHEIM 1956, KALKA 1963, APPEL 1971, FRANK 1974, GSF 1976. Beispielsweise strömt das im Deckgebirge und dem Subrosionsgebiet der Asse befindliche Grundwasser überwiegend durch Verwerfungen und Klüfte in die niedriger gelegenen umgebenden Grundwasserhorizonte. Eine Salzquelle am Westrand der Asse bei Groß Denkte wird nach FRANK, 1974, über eine mehr als 300 m lange, steileinfallende Störung gespeist, die mit dem darunter liegenden Salzstock in Verbindung steht. Hier reicht ein geringer Überdruck infolge des geodätischen Höhenunterschiedes zwischen Speisehorizont und Quelle aus, z.T. turbulente Fließbewegungen zu erzeugen.

Die Wahrscheinlichkeit, daß ein in mehreren hundert Metern Tiefe aus dem Salzstock austretender, unter hohem Zusatzdruck befindlicher Salzlösungsstrom mit dem geringsten Fließwiderstand konzentriert auf Kluftwegen in Zonen niedrigeren Druckes, d.h. ins oberflächennahe Grundwasser gelangt, dürfte gegenüber anderen Ausbreitungsarten (z.B. der flächigen Filtration) sehr groß sein, vgl. GRIMMEL und PALUSKA, 1979. Auch geringere Druckdifferenzen infolge des Druckgefälles zwischen verschiedenen Grundwasserstockwerken können ausreichen, kontaminierte Salzlösungen durch

Kluftsysteme, beispielsweise in den häufig verkarsteten Salzhängen und im Hutgebirge, nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren über weite Entfernungen auch vertikal zu transportieren.

Die Sorptionseigenschaften durchströmter Boden- und Gesteinsschichten können verallgemeinernd nicht als Barriere gegen in Salzstöcken enthaltene radioaktive Substanzen gelten, da im Einzelfall vor einem Ersaufen des Endlagers nicht bekannt sein dürfte, auf welchen Fließwegen sich die aus dem Endlager stammenden Salzlösungen in die Grundwasserströme der Umgebung ergießen, ob großflächig durch Tone und Sande hindurch oder konzentriert durch Verwerfungen und Klüfte.

6. Zusammenfassung

Die Wechselwirkungen zwischen einem Salzstock und dem ihn umgebenden Grundwasser befinden sich in einem labilen Gleichgewicht, das durch Einlagerungsmaßnahmen empfindlich gestört werden kann.

Ausgehend von der Löslichkeit der Salzgesteine, den Einlagerungsbedingungen und dem Auslaugverhalten radioaktiver Abfälle, werden Wasserzutrittsmöglichkeiten genannt, die zum Ersaufen des Endlagers führen können.

Die Ausbreitung von Radioaktivität im Grubengebäude ist auf verschiedene Arten möglich, wie durch Diffusion, Dichteströme (Temperatur), äußeres Druckgefälle und Verdrängungsvorgänge. U.a. kann für Fließvorgänge vom vollgelaufenen Endlager in die Umgebung des Salzstockes beträchtliche zusätzliche Druckenergie zur Verfügung stehen, die aus Konvergenzen nicht verfüllbarer bzw. nicht verfüllter Endlagerräume resultiert. Eingeschlossene Grubenluft spielt hierbei eine vernachlässigbar geringe Rolle.

Als denkbar schwerster Unfall ist ein Tagesbruch über dem Endlager anzunehmen.

Der Transport radioaktiver Substanzen außerhalb des Salzstockes ist u.a. durch großflächige Sickerströmung in das poröse Deck- und Flankengebirge möglich, das zum Einflußbereich von Grundwasserströmen zählt. Als am wahrscheinlichsten sind jedoch Salzlösungs-

fließbewegungen auf Klüften und Verwerfungen des Deck- und Flankengebirges anzusehen. Schlußfolgernd ist zu befürchten, daß die endgelagerten radioaktiven Abfälle selbst dann nicht auf lange Zeit vom Biozyklus fernzuhalten sind, wenn die Schachtröhren des einst stillzulegenden Endlagers „nach erprobten Verfahren des Salzbergbaus wasser- und gasdicht“ verfüllt werden (DWK, 1977, S. 248).

7. Literatur

- ALBRECHT, E., 1977 Die Tieflagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland, Kernenergie-Seminar II, Jülich, 31.1.1977
- APPEL, D., 1971 Geologischer Bau der Asse bei Wolfenbüttel (Ostniedersachsen) unter besonderer Berücksichtigung ihrer Quartärsedimente und der Tektonik der Südwest-Flanke
- BAAR, C.A., 1977 Applied salt rock mechanics, 1, The in-situ behaviour of salt rocks, Elsevier Amsterdam, Oxford, New York
- DREYER, W., 1969 Festigkeit und Tragfähigkeit der wesentlich am Aufbau des Asse-Sattels beteiligten Salzgesteine im Hinblick auf die Standsicherheit der Grubenräume
Bundesminister für wissenschaftliche Forschung, Forschungsbericht K 69-32, Kernforschung (BWwF-FB K 69-32)
- DWK, 1977 Bericht über das in der Bundesrepublik Deutschland geplante Entsorgungszentrum für ausgediente Brennelemente aus Kernkraftwerken, Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen mbH, Bünteweg 2, 3000 Hannover 71
- EGT 1979 Jahresbericht 1978 (EGT 1)
GSF-T 94, KfK - 2852
Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltschutz mbH München, Kernforschungszentrum Karlsruhe
- FENK, J., 1975 Über die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Tagesbrüchen, Neue Bergbautechnik 5.Jg. Heft 4 April 1975
- FRANK, H., 1974 Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen an der Asse bei Wolfenbüttel, GSF-Bericht R 87

