

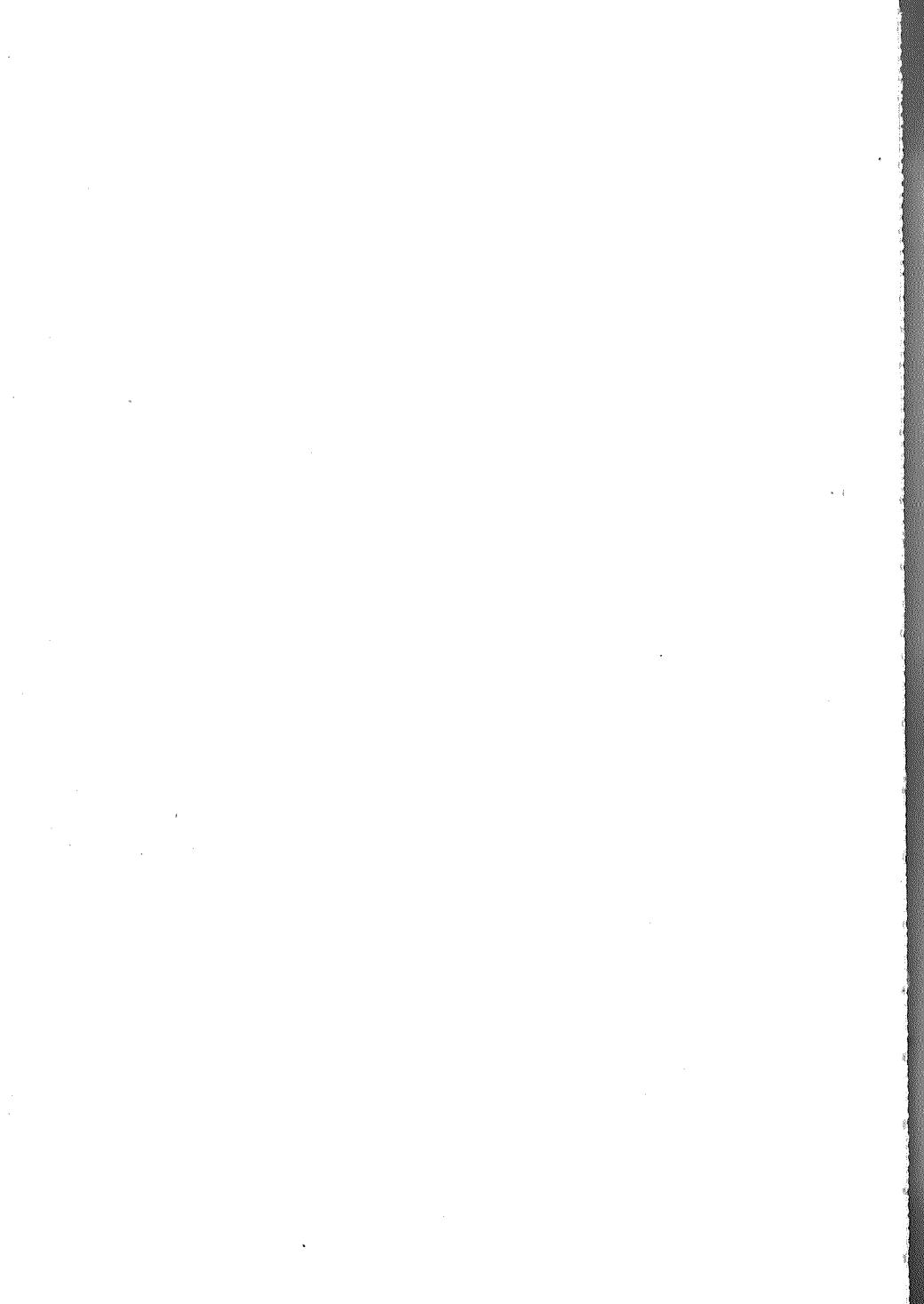
HYDROGEOLOGISCHE FRAGEN BEI DER ENDLAGERUNG
RADIOAKTIVER ABFÄLLE

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften

vorgelegt von Dipl. -Chem. Ernst-Peter Uerpmanne
aus Langenberg / Rheinland

genehmigt von der
Fakultät für Natur- und Geisteswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung : 25.1.1980



Wolkersdorfer

HYDROGEOLOGISCHE FRAGEN BEI DER ENDLAGERUNG

RADIOAKTIVER ABFÄLLE

RWE Energy AG, Abt. Chem
Dr. Verpwmann, Verfahrens
technik

45117 Essen

0201/122 3805
X Dissertation 1224859

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften

vorgelegt von Dipl. -Chem. Ernst-Peter Uerpman
aus Langenberg / Rheinland

genehmigt von der
Fakultät für Natur- und Geisteswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung : 25.1.1980

Berichterstatter: Prof. Dr. H. Beckmann

Mitberichterstatter: Prof. Dr. H. Bottke
Prof. Dr. K.-J. Leers

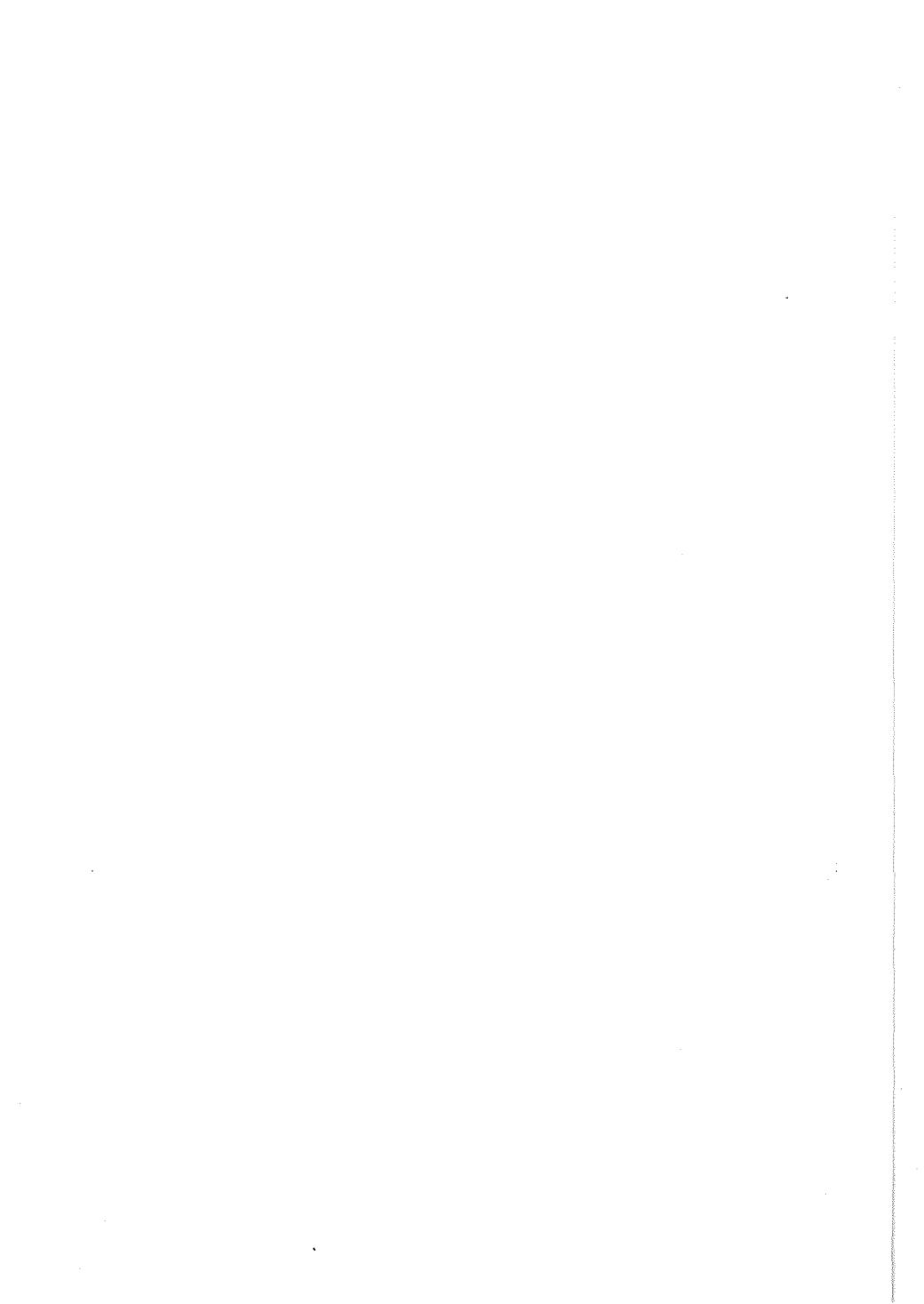
Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde im Institut für Tieflagerung der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München, angefertigt.

Ich danke allen Kollegen, die zum Gelingen mit beigetragen haben, insbesondere dem Leiter der Wissenschaftlichen Abteilung, Herrn Dr. K. Kühn, für seine fördernde Unterstützung und Frau I. Kämmerer für die sorgfältige Ausführung der Schreibarbeiten.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H. Beckmann für die Betreuung und sein stetes Interesse am Fortgang der Arbeit.

Den Herren Prof. Dr. H. Bottke und Prof. Dr. K.-J. Leers danke ich für die Übernahme der Korreferate.



Inhaltsverzeichnis

Seite

| | | |
|---------|---|----|
| 1. | Einleitung und Problemstellung | 1 |
| 2. | Endlager im tieferen geologischen Untergrund | 4 |
| 2. 1 | Endlager in Tonschichten | 5 |
| 2. 2 | Endlager in Festgesteinen, insbesondere in Graniten und in Granitgneisen | 6 |
| 2. 3 | Endlager in Salzformationen | 7 |
| 3. | Wasservorkommen in tieferen geologischen Schichten | 10 |
| 4. | Wassereinbrüche in Salzbergwerke | 14 |
| 4. 1 | Das Abteufen von Salzschächten | 14 |
| 4. 2 | Ursachen von Wassereinbrüchen in Salzbergwerken | 19 |
| 4. 2. 1 | Wasserzuflüsse durch undichten Schachtausbau | 19 |
| 4. 2. 2 | Zutritte von Salzläufen durch Salzsicherheitspfeiler aus erstoffenen Nachbaranlagen | 22 |
| 4. 2. 3 | Zutritte durch zu geringe Salzüberdeckung im Hangenden | 23 |
| 4. 2. 4 | Fehler durch den Abbau von kainitischen Kalisalzen und anderen "Hutsalzen" im oberen Teil von Salzstöcken | 25 |
| 4. 2. 5 | Zuflüsse aus dem Hauptanhidrit | 26 |
| 4. 2. 6 | Zuflüsse aus dem Liegenden | 28 |
| 4. 2. 7 | Zuflüsse aus dem Salzspiegel-, Salzhang- oder Gipshutbereich | 29 |
| 4. 2. 8 | Andere Ursachen des Vollaufens von Salzbergwerken | 31 |
| 4. 3 | Lösevorgänge in Salzlagerstätten ozeanischen Ursprungs | 33 |

| | Seite |
|---|-------|
| 4. 3. 1 Der hypothetische Störfall eines Wassereinbruchs | 43 |
| 4. 3. 2 Lösevorgänge bei Auftreten anderer Mineralien | 45 |
| 4. 3. 3 Die Einstellung von thermodynamischen Gleichgewichten | 46 |
| 4. 4 Messungen in vollgelaufenen Salzbergwerken | 48 |
| 4. 4. 1 Temperaturprofile in Schachtröhren vollgelaufener Salzbergwerke | 50 |
| 4. 4. 2 Konzentrationsverhältnisse in vollgelaufenen Schachtröhren | 59 |
| 5. Ausbreitungbarrieren innerhalb geologischer Strukturen von Salzsätteln und Salzstöcken | 61 |
| 5. 1 Zur Schwerlöslichkeit der radioaktiven Abfälle | 64 |
| 5. 2 Auslaugbarrieren in der Verpackung | 66 |
| 5. 2. 1 Metallische Behälter | 67 |
| 5. 2. 2 Anorganische nichtmetallische Fixierungsmaterialien | 69 |
| 5. 2. 2. 1 Hydraulische Bindemittel | 69 |
| 5. 2. 2. 2 Anorganische Gläser | 73 |
| 5. 2. 2. 3 Dichte keramische Werkstoffe | 77 |
| 5. 2. 3 Organische Fixierungsmaterialien | 80 |
| 5. 2. 4 Kombinierte Verpackungen | 81 |
| 5. 3 Einlagerung in Abbaukammern | 82 |
| 5. 4 Einlagerung in Kavernen | 83 |
| 5. 5 Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Bohrlöchern | 89 |

| | Seite |
|--|-------|
| 5. 6 Aufgaben und Möglichkeiten des Versatzes | 90 |
| 5. 6. 1 Stützwirkung des Versatzes | 91 |
| 5. 6. 2 Adsorbierende Eigenschaften des Versatzes | 92 |
| 5. 6. 3 Versatz als Sperre konvektiver Stoffausbreitung | 93 |
| 5. 6. 4 Auswahl von Versatzmaterialien | 95 |
| 5. 6. 4. 1 Hydraulischer Versatz | 96 |
| 5. 6. 4. 2 Versatz mit Schüttgut | 97 |
| 5. 6. 4. 3 Versatz mit hydraulischen Bindemitteln | 98 |
| 5. 6. 4. 4 Versatz mit gespannten Gasen | 99 |
| 5. 6. 5 Versatz in verschiedenartigen untertägigen Hohlrbaumformen | 105 |
| 5. 6. 5. 1 Versatz von Kammern | 105 |
| 5. 6. 5. 2 Versatz von Strecken | 106 |
| 5. 6. 5. 3 Verschluß von Bohrlöchern | 107 |
| 6. Zusammenfassung der geologischen und hydrogeologischen Kriterien für die Beurteilung der Eignung einer salinaren Formation als Salzstock-Endlager | 112 |
| 6. 1 Geologischer Aufbau | 113 |
| 6. 2 Hydrogeologische Verhältnisse | 114 |
| 7. Zusammenfassung | 116 |
| 8. Literaturverzeichnis | 120 |



1. Einleitung und Problemstellung

Bei der Energiegewinnung durch Kernspaltung in Leichtwasser-, Hochtemperatur- und schnellen Brutreaktoren fallen zunehmend radioaktive Abfälle an. Nach einer Betriebszeit von 2 - 3 Jahren werden die Brennelemente in den Reaktoren ausgetauscht.

In Wiederaufarbeitungsanlagen werden die entstandenen Spaltprodukte von dem wiederverwendbaren Kernbrennstoff chemisch getrennt. Die Spaltprodukte werden in eine endlagerfähige Form überführt. Die beim Betrieb von Kernreaktoren, der Brennelementfertigung und der Wiederaufarbeitung anfallenden radioaktiven Abfälle müssen je nach der Halbwertszeit ihres Nuklidinhalts verschieden lange Zeiträume aus dem Biozyklus ferngehalten werden. Bis zum Zerfall auf unbedenkliche Gehalte können Zeiträume von einigen Jahrzehnten bis zu Jahrtausenden erforderlich sein.

Neben den bei der Energiegewinnung entstehenden radioaktiven Abfällen fallen bei medizinischen Anwendungen sowie wissenschaftlichen und technischen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben ständig größer werdende Mengen radioaktiver Abfälle an.

Zur Zeit werden in verschiedenen Ländern die radioaktiven Abfälle auf folgende Art beseitigt:

- Versenkung im Meer
- Lagerung in ariden Gebieten
- Verdünnung und Einleitung in Flüsse und Ozeane
- Lagerung im tieferen geologischen Untergrund.

In der vorliegenden Arbeit soll gezeigt werden, wie der sichere Abschluß endgelageter radioaktiver Abfälle durch ein Hintereinander-schalten verschiedener Barrieren von der Biosphäre erreicht werden kann. Als wichtigster langfristig wirkender Transportmechanismus wird eine Ausbreitung radioaktiver Nuklide über Grundwässer angesehen. Demzufolge kommt der Errichtung und Bewertung verschiedener Barrieren gegen eine Ausbreitung auf dem Wasserpfad große Bedeutung zu. Aus bekannten Gründen werden Salzvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland als am besten geeignete Endlagerformationen angesehen. Diesen muß deshalb die größte Aufmerksamkeit gewidmet werden. Aus der Wasserlöslichkeit der Salzgesteine kann bei Nichtbeachtung bergmännischer und hydrogeologischer Erfahrungen die Gefahr nicht beherrschbarer Wasserzuflüsse in das Endlager erwachsen. Deshalb muß hier auf das Volllaufen von Salzbergwerken und die sich daran anschließenden Vorgänge ausführlich eingegangen werden.

Die Auslaugung radioaktiver Nuklide wird vor allem von den Eigenschaften der endgelagerten Abfälle und außerdem von der Qualität der restlichen Verfüllung der Hohlräume nach einer Einlagerung beeinflußt. Demzufolge werden diese Fragen ebenfalls ausführlich behandelt. Eine Reihe verschiedener Barrieren zum Verschluß untertägiger Hohlräume werden vorgeschlagen und diskutiert. Die wichtigste Barriere besteht in der Stabilität der jeweils ausgewählten Endlagerstruktur. Mögliche Anordnungen der Lagerhohlräume, die auch nach der Einlagerung noch eine hohe Stabilität besitzen und behalten müssen, werden aufgeführt. Es werden Vorschläge gemacht, wie die endgelagerten Abfälle selbsttätig - auch über geologische Zeiträume hinweg - vor einem Kontakt mit freiem Wasser oder Salzlösungen geschützt werden können.

Die Versenkung im Meer und die oberflächennahe Aufbewahrung radioaktiver Abfälle hat in den letzten Jahren in immer mehr Ländern Zweifel an den langfristigen Sicherheitsaspekten aufkommen lassen.

Aus diesen Gründen werden in einer Reihe von Ländern intensive Versuche angestellt, auf dem eigenen Territorium geeignete geologische Schichten zu finden, die sich für eine sichere Endlagerung nutzen lassen. In diese Untersuchungen werden Salzlagerstätten, Felsmassive, Tone und Tonschiefer sowie erschöpfte Erdöllagerstätten einbezogen. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Forschungsobjekte in den einzelnen Ländern auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle im tiefen geologischen Untergrund, K. Kühn (1977), G. Dreschoff (1976):

| Steinsalz- lager- stätten | Kristalline Gesteine | Tone und Ton- schiefer | Sedimente des Meeres- bodens | erschöpfte Erdöl- lagerstätten | Sedimentäre Eisenerz- lagerstätten |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|
| Bundesrepublik Deutschland | Frankreich | Belgien | Japan | Bundesrepublik Deutschland | Bundes- republik Deutschland |
| Dänemark | Groß- britannien | Italien | USA | USA | |
| DDR | Kanada | USA | Groß- britannien | | |
| Niederlande | Schweden | | | | |
| USA | USA | | | | |

Tabelle 1: Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten verschiedener Staaten in der Auswahl möglicher Endlagerformationen

2. Endlager im tieferen geologischen Untergrund

Die einzulagernden Abfälle sind teilweise über mehrere tausend Jahre sicher von der Biosphäre zu trennen. Es ist deshalb nach einer optimalen Form des Lagers zu suchen. Die ältesten oberirdischen Bauwerke sind etwa achttausend Jahre alt. Sie unterliegen der Verwitterung durch das Klima, der Zerstörung durch kriegerische Handlungen oder durch Naturereignisse, wie z.B. Erdbeben oder Überschwemmungen. Wollte man ein Endlager für radioaktive Abfälle an der Erdoberfläche einrichten, so müßte dieses Lager bis zum endgültigen Zerfall des Inhaltes instand gehalten und bewacht werden. Dies läßt sich nicht mit der nötigen Sicherheit für die erforderlichen Zeiträume realisieren.

Bei Endlagern im tieferen geologischen Untergrund sehen die Verhältnisse besser aus.

Bei geologischen Schichten lassen sich ihr Alter, ihre Entstehung und ihre wechselvolle geologische Geschichte genügend genau rekonstruieren. Häufig sind sie vor Jahrmillionen entstanden und haben äußere Einwirkungen durch Vulkanismus, Erdbeben, Landhebungen und Überflutung durch Meere mehr oder weniger unbeschadet überstanden. Daraus kann man den Schluß ableiten, daß sie nach einem Einlagerungsbetrieb von einigen Jahrzehnten bei einer entsprechenden Versiegelung ausreichend lange stabil bleiben können. Voraussetzung dafür ist, daß die gebirgsmechanische Stabilität der Struktur erhalten bleibt.

Nach der Stilllegung eines Endlagers bedarf es keiner weiteren Wartung oder Bewachung mehr, wenn mit genügenden Sicherheitsreserven zu Werke gegangen wird und wenn die Hohlräume im Anschluß an die Betriebszeit wieder ausreichend verfüllt werden.

So kann zukünftigen Generationen daraus auch keine Gefahr erwachsen, selbst wenn das Wissen um die eingelagerten Abfälle trotz entsprechender Vorsorge verloren gehen sollte.

Eine direkte Strahleneinwirkung ist völlig ausgeschlossen, da der räumliche Abstand von der Oberfläche üblicherweise mehrere hundert Meter beträgt. Die Kontamination von Grundwässern kann durch die im einzelnen beschriebenen Maßnahmen unterbunden werden.

Bergwerksschächte sind die einzigen Zugänge eines Endlagers. Diese werden nach der Betriebsphase wieder sorgfältig verfüllt. Es besteht dann keine Möglichkeit mehr, an die endgelagerten Abfälle zu gelangen. Sollte nach langer Zeit das Wissen über den genauen Ort der Schächte verloren gehen, so besteht nur eine geringe Wahrscheinlichkeit, daß die gleiche Struktur als Rohstoffquelle genutzt und erneut erschlossen wird. Zum Bergbau in diesen tiefen Schichten ist ein sehr hoher Stand der Technik erforderlich. Die Möglichkeit, daß dann eventuell noch vorhandene Restaktivitäten nicht rechtzeitig erkannt werden, ist unwahrscheinlich.

Darüber hinaus werden die Endlager nicht in Strukturen angelegt, die besonders wertvolle Mineralien enthalten.

2. 1 Endlager in Tonschichten

In verschiedenen Staaten werden nicht kompaktierte Tonvorkommen als geeignete Lagerformation untersucht (s. Tabelle 1). Tone können gegenüber Grundwasser sehr gut abdichtend wirken. Einige Tonmineralien wie z.B. Illit und Montmorillonit quellen bei Wasseraufnahme erheblich und drücken Grubenbaue in solchen Schichten im Laufe der Zeit zu.

Tone sind vorwiegend Schichtsilikate mit ausgeprägter Fähigkeit zum Austausch von Ionen. Dadurch können etwa ausgelaugte Radioisotope auf Zwischenschichtplätzen gebunden werden, so daß ihr Weitertransport in die Biosphäre unterbunden wird. Tone verhalten sich schon bei geringen Drücken plastisch und können radioaktive Abfälle in Bohrlöchern schnell allseitig umschließen. Allerdings ist die Druckfestigkeit von Tonen entsprechend gering. Dies macht unter Umständen einen vollständigen Ausbau der untertägigen Hohlräume erforderlich. Tongesteine in größeren Teufen kommen als Rohstoffe für den bergmännischen Abbau nicht in Frage.

*
Insgesamt bieten Tone, Tonsteine und Tonschiefer in größeren Teufen ein interessantes Entwicklungspotential für die Endlagerung. Da sie häufig mit großen Mächtigkeiten angetroffen werden, sind sie vor allem für die Staaten interessant, die nicht über geeignete Steinsalzlagerstätten verfügen.

2. 2 Endlager in Festgestein, insbesondere in Graniten und in Granitgneisen

In einigen Ländern werden Felsgesteine, vor allem Gneis- und Granitmassive, untersucht. So versucht man in Kanada geeignete Stellen im kanadischen Schild zu finden. In Schweden wurden verschiedene Standorte in Granit- und vor allem in Gneisformationen untersucht, KBS-Studie (1977).

Felsgesteine sind in aller Regel bei richtiger Dimensionierung sehr standfest. Allerdings verursacht die Auffahrung von untertägigen Hohlräumen erhebliche Kosten.

Bisher liegen in Schweden umfangreiche Erfahrungen aus dem Tunnel- und Kavernenbau in Granit vor (militärische Anlagen, Schutzräume, Wasserhaltanlagen, Garagen in Großstädten).

In günstigen tektonischen Gefügebereichen insbesondere postogen intrudierter granitischer Schmelzen bestehen vielfach weitständige und geschlossene Kluftsysteme. Hohlraumbauten in Nähe und unter dem Meeresspiegel beweisen dies. Granit ist als holokristallines Intrusivgestein nicht porös, insbesondere wenn für Endlager die Zone der Anwitterung mit Mikroporositäten der Feldspat- und Glimmeranteile vermieden und im frischen Granit Hohlräume vorgerichtet werden. Unbekannt ist bisher das Verhalten der Granite bei Temperaturerhöhungen nach Einlagerung hochradioaktiver Abfälle.

Eine vermehrte Rißbildung durch thermische Ausdehnung wird befürchtet. Deshalb werden übertägige Zwischenlagerzeiten der hochradioaktiven Abfälle mit Wasser- oder Luftkühlung über ca. 30 Jahre vorgesehen. Da klüftige Festgesteine sich nicht plastisch verformen können, schließen sich auch deren Spalten und Klüfte nicht von selbst. Sie können vielmehr als Transportwege für zirkulierendes Grundwasser dienen. Die Ionenaustauschfähigkeit ist gering. Deshalb schlägt das schwedische Konzept z. B. die Verfüllung der untertägigen Hohlräume mit Bentonit vor, KBS-Studie (1977).

In Schweden geht man unter anderem davon aus, daß sich wegen der Klüftigkeit des Felsmassives der Zutritt von Grundwasser auf Dauer nicht verhindern läßt. So werden die wichtigsten Sicherheitsbarrieren in einer aufwendigen Verpackung und Verfüllung gesehen.

2. 3 Endlager in Salzformationen

Die Endlagerung in Salzstöcken, Salzkissen und Salzlagern wird international als sehr gut geeignet eingeschätzt. Für diese Einschätzung

gibt es eine Reihe von Gründen, E. Albrecht et al. (1969), E. Albrecht (1969), E. Albrecht (1972), R. J. Bradshaw & W. C. McClain (1971), E. Hofrichter (1978), K. Kühn & E. Albrecht (1971).

1. Salzlagerstätten treten sowohl in flacher als auch in steiler Lagerung auf. Sehr häufig weisen sie Mächtigkeiten von über hundert Metern des fast homogenen Steinsalzes der Staßfurt-Serie des Zechstein 2 auf. Im Salzgestein können mit verhältnismäßig geringen Kosten große und gebirgsmechanisch stabile Hohlräume ohne Ausbau aufgefahren werden. Steinsalz verhält sich unter hohen Drücken plastisch. Es besitzt die Eigenschaft, offene Spalten oder Klüfte, die aus Abbauvorgängen entstanden sind, wieder zu verschließen.
2. Salzstrukturen sind meist von der Biosphäre isoliert und im Idealfall nach außen durch mächtige Ton- und Mergellagen vom Grundwasser getrennt.
3. Salzgesteine sind im natürlichen Spannungszustand undurchlässig für Gase und Flüssigkeiten. Diese Eigenschaft kann durch das Auftreten von Erdöl und Erdgas unter Salzlagerstätten belegt werden. In einigen Salzlagerstätten wird hochgespanntes Kohlendioxid angetroffen, welches seit Jahrtausenden im Salz eingeschlossen ist. Es wird erst freigesetzt, wenn in derartige Vorkommen hineingebohrt wird. Diese Gefahren sind bekannt und durch entsprechende Sicherheitsvorkehrungen lassen sich auch derartige Salzgesteine abbauen. Wegen ihrer Dichtigkeit werden Gasdruck- und Ölspeicherkavernen in Salzformationen angelegt.
4. Salz besitzt eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit, welche ca. zweibis dreimal höher als die anderer Gesteine ist. Bei der Endlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle ist dieses von

großer Bedeutung, da die Wärme gut an das Salzgestein abgeleitet werden kann. Dadurch lässt sich die Zeit einer übertägigen Zwischenlagerung der Abfälle auf ca. 10 Jahre begrenzen.

5. Durch das Einrichten von Endlagern in Salzformationen werden keine Rohstoffe blockiert. Für die Bundesrepublik Deutschland wird mit der Endlagerplanung in Salzstöcken, in denen die Kalilager der Leine-Serie des Zechstein 3 nicht ausgebildet sind, eine Verminderung K_2O -reicher Kalisalzvorräte vermieden.
6. Im deutschen Kali- und Steinsalzbergbau sind eine große Zahl von Bergwerken durch Wasser- oder Laugeneinbrüche verloren gegangen. Die einzelnen Ursachen derartiger Ereignisse sind in der geologischen Struktur, Fehlern bei der Abbauführung, der unzureichenden Kenntnis der hydrogeologischen Gegebenheiten der Deckschichten oder bisweilen auch liegenden Schichten und vor allem in den fehlenden Erfahrungen während der Anfangszeit des deutschen Kalibergbaus zu sehen.
7. Bei der Errichtung von Endlagern in Salzformationen stellt die Sicherheit vor einem Wasser- oder Laugeneinbruch eine der Kernfragen dar.

Dies wird nach R. D. Walton (1976) auch für die zumeist flachliegende, aber räumlich weit ausgedehnte, permische Salzformation im SW der USA hervorgehoben. Hier werden in Neu Mexico geologische Bereiche ausgewählt, in denen im Delaware-Basin die Salzformation hydrogeologisch abgedichtet und salzpetrographisch homogen ist. Ausgeschlossen bleiben Räume mit Salzbergbau und mit Netzen ehemaliger Erkundungsbohrungen, sowie auch Räume rezenter tektonischer Aktivitäten mit Bruchtektonik und Erbebenhäufigkeiten. Von Bedeutung für diese Auswahl ist die große Ausdehnung der permischen Salinarformation unter Teilen der Staaten Arkansas, Oklahoma, Texas, Colorado und Neu Mexico.

3. Wasservorkommen in tieferen geologischen Schichten

Zwischen der Erdoberfläche und dem Grundwasserspiegel liegt die von Bodenluft erfüllte Zone. Innerhalb dieser Zone können nach K. Kegel (1950) der Spiegel des geschlossenen Kapillarwassers und der Spiegel des offenen Kapillarwassers unterschieden werden. Ersterer liegt etwa in der Tiefe bis zu der von der Erdoberfläche aus durchgehende Luftporenysteme reichen. Unterhalb dieser Tiefe bis zum Grundwasserspiegel treten vorwiegend geschlossene Luftporen auf. In ungleichporigen Böden kann sich über dem Niveau des geschlossenen Kapillarwassers offenes Kapillarwasser in feinporigen Bereichen bilden. Das Kapillarwasser steht mit dem Grundwasser in Verbindung. Es bildet die Transportwege für die versickernden Niederschläge. Die durch Anstiege des Grundwasserspiegels komprimierte Bodenluft entweicht über grobporige Bereiche. In Trockenzeiten kann das Kapillarwasser das Grundwasser anzapfen und so den Nachschub für die oberflächennah verdunstende Feuchtigkeit bereitstellen. Die Bewegungsvorgänge in den Grundwasservorkommen werden durch die Druckverhältnisse und die Fließwiderstände in den durchflossenen Gesteinen bestimmt.

