

Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung

Jahresbericht 1978



**GSF-T 94
KfK - 2852**

Gesellschaft für
Strahlen- und Umweltforschung mbH · München
Kernforschungszentrum Karlsruhe

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	1
1. Betrieb der Versuchsanlage Asse	3
2. Weiterentwicklung der Einlagerungsverfahren für schwach- und mittelaktive Abfälle	14
3. Entwicklung und Bau einer Kammer für die Versuchseinlagerung mittelaktiver Abfälle	20
4. Prototyp-Kavernenanlage im Salzbergwerk Asse	28
5. Untersuchungen zur Versuchseinlagerung hochaktiver Abfälle	35
6. Lagerung und Verfestigung von schwach- und mittelaktiven Abfällen in untertägigen Hohlräumen	52
7. Beurteilung der Eignung der Schachtanlage Konrad für die Einlagerung radioaktiver Abfälle	66
8. Beseitigung tritiumhaltiger Abwässer durch Einpressen in poröse Schichten des tiefen Untergrundes	79
9. Quantitativer Anforderungskatalog für Abfallprodukte	83
10. Sicherheitsstudien zu einem Endlager für hochaktive Abfälle	92
11. Veröffentlichungen	96

Abbildungsverzeichnis

Nr.	Titel	Seite
1.	Versuchsanordnung zur Ermittlung des Flankenwinkels und des Raumausnutzungsgrades bei Faßschüttungen	17
2.	Trockener Versatz von 900 Modellfässern M 1 : 20	18
3.	Trockener Versatz bei Einlagerungskampagnen zu je 300 Modellfässern M 1 : 20	19
3a.	Einlagerungskammer für mittelradioaktive Abfallstoffe (MAW) auf der 775/800 m-Sohle der Schachanlage ASSE	27
4.	Umladebehälter U 1 auf den Strahlenschutzschieber aufgesetzt	29
5.	Co-60-Quelle (90 Ci) mit Abschirmbehälter, Ausfahrtschlauch und Meßposition an der zu prüfenden Wand	30
6.	Durchmesserkonvergenz der Kaverne	32
7.	Isothermenfeld am 176. Versuchstag beim Vorversuch zum Temperatur-Versuchsfeld 4 auf der 775 m-Sohle	47
8.	Temperatur-Versuchsfeld 4, gemessene Längenänderungen in einer vertikalen Extensometerebene und horizontale Streckenkonvergenz	48
9.	Abhängigkeit der sekundären Kriechgeschwindigkeit von der Temperatur und der Spannung	49
10.	Temperaturwerte im Versuchsfeld 3 (TE = Thermoelement)	50
11.	Relativer Gewichtsverlust bei verschiedenen konstanten Temperaturen in Abhängigkeit von der Heizdauer	50

Nr.	Titel	Seite
12.	System "Abschirmglocke"	51
13.	Zeitlicher Verlauf der Maximaltemperatur in den Referenzsystemen RS 1, RS 2, RS 3 beim Lagern von Portlandzement 350/Abfall-Gemischen der Zusammensetzung 1 : 1	64
14.	Zeitlicher Verlauf der Maximaltemperatur in den Referenzsystemen RS 1, RS 2, RS 3 beim Lagern von Hochofenzement /Abfall-Gemischen	65
15.	Freisetzungsbäume für die Transportmedien a) Grubenwetter, b) Lauge	95

Einleitung

Die Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung radioaktiver Abfälle (EGT), vom Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) und von der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF) zum 1. Januar 1978 gegründet, legt hiermit ihren ersten Jahresbericht vor. Dieser Bericht ist der Nachfolger der Jahresberichte zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in den vergangenen Jahren, die wechselseitig von KfK und GSF herausgegeben wurden.

Im Jahresbericht der EGT wird über Tätigkeiten und Ergebnisse der durchgeführten F+E-Aufgaben berichtet.

Die Einzelbeiträge sind in der Regel, genau wie die Bearbeitung der FE-Vorhaben, das Ergebnis enger Zusammenarbeit zwischen GSF und KfK. Darüber hinaus enthalten sie wichtige Informationen aus der Zusammenarbeit mit externen Institutionen, denen dafür Dank und Anerkennung gebührt.

Mit den folgenden Institutionen besteht eine besonders enge Zusammenarbeit bei der Durchführung der FE-Vorhaben:

- Amtliche Materialprüfanstalt (AMPA), Clausthal,
- Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin,
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover,
- Hahn-Meitner-Institut (HMI), Berlin,
- Institut für Chemie der Explosiv- und Treibstoffe (ICT), Berghausen,
- Kali-Chemie AG, Hannover,
- Kali und Salz AG, Kassel,
- Kernforschungsanlage Jülich (KFA), Jülich,
- Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover,

- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig,
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH),
Aachen,
- SIEMAG-TRANSPLAN, Netphen,
- Stahlwerke Peine-Salzgitter, Salzgitter,
- Technische Universität Clausthal,
- Universität Karlsruhe,
- Westfälische Berggewerkschaftskasse (WBK), Bochum.

1. Betrieb der Versuchsanlage Asse

1.1 Betrieb und Einlagerungsversuche

1.1.1 Bergmännische Arbeiten

Die Durchführung des Forschungsprogramms zur Tieflagerung von radioaktiven Abfallstoffen erforderte auch im Berichtsjahr 1978 eine Reihe bergmännischer Arbeiten. Dazu gehörten die regelmäßigen Prüfungen an den maschinen- und elektrotechnischen Anlagen sämtlicher Seilfahreinrichtungen sowie entsprechende Wartungsarbeiten gemäß den geltenden Bergverordnungen.

Im Hauptschacht wurden zum Ausgleich von Konvergenzen die Spurlatten um 25 mm gekürzt und für die Durchführung weiterer Unterhaltungsarbeiten bei 389 m Teufe eine Arbeitsbühne eingebaut. Beraubearbeiten wurden im Hauptschacht und im Blindschacht 2 durchgeführt.

Um die 800 m-Sohle aufzuschließen und für Fahrzeuge zugänglich zu machen, wurde die Wendelstrecke von der 775 m-Sohle aus mit einer Länge von 228 m und einem Gefälle von 9 bis 12 % aufgefahren. Über einen Querschlag von 15 m Länge wurde auf der 800 m-Sohle die Verbindung zu den Grubenbauen der ehemaligen Salzgewinnung hergestellt. In der Wendelstrecke zwischen der 490 m-Sohle und der 750 m-Sohle erfolgten Beraubearbeiten an Stößen und Firsten sowie zum Neigungsausgleich Fahrbahnarbeiten.

Zur Einrichtung des Temperaturversuchsfeldes 4 wurde im Älteren Steinsalz des westlichen Grubenfeldes der 750 m-Sohle eine Strecke von 70 m Länge und einem Querschnitt von 6 x 6 m aufgefahren. Um Salznachfall zu vermeiden, wurde die gesamte Strecke mit der neu eingesetzten Firstenfräse nachgeschnitten

und profiliert. In dieser Strecke wurden zur Gebirgsbeobachtung Extensometermeßstellen eingerichtet und für die spätere Versuchsdurchführung drei Großbohrlöcher von 34 mm \emptyset und 25 bzw. 15 m Tiefe niedergebracht.

In Vorbereitung des weiteren Tiefenaufschlusses des Grubengebäudes wurde im Westfeld der 750 m-Sohle ein Bohrort für geologische Erkundungsbohrungen vorgerichtet.

Für die Herstellung der Kammer 6 im Jüngeren Steinsalz auf der 750 m-Sohle wurde das dort lagernde Salz abtransportiert und die Kammer durch schonendes Sprengen sowie Spitzarbeiten beraubt. Weitere Bohrarbeiten fanden in allen Strecken und Kammern statt, in denen Transporte und Einlagerungen bisher durchgeführt wurden.

Das bei all diesen Arbeiten anfallende Salz wurde einerseits zum Überdecken der schwachradioaktiven Abfälle und andererseits zum Verfüllen der Kammer 3 (Na 2) der 750 m-Sohle verwendet. Von dieser Kammer 3 wurde unmittelbar unter der Firste eine Verbindungsstrecke zur Kammer 4 mit einer Länge von 22 m vorgetrieben.

Im Rahmen des bergbehördlichen Betriebsplanverfahrens mußten im Berichtsjahr umfangreiche Unterlagen wie

- Jahresbetriebspläne,
- Einzelbetriebspläne und
- Sonderbetriebspläne

für das Kavernenprojekt, die Grubenanschlußbahn sowie für elektrische Anlagen erstellt werden.

1.1.2 Durchführung der Versuchseinlagerung

Die Versuche zur Einlagerung schwachradioaktiver Abfälle wurden 1978 fortgesetzt. Die Einlagerung erfolgte in den Kammern 5, 6, 7 und 10 des Jüngeren Steinsalzes und in der Kammer 2 des Älteren Steinsalzes auf der 750 m-Sohle. Es wurden 30.579 Behälter eingelagert, davon 6.609 Fässer mit verlorener Betonabschirmung. Die Kammern 6 und 7 der 750 m-Sohle wurden überwiegend mit verlorenen Betonabschirmungen und Salz gefüllt. Dabei wurde in der Kammer 6 über den im Vorjahr geschaffenen Zugang eine zweite Einlagerungsetage angelegt. In der unteren Etage wurden die Zwickel mit Salz verfüllt und die Behälter mit Salzhautwerk überdeckt.

1.1.3 Überwachung des Betriebspersonals und der Umgebung

Das bei der Einlagerung radioaktiver Abfälle eingesetzte Personal wurde entsprechend der Strahlenschutzverordnung und den Auflagen der Genehmigungsbehörde laufend mit Dosimetern überwacht. Ebenso erfolgten die Messung der Ortsdosis, der Ortsdosisleistung und des Aktivitätsgehaltes der Luft unter- und übertage an vielen repräsentativen Stellen. Eine Überschreitung der zugelassenen Personendosen und Aktivitätswerte konnte nicht festgestellt werden. Bei der jährlichen Untersuchung der gesamten untertage beschäftigten Belegschaft im Ganzkörperzähler ergab sich kein Hinweis auf Inkorporation von radioaktiven Stoffen.

Wie in den vergangenen Jahren wurden die Messungen zur Überwachung der Umweltradioaktivität im Bereich der Asse fortgesetzt. Hierzu wurden in regelmäßigen Abständen Wasser-, Luft- und Bodenbewuchsproben aus der näheren und weiteren Umgebung der Versuchsanlage Asse entnommen und auf ihren Gehalt an radioaktiven Stoffen untersucht. Die gemessenen Werte lagen

alle im Bereich der natürlichen Umweltradioaktivität und lassen keinen Einfluß durch die eingelagerten radioaktiven Abfälle erkennen.

In Anlehnung an die Umgebungsüberwachung bei anderen kerntechnischen Anlagen wurden im Abstand von einem und zwei Kilometern von der Schachtanlage Asse an insgesamt 24 Stellen, verteilt auf zwölf Sektoren, Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD) ausgehängt. Die Ergebnisse der Strahlenschutzüberwachung werden in einem eigenen Bericht zusammengefaßt.

1.1.4 Genehmigungen für weitere Einlagerungsversuche

Nachdem zum Jahresende 1978 die bestehenden Genehmigungen zur Einlagerung radioaktiver Abfälle ausgelaufen sind, wurden im Juni 1978 neue Genehmigungsanträge für die Einlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen gestellt. Über diese neuen Genehmigungsanträge wurden verschiedene Gespräche zwischen Vertretern des Bundes und des Landes Niedersachsen geführt, die noch nicht abgeschlossen sind.

Alle Arbeiten ohne radioaktive Abfälle können ungestört durchgeführt werden.

Die bisherigen Endlagerungsversuche mit schwach- und mittelradioaktiven Abfällen können nach der Forderung des Landes Niedersachsen erst nach Abschluß eines Planfeststellungsverfahrens fortgesetzt werden. Zur Lösung der dringenden Entsorgung ist das Land bereit, im Salzbergwerk Asse ein bundesweites Zwischenlager zu genehmigen, in dem die Abfälle in rückholbarer Form gestapelt werden.

1.1.5 Besucherbetreuung und Öffentlichkeitsarbeit

Der Schwerpunkt der Öffentlichkeitsarbeit lag, wie auch in den vergangenen Jahren, bei Gruppenbesichtigungen durch Grubenbefahrungen.

2.600 Besucher aus der interessierten Bevölkerung der näheren Umgebung nutzten die 6 Tage der Offenen Tür zu ihrer persönlichen Information. Dazu wurden ca. 4.500 Fachbesucher aus dem In- und Ausland sowie Besucher aus allen Bevölkerungsschichten über die Arbeiten im Salzbergwerk Asse durch Vorträge und Führungen umfassend informiert.

1.2 Gebirgsmechanische in situ-Messungen

Die jährlichen Wiederholungsmessungen für die untertägigen Gebirgsbeobachtungen in der Schachanlage Asse wurden entsprechend dem Konzept von 1976 mit dem Anschluß an über-tägige Festpunkte und Kreiselorientierungen in der Grube durchgeführt. Ihre Auswertungen haben Lageänderungen an den Beobachtungspunkten ergeben, die örtlich entgegengesetzt zu der bisherigen Verschiebungsrichtung verlaufen. Die Ursachen dafür können sowohl in dem geänderten Anschlußsystem als auch durch den Streubereich innerhalb der erreichbaren Meßgenauigkeit begründet sein. Um die Auswirkungen dieser Einflüsse auf das Meßergebnis beurteilen zu können, müssen die Folgemessungen abgewartet werden. Die Beträge der ermittelten Lageänderungen lagen in dem bereits in den Vorjahren beobachteten Millimeter- bis Zentimeterbereich.

Das in der Baufeldmitte im Pfeiler zwischen den Abbauen 4 und 5 auf der 553 m-Sohle verdichtet angelegte Extensometer-Meßprogramm ist weiter beobachtet worden. Die Ergebnisse zeigen, daß der Pfeiler sich im Berichtsjahr mit konstanter niedriger Verformungsgeschwindigkeit deformiert hat.

Zur Konvergenzüberwachung in den Abbaukammern wurde eine Reihe neuer Meßstellen eingerichtet. Gemessen wird jeweils die querschlägige Konvergenz zwischen südlichem und nördlichem Kammerstoß. Bei der Auswahl dieser Meßpunkte wurde von den bisherigen Schlüssen aus dem Gebirgsbeobachtungsprogramm ausgegangen, wonach sich über der stark geneigt bis steil stehenden Baufeldebene im Jüngeren Steinsalz ein trogartiges Deformationsfeld senkrecht zur Baufeldebene ausgebildet hat, dessen Maximum im Baufeldzentrum liegt und das sowohl in streichender als auch in fallender Richtung zu den Baufeldgrenzen hin abnimmt. Die daraus resultierenden Abbauverformungen, die auch heute noch nicht abgeklungen sind, werden durch dieses Erweiterungsprogramm sowohl in der Baufeldmitte als auch in einem repräsentativen Abbau am Baufeldrand überwacht.

Das Nivellement der Tagesoberfläche wurde im bisherigen Umfang fortgesetzt. Die Meßdaten befinden sich noch in der Auswertung. Es läßt sich jedoch bereits jetzt erkennen, daß sich gravierende Abweichungen von den Ergebnissen der Vorjahre nicht ergeben werden.

Insgesamt haben die Gebirgsbeobachtungen keine Hinweise auf eine zu erwartende Beeinträchtigung der Standsicherheit des Grubengebäudes bis zur vorgesehenen Verfüllung der Grubenräume in der Südflanke erbracht.

1.3 Hydrogeologisches Forschungsprogramm

Das Hydrogeologische Forschungsprogramm hat zum Ziel, die Grundwasserverhältnisse, insbesondere Grundwasservorkommen und -fließrichtungen sowie eventuelle hydrogeologische Verbindungswege im Deckgebirge über dem Salzsattel der Asse zu erkunden. Zusätzlich werden dadurch ergänzende Erkenntnisse über die geologische Situation erzielt.

Im Rahmen des Hydrogeologischen Forschungsprogramms Asse wurden drei hydrogeologische Untersuchungsbohrungen mit insgesamt 645,6 Bohrmeter, drei geologische Aufschlußbohrungen mit insgesamt 70 Bohrmeter und zwölf Grundwasserpiegelbohrungen mit insgesamt 208 Bohrmeter auf dem Asse-Höhenzug und an seinen Flanken niedergebracht. Damit ist das geplante hydrogeologische Bohrprogramm abgeschlossen. Die technische Ausführung der Bohrarbeiten wurde ständig den jeweiligen durch die Gesteinsbeschaffenheit bedingten Erfordernissen angepaßt. Nach Festlegung der Endteufe aufgrund der durchörterten Schichtenfolge wurden mit Hilfe von Kern- und Spülprobenbearbeitung und von geophysikalischen Bohrlochmessungen die wasserführenden Horizonte in den hydrogeologischen Untersuchungsbohrungen bestimmt und der Ausbau mit Filter- und Vollrohren dementsprechend durchgeführt.

Mit einer hydrogeologischen Untersuchungsbohrung sollen die Grundwasserverhältnisse im verstürzten Buntsandstein-Deckgebirge im Vergleich zu einer nur 40 m entfernten Salzspiegelbohrung untersucht werden, die bereits früher niedergebracht worden war. Der untere Teil der Bohrung wurde von 196,5 bis 166,0 m Tiefe mit einem Ton-Zement-Gemisch verfüllt, da in diesem Bereich keine wasserleitenden Schichten angetroffen worden sind. Ebenso wurde der Ringraum des oberen Teiles der Bohrung von 0 bis 50 m unter Gelände verfüllt, um den Einfluß von Oberflächenwasser auszuschließen. Der zwischen 50 und 166 m Tiefe liegende Bereich ist für die Grundwasseruntersuchungen überwiegend mit Filterrohren ausgebaut. Von 72 bis 84 m und von 138,5 bis 150,5 m wurden Vollrohre mit Tonsperren im Ringraum gesetzt, um gegebenenfalls durch Einbringen von Packern unterschiedlich tiefe grundwasserführende Zonen getrennt untersuchen zu können.

Beide Bohrungen sind mit Pegelschreibern versehen, um Grundwasserspiegel-Ganglinien zu erhalten, mit denen eine vergleichende Charakteristik der Grundwasserleiter im Deckgebirge und im Salzspiegelbereich möglich sein wird. Die ersten noch einen sehr kurzen Zeitraum umfassenden Wasserspiegelmessungen deuten ähnliche Reaktionen auf Niederschläge, aber unterschiedliche Trockenwetterkoeffizienten an. Zur weiteren Interpretation müssen längere Meßreihen vorliegen.

Derselben Fragestellung dient die zweite hydrogeologische Untersuchungsbohrung, die Grundwasser des verstürzten Buntsandstein-Deckgebirges erschließt. Mit der dritten hydrogeologischen Untersuchungsbohrung wurde versucht, mit Sole erfüllte Gerinne zwischen Gipshut und Salzspiegel zu treffen. Die Bohrung traf jedoch keine Gerinne an, sondern statt dessen unter dem Gipshut Hauptanhydrit, Grauen Salzton und schließlich Carnallitit des Zechstein 2 in normaler Abfolge.

Zwölf Flachbohrungen wurden zur Einrichtung von Eingabe- und Grundwasserbeobachtungspegeln niedergebracht. Eine Bohrung wurde verfüllt, da sie kein Grundwasser antraf und auch als Eingabepegel nicht geeignet war. Vier Bohrungen zeigten deutlichen Spülungsverlust und sind als Eingabepegel für Markierungsstoffe hergerichtet. Die restlichen sieben Bohrungen sind mit Schreibpegeln bestückt und dienen der Ergänzung des Grundwasserbeobachtungsnetzes für die geplanten Pump- und Markierungsversuche.

Die Langzeitmessungen an Bohrungen, Brunnen, Quellen und Vorflutern sowie der Wetterstation auf dem Gelände der Schachtanlage Asse zur Erfassung der hydrologischen Parameter und ihrer Änderungen wurden weitergeführt. Mit der Auswertung wurde begonnen.

Die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Grundwässer und Salzlösung sowie der Luftfeuchteproben aus der Schacht-

anlage Asse wurden fortgesetzt. Sie erlauben Rückschlüsse auf Herkunft und Alter.

1.4 Geologische Untersuchungen

Die laufenden geologischen Untersuchungen haben zum Ziel, verbesserte Erkenntnisse über die geologische Feinstruktur und die tektonischen Verhältnisse sowohl im Salzsattel als auch im Deckgebirge zu erhalten.

Dazu wurden in den Bohrungen des Hydrogeologischen Forschungsprogramms durchbohrte Gebirgsschichten im Gelände petrographisch untersucht und soweit möglich stratigraphisch zugeordnet. Die geologische Feldaufnahme der Bohrproben wurde durch begleitende und weiterführende Laboruntersuchungen ergänzt.

Die erste hydrogeologische Untersuchungsbohrung erschließt die verstürzten Deckgebirgsschichten des Unteren Buntsandsteins überwiegend rotbrauner Farbe und toniger bis schluffiger Zusammensetzung mit Kalksandsteinbänkchen und Gipseinlagerung, die ab 145 m Bohrtiefe stärker auftreten und ab 193,5 m Tiefe einen kompakten Gipshut bilden. Die Bohrung ist bei 196,5 m Endteufe im Gipshut eingestellt.

Die zweite hydrogeologische Untersuchungsbohrung erschließt ebenfalls Deckgebirgsschichten des Unteren Buntsandsteins. Ab 180,9 m folgt kompakter Gipshut bis zur Endteufe bei 190,4 m.

Die dritte hydrogeologische Untersuchungsbohrung durchörterte bis ca. 5 m Tiefe graue, feinsandige, teils mergelige Schluffe, die dem Tertiär zugeordnet werden. Darunter wurden wiederum verstürzte Buntsandsteinschichten angetroffen. Ab 182 m Bohr-

tiefe schalten sich Gipsbänke ein, die zum Liegenden stark zunehmen. Bei 217 m Tiefe geht der Gipshut in den Hauptanhydrit des Zechstein 3 über. Nach 30 m durchbohrter Mächtigkeit des Hauptanhydrites (A 3) folgen 7 m Grauer Salzton (T 3) und ab 254 m Carnallitit (K 2 C) des Zechstein 2. Die Zechsteinschichten liegen in normaler stratigraphischer Abfolge übereinander und haben ein Einfallen von etwa 50°. Bei 258,7 m Endteufe wurde die Bohrung im Carnallitit eingestellt.