- FRANKE, H., 1972 Betrachtungen zur Havariesituation bei der Lagerung radioaktiver Abfälle in einem Steinsalzbergwerk, Deutsches Brennstoffinstitut Freiberg, Nuclear Materials and Waste Management, Volume 27, 1973 17935 (SZS-138pp 31-45 , Accidental Situations in Storing Wastes in a Rock Salt Mine)
- GIMM, W. 1968 Kali- und Steinsalzbergbau, Band I, Aufschluß und Abbau von Kali- und Salzlagerstätten, VEB-Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1968
- GRIMMEL, E., 1978 Warum der Salzstock Gorleben als Atommülldeponie ungeeignet ist, 2. Auflage 1979 Öko-Institut, Arbeitsstelle Hannover, Großer Hillen 38,3000 Hann.
- GRIMMEL, E., 1979
PALUSKA, A., Bericht über geophysikalische Untersuchungen im Bereich des Salzstockes Gorleben am 6. u. 7.10.79, Öko-Institut s.o.
- GSF, 1975 Zur Sicherheit der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München, (GSF), 8042 Neuherberg, Post Oberschleißheim, Ingolstädter Landstr. 1
- GSF, 1976 Jahresbericht 1975, GSF s.o.
- GSF, 1978 Jahresbericht 1977, GSF s.o.
- HATZFELD, 1979
HIRSCH,
KOLLERT Der Gorlebenreport - Ungewißheit und Gefahren der nuklearen Entsorgung Verlag Fischer Alternativ, 4031
- HERRMANN, A.G., 1961 Über das Vorkommen einiger Spurenelemente in Salzlösungen aus dem deutschen Zechstein, Kali und Steinsalz, Heft 7/1961, Essen: Verlag Glückauf
- HERRMANN, A.G., 1978 Computerprogramme zur Berechnung von Mineral- und Gesteinsumbildungen bei der Einwirkung von Lösungen auf Kali- und Steinsalzlagerstätten (Lösungsmetamorphose) Kali und Steinsalz, Heft 7/1978
- HERRMANN, A.G., 1979a "Verantwortung, für die es keine Parallele gibt" Umschau 79 (1979) Heft 6
- HERRMANN, A.G., 1979b "Keineswegs die beste Lösung der Welt" in: Göttinger Tageblatt 20./21. Januar 1979

- HOFFMANN, D. 1972 Elf Jahrzehnte deutscher Kalisalzbergbau
Verlag Glückauf mbH Essen, 1972
- HOFRICHTER, E., 1973 Ursache eines Erdfalles bei Vienenburg - Salzauflösung in ersoffenen Grubenbauen, Int. Ass. Eng. Geol. Proc. Symp. Hannover 1973
T 1-H 1-6, Hannover
- JÜRGENS, H.-H., 1979 Atommülldeponie Salzbergwerk Asse II, Gefährdung der Biosphäre durch mangelnde Standsicherheit und das Ersaufen des Grubengebäudes, Aktiv-Druck, "Asse-Gruppe", Jürgens, Wilhelm-Raabe-Str. 2, 3300 Braunschweig
- KALKA, N., 1963 Tektonische Analyse des Asse-Heeseberg-Zuges, Dissertation, TH Braunschweig 1963
- KÖRNER, W., 1971 Sicherheitstechnische Untersuchungen zur Bituminierung radioaktiver Abfälle,
DAGEN, A., Staatl. Zentrale für Strahlenschutz: SZS - 8 (1971)
- KEZDI, A., 1969 Handbuch der Bodenmechanik, Bd. I Bodenphysik, VEB-Verlag für Bauwesen Berlin
- MAUTHE, F., 1979 Probleme und Risiken bei der geplanten Einlagerung radioaktiver Abfälle in einem nordwestdeutschen Salzstock,
Mitteilungen aus dem Geologischen Institut der Universität Hannover, Heft 18
- PROSKE, R., 1977 Beiträge zur Risikoanalyse eines hypothetischen Endlagers für hochaktive Abfälle,
Dissertation, TU Clausthal 1977
- RINGWOOD, A.E., 1978 Safe disposal of high level nuclear wastes: A new strategy,
Australian National University Press, Canberra, Australia and Norwalk, Conn. U.S.A. 1978
- SEEDORF, H.H., 1955 Reliefbildung durch Gips und Salz im niedersächsischen Bergland,
Walter Dorn Verlag, Bremen-Horn
- SPACKELER, G., 1950 Lehrbuch des Kali- und Steinsalzbergbaues
Verlag von Wilhelm Knapp, Halle

- STAUPENDAHL, G., 1974 Zur Standsicherheit des Salzberg-
BORCHERT, H., werkes Asse II als Endlager für
DÜRR, K., radioaktive Abfälle,
KÜHN, K., GSF-Bericht T 51 , GSF s.o.
- TRUSHEIM, F., 1956 Über Halokinese und ihre Bedeutung
für die strukturelle Entwicklung
Norddeutschlands,
Zeitschrift der Deutschen Geolo-
gischen Gesellschaft bd. 109/1
- TU aktuell 6/79 Mitteilungen des Rektors für die
Mitglieder und Angehörigen der
TU Braunschweig, Juni 1979
- VIEHL, PTB, 1979 "Sicherstellung und Endlagerung
radioaktiver Abfälle",
Vortrag auf VDE - Veranstaltung am
4.6.1979, TU Braunschweig
- WOSNIK, PTB, 1979 "Arbeiten im Rahmen des hydrogeo-
logischen Untersuchungsprogrammes
Gorleben", Kurzfassung eines Vor-
trages auf einer Informationsver-
anstaltung des Bundes am 31.8.79
in Lüchow