Bewegungen des Grundwassers durch Dampfblasenbildung, wie sie in Geisiren auftreten werden hier nicht betrachtet.

Der hydrostatische Druck wird bekanntlich durch

$$p = g \cdot \gamma \cdot h$$

bestimmt, wobei p der hydrostatische Druck, g die Gravitationskonstante, γ das spezifische Gewicht und h die Höhe des Fluids darstellt.

Druckunterschiede in benachbarten Grundwasservorkommen können durch Änderung des spezifischen Gewichtes infolge von Temperatur- oder Konzentrationsänderungen hervorgerufen werden. In hydrologisch miteinander verbundenen Grundwasserhorizonten können, namentlich in der Nähe von Salzvorkommen, verschieden konzentrierte Grundwässer übereinander auftreten. Eine vertikale Verschiebung der flüssigen Grenzflächen führt ebenfalls zu Druckänderungen in den Grundwasserleitern.

Die im Untergrund eines Grundwasserstromes befindlichen Gebirgsschichten sind meist praktisch wasserundurchlässig. Sind die Schichten oberhalb des Grundwasserspiegels durchlässig, so liegt "offenes" Grundwasser vor. Wird das Grundwasser von wasserundurchlässigen Schichten, z. B. Ton oder Mergel überlagert, so liegt ein "geschlossenes" Grundwasser vor.

Die wasserdurchlässigen Schichten mit dem geschlossenen Grundwasser verhalten sich wie kommunizierende Röhren. Das Grundwasser kann Druck auf wasserundurchlässige Begrenzungsschichten ausüben. Es wird dann als "gespanntes" Grundwasser bezeichnet. In wasserdurchlässigen Materialien wie z. B. in Sanden und Kiesen, fließt der Grundwasserstrom rechtwinklig zu den Grundwasserisohypsen über den ganzen vom Grundwasser erfüllten Querschnitt. Die Geschwindigkeit hängt dabei vom Gefälle und vom Fließwiderstand ab. Der gesamte Wassergehalt besteht aus dem fließfähigen Grundwasserstrom und dem adsorptiv gebundenen Haftwasser.

In wasserdurchlässigen, festen Gesteinen ist das Grundwasser überwiegend auf Klüften, Spalten oder in Schlotten anzutreffen. Die Ursachen zur Bildung der offenen Fließwege liegen häufig in tektonischen Vorgängen begründet. In löslichen Gesteinen, vor allem des Zechsteins, sind auch langandauernde Lösevorgänge an der Ausbildung der Kluft-

systeme beteiligt. Je unregelmäßiger und weitmaschiger derartige Kluftsysteme sind, desto schwieriger sind die Grundwasserverhältnisse in ihnen zu erfassen. Da die Fließwiderstände in Klüften im allgemeinen niedriger sind als Fließwiderstände in porösen Gesteinsschichten, so sind auch die in Klüften gemessenen Fließgeschwindigkeiten entsprechend größer.

In der Tabelle 2 sind verschiedene Fließgeschwindigkeiten einander gegenübergestellt, K. Kegel (1950), H. Schneider (1973):

| Formation | Art des Grundwassers | Geschwindigkeit des Grundwassers | |
|--|----------------------|----------------------------------|-----|
| Schotterströme Nordsachsens | Porenwasser | 2, 16 | m/a |
| Sehr feinkörniger Dünensand Haarlem | Porenwasser | 5,0 - 5,5 | m/a |
| Kiese | Porenwasser | 10 - 12 | m/d |
| Rheinalt bei Straßburg | Porenwasser | 7 | m/d |
| feinkörnige Deckgebirgs- sande über nordl. Braunkohle | Porenwasser | 1 - 3 | m/d |
| Deckgebirgskiese über nordl. Braunkohle | Porenwasser | 7 - 15 | m/d |
| Buntsandstein | Kluftwasser | 34 - 173 | m/h |
| Muschelkalk | Kluftwasser | 46 - 136 | m/h |
| Mittlerer Keuper | Kluftwasser | 115 - 186 | m/h |
| Weißjura | Kluftwasser | 64 - 150 | m/h |

Neben den Grundwasserströmen in Poren und auf Klüften treten bei tektonisch beanspruchtem porösem Gestein auch Mischformen der Grundwasserströmung auf.

Druckänderungen pflanzen sich im geschlossenen Grundwasser mit Schallgeschwindigkeit fort. Im offenen Grundwasser erfolgt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Druckänderungen mit einer etwas größeren als der Fließgeschwindigkeit. Vom Ort der Druckerhöhung breitet sich eine Welle im ungestörten Porenwasserleiter kreisförmig aus.

In tiefer liegenden geologischen Schichtverbänden ist mit einer Abnahme der Porenräume und Klufträume von Festgesteinen zu rechnen. Diese beruht auf zunehmender Kompaktion und diagenetischer Verfestigung von Sedimenten durch Mineralneubildungen aber auch auf erdgeschichtlich unterschiedlichen tektonischen Verformungsdrücken. Die Fließwiderstände der Porenwässer sind also größer, so daß Fließvorgänge in größeren Teufen wesentlich langsamer ablaufen als in oberflächennahen Zonen, H. Beckmann (1976).

4. Wassereinbrüche in Salzbergwerke

Mit dem Abteufen des Schachtes von der Heydt am 4.1.1851 und dem Schacht von Manteuffel am 31.1.1852 begann ein neuer Abschnitt der Salzgewinnung in Deutschland, D. Hoffmann (1972). Bis dahin wurde Salz im wesentlichen aus Solquellen und Salzbohrungen durch Verkochen des Wassers gewonnen. Mit der nun einsetzenden Gewinnung in Bergwerken wurden in Deutschland die ersten Erfahrungen des Salzbergbaus gesammelt, H. Münster (1909).

Das Ziel des folgenden Kapitels ist es, die bisher in den etwa 120 Jahren gemachten Erfahrungen bei Wassereinbrüchen zusammenzutragen und auf die Verhältnisse, wie sie bei derendlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen erwartet werden können, anzuwenden. Dieses schließt ein, daß über Wassereinbrüche in Salzbergwerken ausführlich berichtet werden muß. Nur so lassen sich die Fehler, welche im Umgang mit dem Salzgebirge begangen wurden, sowie potentielle Gefährdungspunkte erkennen. Bei der Errichtung eines Endlagers in einem unverritzten Salzstock lassen sich die erkannten Fehler vermeiden.

4.1 Das Abteufen von Salzschächten

Bereits beim Abteufen gerieten etwa 46 von insgesamt ca. 285 auf Salz abgeteuften Schächte in so große Schwierigkeiten, daß sie nicht zu Ende geteuft werden konnten. Dies gilt auch für nicht in den Salinar- folgen erfolgte Wasser- und Schwimmsandeinbrüche.

Diese Schwierigkeiten hatten technische, hydrogeologische und wirt-

schaftliche Ursachen. Dieses wird an Hand von Beispielen im einzelnen erläutert.

Bei 24 dieser mißlungenen Abteufversuche sind von W. Gimm (1968) Gründe genannt. So wurden acht Abteufversuche mit dem Ausbruch des Ersten Weltkrieges eingestellt. In den Jahren von 1912 bis 1914 wurden noch in der Zeit des Kalisalzmonopols im Gebiet des Deutschen Reiches 99 Schächte auf Salzlagerstätten geteuft. In den davorliegenden 56 Jahren waren insgesamt 116 Schächte abgeteuft worden. Es erfolgte innerhalb weniger Jahre eine Verdoppelung der Salzschächte, ohne daß die Absatzchancen für Salz auch nur annähernd im gleichen Maße gestiegen wären. Die meisten der bei Kriegsausbruch aus wirtschaftlichen Gründen eingestellten Teufarbeiten wurden nach dem Ende des Krieges nicht wieder aufgenommen, da die Beseitigung des deutschen Kalisalzmonopols und die enorm gewachsene Zahl an Schachtanlagen von 1923 bis 1926 zur Stilllegung vieler weiterer Produktionsbetriebe führte.

Neben diesen wirtschaftlichen Gründen, welche die Aufgabe der Teufarbeiten erzwangen, waren es in sieben Fällen Zuflüsse aus dem Buntsandstein, welche nicht beherrscht werden konnten. In vier Fällen hatten die Wässer, welche die Teufarbeiten unmöglich machten, ihren Ursprung im schwierig zu durchteufelnden Gipshutbereich oberhalb des Salzspiegels oder Salzhanges, welcher durch wiederholtes Sümpfen immer stärker zermürbt wurde. In drei Fällen wird von nicht beherrschbaren Zuflüssen aus dem zumeist klüftigen Gipshut berichtet und in 2 Fällen handelte es sich um starke, nicht zu beherrschende Zuflüsse aus den oberen Deckgebirgsschichten, die aus Sanden und Kiesen bestanden. Bei etwa 20 weiteren bekanntgewordenen Einstellungen der Teufarbeiten sind keine näheren Einzelheiten mitgeteilt.

Aus der Abbildung 1 wird deutlich, daß 29 Schächte vor 1913 vornehmlich aus wirtschaftlichen Gründen nicht zu Ende geteuft wurden.

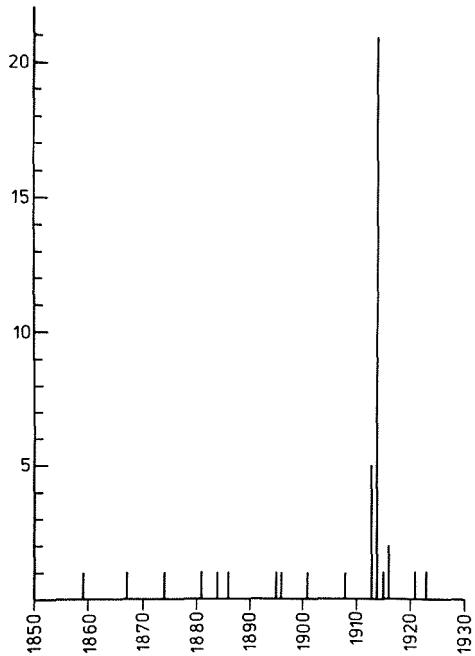


Abb. 1: Kurz vor dem Ausbruch des Ersten Weltkrieges geht die Zahl der aufgegebenen Schachtteufversuche auf Kali-salze steil in die Höhe.

Aus der Abbildung 2 läßt sich ersehen, daß bis zum Jahre 1884 die fünf bis dahin mißglückten Versuche in geringer Teufe scheiterten. Etwa zwei Drittel aller Teufversuche wurden bei weniger als 120 m aufgegeben, wofür eher wirtschaftliche als technische Gründe sprechen, wie die Zahl von 16 aufgegebenen Versuchen zwischen 1913 und 1921 bei weniger als 120 m Teufe zeigt.

In einer Teufe von 200 bis 400 Metern wurden bei 12 Schächten die Teufarbeiten eingestellt. In Teufen über 550 m wurden nur 3 Schächte aufgegeben.

In den Jahrzehnten nach der großen Stilllegungsaktion von Kali- und Salzbergwerken der zwanziger Jahre wurden nur noch wenige Schächte neu abgeteuft. In keinem Falle mußten Teufarbeiten endgültig eingestellt werden, wenngleich auch beim Ausbruch des Zweiten Weltkrieges die Teufarbeiten für den Schacht Hansa III für mehrere Jahre ruhten. Dieser Erfolg ist im wesentlichen in einer verbesserten Bohrtechnik und in der genaueren Kenntnis des Deckgebirges sowie der Salzstöcke durch geophysikalische Untersuchungen zu sehen. Neben dem Teufen im herkömmlichen Verfahren mit Bohr- und Schießarbeit stehen heute leistungsfähige Gefrierteufverfahren sowie Bohrtechniken zur Herstellung von Schächten zur Verfügung.

Bei Kenntnis des Deckgebirges durch vorangegangene Bohrungen und geophysikalische Messungen kann heute das jeweils bestgeeignete Schachteufverfahren ausgewählt und angewandt werden. Durch den Einsatz moderner Bohrtechnik beim Abteufen läßt sich die beim Abteufen im Gefrierverfahren bisweilen auftretende Auflockerung der schachtnahen Schichten vermeiden. Die Zerklüftung der Schachtwandung durch die Volumenausdehnung des Wassers beim Gefrieren führte früher häufig zu Schwierigkeiten beim Ausbau der Schächte und zu Wasserzuflüssen im Schacht.

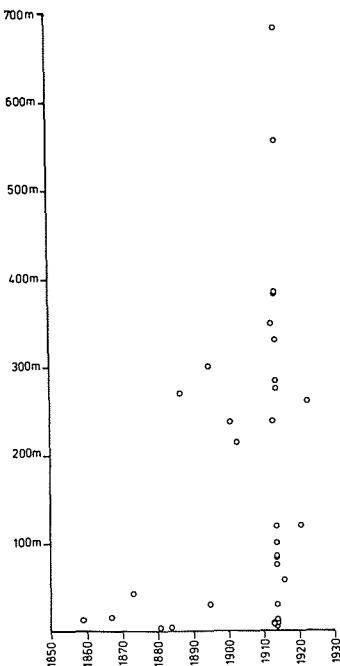


Abb. 2 : In den ersten Jahrzehnten des deutschen Kalibergbaus scheiterten die Teufversuche zumeist in geringen Tiefen. In den Jahren 1913 bis 1914 wurden viele Teufversuche auch nach Erreichen größerer Teufen aus wirtschaftlichen Gründen eingestellt.

4.2

Ursachen von Wassereinbrüchen in Salzbergwerken

Nachdem im vorstehenden Teil 4.1 über die beim Abteufen von Schächten aufgetretenen Schwierigkeiten berichtet wurde, welche zur Aufgabe der Teufversuche führten, sollen nun die Ursachen untersucht werden, welche in der Vergangenheit bei produzierenden oder stillgelegten Werken zu nicht beherrschbaren Wassereinbrüchen führten. Mit wenigen Ausnahmen, in denen die voll Wasser oder Salzlösungen stehenden Salzbergwerke wieder gesümpft werden konnten, bedeuteten Wassereinbrüche die Aufgabe der Schachtanlagen und damit auch den Verlust bedeutender Rohstoffvorräte.

Die Wassereinbrüche lassen sich auf einige wenige Ursachen zurückführen, welche in den folgenden Kapiteln abgehandelt werden.

4.2.1

Wasserzuflüsse durch undichten Schachtausbau

Im Schacht werden die wasserführenden Schichten des Deckgebirges, der Salzspiegel oder Salzhang, die löslichen Salzgesteine und manchmal auch Salzlösungen führernder Hauptanhidrit auf kürzeste Entfernung durchörtert. Die Wasserführung der Deckgebirgsschichten nimmt normalerweise von oben nach unten hin ab. Es treten aber häufig auch stark wasserführende Kluftzonen vor allem im Buntsandstein, im Unteren Muschelkalk oder im Plattendolomit des Zechstein auf.

In der Vergangenheit sind 13 Salzschächte infolge Undichtigkeiten des Schachtausbaus erstickt. Durch jahrzehntelange Auswaschungen besonders des kavernösen Salzspiegelbereichs traten häufig Hohlräume hinter den Tübbingsäulen oder der Ausmauerung auf. Diese Hohlräume waren mit

vorgesättigten Laugen gefüllt, welche noch Salze auf ihrem Wege nach unten aufzulösen vermochten. An undichten Stellen des Ausbaus oder am Mauerfuß traten diese Lösungen dann als schwer zu bekämpfende "Schachtlaugen" aus.

Bei jenen zehn Schachtanlagen, welche nach ihrer Stilllegung in den Jahren 1923 bis 1926 aus unbekannten Gründen und unbemerkt ersoffen sind, ist sicherlich ebenfalls ein hoher Prozentsatz auf Undichtigkeiten im Schachtbereich zurückzuführen.

W. Gimm (1968) führt die wichtigsten Schachtausbauarten an, Abbildung 3:

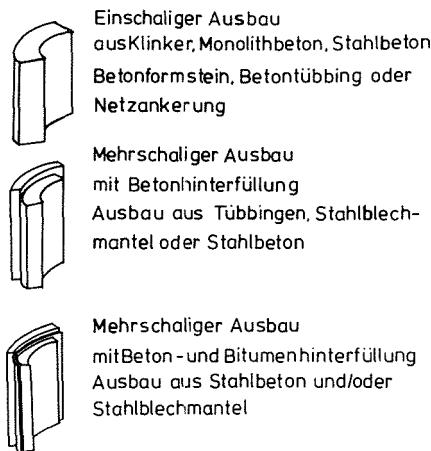


Abb. 3: Der mehrschalige Ausbau von Salzschächten bietet im schwierigen Deckgebirge mehr Sicherheit, vor allem, wenn er mit einer wasserabweisenden Hinterfüllung versehen ist.

Er weist darauf hin, daß eine Fuge von ca. 30 cm Bitumen, welches durch mineralische Zusätze auf ein spezifisches Gewicht $1,3 \text{ g/cm}^3$ eingestellt wurde, die direkte Beeinflussung der Gebirgsbewegung auf den Schachtausbau vermindern kann. Des Weiteren hat eine Temperaturänderung der einziehenden Wetter keinen Einfluß auf die Dichtigkeit, wie dies bei Tübbingausbau auftreten kann. Die Bitumenschicht hält die Salzlösungen vom inneren Ausbau fern. Da diese Wässer teilweise sehr aggressiv sind, wird auch eine Korrosion des Betons oder Stahls weitgehend vermieden.

Häufig ist der Bereich über dem Salzspiegel durch die seit geologischen Zeiträumen stattfindenden Subrosionsvorgänge mit Salzlösungen angefüllt. Diese stehen unter hydrostatischem Druck. Dies gilt besonders für Sulfatgesteine als Subrosionsreste über dem Salzspiegel.

Der Schachtausbau wurde bei den ersten Schächten von der Heydt und von Manteuffel noch in Holz ausgeführt. Später setzte sich der Ausbau mit gußeisernen Tübbingen durch. Die Fugen zwischen den einzelnen verschraubten Segmenten wurden mit Blechstreifen aus Blei abgedichtet. Auftretende Undichtigkeiten wurden mit Bleiwolle verstemmt. Die Instandhaltung einer Tübbingsäule erfordert ständige Aufmerksamkeit und Nacharbeiten. Durch jahreszeitlich bedingte Temperaturunterschiede des einziehenden Wetterstroms und durch Gebirgsbewegungen konnten in der Säule Spannungen auftreten. Als Folge war immer mit Wasserzuflüssen in Schachtnähe zu rechnen.

Bei der Renovierung des Ausbaus von Schacht Asse 2 wurde zwischen die ursprüngliche Tübbingsäule und die neu eingegebauten Stahlbetonvorbau-säule eine Bitumenschicht als Gleit- und Abdichtungsfuge eingebaut, E. Albrecht (1970), E. Albrecht (1972). Diese Maßnahme hat sich außerordentlich bewährt. Der Schacht ist seitdem trocken.

Die Frage des Schachtausbau ist daher für Anlagen, welche einer Endlagerung radioaktiver Abfälle dienen, besonders wichtig. Der Ausbau sollte völlig trocken sein, damit Schachtlaugen die Sicherheit der Anlage nicht gefährden. Neben der Dichtigkeit ist auch von vornherein großer Wert auf die Möglichkeiten einer zuverlässigen Verfüllung der Schachtröhren nach der Betriebszeit der Anlage zu legen.

4. 2. 2 Zutritte von Salzlaugen durch Salzsicherheitspfeiler aus ersoffenen Nachbaranlagen

Im Staßfurter Revier sind die Schächte von der Heydt, Manteuffel und Achenbach nach ihrer Stilllegung durch Salzlaugen aus der ersoffenen Schachtanlage Leopoldshall I / II im Jahr 1900 ersoffen.

Der Sicherheitspfeiler war an der schwächsten Stelle geringster Ausdehnung nur 28 m stark, D. Hoffmann (1972).

Zwölf Jahre später sind im Bereich des Staßfurter Salzsattels die Schächte Neustäffurt I, II und III durch Salzlaugen aus dem Schacht Achenbach vollgelaufen, welche sich über den klüftigen Hauptanhidrit einen Weg in die benachbarten Grubenräume gesucht hatten, der auf beiden Anlagen aufgeschlossen war. Die Sicherheitspfeiler zu ersoffenen Nachbarwerken wurden seitdem größer dimensioniert und betragen heute nach bergamtlichen Festlegungen 200 bis 400 Meter, teilweise auch noch mehr. Ihre Bemessung erfolgt daher nach geologischen Gegebenheiten.

Salz ist unter Gebirgsdruck zu plastischen Verformungen fähig. Durch diese Eigenschaft wird normalerweise das Auftreten offener Klüfte verhindert. Der Einfluß von gespannter Kohlensäure im Werra-Revier

und Vorkommen von Erdöl und Erdgas unter Salzüberhängen von Salzdiapiren zeigt, daß Salz über geologische Zeiträume hinweg als dicht anzusehen ist, obwohl Basaltschmelzen des tertiären Rhön-Vulkanismus im Werra-Kalirevier die flach liegenden Salinarserien der Werra-Serie des Zechstein 1 unter Spaltenbildung intrudiert haben. Hierfür ist aber im Vergleich zu den Salzstöcken NW-Deutschlands die ganz anders geartete bruchtektonische Position zu beachten.

Auf die Bemessung von Sicherheitspfeilern in Salzsätteln und Salzstöcken übertragen bedeutet dies, daß diese nach der Aufsättigung einer Salzlösung in einer abgesoffenen Nachbaranlage noch so ausgedehnt sein müssen, daß im Inneren des Sicherheitspfeilers ungestörte Gebirgsdruckverhältnisse bestehen und erhalten bleiben. So kann eine Bildung von Klüften durch bruchhafte Deformation in den chloridischen Salzmassen der Salzstockkerne und damit Laugenbewegungen nicht eintreten.

Für die Errichtung einer zentralen Endlagerstätte für radioaktive Abfälle in der Bundesrepublik hat die Frage von Sicherheitspfeilern zu erstoffenen Nachbaranlagen keine Bedeutung. Die Anlage soll in einem Salzstock errichtet werden, in dem noch kein Bergbau betrieben wurde.

4.2.3 Zutritte durch zu geringe Salzüberdeckung im Hangenden

Der Schacht Heldrungen II (Anna) ist 1926 durch den Einbruch von Tageswässern erstickt, da die schützenden Schichten des Leinesteinsalzes an einigen Stellen fehlten, D. Hoffmann (1972). Wenn wasserführende, poröse Schichten des Deckgebirges in den Bereich einer Auflockerungszone um offene Grubenbaue geraten, können sich Klüfte bilden oder vorhandene Klüfte zu Spalten erweitern. Das Deckgebirge ist im allgemeinen wesentlich spröder als die chloridischen Salze,

welche eine Verformung bruchlos ertragen können, sofern genügend Zeit für eine plastische Deformation zur Verfügung steht. Fehlen jedoch im Hangenden von Grubenbauern genügend mächtige Schichten aus Steinsalz, so können an chloridischen Salzen ungesättigte Wässer aus den Kluft- oder Poren speichern des Deckgebirges in die Grubenbaue eintreten. Die örtlichen Spannungen, welche bei Auffahren eines Grubengebäudes entstehen, werden nach den bisherigen Abbauerfahrungen durch eine Schicht von 100 bis 150 m aus kompaktem Steinsalz aufgefangen.

Bei der Auffahrung eines Endlagers für radioaktive Abfälle in einem unverritzten Salzstock wird zur Sicherheit ein Abstand von einigen hundert Metern zum Deckgebirge einzuhalten sein, um bruchhafte Deformationen sicher zu vermeiden. Bei einem produzierenden Bergwerk bestand das Ziel, die vorhandene Lagerstätte nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten innerhalb einer bestimmten Zeit vollständig abzubauen. Die Abbauführung wurde und wird so eingerichtet, daß bei vertretbaren Kosten soviel wirtschaftlich gewinnbare Salze wie möglich abgebaut werden können. In einem Endlager wird dagegen nur gerade soviel Salz wie zur Hohlraumgestaltung erforderlich, zu gewinnen sein. Die eigentlichen Endlagerbereiche werden im standfesten Steinsalz der Staßfurt-Serie des Sattelkerns aufgefahren, wo sie von den wasserführenden Horizonten des Deckgebirges durch große, unverritzte Salinarfolgen der jüngeren Salzbildungszyklen geschützt bleiben.

Für ein neu zu errichtendes Endlager ist ein Wassereinbruch durch eine zu geringe Salzüberdeckung daher auszuschließen.

4. 2. 4 Fehler durch den Abbau von kainitischen Kalisalzen und
anderen "Hutsalzen" im oberen Teil von Salzstöcken

Beim Betrieb der Gruben Staßfurt und Leopoldshall wurde neben Carnallitit und Steinsalz auch Kainit im Kammerbau gewonnen. Als Kainit bezeichnet man ein Gemenge aus Kainit ($KCl \cdot MgSO_4 \cdot \frac{11}{4} H_2O$) und Steinsalz, R. Kühn (1959). Kainit bildet sich durch die Einwirkung von Laugen auf Carnallitit. Der $MgCl_2$ -Anteil geht dabei in Lösung und wird in den Laugen entfernt, H. Borchert (1963). Aus dem zurückbleibenden Sylvin (KCl) und dem Kieserit ($MgSO_4 \cdot H_2O$) des ehemaligen Carnallitits entsteht das Kainit-Gestein, welches sich nach der Umwandlung wieder verfestigt, J. D'Ans & R. Kühn (1960). Es wird zumeist im oberen Teil von Salzstocklagerstätten angetroffen. Dieses Kaliumsalz ist besonders wertvoll, da es nur aufgemahlen zu werden brauchte und ohne weitere Behandlung der Landwirtschaft als Düngemittel dienen konnte. Da bei der Verarbeitung von Carnallitit große Mengen an $MgCl_2$ -haltiger Endlauge anfiel, deren Beseitigung erhebliche Schwierigkeiten machte, wurde der Kainit bevorzugt abgebaut. Anfänglich wurde auch aus Kostengründen auf ein Einbringen von Versatz in die Abbauhohlräume verzichtet. In der Grube Leopoldshall stellten sich bereits 1878 Druckerscheinungen an Pfeilern der Abbaukammern ein. Diese führten dann im Jahr 1879 zu Pfeilerbrüchen mit Gebirgschlägen, D. Hoffmann (1972).

In deren Folge drangen Laugen und Tageswässer aus dem Deckgebirge in die Grubenbaue ein. Diese führten zum Ersaufen der Schachtanlage.

Ähnliche Gewinnungsfehler wurden in der Folgezeit noch öfter begangen. Man wagte sich zumeist ohne Vorbohrungen zu nahe an die Salzstockrandzonen oder traf in Hochbohrungen wasserführenden Buntsandstein an. Da die Abbaukammern zumeist sehr groß waren, bildeten sich in deren Hangenden häufig Klüfte oder Spalten, welche sich nicht mehr abdichten ließen. Insgesamt sind so 8 Schachtanlagen abgesoffen, weil Grundwasser in Kainitabbaue der Hutzonen von Salzstöcken eingedrungen ist. Viele

dieser Schächte sind um die Jahrhundertwende voll Wasser gelaufen. Deshalb wurde später weitestgehend auf den mit hohem Risiko verbundenen Abbau dieser K_2O -reichen Hutsalze verzichtet. Die Grubenbaue wurden in größerer Entfernung vom Salzspiegel aufgefahrene und der Abbau beschränkte sich auf Carnallitit und Sylvinit in hydrogeologisch ungefährdeten Bereichen im Inneren der Salzsättel und Salzstöcke des nordwestdeutschen Kalibergbaubezirkes.

Bei der Auffahrung eines Endlagers sollen nur die Steinsalzmassen im Kern der Salzsättel und Salzstöcke ausgerichtet und für die Lagerung vorgerichtet werden.

Eine Gefährdung durch das Anfahren von Bereichen der Kalilager in der Nähe der Salzstockränder kann ausgeschlossen werden.

4. 2. 5 Zuflüsse aus dem Hauptanhydrit

Der Hauptanhydrit tritt im Zechstein 3 mit einer Mächtigkeit von etwa 35 m auf, E. Fulda (1938). Anhydrit ist in der Verformung durch Faltung kompetenter als Steinsalz und die Kalisalze. Wird der im Hangenden des Kalilagers Staßfurt befindliche Hauptanhydrit durch Spezialfaltung des Diapirstadiums verformt, so kann er zerbrechen, in einzelne Schollen zerfallen, die von chloridischen Salzen eingeschlossen werden. Innerhalb des geschlossenen Hauptanhydrits entsteht ein mehr oder weniger weit ausgedehntes Kluftsystem, welches sich beim Vorhandensein gesättigter Laugen mit diesen anfüllt. In ungünstigen großtektonischen Strukturen der Salzstöcke kann der Hauptanhydrit den Salzspiegelbereich berühren. Die darin auftretenden Laugen werden oberhalb des Salzspiegels mit ungesättigten Wässern

des klüftigen Deckgebirges überschichtet. In vielen Salzbergwerken mußte der Hauptanhydrit mit Schächten oder durch Horizontalstrecken durchörtert werden, damit Salze abgebaut werden konnten. Wenn diese Durchörterungen in dichtem Anhydrit liegen, kann es gefahrlos geschehen. Wird der Hauptanhydrit aber klüftig und laugenführend angetroffen, so ist besondere Sorgfalt angebracht. Es empfiehlt sich dann vor Auffahrung eines größeren Querschnittes die entsprechende Stelle durch Zementation zu sichern und die Spaltenräume zu verschließen. Verschiedene Salzbergwerke sind durch Zuflüsse aus dem Hauptanhydrit vollgelaufen, so Grethem-Büchten bei Hannover, Roßleben und als letztes das Kalibergwerk Ronnenberg bei Hannover mit den Schächten Albert und Deutschland im Jahre 1975. Auf diesem Werk wurde bereits im Jahre 1907 in einem Querschlag auf der 560 m -Sohle Lauge - führender Anhydrit angetroffen. Durch zahlreiche Abdichtungsmaßnahmen konnten die Laugenzuflüsse bis zum Jahre 1974 immer wieder kurz gehalten werden, bis schließlich durch die ständige Aussolung steilstehender Bereiche des Hauptanhydrits auch ungesättigte Laugenzuflüsse in die Grubenbaue erfolgten und die Gegenmaßnahmen eingestellt werden mußten. In dem Bergwerk Roßleben gelang es, Klüfte durch Einpressen von CaCl_2 -Lösungen zu verstopfen. Durch eine Umsetzung mit SO_4^{2-} -Ionen bildete sich danach Gips, welcher sich auf den Kluftflächen ablagerte. Es war danach möglich, die Grube wieder zu sämpfen und weiter zu betreiben.

Zuflüsse aus dem Hauptanhydrit sind als sehr gefährlich anzusehen, vor allem wenn es sich nicht um einen abgeschlossenen Kluftraum handelt, sondern eine Verbindung mit dem Deckgebirge besteht. Durch Vergleich der Ausflußmengenkurve mit dem freien Grundwasserspiegel, durch Färbeversuche oder durch Messung des hydrostatischen Drucks lassen sich aber Hinweise auf den Ursprung der Laugen erhalten.