Durch die drei wieder verfüllten geologischen Aufschlußbohrungen westlich des Schachtes Asse 1 wurde der Nachweis erbracht, daß die dort angetroffenen fossilereeren Kalke nicht in tektonischem Kontakt mit dem Salzgebirge stehen. Dieses Ergebnis bedeutet, daß die geologische Abdichtung des Salzsattels auch an dieser Stelle gegeben ist.

Im Grubengebäude des Salzbergwerkes Asse sind reflexionsseismische Versuchsmessungen unter Ausnutzung der Sprengenergie beim Auffahren der Prototyp-Kavernenanlage durchgeführt worden. Mit Hilfe dieser Messungen sollte versucht werden, in erster Linie die Salzbasis, gegebenenfalls auch weitere Reflexionshorizonte, zu orten. Die Auswertung der Seismogramme unter Einsatz einer Rechenanlage wurde als Auftrag vergeben. Da sich bislang kein deutliches Ergebnis abzeichnete, wurden 1978 zwei Schüsse beim Auffahren des Temperatur-Versuchsfeldes 4 und ein Schuß im Zusammenhang mit dem Auffahren der Wendelstrecke von der 775 m- zur 800 m-Sohle mit einer reflexionsseismischen Apparatur im Grubengebäude registriert und zusätzlich in die Auswertung einbezogen. Diese befindet sich noch in Bearbeitung.

Um untertage neue Versuchsfelder bereitstellen zu können, sind geologische Aufschlüsse im Kern der Salzstruktur bis 1100 m Tiefe unter Gelände vorgesehen. Ein Kernbohrprogramm mit insgesamt ca. 2000 m Bohrleistung wurde zur Erschließung des Bereiches von Staßfurt-Halit (Älteres Steinsalz, Na 2) im Westfeld entworfen.

Mit dem Beginn der Wendelstreckenauffahrung von der 775 m- zur 800 m-Sohle hat die begleitende geologische Betreuung eingesetzt.

2. Weiterentwicklung der Einlagerungsverfahren für schwach- und mittelaktive Abfälle

Im Mittelpunkt der Arbeiten zu diesem Vorhaben standen Fragen der Verfüllung des Versatzes und der Versiegelung von Hohlräumen. Im folgenden wird über Modellversuche zum Versatz berichtet.

2.1 Modellversuche zum Schütt- bzw. Fließverhalten des Versatzes

Die Modellversuche wurden mit der folgenden Zielsetzung durchgeführt:

- Untersuchung des Einflusses von Kammergeometrien und -einbauten auf das Schütt- bzw. Fließverhalten von Abfall und Versatz,
- Optimierung der Zwickelverfüllung zwischen den eingelagerten Abfallfässern,
- Entwicklung von Versatzeinbringungsgeräten.

Gebirgsmechanische, hydrogeologische und kernphysikalische Aspekte wurden zunächst vernachlässigt.

Bei den Versatzstoffen wurde grundsätzlich unterschieden zwischen:

- **Trockenem Versatz:**
Hierunter fallen rieselfähige Stoffe, die eingeschüttet oder -geblasen werden können.
- **Nassem Versatz:**
Hierzu gehören Stoffe, die sich eingießen lassen und danach verfestigen.

Zur Durchführung kamen Versuche mit Modellfässern im kleinen (M 1:20) und im großen Maßstab (M 1:5).

Die ersteren dienten dazu, die Zusammenhänge bei großen Faßzahlen und simulierten Versatzstoffen aufzuzeigen. Die letzteren sind Detailversuche mit kleineren Faßzahlen, deren Durchführung auch mit Originalversatzstoffen erfolgen kann.

Zunächst erfolgten Versuche im Maßstab 1:20 zur Ermittlung des Flankenwinkels und des Raumausnutzungsgrades einer Faßschüttung (Bild 1). Als Versuchsmittel dienten 1500 maßstäblich verkleinerte aus Aluminium gefertigte Modellfässer; das Absetzen der Fässer geschah durch eine den Faßgreifer simulierende Vorrichtung. 30 durchgeführte Versuche mit unterschiedlichen Faßzahlen und Absetzhöhen ergaben bei 120 Messungen, daß diese Parameter keinen Einfluß auf die Versuchsergebnisse hatten. Als Größe für den Flankenwinkel kann $37^{\circ} \pm 1,5^{\circ}$ und für den Raumausnutzungsgrad $48,4 \% \pm 3,1 \%$ angegeben werden.

Gegenstand weiterer Versuche war das Schüttverhalten des trockenen Versatzes. Als Versatzmaterial diente trockener Sand, der in Form eines Strahles auf die Spitze eines Faßberges vor 900 Modellfässern geschüttet wurde (Bild 2). Dabei war zu beobachten, daß sich die Sandschüttung im Innern des Faßberges als Kegel ausbildete.

Die Zwickel zwischen den Fässern wurden gut verfüllt und der Faßberg am Ende der Versuche ohne Störungen kegelförmig überdeckt. Die nächsten Versuche erfolgten in Einlagerungskampagnen zu je 300 Fässern bei zwischenzeitlichen Versatzeinbringungen (Bild 3). Als günstig kann hier eine nachträgliche Verdichtung des Versatzes durch Absetzen der Modellfässer nach dem Einbringen des Versatzes angesehen werden.

Um den Einfluß von Kammergeometrien und -einbauten beurteilen zu können, sind weitere Versuche mit verschiedenartig ausgebildeten Modellkammern aus Plexiglas vorgesehen.

2.2 Versuche zur Auswahl geeigneter Versatzmaterialien

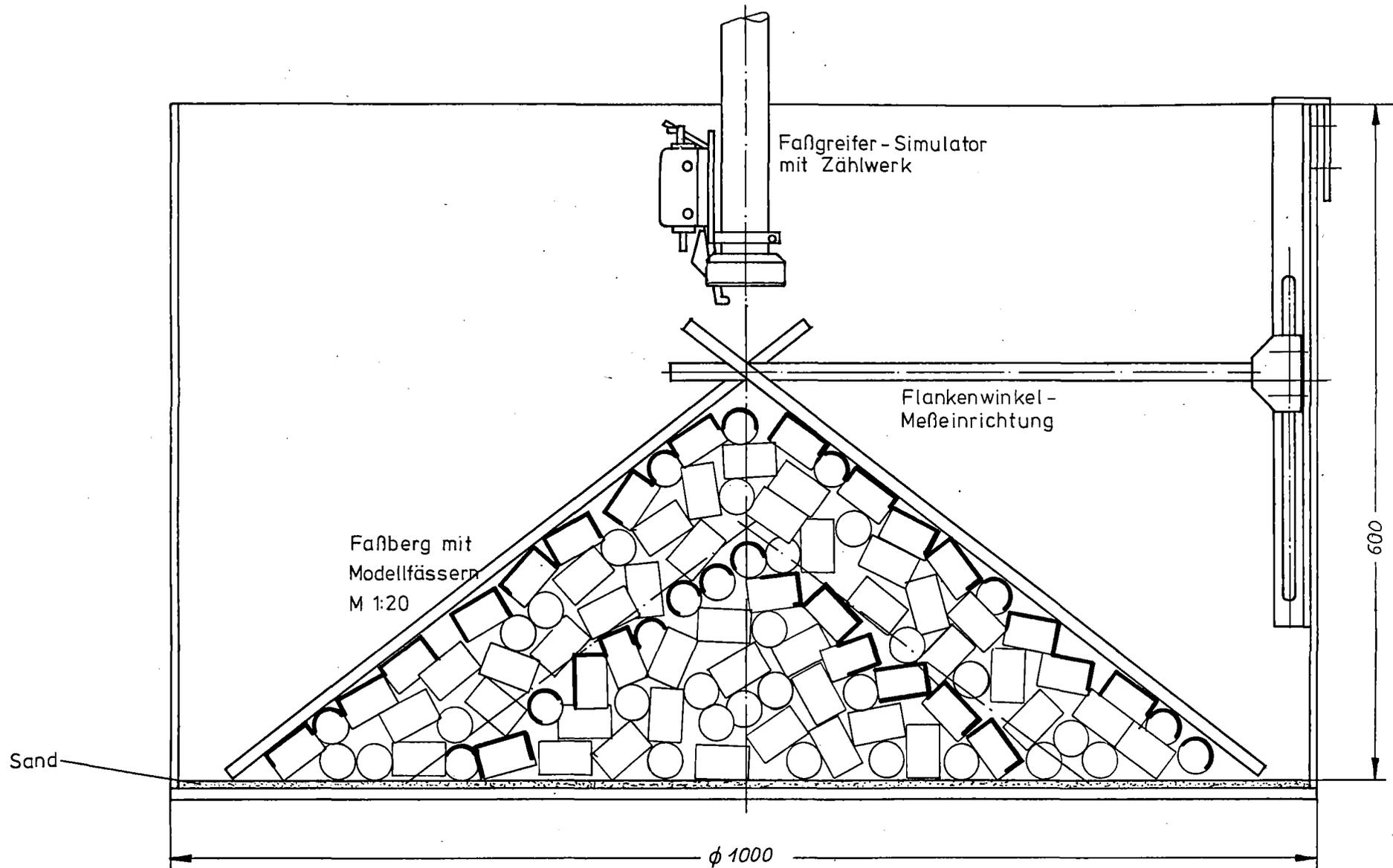
Zur Erprobung von Füllmaterialien wurde in einem Faßstapel ein Vorversuch mit einem kalterhärtenden Bitumenprodukt durchgeführt.

Die flüssige, pumpfähige Mischung erreichte eine gute Zwickelfüllung, hatte ein Raumgewicht von $1,7 \text{ kg/dm}^3$, wies jedoch einen Abbindeschwund von 3 - 6 %, ein Porenvolumen bis zu 14 % und eine Endfestigkeit von nur 20 - 49 kp/cm^2 auf. Durch Verwendung von Sand mit günstigerer Kornverteilung sind die Materialeigenschaften dieses Stoffes noch zu verbessern. σ

Daneben wurde ein großtechnischer Versuch zum Einbetonieren von 50 Abfallfässern (Attrappen) im Abbau 6/511 m-Sohle vorbereitet.

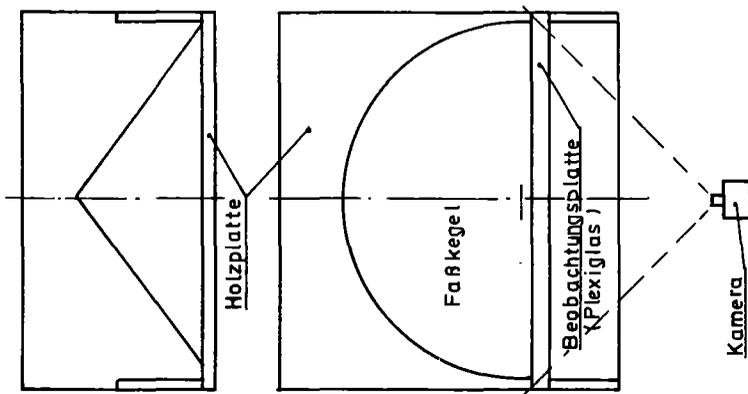
Die Versuchseinrichtungen sind wiederverwendbar und erlauben die Erprobung anderer Verfüllstoffe (Zementsorten, Bitumen etc.) unter vergleichbaren Bedingungen mit aussagekräftigen Ergebnissen im Originalmaßstab 1:1.

Zur Eignungsanalyse von Versatzmaterial wurden die Eigenschaften und das Stoffverhalten von 8 ausgewählten Materialien (3 Haldenrückstände von Kaliwerken, 1 Schlackenrückstand, 2 Flugaschen, 2 mit hydraulischen Bindemitteln versetzte Stoffe) nach einheitlichen, vergleichbaren Methoden untersucht. Ergebnisse werden erst 1979 vorliegen.

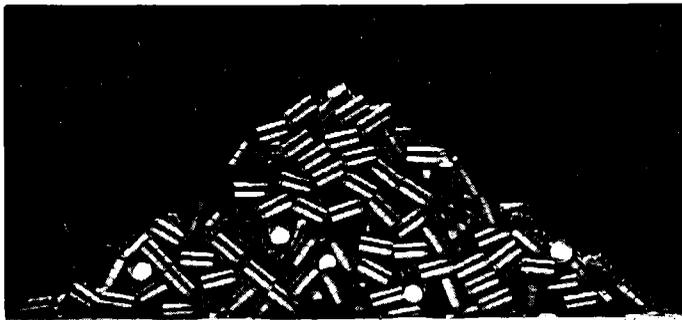


Versuchsanordnung zur Ermittlung des Flankenwinkels und des Raumausnutzungsgrades bei Faßschüttungen

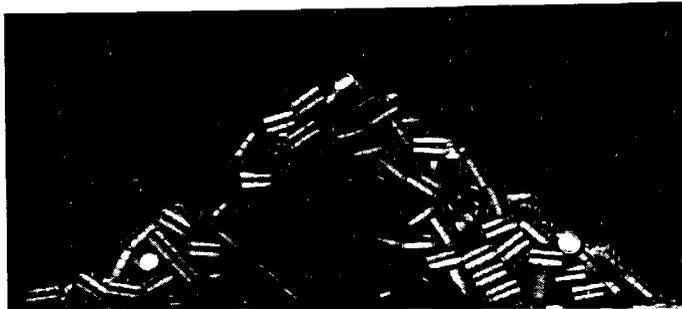
Abb.1



Versuchsaufbau



Faßberg ohne Versatz

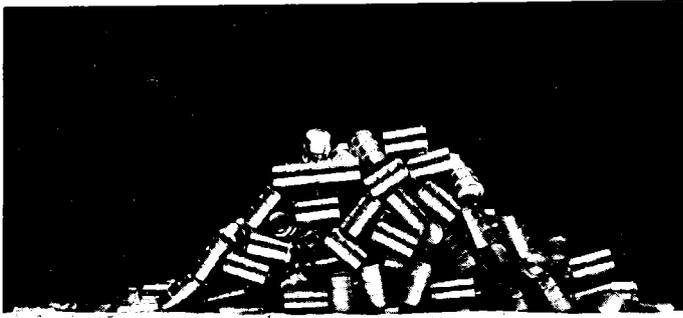


Faßberg teilweise versetzt

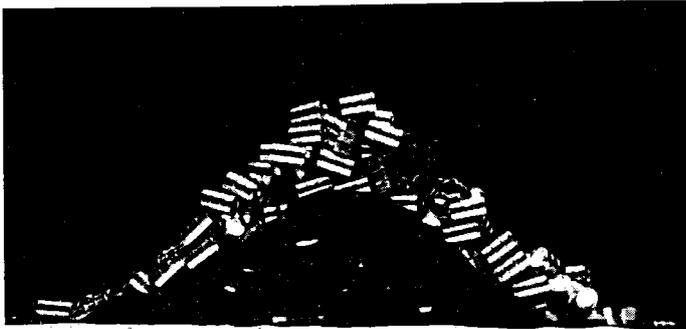


Faßberg vollständig versetzt

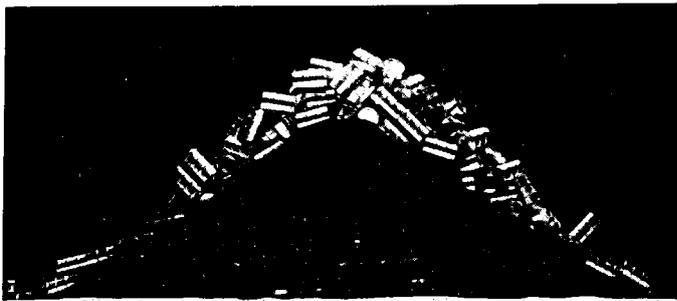
Trockener Versatz von 900 Modellfässern
M 1 : 20



300 Fässer ohne
Versatz



300 Fässer versetzt
und weitere 300 Fässer
eingebracht



600 Fässer versetzt
und weitere 300 Fässer
eingebracht



900 Fässer versetzt
(Vor dem Abschluß des
Versuchs)

Abb. 3

Trockener Versatz bei Einlagerungs-
kampagnen zu je 300 Modellfässern M1:20

3. Entwicklung und Bau einer Kammer für die Versuchseinlagerung mittelaktiver Abfälle

Mit dem Bau einer neuen Kammer für die Versuchseinlagerung mittelaktiver Abfälle sollen neben der Demonstration von Verfügbarkeit und Sicherheit dieser Einlagerungsverfahren weitere Ergebnisse erzielt werden, wie

- Bestimmung der zulässigen Grenzwerte der mittelaktiven Abfälle für diesen Kammertyp und ihr Verhalten unter Lagerbindungen,
- Verfahren und Materialien für die Verfüllung und den Verschluß der Kammer.

Mit dieser Zielsetzung wurden umfangreiche konzeptionelle Arbeiten durchgeführt, die wesentliche Grundlage für die Realisierung sind.

3.1 Gebirgsmechanische Arbeiten

Als Form der Kammer ist ein Kreiszyylinder mit aufgesetztem Kegel vorgesehen, ihr Inhalt soll 3000 m^3 betragen. Als Herstellungsverfahren wird von der Firstenkammerbauweise ausgegangen. Es ist ein syphonartiger Zugang geplant, der gegenüber einem horizontalen Zugang bei der Verfüllung Vorteile hat.

Diese Randbedingungen sind die Basis für das gebirgsmechanische Meß- und Überwachungsprogramm unter spezieller Berücksichtigung der langfristigen Sicherheit.

Finite-Elemente-Berechnungen zur Statik der geplanten MAW-Kammer und der umgebenden Strecken- bzw. des Beschickungsraumes werden durchgeführt. Basis für diese rechnerischen

Abschätzungen bildet das von VOLLSTEDT (1978) veröffentlichte FEM-Programm, welches es ermöglicht, auch inelastisch und zeitabhängig zu rechnen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen bilden gleichzeitig die Grundlage für die Lokation der meßtechnischen in situ-Überwachung und Kontrolle.

Als erstes Zwischenergebnis der Finite - Element-Berechnungen wurden zwei Finite-Element-Netze vorgelegt, welche in 775 m Teufe sowohl einen sofortigen Vollausbruch des Beschickungsraumes als auch einen Teilausbruch berücksichtigen. Für beide Fälle wurden die als Folge der Auffahrung zu erwartenden Sekundärspannungen, deren Betrag und Reichweite in das unverritzte Gebirge und die zu erwartenden Verschiebungen und der Richtungen ermittelt. Als Seitendruckbeiwert für den Anfangsspannungszustand wurde ein Verhältnis von

$$\lambda = 1,0; \quad \lambda = 0,7 \text{ und } \lambda = 0,5$$

gewählt.

Für beide Varianten der Beschickungsraumauffahrung - Vollausbruch oder Teilausbruch - ergeben sich geomechanische Wechselwirkungen zum eigentlichen Lagerraum im Hinblick auf die Richtung und den Betrag der zu erwartenden Deformation. In den Folgerechnungen müssen diese ersten Zwischenergebnisse noch weiter analysiert werden, um vor Beginn der eigentlichen Auffahrung eine nach qualitativen gebirgsmechanischen Kriterien günstige Bauweise unter dem speziellen Blickwinkel der langfristigen Sicherheit des Lagerraumes zu ermitteln.

Gleichzeitig soll mit dieser Vorgehensweise, d.h. einer Planung in an den jeweiligen Kenntnisstand angepaßten Stufen, modellartig ein auch für das geplante Entsorgungszentrum anwendbares Konzept für eine gebirgsmechanische Standsicherheitsanalyse entwickelt und auf seine Anwendbarkeit an kon-

kreten Bauobjekten überprüft werden. Die Kombination von rechnerischen Abschätzungen mit in situ-Messungen zur Überprüfung und Überwachung gebirgsmechanischer Vorgänge dient gleichzeitig dazu, standortunabhängige gebirgsmechanische Prognosen zu ermöglichen bzw. zu verbessern.

Die gewählte Teufe und geologische Position sowie der Abstand zu vorhandenen älteren Grubenbauen ermöglichen hier des weiteren einen Analogieschluß zu vergleichbaren Positionen anderenorts, so daß neben den spezifischen ortsgewundenen Verhältnissen auch standortunabhängige Kriterien erarbeitet werden.

Um das mechanische Verhalten des Steinsalzes für den Bau der MAW-Kammer besser zu beschreiben, wurden erste Kerne für gebirgsmechanische Laboruntersuchungen im Älteren Steinsalz gewonnen. Durch die festigkeitsmechanischen rheologischen Untersuchungen an diesen Kernen wird der Kenntnisstand so verbessert, daß auch hier der vorstehend erwähnte stufenweise Aufbau der gebirgsmechanischen Standortsicherheitsanalyse folgerichtig anwendbar wird.

3.2 Ingenieurtechnische Arbeiten

3.2.1 Beschreibung des Einlagerungsvorganges

Das Konzept sieht folgenden Einlagerungsvorgang vor:
Das einzulagernde Abfallfaß wird in einem Abschirmbehälter durch ein Transportfahrzeug vom Füllort am Schacht zur Beschickungskammer transportiert.

Der Behälter wird mit dem Laufkran zum Bohrlochschieber transportiert, auf die Schieberaufnahmeplatte abgesetzt und vom Laufkran automatisch entkuppelt.

Der Kran führt nun die folgenden Einzelfunktionen aus:

- Verschieben der Lastanhängevorrichtung auf dem Behälterdeckel,
- Kuppeln des Faßgreifers,
- Absenken des Fasses in die Kaverne, nachdem zuvor der Transportbehälter-Bodenschieber entkuppelt und der Bohrlochschieber mit dem gekuppelten Bodenschieber geöffnet wurde,
- Ausklinkung des Fasses in der Kaverne kurz oberhalb des Füllspiegels,
- Heben, Verriegeln und Entkuppeln des Faßgreifers (Schließen des Bohrlochschiebers mit dem gekuppelten Bodenschieber und Verriegelung des Bodenschiebers durch die Antriebe des Bohrlochschiebers),
- Verschieben der Lastanhängevorrichtung.

Danach wird der Transportbehälter vom Laufkran aufgenommen, zum LKW zurücktransportiert, darauf abgesetzt und entkuppelt. Der LKW bringt den leeren Transportbehälter zum Schacht zurück.