In einer geplanten Endlagerstätte für radioaktive Abfälle wird unter Umständen der Hauptanhydrit durchörtert werden müssen. In diesen

Fällen kann man die gekernten Vorbohrungen mit Preventern sichern, die Beschaffenheit des Anhydrits erkunden und gegebenenfalls offene Klüfte zementieren. Durch diese Maßnahme lässt sich die Gefahr der Laugenzuflüsse aus dem Hauptanhydrit bannen und ausschalten.

Der Hauptanhydrit der Leine-Serie des Zechstein 3 sollte daher schon in die Vorerkundung der inneren Faltentekonik des Deponie-Salzstockes mit untertägigen Horizontal- und Schrägböhrungen einbezogen werden. In ihrer Ausdehnung begrenzte Anhydritkörper sind als klüftige Laugenspeicher bevorzugt in steilachsigen Kulissenfalten und Muldenumbiegungen zu erwarten. Die geologische Typisierung der salztektonischen Innenstruktur des Deponie-Salzstockes ist somit von großer Bedeutung.

4. 2. 6

Zuflüsse aus dem Liegenden

Die meisten Wasserzuflüsse in der Geschichte des Deutschen Kalibergbaus erfolgten aus hangenden Schichten. Bei den Schächten Preußen und Sachsen in Bernterode, dem Schacht Neubleicherode und dem Kalibergwerk Königshall-Hindenburg traten dagegen Zuflüsse aus dem Liegenden auf. Die Zuflüsse aus dem Liegenden der Kalisalzlager sind häufig hochgesättigte Laugen. Sie wurden offenbar durch zu groß bemessene Abbauhohlräume, in die Sohlenhebungen erfolgten, freigesetzt, W. Gimm (1968), U. Storck (1951).

Das Eindringen gesättigter Salzlösungen aus dem Liegenden in die im Kalilager aufgefahrenen Grubenbaue erfolgte jedoch in keinem Fall mit jenen Laugemengen, wie es in einigen Salzbergwerken durch das Einströmen von ungesättigtem Kluftwasser aus dem Deckgebirge geschehen ist.

In einem geplanten Endlager sind gesättigte Salzlaugenzuflüsse aus Schichten des Zechstein 2 auszuschließen, da große, freiliegende Abbaufächen nicht entstehen werden.

Die in den bis zu mehreren hundert Metern mächtigen Steinsalzserien des Zechstein 2 aufzufahrenden Deponiehohlräume werden in kluft- und laugenfreien Wechselfolgen von Steinsalzen unterschiedlicher Korngrößen mit dünnen Anhydrit-Steinsalzbändern zu projektieren sein. Diese bilden die für die Deponiekapazitäten geeigneten und räumlich ausge-dehnten Kerne der Salzsättel und Salzstöcke, P. Simon (1972).

4.2.7 Zuflüsse aus dem Salzspiegel-, Salzhang- oder Gipshutbereich

Das Abteufen der Schächte J e s s e n i z und F r i e d r i c h - F r a n z bereitete im Salzspiegelbereich große Schwierigkeiten. Die Schächte mußten mehrfach gesümpft werden. Dadurch vergrößerten sich die Zuflußwege zwischen Salz und Deckgebirge. Die Zuflüsse konnten nie vollkommen abgedichtet werden und so eroffnen die Schächte nach einigen Jahren durch den nicht aufzuhaltenen Zustrom von ungesättigten Kluftwässern, D. Hoffmann (1972). Der Schacht A l e x a n d e r s h a l l ist nach seiner Stillegung wahrscheinlich auch durch Wässer aus dem Salzhangbereich eroffen, W. G i m m (1968).

Die Kluft- und Porenwässer, welche sich in Aquiferen zwischen dem Salzspiegel und dem Deckgebirge befinden, können eine bedeutende hydrologische Gefährdung für ein Salzbergwerk darstellen, wenn zum einen die Abdichtung des Schachtes nicht völlig gelingt oder wenn durch Abbaueinwirkung Klüfte entstehen, die einen Weg in das Grubengebäude ermöglichen. Wie schon unter 4.2.5 dargelegt wurde, kann auch der klüftige Haupt-

anhydrit als Wasserleiter auftreten, besonders wenn er bis in den Salzspiegelbereich hinaufreicht.

Welche großen Wassermassen aus diesem Reservoir mobilisiert werden können, wurde im Sommer 1975 deutlich, als Zuflüsse im Kalibergwerk Ronnenberg über den Hauptanhydrit ins Grubengebäude gelangten. Durch die ständig zunehmende Schüttung der Einbruchsstelle wurde die darüberliegende Siedlung infolge der Grundwasserabdeckung durch Bergschäden bedroht. Durch den Wassereinbruch ließen oberflächennahe Hohlräume im Gipshut des Salzstockes leer und brachen zusammen, da der stützende hydrostatische Druck vorübergehend nicht vorhanden war. Die Folge davon waren wiederum Schäden an Häusern, Straßen und Erdleitungen. Zur Abwendung weiterer Schäden entschloß man sich daher zur Aufgabe der Grube. Zur schnellen Flutung wurden weit außerhalb der bebauten Flächen drei Entlastungsbohrungen geteuft, von denen eine den Salzspiegel trocken antraf und gestundet wurde. Die beiden anderen erreichten die Grubenbaue in dem vorgesehenen Bereich mit einem Tag Unterschied. Nachdem die Bohrungen mit dem Grubengebäude durchschlägig wurden, war die Grube innerhalb von zwei Tagen geflutet. Im Bereich der Entlastungsbohrungen trat eine erhebliche Grundwasserabsenkung auf, die anfänglich ca. 90 m betrug. In der Nähe der Entlastungsbohrungen traten wiederum einige Erdfälle auf. Die Grundwasserbeeinflussung wurde noch ca. 20 km weiter durch geringe Pegeländerungen des freien Grundwasserspiegels registriert. Innerhalb der letzten Flutungsphase sind der Grube etwa $4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ innerhalb von 2 Tagen zugeflossen. Der Gipshutbereich oberhalb des Salzspiegels muß als Kluftspeicher gut wasserleitend gewesen sein.

W. Gimm (1968) berichtet, daß beim Abteufen des Schachtes Wapno I insgesamt ca. 15 000 t Zement im Bereich des Gipshutes verpreßt wurden, davon allein ca. 3600 t durch ein einziges Bohrloch.

Dies weist nicht nur auf zu Spalten erweiterte Klüfte, sondern auch auf größere Kavernen eines Sulfatkarstes im Gipshut oberhalb des Salzspiegels hin.

Für die Errichtung eines Endlagers würden derartig kavernöse Deck-schichten für die Schachtröhren nicht auszuschließen sein. Durch Ver-füllung der Hohlräume eines Gipshutes über dem Salzspiegel mit hydraulisch aktiven Flugaschen oder mit Zementen lassen sich Spalten und Karsthohlräume in Schachtnähe schließen. Das Beispiel des Kali-bergwerks Ronnenberg zeigt andererseits, daß selbst bei stark wasserführendem Deckgebirge der Schacht Deutschland trocken ohne größere Schwierigkeiten geteuft werden konnte. Durch eine ge-eignete Wahl des Schachtansatzpunktes aufgrund von Bohrergebnissen, Bohrlochgeophysik und Pumpversuchen lässt sich auch in schwierigem Deckgebirge eine optimale Stelle für den Schachtansatz festlegen.

4.2.8 Andere Ursachen des Vollaufens von Salzbergwerken

Neben den in den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.7 aufgeführten Ursachen, sind noch andere Gründe zu nennen, welche zu einem Vollaufen von Salzberg-werken führten.

In die Schächte Beienrode I und II wurde von 1967 bis 1971 Grund-wasser eingeleitet um die Grubenbaue mit einem hydraulischen Versatz zu füllen. Das Wasser wurde zunächst in Abbaukammern im Carnallitit geleitet, damit es sich dort an $MgCl_2$ aufsättigen konnte und die Schacht-sicherheitspfeiler nicht geschwächt wurden.

Die Anlage Wilhelm Ernst I/II lief durch bekannte Zuflüsse voll, als bei der Betriebseinstellung das Pumpen eingestellt wurde, D. Hoff-mann (1972).

Der Schacht Asse III lief langsam voll Wasser, nachdem am Ende der Zwanziger Jahre Regenwasser, welches sich über dem im Schacht eingebrachten Betonklotz ansammelte, nicht mehr entfernt wurde. Bei diesem Schacht, dessen Teufarbeit während des Ersten Weltkrieges ruhte, wurden in einer Untersuchungsstrecke geringe Mengen an $MgCl_2$ -gesättigter Lösung angefahren. Die zwei zur Abdämmung vorgesehenen Dämme waren nicht dicht, die Lösungen traten in Rissen neben den Dämmen aus. Ein in den Schacht eingebauter Betonverschluß, welcher aus 5 übereinanderliegenden Scheiben besteht, deren Zwischenräume mit Magnesia-Zement verpreßt wurden, dichtete die Zuflüsse ab.

In den Schächten Reinhardtsbrunn, Carlsfund I und Hermann II stiegen die Wässer an, da in den Schacht eingebaute Betonklötzte nicht hielten und abgingen.

Die Grube Hansa in Empelde mit den Schächten Hansa I, II und III soll von 1979 an mit hochgesättigten NaCl-Lösungen geflutet werden, welche aus einem nahe gelegenen Kavernen-Sol-Projekt stammen. Für diese Solen ist keine andere Beseitigungsmöglichkeit vorhanden. Die stillgelegte Schachtanlage wird mit Laugen versetzt und so gegen einen unbeabsichtigten Wassereinbruch geschützt, Kali und Salz Werkzeitschrift (1978). In der Zukunft werden sich möglicherweise noch mehrere Kavernenprojekte in NW-Deutschland realisieren lassen, wenn deren Solen in stillgelegte, offenstehende Grubenräume versenkt werden können. Das Offthalten und die Instandhaltung stillliegender Salzbergwerke erfordern laufende Aufwendungen, welche nicht mehr durch Erträge gedeckt sind.

Für ein geplantes Endlager trifft die gleichzeitige Verwendung als Soledeponie nicht zu, da das Endlager nach der Betriebsphase verfüllt und die Zugänge zu den einzelnen Feldesteilen versiegelt werden sollen. Die Schachtröhren werden bei der Stilllegung ebenfalls sorgfältig verfüllt (s. Kap. 5.6.5.3).

Es bleibt zusammenfassend festzuhalten, daß die im deutschen Kali-bergbau durch Wasser- oder Laugenzuflüsse verlorengegangenen Schacht-anlagen aus Gründen ersoffen sind, welche beim Betrieb eines Endlagers für radioaktive Abfälle entweder nicht auftreten werden oder durch technische Maßnahmen vermieden werden können.

4.3 Lösevorgänge in Salzlagerstätten ozeanischen Ursprungs

Im Kapitel 4.2 wurde gezeigt, daß für ein bergmännisch hergestelltes Endlager in einem Salzstock mit seinen vergleichsweise kleinen Hohl-räumen praktisch keine Gefahr eines Wassereinbruchs besteht. Dennoch soll im folgenden, entsprechend der Empfehlung der Reaktorsicherheits-kommission vom Dezember 1977, auf die Folgen eines hypothetischen Wassereinbruchs und auf die damit verbundene Subrosion chloridischer Salze im Salzstockbereich eingegangen werden. Dabei werden folgende Randbedingungen vorausgesetzt:

1. Der für die Endlagerung radioaktiver Abfälle ausgewählte Salzstock besitzt einen stratigraphischen Aufbau entsprechend dem von E. Fulda (1938) angegebenen Normalprofil des deutschen Zech-steins. Dies gilt besonders für große Mächtigkeiten des Staßfurt-Steinsalzes, Z 2.
2. Der Salzstock liegt außerhalb der Verbreitungsgebiete der Kali-lager Ronnenberg und Riedel, Z 3, E. Seidl (1921). Demzufolge ist als Kalilager nur das Kalilager Staßfurt im Hangenden des den Salzstock-Kern aufbauenden Staßfurt-Stein-salzes zu erwarten.

3. Die chloridischen Salzfolgen des Leine-Steinsalzes (Jüngerer Steinsalz) und des Staßfurt-Steinsalzes (Älteres Steinsalz) werden hinsichtlich ihrer Löslichkeit und ihrer Auflösungsgeschwindigkeiten als annähernd gleich angesehen.

Die Salzlagerstätten ozeanischen Ursprungs sind durch Sedimentation unter Eindunstung des Lösungsmittels im Zechsteinmeer in mehreren Zyklen entstanden, H. Borchert (1959), E. Fulda (1938), F. Lotze (1957), G. Richter-Bernburg (1950).

Bei dieser Eindunstung, welche sich über geologische Zeiträume erstreckte, wurden der Reihe nach die Löslichkeitsgrenzen der Ca-Karbonate Ca-Sulfate und Chloride überschritten. Die ausfallenden Salze sanken aufgrund ihres höheren spezifischen Gewichtes zu Boden und bildeten dort Schichten unterschiedlicher Mächtigkeiten und petrographischer Zusammensetzung, G. Richter-Bernburg (1955).

Wenn leichtlösliche Magnesiumsalze, welche zu Ende der Eindunstung ausgefällt wurden, durch wasserundurchlässige Schichten, wie den Grauen oder Roten Salzton abgedeckt wurden, konnte bei erneuter Überflutung der Eindunstungsvorgang wieder mit der Ausfällung von Ca-Sulfaten und/oder Steinsalz beginnen. Wenn nun, wie in einem hypothetischen Störfall ein Wassereinbruch angenommen wird und Grundwasser über ein Leck im Schachtbereich mit dem Salzgebirge in Kontakt kommt, so gehen je nach der chemischen Zusammensetzung verschiedene Salze in Lösung. Die pro Zeiteinheit in Lösung gehende Stoffmenge der einzelnen Salze ist von der Auflösungsgeschwindigkeit, dem Sättigungsgrad der Lösung an der jeweiligen Komponente und der freiliegenden Oberfläche des Salzes abhängig.

Die im thermodynamischen Gleichgewicht vorhandenen Konzentrationen sind einer umfangreichen Literatur zu entnehmen und erstmals von D'Ans (1933) umfassend zusammengestellt worden.

Auflösungsgeschwindigkeiten an Salzen wurden von J. Hentschel &

W. Kleinitz (1976), H. Hoffmann & H.-H. Emons (1969),
O. Karsten (1954) und P. Siebler (1969) angegeben.

Die in einem Endlager zu erwartenden freiliegenden Oberflächen der verschiedenen Salzgesteine können quantitativ nicht im voraus festgelegt werden, da weder die Geologie des in Frage kommenden Salzstockes noch die endgültige Geometrie des Endlagers z. Zt. bekannt sind. Es wird aber für die Endlagerräume unterschiedlicher Ausdehnung und Hohlraumgestaltung eine bevorzugte Auffahrung in den anhydritischen Steinsalzen der Staßfurt-Serie, $\text{Na}_2\beta$, vorzuziehen sein, so daß in den freiliegenden Oberflächen Steinsalz vorherrschen wird.

Für Lösevorgänge in Salzbergwerken sind allgemein zwei Systeme von besonderer Bedeutung. Es ist dies das System $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ und das System $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{MgCl}_2-\text{MgSO}_4-\text{H}_2\text{O}$. Letzteres entspricht den kieseritischen Übergangsschichten und dem Carnallitit im Lagerhorizont des Staßfurt-Kalilagers.

Mit Hilfe des ersten Systems läßt sich die Aufsättigung von eindringendem, ungesättigtem Grundwasser beschreiben. Durch die in einem Endlager überwiegend auftretenden Steinsalzoberflächen bilden sich innerhalb von Tagen nach einem Wassereinbruch gesättigte NaCl -Lösungen. Die Konzentration und das spezifische Gewicht der entstehenden Lösung läßt sich aus der Abbildung 4 bestimmen. Für den Fall, daß sich in Endlagerhohlräumen auch wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle befinden, sind die Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit und des spezifischen Gewichtes zu berücksichtigen. Wenn sich lokale, aus der Einlagerung hochradioaktiver Abfälle entstehende Wärmequellen unterhalb der Salzlösungen befinden, so würde durch die Abnahme des spezifischen Gewichtes um ca. $4,34 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ grad eine Konvektionsströmung in Gang gesetzt werden. Die sehr geringe Zunahme der Löslichkeit von 55 Mol/1000 Mol H_2O bei 0°C auf ca. 60 Mol/1000 Mol H_2O bei 100°C ist bei weitem nicht in der Lage, die

Abnahme der Dichte infolge thermischer Ausdehnung zu kompensieren. Daneben erfolgt die Gleichgewichtseinstellung der Sättigungskonzentration in der Lösung bei hohen Salzgehalten etwa einhundertmal langsamer als die Änderung der Temperatur durch Wärmeleitung. Die Einstellung einer stabilen Laugenschichtung, in der der Stofftransport durch langdauernde Diffusion und Wärmeausbreitung und somit im wesentlichen durch Wärmeleitung erfolgt, lässt sich jedoch durch eine besondere Anordnung der Hohlräume erreichen.

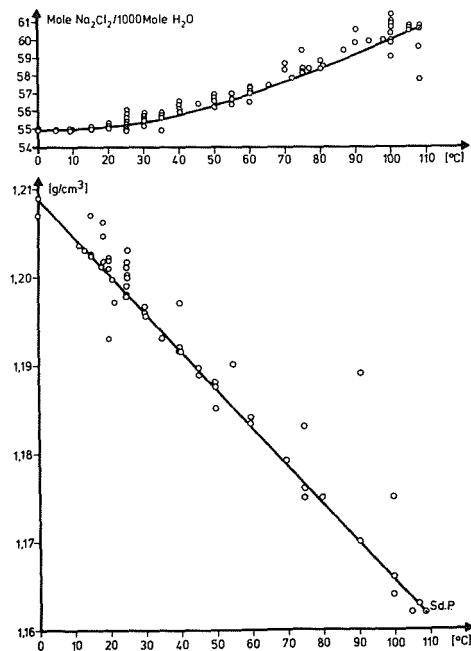


Abb. 4: Die Temperaturabhängigkeit der NaCl -Löslichkeit ist nicht sehr hoch. Die geringe Zunahme der Löslichkeit ist nicht in der Lage, die thermische Ausdehnung zu kompensieren, die Dichte der gesättigten NaCl -Lösung nimmt folglich mit zunehmender Temperatur ab. Nach Werten von J. D'Ans (1933) gezeichnet.

Dazu wäre eine Vorrichtung der Grubenbaue erforderlich, bei der sich die eingelagerten radioaktiven Abfälle oberhalb der Zugangsstrecken befinden, wie dies auch aus weiteren Gründen in Kapitel 5. 6. 4. 4 empfohlen wird. Die Strömungsverhältnisse für beide Fälle sind in der Abbildung 7 dargestellt.

Wenn neben Steinsalz auch noch Carnallitit an der Auflösung beteiligt ist, muß das quinäre System ozeanischer Salze betrachtet werden. Die Isotherme für 25 °C ist in der Abbildung 5 dargestellt. Die Parallelprojektion auf die Mg-SO₄-Ebene ermöglicht ein Ablesen der Koordinaten beliebiger Punkte in den Sättigungsflächen, J. D'Ans (1933). Wegen der wesentlich größeren Oberflächen an Steinsalz als an Carnallitit in den Hohlraumflächen des Endlagers tritt im Falle eines Wassereinbruchs zunächst eine an Steinsalz gesättigte Lösung auf. Die Auflösungsgeschwindigkeit für Steinsalz und Carnallitit ist nur etwa um den Faktor 2-4 unterschiedlich. Der darstellende Punkt der an NaCl gesättigten Lösung ist der Koordinatenursprung des Diagramms.

Bei der inkongruenten Auflösung von Carnallit bildet sich eine Lösung Q, welche mit den stabilen Bodenkörpern NaCl, KCl (Sylvian), KMgCl₃ · 6H₂O (Carnallit) und KClMgSO · 11/4 H₂O (Kainit) im Gleichgewicht steht. Die Bodenkörper NaCl und Carnallit sind von vornherein vorhanden. Sylvian bildet sich bei der inkongruenten Carnallitauflösung. Kainit dürfte primär nicht in ausreichenden Mengen vorhanden sein, es bildet sich aus anstehendem Kieserit (MgSO₄ · H₂O). Wenn Kieserit in ausreichenden Mengen vorhanden ist, kann der gesamte Umbildungs-sylvian aufgezehrt und zu Kainit umgewandelt werden. In diesem Falle läge letztlich eine Lösung R mit den stabilen Bodenkörpern NaCl, KMgCl₃ · 6H₂O, KClMgSO₄ · 11/4H₂O und MgSO₄ · H₂O vor. Wegen der im Vergleich zu anderen Salzen sehr kleinen Auflösungsgeschwindigkeit dauert diese Gleichgewichtseinstellung allerdings länger.

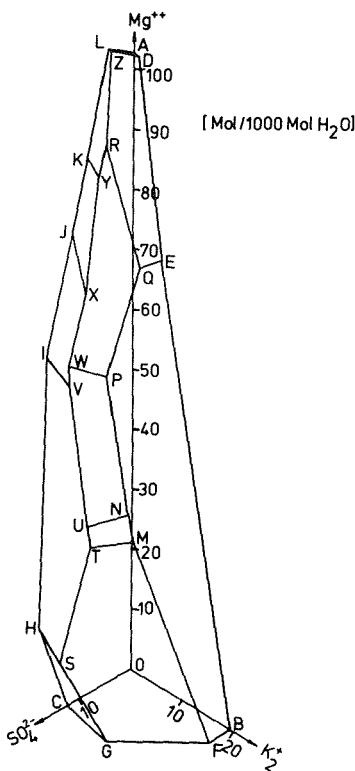


Abb. 5: Die rechtwinkeligen Achsen (Mg^{++} , K^+ , SO_4^{2-}) spannen einen vielflächigen Körper auf, der die Sättigungsflächen des quinären Systems ozeanischer Salze bei $25^\circ C$ nach J. D'Ans (1933) zeigt. Im Koordinatennullpunkt liegt eine an NaCl gesättigte Lösung vor. Bei der Auflösung von Carnallit durch eine NaCl gesättigte Lösung bewegt sich der darstellende Punkt der Lösung auf einer Linie vom Koordinatennullpunkt zum Punkt Q des Systems.

Mit zunehmender Sättigung an den übrigen Lösungsgenossen bewegt sich der darstellende Punkt der jeweils vorhandenen Lösung vom Koordinatennullpunkt auf die Carnallit-Sättigungsfläche zu. Die Isothermenkonstruktion umspannt ein Polyeder, von denen drei Seiten, die $Mg\text{-SO}_4$ -Ebene, die $K_2\text{-SO}_4$ -Ebene und die $K_2\text{-Mg}$ -Ebene senkrecht aufeinanderstehen. Innerhalb des Polyeders herrscht Untersättigung, außerhalb des Polyeders herrscht Übersättigung bei der jeweiligen Temperatur. Die Konzentrationen der verschiedenen nonvarianten Salzpunkte sind in der Literatur zu entnehmen, J. D' Ans (1933), O. Braitsch (1962). In der Abbildung 6 ist das spezifische Gewicht der beiden interessierenden Salzlösungen dargestellt.

Das spezifische Gewicht der Lösung Q steigt mit der Temperatur an und durchläuft bei ca. 72°C einen Wendepunkt. Bei dieser Temperatur weist die Lösung Q dieselbe Zusammensetzung wie die Lösung R auf. Unterhalb 72°C liegt die Dichte der Lösung Q unterhalb der von Lösung R, oberhalb 72°C über der von Lösung R.

Die Dichte der Lösung R nimmt bis 72°C annähernd linear mit ca. $1 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ab, danach steigt sie stark an.

Dieses Verhalten kann gleichfalls zu einer stabilen Dichteschichtung führen, wenn die Grubenbaue so angelegt sind, daß sich die Wärmequelle oberhalb der Zugänge befindet (s. Abbildung 7) und sich desweiteren in dem absteigenden Zugang A ausschließlich Steinsalz befindet. In diesem Falle wird die Lösung Q erwärmt und die Dichte würde durch thermische Ausdehnung abnehmen. Da außer Steinsalz keine Bodenkörper in diesem Bereich "A" vorhanden sind wird die Lösung Q geringfügig untersättigt, ein Stofftransport wäre nur durch Diffusion möglich. Ebenso verhält es sich mit der Lösung R. Anders als bei NaCl-gesättigten Lösungen nimmt die Lösung Q mit steigender Temperatur in der Dichte zu. Dies liegt in der starken Löslichkeitzunahme von $Mg\text{Cl}_2$ mit steigender Temperatur.

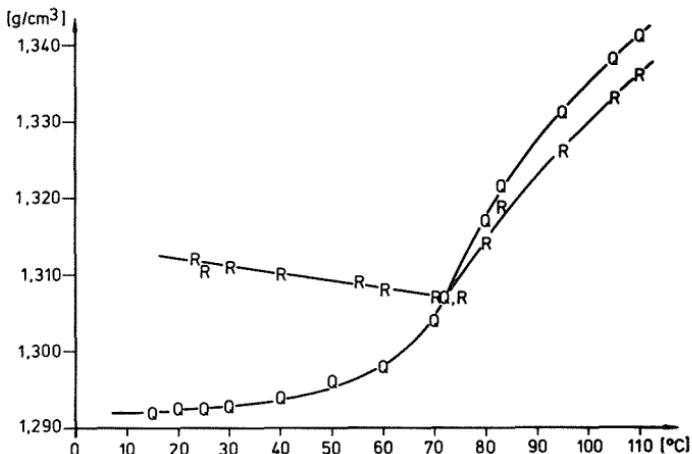


Abb. 6: Die Dichte der Lösungen des Punktes R und Q sind nach Werten von J. D'Ans (1933) als Funktion der Temperatur dargestellt. Die Löslichkeitszunahme der Lösung Q kompensiert stets die thermische Ausdehnung, die Dichte steigt mit der Temperatur an. Die Dichte der Lösung R fällt bis 72°C annähernd linear um dann mit zunehmender Temperatur ebenfalls anzusteigen.

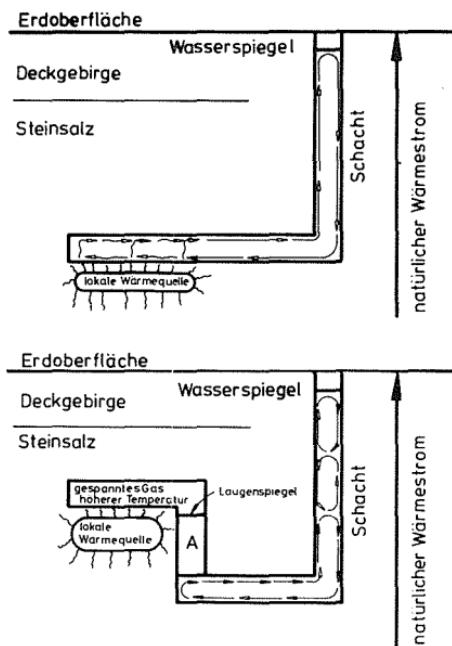


Abb. 7 : Denkbare Strömungsverhältnisse in Endlagern mit unterschiedlicher räumlicher Anordnung der wärmeproduzierenden Abfallagerzone und der untertägigen Hohlräume. Im unteren Schema ist die Salzlösung durch ein Gaspolster vom Einlagerungsfeld ferngehalten. In der Zone A ist eine stabile Dichteschichtung möglich. Der Stofftransport ist wirkungsvoll unterbrochen.

| | Na_2Cl_2 | K_2Cl_2 | MgCl_2 | MgSO_4 | |
|------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|
| 0 $^{\circ}\text{C}$ | 3, 1 | 4, 6 | 65, 0 | 4, 5 | Mole/1000 Mole H_2O |
| 110 $^{\circ}\text{C}$ | 4, 1 | 12, 5 | 98, 5 | 2, 5 | Mole/1000 Mole H_2O |

Tab. 3: Konzentration der Lösung Q nach J. D'Ans (1933)

Die starke Zunahme an gelösten Salzen ist in der Lage, die Abnahme der Dichte durch thermische Ausdehnung zu kompensieren.

In einem mit der Lösung Q gefüllten Endlager stehen aber die Lösungen nicht im thermodynamischen Gleichgewicht. Die Temperaturerhöhung tritt wesentlich schneller ein, als die chemische Gleichgewichtseinstellung mit der Auflösung der Bodenkörper reagieren kann. Dies wurde bereits im Fall der NaCl -Lösung erwähnt. Damit sind Konvektionsströmungen zu erwarten.

Die Vorrichtung ausgedehnter Grubenbaue des Endlagers im stratigraphischen Niveau des Kalilagers Staßfurt (K 2) wie auch in den kieseritischen Übergangsschichten seines unmittelbaren Liegenden ist nicht vorgesehen. Für die Vorrichtung der Endlagerräume im Staßfurt-Hauptsalz eines Salzsattel- oder Salzdomkernes sind lediglich querschlägige Durchörterungen des Staßfurt-Lagerhorizontes mit Aufschlüssen geringer Flächenanteile vorzusehen.

4. 3. 1 Der hypothetische Störfall eines Wassereinbruches

In einem untertägig aus- und vorgerichteten Endlager ist ein Wassereinbruch aus den Deckschichten nicht zu erwarten. Dennoch soll auf Anregung der Reaktorsicherheitskommission (1977) mit einem Wassereinbruch in Nähe der Schachtröhre als hypothetischem Störfall gerechnet und seine Folgen abgeschätzt werden. Da bei der Auffahrung des Endlagers im Unterschied zum ausgedehnten Grubengebäude des Kali- oder Steinsalzbergbaus weniger ausgedehnte Hohlräume aufgefahren werden, ist ein Wassereinbruch aus dem Deckgebirge über aus Bruchvorgängen entstandenem Klufthohlraum im Salzstock unwahrscheinlich. Dies wurde aus der Betrachtung der Ursachen für das Vollaufen von Salzbergwerken (Kap. 4. 2) deutlich gemacht. Der als hypothetisch angenommene Wassereinbruch in die Schachtröhre wird daher als ein nicht näher definierter Schaden durch äußere Einwirkung angesehen.

Im folgenden sollen drei unterschiedliche Fälle mit als gegeben vorausgesetzten Randbedingungen berücksichtigt werden.

1. Das Endlager ist ausschließlich im Staßfurt-Steinsalz, Na 2 β , des Salzstockkernes vorgerichtet worden.
2. Das Endlager hat das in seiner Mächtigkeit begrenzte Carnallitit-Lager des Staßfurt-Lagerhorizontes, K 2, in seinem weiteren Hangenden.
3. Das Endlager grenzt an das Carnallititlager des Staßfurt-Lagerhorizontes unmittelbar an.

Im Fall 1 wird nach dem schnellen Vollaufen der Grubenbaue die Lösung mit Steinsalz gesättigt. Die Lösetätigkeit erstreckt sich vorwiegend auf

die Streckenfirste und die Stöße, da die Sohle durch eine höher aufgesättigte Lösung geschützt wird, P. Siebler (1969). Die Auflösungsgeschwindigkeit von Steinsalz beträgt etwa

$$1 \cdot 10^{-3} \quad [\text{g/cm}^2 \text{ sec}] .$$

J. Hentschel & W. Kleinitz (1976), H. Hoffmann & H.-H. Emons (1969), O. Karsten (1954), P. Siebler (1968), P. Siebler (1969).

Für verschiedene Strecken- und Hohlraumquerschnitte wird je nach dem Oberflächen-Volumen-Verhältnis eine Sättigung mit Steinsalz in etwas unterschiedlichen Zeiträumen erfolgen. Die Sättigung wird innerhalb weniger Tage erreicht sein.

Wenn im Fall 2 begrenzte Mengen von Carnallitit im Hangenden auftreten, so wird der $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ -Anteil des Carnallits inkongruent gelöst. Diese Auflösung findet nach der Aufsättigung der Lösung mit NaCl statt. Es wird davon ausgegangen, daß das Grubengebäude eines Endlagers zum allergrößten Teil im Steinsalz aufgefahren wird. Eine gesättigte Steinsalzlösung ist in der Lage, Carnallitit aufzulösen. Die Lösetätigkeit würde aufgrund des höheren spezifischen Gewichtes der entstehenden MgCl_2 -Lösungen solange anhalten, wie eine an Carnallit ungesättigte Lösung noch Carnallitit im Hangenden vorfindet. Wenn der Carnallitit im Liegenden auftritt, werden sich die Lösungen schnell sättigen und die Lösetätigkeit kommt zum Stillstand. Aufgrund des hohen spezifischen Gewichtes sammeln sie sich im tiefsten Teil des Grubengebäudes. Weiterer Carnallit kann dann nicht mehr gelöst werden. Die Lösungen bewegen sich auf dem Strahl vom darstellenden Punkt der NaCl-Sättigung, der gleichzeitig Koordinatennullpunkt ist, in Richtung auf den Punkt Q des isothermen Diagramms zu. In Abbildung 5 ist die Isotherme für 25°C nach J. D'Ans (1933) gezeichnet worden.

Die möglichen Konzentrationen für die an Carnallit, Sylvan und Kainit gesättigten Lösungen lassen sich dem Diagramm entnehmen. Im Punkt Q ist die Sättigung mit Carnallit erreicht. Durch inkongruente Auflösung entsteht viel Umlösungssylvan, der sich mit Kieserit teilweise zu Kainit umsetzt, so daß auch Sylvan und Kainit als stabile Bodenkörper auftreten.

Wenn im Fall 3 davon ausgegangen wird, daß durch das untertägige Grubengebäude größere Mächtigkeiten eines Carnallitits aufgeschlossen sind, so wird es zu einer Gleichgewichtslösung Q kommen.

Wenn das Endlager während der Betriebsphase ein untertägiges Streckennetz von ca. 20 km Länge mit etwa 300000 m^3 Inhalt luftefüllt aufweisen würde, so könnte sich der anschließend mit Salzlauge und mit wiederausgefälltem Steinsalz, Sylvan und Kainit erfüllte Bereich auf etwa $870\,000 \text{ m}^3$ vergrößern. Die Standsicherheit wäre bei diesen für Salzbergwerke sehr geringen Volumina und angesichts der großen Teufe in einem Salzstockkern nicht gefährdet. Die resultierende Lösung mit dem spezifischen Gewicht von $1,29 \text{ g/cm}^3$ übt zu dem auf das Salzgebirge einen stützenden Einfluß aus. Die Geschwindigkeit der Lösungsumwandlung hängt von der Größe der ursprünglich freigelegten Carnallititfläche ab.

4. 3. 2 Lösevorgänge bei Auftreten anderer Mineralien

Der Fall des Anfahrens von Carnallitit in einem Endlager ist unerwünscht, da dieses Mineral durch seine hygrokopische Eigenschaft auch Wetterlaugen bilden kann. Durch eine untertägige geologische

und geophysikalische Erkundung ist zu vermeiden, Endlagerräume in Kalisalzlagern aufzufahren.

Noch unwahrscheinlicher wird es sein, andere Mineralien als Carnallit in größeren Mengen aufzuschließen, da zum Beispiel Glaserit, Bischofit oder Tachhydrit bislang immer nur in isolierten Einschlüssen, in Lagerzonen von maximal einigen hundert Kubimetern angetroffen wurden. Solche im Vergleich zum gesamten Salzstockinhalt äußerst geringen Mengen würden von der NaCl-gesättigten Lösung aufgelöst. Ihre Gesamtmenge wäre zu klein, daß sich aus ihnen ein stabiler Bodenkörper bilden könnte.

Einzig der Kainit könnte örtlich von der Menge her ausreichend vorhanden sein, um einen Bodenkörper zu bilden. Da seine chemischen Komponenten KCl und $MgSO_4$ aber auch bei der inkongruenten Carnallitauflösung als Rückstand übrig bleiben, ändert sich durch sein Vorhandensein das physikalisch-chemische Verhalten der Salzlaugen nicht wesentlich.

Kainit ist ein sekundär durch Grundwassereinwirkung aus Carnallit entstandenes Mineral, welches sich meistens in den oberen Bereichen norddeutscher Salzstücke als sogenanntes "Hutsalz" gebildet hat. Die Vorrichtung von Endlagerräumen scheidet in derartigen Salzstockpositionen aus.

4. 3. 3 Die Einstellung von thermodynamischen Gleichgewichten

Zur Einstellung eines thermodynamischen Gleichgewichtszustandes sind ein thermisches Gleichgewicht, ein chemisches Gleichgewicht und ein mechanisches Gleichgewicht erforderlich, O. Hummel & W. J. Moore (1976).

Nach einem hypothetischen Wassereinbruch existieren in einem Endlager zwei verschiedene Wärmequellen, welche zu einer Ursache für konvektiven Stofftransport werden können. Zum einen existiert von der Erdoberfläche zur Tiefe hin ein Temperaturgradient, dessen Kehrwert, die geothermische Tiefenstufe, in norddeutschen Salzstöcken etwa bei $30 \text{ m/grad}^{\circ}$ liegt, O. Braitsch (1962), W. Giesel (1970). Dieser Temperaturgradient hat seinen Ursprung im Zerfall natürlicher radioaktiver Nuklide wie Kalium-40, Uran-235, Uran-238 und von deren Folgeprodukten, die in der Erdkruste vorhanden sind. Neben dieser zeitlich in etwa unveränderlichen Wärmequelle treten durch den Zerfall eingelagerter hochradioaktiver Abfälle in einem Salzstock lokale Wärmequellen auf, deren Wärmeleistung nach etwa 50 - 100 Jahren stark abfällt.

Wenn nach einem hypothetischen Wassereinbruch in die Schachtröhre eines Salzstock-Endlagers diese verfüllt wird und nicht mehr mit dem vollgelaufenen Grubengebäude verbunden ist, kann mit der Einstellung eines thermischen Gleichgewichtes nach einigen hundert Jahren gerechnet werden.

Die Möglichkeit zur Einstellung eines chemischen Gleichgewichtes ist innerhalb längerer Zeiträume gegeben. Der chemische Gleichgewichtszustand ist oben für verschiedene Salzgesteine beschrieben worden.

Ein mechanisches Gleichgewicht liegt vor, wenn in allen Phasen eines Systems der gleiche Druck herrscht. Ist dies nicht der Fall, so wird sich diejenige Phase, in der ein höherer Druck besteht, auf Kosten der Phase mit dem niedrigeren Druck ausbreiten. In einem vollgelaufenen untertägigen Hohlraum wird der Druck in der flüssigen Phase durch den hydrostatischen Spannungszustand festgelegt. Dieser ist von der Höhe der Wassersäule und von ihrem spezifischen Gewicht abhängig. Wenn sich in dem Hohlraum komprimierte Gasblasen gebildet haben,

so ist der Druck in der Gasphase ebenfalls durch den hydrostatischen Druck an der Grenzfläche Flüssigkeit-Gasphase festgelegt. Im Gebirge, der festen Phase, wird sich der Druck von der Oberfläche ins Gebirge hinein von einem sekundären zum primären Spannungszustand ändern. Der primäre Spannungszustand entspricht dem petrostatischen Druck, der von der Tiefe und dem mittleren Raumgewicht der überlagernden Gesteinsschichten abhängig ist. Die Größe der Übergangszone wird etwa das vier- bis sechsfache des Hohlraumdurchmessers betragen. Die Größe des sekundären Spannungszustandes kann bisher noch nicht genau präzisiert werden. Der primäre Spannungszustand ist größer als der hydrostatische Druck einer wässrigen Lösung in gleicher Tiefe. Die feste Phase kann sich grundsätzlich in die flüssige Phase hinein ausdehnen.

Art und Geschwindigkeit lassen sich bislang noch nicht näher beschreiben, auf jeden Fall handelt es sich um langsam ablaufende Vorgänge. Bei dem gebirgsmechanisch günstigen Streckenquerschnitt eines Tonnengewölbes sind die Konvergenzraten in lufterfülltem Zustand unter atmosphärischem Druck sehr klein. Wenn die Oberflächen der Stöße dagegen einem hydrostatischen Druck ausgesetzt sind, so wird sich die Konvergenzrate noch erheblich verkleinern, wenn nicht sogar völlig zum Stillstand kommen.

Ein mechanisches Gleichgewicht wird möglicherweise erreicht.

4. 4

Messungen in vollgelaufenen Salzbergwerken

Zur Prüfung der angeführten theoretischen Überlegungen wurden vom Verfasser Messungen in verschiedenen vollgelaufenen Salzbergwerken ausgeführt. Die Messungen erstreckten sich auf die Ermittlung von Temperatur-, Leitfähigkeits- und Konzentrationsprofilen in den mit Wasser oder Lauge gefüllten Schachtröhren. Es wurden Bergwerke

untersucht, welche seit unterschiedlich langen Zeiträumen voll Wasser stehen. In allen Fällen schichteten sich verschiedene konzentrierte Laugen entsprechend ihrem spezifischen Gewicht übereinander. Die einzelnen Lösungen waren häufig durch sehr scharfe horizontale Grenzflächen voneinander getrennt. Innerhalb der einzelnen Wasserkörper herrschten meist sehr einheitliche physikalisch-chemische Verhältnisse. Dieser Zustand wird bereits einige Wochen nach dem Vollaufen der Gruben erreicht. Offenbar ändert er sich dann im Verlauf vieler Jahrzehnte nur noch sehr geringfügig, wenn die Laugen in den Hohlräumen stagnieren und nicht abfließen können.

Für die Messungen standen verschiedene Temperatur-, Leitfähigkeits- und Strömungssonden sowie verschiedene Probenahmegeräte für Wasserproben zur Verfügung. Bei den Winden handelte es sich sowohl um tragbare Winden mit Handbetrieb als auch um elektrische Winden mit stufenlosem Getriebe in einem Meßwagen.

| Funktion | Lieferant | Kabel | Meßbereich | Auflösung |
|-----------------------------|--|-------------------------|--------------------------|------------------|
| Temperatur Leitfähigkeit | Tamam, Israel | 4-Adern 80-800 S | 5-35 ° C ± 1 S | 0,2 ° C ± 1 S |
| Temperatur Strömung | Eigenbau | 7-Adern 1-100 cm/sec | 5-50 ° C ± 0,5 cm/sec | 0,1 ° C |
| Temperatur | Eigenbau | 2-Adern | 0-50 ° C | 0,001 ° C |
| Temperatur Leitfähigkeit | Haferland Hannover | 4-Adern | 0-50 ° C | 0,01 ° C |
| Probenahme | Haase, Kiel Rüttner- Wasser- schöpfer | 7 x 19 / 2 mm | 500-1000 ml | |
| Probenahme | Eigenbau | 7 x 19 / 2 mm Ø | 200-1400 ml | |

Tab.: 4 Meßausrüstung für Feldmessungen

4. 4. 1 Temperaturprofile in Schachtröhren vollgelaufener Salzbergwerke

In einer unter Wasser stehenden Schachtröhre, die ausschließlich mit Steinsalz Kontakt hatte, wurde das folgende Temperaturprofil aufgenommen. Die Messungen erfolgten punktweise im Abstand von 1 m. Als Temperatursonde diente Sonde Nr. 1.

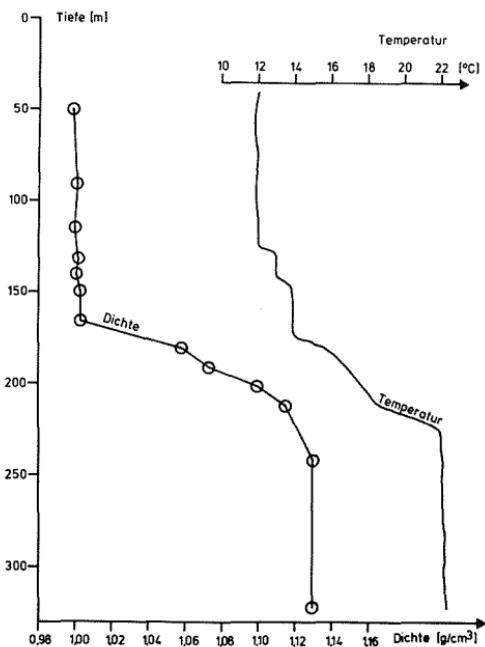


Abb. 8: Die Wassertemperatur steigt stufenweise mit der Tiefe an. Bis zu einer Tiefe von ca. 170 m liegt unverzweigtes Grundwasser vor, obwohl der Schacht seit etwa 50 Jahren voll Wasser steht. Die sprunghaften Temperaturänderungen sind Indizien für die Existenz einzelner Wasserkörper, die gegeneinander abgegrenzte Konvektionszellen ausbilden.

HSS-p III

Ein weiteres Beispiel einer bereits vor 5 Jahrzehnten vollgelaufenen Schachtröhre, die nur Kontakt mit Steinsalz hatte, zeigt die Abbildung 9.

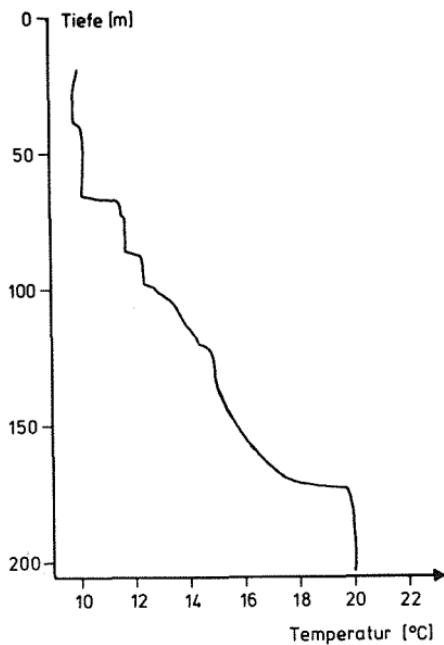


Abb. 9: Der Temperaturanstieg erfolgt teilweise sprunghaft, aber in weiten Bereichen auch stetig ansteigend. Der Salzspiegel befindet sich etwa in 170 m Tiefe. Von dort ab stellt sich eine konstante Temperatur ein.

Desdemona

Wenn das Wasser in den Grubenbauen neben Steinsalz auch noch mit Kalisalzen in Kontakt steht, so stellen sich verschiedene konzentrierte Lösungen ein. Im Tiefsten befindet sich stets eine an Magnesium reiche Laugenschicht, welche eine Dichte von $1,29 - 1,31 \text{ g/cm}^3$ besitzt. Darüber ist häufig eine an NaCl gesättigte Lauge mit einer Dichte von ca. $1,20 \text{ g/cm}^3$ anzutreffen. Diese Schicht wird oberhalb des Salzspiegels von ungesättigtem Grundwasser der Dichte $1,0 - 1,01 \text{ g/cm}^3$ überschichtet.

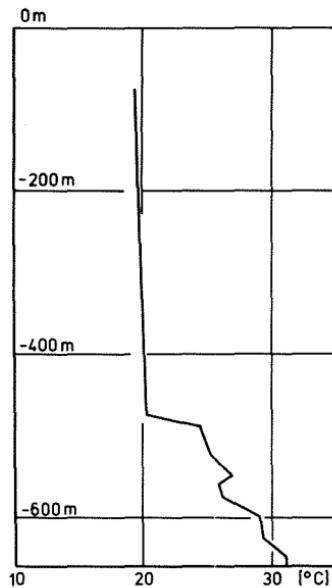


Abb. 10: Temperaturprofil in einer Schachtröhre, die in einem Salzstock mit Steinsalz und mit Kali-lagern Ronnenberg und Riedel des Zechstein 3 in Kontakt steht.

Deutschland

Ein weiteres Beispiel für das Temperaturprofil einer Schachtröhre, welche mit Steinsalz und mit Kalisalzen in den Kalilagern Ronnenberg und Riedel in Kontakt ist. Über weite Bereiche ist kaum eine Temperaturerhöhung festzustellen ($\approx 0,001^{\circ}\text{C}/\text{m}$) Im Salzspiegelbereich erfolgt dagegen stufenweise eine Temperaturerhöhung.

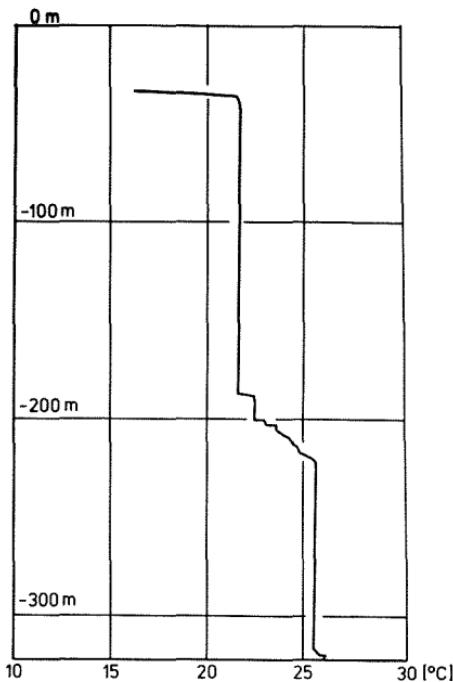


Abb. 11: Temperaturprofil einer Schachtröhre, die im Kontakt mit Steinsalz und mit Kalisalzen der Kalilager Ronnenberg und Riedel des Zechstein 3 steht.

Ronnenberg

Sprungartige Temperaturänderungen werden auch in salzreichen Seen beobachtet. In der Abbildung 12 ist der Temperaturverlauf des salz- und methanreichen afrikanischen Kivu-Sees an Hand der von K. Tietze (1978) mitgeteilten Daten dargestellt.

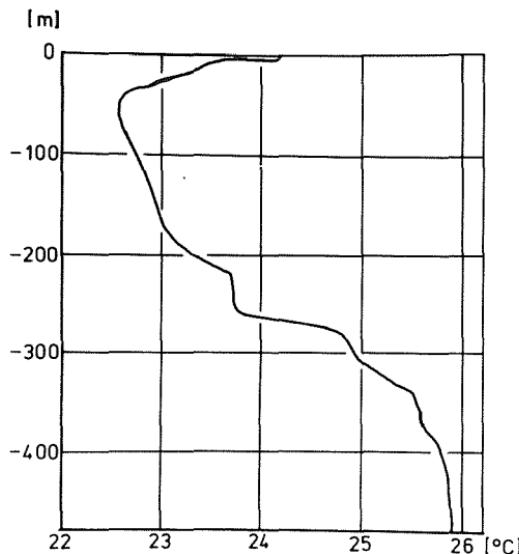


Abb. 12: Temperaturprofil des salzreichen Kivu-Sees nach K. Tietze (1978). Das Temperaturprofil zeigt in den oberen 50 Metern Inversion.

Die Einstellung der Wassertemperaturen unmittelbar nach einem Wassereinbruch erfolgt sehr schnell innerhalb einiger Monate.

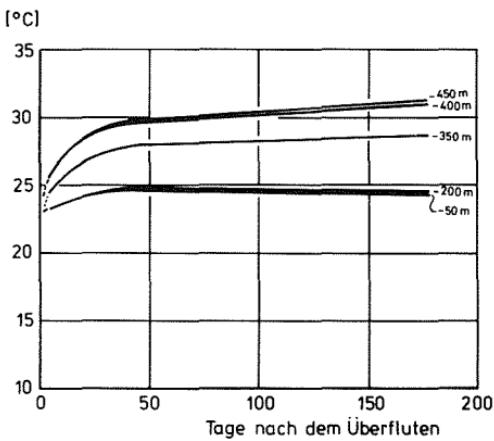
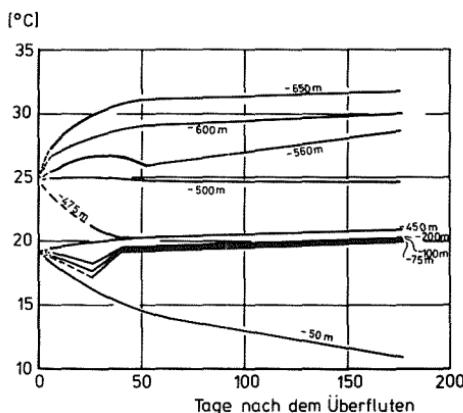


Abb. 13 : Temperaturereinstellung in einer Schachtröhre nach der Überflutung des dazu gehörenden Bergwerkes. Der Zufluß erfolgte aus dem Grubengebäude und füllte den Schacht von unten nach oben. Der Temperaturnausgleich im oberen Teil des Schachtes (≤ 200 m) war nach weniger als 50 Tagen erreicht.

Ronneburg

Wenn die Wasserzuflüsse sich nach Überflutung der tieferen Sohlen einen Weg über höhergelegene Sohlen bahnen, so sinken auch die Temperaturen in der Schachtröhre. Dieser Fall wurde in einer anderen Schachtröhre gemessen.



Derbighausen

Abb. 14: Die Temperatur des zufließenden Wassers betrug etwa 18 °C. Durch längere Verweilzeit in den tieferen und durch höhere Salzgebirgstemperaturen wärmeren Sohlen erwärme es sich auf dem Wege zum Schacht auf etwa 25 °C. Beim Pegelstand von ca. 450 m floß es dem Schacht auf kürzerem Wege zu und war dann entsprechend kälter.

Ein Beispiel für das Temperaturprofil einer Schachtröhre, welche mit Grubenbauen im Kaliflöz Staßfurt (Carnallitit) in Kontakt steht, ist in Abbildung 15 dargestellt.

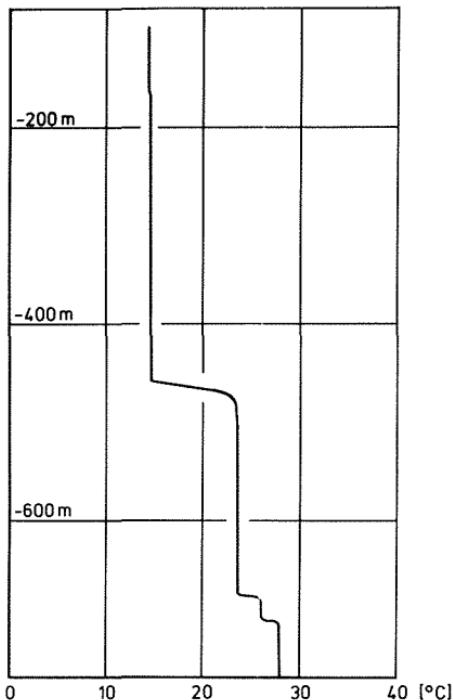


Abb. 15: Temperaturprofil einer Schachtröhre, die mit Carnallitit in Verbindung steht. Der Salzspiegel liegt in ca. 470 m Teufe, die obersten freigelegten Carnallititflächen in bergmännischen Hohlräumen des Kalilagers Staßfurt, Zechstein 2, liegen in 700 m Teufe.

Bekerrade

Der genaue Temperaturverlauf des Temperatursprungs in 468 m Teufe wurde mit einer hochauflösenden Sonde untersucht. Die laterale Auflösung beträgt 5 mm, die Temperaturauflösung $\pm 0,001^{\circ}\text{C}$. Die Feinstruktur des Temperatursprunges ist in Abbildung 16 dargestellt.

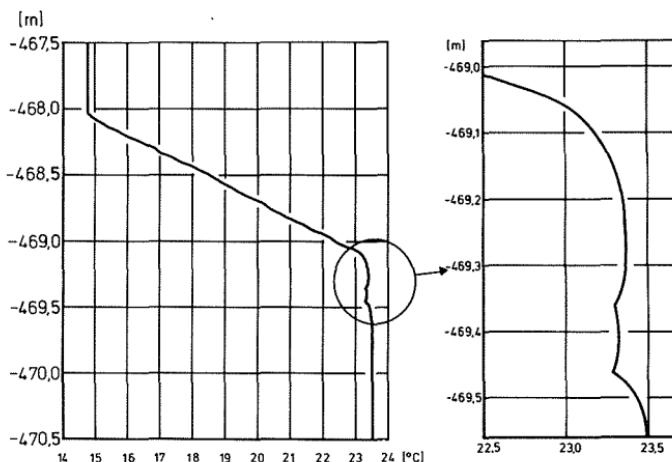


Abb. 16: Feinstruktur eines Temperatursprunges in einer Schachtröhre beim Übergang vom Grundwasser zu einer an NaCl gesättigten Lauge.

Die in der Abbildung erkennbare Temperaturinversion (rechtes Bild) deutet auf mehrere scharfe Trennschichten innerhalb des Temperaturübergangs durch Laugenschichtungen hin.

Bleivrode

Diese Feststellungen wurden auch durch Beobachtungen bestätigt, die an Hand von Laborversuchen gewonnen wurden. Der Übergang von einer wärmeren zu einer darüber befindlichen kälteren Wasserschicht geringerer Salzkonzentration muß nicht an einer einzigen Konzentrationsgrenze erfolgen. Vielmehr wurden im Laborexperiment 2 bis 3 sehr scharf getrennte Schichten beobachtet, welche in kurzen Abständen von 5 bis 10 cm aufeinanderfolgten. Die Laugenschichten machten sich optisch infolge der sprunghaften Änderung des Brechungsindex als scharfe Grenzflächen bemerkbar. Im Laborexperiment wurden in die Wasserkörper unterhalb und oberhalb des Temperatursprungs zwei verschiedene Farbstoffe als Indikator für Strömungen eingegeben. Die Ausbreitung der Farbstoffe wurde während mehrerer Tage beobachtet. In den Zonen gleicher Temperatur stellte sich schnell eine gleichmäßige Farbstoffkonzentration ein. Dort wurden Strömungsgeschwindigkeiten von 1-5 mm/sec beobachtet. In der Zone des Temperatursprungs waren die Ausbreitungsgeschwindigkeiten um Größenordnungen kleiner. Der Transport von gelösten Farbstoffen erfolgte hauptsächlich durch Diffusion, wie sich an Farbstoffwolken zeigen ließ, welche direkt in die Übergangszone injiziert wurden.

4. 4. 2 Konzentrationsverhältnisse in vollgelaufenen Schachtröhren

In den im vorigen Kapitel aufgeführten Schachtröhren wurden auch orientierte Wasserproben entnommen. Durch Leitfähigkeitsprofile war sichergestellt worden, daß an den Stellen einer sprunghaften Temperaturänderung sich jeweils auch die Leitfähigkeit sprunghaft änderte. In Bereichen einheitlicher Temperatur lag auch stets eine einheitliche chemische Zusammensetzung vor.

Die Probenahme der Wasserproben erfolgte jeweils kurz oberhalb und unterhalb des Temperatursprunges. Dabei wurde ein Abstand von 5 bis 10 m von der Grenzschicht eingehalten.

Die Salzkonzentrationen steigen in allen Fällen stufenweise von oben nach unten an. An Stellen, wo der Schachtausbau undicht ist, liegt meist dieselbe Grundwasserzusammensetzung wie im Deckgebirge vor. Im Bereich des Salzspiegels befindet sich oft der größte Temperatur- und Konzentrationssprung. Vom universalen Grundwasser steigt die NaCl-Konzentration innerhalb weniger Meter auf Werte $\geq 300 \text{ g/l}$ an. Die Dichte nimmt sprunghaft um $\approx 0,2 \text{ g/cm}^3$ zu. Im Bereich der freigelegten Kalisalze steigt die Temperatur häufig abermals an. Wenn Carnallitit vorliegt, so bildet sich eine Lösung, deren Konzentration und chemische Zusammensetzung etwa der des Punktes Q entspricht. Die Dichte steigt erneut um etwa $0,09 - 0,1 \text{ g/cm}^3$ an.

Die Grenzschichten mit sprunghaften Temperatur- und Konzentrationsänderungen stellen eine starke Barriere für einen konvektiven Stoffaustausch dar. So betrug oberhalb der Sprungsicht von NaCl-ge-sättigter zu Carnallitit-ge-sättigter Lösung die Konzentration an Mg⁺⁺-Ionen nur etwa 1 % gegenüber der unteren Lösung. Seit dem Volllaufen des Salzbergwerkes bis zu der Messung waren ca. 10 Jahre vergangen.

5. Ausbreitungsbarrieren innerhalb geologischer Strukturen
von Salzsätteln und Salzstöcken

Das Ziel der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tektonischen Salzstrukturen ist es, die Abfallstoffe für eine Zeitspanne, welche durch die Halbwertszeit der Nuklide bestimmt wird, von der terrestrischen Biozone zu isolieren. Diese Aufgabe lässt sich lösen, wenn folgende Randbedingungen geklärt sind:

Die radioaktiven Abfälle müssen in ihrer Menge und Zusammensetzung bekannt sein. Aus diesen Daten lässt sich über die maximal zulässigen Konzentrationen für Luft und Wasser das kritische Nuklid zu verschiedenen Zeiten bestimmen.

Nach einem Vorschlag von Haug lässt sich ein relativer Radiotoxizitätsindex bestimmen, indem eine Trinkwassermenge welche durch Auflösung der betrachteten Aktivitätsmenge unbrauchbar gemacht wird, mit einer Wassermenge verglichen wird, die durch Auflösung einer entsprechenden Menge eines 0,2 prozentigen Uranerzes unbrauchbar wird, H. O. Haug (1976).

Aus der Summe der in einem Endlager vorhandenen Aktivität lässt sich zu einer bestimmten Zeit somit ein theoretisches Gesamtgefährdungspotential ableiten. Dieses Gefährdungspotential ist zeitabhängig, da die Nuklide zerfallen. Die Rolle des jeweils kritischen Nuklides geht durch den radioaktiven Zerfall nach verschiedenen Zeiten auf immer langlebigere Isotope über.

Haug vergleicht die Radiotoxizität verschiedener Abfallkategorien hochaktiver Gläser mit 0,2 prozentigem Uranerz, siehe Abbildung 17.

Dieser Vergleich liefert den Bezugspunkt RTI = 1. Bei einer Einlagerung in Bohrlöchern mit ca. 10 m Abstand ergibt sich ein Vergleichsniveau mit 0,2 prozentigem Uranerz. Verglichen wird dabei der gesamte Einlagerungsbereich im Salz mit hochaktiven Abfallbehältern. Innerhalb der 10^3 Jahr-Phase wird das radioaktive Gefährdungspotential eines Uranerzes bereits unterschritten.