3.2.2 Konzept der Lüftungs- und Filteranlage

Eine Lüftungs- und Filteranlage (Bewetterungsanlage) der Einlagerungskammer soll folgende Aufgabe erfüllen:

- Aufrechterhaltung eines Unterdruckes in der Lagerkammer gegenüber dem übrigen Grubengebäude, so daß durch Einhaltung eines Druckgefälles eine Ausbreitung von kontaminierter Luft sicher vermieden wird.
- Abfuhr der während der Einlagerungsphase entstehenden Radiolysegase (radiolytische Zersetzung des Fixiermittels) aus der Kammer in die belüftete Einlagerungsstrecke. Da-

mit wird erreicht, daß während der Einlagerungsphase die H₂-Konzentration in der Kammer stets unterhalb 0,1 Vol. % in Luft beträgt.

Nach Beendigung der Einlagerungsphase und erfolgtem Versetzen der Kammer existiert ein Radiolyseproblem nicht mehr, da auch im ungünstigsten Fall der Bildung von zündfähigen H₂/Luft-Gemischen deren Zündung wegen des Nichtvorhandenseins von Zündquellen undenkbar ist.

Die Zuluft gelangt aus der Beschickungskammer in die Einlagerungskammer über ein Zuführungsrohr. Eine Umkehrung der Zu- und Abluft wird ausgeschlossen.

Die Abluft aus der Lagerkammer wird über Absolut-Schwebstofffilter geleitet.

Die Leistung der Ventilatoren wird mit ca. 10.000 m³/h ausgelegt, so daß ein dreifacher Luftwechsel gewährleistet ist. Eine eingeschränkte Betriebsweise ist durch Regeln des Volumenstromes möglich.

Die Filtereinheiten (Schwebstofffilter - Sonderstufe S) sind so aufgeteilt, daß ein Filterwechsel ohne Betriebsunterbrechung stattfinden kann.

Nach dem Filtern wird die Luft über den Ventilator und einen nachgeschalteten Schalldämpfer mit der Grubenluft über den Wetterausziehschacht ins Freie geführt.

Die Ventilatoren sind parallel angeordnet, können wechselseitig betrieben werden und schalten bei Störungen an dem in Betrieb befindlichen Ventilator selbsttätig auf den Reserve-Ventilator um.

3.2.3 Konzept zum Einbringen von Versatzmaterial

Im Rahmen der Durchführung der Einlagerungsversuche soll die Kammer abschnittsweise mit Verfüllmaterial beschickt werden. Es ist dabei nicht nur an eine Überdeckung der Fässer, sondern insbesondere auch an eine weitgehende Ausfüllung der Hohlräume zwischen den Fässern gedacht.

Für das Einbringen des Versatzes sind vier Befüllöffnungen zwischen Beschickungs- und Lagerkammer vorgesehen. Die Einlagerung der Abfälle und das Einbringen des Versatzmaterials werden in wechselseitigen Kampagnen erfolgen.

Als Versatzstoff werden unterschiedliche Materialien zum Einsatz kommen. Die Auswahl dieser Materialien erfolgt aufgrund von Vorversuchen. Nach heutigem Kenntnisstand werden insbesondere Versatzstoffe mit hydraulischem Bindemittel verwendet.

Die einzelnen Zuschlagstoffe werden getrennt angeliefert und sind in Silos oder entsprechenden Behältern zu lagern.

Die Herstellung der Mischung soll untertage erfolgen. Die Mischanlage besteht aus folgenden Teilen:

1. Siloanlagen für die Grundstoffe,
2. Stationäre Mischanlage, bestehend aus:
 - automatischer Dosierungseinrichtung,
 - Mischmaschine,
 - Füllanlage.

3.2.4 Elektrische Ausrüstung

Sämtliche sowohl für den Starkstromteil als auch für die Steuerung erforderlichen Geräte sollen auf Umladeniveau oberhalb der Kammer zur Aufstellung kommen.

Auf den beweglichen Aggregaten, d.h. auf dem Laufkran einschließlich -katze und dem rehkran, werden lediglich Geräte plaziert, die zur direkten Signalerfassung und -auswertung erforderlich sind.

Die komplette Signalverarbeitung und -zuordnung erfolgt grundsätzlich in den stationär angeordneten Schalt- und Steuerschränken.

Die Bedienung der Überwachung der Anlage erfolgt von einem im Umladebereich der Kammer plazierten zentralen Steuerstand aus.

4. Prototyp-Kavernenanlage

In einer Prototyp-Kavernenanlage soll die Einlagerung mittelradioaktiver Abfälle in den Kavernenhohlraum zwischen 959 m und 996 m Teufe erfolgen. Mit diesem Vorhaben, das den umständlichen Untertagetransport der Abschirmbehälter vermeidet, wurde 1972 begonnen.

4.1 Bauliche Herrichtung

Die bergmännischen Arbeiten zur Erstellung des Kavernenhohlraumes wurden abgeschlossen. Wegen der nicht erwarteten hohen Anfangskonvergenz mußte das Fundament des Kavernenabschlußbauwerkes völlig neu konzipiert werden, wodurch sich eine erhebliche Zeitverzögerung im gesamten Projektablauf ergab.

Die Schachteinbauten unterhalb der 750 m-Sohle, wie Förderrohrtour, Fahrten mit Bühnen, Entladeanlage mit Überleitrut-sche und Dämpfungsklappe sowie Fallrohrtour und Meßrohrlei-tungen im Kavernenhals wurden eingebracht. Der Auftrag zur Montage der Schachteinbauten von übertage bis zur 750 m-Sohle einschließlich Montage der Spurlatten bis zur Entladeanlage wurde vergeben.

Die baulichen Arbeiten im Rahmen der Erstellung der Schacht-hallenerweiterung, der Umladezelle mit Filterraum sowie des Fördermaschinenraumes mit den erforderlichen Schaltstationen sind bis auf Restarbeiten abgeschlossen worden, so daß die Montage der Förder- und Beschickanlage zügig durchgeführt wer-den konnte.

4.2 Montage der maschinen- und elektrotechnischen Anlagenteile

Der mechanische und elektrische Teil der Förder- und Beschickungsanlage wurde bis auf wenige Anlagenteile vollständig ausgeliefert und zu rund 90 % im Übertagebereich montiert.

In umfangreichen Kaltversuchen wurde die Funktionstüchtigkeit des an einem Spezialkrangeschirr des Hallenportalkranes montierten Umladebehälters U 1 getestet und das Anfahren und Absetzen desselben auf der Position Strahlenschieber der Umladezelle sowie der Entlade- und Beschickungsvorgang eines Abfallfasses auf die Absetzposition der Rollenbahn erprobt.

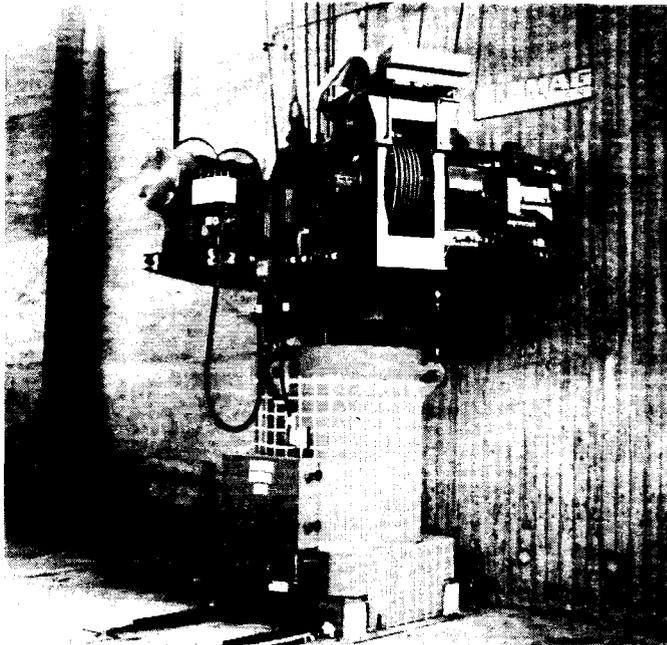


Abb. 4 : Umladebehälter U 1 auf den Strahlenschutzschieber aufgesetzt

Nach einer ausführlichen Funktionsprüfung wurden die erstellten Einheiten: Schwerlastmanipulator, Portalkran mit Abschirmeinheit U 1, Rollenbahnanlage sowie die Fördermaschine abgenommen.

Die Homogenität und Strahlendichtheit des Betons von Decke und Wänden der Umladezelle wurde mit Hilfe einer Co-Quelle nachgewiesen.



Abb. 5: Co-60-Quelle (90 Ci) mit Abschirmbehälter, Ausfahrtschlauch und Meßposition an der zu prüfenden Wand

Im Bereich "oberer Wetterkreis" der Lüftungsanlage wurden im Lüfterraum die Ventilatoren und Filtereinheiten bis zum elektrischen Anschluß montiert.

Weitgehend abgeschlossen wurde ferner die Installation der Lüftungs- und Klimaanlage im Bereich der Umladezelle mit den dazugehörigen Überwachungseinheiten sowie der Abluftkamin.

Durch die Verzögerung beim Bau des Kavernenabschlußbauwerkes konnten die Schachteinbauten oberhalb der 750 m-Sohle sowie die Lüfter- und Filteranlage für den "unteren Wetterkreislauf" noch nicht montiert werden.

Die Tatsache, daß aus bergmännischen Arbeitsgründen im Bereich des Schachtes, der Entladeanlage und in der Kaverne jeweils nur an einem Betriebspunkt gearbeitet werden kann, führt bei Zeitverzögerung in der Montage in einem Bereich automatisch zu Verschiebungen im Zeitplan für die Gesamtanlage.

4.3 Gebirgsmechanische Untersuchungen

Im Rahmen der Erstellung der Kavernenanlage wurde bereits in der Bauphase, d.h. während der Teufarbeiten zur Erstellung des Schachtes und der Kaverne ein baubegleitendes gebirgsmechanisches Untersuchungsprogramm durchgeführt. Die Auswahl und Installation der Meßinstrumente wurde so vorgenommen, daß die Messungen auch nach Abschluß der eigentlichen Bauarbeiten im Rahmen des in situ-Meßprogramms erfolgen können. So werden die gebirgsmechanischen Messungen in unterschiedlichen Teufen und geologischen Positionen vorgenommen.

Die Meßhorizonte sind sowohl im verrohrten Abschnitt des Bohrschachtes bis 396 m Teufe als auch im nicht ausgebauten Teil des Schachtes zwischen der 490 m- und der 700 m-Sohle sowie im konventionell aufgefahrenen Schacht mit Rechteckquerschnitt unterhalb der 750 m-Sohle bis in die Kaverne hinein installiert.

Die Messungen sind bereits während der Bauphase angelaufen, mußten jedoch aus betrieblichen Gründen für einige Zeit unterbrochen werden. Die bereits vorliegenden Meßergebnisse zeigen, daß die anfangs starken Konvergenzen im Salzbereich des Schachtes sowie innerhalb der Kaverne ständig abnehmen (Abb. 6).

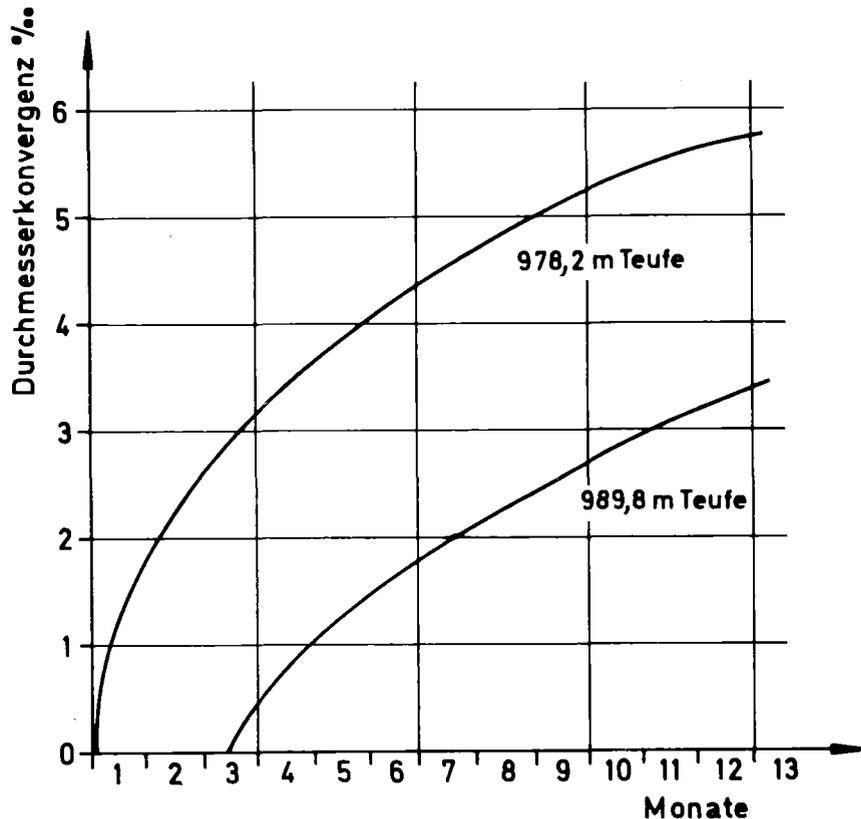


Abb. 6: Durchmesserkonvergenz der Kaverne

Im Kavernenabschlußbauwerk wurde eine Zusatzinstrumentierung eingebaut, um die Gebirgskonvergenz in diesem Bereich laufend kontrollieren zu können. Die anfallenden Meßwerte der Distanzgeber zwischen Gebirge und Abschlußbauwerk sowie der Neigungsgeber an der Fallrohrtour wurden kontinuierlich ausgewertet. Sie zeigen gleiche abnehmende Raten.

Festigkeits- und Verformungsuntersuchungen an den während der Teufarbeiten in der Kaverne entnommenen Bohrkernen wurden von der BGR an 34 Probekörpern durchgeführt. Es wurde ein relativ einheitliches Verformungsverhalten des Gebirges festgestellt.

Die vorstehend beschriebenen Messungen stellen einerseits die Basiswerte für die gebirgsmechanische Standsicherheitsanalyse der Prototypkavernenanlage Asse dar, sie dienen andererseits aber auch der Verknüpfung mit anderen zu planenden Einlagerungssystemen, z.B. am zukünftigen Standort eines Endlagerbergwerkes für radioaktive Abfälle.

Die Untersuchungsergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die zeitliche Entwicklung der Durchmesserkonvergenzarten nimmt stetig ab.
- Die radiale Dilatation des Gebirges nimmt, wie die Extensometermessungen zeigen, sowohl mit wachsender Stoßtiefe als auch mit zunehmender Standzeit überproportional ab.
- Die durchgeführten Bohrlochdilatorometer- und Ultraschallmessungen ergaben ein relativ einheitliches Verformungsverhalten des Gebirges und lassen auf ein ungestörtes mechanisches Verhalten des Gebirges schließen.
- Erste Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von Salzgesteinen infolge Anisotropie (tektonische Substrukturen der 3. und 4. Ordnung) zeigen nach den bislang vorliegenden Ergebnissen nur geringe Änderungen der Festigkeit.

4.4 Programm zur Durchführung von "Kaltversuchen"

Nach Fertigstellung der Gesamtanlage ist die Erprobung dieser neuartigen Einbringtechnik zunächst mit inaktiven Produkten (Gebinden) vorgesehen. Diese Erprobung dient dem Ziel, die Funktionen aller Anlagenteile ausgiebig zu prüfen, Schwachstellen zu erkennen und zu beseitigen sowie das gesamte System zu optimieren. Ferner sollen sämtliche nur mögliche Störfälle innerhalb des Gesamtablaufes simuliert, geeignete Maßnahmen für deren Behebung ermittelt und deren Wirksamkeit in der Praxis untersucht werden.

Ein entsprechendes Untersuchungs- und Erprobungsprogramm, das auch alle denkbaren Störfälle beinhaltet, muß erarbeitet werden.

Zur Gewährleistung der kerntechnischen Sicherheit bei der im Rahmen der F+E-Arbeiten durchzuführenden Einlagerung mittelradioaktiver Abfälle in die Kaverne ist ein umfangreiches Meßprogramm für die Sicherheitsüberwachung der Kaverne durchzuführen. Es sind Meßeinrichtungen zur Erfassung von Betriebsdaten sowie zur Überprüfung modellmäßiger Berechnungen kerntechnischer Daten (Radiolysegasentwicklung, Temperaturverteilung im Einlagerungsgut u.a.) zu konzipieren und zu beschaffen.

Ein Konzept für die meßtechnische Ausrüstung der Kaverne wurde aufgestellt.

5. Untersuchungen zur Versuchseinlagerung hochaktiver Abfälle

Konditionierte hochradioaktive Abfälle haben eine Wärmeleistung in der Größenordnung von ca. 1000 Watt pro Glasblock. Die sich durch die Wärmefreisetzung ergebenden Spannungen im Gebirge müssen gemessen, notwendige Geräte für Transport, Einlagerung, Rückholung und Überwachung entwickelt sowie im Labor und im Bergwerk erprobt werden. Außerdem müssen wichtige Stoffeigenschaften des Salzes bestimmt werden.

5.1 Wärmeausbreitung und gebirgsmechanische Auswirkungen

In Fortsetzung der in früheren Jahren bereits durchgeführten Temperaturversuche wurde im Laufe des Jahres 1977 das Konzept für das verschiedenste Aspekte vereinigende Temperatur-Versuchsfeld 4 (TVF 4) erarbeitet. 1978 wurden die bergmännischen Arbeiten zur Erstellung des 70 m langen und 6 x 6 m weiten Grubenraumes auf der 750 m-Sohle des Salzbergwerkes Asse durchgeführt mit der für eine hexagonale Erhitzerkonfiguration notwendigen kreisförmigen Erweiterung.

Anschließend wurden in der Sohle des Versuchsfeldes im Trockenbohr-Verfahren drei Erhitzerbohrlöcher von 25 bzw. 15 m Tiefe und 300 mm Durchmesser erstellt sowie 20 Bohrlöcher zur Aufnahme von Extensometern und für Spannungsmessungen abgebohrt. Diese Erhitzerbohrlöcher haben unterschiedliche Aufgaben zu erfüllen: Während ein Bohrloch der Untersuchung des Konvergenzverhaltens des aufgeheizten Gebirges dienen wird, soll im zweiten Bohrloch das entstehende Bohrlochklima zusammen mit Fragen der Laugenfreisetzung untersucht werden. Im dritten Bohrloch im Zentrum des Hexagons wird eine hohe elektrische Heizleistung installiert, um die Folgewirkungen sowohl im Bohrloch selbst als auch im Hexagon und dem umliegenden Gebirge messen zu können.

Zwei weitere Erhitzerbohrlöcher wurden auf der 775 m-Sohle für einen Vorversuch an Erhitzern und Verrohrung niedergebracht. Die dafür notwendigen Installationen wie Erhitzer, Bohrlochverschluß und Kühlfalle wurden im Laufe des Sommers auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft. Danach wurde der Vorversuch durchgeführt. Der Aufheizung dienten zwei Erhitzer des schon mehrfach in der Asse verwendeten Typs (Doppelstahlrohr mit keramisch isolierter Heizmanschette), der sich bewährt hat und der auch in zukünftigen Versuchen dieser Art eingesetzt werden soll. Eine Druckdichtigkeit des Bohrloches konnte nicht erzielt werden, da der ca. 40 Jahre alte Stoß infolge des Gebirgsdruckes bereits zu weit aufgelockert und nicht mehr impermeabel war. Weitere Drucktests des Bohrlochverschlusses mußten nach übertage verlegt werden und waren noch nicht abgeschlossen.

Die Kühleinrichtung hat sich als funktionsfähig erwiesen. Sie wurde zur besseren Steuerung mit einer automatischen Temperatur- und Schaltregelung versehen und steht für den Simulationsversuch im Temperatur-Versuchsfeld 4 zur Verfügung.

Im Versuchsverlauf wurde die in das Bohrloch durch Thermomigration freigesetzte Laugenmenge gemessen. Die Messungen ergaben einen H_2O -Anteil von 0,12 Vol. % im Steinsalz. Dieser Wert steht in guter Übereinstimmung mit den im Labor ermittelten Ergebnissen.

Der Vorversuch diente gleichfalls der Bestimmung des Temperaturgradienten. Abbildung 7 zeigt den Isothermenplan am 176. Versuchstag. Die Temperatur auf der Oberfläche der Erhitzer betrug im Durchschnitt $360^{\circ}C$, der Temperaturanstieg im Gestein war nach ca. 45 Tagen abgeschlossen. Die höchste erreichte Temperatur an der Bohrlochwand betrug $156^{\circ}C$ nach ca. 160 Tagen, die durchschnittliche

Gesteinstemperatur in der unmittelbaren Umgebung (≤ 20 cm) des Bohrloches 120°C . Dem entspricht ein Temperaturgradient von 3°C/cm .

In Verbindung mit den durchzuführenden Konvergenzmessungen des aufgeheizten Bohrlochs wurde ein neuer Erhitzertyp konstruiert. Dieser besteht aus einem Rohrerhitzer mit integrierter coaxialer Heizleistung. Er wurde als Prototyp gebaut und im Labor erprobt. Die Konvergenzmessungen sollen mit Dehnungsmeßstreifen erfolgen. Für Tests und Eichung dieser Dehnungsmeßstreifen wurden einige Prüfstände gebaut und in Betrieb genommen. Außerdem wurde eine spezielle Druckmeßtechnik in Form von Druckmembranen entwickelt und erprobt.

Für großräumige Konvergenzmessungen außerhalb der Bohrlöcher wurde das Temperatur-Versuchsfeld 4 unmittelbar nach seiner Auffahrung in zwei Meßebenen mit Extensometern bestückt. Die Konvergenzen wurden bei Normaltemperaturen über einen Zeitraum von 234 Tagen erfaßt und ausgewertet. Bei der Auffahrung des 6×6 m großen Streckenquerschnittes wurde aus betriebstechnischen Gründen zunächst eine Firststrecke mit einer Breite von 5,4 m und einer Höhe von 3,5 m aufgefahren. Die hierbei beobachteten Konvergenzraten erfuhren bei der späteren Auffahrung der Sohlenstrecke zur Erreichung des geplanten Querschnitts eine kurzzeitige Beschleunigung. Bis zum Ende des Berichtszeitraumes haben sich jedoch die anfangs hohen Dehnungsgeschwindigkeiten wieder verlangsamt.