Biologisch wirksam werden kann daher nur derjenige Teil der endgelagerten Aktivität, der in einer auslaugbaren Form vorliegt und über den Lösungstransport aus dem Endlagerbereich herausgelangen kann. Das tatsächliche Gefährdungspotential ist deshalb stets sehr viel kleiner als das theoretische Gefährdungspotential.

Ein theoretisches Gefährdungspotential entsteht, wenn keinerlei Barrieren durch Schwerlöslichkeit, Verpackung und Endlagergestaltung berücksichtigt werden. Es errechnet sich so, als würde die gesamte Radioaktivität in einer Trinkwassermenge aufgenommen und bis an die Grenze der maximal zulässigen Konzentration verdünnt.

In einem Endlager liegen aber die Nuklide zumeist in einer chemisch sehr schwerlöslichen Form als Oxide oder Sulfate vor. Radioaktive Abfälle werden nur in fester Form eingelagert. Sie werden in Fixierungsmaterialien aus Zement, Bitumen, Kunststoffen, Glas oder keramischen Massen eingebettet und in metallischen Behältern verpackt. Es gibt Vorschläge, durch eine dickwandige Ummantelung aus korrosionsfesten Materialien die Umhüllung zu einer starken Ausbreitungsbarriere zu machen, KBS-Studie (1977).

Der Zwischenraum zwischen einzelnen endgelagerten Behältern kann zudem mit Steinsalz gefüllt werden.

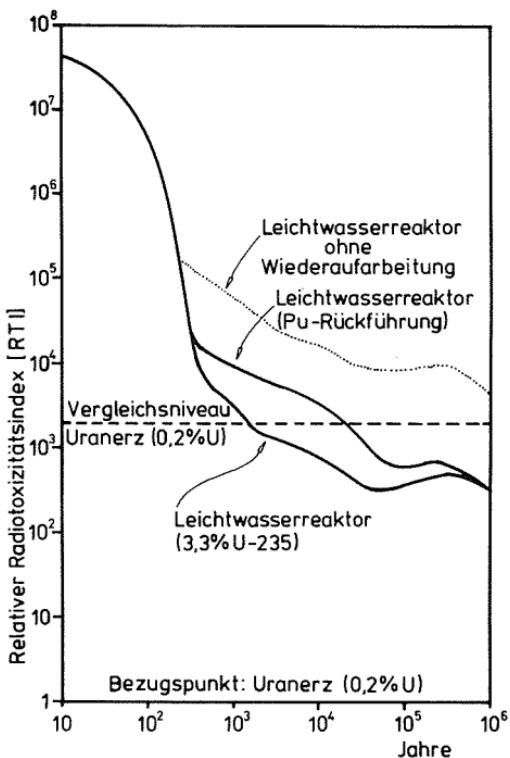


Abb. 17: Nach H. O. Haug (1976) lässt sich ein relativer Radiotoxizitätsindex errechnen:

$$RTI = \frac{\frac{Q_i}{MPC_{w,i} \text{ Abfall}}}{\frac{Q_j}{MPC_{w,j} \text{ Uranerz}}}$$

wobei Q_i die Aktivität des Nuklids i und $MPC_{w,i}$ die maximal zulässige Konzentration des Nuklids i in Wasser ist. Während der ersten 400 Jahre bestimmen Spaltprodukte (Sr-90) die relative Radiotoxizität, danach langlebigere Aktinide (Pu, Am).

Erfolgt die Einlagerung in besonderen Lagerbohrungen, so werden diese zur Lagerstrecke hin durch Verschlüsse abgedichtet. Wenn die Behälter in Fässern oder verlorenen Abschirmungen endgelagert werden, können die Zwischenräume mit besonderen Verfüllmaterialien ausgefüllt werden. An wichtigen Punkten wie Zugangsstrecken, Blind-schächten und Tagesschächten können zudem Abschlußbauwerke errichtet werden.

Jede dieser Maßnahmen wird im Falle eines Kontaktes der Abfälle mit Wasser oder Salzlaugen die Ausbreitung der endgelagerten Stoffe verzögern. Im Kapitel 5.6 werden die einzelnen Maßnahmen behandelt, welche innerhalb eines Salzstock-Endlagers als Barrieren dieser Ziel-setzung dienen.

Bei der Ausbreitung radioaktiver, gelöster Substanzen aus endgelagerten Abfällen müssen diese Barrieren überwunden werden, ehe der Biozyklus überhaupt kontaminiert werden kann. Der langsamste Schritt in dieser Kette ist dabei geschwindigkeitsbestimmend.

Es gilt daher, die verschiedenen Barrieren so auszuführen, daß in allen denkbaren Störfällen zu ihrer Überwindung durch Radionuklide mehr Zeit erforderlich ist als diesen aufgrund ihrer Halbwertszeit für eine Gefährdung zur Verfügung steht.

5.1

Zur Schwerlöslichkeit der radioaktiven Abfälle

Radioaktive Abfälle fallen in sehr unterschiedlichen Bereichen der Energieerzeugung, Technik, Medizin oder wissenschaftlichen Forschung an. Ebenso unterschiedlich wie das Nuklidspektrum

ihrer Inhaltsstoffe ist die chemische Form, in der sie vorliegen. Wurden sie beispielsweise vor ihrer Überführung in eine endlagergerechte Fixierung bei hohen Temperaturen verascht, so liegen sie zum größten Teil als Oxide vor. In den Vorstufen zu einer Verglasung werden ebenfalls häufig Oxide bei Trocknungsschritten erzeugt. Bei der Dekontamination von Kühl- oder Betriebswässern werden oft Fällungsreaktionen angewandt, welche die Nuklide als schwerlösliche Salze, zumeist an Trägermaterialien wie Kieselgur gebunden, ausscheiden und dann eine Filtration möglich machen.

Unter den chemischen Verhältnissen, wie sie in gesättigten Steinsalz- oder anderen salinaren Gleichgewichtslösungen herrschen, wird die Löslichkeit durch das große Angebot von Chlorid-, Sulfat- und Sulfidionen beeinflußt. Bei Ionen, welche mit den genannten Ionen schwerlösliche Verbindungen bilden, wird das chemische Gleichgewicht auf der Seite der festen Verbindung liegen.

$$C_{\text{Anion}} \cdot C_{\text{Kation}} = C_{\text{Salz}} \cdot k$$

Damit diese Auswirkung einen nennenswerten Einfluß auf die Ausbreitung von Radionukliden haben kann, muß die Löslichkeit allerdings extrem gering sein.

Einige der wegen ihrer α -Strahlung und großen Halbwertszeiten nach langen Lagerzeiten im Gefährdungspotential dominierenden Transurane bilden schwerlösliche Oxide.

In den Abfällen einer Wiederaufarbeitungsanlage liegt nahezu das gesamte Plutonium als Oxid vor, während der Rest als Nitrat in Mengen weit unter einem Prozent auftritt. Plutonium könnte sich bei Vorhandensein einer Gleichgewichtslösung des quinären Systems zu

polymerem Plutonium umsetzen, welches ausgefällt wird und faktisch unlöslich ist, U. S. Milyukova et al. (1969). Das Polymer hat eine Struktur, welche der von PuO_2 ähnlich ist. Die chemischen Eigenschaften von polymerisiertem Pu (IV) sind von denen der Ionenform völlig verschieden. Es wird von vielen Stoffen wie z. B. Glas, Ionenaustauschern oder Stahl in großer Menge adsorbiert (bis zu $\approx 1,6 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), U. S. Milyukova et al. (1969).

Die Überführung in schwerlösliche Verbindungen trägt sicher ihren Teil zu einer Fixierung der endgelagerten Nuklide und zu einer Verminderung der Ausbreitung bei. Die chemische Form endgelagerter Nuklide reicht für sich allein noch nicht als Barriere aus.

5.2 Auslaugbarrieren in der Verpackung

Die sichere Handhabung radioaktiver Stoffe über Tage ist durch eine Reihe von nationalen und internationalen Empfehlungen, Vorschriften und Gesetzen geregelt. Durch diese administrativen Maßnahmen wird der Umgang mit radioaktiven Stoffen vereinheitlicht und abgesichert. So hat z. B. die Internationale Atomenergie Behörde (IAEA) ständig verbesserte "Transport Regulations" (1973) erarbeitet, in denen u. a. auf die Verpackung radioaktiver Abfälle eingegangen wird.

Diese Bedingungen gelten vor allem für Risiken bei einem Transport oder einer Handhabung der Abfälle. Für die Anforderungen an Auslaugbarrieren bei derendlagerung radioaktiver Abfälle gelten in den einzelnen Staaten eine Reihe von nationalen Regelungen. Für die bei Meeresversenkungen zugelassenen Behälter hat die Europäische Atomenergiebehörde (NEA) entsprechende Richtlinien erlassen.

Radioaktive Abfälle müssen in fester Form endgelagert werden. Das Fixierungsmaterial muß gegenüber Wasser oder Salzlösungen widerstandsfähig sein. Dieses Ziel wird durch verschiedene Arten der Verpackung erreicht. Die Verpackungen werden in den folgenden Abschnitten 5. 2. 1 bis 5. 2. 4 näher beschrieben.

5. 2. 1

Metallische Behälter

Als Behälter für radioaktive Abfälle werden häufig 200- oder 400-Liter-Blechtrömmeln benutzt. Diese bieten bei verschraubten Deckeln einen mechanischen Schutz beim Transport und lassen sich gut von Gabelstaplern mit Faßklammern bewegen. Sie bieten wenig Schutz gegen eine Auslaugung, da das verhältnismäßig dünne Stahlblech innerhalb weniger Jahre durchrostet, wenn es mit chloridischen Salzlösungen in Berührung kommt. Bei Anwesenheit von Sauerstoff wird die Korrosion gefördert. Die Fässer sind auch nicht gasdicht. Wenn sie einem hydrostatischen Druck ausgesetzt werden, wird Wasser eindringen, welches einen Teil der Nuklide auslaugt kann.

Metallische Behälter sind weiterhin für Sonderzwecke vorgesehen. So sollen abgebrannte carbidische Brennelemente in starkwandigen Stahlbehältern in 35 m tiefe Bohrlöcher in der Versuchsanlage Asse II versuchsweise eingelagert werden, K. Kühn (1976).

Verglaste hochradioaktive Abfälle aus dem ersten Zyklus einer Wiederaufarbeitungsanlage sollen als erste Auslaugbarriere in Kanistern aus korrosionsbeständigem Stahl endgelagert werden. Die geschmolzene Glasmasse mit den radioaktiven Abfällen soll in die Behälter eingefüllt werden und dort erstarrt.

Ein weiteres Verfahren sieht vor, die zu kleinen Pellets geformte hochaktive Glasmasse in eine Bleilegierung einzubetten, welche sich ebenfalls in einer Stahlkanne befindet. Bleilegierungen dürfen in chloridischen und sulfatischen Lösungen als sehr beständig angesehen werden.

In einer, als Auflage der schwedischen Regierung angefertigten Studie über Endlagermöglichkeiten in schwedischen Granit-Endlagern werden Behälter aus massivem Kupfer vorgeschlagen. Die Behälter sollen nicht aufgearbeitete Kernbrennstoffe aufnehmen und endlagerfähig umhüllen. Sie sollen eine Länge von ca. 350 cm und eine Wandstärke von ca. 20 cm aufweisen. Das Gewicht der einzelnen Behälter beträgt etwa 14 Tonnen. Die Dichtigkeit der aufwendigen Kupferzyliner im Kontakt mit Grundwasser wird auf etwa 5000 Jahre geschätzt.

Die Ausführung von Metallbehältern für Endlagerzwecke reicht also je nach radioaktivem Aktivitätsinhalt und sonstigen Sicherheitsbarrieren vom Blechfaß bis zu aufwendigen Ausführungen korrosionsbeständiger Metallbehälter. Bei einigen Abfallprodukten wird auch die gute Abschirmwirkung von Gußstahlbehältern genutzt, wenn aus räumlichen Gründen keine verlorenen Betonabschirmungen benutzt werden können. Metallbehälter werden von eventuellen Salzlaugen in den Salzstock-Endlagern durch Korrosion angegriffen. Insbesondere bei Anwesenheit von Sauerstoff wird die Korrosion beschleunigt. Die Lebensdauer der verschiedenen Behältertypen kann als zwischen einigen Jahren und mehreren Jahrtausenden liegend angenommen werden.

5.2.2 Anorganische nichtmetallische Fixierungsmaterialien

Es gibt eine Reihe anorganischer, nichtmetallischer Materialien, welche sich für dieendlagerung radioaktiver Abfälle verwenden lassen. Folgende Kriterien sind bei ihrer Auswahl zu berücksichtigen:

- hohes spezifisches Gewicht; dadurch besteht eine gute Abschirmung von γ -Strahlung;
- chemische Widerstandsfähigkeit gegen wässrige Lösungen;
- thermische Belastbarkeit;
- Möglichkeit der Fixierung von Metalloxiden radioaktiver Nuklide;
- Möglichkeit der Bindung von Wasser und Verfestigung radioaktiver Abfallösungen;
- mechanische Festigkeit bei Druckbeanspruchung;
- unkomplizierte und preiswerte Herstellung und Verarbeitung;
- Herstellungsmöglichkeit in großer Menge.

Materialien, die eine oder mehrere der aufgeführten Eigenschaften besitzen und demzufolge als Fixierungsstoffe für radioaktive Abfälle Verwendung finden, werden in den folgenden drei Abschnitten behandelt.

5.2.2.1 Hydraulische Bindemittel

Unter hydraulischen Bindemitteln versteht man Stoffe, die in der Lage sind, mit Wasser zu reagieren und ein festes und widerstandsfähiges

Produkt zu bilden. Die Zemente lassen sich durch die verschiedenen Anteile der Klinkermineralien unterscheiden. Je nach der Mahlfeinheit und Zusammensetzung erreichen die Zemente nach dem Abbinden verschiedene Festigkeiten.

Zemente werden zur Fixierung radioaktiver Abfallösungen sehr häufig eingesetzt. Ihre Verarbeitung kann im kalten Zustand mit verhältnismäßig einfachen Mischaggregaten erfolgen. In ihrem Abbindeverhalten werden die Zemente von der chemischen Zusammensetzung der Rohabfälle beeinflußt. So verzögert ein größerer Anteil von Borat aus den Betriebsabfällen von Druckwasser-Reaktoren das Abbinden, während z. B. Natriumkarbonat ein Abbinden stark beschleunigt. Organische Verunreinigungen in den Rohabfällen können u. U. eine Verfestigung der zementierten Abfälle völlig verhindern. Nitrate in den Abfallösungen vermindern die Qualität des Endproduktes. Eine geringere Endfestigkeit und Salzausblühungen an der Oberfläche können die Folge sein.

Die Zementsorten, welche für eine Verfestigung radioaktiver Abfälle Verwendung finden sollen, müssen möglichst lange einem zweifachen chemischen Angriff standhalten und dementsprechend ausgewählt werden.

1. Die Zemente werden durch die salzbeladenen radioaktiven Lösungen, welche mit ihrer Hilfe verfestigt werden sollen, angegriffen. Dieser chemische Angriff im Inneren der einzelnen Abfallgebinde erfolgt hauptsächlich durch die in großer Menge in den Abfallösungen vorhandenen Nitrate, Chloride, Citrate, Borate und Sulfate. Der Salzgehalt der zu verfestigenden Abfallösungen kann bis zu 450 g/l betragen. Die Verfestigung von Borat-haltigen Abfällen wurde von O r t t m a n n (1977) untersucht.

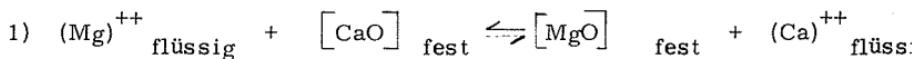
Die behälterlose Einlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfallösungen aus einer Wiederaufarbeitungsanlage in bergmännisch aufgefahrenen Kavernen im Staßfurt-Steinsalz des Zechstein 2 ist Gegenstand umfangreicher Untersuchungen, E. Albrecht (1969), K. - J. Leers & C. Ortmann (1978), R. Köster et al (1979).

Die mittelradioaktiven Abfallösungen mit etwa 300 g NaNO₃ pro Liter sollen mit Zement gemischt und zu Pellets verarbeitet werden. Diese härteten über Tage aus und werden dann mit einer inaktiven Zementsuspension versetzt und durch Rohrleitungen direkt in eine Kaverne im Salzstockkern befördert, wo die Masse zu einem kompakten Block aushärtet und den untertägigen Hohlraum lückenlos ausfüllt. Durch das Aushärten der Pellets über Tage wird eine Qualitätskontrolle möglich und die Wärmebilanz des Kaverneninhaltes nicht mit der Hydratationswärme der Pellets belastet.

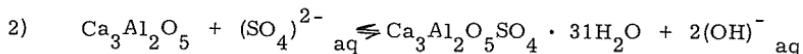
Als aussichtsreiche Zementsorte hat sich nach K. J. Leers & C. Ortmann (1979) bisher Portlandzement 35 F erwiesen.

2. Im Falle eines hypothetischen Störfalles "Wassereinbruch" erfolgt ein Kontakt der zementierten Abfälle mit NaCl- oder anderen Magnesiumchloridlägen und damit auch ein chemischer Angriff von außen her auf die radioaktiven Abfallbehälter oder das behälterlos zementierte Abfallprodukt. Die Korrosion wird hier im wesentlichen durch die hohen Magnesium-, Chlorid- und Sulfatgehalte in den Laugen hervorgerufen.

Es können u. a. die folgenden Reaktionen auftreten:



Durch Ionenaustausch wird Calcium aus den Klinkermineralien herausgelöst und gegen Magnesium ersetzt. Die Folge ist eine Verminderung der Festigkeit des Zementsteins.



Als bekannteste Reaktion bilden Sulfationen aus der Salzlösung bei Vorhandensein der Klinkerphase Tricalciumaluminat mit diesem das Mineral Tricalciumaluminatsulfat. Dieses Mineral wird auch Ettringit genannt und besitzt 31 Kristallwasser in seiner Einheitszelle. Die Umkristallisation des Feststoffes ist mit einer Volumenvergrößerung verbunden, welche durch den hohen Kristallwasseranteil hervorgerufen wird. Die Folge ist eine völlige Zerstörung des Zementsteins durch den Kristallisationsdruck. Aus diesem Grunde darf lauf DIN 1164 der Gehalt an Tricalciumaluminat in sulfatbeständigen Zementen nicht höher als 3 Prozent sein.

Durch einen Zusatz von CaSO_4 zum Zement kann diese Ettringitbildung bereits im Anfangsstadium des Abbindens herbeigeführt werden. Dadurch wird das reaktionsfähige Tricalciumaluminat bereits im Zementbrei zu Tricalciumaluminatsulfat teilweise umgesetzt, und das Aushärten des Zementsteins wird nicht beeinflußt, I. Biczok (1968).

Neben den Klinkerzementen ist der im Salzbergbau benutzte, sehr harte Magnesia- oder Sorel-Zement zu erwähnen. Er besteht zum überwiegenden Teil aus MgO . Zusammen mit MgCl_2 -gesättigter Lösung angemacht, bildet er Magnesiumoxichloride, die gegen Magnesiumchlorid-haltige Lösungen recht widerstandsfähig sind.

Die Einwirkung von NaCl -reichen Lösungen auf Magnesiazement läßt diesen im Laufe der Zeit weich werden, D. Rausch (1955).

Hydraulische Kalke werden bei der Fixierung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik nicht benutzt. Die chemische Widerstandsfähigkeit dürfte infolge Ionenaustauschvorgängen zwischen Calcium- und Magnesiumionen begrenzt sein.

Gips fällt in der chemischen Industrie in großer Menge an. Er eignet sich gut für die Fixierung von Rohabfällen und wurde von einer Arbeitsgruppe der KFA Jülich auf seine Eignung untersucht, J. Knieper et al. (1977).

Gips ist in NaCl-haltigen Wässern löslich. In $MgSO_4$ -haltigen Lösungen, wie z.B. der Gleichgewichtslösung des Punktes Q, ist Gips praktisch unlöslich. Dies bestätigt auch die Tatsache, dass Grubenlaugen aus dem Anhydrit meistens keine Ca^{++} -Ionen enthalten, obwohl sie lange Zeit mit großen $CaSO_4$ -Mengen in Kontakt standen.

5. 2. 2. 2

Anorganische Gläser

Für die Endlagerung radioaktiver Abfälle besitzen zwei Glassorten besondere Bedeutung, es sind dies Borosilikatgläser und Phosphatgläser. Die Borosilikatgläser zeichnen sich durch eine etwas größere Auslaugbeständigkeit aus, während die Phosphatgläser Vorteile bei der Herstellung der Endlagerprodukte wegen ihres etwas niedrigeren Schmelzbereiches bieten. Im wesentlichen wird jedoch Borosilikatglas als Verfestigungsmaterial für hochradioaktive Abfälle in Betracht gezogen, da die Phosphatglasschmelzen sehr korrosiv auf die Schmelzöfen wirken.

Anorganische Gläser sollen zur Verfestigung der im ersten Extraktionszyklus anfallenden Spaltproduktoxide dienen. Diese Rohabfälle besitzen eine spezifische Aktivität von etwa 1 Ci/cm^3 . Durch die starke Strahlung

erwärmen sie sich über die Umgebungstemperatur. Je nach der Konzentration der Spaltprodukte können sich die verglasten Abfälle auf 200 - 400° C aufheizen. Bis zu einem Gehalt von ca. 20 - 25 Gewichtsprozent Spaltprodukte im verglasten Endprodukt lässt sich noch ein ausgezeichnetes Auslaugverhalten erreichen. Die Auslaugraten betragen etwa $1 \cdot 10^{-6}$ bis $1 \cdot 10^{-7}$ g/cm² d. Bei größeren Anteilen der Spaltprodukte sinken die mechanische Festigkeit und das gute Auslaugverhalten.

In der Bundesrepublik werden z. Zt. zwei verschiedene Verfestigungsverfahren auf Glasbasis erforscht.

| Verfahren | Forschungszentrum | Glassorte |
|-----------|-------------------|------------------|
| VERA | KfK | Borosilikat-Glas |
| AVM | KFA/KfK | Borosilikat-Glas |

Innerhalb des amerikanischen WIPP-Programms (Waste Isolation Pilot Plant) wird untersucht, ob eine Verglasung von Borsäure-haltigen Abfällen möglich ist und welche Vorteile sich dabei ergeben könnten, WIPP - Report (1977).

International wird die Fixierung von hochradioaktiven Abfällen des ersten Extraktionszyklus in Gläsern als ausgezeichnete Methode angesehen. Die Vorteile liegen in der guten thermischen Stabilität, mechanischen Festigkeit, den hervorragenden Auslaugeigenschaften und der Möglichkeit, verhältnismäßig große Mengen technisch einfach zu fixieren.

Gläser befinden sich nicht im thermodynamischen Gleichgewicht. Es sind unterkühlte Flüssigkeiten. Ihr spezifisches Volumen \tilde{V} ist größer als das des kristallinen Festkörpers.

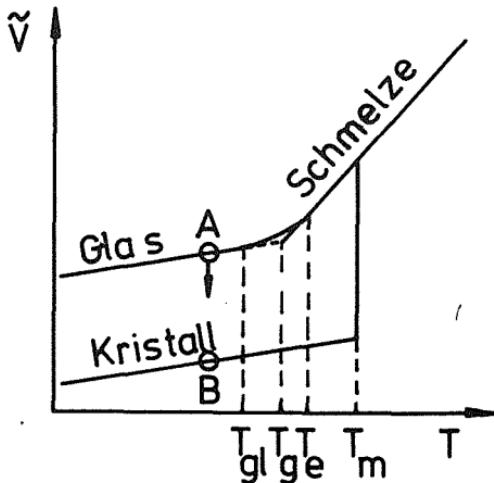


Abb. 18: Die durch den radioaktiven Zerfall hervorgerufene Temperaturerhöhung kann zu einer partiellen Kristallisation und damit zu einer Abnahme des spezifischen Volumens von A nach B führen. Bedingt durch die hohe Viskosität dauert dieser Vorgang sehr lange, G. Rehage & W. Borchard (1973).

T = Temperatur; T_{gl} und T_e sind die Temperaturen, bei denen der Verglasungsprozess beginnt bzw. endet; T_g = Glas-temperatur; T_m = Schmelztemperatur.

Kristalline Körper zeichnen sich dadurch aus, daß bei einer Temperaturerhöhung ein definierter Schmelzpunkt auftritt. Oberhalb des scharfen Schmelzpunktes bildet sich eine Schmelze. Wird ein Glas erwärmt, so erreicht man einen Schmelz- oder Erweichungsbereich. Der Übergang vom Glaszustand zur Schmelze erfolgt langsam und kontinuierlich.

Während des Erweichungsbereiches ändert sich die Viskosität des Glases um mehrere Größenordnungen. Ein scharfer Schmelzpunkt fehlt. Werden die $\tilde{V}T$ -Kurven des Glases und der Schmelze durch Extrapolation zum Schnitt gebracht, so erhält man die sogenannte Glastemperatur, die man zur Charakterisierung des Glases heranziehen kann.

Ein Glas besitzt eine höhere innere Energie als ein entsprechender Kristall. Es ist bestrebt, sich im Laufe der Zeit in einen Zustand niedrigerer innerer Energie zu versetzen. Für das spezifische Volumen bedeutet dies, daß es sich im Laufe der Zeit vom Punkt A auf den Punkt B hin bewegt (s. Abb. 18). Es kann einen partiell kristallinen Zustand erreichen, der zwischen den Punkten A und B liegt. Diese grundlegenden Vorgänge betreffen sowohl die anorganischen als auch die organischen Gläser. Durch die Bildung von Kristalliten im Glas wird dieses trüb. Durch die Abnahme des spezifischen Volumens treten in dem Glas Spannungen auf, welche die mechanischen Eigenschaften verändern und u. U. zur Mikrorißbildung führen können.

Dieser langfristig zu erwartende Effekt könnte zu einer unerwünschten Verminderung der guten Auslaugeigenschaften hochradioaktiver Abfallglasblöcke führen. Damit dieser Effekt hinsichtlich einer langfristig sicheren Endlagerung unwirksam wird, lassen sich zwei technische Lösungswege beschreiten. Zum einen kann man die Glasmasse zu kleinen Pellets formen, damit keine schädlichen Spannungen im Glas auftreten. Der zwangsläufigen Vergrößerung der Oberfläche begegnet man, indem die Pellets in eine Bleiegierung eingeschmolzen werden, wie dies in dem Pamela-Verfahren erfolgt.

Eine andere Möglichkeit, die Veränderung der Auslaugeigenschaften während langer Zeiträume zu vermeiden, besteht in der Anwendung keramischer Massen.

5. 2. 2. 3

Dichte keramische Werkstoffe

Aus tonkeramischen Massen lassen sich dichte Werkstoffe herstellen, wenn bei der Brenntemperatur ein ausreichender Anteil an Schmelzphase vorhanden ist, H. Salmang & H. Scholze (1966). Diese Schmelzphase erreicht man durch Zugabe von Flußmitteln, wie Feldspat, CaCO_3 oder illitischen Tonen und / oder durch Steigerung der Brenntemperatur. Während man bei den grobkeramischen Werkstoffen noch eine Wasseraufnahme von 6 Gewichtsprozent zuläßt, beträgt dieser Wert beim Porzellan null. Es können noch geschlossene Poren bis zu 10 Vol % auftreten.

- Steinzeug

Die Brenntemperatur des Steinzeuges liegt meist zwischen 1250 und 1280°C .

Es besteht zu

25 - 55 Gewichtsprozent aus Glasphase,

25 - 50 Gewichtsprozent aus Quarz und Cristobalit und

15 - 35 Gewichtsprozent aus Mullit.

Die chemische Widerstandsfähigkeit hat zu einer großen Verbreitung des Steinzeuges geführt. Die Säurebeständigkeit ist sehr gut, in alkalischen Medien wird es, wie alle Silikate, angegriffen. Dieser Angriff auf die Glasphase kann durch z.B.

BaCO_3 -Zugabe zur Masse eingeschränkt werden, E. Gugel et al. (1966).

- Porzellan

Porzellan unterscheidet sich von Steinzeug durch seinen weißen und durchscheinenden Scherben. Chemisch verhält es sich ähnlich wie Steinzeug. Während Steinzeug im allgemeinen eine Salzglasur aufweist, erhält das Porzellan seine dichte Glasur durch eine flußmittelreiche Schicht.

Neben diesen klassischen keramischen Werkstoffen, deren chemische Widerstandsfähigkeit und Dichtigkeit sie zu einer Verwendung als Fixierungsmaterial für radioaktive Abfälle befähigen könnten, seien noch einige weitere keramische Werkstoffe aufgeführt, welche sich möglicherweise auch als Fixierungsmaterialien eignen.

- Pyrographit lässt sich durch thermische Zersetzung von kohlenwasserstoffhaltigen Gasen erzeugen, H. Salmang & H. Scholze (1966). Er besitzt eine hohe Dichte und enthält nur geschlossene, submikroskopische Poren. Aus diesem Material hergestellte Gegenstände sind deshalb sehr gasdicht.
- Glaskeramik werden Produkte genannt, welche durch Entglasen hergestellt werden. Die Körper werden geformt, wie es in der Glastechnologie üblich ist. Anschließend wird durch ein zweistufiges Temperiern zunächst eine Keimbildungs- und dann eine Kristallisationsphase durchlaufen. Es lassen sich so Werkstoffe mit kleinen Ausdehnungskoeffizienten erzeugen.
- Cermets werden Werkstoffe genannt, in denen die günstigen Eigenschaften von Metallen und Keramik miteinander vereint werden. Es lassen sich sehr verschiedenartige Stoffe herstellen, die z.B. gute Oxidationsbeständigkeit, vollkommene Dichtigkeit und große Härte aufweisen.

Diese kurze Aufzählung einiger sehr temperaturbeständiger und dichter Werkstoffe sollte dazu dienen, nach weiteren Möglichkeiten zu suchen, hochradioaktive, wärmeentwickelnde Abfälle sicher und technisch einfach zu fixieren.

Der chemische Angriff auf silikatische Gläser und auch Keramik erfolgt, je nach pH-Wert der angreifenden Lösung, auf zwei Wegen, H. Salmang & H. Scholze (1966).

Im sauren Bereich wird das Si-O-Netzwerk nicht angegriffen. Durch Ionenaustausch können aber Netzwerkwandler, z. B. Alkali- oder Erdalkali-Ionen, gegen Protonen ausgetauscht werden.

Beim Angriff durch Basen führen die OH⁻-Ionen zum Aufbrechen von Si-O-Si-Bindungen, bis eine Auflösung des Gitters eintritt. Bei den normalen Gläsern ist der Angriff gering, aber feststellbar.

5. 2. 3

Organische Fixierungsmaterialien

Für verschiedene radioaktive Abfälle, wie z.B. kontaminierte Ionenaustauscher, werden organische Fixierungsmaterialien eingesetzt. Diese Stoffe bestehen aus verschiedenen Bitumensorten oder Kunststoffen. Aufgrund der meist hydrophoben Eigenschaften weisen mit organischen Stoffen verfestigte Abfälle im allgemeinen eine bessere Auslaugbeständigkeit auf, als mit Zement fixierte Abfälle. Der besseren Auslaugbeständigkeit steht eine geringere Strahlenbeständigkeit gegenüber. Vor allem geradkettige Kohlenwasserstoffverbindungen werden radiolytisch abgebaut. In der Tabelle 5 sind die Eigenschaften aufgeführt.