Die Abbildung 8 zeigt beispielhaft für einen Meßquerschnitt die Summen der gemessenen Längenänderungen zu drei verschiedenen Zeitpunkten als Absolutbetrag. Hiernach ist der Hohlraumeinfluß im Abstand des dreifachen Streckenradius noch deutlich meßbar vorhanden. Besonders auffällig an dem Kurvenverlauf ist das einheitlich in allen Richtungen auftre-

tende Dilatationsmaximum zwischen 1,5 und 3 m Gesteinstiefe. Die größten Dehnungen sollten eigentlich in unmittelbarer Stoßnähe zu erwarten sein. Eine Erklärung für das hier nach den Meßergebnissen andersartige Gesteinsverhalten konnte bisher noch nicht gefunden werden.

5.2 Rheologische Eigenschaften von Salzgesteinen

Die Untersuchungen zur Rheologie von Salzgesteinen erstreckten sich vorzugsweise auf die Prüfung von Steinsalz als dem nach Vorkommen und Menge wichtigsten Mineral. Sie wurden durch einige Versuche zur Druck- und Spaltzugfestigkeit an Trümmercarnallit (K 2 C) des Kaliflözes Staßfurt ergänzt. Innerhalb dieser Arbeiten sind im Rahmen eines Auftrages von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, einaxiale Kriechversuche und mehrachsige Festigkeitsuntersuchungen durchgeführt worden.

Das Versuchsprogramm dieses Unterauftrages wurde im April 1978 als Fortsetzungsprogramm zu einem bereits 1977 begonnenen Untersuchungsauftrag an die BGR gemeinsam mit dieser festgelegt. Seine Laufzeit erstreckt sich auch noch auf das Jahr 1979.

Für die verschiedenen Testreihen dieses Untersuchungsprogramms wurden 1978 insgesamt 388 Stück Prüfkörper im Salzbergwerk Asse im Trockenbohrverfahren erbohrt und anschließend präpariert.

An diesen Proben wurden folgende mechanische Prüfungen durchgeführt:

1. Ultraschalllaufzeitmessungen zur Ermittlung von Longitudinal- und Transversalgeschwindigkeiten elastischer

Wellen, dynamischer elastischer Konstanten und dynamischer Anisotropen für die verschiedenen Salzarten, u.a. auch als Test für die Unversehrtheit der verschiedenen Probekörper.

2. Ermittlung der einachsigen Druckfestigkeit σ_c im statischen Druckversuch.
3. Ermittlung der einachsigen Spaltzugfestigkeit σ_t im statischen Spaltzugversuch (Brasilianer Test).
4. Einachsige Zeitstandversuche unter konstanter Belastung und konstanten Versuchstemperaturen zwischen 27°C und 300°C .
5. Triaxiale Festigkeits- und Verformungsuntersuchungen an würfelförmigen Proben als quasi-statische Kompressions- und Extensionsversuche.

Ergebnisse der unter den Ziffern 1 - 3 durchgeführten Versuche sind in der Tabelle 1 zusammengefaßt dargestellt.

Die Schalllaufzeitmessungen zeigen bei axialer und radialer Durchschallung der stets orientiert in Richtung des Schichtstreichens erbohrten Prüfkörper nur geringe Unterschiede innerhalb jeder Salzart. Sie bestätigen die bereits im Jahre 1977 ermittelten Versuchsergebnisse, auch im Hinblick auf das praktisch isotrope Verhalten sämtlicher Salze bei dynamischer Beanspruchung.

Die Zeitstandversuche unter einachsiger konstanter Belastung zwischen 2,0 und 18,0 MPa und bei konstanten Versuchstemperaturen von 27, 100, 150, 200 und 300°C an Steinsalzen zeigen, daß sich bisher die stationäre Kriechgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}_s$ im Bereich der sekundären Kriechphase und damit der Kriech-

mechanismus in diesem Abschnitt in der Form einer Arrhenius-Funktion in erster Näherung nach dem Ansatz

$$\dot{\epsilon}_s = A \cdot e^{\frac{-Q_c}{R \cdot T}} \cdot \sigma^n$$

recht gut beschreiben lassen.

Die Abhängigkeit der sekundären Kriechgeschwindigkeit von der angelegten Konstantspannung für verschiedene Versuchstemperaturen auf der Grundlage von bisher 87 Kriechversuchen, die teilweise Versuchszeiten bis zu 265 Tagen erreichten, zeigt die Abb. 9 .

Die Versuchsserien sind noch nicht abgeschlossen und sollen auch im Jahre 1979 fortgeführt und ergänzt werden.

Die mehrachsigen Kompressionsversuche und Extensionsversuche an Würfeln von Jüngerem Steinsalz wurden programmgemäß bei Raumtemperatur durchgeführt.

In rund 50 kraftgeregelten Versuchen wurden, ausgehend von einer isotropen Ausgangsbelastung $P_1 = P_2 = P_3$ zwischen 200 und 900 kN, die Testreihen sowohl unter Variation der Belastungsgeschwindigkeiten als auch der Spannungspfade zur Ermittlung der Oktaederschubspannung τ_o bei jeweils konstanter Oktaedernormalspannung σ_o durchgeführt. Die Analyse dieser Versuche ist noch nicht abgeschlossen.

Erste Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Temperatur auf die mehrachsige Festigkeit von Steinsalzwürfeln zeigen, daß diese linear mit steigender Temperatur abnimmt.

5.3 Rechenprogramme zur Temperaturentwicklung und zur Standfestigkeit des Gebirges

Die im Vorjahr erstellten Rechenprogramme für den eindimensionalen Fall der klein- und großräumigen Temperaturentwicklung wurden 1978 durch erweiterte Versionen für den zwei- und dreidimensionalen Fall ergänzt.

Das zweidimensionale Programm ASYTE/KA wurde auf eine weitere Zone ausgedehnt und mit erweiterten Möglichkeiten zur Vorgabe von Randbedingungen und Quellverteilungen ausgestattet.

Das dreidimensionale Programm CUB 3 DG ist für großräumige Rechnungen sowie zur Simulation schräger Salzstockflanken ausgelegt.

Die Version GERA dient der Berechnung der zeitlich gestuften Befüllung von Bohrlöchern und Lagerräumen. CUBSIT berücksichtigt die Bewetterung von Einlagerungsstrecken bei kleinräumigen Rechnungen.

Eine Überprüfung der Rechenprogramme erfolgte am Beispiel der Temperatur-Versuchsfelder 2 und 3. Die Abb. 10 zeigt einen Vergleich der gemessenen und gerechneten Werte. Die Übereinstimmung ist mit $\pm 10\%$ als gut zu bezeichnen.

Im Rahmen von Parameterstudien geschah die Aufstellung von Interpolationsformeln für die maximale Salztemperatur und die notwendigen Bohrlochabstände.

Für gebirgsmechanische Rechnungen erfolgte die Entwicklung des analytischen eindimensionalen Programms TSTRESS für elastisch-plastisches temperaturabhängiges Stoffverhalten. Dieses Programm wurde auf klein- und großräumige Modelle angewandt.

Zur Berücksichtigung von Hohlräumen im Nahfeld-Bereich wurde das bisher verwendete nicht-rheologische Stoffgesetz erweitert und verbessert.

Das Finite-Element-Methode (FEM)-Programm SAFE-AXISYM wurde lauffähig gemacht und für die Anwendung eines elastisch-plastischen temperaturabhängigen Stoffgesetzes modifiziert. In gleicher Weise lauffähig gemacht wurden ein zweites ähnliches Programm (GNATS) sowie zwei weitere FEM-Programme für die Behandlung von zeitabhängigem Stoffverhalten (THVISC und VELVPL).

Das elastisch-plastische temperaturabhängige Stoffgesetz wurde für das Kurzzeitverhalten von Steinsalz formuliert.

Mit dem FEM-Programm SAP V (linear elastisch-plastisches temperaturabhängiges Stoffverhalten) wurden großräumige Spannungs-Verformungsberechnungen für eine einfache hypothetische Endlagerkonfiguration durchgeführt.

5.4 Laugenmigration, Laugenfreisetzung sowie Bohrloch-atmosphäre als Funktion der Wärmefreisetzung

Als Eingangswert ist der Wassergehalt verschiedener Steinsalzarten zu bestimmen. Die Bestimmung erfolgte nach drei verschiedenen Methoden, um die Aussagekraft der gewonnenen Werte zu erhöhen, nachdem die Infrarot- und Vakuumtrocknung fallengelassen wurden, da diese Methoden für größere Probenzahlen zu arbeitsaufwendig waren.

Mit dem inzwischen verbesserten Verfahren der Karl-Fischer-Titration werden nunmehr innerhalb der normalen Fehlergrenzen die gleichen Werte erreicht wie mit der Thermogravimetrie. Dies bedeutet, daß auch mit dieser Methode der gesamte und mit unterschiedlichem Bindungsgrad im Steinsalz vorhandene Wassergehalt nachgewiesen wird.

Die bis jetzt ermittelte Schwankungsbreite der Wassergehalte im Älteren und Jüngeren Steinsalz bewegt sich zwischen 0,02 und 0,6 Gew. % wobei die höheren Werte mit ziemlicher Sicherheit durch kristallwasserhaltige Mineralkomponenten verursacht werden, die in geringer bis sehr geringer Menge relativ häufig im Steinsalz anzutreffen sind.

Mit Hilfe der Thermogravimetrie konnte eine deutliche Gewichtsabnahme im Temperaturbereich zwischen 250 und 300°C festgestellt werden. Durch einfache Variation der Aufheizgeschwindigkeit zwischen 0,1 und 10°C/min war ein diskreter Einsatzzpunkt für die Freisetzung nicht zu ermitteln. Erst die Messung des Gewichtsverlustes bei verschiedenen konstanten Temperaturen zwischen 90 und 350°C in Abhängigkeit von der Zeit (Abb. 11) zeigte hier deutlichere Unterschiede. Insbesondere der Vergleich der Gewichtsverluste bei verschiedenen Temperaturen für den gleichen Zeitraum zeigt, daß die Freisetzung gestuft erfolgt. Eine völlige Gewichtskonstanz war allerdings auch nach 40 Stunden noch nicht eingetreten.

Schließlich wurde das aus einer größeren Probenmenge thermisch freigesetzte Wasser mit Stickstoff aufgenommen und anschließend wieder ausgefroren. Das so erhaltene Wasser war schloridhaltig und hatte einen pH-Wert zwischen 1,5 und 3,0.

Eine weitere Verbesserung der Aussagesicherheit wird die gerade in Betrieb genommene Feuchtigkeitsmessung nach DuPont bringen. Insgesamt aber weichen auch jetzt bereits die Ergebnisse der drei zur Wasserbestimmung benutzten Methoden nur noch um ca. 10 % voneinander ab.

5.5 Kern- und Ingenieurtechnik

Für die geplante Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfälle

und deren Rückholung wurden verschiedene Komponenten entwickelt. Es handelt sich um:

- Kokille aus Edelstahl mit Greifvorrichtung (Länge 1000 mm, Durchmesser 219 mm, Wandstärke 8 mm),
- Greifersystem mit Tragkabel und -winde,
- Schiebersystem zum Abschluß des Lagerbohrloches,
- Rückholsystem der Kokillen aus den Lagerbohrungen,
- Einlagerungs- und Rückholsystem "Abschirmglocke",
- Spezialgreifer für das Rückholen der Kokille nach einem Tragkabelriß.

Diese Komponenten und die Verrohrung der Lagerbohrlöcher wurden in Technikumsversuchen erprobt. Das System "Abschirmglocke" zeigt die Abb.12.

Alle Versuchskomponenten bewährten sich hinsichtlich Funktion und Handhabung bei ca. 600 Einlagerungs- bzw. Rückholoperationen. Darüber hinaus konnte in den Versuchen die Notrückholung aus dem Bohrloch nach dem Absturz der Kokille mit dem Greifer aus 25 m Fallhöhe erfolgreich demonstriert werden.

Für den Prototypbehälter zum Transport hochradioaktiver Abfälle wurde 1978 die Berechnung der Abschirmung fortgeführt. Dabei wurden folgende Daten zugrundegelegt:

- Brennelement-Abbrand 34.00 MWd/t,
- Beginn der Wiederaufarbeitung 150 Tage nach Entnahme der Brennelemente aus dem Reaktor,
- 1 % Pu- und 1 % U-Rückstand im HAW,
- 5 Jahre Kühlzeit des HAW nach Wiederaufarbeitung,
- Glaszusammensetzung:
Spaltproduktoxide 20 %, Gd_2O_3 10 %, Grundglas 70 %,
- Dimension des Glasblocks:
Länge 1000 mm, Durchmesser 203 mm.

Für die Behälter ist eine Abschirmkombination aus einer 22 cm dicken Bleischicht und einer 12 cm dicken Moderatorschicht aus boriiertem Polyäthylen vorgesehen.

Zur detaillierten Prüfung der Abschirmwirkung des Behälters auf Schwachstellen wurde ein Modell des Behälters im Maßstab 1 : 4 gefertigt und ein Durchstrahlungsversuch in einer Heißen Zelle aufgebaut, um die Streustrahlenwerte zu ermitteln.

Zur meßtechnischen Überwachung der in situ-Versuche wurden 1978 ein Datenerfassungs- und Prozeßsteuerungssystem beschafft und zusammen mit dem bereits vorhandenen Rechner umfangreiche soft- und hardware-Tests ausgeführt. Es wurden verschiedene Anwenderprogramme, z.B. zur Druckfestigkeit von Bohrlochverrohrungen (ROHR) oder zur Temperaturverteilung in beheizten Rohrstrecken (EMIS), erstellt und in den Rechenbetrieb überführt.

Tab. 1: Ergebnisse der Ultraschallversuche und statischen Druck- und Zugversuche an Asse-Salzen

Probenserie Salzart	Nr. I Älteres Steinsalz mittelkristallin	Nr. II Älteres Steinsalz grobkristallin	Nr. III Jüngeres Steinsalz mittelkristallin	Nr. IV Trümmer- carnallitit
Schallgeschwindigkeiten:				
a) <u> zur Probenachse:</u>				
Longitudinalgeschw. V_p [m/s]	4403 \pm 68	4465 \pm 67	4436 \pm 51	3834 \pm 231
Transversalgeschw. V_s [m/s]	2540 \pm 71	2532 \pm 44	2554 \pm 56	2184 \pm 142
b) <u>⊥ zur Probenachse:</u>				
Longitudinalgeschw. V_p [m/s]	4341 \pm 55	4357 \pm 72	4388 \pm 54	3878 \pm 140
Transversalgeschw. V_p [m/s]	2482 \pm 82	2512 \pm 54	2478 \pm 31	2081 \pm 124
Einachsige Druckfestig- keit σ_c [MPa] (h/d = 2,5 und $\dot{\sigma} \approx 0,6 \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$)	22,3 \pm 1,4	24,6 \pm 1,5	25,3 \pm 1,5	15,5 \pm 2,1
Spaltzugfestig- keit σ_t [MPa] (h/d = 1 und $\dot{\sigma} = 1,0 \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$)	1,55 \pm 0,11	1,66 \pm 0,15	1,41 \pm 0,23	1,18 \pm 0,40

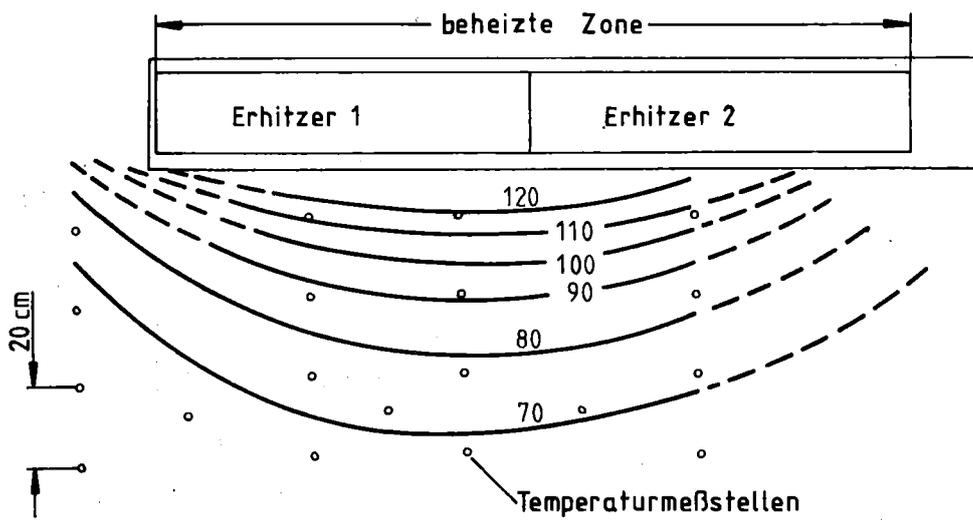


Abb. 7
Isothermenfeld am 176. Versuchstag beim Vorversuch
zum Temperatur-Versuchsfeld 4 auf der 775m - Sohle

Zeichenerklärung:

- 10 Tage vor Auffahrung der Sohlenstrecke
- 10 Tage nach Auffahrung der Sohlenstrecke
- · - · - 234 Tage nach Beginn der Streckenauffahrung
- 9m Extensometerfestpunkt

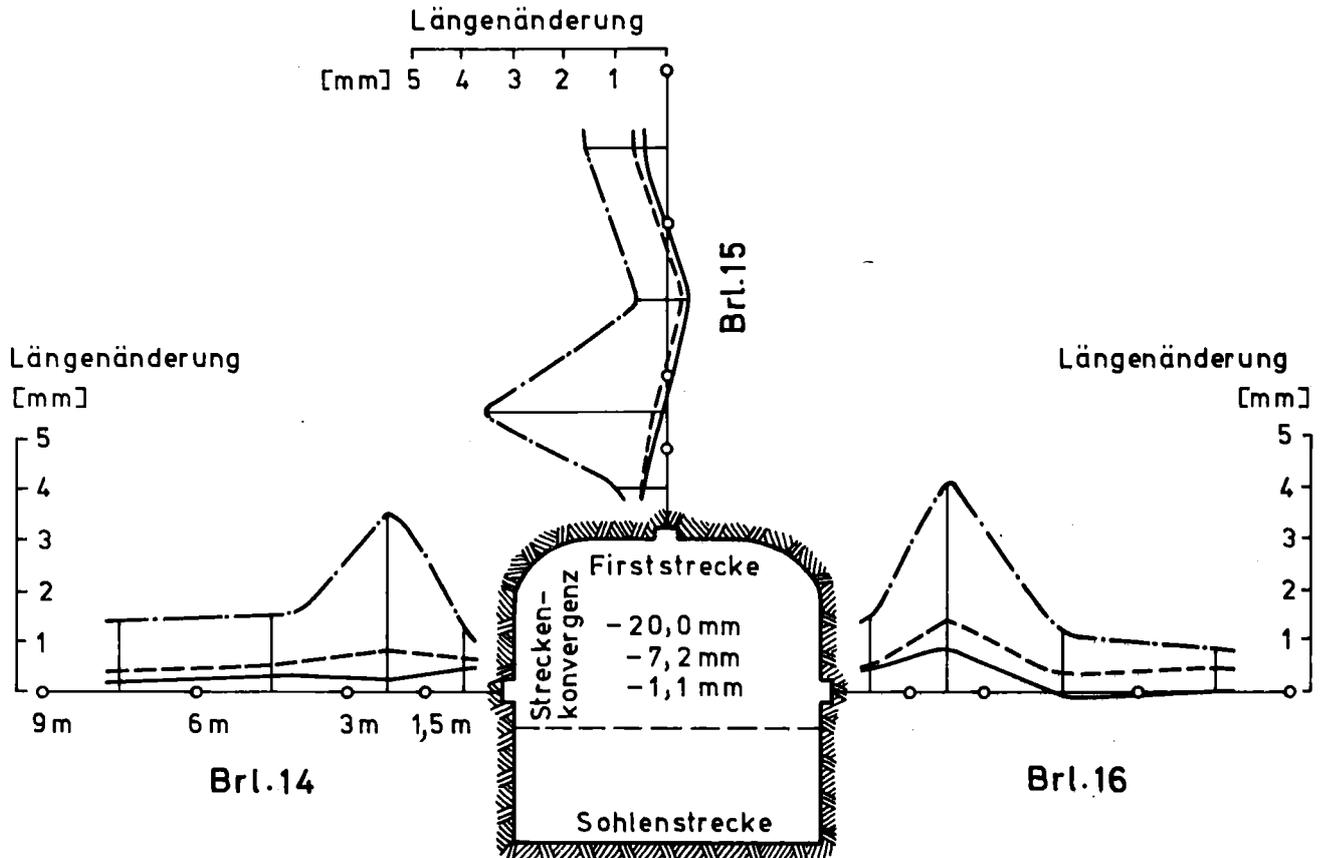


Abb. 8

Temperatur-Versuchsfeld 4, gemessene Längenänderungen in einer vertikalen Extensometerebene und horizontale Streckenkonvergenz

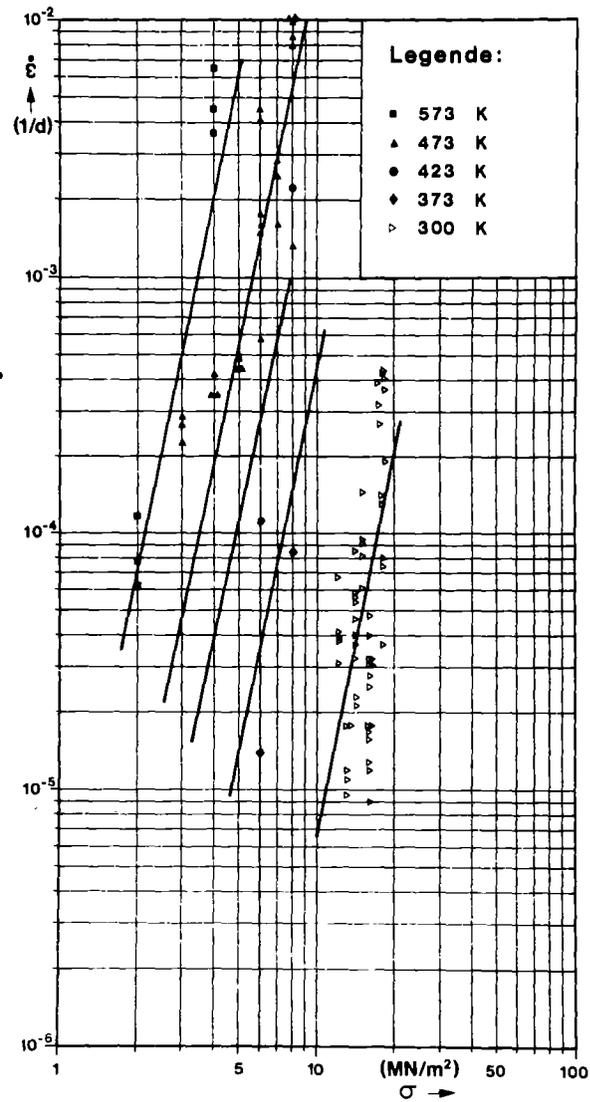


Abb. 9 : Abhängigkeit der sekundären Kriechgeschwindigkeit von der Temperatur und der Spannung