Tab. 5: Strahlenbeständigkeit verschiedener Kunststoffe nach H. Schönbacher et al. (1977):

| Kunststoffe | Strahlenbeständigkeit |
|--------------------------------|---|
| Celluloseester | 1×10^6 rad |
| Polymethacrylate | 5×10^6 rad |
| Neoprene | 5×10^7 rad |
| Chlorsulfoniertes Polyaethylen | 5×10^7 rad - 1×10^8 rad |
| Silikone | 1×10^8 rad |
| Vinylchloridpolymere | 5×10^7 rad - 5×10^8 rad |
| Polyester | 5×10^8 rad - 2×10^9 rad |
| Melamin-Formaldehyde | 7×10^8 rad - 2×10^9 rad |
| Phenolharze | 7×10^8 rad - 2×10^9 rad |
| Polyurethane | 5×10^8 rad - 5×10^9 rad |
| Epoxydharze | 5×10^8 rad - 5×10^9 rad |

Für die Einbindung der Abfälle sind verschiedene Verfahren anwendbar. Thermoplastische Stoffe werden in zwei- oder Vierwellenextrudern aufgeschmolzen und innig mit dem Abfall vermischt. In anderen Verfahren werden Monomere zusammen mit dem Abfall polymerisiert, so daß ein recht homogener Körper entsteht.

5. 2. 4

Kombinierte Verpackungen

Die Vorteile von Abfallkonditionierungsverfahren für schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit anorganischen und organischen Bindemitteln lassen sich in einfacher Weise miteinander verbinden. Zur Einbindung der radioaktiven Abfälle wie Schlämme, Filterhilfsstoffe, Konzentrate oder Ionenaustauscher werden anorganische Bindemittel, z.B. Zemente oder Gips, benutzt. Diese Stoffe weisen eine hohe Strahlenbeständigkeit und infolge ihres hohen spezifischen Gewichtes eine gute Abschirmwirkung auf. Dieser feste Abfallkern wird mit einer dichten, etwa ein bis zwei Zentimeter starken Schicht aus gut strahlenbeständigem Kunstharz, z.B. Polyester- oder Epoxidharz, allseitig umschlossen. Dieses Verfahren ist dann besonders einfach, wenn die mit anorganischen Bindemitteln vermischten Abfälle in einen vorgeformten Behälter aus geschäumtem Polystyrol eingefüllt werden und erstarren, E.-P. Uerpman (1977).

Nach dem Abbinden des Kerns wird die Hülle aus geschäumtem Polystyrol durch ein Lösungsmittel, z.B. Styrol, aufgelöst und der Ringraum zwischen dem Abfallkern und dem Blechfaß oder der verloreren Betonabschirmung mit einem Kunstharz vergossen.

Im Falle des hypothetischen Wassereinbruchs sind die Nuklide im Inneren des Abfallfaßes durch eine dichte, stabile Schicht aus Kunstharz gegen einen Kontakt mit Salzlösungen und damit gegen eine Auslaugung geschützt.

Als dichte, wasserundurchlässige Schicht kann auch eine ausreichend dicke Schicht aus inaktivem Bitumen dienen.

Da sich die organischen Materialien an der Oberfläche der Abfallbehälter befinden, wird ihre Strahlenbeständigkeit innerhalb der

Zerfallszeit der radioaktiven Abfälle nicht überschritten. Die strahlenbeständigeren, aber in ihrem Auslaugverhalten ungünstigeren, anorganischen Bindemittel befinden sich im Inneren der Abfallbehälter und bilden das eigentliche Fixierungsmaterial.

5.3

Einlagerung in Abbaukammern

Schwachradioaktive Abfälle weisen an der Oberfläche entsprechend den IAEA-Richtlinien für den Transport radioaktiver Stoffe eine Oberflächendosisleitungen von ≤ 200 mrem / h auf. Sie lassen sich ohne Abschirmung handhaben, IAEA Transportregulations (1973).

In der Versuchsanlage Asse wurde 1967 mit der Einlagerung der ersten schwachradioaktiven Abfälle begonnen. Zunächst wurden die 200-l-Fässer stehend übereinandergestapelt.

Bei dieser Art der Einlagerung wird der Hohlraum nur zu einem geringen Teil mit Abfällen gefüllt. Bei der Einlagerung in der Versuchsanlage Asse konnten nur 11 % des Kammerraumes gefüllt werden.

In einem zweiten Schritt wurden die Fässer liegend gestapelt.

Der Verfüllungsgrad lag bei ca. 17 - 35 %.

In einem weitergehenden Großversuch wurden die Abfallfässer über eine Böschung abgekippt und von Zeit zu Zeit mit losem Salz bedeckt. Neben dem Vorteil einer besseren Strahlenabschirmung bietet dieses Verfahren die Möglichkeit, die Hohlräume zu etwa 60 % wieder mit festen Stoffen zu füllen. Im Falle einer Berührung mit wässrigen Lösungen sind die Transportvorgänge durch das poröse Haufwerk stark eingeschränkt. Die Ausbreitung ausgelaugter Radioaktivität kann in diesen Haufwerkschichten nur durch langwierige Diffusionsvorgänge erfolgen.

5. 4

Einlagerung in Kavernen

Neben der Einlagerung radioaktiver Abfälle in Kammern mit seitlichen Eingängen lassen sich auch Hohlräume benutzen, die von oben durch eine besondere Öffnung gefüllt werden. Solche Hohlräume lassen sich grundsätzlich durch verschiedene Techniken herstellen. Bei der Erdöl- und Erdgasspeicherung werden mit Süßwasser ausgesolte Kavernen benutzt, die zumeist von über Tage aus hergestellt, verrohrt und gefüllt werden.

Bei der Lagerung radioaktiver Abfälle würde dieses Herstellungsverfahren erhebliche Schwierigkeiten bei der Beurteilung der langfristigen Sicherheit mit sich bringen, da z. B. die unmittelbare Untersuchung der Kavernenstöße bei Solkavernen z. Zt. technisch nicht möglich ist, abgesehen von Messungen mit einem speziellen Echolot.

Es lassen sich aber auch Kavernen durch bergmännische Verfahren mit Bohr- und Schießarbeit auffahren, wie dies in der Versuchsanlage Asse anhand einer 10000 m^3 großen Prototypkavernenanlage gezeigt wurde, Schmidt et al. (1979), Staupendahl et al. (1979).

Neben der Bohr- und Schießarbeit ist auch eine Herstellung der Kavernen mit schneidender Gewinnung möglich. Wenn das Material nach oben durch den Kavernenzugang abgefördert werden muß, wird der Kavernenhals mehrere Meter im Durchmesser betragen müssen. Es erscheint aber auch denkbar, die Kavernen bergmännisch von unten nach oben aufzufahren. Der Zugang würde hierbei durch eine seitlich angesetzte Strecke erfolgen, welche als Wetterweg und zum Salzabtransport dient (s. Abb. 19).

Vor einer Befüllung durch ein Bohrloch im Dach der Kaverne wird der untere, seitliche Eingang wieder verschlossen.

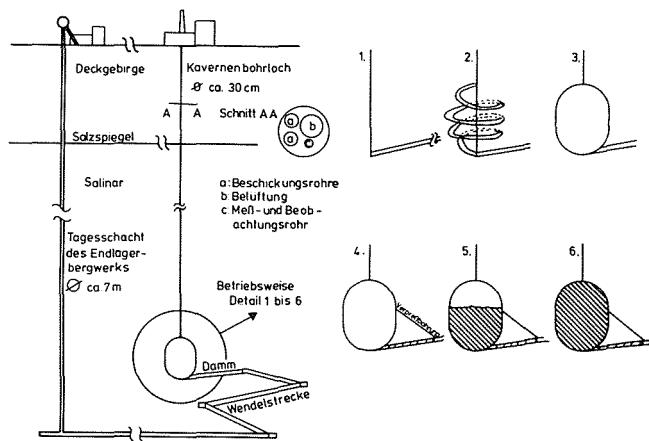


Abb. 19 : Die Einlagerung radioaktiver Abfälle in Kavernen bietet die Möglichkeit einer hohen Wiederverfüllung. Die Kaverne kann bergmännisch z. B. mit schneidender Gewinnung aufgefahren werden (1-3). Anschließend wird sie von über Tage aus vollständig verfüllt.

Die Vorteile der Einlagerung radioaktiver Abfälle in Kavernen liegen in der fernbedienten Befüllung des Hohlraumes, in der hohen Raumausnutzung und in der technisch verhältnismäßig einfachen Möglichkeit, die Zugänge sicher verschließen zu können. Wenn die Zwischenräume der radioaktiven Abfallbehälter mit einem fließfähigen Material wie z. B. Bitumen oder einem hydraulischen Bindemittel geschlossen werden, lässt sich in der Kaverne ein sehr hoher Feststoffanteil erzielen.

Durch ein Verpressen mit z. B. Zementen auf Magnesiabasis lassen sich bei einem Druck über dem zu erwartenden hydrostatischen Druck die Kavernen abdichten. Expandierende Stoffe fördern die Abdichtung.

Das Volumen, welches einem hypothetischen Wassereinbruch überhaupt nur noch zur Verfügung stünde, wird von dem Anteil des offenen Porenraumes des eingebrachten Materials bestimmt. Wenn der Kavernenhals durch einen dichten Stopfen verschlossen wird, kann keine Salzlösung an die Abfälle gelangen. Sollte es nicht möglich sein, die Stopfen ausreichend für den zu erwartenden hydrostatischen Druck auszulegen, so läßt sich ein automatischer Druckausgleich vorsehen, wie es in der Abbildung 20 dargestellt ist.

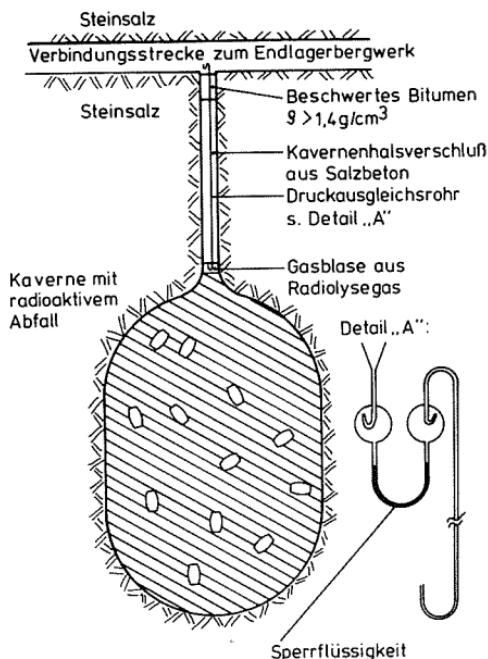


Abb. 20 : Vorschlag zum Verschluß einer Kaverne mit direktem Anschluß an das Endlagerbergwerk. Die Sperrflüssigkeit sorgt für selbst-

Schwankungen des atmosphärischen Luftdruckes, Radiolysegasentwicklung und Volumenkonvergenz haben in diesem Fall keinen Einfluß auf die Stabilität des Bohrlochverschlusses. Sollte sich zu irgendeiner Zeit ein Wassereinbruch ereignen, so könnte durch den sich aufbauenden hydrostatischen Druck eine kleine Laugenmenge in das unter atmosphärischem Druck stehende Nutzporenvolumen des Kaverneninhaltes gedrückt werden. Wenn der Druckausgleich erreicht ist, kann ein Stofftransport von ausgelaugter Aktivität nur über das enge Druckausgleichsrohr erfolgen. In diesem Rohr kann der Stofftransport radioaktiver Ionen durch die Formel für Diffusion in Zylindern beschrieben werden, W. Jost & K. Hauffe (1972).

$$N = \frac{N_0 e^{-\lambda t}}{4 D t} + e^{-\frac{x^2}{4 D t}}$$

Die einzelnen Ausdrücke haben folgende Bedeutung:

- N_0 = ausgelaugte Aktivität bei Beginn der Diffusion
 λ = Zerfallskonstante des betrachteten Radionuklids
 t = Zeitraum seit Beginn der Diffusion
 D = Diffusionskoeffizient des Nuklids in gesättigter Salzlösung
 X = betrachtete Weglänge (Länge des Ausgleichsrohres)
 N = die nach der Zeit t in der Entfernung x vorhandene Aktivität

Durch verhältnismäßig kurze Diffusionsstrecken lassen sich die spezifischen Aktivitäten in der Lösung außerhalb der Lagerkaverne sehr stark herabsetzen.

Der Kaverneninhalt besitzt ein offenes Volumen, das durch die kontrolliert über das Druckausgleichsrohr eindringende Lauge gefüllt wird. Die verdrängten Gase einschließlich der Radiolysegase sammeln sich unter dem Kavernenhals-Verschluß an. Durch die Volumenkonvergenz der Kaverne wird deren Inhalt an festen Stoffen soweit kompaktiert, bis dem Druck des Salzgebirges ein gleich großer Druck im Inneren der Kaverne entgegenwirkt. Das hochgeführte Endstück des Druckausgleichrohres (A) ragt in den obersten Teil des gespannten Gaspolsters hinein. Durch die Volumenkonvergenz wird eventuell Gas, aber keine kontaminierte Lauge in den oberhalb der Kaverne befindlichen laugefüllten Grubenraum gedrückt. Ein selbsttätiger Verschluß verhindert eine Durchmischung mit Lauge.

Durch die beschriebene Art der Versiegelung einer Kaverne ist es möglich, den radioaktiven Inhalt wirkungsvoll an einer Ausbreitung zu hindern. Verschiedene Barrieren arbeiten unabhängig voneinander. Der Verschluß des Kavernenhalses ist vor einem chemischen Angriff durch korrosiv wirkende Salzlösung nach oben durch eine dicke Schicht von beschwertem Bitumen und nach unten durch ein sich selbsttätig aufbauendes Druckgaspolster geschützt.

Die Einlagerung in kavernenartige Hohlräume, insbesondere nach Auffahrung der Kaverne von unter Tage aus, kann als eine sichere Methode für schwach- und mittelradioaktive Abfälle angesehen werden.

Von gleichwertiger Bedeutung für die sichere Einlagerung und Verfüllung derendlager-Kavernen sind zur Zeit in der Prototyp-Kaverne der Schachtanlage Asse II langzeitig angesetzte geomechanische Untersuchungen, welche das rheologische Langzeitverhalten des Hauptsalzes, Na₂β der Staßfurt-Serie um einen etwa 70 m tiefen Kavernenhohlraum

klären sollen. Von Bedeutung für eine hydrologische Abdichtung des als gestrecktes Rotationsellipsoid mit aufgesetztem Kreiskegel ge- stalteten Hohlraumes von maximal 24,12 m Durchmessergröße sind:

- die Gewährleistung der Standsicherheit der Kaverne während der Befüllungszeiträume,
- die Bemessung von Sicherheitspfeilern zu den Salzstockrandzonen,
- das geomechanische Verhalten der Kaverne und ihres Inhaltes nach vollständiger Befüllung durch dieendlagerung als Schütt- güter bei hohen Füllungsgrad, Staupendahl et al. (1979).

Die gebirgsmechanischen Grundlagen dieser noch in Untersuchung be- findlichen Fragestellungen auch nach einem sicheren hydrologischen Abschluß des Kavernenbauwerkes können hier nicht betrachtet werden, Dreyer (1971), Röhr (1973), Albrecht et al. (1978).

5. 5

Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Bohrlöchern

Im ersten Extraktionszyklus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Kernbrennstoffe fällt etwa 99 Prozent des gesamten Aktivitätsinhaltes des radioaktiven Abfalls an. Die hochradioaktiven Abfallösungen werden mit Glasbildern versetzt und in Glas verfestigt (siehe Kap. 5. 2. 2. 2).

Die hochradioaktiven Abfälle enthalten pro Liter Glasprodukt etwa 1000 Curie. Durch die Energiefreisetzung beim radioaktiven Zerfall erwärmen sich die Glasblöcke je nach der Konzentration der Spaltprodukte und der Wärmeabfuhr über ihre Umgebungstemperatur. Die spezifische Wärmeproduktion kann anfänglich je nach Konzentration der Spaltprodukte im Glas zwischen ca. 15-50 Watt pro Liter liegen. In den ersten Jahrzehnten ist beim Umgang und der Handhabung die Wärmeproduktion der hochradioaktiven Abfälle zu berücksichtigen. Nach ca. 50 Jahren ist die spezifische Aktivität auf etwa 1 Curie pro Liter gesunken. Die Wärmeproduktion reicht nach diesem Zeitpunkt nur noch zu einer Temperaturerhöhung gegenüber der Umgebung um wenige Grad.

Die Wärmeentwicklung hochradioaktiver Abfälle ist ein schwieriges, aber zeitlich begrenztes Problem.

Neben der Hauptmenge der Spaltprodukte gelangen etwa 0,2 - 0,5 Prozent der Aktivität an länger lebigen α -Strahlern aufgrund der Extraktionsgleichgewichte in den flüssigen Phasen in den hochradioaktiven Abfall. Durch diesen Gehalt an α -Aktivität wird nach B. Verkerk (1976) ein radioaktiver Glasblock nach ca. 1000 Jahren noch die spezifische Toxizität von starken chemischen Giften, wie z.B. Phosgen aufweisen. Die Radioaktivität der α -Strahler

fällt wesentlich langsamer als die der β^-/γ -Strahler Cs-137 oder Sr-90 ab.

Nach Zeiträumen von ca. $5 \cdot 10^5$ Jahren ist allerdings auch das sehr langlebige Pu-239-Isotop mit einer Halbwertszeit von 24 600 Jahren auf ca. ein Millionstel der Ausgangsaktivität zerfallen. Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle bietet folglich zwei technische Schwierigkeiten. Zunächst muß für einen Zeitraum von einigen Jahrzehnten die Wärmeproduktion der Abfälle beherrscht werden. Darüberhinaus muß der radiotoxische Inhalt für lange Zeiträume sicher aus der Biosphäre ferngehalten werden.

Zur Lösung dieser Aufgaben wird schon seit längerem von Fachleuten des In- und Auslands die Einlagerung in Bohrlöchern vorgeschlagen.

Durch den unmittelbaren Kontakt der Abfälle mit dem gut wärmeleitenden Steinsalz entsteht kein Wärmestau. Durch die Konvergenz der Bohrlöcher werden die nach oben durch Stopfen verschlossenen Abfälle vollständig vom Salzgebirge eingeschlossen.

5. 6

Aufgaben und Möglichkeiten des Versatzes

Als Versatz werden feste oder flüssige Stoffe bezeichnet, die nach der Gewinnung nutzbarer Mineralien in die offenstehenden Grubenbaue eingefüllt werden. Diese Stoffe bestehen im Kalibergbau im allgemeinen aus Fabrikrückständen wie z.B. Steinsalz, Gips, Kieserit oder Magnesiumchlorid-haltigen Lösungen. Daneben wird auch Asche oder taubes Nebengestein als Versatz benutzt.

Der Versatz soll die leerstehenden Hohlräume füllen und zu einer Stützung der hangenden Schichten beitragen. Häufig besteht keine Möglichkeit die Versatzstoffe übertage zu lagern. Das Versatzmaterial enthält häufig größere Mengen an Feuchtigkeit, die teilweise wieder als Grubenwässer gesammelt und von dem Versatzhaufwerk physikalisch oder chemisch gebunden werden. Im Laufe der Zeit verdichtet sich der Versatz durch sein Eigengewicht, durch Konvergenz der Hohlräume, durch chemische Umwandlung von Versatzkomponenten oder durch Umkristallisation. Diese allmähliche Verfestigung verbessert die erwünschte Tragfähigkeit.

5. 6. 1

Stützwirkung des Versatzes

Die stützende Wirkung des Versatzes ist in wenig standfestem Gebirge wie Kohle, Erz oder Kalisalzen von großer Wichtigkeit.

So bestand in Kalibergwerken häufig die Notwendigkeit, die Abbaukammern in den Kalisalz-Lagern wenige Wochen nach dem Leerfördern wieder zu versetzen. In der Anfangszeit wurden hier oft entscheidende Fehler begangen. So ist z. B. das Kalisalzbergwerk Leopoldshall unter anderem deshalb ersoffen, weil in einem zu großen und zu nahe am Salzspiegel gelegenen Abbau kein stützender Versatz eingebracht worden ist, D. Hoffmann (1972). Für dieendlagerung radioaktiver Abfälle ist die stützende Wirkung des Versatzes nicht so sehr entscheidend, da ja die benötigten Hohlräume ohnehin nur im homogenen und standfesten Steinsalz des Salzstockkernes aufgefahrene werden. Die Geometrie der Hohlräume wird außerdem so bemessen, daß eine Standsicherheit auch ohne stützenden Versatz gegeben ist.

Trotzdem ist die Frage des Versatzes für ein Endlager sehr wichtig, da er als Barriere für die Verbindungsmöglichkeit der eingelagerten

Aktivität zur Biosphäre wirkt. Diese wichtigen Aspekte, welche im Bergbau sonst nicht auftreten, werden im folgenden behandelt.

5. 6. 2

Adsorbierende Eigenschaften des Versatzes

Bei einem Kontakt von Salzlösungen mit eingelagerten Abfällen im Falles eines hypothetischen Wassereinbruchs besteht die Möglichkeit einer Kontamination der Salzlösungen. Diese Kontamination besteht aus radioaktiven Ionen, von denen wegen seiner Radio-toxizität das Sr-90-Isotop das kritische Nuklid während der ersten vierhundert Jahre ist. Es eignen sich deshalb solche Stoffe für radioaktive Abfälle besonders gut als Versatzmaterialien, die in der Lage sind, aus den hochgesättigten Alkali- und Erdalkali-haltigen Lösungen das radioaktive Strontium zu binden. Diese Bindung kann in einer physikalischen Adsorption durch oberflächenaktive Stoffe bestehen.

Die hohen Salzgehalte der Lösungen werden allerdings die aktiven Zentren, die sich zur Adsorption eignen, überwiegend mit inaktiven Ionen sättigen. Eine Adsorption radioaktiver Sr-90-Ionen wird nur in geringem Ausmaß stattfinden.

Als wesentlich wirkungsvoller könnten sich solche Stoffe erweisen, die Strontium selektiv einzubauen vermögen. Es ist bekannt, daß Tone in der Lage sind, eine große Anzahl von Erdalkali-Ionen in Zwischengitterplätzen aufzunehmen. Es müssen Tonsorten gesucht werden, die beim Zusatz von Sr-90-haltigen Lösungen einen möglichst großen Dektontaminationseffekt haben, das radioactive Strontium also möglichst vollständig aus den Lösungen herausfiltern. Ein solcher Stoff wäre zur Verfüllung der unmittelbaren Umgebung der radioaktiven Abfälle, wie z. B. Lagerbohrungen oder Zwischenräumen zwischen Abfallfässern sehr geeignet.

5. 6. 3

Versatz als Sperre konvektiver Stoffausbreitung

Neben der Adsorption kann die Ausbreitung auch durch eine möglichst dichte Verfüllung der Lagerräume eingeschränkt werden.

In unversetzten, offenstehenden Hohlräumen können sich im Falle des hypothetischen Wassereinbruchs Strömungen ausbilden. Diese haben ihre Ursache in Dichteänderungen, die durch Temperatur- oder Konzentrationsunterschiede hervorgerufen werden. Diese Strömungen können sehr weitreichend sein. Die tieferliegenden Grubenteile sind aufgrund der geothermischen Situation die wärmeren. Die dort befindliche Salzlösung erwärmt sich an den Salzoberflächen. Dabei nimmt die Dichte geringfügig ab. Die sich gleichzeitig mit der Erwärmung einstellende höhere Lösefähigkeit kann wegen der bei nahezu gesättigten Magnesiumchlorid-Lösungen äußerst geringen Auflösungsgeschwindigkeit nicht wirksam werden. Die Dichteabnahme durch thermische Ausdehnung kann durch Konzentrationserhöhung nicht schnell genug ausgeglichen werden. Die Folge ist, daß sich die Lösungen langsam innerhalb der offenstehenden Hohlräume umwälzen. Die Wärme wird von den wärmeren Stoßflächen in der Tiefe kontinuierlich zu kälteren in geringerer Tiefe transportiert. Diese langsamen Konvektionsströmungen lassen sich durch unterschiedliche Maßnahmen eindämmen.

Durch Verringerung des freien Querschnittes kann der Strömungswiderstand soweit erhöht werden, daß keine nennenswerte Konvektion mehr auftreten kann. Diese läßt sich mit Materialien wie z.B. gemahlenem Steinsalz, Sand, Kies oder Aschen erreichen, die in gesättigter $MgCl_2$ -Lösung beständig sind.

Eine weitere Möglichkeit, Konvektionsströmungen zu unterbinden, besteht darin, die Viskosität der Salzlösungen durch geeignete Beimengungen zum Versatz soweit zu erhöhen, daß keine Strömungen mehr auftreten. Durch physikalisch vernetzte, in Wasser quellfähige Gele, wie z.B. Methylzellulose, läßt sich das sehr einfach und selbsttätig erreichen. Schon etwa einprozentige Lösungen würden ausreichen, eine Konvektion zu erschweren.

Ein Hohlraum von 20 000 m³, der mit etwa 30 000 Stück 200-l-Fäßern und 14 000 m³ gemahlenem Salz gefüllt ist, enthält noch etwa 3 200 m³ freien Raum, der im Falle eines hypothetischen Wassereinbruchs mit Salzlösungen gefüllt werden kann. Etwa 30 bis 40 Tonnen quellfähiges Material würde ausreichen, die Salzlösung in dieser Lagerkammer in ein physikalisch vernetztes Gel zu überführen. Dies würde pro Abfallbehälter etwa 1 - 1,3 kg Methylzellulose erfordern.

Ein dritte Maßnahme läßt sich auch nach einem hypothetischen Wassereinbruch zur Vermeidung großräumiger Konvektionszellen anwenden. Dabei werden mit Wasser nicht mischbare Flüssigkeiten von übertage aus in die vollgelaufenen Grubenräume gepumpt. Durch Verwendung von organischen Lösungsmitteln entsprechender Dichte werden zwischen die zu erwartenden unterschiedlichen Salzlösungen (s. Kap. 4. 4. 2) Sperrsichten aufgebaut. Diese Sperrsichten transportieren die Wärme von unten nach oben durch interne Konvektion, sind aber für radioaktive Nuklide in Ionenform ein schwer zu überwindendes Hindernis. Die Sperrsichten sind flüssig und breiten sich horizontal soweit aus, bis sie an eine feste Phasengrenze (Stoß, Schachtwandung) gelangen. Es lassen sich mehrere solcher Sperrsichten übereinander aufbauen, die immer abwechselnd aus Salzlösungen und organischen Lösungsmitteln bestehen. Die Dichte ändert sich jeweils sprunghaft an den Phasengrenzen. Die einzelnen Phasen vermischen sich nicht mit den

jeweils benachbarten. Eine Stoffausbreitung durch Diffusion wird stattfinden können, großräumige Konvektionsströmungen werden aber jeweils an den Phasengrenzen abgelenkt.

5. 6. 4 Auswahl von Versatzmaterialien

Für die Auswahl der Versatzmaterialien sind Kriterien anzulegen, die sich nach der jeweils zu erfüllenden Aufgabe richten.

Beim Auffahren der untertägigen Streckennetze und Einlagerungshohlräume fällt loses Salz an, welches als Versatzmaterial benutzt werden kann. Durch die Auflockerung bei der Gewinnung verringert sich die Raumdichte des Steinsalzes von $2,16 - 2,20 \text{ g/cm}^3$ auf $1,35 - 1,38 \text{ g/cm}^3$, das heißt 1 m^3 kompaktes Steinsalz im Gebirge nimmt nach seiner Gewinnung und Zerkleinerung etwa $1,6 \text{ m}^3$ Schüttvolumen ein. Das entspricht einem lufterfüllten Porenvolumen von ca. 37 %. Ein Kriterium für die Auswahl von Versatzstoffen ist das Verhalten bei Einwirkung eines äußeren Druckes. Wenn das Material sehr schnell kompaktiert wird und es der Einwirkung des Druckes standhält, eignet es sich gut als Verfüllmaterial an Orten, die einer starken Konvergenz unterliegen. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, daß Basaltschotter für die Verfüllung von Füllröhren und Schachtröhren mit gutem Erfolg angewendet wird.

Dichte oder quellfähige Stoffe wie Tone, bitumenimprägnierte Zemente oder Gele können dort zum Einsatz kommen, wo im Nahbereich von radioaktiven Abfällen eine Ausbreitung von radioaktiven Ionen durch Strömung verhindert werden soll.

Bentonitische Tone können Dank ihrer guten adsorbierenden Eigenschaften die Kontamination in den Laugen herabsetzen.

Poröse Stoffe wie gemahlenes Steinsalz, Sand, Kies, Asche oder andere Gesteine verhindern durch die starke Verringerung der freien Querschnitte eine großräumige Konvektion.

5. 6. 4. 1

Hydraulischer Versatz

Das bewußte Fluten untertägiger Hohlräume mit Grundwasser oder Salzlösungen wird als hydraulischer Versatz bezeichnet. Durch den hydrostatischen Druck wird das Grubengebäude entlastet und es ist eine Stützwirkung zu erwarten.

Andererseits kann bei ungenügender Sättigung der Lösungen eine selektive Auflösung vor allem der Kalium- und Magnesiumsalze auftreten. Sollte etwa Süßwasser in die Hohlräume gepumpt werden, so ist mit einer starken Auflösung vor allem von Carnallitit und, soweit vorhanden, auch Kainit zu rechnen.

Für den Versatz von Endlagern radioaktiver Abfälle sind Fluide nur bedingt geeignet, da große Querschnitte offenbleiben würden und die schon erwähnte Konvektion zu einer Verteilung der auslaugbaren Aktivität im laugefüllten Grubengebäude führen kann.

Die Möglichkeit, durch organische Lösungsmittel Konvektionssperren zu errichten, wurde schon im Kapitel 5. 6. 3 beschrieben. Diese Maßnahme ist jederzeit und technisch einfach von über Tage aus durchführbar.

5. 6. 4. 2

Versatz mit Schüttgut

Beim Versatz mit Schüttgut kommen gebrochenes Salz, Sand, Kies, Asche, Schotter oder Mischungen daraus in Frage.

Schüttgüter werden trocken eingebracht und können bei einer mechanischen Verdichtung in kurzer Zeit den Gebirgsdruck aufnehmen und zu einer Stützung des Grubengebäudes beitragen. Schüttgüter besitzen ein hohes spezifisches Gewicht. Dies führt zu großen Aufwendungen beim über- und untertägigen Transport. Beim Übertagetransport kommen Schienen-, Straßen- oder Binnenschiffahrtswege vom Ursprungsort zu der Endlagerstätte in Betracht.

Gebrochenes Steinsalz fällt bei der Auffahrung des Endlagers an und muß übertage aufgehaldet werden.

Asche fällt in Kohlekraftwerken in großen Mengen an. Die jährliche Menge kann auf etwa $6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ geschätzt werden, Esche (1977), Schäfer & Knatz (1968).

Durch die Staubentwicklung bei der trockenen Versatzeinbringung können Verschlechterungen der Arbeitsplatzbedingungen untertage auftreten.

Für den saigeren Transport kommen Gefäßförderung, Fallbühnen oder ausgekleidete Rohrleitungen in Betracht. Der untertägige horizontale Transport kann mit Ladefahrzeugen oder Förderbandstrecken erfolgen. Eine Verdichtung des Materials durch Rüttelwalzen kann bei Salz, Sand oder Kies erforderlich sein.

Bei der Verwendung von Sand oder Kies ist mit einem Wassergehalt zu rechnen. Bei den großen erforderlichen Mengen können Schwierigkeiten beim Abtransport des verdunstenden Wassers durch die

Wetterführung auftreten. Durch hohe Luftfeuchtigkeit kann auch das Grubenklima verschlechtert werden. Bei freigelegten Flächen hygrokopischer Salzminerale wie z. B. Carnallit könnten Wetterlaugen entstehen. Bei Aschen handelt es sich um in großer Menge vorhandene Stoffe, deren Beseitigung Schwierigkeiten macht. Durch den Einsatz als Versatzmaterial könnten hier zwei Schwierigkeiten zugleich gelöst werden.

Ein Versatz mit Schüttgütern würde viel Zeit und damit Kosten erfordern. Die verfüllten Hohlräume machen einen Porenraum von ca. 20 - 40 Prozent aus. Im Falle eines hypothetischen Wassereinbruches könnten sich ausgelaugte Nuklide nur durch sehr langsame Diffusionsvorgänge ausbreiten.

5. 6. 4. 3 Versatz mit hydraulischen Bindemitteln

Als hydraulische Bindemittel werden solche Stoffe bezeichnet, die mit Wasser chemisch reagieren und sich dabei verfestigen. Für Versatzzwecke kommen Zemente, hydraulische Kalke, Gips-Halhydrat und hydraulisch reagierende Flugaschen in Betracht. Wegen der teilweise beträchtlichen Kosten können sie mit hydraulisch inaktiven Füllern vermischt werden.

Da es sich meistens um fein gemahlene Stoffe handelt, kann Gefäßförderung, Fallbühnen- oder Rohrleitungstransport angewandt werden. Bei hydraulischen Bindemitteln ist nach dem Erhärten noch mit einem Porenvolumen von etwa 10 - 20 Prozent zu rechnen. Im Falle eines hypothetischen Wassereinbruches können Salzlösungen in diesen Porenraum eindringen und das Verfestigungsmaterial

benetzen. Bei Zementen sind die im Kapitel 5.2.2.1 beschriebenen Zersetzungreaktionen durch Ionenaustausch und Ettringitbildung möglich und zu erwarten.

Gips fällt unter anderem in der chemischen Industrie in großer Menge als Nebenprodukt an. Ein Teil wird zu Baustoffen wie z.B. Platten weiterverarbeitet. Im Kohlenbergbau wird Gips als Verfüll- und Dämmmaterial mit gutem Erfolg eingesetzt.

Zemente und Gips können mit Wasser vermischt und verpumpt werden. Hohlräume lassen sich damit verpressen.

Einige Stäube verhalten sich latent hydraulisch. Nach einem polnischen Verfahren werden sie mittels Druckluft in untertägige Hohlräume, Spalten und Klüfte zur Vermeidung von Bergschäden eingeblasen und anschließend mit einer empirisch ermittelten, in etwa stöchiometrischen, Wassermengen versetzt, J. Kostrzewski & A. Czekaj (1976). Es lassen sich so einachsige Druckfestigkeiten von $2,0 - 11,3 \text{ N/mm}^2$ erreichen. Der Versatz mit Flugasche könnte sich zur restlosen Verfüllung von verschlossenen Einlagerungskammern für schwach- oder mittelradioaktive Abfälle eignen. Das Siliziumdioxid in den Stäuben liegt in Form kleiner, runder Kugeln von weniger als $2\mu\text{m}$ vor. Es ist deshalb als nicht Silikose-erzeugend anzusehen.

5.6.4.4

Versatz mit gespannten Gasen

Die Einlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen wird weltweit als beste Methode angesehen, die radioaktiven Stoffe über Jahrtausende sicher aus der mit Leben gefüllten Zone der Erde fernzuhalten. Der Ausschluß aus der Biosphäre muß bis zum Zerfall der Radioaktivität

auf ungefährliche Werte erfolgen. Bei der Einlagerung in geologische Formationen stellt das Vollaufen eines Salzstock-Endlagers mit Wasser einen hypothetischen Störfall dar. Die Auslaugung von Radioaktivität und das anschließende Eindringen der kontaminierten Lösungen in das Grundwasser des Salzstock-Deckgebirges stellt die gefährlichste Art der Ausbreitung dar. Durch technische Maßnahmen kann der direkte Kontakt von Wasser mit den im Steinsalz eingelagerten Abfällen sicher und auf Dauer verhindert werden. Der Weg in die Kluft- und Poren speicher (Festgesteinsaquifere) des Deckgebirges wird durch ein neues Einlagerungskonzept von Anfang an unterbunden, da ein direkter Kontakt von Laugen mit den radioaktiven Abfällen vermieden werden soll.

Wie in den Kapiteln 5. bis 5.6.4.3 und 5.6.5 bis 5.6.5.3 dargelegt wird, lassen sich durch eine Vielzahl hintereinandergeschalteter Barrieren die radioaktiven Abfälle gegen eine Auslaugung schützen.

Dies geschieht durch die Verwendung hochwertiger Fixierungs materialien wie Glas, Keramik, Bitumen, Kunststoffe und hydraulische Bindemittel. Daneben werden die Lagerkammern oder Kavernen durch Salz und hydraulische Bindemittel verschlossen; die Zwischenräume zwischen den Abfallfässern werden mit losem Salz verfüllt. In Bohrungen eingebrachte Abfälle sollen durch Stopfen aus verschiedenen Materialien wie Salz, Zement oder Bitumen geschützt werden. In allen diesen Fällen wird aber im Falle eines angenommenen Laugen einbruches ein unmittelbarer Kontakt eines Teils oder aller eingelagerten Abfälle mit eindringenden wässrigen Lösungen nicht sicher verhindert werden können. Dadurch kann ein Teil der eingelagerten Radioaktivität ausgelaugt und durch Konvektion und Diffusion über einen mehr oder weniger großen Bereich der untertägigen Hohlräume verteilt werden.

Für die Einlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle sind eigens für diesen Zweck hergestellte untertägige Endlager vorgesehen. Bisher entsprechen diese in ihrem Zuschnitt herkömmlichen Bergwerken. Die hochradioaktiven Abfälle umfassen die Hauptmenge der zur Endlagerung kommenden Aktivität. Die in eine Glasmatrix eingeschmolzenen Abfälle sollen in Edelstahlbehältern verpackt in Bohrlöchern zur Endlagerung gebracht werden.

In den bisherigen Konzepten erfolgt ein Anschluß des Endlagerniveaus (Endlagersohle) horizontal an Tagesschächte über einen Sohlenanschlag in gleicher Teufe.

Der in den bisherigen Konzepten geplante horizontale Anschluß der Endlagersohle an Tagesschächte begünstigt jedoch eine Ausbreitung der Radioaktivität infolge von Konvektionsströmungen nach Laugeneinbrüchen insbesondere über die Schachtröhren.

In einem verbesserten Ausrichtungsvorschlag werden die für den Betrieb des Endlagers benötigten Schächte tiefer als die Endlagerräume im Salzstockkern abgeteuft. Sie besitzen zu den Einlagerungsfeldern auch einen ausreichenden Sicherheitsabstand. Im Falle des ange nommenen Laugeneinbruches läßt sich in den für die Endlagerung radioaktiver Abfälle genutzten Kammern, Kavernen oder Strecken eine Luftblase erzeugen, welche unter dem hydrostatischen Druck der Wassersäule steht. Dadurch ist sichergestellt, daß die Wassermassen keinen unmittelbaren Zutritt zu den Endlagerbereichen haben. Steinsalzformationen sind im ungestörten Gebirgsverband erfahrungsgemäß undurchlässig für Gase. Bereits Börger (1942) weist auf die Entstehung von unter hydrostatischem Druck stehenden Luftblasen in abgesoffenen Salzbergwerken hin.

Hofrichter (1977) hält komprimierte Luftblasen ebenfalls für eine wirksame Barriere bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle.

Die erforderlichen Luftblasen lassen sich in folgender Weise erzeugen:

Die für das Endlager benötigten Schächte werden in einem Abstand (ca. 200 m) von dem eigentlichen Endlagerbereich für hochradioaktive, wärmeentwickelnden Abfall abgeteuft. Nachdem diese Schächte bis auf ca. 1000 m Tiefe niedergebracht sind, werden Füllörter und horizontale Verbindungsstrecken aufgefahren. Das eigentliche Einlagerungsfeld wird ca. 200 - 300 m oberhalb dieses Niveaus angelegt und ist mit den tiefergelegenen Verbindungsstrecken nur über Wendelrampen verbunden. Im Falle eines Wassereinbruchs steigt die Lauge zunächst in den unteren Teil des Grubengebäudes an und komprimiert die in den Lagerstrecken befindliche Luft bis zum hydrostatischen Druck der Wasser-Laugensäule.

In der Abbildung 21 ist diese Ausrichtungskonzeption der Endlagerbereiche vor und nach einem Laugeneinbruch schematisch dargestellt.

Die zur Fernhaltung der eingedrungenen Laugen erforderliche Luftmenge lässt sich über in den Schächten und Strecken verlegte Rohrleitungen in den Endlagerbereich mit übertätig eingerichteten Kompressorenstationen pressen.

Sollte ein Wassereinbruch aus anderen hangenden Gebirgsbereichen als in der Schachtröhre erfolgen, so ist es möglich, auch in diesem Fall weite Teile des Endlagers vor einem Zutritt von Flüssigkeiten durch Druckgaskissen zu sperren. Dies kann in der Weise geschehen, daß das gesamte Einlagerungsfeld durch horizontale Strecken in Verbindung steht.

Durch die Zwischenschaltung eines Polsters aus unter Druck stehenden Gasen zwischen die eingedrungenen Salzlösungen und die radioaktiven

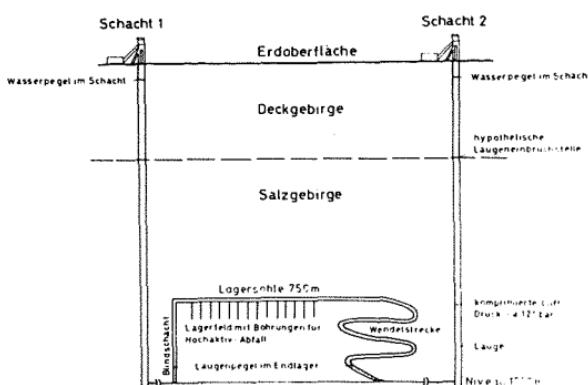
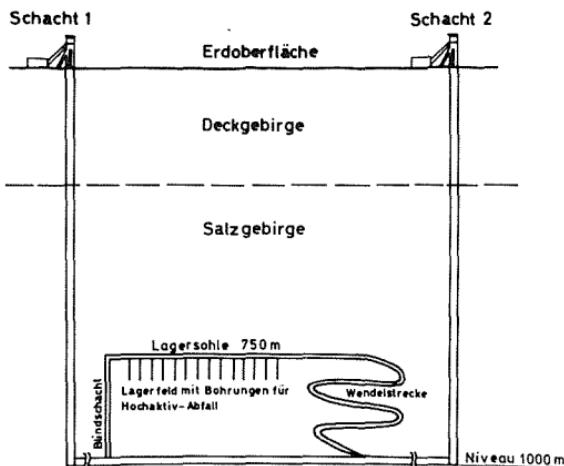
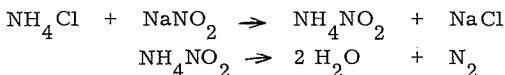


Abb. 21: Schematische Darstellung eines Endlagers vor (oben) und nach einem Laugeneinbruch (unten).

Durch die besondere Anordnung des Lagerfeldes kann dieses nicht überflutet werden. Es wird durch ein Polster aus komprimierter Luft geschützt.

Abfälle werden diese sicher, langfristig und selbsttätig geschützt. Es sind zudem bergmännische Gegenmaßnahmen möglich, welche eine Verfüllung der gasgefüllten Hohlräume von über Tage aus erlauben und eine Ausbreitung kontaminiierter Laugen in Bereiche außerhalb des unmittelbaren Laugeneinbruchbereiches verhindern. Durch während der Vorrichtung der Endlagerhohlräume eingebaute Rohrleitungen, welche im Einlagerungszeitraum als Kühl-, Frischwetter- oder Materialtransportleitungen genutzt werden können, lassen sich in das unter erhöhtem Druck stehende Luftkissen breiförmige Verfüllmassen unter erhöhtem Druck einpumpen, welche erstarren und letztlich zu einem mit festen Massen dicht verfüllten Endlagerhohlraum führen.

Die erforderlichen Gasmengen, welche auf ca. 100 bar komprimiert werden sollen, lassen sich neben dem Einpressen mittels Kompressoren von über Tage aus auch inhärent durch folgende chemische Reaktion erzeugen:



Ammoniumnitrit zerfällt bei Erwärmung in Wasser und Stickstoff. Wenn der gegen eine Laugenüberflutung zu schützende Bereich z. B. in 750 m Teufe und der Salzspiegel in 250 m Teufe liegt, so beträgt der hydrostatische Druck einer Wasser- und Laugensäule in 750 m Teufe etwa 85 bar.

Aus je einem Mol NH_4Cl ($\approx 53,5$ g) und einem Mol NaNO_2 (≈ 69 g) wird ein Mol N_2 (≈ 28 g) freigesetzt, welches bei Normalbedingungen ein Volumen von 22,4 l einnimmt. Bei 85 bar wird dieses Volumen auf etwa 264 ml komprimiert. Für jeden Kubikmeter Hohlraum, der unter diesen Bedingungen gegen eine Überflutung mit Laugen geschützt werden soll, müssen also etwa 200 kg Ammoniumchlorid und etwa 260 kg

Natriumnitrit als festes Salz eingebracht werden. Wenn nun zu irgend einem Zeitpunkt nach der Stilllegung an das trocken eingelagerte Natriumnitrit und Ammoniumchlorid Laugen gelangen, so gehen die Salze in Lösung und die Gasbildungsreaktion setzt ein.

5. 6. 5 Versatz in verschiedenartigen untertägigen Hohlraumformen

Die Eignung eines Versatzmaterials für verschiedene Zwecke richtet sich auch nach den bergmännischen Hohlräumen einesendlagers, die zu verfüllen sind. So eignet sich für horizontale Lagerkammern ein Material, welches sich in Böschungen anschütten lässt, wenn im entferntesten Teil mit dem Versatzeinbringen begonnen wird. Für Kavernen, die abschüssig sind oder von oben befüllt werden können, eignen sich flüssige, breiförmige oder gut rieselfähige Stoffe.

Der Materialtransport von über Tage kann durch Fallbühnen oder Rohrleitungen erfolgen. Der Transport in Rohrleitungen erfordert ein pumpfähiges Gemisch oder ein sehr feinkörniges Material wie z.B. gemahlene Bindemittel oder Flugaschen.

5. 6. 5. 1 Versatz von Kammern

Wenn bei der Einlagerung von radioaktiven Abfällen auf bereits bestehende und weitgehend leer geförderte Kalisalzbergwerke und Steinsalzbergwerke zurückgegriffen werden kann, so bestehen dort häufig Abbaukammern, die zweckmäßigerverweise mit verfestigten Abfällen in Behältern verfüllt werden. Da die leerstehenden Abbaukammern im Steinsalz teilweise eine beachtliche Höhe erreichen und im unmittel-

baren Nahbereich der Stöße und Firsten aufgelockerte Salzschalen auftreten können, wird eine Beraubung der Stöße und Firsten zur Vermeidung einer Gefährdung des Einlagerungsbetriebes erforderlich sein. Wenn die Behälter gestapelt werden, so muß in der entlegensten Ecke mit den Arbeiten begonnen werden.

Wenn sich die Kammer durch einen Zugang kurz unterhalb der Firste befüllen läßt, so bietet dies verschiedene Vorteile. Die Abfälle können dann zu einer geböschten Halde angeschüttet werden und zur Strahlenschirmung lagenweise mit inaktivem Verfüllmaterial (Steinsalz) überdeckt werden. Ein aufwendiges Stapeln in der Kammer entfällt. Die Strahlung der Fässer ist stets gut abgeschirmt. Firste und Stöße der Kammer brauchen nur am Kammereingang beraubt werden. Spätere Beraubearbeiten können bequem und sicher von der Böschung aus vorgenommen werden.

Durch den Fahrzeugverkehr auf der Böschung aus Abfallbehältern und inertem Versatzmaterial wird der Versatz verdichtet.

5. 6. 5. 2 Versatz von Strecken

Zugangsstrecken zu verfüllten Feldesteilen, die nicht mehr offen gehalten werden müssen, können gleichfalls durch Abfallbehälter und inaktiven Versatz verfüllt werden. Zylindrische Behälter können liegend oder stehend gestapelt werden. Der Zwischenraum zu Stößen und Firsten kann mit losem Salz versetzt werden. In Strecken welche Gefälle aufweisen, lassen sich pumpfähige Versatzstoffe einfüllen. Der Versatz in Strecken hat im Falle eines hypothetischen Wasserbruches die Aufgabe, die Ausbreitung ausgelaugter Aktivität zu verzögern.

Die Geschwindigkeit eines konvektiven Stofftransports nimmt umso stärker ab, je mehr der freie Querschnitt der Strecke durch feste Stoffe verringert wird. Selbst poröse Medien wie grob gemahlenes Salz, Sand oder Kies setzen Strömungen einen großen Widerstand entgegen.

Durch Dammbauten lassen sich an geeigneten Stellen ganze Feldesteile voneinander und von saigeren Hohlräumen wie Blind- oder Tagesschächten trennen. Das Vorgehen bei der Anlage von untertägigen horizontalen Dämmen im Salzbergbau wurde von G. Grubler (1976) beschrieben.

Die schonende Bearbeitung des benachbarten Salzgebirges ist dabei neben einer geeigneten, vorzugsweise prismatoiden Form des Dammes für eine erfolgreiche Laugenabdämmung von größter Bedeutung.

5. 6. 5. 3 Verschluß von Bohrlöchern

In einem Endlager für radioaktive Abfälle müssen die Streckenauffahrungen durch sorgfältige geologische Vorerkundungen abgesichert sein. Es empfiehlt sich, die neu aufzuschließenden Feldesteile durch horizontale und schräge Kernbohrungen von untertage aus zu untersuchen, damit Schichten, welche Laugenzutritte induzieren können, frühzeitig erkannt werden. Insbesondere sind hier möglicherweise als Kluftlaugenspeicher auftretender Hauptanhidrit oder Salzton oder aber auch temperaturempfindliche Carnallititschichten als Salzstock interne Laugenspeicher gemeint. Die geologischen Erkundungsbohrungen

liefern Kerne für geologische, gebirgsmechanische und geochemische Untersuchungen. In den Bohrlöchern können geoelektrische und seismische Untersuchungen ausgeführt werden, welche das Gebirge zwischen einzelnen Bohrungen und schon aufgefahrenen Strecken und Feldesteilen erkunden helfen. Durch Radar- und Hochfrequenzmessungen können Laugennester erkannt und geortet werden, H. Nickel (1971), H. Nickel (1972), H. Nickel (1976), H. Nickel (1976)b, U. Winter (1966).

Es können Reflexions- und Durchstrahlungsverfahren angewendet werden.

Diese Bohrlöcher sind während des Bohrbetriebes durch Preventer für den maximal zu erwartenden Druck zu sichern. Nach Beendigung der Messungen sind sie sorgfältig mit Magnesia-Binder oder Spezialbindern auf MgO-Basis wieder zu zementieren.

H. Bottke (1968) hat das Vorgehen bei den Verfüllarbeiten ausführlich beschrieben. Bei der Einlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle in Lagerbohrungen entsteht nach der Befüllung auch die Notwendigkeit, die Lagerbohrungen wieder sicher zu verschließen. Die Bohrlöcher werden nach den jetzigen Planungen senkrecht niedergebracht, DWK (1976).

Sie werden etwa einen Durchmesser von 250 mm und eine Tiefe von 20 - 50 m besitzen. Die Bohrlochwandung darf eine Aufheizung auf maximal 200° C erfahren, da bei Temperaturen von mehr als 250° C mit einer erhöhten Freisetzung von Feuchtigkeit aus dem Steinsalz zu rechnen ist, N. Jockwer (1977). Unter diesen Bedingungen wird sich im oberen Bereich des Bohrloches der Querschnitt innerhalb von etwa 90 Tagen um 50 % verringern, K. Dürr et al. (1979).

Im folgenden werden Bohrlochverschlüsse vorgeschlagen, die sich diese - auf der thermischen Ausdehnung des Steinsalzes beruhenden - Verhältnisse zunutze machen, E. - P. Uermann (1978).

Bisher wurden zwei Verfahren vorgeschlagen, wie diese Verschlüsse aufgebaut werden sollten:

1. Die hochradioaktiven Abfälle sollen mit gemahlendem Salz überdeckt werden, P W K (1976).
2. Die hochradioaktiven Abfälle werden mit einem salzlösungsbeständigen Zement übergossen, R. Proske (1977).

Im 1. Fall, entsteht kein dichter Abschluß im Falle eines Laugeneinbruches. Die wärmeentwickelnden Abfälle kämen dann unmittelbar mit den Salzlösungen in Kontakt. Es ist dann nicht auszuschließen, daß diese durch ausgelaugte Aktivität kontaminiert wird. Durch die Wärmequellen würde eine Konvektion der Salzlösungen induziert, die zu einer Verschleppung der Radioaktivität über weite Bereiche führen könnte.

Wenn die Bohrlöcher mit hochradioaktiven Abfällen im Fall 2 durch Zemente verschlossen werden, so sind ebenfalls Unsicherheiten nicht auszuschließen.

- Beim Einfüllen des breiförmigen Zementes kann Schwitzwasser oder überschüssiges Wasser in Kontakt mit den Abfallkokillen kommen, indem es an der Bohrlochwandung herunterläuft. Dieses Wasser wird durch die γ -Strahlung u. a. zu H_2 und O_2 (Knallgas) radiolytisch zersetzt. Daneben bilden sich auch OH-Radikale und H_2O_2 . Diese Produkte wirken stark korrosiv.
- Durch die starke γ -Strahlung wird auch das im Zement gebundene Wasser teilweise radiolytisch gespalten. Die Folge ist eine Strahlenschädigung des Zementes. Die Strahlenbeständigkeit von Zement liegt bei etwa 10^{10} rad.

- Aus Versuchen mit elektrisch beheizten Modell-Abfallkokillen ist bekannt, daß vor allem der obere Teil der Lagerbohrlöcher einer starken Konvergenz (Querschnittsverengung) unterliegt. Die ständige Verengung des Bohrloches könnte den Abbinde- und Erstarrungsvorgang des Zementes soweit stören, daß keine ausreichende Endfestigkeit des Verschlußsystems mehr erreicht wird.

Es ist daher vorzuschlagen, Bohrlochverschlüsse für hochradioaktive Abfälle herzustellen, die strahlungsbeständig, druckfest, chemisch widerstandsfähig, thermisch stabil, leicht herstellbar und sicher handhabbar sind. Weiterhin müssen sie die durch die Wärmeausdehnung des Gebirges hervorgerufenen Druckspannungen aufnehmen können und mit dem Salzgebirge eine mechanisch dichte Verbindung eingehen sowie zuverlässig und unter voller Strahlenschutzabschirmung einbaubar sein.

Das Neue wird hierbei in der Einführung vorgefertigter Verschlußelemente gesehen, die aus Keramik, Bleilegierungen oder Gußstahl bestehen, welche mit gleichmäßigem Qualitätsstandard hergestellt werden können. Dadurch entfallen Arbeiten in der Nähe der Lagerbohrungen. Durch fernbediente Einbringung des Verschlusses wird das Personal keiner Strahlenbelastung ausgesetzt. Die vorgeschlagenen Materialien enthalten kein Wasser, welches von γ -Strahlung radiolytisch zersetzt wird. Die Strahlenbeständigkeit ist so gut, daß die Stoffe als Abschirmmaterial (Bleilegierung, Gußstahl) bzw. als Reaktorwerkstoff (Keramik) eingesetzt werden. Ihre thermische Stabilität ist sehr gut. Auch Bleilegierungen schmelzen unter den zu erwartenden Bedingungen nicht. Die Druckfestigkeit von Keramik und Gußstahl ist ausreichend hoch. Bleilegierungen sind in der Lage, sich duktil zu verformen und dichten deshalb auch gut ab. Die Handhabung vorgefertigter Verschlußkörper durch Fernbedienung bietet keine Schwierigkeiten. Gußstahl ist wie Blei ein chemisch widerstandsfähiges Material.

Dichte Keramik ist chemisch außerordentlich widerstandsfähig, sie wird z. B. für Rohrleitungen chemischer Laboratorien verwendet.

Die wesentlichsten Vorteile sind darin zu sehen, daß die Bohrlochverschlüsse für hochradioaktive Abfälle gleichmäßig sicher ausfallen. Alle Methoden, vor Ort die Bohrlöcher mit gemahlenem Salz oder Zement zu füllen, bedingen einen Aufenthalt des Personals in der Umgebung der nicht versiegelten Bohrungen. Die Qualität des Bohrlochverschlusses kann bei diesen Verschlüssen alter Art unterschiedlich ausfallen und ist wegen der hohen Dosisbelastung der γ -Strahler nicht zu kontrollieren. Da das neue Material kein Wasser enthält, kann auch keine Radiolyse desselben auftreten.

Da die Verschlußelemente die gleichen Abmessungen wie die hochradioaktiven Abfallbehälter besitzen, können sie mit den vorhandenen Abschirmbehältern eingesetzt werden. Durch die Bohrlochkonvergenz infolge thermischer Ausdehnung des Steinsalzes und durch den Gebirgsdruck werden sie in das Salz eingebunden. Erforderlichenfalls können sie mit Überdruckventilen ausgerüstet sein, welche selbsttätig arbeiten (s. Kap. 5.4).

6. Zusammenfassung der geologischen und hydrogeologischen Kriterien für die Beurteilung der Eignung einer salinaren Formation als Salzstock-Endlager

Bei der Eignungsanalyse einer salinaren Formation sind verschiedene Faktoren zu prüfen. Es sind dies

- gesetzliche Vorschriften,
- Standortfragen und Verkehrsverbindungen,
- geologischer Aufbau,
- hydrogeologische Verhältnisse,
- Art und Menge der einzulagernden Abfälle,
- Einlagerungstechnik.

In der vorliegenden Arbeit wurden nur die letzten vier Punkte in Form modellartiger Betrachtung behandelt.

Der geologische Aufbau und die hydrogeologischen Verhältnisse sind vorgegeben. Sie gilt es genau zu kennen und zu verstehen, damit gesicherte und belastbare Aussagen über die geologische Zukunft der infrage kommenden Salinarformation getroffen werden können und der bestgeeignete Ort für die Einlagerung festgelegt werden kann. Art und Menge der einzulagernden Abfälle sind durch den jeweiligen Grad der Nutzung von Kernenergie zur Energiegewinnung und der Anwendung von kerntechnischen Verfahren in der Medizin, Forschung und Technik abhängig. Die Volumina der radioaktiven Abfälle hängen davon ab, welche Konditionierungsschritte zur Anwendung kommen. Dieser Punkt gestattet eine technische Beeinflussung in dem Sinne, daß z. B. konzentrierende Verarbeitungsverfahren eine Verkleinerung des Volumens in gewissen Grenzen möglich machen. Andererseits wird bei jedem Konditionierungsschritt wieder neuer, schwach kontaminiertes Abfall geschaffen.

Das Gesamtaktivitätsinventar des endzulagernden Abfalls wird durch Konditionierungsschritte natürlich nicht beeinflußt.

Unter der Einlagerungstechnik sollen in diesem Zusammenhang alle ingenieurtechnischen Maßnahmen zur Errichtung, Betrieb und Versiegelung des Endlagers verstanden werden. Die Einlagerungstechnik muß alle genannten Randbedingungen berücksichtigen und sich ihnen anpassen.

Dies beginnt bei der Wahl der Schachtansatzpunkte, der Methode des Schachtteufens und des Schachtausbau. Form, Größe und räumliche Lage der Einlagerungshohlräume richten sich nach Art und Menge der radioaktiven Abfälle. Die Technik der Einlagerung ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Vorschläge zum sicheren Verschluß und zur Versiegelung der Hohlräume und des gesamten Endlagers wurden in den Kapiteln 5.6 bis 5.6.5.3 gemacht. Nach der Betriebszeit ist die gesamte Anlage stillzulegen, und die Schächte müssen verfüllt werden. Die Schachtansatzpunkte sind langfristig zu kennzeichnen. Informationen über Ort und Lage des Endlagers sowie des Aktivitätsinhaltes sind auf verschiedene Datenträger zu bringen und an verschiedenen Orten dauerhaft und sicher aufzubewahren.

6.1 Geologischer Aufbau

Die Salzfolgen des deutschen Zechsteins sind vor etwa 200 - 230 Millionen Jahren durch Eindunstung in einem Schelfmeer entstanden. Nach der Sedimentation wurden sie von weiteren neugebildeten Evaporiten überdeckt und diagenetisch verändert. Ihre Sedimentation ist von dem Erreichen der Sättigungskonzentration der jeweils vorhandenen Mutterlauge

bei den zur Zeit der Salzbildung vorliegenden Temperaturen abhängig. Theorien über die verschiedenen Mineralbildungen wurden u. a. von H. Borchert (1959), O. Braitsch (1962) und E. Fulda (1938) beschrieben.

Für die verschiedenen Salzfolgen des Zechsteins wurden von E. Fulda (1938), F. Lotze (1957), H. Borchert (1959), Richter-Bernburg (1955), stratigraphische Profile aufgestellt. Stratigraphische Gliederungen und Fragen der Salzstockbildung wurden von Baar (1963), Jaritz (1973), Simon und Haltenhof (1970), Simon (1972) und Trusheim (1957) behandelt. Für eine Endlagerung radioaktiver Abfälle sollen möglichst mächtige und einheitliche Steinsalzfolgen ausgewählt werden. In deren Liegenden sollten sich keine leichtlöslichen Kalium- und Magnesium-haltigen Salze (Kalisalzlager) befinden. Dann kann im Falle des als hypothetischen Störfalles angenommenen Laugeneinbruches das Auflager des Einlagerungsfeldes nicht geschwächt werden. Die Schichten des Staßfurt-Steinsalzes des Zechstein 2 (Hauptsalz, $\text{Na}_2\beta$) bieten sich als Lagerformation an, da sie bei großen Primärmächtigkeiten in NW-Deutschland durch Halokinese massiert in den Kernen von Salzsätteln und Salzdomen auftreten. Das Kalilager Staßfurt des Zechstein 2 findet sich verfaltet in ihrem Hangenden. Salzstücke mit den Kalilagern des Zechstein 3 scheiden für eine Endlagerung aus.