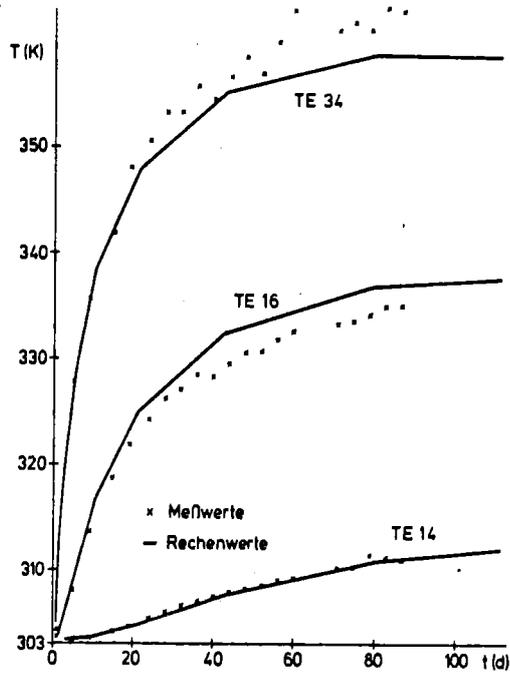


Abb. 10: Temperaturwerte im Versuchsfeld 3 (TE = Thermo-element)

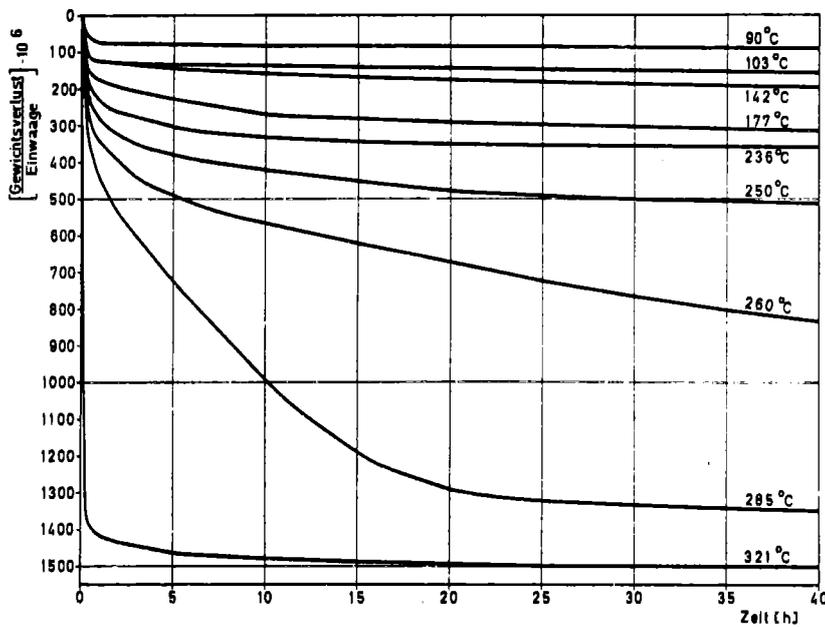


Abb. 11: Relativer Gewichtsverlust bei verschiedenen konstanten Temperaturen in Abhängigkeit von der Heizdauer

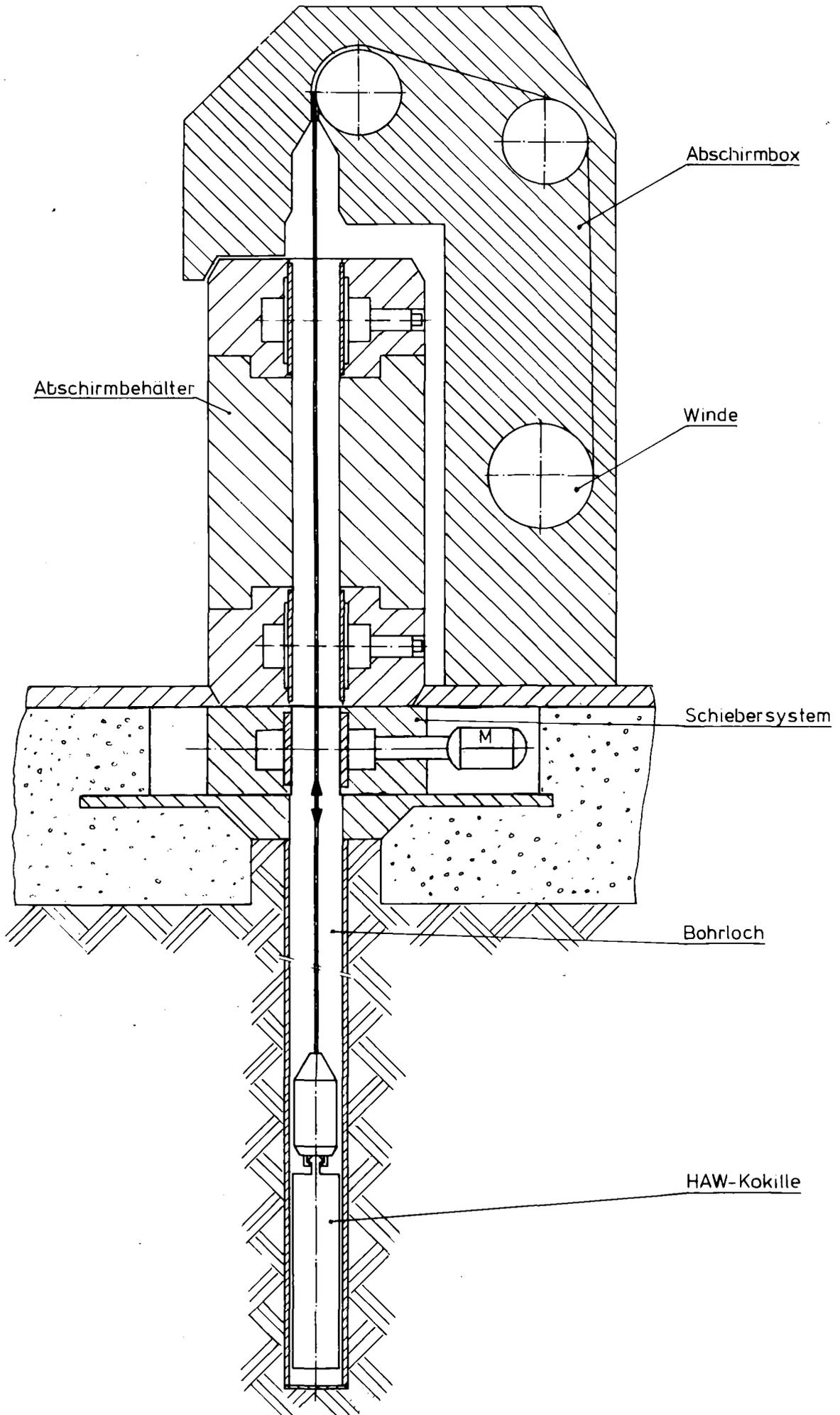


Abb 12: System "Abschirmglocke"

6. Lagerung und Verfestigung von schwach- und mittelaktiven Abfällen in untertägigen Hohlräumen

Die wichtigsten Fragestellungen bezüglich stofflicher Eigenschaften des Abfall-Binder-Gemisches, der gebirgsmechanischen Standsicherheit, der Wärme- und Radiolyse-Gas-Entwicklung sowie der Verfahrenstechnik (dosieren, mischen, fördern) sollten anhand von drei Referenzsystemen beantwortet werden.

6.1 Geowissenschaftliche Arbeiten

Im Rahmen der geowissenschaftlichen Untersuchungen wurde die mögliche geologische Position für die Referenzsysteme in erster Näherung dargestellt. Weiter erfolgte eine erste gebirgsmechanische Abschätzung zur Standsicherheitsanalyse. Möglichkeiten zur Versiegelung von Lagerräumen, Strecken und Schächten werden aufgezeigt. Das Auslaugverhalten von zur Einlagerung kommenden Produkten wird in einem Langzeitprogramm untersucht. Die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Gebirge werden in situ an Bohrungen untersucht.

6.1.1 Beschreibung und geologische Position der Referenzsysteme

Für die behälterlose Lagerung und Verfestigung von MAW/LAW wurden in der 1. Projektphase drei Varianten des Einlagerungssystems den zu erstellenden Studien zugrunde gelegt.

Die untertägigen kavernenförmigen Lagerräume sollen alternativ über eine direkte oder eine gebrochene Förderung beschickt werden. Das Einlagerungsgut soll naß oder trocken, rieselfähig eingebracht werden. Die Größe der Lagerräume ist für eine 15-jährige Betriebszeit oder für jeweils einjährige Betriebszeiten mit kampagnenweiser Beschickung auszulegen.

Als geologische Position aller drei Referenzsysteme wird folgende Grundsituation angenommen:

- Der Salzstock am Standort wird von annähernd 300 m mächtigen Sedimenten des Holozän, Pleistozän und Tertiärs überlagert.
- Darunter befindet sich in Sattelstruktur die Zechsteinfolge. Ohne auf standortgebundene salztektonische Fragen näher einzugehen, wird ab ca. 800 m Teufe das Vorkommen geeigneter Steinsalzpartien hinreichender Mächtigkeit erwartet. Darin sollen Lagerräume entsprechender Größe positioniert werden können.

Das Lagerfeld für eine Behälterlose Lagerung von MAW/LAW soll in das Teilprojekt 6 des Entsorgungszentrum integrierbar sein.

Die Referenzsysteme weisen folgende Charakteristiken auf, welche für die jeweiligen Teilgebiete - stoffliche Eigenschaften, Verfahrenstechnik und Geowissenschaften - analysiert werden.

Charak. Ref. System	Produkt	Ver- arbei- tung	Förderung	Volumen	Betriebs- zeit des Lager- raumes
I	fließfähige Abfall- Binder- Suspension	über- tage	direkt über Fallrohre	$2,5 \cdot 10^5 \text{ m}^3$	15 Jahre
II	rieselfähiges, abge- bundenes Abfall- Binder- Granulat	über- tage	gebrochen: Schacht- Strecke- Lagerraum	$2,6 \cdot 10^4 \text{ m}^3$	je 1 Jahr pro Lagerraum
III	fließfähige Abfall- Binder- Suspension	unter- tage	gebrochen (zusätzl. eine Boh- fung für Transport des Roh- abfalls)	$1,6 \cdot 10^4 \text{ m}^3$	je 1 Jahr pro Lagerraum

6.1.2 Abschätzung der über untertägigen Hohlräumen zu erwartenden großräumigen Bewegungen

Für Schächte, Strecken und kavernenförmige Lagerräume von 16.000 bzw. 26.000 m^3 Volumen kann von ausreichenden Standzeiten und hinreichender Standsicherheit ausgegangen werden.

Für großvolumige Lagerräume mit z.B. 250.000 m^3 Inhalt und atmosphärischen Betriebsbedingungen muß die gebirgsmechanische Stabilität noch im einzelnen untersucht werden.

Vom Institut für Markscheidewesen der TU Clausthal wurden im Rahmen eines erteilten Auftrages die über den Lagerräumen zu erwartenden Boden- und Gebirgsbewegungen abgeschätzt. Die Ergebnisse wurden nach mathematisch und körperlichen Modellen unter vereinfachten Annahmen ermittelt. Die Senkung über der

Vertikalachse der Großkaverne (250.000 m^3) wurde mit ca. 2 mm/Jahr ermittelt. Für ein Kavernenfeld, bestehend aus mehreren Einzelkavernen (16.000 m^3), wurde über der Einzelkaverne eine Senkung von 0,08 mm/Jahr ermittelt. Durch additive Überlagerung ergibt sich eine Senkung des Kavernenfeldes von 0,52 mm/Jahr. Die vertikale Senkung über einem Kavernenfeld ist also kleiner als über der Großkaverne. Der horizontale Einflußbereich beträgt jedoch das 1,5fache gegenüber der Großkaverne. Die rechnerischen Ansätze gestatteten es unter vereinfachten Randbedingungen, den Einfluß der Temperatur und der offenen Standzeit vergleichend zu betrachten. Erwartungsgemäß wächst die Senkung mit steigender Temperatur und längerer offener Standzeit.

6.1.3 Für Standsicherheitsanalysen zu berücksichtigende Grad der Genität und Tropicie bezüglich festigkeitsmechanischer Eigenschaften von Gestein und Gebirge

Rechnerische Abschätzungen zum Spannungs-Verformungs-Verhalten von untertägigen Hohlräumen setzen vielfach homogenes und isotropes z.T. auch elastisches Materialverhalten voraus.

Moderne rechnerische Verfahren, z.B. die Anwendung der Finite-Element-Methoden (FEM), gestatten es sowohl Inhomogenitäten und Anisotropien als auch inelastisches Materialverhalten in die rechnerischen Ansätze einzubeziehen. Aus diesem Grunde waren u.a. der in die Berechnungen eingehende Grad der Tropicie und Genität abzuschätzen. In Zusammenarbeit mit der Abteilung Ingenieurgeologie der TU Clausthal wurden geologisch-tektonische Substrukturen der dritten und vierten Ordnung auf ihre festigkeitsmechanischen Eigenschaften untersucht.

Die umfangreichen Untersuchungen ergaben, daß das im Arbeitsgebiet aufgeschlossene Staßfurt-Steinsalz festigkeitsmechanisch als quasi-homogen und quasi-isotrop angesehen werden kann. Eindeutig wurden aber Zugfestigkeitsanisotropien festgestellt. Diese sind in Bereichen, wo Zugspannungen erwartet werden können, einer gesonderten Betrachtung zu unterziehen.

6.1.4 Berechnungen zur dynamischen oder statischen Belastung von untertägigen Hohlräumen und rechnergestützte Auswertung der Extensometer-Messungen an der Prototypkaverne Asse

Neben den statischen bzw. quasi-statischen Belastungen des Gebirges während des Baues und Betriebes untertägiger Hohlräume können infolge von Seismizitäten dynamische Beanspruchungen der untertägigen Hohlräume bzw. der tragenden Gebirgselemente auftreten. Um diese Belastungen rechnerisch erfassen zu können, wurde die erforderliche Software aufbauend auf SAP 4 entwickelt. Es wurden Modellberechnungen für in homogenen Salzkörper angeordnete kugelförmige Hohlräume von 39 m Durchmesser als Testläufe durchgeführt. Die dynamische Anregung des Systems erfolgte mittels einer Beschleunigungsfunktion. Berechnet wurden der zeitliche Verlauf der dynamischen Belastung sowie die zu erwartenden Spannungsänderungen. Beschleunigung, Geschwindigkeit und Verschiebungen sind für jeden Netzknoten mit dem erarbeiteten Programm berechnbar. Ziel ist es, die dynamische Belastbarkeit des Gebirges z.B. durch Seismizitäten und mögliche schädliche Auswirkung auf die Standsicherheit von unterirdischen Hohlräumen zu untersuchen.

Für statische Untersuchungen untertägiger Hohlräume ist das Rechenprogramm SAP 4 implementiert worden. Erste Vergleichsrechnungen unter räumlicher Lastabtragung zu den bereits von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe,

Hannover, durchgeführten Berechnungen an der Prototypkaverne Asse wiesen eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse auf.

6.1.5 Untersuchungsergebnisse an den geotechnischen in situ-Untersuchungen an der Prototypkaverne Asse

Aus den an der Prototypkavernenanlage Asse durchgeführten geotechnischen in situ-Untersuchungen konnten folgende erste Ergebnisse ermittelt werden:

1. Die zeitliche Entwicklung der Kavernendurchmesserkonvergenz zeigt bisher stetig abnehmende Konvergenzraten. Im Niveau der Mittelebene lag die Durchmesserkonvergenz ein Jahr nach dem Ausbruch unter 6 o/oo.
2. Eine erste Analyse der Extensometermessungen zeigt, daß die Verschiebungsrate der zu betrachtenden Gebirgsabschnitte mit zunehmender Standzeit und wachsender Stoßtiefe überproportional abnimmt. Vergleicht man die Durchmesserkonvergenz mit der Verschiebung zwischen tiefstgelegenen Extensometerfixpunkt und Kavernenstoß, so ergibt sich, daß auch bei einer Stoßtiefe von ca. 40 m noch, wenn auch kleine Verschiebungen von Gebirgs-elementen in Richtung Hohlraumrand erfolgen.
3. Die Dilatometerversuche mit Zwischenentlastung zeigten bislang ein recht einheitliches Verformungsverhalten des Gebirges, woraus auf eine homogene Lastverteilung geschlossen werden kann.
4. Die Ultraschallsondierungen lassen einen schwach fallenden Verlauf der Laufzeitkurven erkennen. Abweichungen von der Bohrlochparallelität dürften die Hauptursachen sein.

Wiederholungsmessungen haben bislang keine signifikanten Abweichungen von vorausgegangenen Messungen ergeben. Insgesamt kann daraus auf ein ungestörtes mechanisches Verhalten des Gebirges geschlossen werden.

6.1.6 Versiegelung der Referenzsysteme

Für die drei Referenzsysteme werden Möglichkeiten einer sicheren Versiegelung aufgezeigt. Die Versiegelungsmaßnahmen beginnen bei allen Referenzsystemen bereits mit dem Durchteufen des Deckgebirges. Im Zusammenhang mit der Auswahl des geeigneten Teufverfahrens müssen auch die erforderlichen Dichtverfahren frühzeitig festgelegt werden. Umfangreiche Zementationsarbeiten zur Stabilisierung und Abdichtung sind gegebenenfalls mit einzuplanen.

Für den einzubringenden endgültigen Ausbau wurden die Grundzüge einiger ausgewählter Ausbautypen näher erläutert.

Im Anschluß an die Betriebsphase müssen alle im Schacht installierten Versorgungsleitungen entfernt werden, um eine einwandfreie Versiegelung vornehmen zu können.

Nach der Demontage soll im Zuge der Stilllegung beim Referenzsystem I die Verfüllung des Kavernenhalses und des Schachtes mit inaktiver Zementsuspension vorgenommen werden. Bei den Referenzsystemen II und III muß nach der geeigneten Versiegelung des Kavernenhalses zusätzlich eine Verfüllung der Strecken erfolgen. Hierzu wurden Dämme in unterschiedlicher Bauform vorgeschlagen. Beim Referenzsystem III ist zusätzlich eine Versiegelung der Bohrung vorzusehen, in welcher während des Betriebes die waste-Leitung von über Tage in die Grube geführt wurde.

6.2 Berechnungen zur Wärmeentwicklung aus den Abfallprodukten

Im Rahmen der Sicherheitsbetrachtungen zum Projekt "Lagerung und Verfestigung von LAW/MAW in untertägigen Hohlräumen" wurde untersucht, ob die beim Abbinden des Fixierungsmittels Zement und die durch den radioaktiven Zerfall der Abfälle freigesetzte Wärme zu einer Gefährdung der Sicherheit des Endlagers führen könnte.

Für die Behandlung des Wärmeproblems wurden die maximal auftretenden Temperaturen in den drei von der Projektleitung des PWA vorgegebenen Referenzsystemen (RS1, RS2, RS3) für drei verschiedene Abfallproduktzusammensetzungen (hier als 1.1, 1,2 und 1.3 bezeichnet) berechnet.

Eine kurze Beschreibung der Referenzsysteme und der Art der einzulagernden Abfallprodukte findet sich im Abschnitt "Rechenmodelle und Modellannahmen". Die Zusammensetzung, Menge und Aktivität der Endprodukte sind in Tabelle 2 angegeben. Aus diesen Daten wurden die mittlere spezifische Aktivität und spezifische Wärmeleistung der Abfallprodukte zum Zeitpunkt der Einlagerung (3 a nach Reaktorentnahme) errechnet.

Bei den Berechnungen zur Wärmeentwicklung aus den Produkten wurden als Fixierungsmittel für die Abfälle Zemente mit unterschiedlichen Hydratationswärmern betrachtet. Es wurden die folgenden Fixierungsmittel zugrundegelegt:

- Portlandzement PZ-350 mit einer integralen Hydratationswärme von 100 Kcal/kg Zement ohne Zuschlagstoffe,
- Hochofenzement mit einer integralen Hydratationswärme von 65 Kcal/kg Zement und einem Gehalt an Zuschlagstoffen von 60 Gew.-%.

Experimentelle Werte für die maximal zulässige Temperaturbelastbarkeit von zementiertem LAW/MAW existieren nicht. Für diese Untersuchungen wurden als maximal zulässige Temperatur für die Produkte 90°C angenommen. Bei dieser Temperatur ist keine merkliche Änderung der physikalisch/chemischen Eigenschaften der Produkte zu erwarten.

6.2.1 Rechenmodelle und Modellannahmen

Für die Temperaturberechnungen wurden eine Reihe von Rechenmodellen und Annahmen zugrunde gelegt:

- Kavernenvolumen: 250.000 m^3 für Referenzsystem 1 (RS1), 26.000 m^3 für RS2 und 16.700 m^3 für RS3,
- Dimensionierung der Kavernen: $D/H = 0,6$. Daraus ergeben sich für RS1 $D = 57,6 \text{ m}$, $H = 96 \text{ m}$, für RS2 $D = 27 \text{ m}$, $H = 45 \text{ m}$, für RS3 $D = 23,4 \text{ m}$, $H = 39 \text{ m}$,
- Art der eingelagerten Abfallprodukte: Für RS1 und RS3 Abfall/Zement-Suspension, für RS2 Abfall/Zement-Granulat.
- Einlagerungsart der Abfälle: Schichtenweise in zeitlich und mengenmäßig gleichen Schritten,
- Anzahl der Schichten: zwischen 15 und 90 für RS1 und zwischen 2 und 90 für RS2 und RS3,
- Zusammensetzung der Abfallprodukte:
 - a) 65 Gew.-% PZ 350, 25 Gew.-% H_2O und 10 Gew.-% Salze. Bei einer Produktdichte $\rho = 2 \text{ kg/l}$ ergeben sich $1300 \text{ kg Zement/m}^3$ Produkt.
 - b) 26 Gew.-% Hochofenzement, 39 Gew.-% Zuschlagstoffe, 25 Gew.-% H_2O und 10 Gew.-% Salze. Bei einer Produktdichte $\rho = 2 \text{ kg/l}$ ergeben sich $520 \text{ kg Zement/m}^3$ Produkt.
- Totale Absorption der aus den Abfällen ausgesandten α - und β - und γ -Strahlung im Fixiermittel Zement.