6. 2

Hydrogeologische Verhältnisse

Bei der Auswahl einer salinaren Formation aus löslichen chloridischen Salzen muß geprüft werden, inwieweit das Grundwasser des überlagernden Deckgebirges mit dem Salzkörper in Wechselwirkung treten kann. Es muß geklärt sein, ob es rezente Subrosion am Salzspiegel oder am Salzhang bei gleichzeitigem Salzmassenaufstieg gibt und ob diese gegebenenfalls eine wesentliche Beeinflussung der langfristigen Stabilität

und Sicherheit darstellt. Zu diesem Zweck sollten die Oberflächenwässer der Umgebung auf ihre Salzgehalte überprüft werden. Neben den oberflächennahen Lockergesteinsaquiferen müssen einzelne Grundwasserstockwerke in Festgesteinen als Poren- und / oder Kluftwasserspeicher untersucht werden. Hier bietet es sich an, durch ein sorgfältig geplantes und ausgeführtes hydrogeologisches Bohrprogramm die notwendigen Aufschlüsse zu erhalten. Während der Bohrarbeiten kann der geologische Rahmen eines Salzstockbereiches durch Kerne, Spülungsuntersuchung, Bohrfortschrittsmessung und geophysikalische Bohrlochmessungen erkundet werden. In situ-Messungen der Permeabilität durch Druckverlustmessungen geben Aufschluß über Wasserwegsamkeiten im Deckgebirge. Chemische Analysen und Altersbestimmung der angetroffenen Tiefenwässer geben Anhaltspunkte über ihre Herkunft und Verweilzeit. So läßt sich abschätzen, ob, und wenn ja, in welchen Zeiträumen die verschiedenen Formationswässer am metereologischen Kreislauf teilnehmen. Mit Hilfe dieser Daten läßt sich mit ausreichender Sicherheit vorhersagen, ob der ausgewählte Salzstock für den bis zum Abklingen der Radionuklide erforderlichen Zeitraum vom Biozyklus abgeschlossen bleiben wird.

7.

Zusammenfassung

Bei der Energiegewinnung durch Kernspaltung, der wissenschaftlichen und technischen Forschung und der Anwendung von Radionukliden in der Medizin entstehen radioaktive Abfälle. Die Endlagerung dieser Abfälle in dem tiefen geologischen Untergrund wird von Fachleuten des In- und Auslandes als die bestgeeignete Methode angesehen. In vielen Staaten werden Forschungs- und Entwicklungsprogramme aufgestellt und ausgeführt, welche die auf dem jeweiligen Territorium vorhandenen geologischen Möglichkeiten prüfen sollen. Für den Bereich der Bundesrepublik Deutschland werden Salzstrukturen, Eisenerzlagerstätten und leergeförderte Erdöllagerstätten untersucht. Für die Einlagerung von Abfällen, welche bei der Wiederaufarbeitung abgebrannter Kernbrennstoffe anfallen, kommen Salzstrukturen in erster Linie in Betracht.

Ein wichtiger Punkt bei der Eignungsanalyse von Salzstrukturen und insbesondere von Salzstöcken des norddeutschen Flachlandes ist die Frage einer hydrogeologischen Wechselwirkung mit dem wasserführenden Deckgebirge. Die vorliegende Arbeit befaßt sich neben dem Auftreten hypothetischer Störfälle vor allem mit den Möglichkeiten, geeignete Barrieren gegen eine Ausbreitung von Radionukliden aus dem Endlagerbereich in die Biosphäre zu errichten. In der mehr als hundertjährigen Geschichte des deutschen Salzbergbaus ist es wiederholt zum Vollaufen von Schachtanlagen durch Wasser- oder Laugeneinbrüche gekommen. In einer ausführlichen Auswertung der vorhandenen Literatur werden die verschiedenen Ursachen aufgezeigt. Es wird klar gemacht, daß Störfälle, die zum Ersaufen von Kali- und Steinsalzbergwerken führten, häufig auf abbaubedingte Ursachen zurückzuführen sind. Die bei der Kali- und Steinsalzgewinnung notwendigerweise anfallenden untertägigen Hohlräume sind relativ groß.

Bei einem speziell für Endlagerzwecke aufgefahrenen Bergwerk sind diese Hohlräume erheblich kleiner. Trotz dieser andersgearteten Verhältnisse wird ein Wassereinbruch im Schachtbereich nicht ausgeschlossen. Dieser hypothetische Störfall wurde von der Reaktorsicherheits- und der Strahlenschutzkommission am 20. 10. 1977 als ein zu betrachtender Störfall in die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit aufgenommen.

Die möglichen Auflösungsvorgänge beim Kontakt verschiedener natürlicher Salzminerale mit Wasser werden diskutiert. Beim Kontakt von Grundwasser mit unterschiedlichen Salzgesteinen stellen sich in dem thermischen Feld des Salzstockes verschiedene Ungleichgewichte ein, welche als Ursache für Transportmechanismen dienen können. Die Verhältnisse in vollgelaufenen Salzbergwerken nach verschiedenen langen Zeiträumen werden an Hand von in situ-Messungen und Beispielen aus der Literatur erläutert. Der Wasserpfad kann als der kritische Pfad bei der Ausbreitung von endgelagerten Radionukliden angesehen werden. Es wird gezeigt, daß mit einer Kette von Barrieren die Ausbreitung von Radionukliden zu einem diffusionskontrollierten Vorgang umgewandelt werden kann. Bei der Ausbreitung ist der langsamste auch der geschwindigkeitsbestimmende Schritt.

Die Ausbreitungsbarrieren müssen naturgemäß bei der chemischen Form, in der die Nuklide vorliegen und in ihrer Verpackung ansetzen. Es werden verschiedene Fixierungarten und -materialien behandelt, die sich für schwach- und mittelradioaktive Abfälle eignen.

Es wird ein neues Verfahren vorgestellt, welches die Vorteile der verschiedenen Fixierungsmaterialien für schwach- und mittelradioaktive Abfälle ausnutzt und durch eine technisch einfache Behandlung zu einem sehr auslaugbeständigen Produkt führt.

Als hochradioaktive Abfälle werden diejenigen bezeichnet, welche aus dem ersten Extraktionszyklus einer Wiederaufarbeitungsanlage für abgebrannte Brennelemente stammen. Diese Abfälle unterliegen infolge ihrer Zerfallenergie einer Eigenerwärmung. Aus diesem Grunde ist es vorgesehen, sie in eine Matrix aus Glas oder Keramik einzuschmelzen.

Die zweite Ausbreitungsbarriere wird in der Einlagerung in verschiedenenartigen untertägigen Hohlräumen gesehen. Je nach ihrer Dosisleistung können die Abfälle in Kammern, Kavernen, Strecken oder Bohrlöchern eingelagert werden. Die Zugänge zu diesen Kammern oder Einlagerungsstrecken können nach der Befüllung durch Mauern und die Zugänge zu Feldesteilen durch Dammbauwerke verschlossen werden. Ein zwischen die Abfälle eingebrachter Versatz hat verschiedene Aufgaben zu erfüllen. Er stützt das Gebirge ab und er kann, wenn er oberflächenaktive Stoffe enthält, Radionuklide adsorbieren. Der Versatz wirkt als Sperrre gegenüber einer Stoffausbreitung durch Konvektion, indem er die freien Querschnitte eines Streckensystems verkleinert hilft. Es wird der Vorschlag gemacht, dem Versatz quellfähige Stoffe, wie z.B. Methylzellulose, trocken beizumischen. Im Falle des hypothetischen Störfalls "Wassereinbruch durch den Schacht" wird die den Porenraum im Versatz füllende Salzlösung durch das quellfähige Material so hochviskos, daß Strömungen nicht mehr auftreten können. Neben dem bei der Auffahrung anfallenden Steinsalz wird der Einsatz anderer Versatzmaterialien, wie z.B. hydraulischer Versatz, Rotschlamm, Calciumsulfit und Flugasche diskutiert, die allein oder zusammen mit Steinsalz angewendet werden können. Die Vor- und Nachteile werden aufgezeigt.

Es wird eine neue Methode vorgestellt, wie sich Feldesteile mit gespannten Gaskissen vor einem Eindringen von Salzlösungen schützen lassen.

Je nachdem, ob es sich bei den zu versetzenden Hohlräumen um Kammern, Strecken oder Blind- und Tagesschächte handelt, müssen verschiedene Verfüllungstechniken angewendet werden. Beim Verfüllen von Bohrlöchern können bewährte Verfahren eingesetzt werden.

Zur Beurteilung der Eignung als Endlager sind detaillierte geologische und hydrogeologische Kenntnisse über die Lagerstätte erforderlich. Diese lassen sich durch geophysikalische Messungen und Bohraufschlüsse erarbeiten.

Durch ein Hintereinanderschalten verschiedener Barrieren wird gezeigt, daß die Einlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Strukturen, insbesondere der Zechsteinsalzlagerstätten des Norddeutschen Flachlandes, eine sichere Methode der Endlagerung darstellt.

8. Literaturverzeichnis

- Albrecht, E.: Die Endlagerung radioaktiver Rückstände
unter Tage
Glückauf, 18, S. 871 - 874, 1969
- Albrecht, E., Kolditz, H., Kühn, K., Krause, H., Kluger, W.:
Endlagerung radioaktiver Rückstände
Schriftenreihe des Deutschen Atomforums, H. 16, 43 S., 1969
- Albrecht, E.: Sicherungsarbeiten am Ausbau des Schachtes
Asse 2
Kali und Steinsalz, 5/8, S. 257 - 263, 1970
- Albrecht, E.: Der Ausbau des Steinsalzbergwerkes Asse II
für die Einlagerung radioaktiver Rückstände
Bergbau, 4, S. 82 - 88, 1972
- Albrecht, H., Meister, D., Stork, G.H., Wallner, M.:
Zur Frage des Standsicherheitsnachweises von Hohlräumen
in Salzgesteinen
Proc. V. Internat. Salzsymposium 1978 (im Druck)
- Baar, A.: Der Bromgehalt im Steinsalz als stratigraphischer
und genetischer Indikator im norddeutschen Zechstein
Zeitschrift d. deutschen geologischen Gesellschaft, 115,
S. 572 - 608, 1963
- Beckmann, H.: Geology of Petroleum Vol. 2, Geological
Prospecting of Petroleum
Ferdinand Enke Publishers, Stuttgart, 1976
- Biczok, I.: Betonkorrosion / Betonschutz. - Wiesbaden -
Berlin - Budapest, 1968
- Börger : Laugenströmungen in ersoffenen Kalibergwerken
als Ursache späterer Oberflächenschäden
Kali, verwandte Salze und Erdöl, H. 2, S. 27 - 31, 1942
- Borchert, H.: Ozeane Salzlagerstätten
Berlin, 1959
- Borchert, H.: Der Wasserhaushalt bei der Meta-
morphose der Kalisalze
Berichte d. Geologischen Gesellschaft DDR, Sonder-
heft 1, S. 145 - 194, 1963

Bottke, H.: Schürfbohren Teil 1: Die Durchführung von
Kernbohrungen - Clausthal-Zellerfeld
Verlag E. Pilger, 1968

Bradshaw, R. J., McClain, W. C.: Project salt vault: A
demonstration of the disposal of high active solidified
wastes in underground salt mines,
Oak Ridge National Laboratory, ORNL - 4555, 1971

Braitsch, O.: Mineralogie und Petrographie in Einzel-
darstellungen
III. Band, Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten -
Berlin, Göttingen, Heidelberg
Springer-Verlag, 1962

Brocke, W., Davids, P.: Internationaler Stand der Technik
der Abgasentschwefelung in Kraftwerken
Brennst.-Wärme-Kraft, 26/3, 1974

D'Ans, J.: Die Lösungsgleichgewichte der Systeme der Salze
ozeanischer Salzablagerungen
Kali-Forschungs-Anstalt GmbH, Berlin
Verlagsgesellschaft für Ackerbau mbH., 1933

D'Ans, J., Kühn, R.: Bemerkungen zur Bildung und zu Um-
bildungen ozeanischer Salzlagerstätten
Kali und Steinsalz, 3, S. 69 - 84, 1960

Dreschhoff, G.: International Practices and Policies of
Radioactive Waste Management,
Modern Geology, 6, S. 5 - 9, 1976

Dreyer, W.: Die Festigkeitseigenschaften natürlicher Gesteine,
insbesondere der Salz- und Karbonatgesteine
Clausthaler Hefte zur Lagerstättenkunde und Geochemie der
Mineralischen Rohstoffe, 5, 247 S., 1969

Dreyer, W.: Zur Standfestigkeit kavernenartiger Hohlräume
im Salzgebirge
Kali und Steinsalz, 5, S. 473 - 478, 1971

Dürr, K., Korthaus, E., Donath, P.: Untersuchungen zur
Temperaturrentwicklung bei der Endlagerung hochradio-
aktiver Abfälle
Atomwirtschaft - Atomtechnik, 24/2, S. 91 - 94, 1979

Eckhardt, A., Kronsbein, W.: Versuche über das Verhalten von Beton und Zement im Seewasser
Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, 102, Berlin
Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, 1950

Esche, M.: Rauchgasentschwefelungs- und Abgasreinigungsanlagen
Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie, Bd. 30, H. 11,
S. 511 - 514, 1977

Fulda, E.: Die Lagerstätten der nutzbaren Mineralien und Gesteine,
III. Band, 2. Teil : Steinsalz und Kalisalze - Stuttgart
Ferdinand Enke Verlag, 1938

Giesel, W., Holze, A.: Das anomale geothermische Feld in Salzstöcken - Quantitative Deutung an einem Beispiel
Kali und Steinsalz, 5, S. 272 - 274, 1970

Gimm, W.: Kali- und Steinsalzbergbau
I., Leipzig, 1968

Grübler, G.: Der Bau von Dämmen im Salzbergbau
Kali- und Steinsalz, Bd. 7/1, S. 5 - 12, 1976

Gugel, E., Vogel, H., Osteried, O.: Untersuchungen zur Herstellung eines alugenbeständigen Steinzeugs,
Ber. Dtsch. Keram. Ges., Bd. 43, S. 587 - 592, 1966

Hamstra, J., Velzeboer, P. Th.: Design Study of a Radioactive Waste Repository to be Mined in a Medium Size Salt Dome - ECN-78-023, Petten
Commission of the European Committees (Contr. nr. 02-76-9-WASN), 1978

Haug, H.O.: Some Aspects and Long-Term Problems of High-Level and Actinide-Contaminated Spent Fuel Reprocessing Wastes from the U-Pu and Th-U Fuel Cycles.
International Symposium on the Management of Radioactive Wastes from the Nuclear Fuel Cycle, Wien, 1976

Hentschel, J., Kleinitz, W.: Aufbau der Salzgesteine des Salzstocks Etzel abgeleitet aus Kernuntersuchungen und Loginterpretation.
3. DGMK-Fachgruppentagung vom 6. -8.10.1975 in Hannover,
Erdöl und Kohle Ergänzungsband, Compendium 75/76, S. 185 - 206, 1976

Hoffmann, D.: Elf Jahrzehnte Deutscher Kalisalzbergbau, -
Essen,
Verlag Glückauf GmbH, 1972

Hoffmann, H., Emons, H.-H.: Zur Lösungskinetik des
Carnallits unter besonderer Berücksichtigung des Aus-
solprozesses von Mineralsalzlagerstätten - Teil I.
Bergakademie, Bd. 21/8, S. 486 - 490, 1969

Hoffmann, H., Emons, H.-H.: Zur Lösungskinetik des
Carnallits unter besonderer Berücksichtigung des Aus-
solprozesses von Mineralsalzlagerstätten - Teil II.
Bergakademie, Bd. 21/9, S. 554 - 558, 1969

Hofrichter, E.: Probleme der Endlagerung radioaktiver Ab-
fälle in Salzformationen,
Vortrag beim Energiepolitischen Forum der Landesregie-
rung von Baden-Württemberg und der Universität Stuttgart
am 11.5.1977

Hofrichter, E.: Probleme um die Kernenergie aus geo-
wissenschaftlicher Sicht: Resourcen, Alternativen, End-
lagerung
Erzmetall, 31, S. 85 - 90, 1978

Hummel, O., Moore, W.J.: Physikalische Chemie - Berlin -
New York
Walter de Gruyter, 1976

International Atomic Energy Agency: Regulations for the Safe
Transport of Radioactive Materials
Safety Series No. 6, STI/PUB 323, Wien, 1973

Jaritz, W.: Zur Entstehung der Salzstrukturen NW-Deutschlands
Beiheft des Geologischen Jahrbuchs A 10, 77 S, 1973

Jockwer, N.: Migration und Freisetzung von eingeschlossenen
Laugentröpfchen im Älteren Steinsalz
Unveröffentlichter Bericht, Clausthal-Zellerfeld, 1977

Jost, W., Hauffe, K.: Diffusion, 2 Aufl., Darmstadt
Dr. D. Steinkopff Verlag, 1972

Kärn-Bränsle-Säkerhet (KBS): Handling of Spent Nuclear Fuel
and Final Storage of Vitrified High Level Reprocessing Waste
Vol. I, Stockholm, 1977

Karsten, O.: Lösungsgeschwindigkeit von Natriumchlorid,
Kaliumchlorid und Kieserit in Wasser und in wässrigen
Lösungen
Z. f. anorg. u. allgem. Chemie, Heft 276, S. 247 - 266,
1954

Kegel, K.: Berg- und Aufbereitungstechnik, Band III Geo-
logische und technologische Grundlagen des Bergbaus,
Teil 1: Bergmännische Wasserwirtschaft, Halle (Saale)
Verlag W. Knapp, 1950

Knieper, J., Printz, H., Wölfle, R.: A Contribution to the
Problem of Solidification of Medium and Low Radioactive
Liquid Wastes
Atomkernenergie, Bd. 30, S. 11 - 16, 1977

Köster, R., Kraemer, R., Kroebel, R.: Disposal and Fixation of
Medium and Low Level Liquid Wastes in Salt Caverns, International
Symposium on the underground disposal of radioactive wastes,
Otaniemi near Helsinki, 1979, in Vorbereitung

Kostrzewski, J., Czekaj, A.: Verfahren zum Verfüllen von
unterirdischen Hohlräumen und Klüften
Auslegeschrift 25 13003, Deutsches Patentamt, 1976

Kühn, K., Albrecht, E.: Versuchseinlagerung schwach-
radioaktiver Abfallstoffe im Salzbergwerk Asse,
Atom und Strom, 17, S. 134 - 137, 1971

Kühn, K.: Zur Endlagerung radioaktiver Abfälle
Atomwirtschaft, 21, S. 357 - 362, 1976

Kühn, K.: Wichtige Entscheidungen für die Endlagerung
radioaktiver Abfälle
Jahrbuch der Atomwirtschaft, A 53 - A 58, 1977

Kühn, R.: Die Mineralnamen der Kalisalze,
Kali und Steinsalz, 2, S. 331 - 345, 1959

Leers, K. -J., Ortmann, C.: Lagerung und Verfestigung
von MAW/LAW in untertägigen Hohlräumen, Pkt. 1.3
Herstellung und Untersuchung von inaktiven Proben,
Unveröffentlichter Bericht, Clausthal-Zellerfeld, 1978

Leers, K. -J., Ortmann, C.: Produktuntersuchungen im Rahmen
des Projektes "Behälterlose Lagerung von LAW/MAW in unter-
tägigen Hohlräumen", Unveröffentlichte Berichte, Clausthal-
Zellerfeld, 1979

Lotze, F.: Steinsalz und Kalisalze 1. Teil, Berlin
Gebr. Bornträger, 1957

Milyukova, U. S. et al.: Analytical Chemistry of Plutonium
London, 1969

Münster, H.: Die Vermehrung der Kaliwerke und der Kali-
absatz. -Kali, Bd. 3, S. 213 - 223, 237 - 247, 271 - 278,
1909

N.N.: Stillgelegtes Werk Hansa wird Salzlauge speicher
K+S Werkzeitschrift, S. 27, Kassel, 1978

Nickel, H.: Leistungs-Meßsender und Feldstärkenmesser
im Einsatz in Salzbergwerken
Neues von Rhode und Schwarz, Bd. 50, 1971

Nickel, H.: Laugenortung in Salzbergwerken mit Hochfrequenz. -
Geologisches Jahrbuch, Bd. 90, S. 283 - 314, Hannover, 1972

Nickel, H.: Hochfrequenz-Bohrloch-Meßmethode zum Nachweis
von Salzgesteinarten in der Bohrlochumgebung
Geologisches Jahrbuch, Bd. E 6, S. 47 - 66, Hannover, 1976

Ortmann, C.: Untersuchung geeigneter Zemente zur Fixierung
schwachradioaktiver Abfälle, Diplomarbeit, Clausthal-Zellerfeld
1977

Philipsborn, H. von: Tafeln zum Bestimmen der Minerale
nach äußeren Kennzeichen. - Stuttgart
E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1967

Projektgesellschaft Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen:
Bericht über das in der Bundesrepublik Deutschland geplante
Entsorgungszentrum für ausgediente Brennelemente aus
Kernkraftwerken, Essen, 1976

Proske, R.: Beiträge zur Risikoanalyse eines hypothetischen
Endlagers für hochaktive Abfälle
Dissertation, Clausthal-Zellerfeld, 1977

Rausch, D.: Eignung von Zementen zu Dichtungsarbeiten im
Salzbergbau
Kali und Steinsalz, Bd. 5, H. 11, S. 3 - 12, 1955

Reaktor - Sicherheitskommission: Grundsätzliche sicherheits-
technische Realisierbarkeit des Entsorgungszentrums
Geschäftsstelle der Reaktor-Sicherheitskommission, 1977

Rehage, G., Borchard, W.: The Thermodynamics of the Glassy State, in R. N. Haward
The Physics of Glassy Polymers, London, 1973

Richter-Bernburg, G.: Über salinare Sedimentation,
Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, 105,
S. 593 - 645, 1955

Richter-Bernburg, G.: Stratigraphische Gliederung des deutschen Zechsteins,
Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, 105,
S. 843 - 854, 1955

3

Röhr, H.U.: Gebirgsmechanisches Verhalten einer Kaverne im Salzgestein
Kali und Steinsalz, 6, S. 178 - 183, 1973

Salmang, H., Scholze, H.: Die Keramik, Berlin, Heidelberg
New York, 1966

Schäfer, H., Knatz, H.: Neuere Versuchsergebnisse auf dem Gebiet der Ascheverwertung
Vorgetragen auf der VGB-Fachtagung am 15. Nov. 68 in Bonn, am 29. Nov. 68 in Bremen und am 13. Dez. 68 in Nürnberg, 1968

Schmidt, M.W., Kolditz, H., Staupendahl, G., Thielemann, K.: Bau einer Prototyp-Kavernenanlage im ehemaligen Steinsalzbergwerk Asse zur Durchführung von Forschungs- und Entwicklungsaufgaben auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe,
Rock Mechanics, Suppl. 8, S. 249 - 262, 1979

Schneider, H.: Die Wassererschließung - 2. Aufl.,
Essen, 1973,
Vulkan-Verlag

Schönbacher, H. et al.: Verhalten von Farbanstrichen im Strahlenfeld von Kernreaktoren und Hochenergie-Beschleunigern und bei Kontamination durch Radionuklide
Kerntechnik, Bd. 19, S. 209 - 217, 1977

Schröder, H.T., Hallauer, O., Scholz, W.: Beständigkeit verschiedener Betonarten im Meerwasser und in sulfathaltigem Wasser
Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 252

Seidl, E.: Schürfen, Belegen und Schachtabteufen auf deutschen Zechstein-Salzhorsten
Archiv für Lagerstättenforschung, Heft 26, Berlin, 1921
Preuss. Geol. Landesamt

Siebler, P.: Einfluß der gebirgsmechanischen Beanspruchung bei der Auflösung von Salzen
Bergakademie, Bd. 20/7, S. 400 - 406, 1968

Siebler, P.: Untersuchungen über die Auflösung natürlicher Salze als Beitrag zur Erfassung der Zerstörung an Pfeilern beim Ersaufen von Kali- und Steinsalzgruben
Dissertation, Freiberg (Sachsen), 1969

Simon, P., Haltenhoff, M.: Feinstratigraphie, Fazies und Bromgehalt des Staßfurt-Steinsalzes (Zechstein 2) im Kali- und Steinsalzbergwerk Asse (Schacht II) bei Braunschweig,
Geologisches Jahrbuch, 88, S. 159 - 202, 1970

Simon, P.: Stratigraphie und Bromgehalt des Staßfurt-Steinsalzes (Zechstein 2) im hannoverschen Kalisalzbergbaugebiet,
Geologisches Jahrbuch, 90, S. 67 - 126

Spackeler, G.: Berg- und Aufbereitungstechnik Band II, Abschn. 9 B, Lehrbuch des Kali- und Steinsalzbergbaues - Halle (Saale), 1957

Staupendahl, G., Schmidt, M. W., Meister, D., Wallner, M.: Geotechnische Untersuchungen an der Prototyp-Kaverne in der Schachtanlage Asse,
4. Intern. Kongreß f. Felsmechanik, Montreux, 1979,
(im Druck)

Storck, U.: Das Wiederherstellen der Förderfähigkeit des eroffenen Kalibergwerks Königshall-Hindenburg Kali und Steinsalz, Bd. 1, S. 3 - 24, 1951

Tietze, K.: Geophysikalische Untersuchung des Kivusees und seiner ungewöhnlichen Methangaslagerstätte - Schichtung, Dynamik und Gasgehalt des Seewassers
Dissertation 21.6.78, Kiel, 1978

Trusheim, F.: Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands,
Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 109, S. 111 - 151, 1957

Uerpmann, E. -P.: Verfahren zur Umkleidung von Abfallfässern mit einer auslaugsicheren, geschlossenen Hülle
Patentanmeldung P 27 41 661.1, München,
Deutsches Patentamt, 1977

Uerpmann, E. -P.: Verschluß von Lagerbohrungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle und Verfahren zum Anbringen des Verschlusses
Patentanmeldung P 28 39 759.3, München, Deutsches Patentamt, 1978

Ullrich: Der Wassereinbruch in den Schacht I des Kaliwerks Asse
Kali. Bd. 12, S. 89 - 90, 1918.

Verkerk, B.: Actinide Partitioning, Arguments Against.
International Symposium On The Management Of Radioactive Wastes From The Nuclears Fuel Cycle, Wien, 1976

Walton, R. D.: Commercial High-Level Radioactive Waste-Policy, Plans and Development,
Modern Geology, 6, S. 11 - 17, 1976

Winter, U.: Untertagegeophysik im Kali- und Steinsalzbergbau zur Bekämpfung der Gas- und Laugengefahr. - Leipzig
VEB Deut. Verl. f. Grundstoffindustrie, 1966

Wipp Conceptual Design Report: Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)
Conceptual Design Report. - Sand 77 - 0274,
Albuquerque, 1977

Lebenslauf

Geboren: 30. Mai 1947 in Langenberg/Rheinland

Eltern: Ernst Uerpmann und Gertrud Uerpmann,
geb. Wahl

Schulbildung: 1953 bis 1958
Volksschule "An der Frohnstrasse",
Langenberg/Rhld
1958 bis 1966
Städtisches Neusprachliches Gymnasium,
Langenberg/Rhld
Abschluß: Abitur am 2.11.1966

Studium: WS 1966 bis WS 1972
TU Clausthal-Zellerfeld
Fach: Chemie
Diplomarbeit: "Das Assoziationsverhalten
von Polymethylmethacrylat verschiedener
Taktizität in Lösung und im festen Zustand"
Diplomhauptprüfung am 1.12.1972

Beruf: Seit dem 15.12.1972 am Institut für Tief-
lagerung - Wissenschaftliche Abteilung
der Gesellschaft für Strahlen- und Um-
weltforschung mbH München, als wissen-
schaftlicher Mitarbeiter tätig.

Familienstand: verheiratet

Braunschweig, im Juli 1979

X-Original-To: c.wolke@mailserver.tu-freiberg.de
Delivered-To: c.wolke@mailserver.tu-freiberg.de
Date: Fri, 20 Jan 2006 12:55:34 +0100 (Romance Standard Time)
X-Mailer: IncrediMail (5002180)
From: "Peter Uerpman" <peteruerpmann@tiscali.es>
X-FID: FLAVOR00-NONE-0000-0000-000000000000
To: <c.wolke@web.de>
Subject: Namen der Schaechte
X-Antivirus: avast! (VPS 0603-3, 18/01/2006), Outbound message
X-Antivirus-Status: Clean
X-WEBDE-FORWARD: c.wolke@web.de -> c.wolke@tu-freiberg.de

Los Nietos, 20. Jan. 2006

Sehr geehrter Herr Wolkersdorfer,
Vielen Dank fuer Ihren Brief mit den Kopien, den ich vorgestern erhielt.
Wir waren Neujahr einige Tage unterwegs und danach war das Hafenbuero fuer einige Tage geschlossen.

Ich habe mir die Kurven angesehen und dabei sind mir nach ca. 30 Jahren natuerlich alte Erinnerungen gekommen. Seinerzeit hatten sowohl die Kali Chemie AG als auch die Kali und Salz AG wenig Interesse, mit derendlagerung radioaktiver Abfaelle oeffentlich in Verbindung gebracht zu werden. Nicht desdoweniger hatten wir einen guten Kontakt und wir waren den Firmen sehr dankbar, dass wir in einigen vollgelaufenen Schaechten unsere Messungen ausfuehren durften.

Wir haben auch versucht im Schacht Asse 1 unsere Messsonden einzusetzen, konnten aber die mechanischen Hindernisse in ca. 80- 100 Teufe nicht ueberwinden. Oberhalb fanden wir seinerzeit nur Grundwasser in ueblicher Konzentration.

Die Abb. zeigen die Verhaeltnisse in den Jahren ca. 1973 bis 1978:

S. 50 ,Abb. 8 Schacht Asse III,
S. 51, Abb. 9, Schacht Desdemona bei Goettingen,
S. 52 Abb. 10 Schacht Deutschland bei Hannover
S. 52, Abb. 11, Schacht Ronnenberg bei Hannover
S. 53, Abb. 13, Schacht Ronnenberg
S. 56, Abb. 14, Schacht Deutschland,
S. 57, Abb. 15, Schacht Beienrode
S. 58, Abb. 16, Schacht Beienrode.

Schacht Ronnenberg und Schacht Deutschland gehoeren beide zur im Sommer 1975 abgesoffenen Schachtanlage Ronnenberg.

Ich hoffe, das Ihnen diese Hinweise bei Ihrer Arbeit helfen. Falls Sie in der Zukunft ein Exemplar Ihrer Habilitationsarbeit entbehren koennen, bin ich Ihnen dafuer sehr dankbar.

Meine e-mail Anschrift wird Ende Januar 2006 erloeschen, da tiscali Spanien an Wanadoo France verkauft wurde. Ich versuche derzeit einen neuen Internetanschluss ueber Telefonica Spanien zu bekommen. Wenn es soweit ist, werde ich mich bei Ihnen melden.

Mit freundlichem Gruss!

Peter Uerpman