Die zugrunde gelegten Stoffwerte für die Abfallprodukte waren: Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 1 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, spezifische Wärme $c_p = 0,23 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$ und Dichte $\rho = 2 \text{ kg/l}$.

6.2.2 Ergebnisse

Die Maximaltemperatur in den Kavernen setzt sich aus den einzelnen Beiträgen der Hydratationswärme, der Zerfallswärme der Spaltprodukte und des Plutoniums sowie der Salztemperatur (40°C) zusammen.

Es gilt:

$$T_{\max} = \Delta T \text{ (Hydrat.)} + \Delta T \text{ (Spaltpr.)} + \Delta T \text{ (Pu)} + T_{\text{salz.}}$$

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, daß das Temperaturmaximum in den Kavernen hauptsächlich durch den Beitrag der Hydratationswärme bestimmt wird. Die Beiträge der Spaltprodukte und des Plutoniums zur Temperatur liegen im Vergleich zum Beitrag der Hydratationswärme sehr niedrig.

Als Beispiel für die Ergebnisse sind in Abb. die auftretenden Produkttemperaturen (Produktzusammensetzung 1.1) in den Kavernen bei Verwendung von Hochofenzement mit 60 Gew.-% Zuschlagstoffen in Abhängigkeit von der Lagerzeit aufgetragen.

Es treten für alle Produktzusammensetzungen in den Referenzsystemen 2 und 3 Temperaturen auf, die unterhalb der für diese Untersuchungen angenommenen Maximaltemperatur für die Produkte von 90°C liegen. Somit sind in diesem Falle im RS2 und RS3 keine Wärmeprobleme zu erwarten. Ebenfalls keine Wärmeprobleme treten im RS1 beim Lagern von Abfällen der Zusammensetzung 1.3 auf. Beim Lagern von Abfällen der Zusammensetzung 1.1 und 1.2 im RS1 liegen die Temperaturen im Abfallgut etwas oberhalb 90°C. Auch in diesen Fällen lassen sich Wärmeprobleme vermeiden, indem man eine Substitution des hier betrachteten Hochofenzements von etwa 70 Gew.-% (ca. 10 Gew.-% höher als bei 1.3) durch "wärmeinerte" Zuschlagstoffe vornimmt.

Aus den Ergebnissen der Berechnungen lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen:

- Bei Verwendung von Zementen als Fixiermittel mit einer niedrigen Hydratationswärme (z.B. Hochofenzement) und Substitution eines großen Teils der Zemente (ca. 60 bis 70 Gew.-%) durch "wärmeinerte" Zuschlagstoffe ist die Lagerung und Verfestigung von MAW/LAW in großräumigen Kavernen ohne Wärmeprobleme möglich.
- Die Lagerung von Zement-Abfall-Granulat (Referenzsystem 2) ist im Hinblick auf die Temperaturentwicklung am günstigsten.

Tabelle 2: Menge und Aktivität der betrachteten zementierten radioaktiven Abfälle (≈ 10 Gew.-% Salz im Endprodukt, W/Z = 0,4)

Zusammensetzung	Abfall-Produkt	Endprodukt	mittlere β - und γ -Aktivität
		m ³ /a	Ci/m ³
1.1	LAW wäßrig	2.716	$7,94 \cdot 10^{-2}$
	MAW wäßrig	5.307	261,6
	Aschen	140	0,95
	Tritium-haltige Abwässer	5.425	128,6
	Kugelharze	750	25
	Pulverharze + Verd.-Konzentr.	817	80,1
	Σ 1.1	Σ 15.155	143,22
1.2	LAW wäßrig	2.716	$7,94 \cdot 10^{-2}$
	MAW wäßrig	5.307	261,6
	Aschen	140	0,95
	Kugelharze	750	25
	Pulverharze + Verd.-Konzentr.	817	80,1
		Σ 1.2	Σ 9.730
1.3	LAW wäßrig Abgereicherter MAW _{DF=10} aus MAW-splitting	2.716	$7,94 \cdot 10^{-2}$
		4.600	0,46
	Σ 1.3	Σ 7.316	0,32

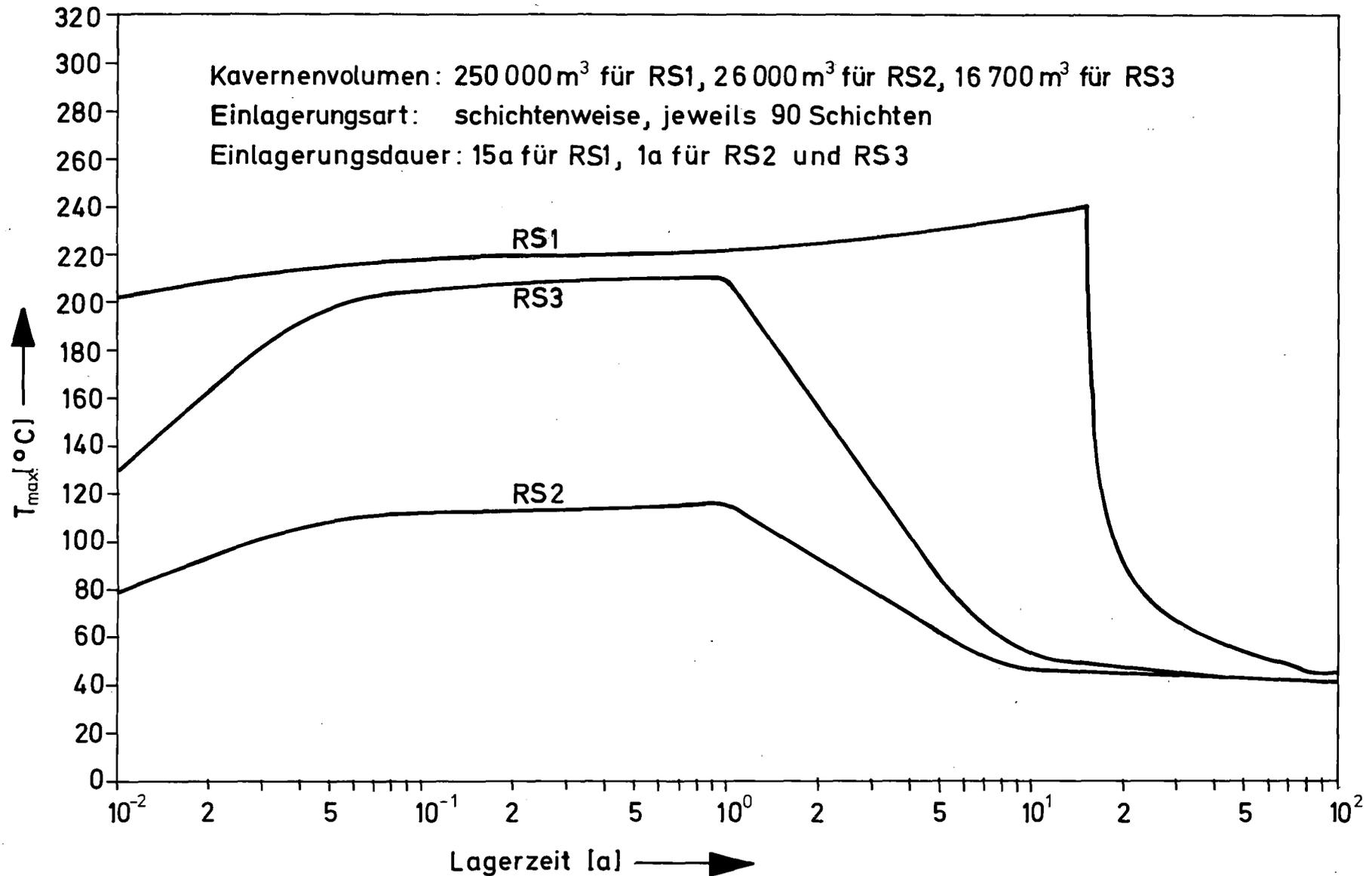


Abb. 13: Zeitlicher Verlauf der Maximaltemperatur in den Referenzsystemen RS 1, RS 2, RS 3 beim Lagern von Portlandzement 350/Abfall-Gemischen der Zusammensetzung 1:1

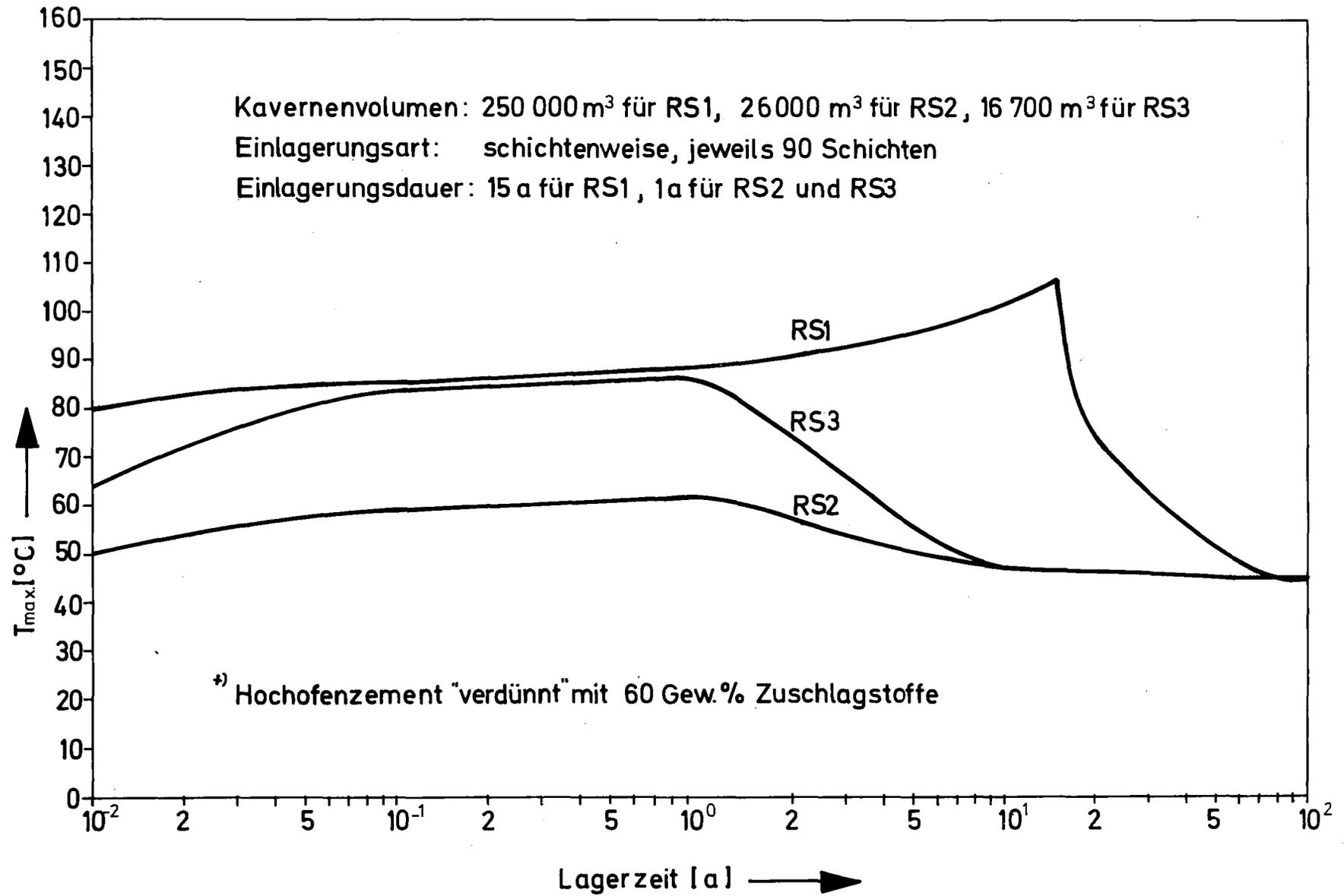


Abb. 14: Zeitlicher Verlauf der Maximaltemperatur in den Referenzsystemen RS 1, RS 2, RS 3 beim Lagern von Hochofenzement/Abfall-Gemischen

7. Beurteilung der Eignung der Schachtanlage Konrad für die Einlagerung radioaktiver Abfälle

Die Arbeiten im Berichtsjahr wurden mit der Zielsetzung durchgeführt, die geologischen Sachverhalte - besonders diejenigen, die die langfristige Sicherheit des Endlagers und den Abschluß der Abfälle vom Biozyklus bestimmen - genau zu erfassen. Bei den bergtechnischen und kerntechnischen Untersuchungen ging es in erster Linie um eine Bewertung der untertägigen Einrichtungen und übertägigen Anlagen des stillgelegten Eisenerzbergwerkes im Hinblick auf seine Möglichkeiten für die Einlagerung radioaktiver Abfälle, insbesondere von schwachradioaktiven Abfällen sowie von aktivierten und kontaminierten Großkomponenten aus Kernkraftwerken. Spezielle Untersuchungen dienen der Bewertung von vorstellbaren Störfällen und deren Konsequenzen.

Bei der Durchführung der Arbeiten wurden die Stahlwerke Peine-Salzgitter AG, als Verwalter und Betreiber der Grube, Hochschul- und Forschungsinstitute sowie verschiedene Industriefirmen eingeschaltet.

7.1 Geologische Untersuchungen

Die wasserführenden Horizonte im Deckgebirge der Grube Konrad sind Gegenstand einer Reihe stratigraphischer und petrographischer Untersuchungen. Hauptziel ist es, die Ausdehnung, Mächtigkeit und den Gesteinshabitus der verschiedenen Aquifere zu bestimmen und so das Potential der oberflächennahen und tiefen Grundwässer im Gebiet der Schachtanlage abzuschätzen.

In den Apt-, Barrême- und Hauterive-Sedimenten in einer Teufe von 521 - 800 m ist der Smektitanteil auf 10 % reduziert und tritt als montmorillonithaltiger Mixed-Layer auf. Die Glimmerminerale steigen auf 50 % und der Kaolinit/Chlorit auf 40 %. Der Bereich der Unterkreidetransgression zeichnet sich durch einen Anstieg der Mixed-Layergehalte in den Tonsteinen aus. Im Oberjura steigen die Kaolinitgehalte auf 50 % bei gleichzeitiger Abnahme der Glimmeranteile an. Im Korallenoolith kommen in den tonigen Gesteinen bis zu 6 % Smektite vor.

Der Nachweis von stark montmorillonithaltigen Tonsteinen im Deckgebirge der Grube Konrad erklärt teilweise die Barrierenwirkung, die diese Gesteinsformationen gegenüber Wasserzuflüssen aus den oberen Grundwasserstockwerken haben. Das Dreischichtmineral Montmorillonit besitzt ein hohes Quellvolumen und damit auch die Fähigkeit, bei Wasserangebot auftretende Klüfte im Gestein zu schließen. Dies ist für die geologische Sicherheit eines möglichen Endlagers Konrad ein entscheidender Faktor.

7.2 Hydrogeologische Untersuchungen

Zur Erstellung einer Wasser- und Feuchtigkeitsbilanz für die Grube wurden die geringen Wasserzuflüsse im Streckennetz den über die Pumpleistungen in den Haupt- und Schachtsümpfen registrierten Wassermengen gegenübergestellt. Dabei zeigte sich, daß der weitaus größte Teil der Wässer direkt im Schacht 2, dem ausziehenden Wetterschacht, anfällt. Um diese Wässer hinsichtlich ihrer Herkunft genauer zu untersuchen, werden seit April 1978 die Grubenwetter in beiden Schächten sowohl in der Schachthalle über Tage als auch in den Füllorten der verschiedenen Sohlen unter Tage gemessen. Einmal wöchentlich werden an vier Beobachtungspunkten die Wettermengen in m^3/min , die Wettertemperatur in $^{\circ}\text{C}$ und die relative Luftfeuchte in % bestimmt.

Über die Berechnung des Wasseranteils der Wetter in g/m^3 und der Wettermenge ergibt sich damit ein Wert für die mit den Wettern durch die Grube transportierten Wassermengen.

Ein Vergleich der Feuchtigkeitsgehalte der ein- und ausziehenden Wetter zeigt, daß die Menge der im Schacht 2 abregnenden Wasser auffällig der Feuchtigkeitserhöhung der Wetter im Schacht 1 entspricht, die sich beim Einziehen von über Tage bis zur 1000 m-Sohle um 10 bis 15°C erwärmen. Die Temperatur der ausziehenden Wetter beträgt über Tage ziemlich konstant 21°C , nachdem sie sich im Schacht 2 um etwa 10° abgekühlt haben. Durch die Temperaturerniedrigung kommt es in der Schachtatmosphäre zu einer Absenkung des Sättigungsdrucks und somit zum Abregnen der Wetter. Diese Wasser werden dann aus dem Schachtsumpf abgepumpt. Aufgrund der erhöhten Temperatur des ausziehenden Wetterstromes wird ein Teil der natürlichen Grubenfeuchte nach über Tage gefördert und dort ausgeschieden.

Zur Kalkulation des quartären Wasserpotentials wurde anhand einer großen Anzahl von Pegelbohrungen eine Mächtigkeitkarte der wasserführenden Kiese und Sande angelegt. Die Darstellung des lateralen und horizontalen Fazieswechsels zeigt, daß der quartäre Grundwasserstrom in einer Rinne von ca. 1 km Breite östlich von Schacht 1 verläuft. Der Schacht 2 liegt dagegen mitten in dieser Rinne, die hier mit etwa 35 m mächtigen Sedimenten, von denen 15 m Sande und Kiese sind, aufgefüllt ist.

Das Hauptwasserreservoir dieses Raumes bilden die quartären Verbreitungsgebiete im Bereich der Hütte Salzgitter und südöstlich davon. Ein gewisser Grundwasserzufluß wird auch in einer direkt nach Süden anschließenden Rinne bestehen, wohingegen der Zufluß aus Norden wegen des starken faziellen Wechsels innerhalb des Quartärs vernachlässigbar ist. Die Abflußrichtung des Grundwassers wird durch eine südlich vom Schacht Konrad 2 nach Westen verlaufende Rinne markiert.

Für die Erstellung von Isobathen- und Isopatchenplänen der Oberkreidekalke, welche ebenfalls wasserführend sind, des Hilssandsteins sowie der Tonsteinformationen der Unterkreide und des Oberjura (Wasserstauer) wurden die Bohrprofile der Tiefbohrungen ausgewertet und Mächtigkeiten und Teufenlagen der jeweiligen Formationen bestimmt.

Die mögliche Existenz tektonisch angelegter Wasserwege im Deckgebirge erforderte eine Aufarbeitung der tektonischen Meßdaten. Dazu wurde das montangeologische Rechenprogramm GELI auf eine Großrechenanlage implementiert. Die Darstellung der wasserführenden Flächen in Lagenkugeldiagrammen lassen eine detaillierte Aussage nicht zu, da die gürtelförmige Anordnung der Polpunkte nur einen geringen Unterschied in der Verteilungsdichte zeigt. Es deutet sich jedoch an, daß der überwiegende Teil der Klüfte, an denen Wasseraustritte registriert wurden, NW/NNE - SE/SSW streichen und synthetisch, durchweg steiler als die Schichtflächen, einfallen. Damit ist das primäre tektonische Beanspruchungssystem, das sich in einer späteren Phase bis in die oberen Kreideschichten durchgepaust hat, bestimmender für die Wasserwegsamkeit des Gebirges als die großen E-W verlaufenden Störungen.

Zur Klärung ihrer abdichtenden Wirkung gegenüber Wasserzutritten aus oberflächennahen Aquiferen wurden die mächtigen Tonsteinformationen des Deckgebirges anhand von 50 ausgewählten Gesteinsproben eingehender untersucht. Mit Hilfe der Röntgendiffraktometermethode wurden Quarz, Calcit, Pyrit, geringe Anteile von Feldspäten, Montmorillonit (Smektit), Kaolinit/Chlorit, Glimmer-Minerale und sogenannte Mixed-Layer-Tonminerale bestimmt.

Durch die Auswertung der Einzelbestimmungen konnte eine teufenabhängige Verteilung der verschiedenen Tonkomponenten festgestellt werden. So bestehen die Alb-Sedimente zu 80 bis 90 % aus Smektit (nicht näher bestimmte Minerale der Montmorillonit-Gruppe).

Zur weiteren Untersuchung dieses Problemkreises wurde ein Versuchsprogramm erarbeitet, das die Feststellung der tatsächlichen, von betrieblichen Vorgängen weitgehend unbeeinflussten Gebirgsfeuchte, die in die Wetter abgegeben wird, zum Ziel hat. Der über eine längere Beobachtungsdauer laufende Versuch wird in einer besonderen Wetter-Test-Strecke durchgeführt, wobei die Feuchtigkeitserhöhung in einem kontrollierten Sonderwetterstrom mit bekannten Feuchtigkeits-, Temperatur- und Mengenwerten bestimmt wird. Mit der Auffahrung der ca. 100 m langen Untersuchungsstrecke im Untertagebau der Grube wurde begonnen.

Als Teil dieser Wasserbilanz wurden auch die von über Tage in den Wasserkreislauf der Grube eingespeisten Wässer registriert, um nach Abzug dieser Menge von dem Gesamtfeuchtigkeitszutritt in die Grube einen möglichst genauen Wert für die auf natürlichem Wege in das Grubengebäude gelangenden Wässer zu ermitteln. Aufgrund der bisherigen Beobachtungen sind die aus dem Gebirge ausgeschiedenen Feuchtigkeitsmengen als verschwindend gering einzustufen. Ein großer Teil der in der Vergangenheit gemessenen Grubenwässer entstammt mit großer Sicherheit den von über Tage zugeführten Brauchwässern.

Wie bereits in den vergangenen Jahren, so wurden die in den Schächten und im Revier zufließenden Wässer auch 1978 in ihren chemischen und physikalischen Werten überwacht. Im Januar und Juli wurden die Wässer auf ihre Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^- , SO_4^{--} , CO_3^{--} und CO_2 -Gehalte analysiert.

Ein Vergleich mit den vorherigen Werten ergab keine besonderen Veränderungen im Chemismus der Wässer, so daß die Aussage über den Charakter dieser fossilen Standwässer, die nicht am hydrologischen Kreislauf der Biosphäre teilnehmen, erhärtet werden konnte. Auf derselben Ebene liegt die Interpretation der Temperatur- und Dichtemessungen, die zur Kontrolle im Vierteljahresturnus durchgeführt werden.

Die hohen Salzgehalte aller in der Grube zutretenden Wässer beweisen, daß eine Zumischung von Wässern der oberen Grundwasserstockwerke nicht stattfindet. Gewisse Schwankungen im Salzgehalt einzelner Wasserzuflüsse können durch die mit dem Spülversatz eingebrachten Wasser und das eingeleitete Brauchwasser verursacht werden.

Zur Vorbereitung eines zusätzlichen Nachweises über das Bestehen oder Nichtbestehen hydraulischer Verbindungen zwischen dem Grubengebäude und den höheren Grundwasserstockwerken wurden am Grubenwasser zusätzliche Spurenelementbestimmungen auf Sr^{++} , Ba^{++} , Fe^{++} , Mn^{++} , Cu^{++} , Zn^{++} , Br^- und J^- durchgeführt.

7.3 Meteorologische Untersuchungen

Im Mai 1978 konnte die Einrichtung einer meteorologischen Beobachtungsstation auf dem Gelände der Schachanlage Konrad abgeschlossen werden. Das laufende Meßprogramm erfaßt die folgenden meteorologischen Parameter.

- Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Globalstrahlung in 2 m Höhe über Gelände,
- Windrichtung und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe,
- Niederschlag und Luftdruck.

Es wurde sichergestellt, daß die ausgewählten Meßwertgeber - außer dem Strahlungsmesser - in Methode und Genauigkeit den Anforderungen des Deutschen Wetterdienstes genügen. Die Standortauswahl wurde durch einen Vertreter des Wetteramtes Hannover vorgenommen. Somit ist ein Vergleich der Meßwerte mit denen der benachbarten Stationen des Deutschen Wetterdienstes möglich.

Vor der Inbetriebnahme der meteorologischen Station wurden zur Darstellung der Niederschlagsverhältnisse im Gebiet der Schachtanlage die vom Deutschen Wetterdienst veröffentlichten Niederschlagswerte der benachbarten Ortschaften ausgewertet und in einer gemittelten Niederschlagskurve dargestellt. Diese Form der regionalen Niederschlagserfassung wird zum Vergleich mit den eigenen Messungen fortgesetzt.

Die meteorologischen Messungen dienen u.a. als Grundlage für eine Ausbreitungsberechnung der aus der Grube ausziehenden Wetter. Die Meßdaten werden in Form von Tages- und monatlichen Wetterberichten zusammengefaßt. Windrichtungsverteilungsdiagramme und Niederschlagskurven für den zurückliegenden Meßzeitraum wurden erstellt.

7.4 Gebirgsmechanische Untersuchungen

In Ergänzung der geotektonischen Untersuchungen wurde ein Programm zur in situ-Messung der mechanischen Gebirgsbewegungen, wie sie in der Grube durch das Auffahren von Kammern und Strecken in Gang gesetzt werden, aufgestellt. Unter Tage wurde in einer frisch aufgefahrenen Untersuchungsstrecke ein gebirgsmechanisches Meßprofil eingerichtet.

Die Interpretation der bisherigen Ergebnisse der Extensometermessungen zeigt, daß die Gebirgsbewegungen in Firste und Sohle bereits nach kurzer Zeit den 20 m-Bereich erfassen. Eine solche mit der Streckenauffahrung zeitgleich einsetzende gleichmäßige Entspannungsbewegung spricht für ein elastisches Gebirgsverhalten, was in bergtechnischer wie auch in geologischer Hinsicht ein positives Kriterium bedeutet. Durch den kontinuierlich ablaufenden Druckausgleich

werden sich Spannungen im unmittelbaren Streckenmantel nicht aufbauen, wodurch das Auftreten plötzlicher Entspannungsbe-
wegungen, wie z.B. Firstenbrüche, mit den Folgen größerer
Gebirgsauflockerungen als wenig wahrscheinlich erscheint.

Eine gleiche Aussage für das Gesamtgebiet der Grube Konrad
leitet sich aus den Senkungsgeschwindigkeiten und Senkungs-
beträgen des Deckgebirges ab, die jährlich durch übertägige
Feinnivellements-aufnahmen kontrolliert werden. Die Messung
vom Mai 1978 ergab, daß sich

- der Senkungstrog nach allen Seiten hin vergrößert,
- das Senkungsmaximum unverändert geblieben ist,
- sich der Senkungstrog in mehrere Teilsenkungströge aufzu-
gliedern beginnt.

Wie in dem zurückliegenden Zeitraum so hat sich auch in
1978 der Senkungstrog weiter gleichmäßig über dem gesamten
Grubengebiet ausgebreitet. Zu kritischen Schief lagen ist es
an übertägigen Einrichtungen nicht gekommen.

In einem besonderen Forschungsvorhaben wurden Berechnungen
durchgeführt, die unter der Annahme bestimmter Hohlraum-
auf-fahrungen und bei Berücksichtigung der bisher ermittelten
gebirgsmechanischen Kennwerte das Maß der zukünftigen über-
tägigen Senkungen erkennen lassen. In Anwendung auf zwei
verschiedene Kammermodelle mit unterschiedlichen Hohlraum-
volumina und Formen konnte festgestellt werden, daß Boden-
bewegungen in einem Gebiet von ca. 2 km um die äußere Be-
grenzung der Deponiefelder möglich sind. Wegen der großen
Tiefe der Hohlräume sind die Ungleichmäßigkeiten der Senkung
und damit auch die Schief lage und die Krümmung sehr gering.
Schäden größeren Ausmaßes an aufstehenden Gebäuden sind daher
auch bei Anlage der größer dimensionierten Einlagerungskam-
mern nicht zu erwarten.

Zur Vorbereitung von in situ-Spannungstensorbestimmungen im Gebirge durch hydraulic-fracturing Versuche und durch Dilatometersonden wurden geeignete Untersuchungspunkte im Grubengebäude ausgewählt und die entsprechenden Programme erstellt. Durch eine Serie einaxialer Zug- und Druckmessungen wurden die Festigkeitskennwerte des Korallenoolitherzes bestimmt und unter Einbeziehung der mineralogisch-petrographischen Parameter der Verschleißkoeffizient für schneidende Werkzeuge berechnet.

7.5 Geophysikalische Untersuchungen

Zur Messung möglicher rezenter Bewegungsvorgänge im Gebirge und im Grubengebäude durch seismische Verfahren mit Ereignis- und Dauerregistrierung wurde auf der Schachtanlage KONRAD eine entsprechende seismische Station eingerichtet.

Dabei geht es in erster Linie um die Beobachtung der bekannten und bergmännisch aufgeschlossenen großen tektonischen Störungen wie z.B. den Bleckenstedter Sprung und die Grabenstörung, die beide nicht bis zu Tage austreichen und sich aufgrund geologischer Profilkonstruktionen nur unterhalb 650 m Tiefe nachweisen lassen.

Zur Beobachtung der dynamischen Vorgänge wurden zwei unabhängige seismische Meßsysteme installiert. Zur Registrierung aller auf das Grubengebäude einwirkenden Ereignisse befinden sich die Aufnehmer einer Dreikomponenten-Station auf der 5. Sohle (1200 m) des Grubengebäudes.

Seit Inbetriebnahme (20.6.1978) wurden verschiedene Beben registriert. Das stärkste Ereignis war das Erdbeben vom 3.9.1978 mit seinem Epizentrum südlich von Tübingen.

Während und nach diesem Beben wurden keine Sekundäreffekte im Grubengebäude beobachtet. Es wurden lediglich die dem Hauptstoß folgenden Nachbeben registriert.

Die zweite Anlage dient zur Erfassung lokaler Ereignisse und besteht aus einem im Grubengebäude aufgebauten Aufnehmer-Netz. Sie unterscheidet sich hauptsächlich im Frequenzbereich von der vorher genannten Apparatur, der hier von 2 Hz bis 250 Hz reicht. Mit Hilfe dieses Netzes können mechanische lokale Vorgänge im Nahbereich des Grubengebäudes sowohl über- als auch untertage erfaßt und geortet werden.

Zusätzlich steht mit dem 8 Kanal-Geophon-Netz ein Instrument zur Verfügung, mit dem Messungen und Kontrollen der dynamischen elastischen Konstanten des Gebirges durchgeführt werden können. Diese Parameter dienen den gebirgsmechanischen Untersuchungen zur Standsicherheit aufgefahrener Hohlräume.

In Erweiterung der Untersuchungen zum dynamischen Verhalten des Gebirges werden zusätzlich mit hochempfindlichen Neigungsmessern periodische und aperiodische Vorgänge erfaßt, deren Periodenbereich von 60 s an aufwärts reicht. Die Standortwahl für die 30 m tiefen Bohrlöcher, in die die Pendel nach erfolgter Verrohrung eingehängt werden, ist abgeschlossen. Der Auftrag für den Bau der Pendelinstrumente ist erfolgt.

7.6 Bergtechnische Untersuchungen

Nach Abschluß einer ersten Untersuchung der Schachtfördereinrichtungen steht fest, daß bei der Einlagerung radioaktiver Abfälle sperrige Komponenten und Fässer mit bis zu 20 t Gewicht und unter Einhaltung der maximalen Abmessung von 2 x 2 x 4 m im Schacht transportiert werden können. Das Konzept für den maschinellen Teil einer benötigten neuen Fördermaschine wurde entwickelt. Weitere Änderungen sind geplant für das Förder-

gerüst mit einer einzurichtenden Zweiseilförderung, die Rasenhängebank und den Schacht mit dem Füllort auf der geplanten Einlagerungssohle (1100 m-Sohle), der für einen Großraumkorb mit Gegengewicht eingerichtet werden muß.

Eine Untersuchung der Krananlage für die Beschickung des Großkorbes resultiert in dem Ergebnis, daß durch entsprechende Änderungen und Verstärkungen der bestehenden Anlage eine Last von 20 t am Haken des Auslegers bewegt werden kann. Für das Entladen des Förderkorbes auf der 1100 m-Sohle sieht die Projektstudie eine Kraneinrichtung vor, die im Hinblick auf die Ausbauten am Füllort besonders konzipiert ist.

Für den Transport der Abfallgebände, insbesondere der sperrigen Komponenten, wurde ein Entwicklungsauftrag vergeben. In der Studie werden geeignete Kran- und Stapelfahrzeuge für die Be- und Entladung am Schacht und Transportfahrzeuge für den Untertagebereich beschrieben. Konzepte für notwendige technische Änderungen an den angebotenen Maschinen werden aufgezeigt. Dabei wird berücksichtigt, daß Komponenten mit den angegebenen Gewichten und Maßen durch die Strecken und Wendeln des Grubenreviers befördert werden sollen.

Unter Berücksichtigung der geologischen und gebirgsmechanischen Verhältnisse sowie der Erfahrungen aus der Zeit des Erzabbaues wurden 4 Kammermodelle entwickelt und unter den Aspekten der betrieblichen und langfristigen Sicherheit beurteilt. Mit der Auswahl der bergtechnischen Auffahrverfahren und einer Betrachtung der verschiedenen Möglichkeiten der Einlagerung und der Versatzeinbringung wurden Grundlagen für Einlagerungskonzepte entwickelt, die in in situ-Versuchen erprobt werden sollen.

Die Wasserhaltung der Grube wurde mit einem Mengenstrombild analysiert. Ein wirtschaftliches Konzept für das Zutagefördern der im Normalfall zufließenden Wassermengen bei

gleichzeitiger Bereithaltung von Pumpreserven zur Bewältigung eines wesentlich erhöhten Wasserzulaufes wurde entwickelt und befindet sich in der Projektierung.

7.7 Kerntechnische Untersuchungen

Im Rahmen der Eignungsanalyse wurde die radiologische Belastung des Lagermediums genauer untersucht. Es wurde festgestellt, daß Abfälle der schwachradioaktiven Kategorie für das Gestein wie auch für die gebirgsmechanischen Verhältnisse in den Einlagerungskammern unproblematisch sind. Das gleiche gilt für Abfälle in verlorenen Betonabschirmungen mit einer Oberflächendosisleistung von 0.2 R/h. Wärme- und radiolysegaserzeugende Abfälle stellen dagegen besondere Anforderungen an die Gebirgsmechanik in der Grube, die Einlagerungstechniken und die betrieblichen Konzepte. Unterschiedliche Gebirgsentspannungen im Nahbereich um die Einlagerungshohlräume bedingen dann andere Dimensionierungen des Lagerfeldes und der Lagerkammern. Aufgrund des klaren Auftrages, die Eignung und die Möglichkeiten der Schachanlage Konrad für die Endlagerung schwachradioaktiver Abfälle und Großkomponenten zu untersuchen, können die Arbeiten hier als abgeschlossen betrachtet werden.

Im Hinblick auf die kerntechnische Sicherheit in einem möglichen Endlager Konrad wurde ein Katalog der denkbaren Störfälle erstellt. Diese müssen vier verschiedenen Zeitintervallen zugeordnet werden.

Als ein in der Einlagerungs-, Betriebs- und Nachbetriebsphase kritisches Ereignis wurde das unkontrollierte Fluten der Grube durch einen größeren Wassereinbruch und die damit verbundene Freisetzung und Ausbreitung von Radionukliden genauer betrachtet. Entscheidend für eine Gefährdung der Biosphäre kann ein schneller Transport der Radionuklide

durch die Konvektionsströmungen aus noch offenen Lagerkammern in die mit Wasser gefüllten Schächte sein. Wie die Berechnungen ergeben haben, ist bei einem derartigen Störfall ein Massentransport vom unteren zum oberen Ende des Schachtes möglich. Dieser Mechanismus läuft jedoch langsam, d.h. in einem Zeitraum bis zu ca. 38 Jahren ab. Auch ohne geeignete Verfüllungs- und Versiegelungsmaßnahmen in den Kammern, wodurch eine Ausbreitung der Radionuklide über erheblich längere Zeiträume verzögert wird, ist eine Verfüllung der Schachtröhren nach sicherheitstechnischen Gesichtspunkten möglich.

Zur Bestimmung des Gefährdungspotentials, wie es durch die Ausbreitung von Radionukliden auf dem Luftpfad im Revier und nach Übertage gegeben ist, wurden bei verschiedenen Arbeitsvorgängen Staubmessungen in der Grube durchgeführt. Dabei wurden die auftretenden Staubkonzentrationen und deren Ausbreitungen beobachtet. Die umfangreichen Meßserien sollen nach weiteren Auswertungen einen Aufschluß darüber geben, inwiefern die Staubentwicklung mit den sicherheitstechnischen Anforderungen an einen Überwachungsbereich, wie er für einen Einlagerungsort einzurichten wäre, zu vereinbaren ist.

Der Katalog der für die Einlagerung infrage kommenden radioaktiven Abfälle wurde ergänzt. Dabei wurden verschiedene Abfallarten in ihrem Aktivitätsgrad und mit ihrem jährlichen Aufkommen beschrieben.

8. Beseitigung tritiumhaltiger Abwässer durch Einpressen in poröse Schichten des tiefen Untergrundes

Die Verpressung tritiumhaltiger Abwässer in poröse Schichten des tiefen Untergrundes basiert unter anderem auch auf den Erfahrungen z.B. der Erdölindustrie, wo seit langer Zeit wässrige salzhaltige Lösungen in poröse Schichten verpreßt werden.

Seit Dezember 1977 liegt der aufgrund der eingegangenen Einsprüche neu zu überarbeitende Antrag auf wasserrechtliche Genehmigung einschließlich der Stellungnahme zu den Einzelsprüchen dem Landesbergamt Freiburg vor.

Der zunächst für Mai 1978 vorgesehene Anhörungstermin mußte erneut verschoben werden, da die Ergebnisse der Prüfung dieses Antrages durch das Baden-Württembergische Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt noch nicht vorlagen. Eine mündliche Zustimmung wurde dem Landesbergamt dann im Dezember 1978 übermittelt.

Es ist zu hoffen, daß die wasserrechtliche Genehmigung im Jahre 1979 erteilt werden kann.

8.1 Technische Situation

Bei einer Überprüfung des Zustandes der Bohrung Lh 2 wurde festgestellt, daß Flüssigkeitsverluste im Ringraum auftreten. Bei einem vollkommen gefüllten Ringraum betrug die ermittelte Verlustrate 0,87 l/Tag mit abnehmender Tendenz (es wurde über eine Zeitdauer von 40 Tagen gemessen). Bis zur letzten Versuchswoche war die Verlustmenge auf ca. 0,5 l/Tag abgefallen.

Da eine vollkommene Abdichtung der Bohrung gegenüber dem umgebenden Gebirge Voraussetzung ist für einen sicheren Betrieb der Anlage, ist eine Reparatur der Bohrlochinstallation durch Einbau eines weiteren Futterrohrstranges, evtl. mit Zementhinterfüllung, und das Auswechseln der inneren Rohrtour vorgesehen.

Eine Vorplanung über die Neuinstallation der Bohrung einschließlich des übertägigen Sondenkopfes wurde durchgeführt, die Werkstoffauswahl unter Berücksichtigung der Einpreßmedien getroffen.

Zur Überarbeitung der gesamten übertägigen Station wurde ein Industrieunternehmen mit der Erstellung eines Vorprojektes beauftragt.

8.2 Hydrologische Situation

Zur Beurteilung der Verhältnisse in den Grundwasserhorizonten sind Kenntnisse von Grundwasserfließrichtung, der Grundwasser-Schwankungen, Grundwasser-Geschwindigkeit sowie der Dispersivität des Aquifers in der Umgebung der Bohrung Lh 2 notwendig.

Die Trendanalyse der Grundwasserstand-Entwicklung zeigt generell eine Senkung des unbeeinflussten Grundwasserspiegels: im Süden des KfK ist der Grundwasserpegel zwischen 1958 und 1977 um ca. 2 m gesunken. Im Norden des KfK ist während des gleichen Zeitraumes das Grundwasser um ca. 1 m zurückgegangen. Für die unmittelbare Umgebung der Bohrung Lh 2 sind nur zwei Meßbrunnen relevant. Die Grundwasser-Schwankungen waren hier zwischen 1957 und 1971 maximal 1,6 m; nach 1971 sind die Schwankungen dann auf 0,4 m zurückgegangen. Anhand der ausgewerteten Meßdaten wurden Grundwasser-Karten des jetzigen (1977) minimalen und maxi-

malen Wasserstandes erstellt, die gleichen Karten wurden auch für die unbeeinflussten Grundwasser-Verhältnisse (1957) erarbeitet, die vor der Inbetriebnahme des KfK-Wasserwerkes Süd vorlagen.

Der räumliche Vergleich der Grundwasser-Situation zeigt: Die Bohrung Lh 2 befindet sich am Rande des Einflußbereiches des KfK-Wasserwerkes Süd. Je nach Wasserstand kann die Grundwasserbewegung hier entweder zum KfK-Wasserwerk hin (Richtung Osten) oder in Richtung des generellen Abflusses zum Rhein hin (Westen) angenommen werden.

Zur Präzisierung der hydrologischen Verhältnisse zwischen Wasserwerk Süd und der Lh 2 ist es erforderlich, einen Grundwasser-Farbmarkierungsversuch durchzuführen. Dafür werden zu den jetzt vorhandenen Beobachtungsbrunnen weitere Meßbrunnen abgeteuft.

Zur Auswertung der geologischen Verhältnisse im potentiellen Wassereinzugsbereich wurde ein Nord-Süd-Schnitt über die Quartär-Schichten konstruiert. Es lassen sich hier vier Horizonte unterscheiden:

Oberes Kieslager	0,0 - 18,4 m
Oberer Zwischenhorizont	18,4 - 26,8 m
Mittleres Kieslager	26,8 - 36,8 m
Altquartär	36,8 - 59,6 m.

Das KfK-Wasserwerk Süd fördert hauptsächlich aus dem oberen Kieslager und teils auch aus dem mittleren Kieslager, wohingegen das Wasserwerk Leopoldshafen lediglich das obere Kieslager nutzt. Lokal treten auch innerhalb der einzelnen Horizonte starke Unregelmäßigkeiten durch Sand-, Ton- und Schlufflinsen auf. Dadurch können lokal die Grundwasser-Fließgeschwindigkeit und -Richtung auf kürzester Strecke variieren.

Die gewonnenen geologischen Informationen dienen sowohl unmittelbar der Konsequenzanalyse einer potentiellen Grundwasserkontamination als auch der Vervollständigung des Grundwasser-Überwachungsplans.

9. Quantitativer Anforderungskatalog für Abfallprodukte

9.1 Berechnungen zur Wärmeentwicklung und Radiolysegasbildung bei der Endlagerung von MAW-Abfällen der oberen Kategorie

Im Rahmen der Sicherheitsbetrachtungen für das nukleare Entsorgungszentrum wurde untersucht, unter welchen Bedingungen die Lagerung von zementierten Hülsen/Strukturteilen, Feed-Klärschlämmen und Core-Bauteilen im Salinar ohne Wärme- und Radiolyseprobleme möglich ist.

Als Endlagerkonzept für die Abfallprodukte wurde die Lagerung in vertikalen Bohrlöchern gewählt. Die maximale Temperaturbelastung für die Produkte wurde mit 100°C angenommen. Als Verpackung für die Produkte wurden nach dem derzeitigen Endlagerkonzept 400 l-Fässer gewählt.

Für die Behandlung des Wärmeproblems wurden die auftretenden Temperaturen in den Bohrlöchern in Abhängigkeit von dem Abstand zwischen den Lagerbohrungen berechnet. Bezüglich des Radiolyseproblems wurde die H₂-Freisetzung aus den Produkten (H₂O-Radiolyse des im Zementstein enthaltenen Wassers) und die auftretende H₂-Konzentration in den Bohrlöchern berechnet.

Für die Berechnungen wurden folgende Rechenmodelle und Modellannahmen zugrundegelegt:

- Bohrlochdurchmesser: 0,76 m; Bohrlochtiefe: 57 m
- Zahl der eingelagerten Fässer pro Bohrloch: 50
- Füllungsgrad der Bohrlöcher: ca. 78 Vol.-%
- Einlagerungsdauer: 3 Tage
- Anordnung der Bohrlöcher: periodische Struktur in hexagonaler Anordnung

- Zahl der jährlich benötigten Bohrlöcher: 56 für die Hülsen/Strukturteile und Feedklärschlämme, 50 für die Core-Bauteile.

Im Falle der Hülsen/Strukturteile und Feedklärschlämme wurde eine getrennte Fixierung und eine gemeinsame Lagerung im Verhältnis 3 : 1 (entsprechend dem jährlich zu erwartenden Mengenverhältnis der zwei Abfallarten) angenommen. Infolgedessen ergibt sich für den Inhalt eines Bohrloches: 38 Fässer mit Hülsen/Strukturteilen und 12 Fässer mit Feedklärschlamm. Die mittlere Wärmeleistung beträgt $0,48 \text{ W/l}_{\text{Prod.}}$. Für die Core-Bauteile ($0,43 \text{ W/l}_{\text{Prod.}}$) wurde eine Lagerung in einem gesonderten Lagerfeld angenommen. Für alle Abfälle wurde ein Alter von 3 a zugrundegelegt. Zu diesem Zeitpunkt wird die Wärmeleistung bei den Hülsen und Core-Bauteilen hauptsächlich durch das Co-60, bei den Feedklärschlämmen durch das Ru/Rh-106 bestimmt.

Darüber hinaus wurden folgende konservative Annahmen gemacht:

- Die Lagerbohrungen sind völlig abgeschlossene Systeme, d.h. es finden keinerlei Luftaustauschvorgänge zwischen den Lagerbohrungen und der belüfteten Strecke statt.
- Die aus den Abfällen ausgesandte γ -Strahlung wird vollständig im Produkt (Temperaturberechnungen) bzw. im Zementstein (Radiolyseberechnungen) absorbiert.
- Die entstehenden H_2 -Mengen werden in sehr kurzer Zeit vollständig aus den Abfallprodukten und ihren Verpackungen in die Bohrlochatmosfera freigesetzt.

Die Ergebnisse der Temperaturberechnungen sind in Tab. 3 und 4 angegeben. Man erkennt daraus, daß die Temperaturbelastung der Produkte stark von dem Abstand zwischen den Bohrlöchern abhängt. Zur Einhaltung der hier angenommenen maximalen Temperaturbelastung der Produkte von 100°C ist im Falle der Hülsen/Strukturteile-Feedklärschlämme ein Ab-

stand von ca. 11 m, bei den Core-Bauteilen von ca. 15 m erforderlich. Vergrößert man den Abstand zwischen den Bohrlöchern auf z.B. 13 m (Hülsen/Strukturteile-Feedklärschlämme) bzw. 17 m (Core-Bauteile), so liegt die Temperaturbelastung der Produkte weit unterhalb 100°C . Daraus folgt, daß bei einer richtigen Dimensionierung des Lagerfeldes die Bohrlochlage- rung der hier betrachteten Abfälle ohne Wärmeprobleme möglich ist.

Die zur Berechnung der H_2 -Konzentration in den Bohrlöchern erforderliche H_2 -Ausbeute aus den Produkten wurde in Ermangelung von experimentellen Daten aus der Radiolyse des im Zementstein (für Hülsen/Strukturteile und Core-Bauteile) bzw. Feedklärschlamm enthaltenen Wassers errechnet.

Die berechneten Werte für die H_2 -Konzentration in den Bohr- löchern zeigen, daß unter den hier gemachten konservativen Annahmen (z.B. keine Belüftung der Bohrlöcher, totale Ab- sorption der γ -Strahlung im Zementstein) noch während der Einlagerungsphase (3 Tage) ein zündfähiges H_2 /Luft-Gemisch auftreten würde. Die zum Zeitpunkt der Beendigung des Ein- lagerungsvorganges berechnete H_2 -Konzentration in den Bohr- löchern (maximale H_2 -Konzentration) beträgt im Falle der Hülsen/Feed-Klärschlämme ca. 4,7 Vol.% und bei den Core- Bauteilen ca. 4,4 Vol. %.

Berücksichtigt man jedoch die Tatsache, daß es in der Praxis während der Einlagerungsphase zu starken Luftaustauschvor- gängen zwischen den Bohrlöchern und der belüfteten Strecke kommt, wird die tatsächliche H_2 -Konzentration in den Bohr- löchern in dieser Phase weit unterhalb der unteren Zündgren- ze eines H_2 /Luft-Gemisches (4 Vol.% in Luft) liegen.

Zwei weitere Effekte, die dazu führen, daß die tatsächliche H_2 -Konzentration in den Bohrlöchern um etwa 40 - 50 % klei- ner ist als die betrachtete, sind die Abgabe eines Teiles

der γ -Strahlung an das umgebende Salz sowie die Absorption eines großen Teiles der γ -Strahlung in den Abfällen selbst.

Aus diesen Gründen ist die Bildung von zündfähigen H_2 /Luft-Gemischen in den Bohrlöchern während der interessierenden Einlagerungsphase unwahrscheinlich.

Nach Beendigung des Einlagerungsvorgangs und anschließendem Versiegeln der Bohrlöcher entstehen in den Lagerbohrungen zündfähige H_2 /Luft-Gemische, falls der H_2 nicht durch das Versiegelungsmaterial hindurchdiffundieren kann. Die Bildung von zündfähigen Gasgemischen in dieser Phase stellt jedoch keine Gefahr für das Endlager dar, da dann keine Zündquellen mehr vorhanden sind.

Abschließend kann gesagt werden, daß bei einer richtigen Dimensionierung des Lagerfeldes sowie Gewährleistung eines Luftaustausches während der Einlagerungsphase zwischen den Bohrlöchern und der belüfteten Strecke, die Bohrlochlage- rung von Hülsen/Strukturteilen, Feed-Klärschlämmen und Core-Bauteilen ohne Radiolyse- und Wärmeprobleme möglich ist.

Die bisherigen theoretischen Berechnungen sollen durch Experimente überprüft werden, um die verschiedenen Annahmen bei der Berechnung durch praxisnahe Werte zu bestätigen.

Tab. 3: Berechnete Maximaltemperatur (Zentraltemperatur) für die zementierten Hülsen/Strukturteile - Feedklärschlämme ($0,48 \text{ W/l}_{\text{Prod.}}$) beim Lagern in Lagerbohrungen (hexagonales Lagerfeld)

Art der Befüllung der Bohrlöcher	Abstand zwischen den Bohrlöchern (m)	T_{max} (°C)
Hülsen / Feedklärschlämme 3 : 1	6	245
	7	192
	8	160
	10	118
	11	103
	12	92
	Einzelbohrloch	60

Tab. 4: Berechnete Maximaltemperatur (Zentraltemperatur) für zementierte Core-Bauteile ($0,43 \text{ W/l}_{\text{Prod.}}$) beim Lagern in Lagerbohrungen (hexagonales Lagerfeld)

Abstand zwischen den Bohrlöchern (m)	T_{max} (°C)
8	250
9	207
10	185
12	140
15	103
17	90
Einzelbohrloch	73

9.2 Beurteilung der Toxizität durch die in den radioaktiven Abfällen enthaltenen oder entstehenden chemischen Gifte

Ziel der Arbeiten war zu klären, inwieweit durch den Zerfall der in den radioaktiven Abfällen enthaltenen Radionuklide chemische Gifte entstehen, die ein fortwährendes und nicht mehr abklingendes Gefährdungspotential besitzen.

9.2.1 Zerfall der Aktiniden

Das Endprodukt beim Zerfall der natürlichen radioaktiven Aktiniden-Isotope ist das Schwermetall Blei. Die von den Mutter-Nukliden U-238, U-235 bzw. Th-232 ausgehenden Zerfallsketten enden bei den stabilen Blei-Isotopen 206, 207 bzw. 208. Lediglich die Neptunium-Zerfallsreihe, zu welcher die Isotope Pu-241 und Am-241 gehören, endet beim stabilen Wismuth-209.

Blei ist ein giftiges Schwermetall, das in der Erdkruste im Durchschnitt mit 12,5 ppm (entsprechend 12,5 g/t) enthalten ist.

Unter Zugrundelegung der Einlagerungsbedingungen für die Asse und einer Gegenüberstellung maximal zulässiger Konzentrationen von Pu-239 und Pb in Wasser folgt, daß mit dem Abklingen der Aktivität der Alphastrahler eindeutig die Gesamttoxizität abnimmt.

9.2.2 Zerfall der Spaltprodukte

Der überwiegende Teil der Spaltprodukte besteht bei der Einlagerung aus stabilen Isotopen, die keinen weiteren Zerfall mehr durchlaufen.

Zum Zeitpunkt der Einlagerung der Abfälle, d.h. nach einer Abklingzeit der Spaltprodukte von 1 bis 3 Jahren, hat ein in einem Leichtwasserreaktor entstandenes Spaltproduktgemisch, d.h. sowohl die aktiven als auch die bereits inaktiven Spaltprodukte eine spezifische Aktivität von 63 bzw. 21 Ci/g.

Von den radioaktiven Isotopen im Abfall wird von den Cäsium-Isotopen Cs-134, Cs-135 und Cs-137 mengenmäßig der größte Einzelbeitrag geliefert. Er beträgt zum Zeitpunkt der Einlagerung (1 bis 3 Jahre Abklingzeit) ca. 5 % der insgesamt im Reaktor entstandenen Spaltprodukte. Der Gehalt an radioaktiven Cäsium-Isotopen in den mittelaktiven Abfallprodukten liegt somit bei 0,08 mg/l bis 0,24 mg/l.

Die Cäsium-Isotope Cs-134, Cs-135 und Cs-137 zerfallen zu stabilem, d.h. nicht radioaktivem Barium. Barium ist ein giftiges Erdalkalimetall. Es kommt in der Natur hauptsächlich als Schwerspat, BaSO_4 , vor. Dieser ist ein relativ weit verbreitetes, in Wasser praktisch unlösliches Mineral. Wegen des Vorhandenseins von SO_4^{--} -Ionen nach dem Ersaufen der Anlage würde in größeren Mengen auftretendes Barium als unlösliches BaSO_4 ausfallen. Nach der World Health Organisation (WHO): European standards for drinking water, Genf 1961, beträgt die zulässige Maximalkonzentration von Barium in Trinkwasser 1 mg/l. Der Vergleich dieser zulässigen Konzentration mit der o.a. Konzentration zeigt, daß eine Gefährdung durch das in den Abfällen entstehende Barium nicht auftreten kann.

Mit dem Zerfall des Cs zu Ba nimmt die Toxizität der Abfälle ab; eine Gefährdung durch andere Elemente, die durch den Zerfall von radioaktiven Isotopen entstehen, ist nicht möglich.

9.3 Untersuchungen zur Langzeitbeständigkeit von schwach-aktiven Zementprodukten unter Endlagerbedingungen

Als ungünstigster Störfall im Endlager wird ein Wassereintrich in das Endlager während der Befüllphase angenommen.

Durch die noch vorhandenen Hohlräume bildet sich je nach Umgebung konzentrierte NaCl-Lösung bzw. eine Gleichgewichtslauge aus $H_2O/MgCl_2/MgSO_4/KCl/NaCl$, die auf die Abfallprodukte einwirkt und ausgelaugte Radionuklide in die Biosphäre zurücktransportieren kann. Die durch den Kontakt mit der Salzlösung bedingte Auslaugrate hängt im wesentlichen vom Auslaugmechanismus und der Natur des betreffenden Radionuklids ab. Nach heutigen Kenntnissen über Auslaugversuche an Abfallsalz/Zementprodukten über Zeiträume bis zu zwei Jahren sind die Auslaugprozesse in erster Näherung diffusionsbestimmt.

Für die langfristige Auslaugung muß darüber hinaus der korrosive Angriff der Lauge, der zu einer Vergrößerung der auslaugbaren Oberfläche führen kann, berücksichtigt werden. Im Zementstein sind insbesondere Cs-137 und Sr-90 in nennenswerten Mengen auslaugbar, die Schwermetalle und Transuranelemente bilden im alkalischen Material ausnahmslos schwerlösliche Verbindungen.

Daraus ergeben sich die an die Abfallprodukte zu stellenden Anforderungen:

- Höchstmögliche Korrosionsbeständigkeit gegen gesättigte NaCl-Lösung und quinäre Gleichgewichtslauge über lange Zeiträume.
- Geringe Auslaugbarkeit der inkorporierten Radionuklide. Es sind dabei drei verschiedene Zementprodukte zu unterscheiden, die gegen angreifende Laugen beständig sein sollen:
 - a) Zementprodukte für Faßauskleidungen und verlorene Betonabschirmungen
 - b) Zementprodukte für die Verfüllung von Zwischenräumen zwischen Abfall und Faß
 - c) Zementprodukte für die Verfestigung von radioaktiven Abfalllösungen ($NaNO_3$ -Lösungen bei WA-Abfällen).

Folgende Ergebnisse wurden erarbeitet:

Für den Korrosionswiderstand bedeutender als die Auswahl spezieller Zementsorten ist die Verarbeitung des Zementprodukts. Äußerst wichtig und effektiv ist die Verringerung der Porosität und Permeabilität, da dadurch der Zutritt aggressiver Lösung zum Zementstein verringert wird.

Ein gut abgestimmter Zuschlag erhöht die Festigkeit und verringert das Schwinden. Fette Mischungen sind dabei korrosionsfester als magere; Zusatzstoffe, die das Wasserrückhaltevermögen erhöhen und Zusatzmittel, die verflüssigend oder stabilisierend wirken, können eingesetzt werden.

10. Sicherheitsstudien zu einem Endlager für hochaktive Abfälle

Entsprechend dem FE-Programm lag der Schwerpunkt der Arbeiten bei der Entwicklung der Freisetzungsbäume und Freisetzungsmodelle.

Die Freisetzungsbäume beschreiben das zu untersuchende System und ermöglichen die Ermittlung von Fehlersequenzen. Die Freisetzungsmodelle zeigen Mechanismen und Abläufe auf, die zur Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlagersalzstock führen können.

Die sicherheitsanalytischen Untersuchungen des Endlagers für hochaktive Abfälle müssen aufgrund der sicherheitsrelevanten Änderungen der Randbedingungen für drei Zeitphasen durchgeführt werden:

1. Betriebsphase
2. 1000 Jahre-Phase
3. >1000 Jahre-Phase

Eine detaillierte Analyse wird zunächst für die Betriebsphase durchgeführt.

Als Grundlage für die Entwicklung der Freisetzungsbäume dient das Barrieremodell.

Für eine Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlagersalzstock gilt, daß

- ein Transportmedium vorhanden ist,
- Radionuklide in transportabler Form vorliegen,
- Transportvorgänge ablaufen.

Während der Betriebsphase des Endlagers muß mit einem gasförmigen Transportmedium (Grubenwetter) und mit einem flüssigen Transportmedium (Lauge) gerechnet werden. Für diese beiden Transportmedien sind Freisetzungsbäume und Freisetzungsmodelle entwickelt worden.

Für eine Freisetzung von Radionukliden durch das Transportmedium "Grubenwetter" gilt, daß

- das Transportmedium primär im Grubengebäude vorhanden ist,
- die Überführung der Radionuklide in eine transportable Form über mechanische Zerkleinerung der Glasmatrix und die daraus resultierende Entstehung von Schwebestaub möglich erscheint,
- als Transportmechanismen die Grubenbewetterung und Konvektionsprozesse infrage kommen.

Als Basisfehlerereignisse kommen Transportunfälle im Grubengebäude (z.B. Förderkorbabsturz) infrage.

Für eine Freisetzung von Radionukliden durch das Transportmedium "Lauge" gilt, daß

- das Transportmedium nicht primär in ausreichenden Mengen im Grubengebäude vorhanden ist,
- die Überführung der Radionuklide in eine transportable Form durch Auslaugung der Glasmatrix nach Zerstörung des Edelstahlbehälters erfolgen kann,
- als Transportvorgänge Diffusion und Konvektion sowie konvergenzinduzierte Strömungen auftreten können.

Der komplexe Charakter des Modells "Lauge" machte eine detaillierte Entwicklung von Teilmodellen erforderlich.

Die Abbildung zeigt die Freisetzung für die beiden Transportmedien Grubenwetter und Lauge.

Eine erste Wertung der verschiedenen Modelle zeigt, daß während der Betriebsphase des Endlagers in erster Linie die Freisetzung durch das flüssige Transportmedium Lauge zu berücksichtigen ist. Laugeeinbrüche, die zum Vollaufen eines Grubengebäudes führen, sind technisch schwer kontrollierbar. Im Gegensatz zum Modell "Grubenwetter" können im ungünstigsten Fall alle zum Störfallzeitpunkt eingelagerten Abfallbehälter betroffen sein und für die Auslaugung zur Verfügung stehen.

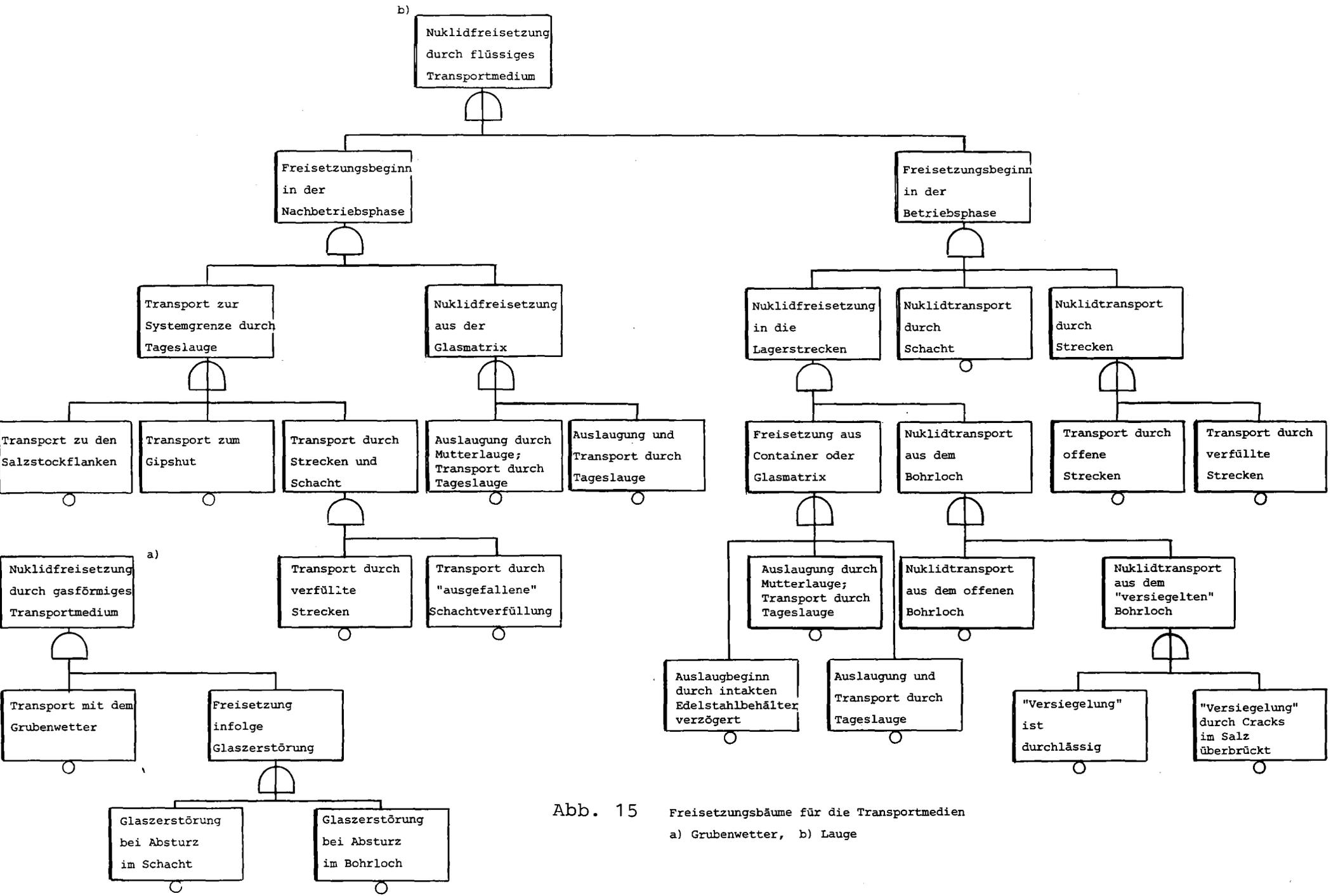


Abb. 15 Freisetzungsbäume für die Transportmedien
a) Grubenwetter, b) Lauge

Liste der Veröffentlichungen der EGT im Jahre 1978

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. -

Gemeinsamer Jahresbericht 1977 des Instituts für Tief-
lagerung der GSF und der Abteilung Behandlung radioak-
tiver Abfälle der KfK

GSF - T 84, KfK - 2650, PWA - 53/78

Albrecht, E.:

Die Tieflagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen
der Bundesrepublik Deutschland. -

Aktuelle Themen der Kernenergie, Jül-Conf-24,
Dezember 1977, 15 - 24

GSF - T 85

Albrecht, E. and Perzl, F.:

The Research and Development Program on Waste Disposal
in the Federal Republic of Germany. -

Waste Management and Fuel Cycles, Proceedings of the
Symposium on Waste Management, Tucson, Arizona, USA,
March 6 - 8, 239 - 251

GSF - T 86

Kühn, K.:

"Standorte" bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle. -
Jahrbuch der Atomwirtschaft 1978, A 59 - A 62 (1978)

GSF - T 90

Kühn, K., Röthemeyer, H. and Salander, C.:

West Germany gears up for licensing process. -
Nucl. Eng. Intern. 23 (1978), 48 - 53

GSF - T 91

Kühn, K.:

Stand der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung. -

Haus der Technik - Vortragsveröffentlichungen, Heft 400, Essen (1978), 32 - 33

GSF - T 92

Perzl, F.:

Tieflagerung radioaktiver Abfälle im Salz

- Erreichtes und Geplantes -

KFK 2615, 92 - 112

Proske, R.:

Developments in Risk Analysis of Geologic Repositories for Radioactive Wastes in the Federal Republic of Germany. - Waste Management and Fuel Cycles 78, Proceedings of the Symposium on Waste Management, Tucson, Arizona, Arch 6 - 8, 551 - 559 (1978)

GSF - T 89

Rudolph, Köster:

Verfestigung von LAW/MAW und Tritiumabwässern aus der Wiederaufarbeitung. -

Reaktortagung in Hannover, 4. - 7.4.1978,

Compact Seite 482

Stippler, R. und Kleimann, H.:

Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Versuchsanlage Asse. -

Jahresbericht 1977

GSF - T 87

Smailos, Diefenbacher, Korthaus, Gomper:

Berechnungen zur Radiolysegasbildung und Wärmeentwicklung bei der Einlagerung von radioaktiven Bitumen- und Zementprodukten in unterirdischen Lagerräumen. -

KFK 2076, März 1978