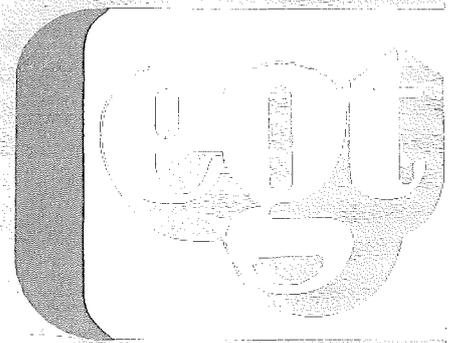


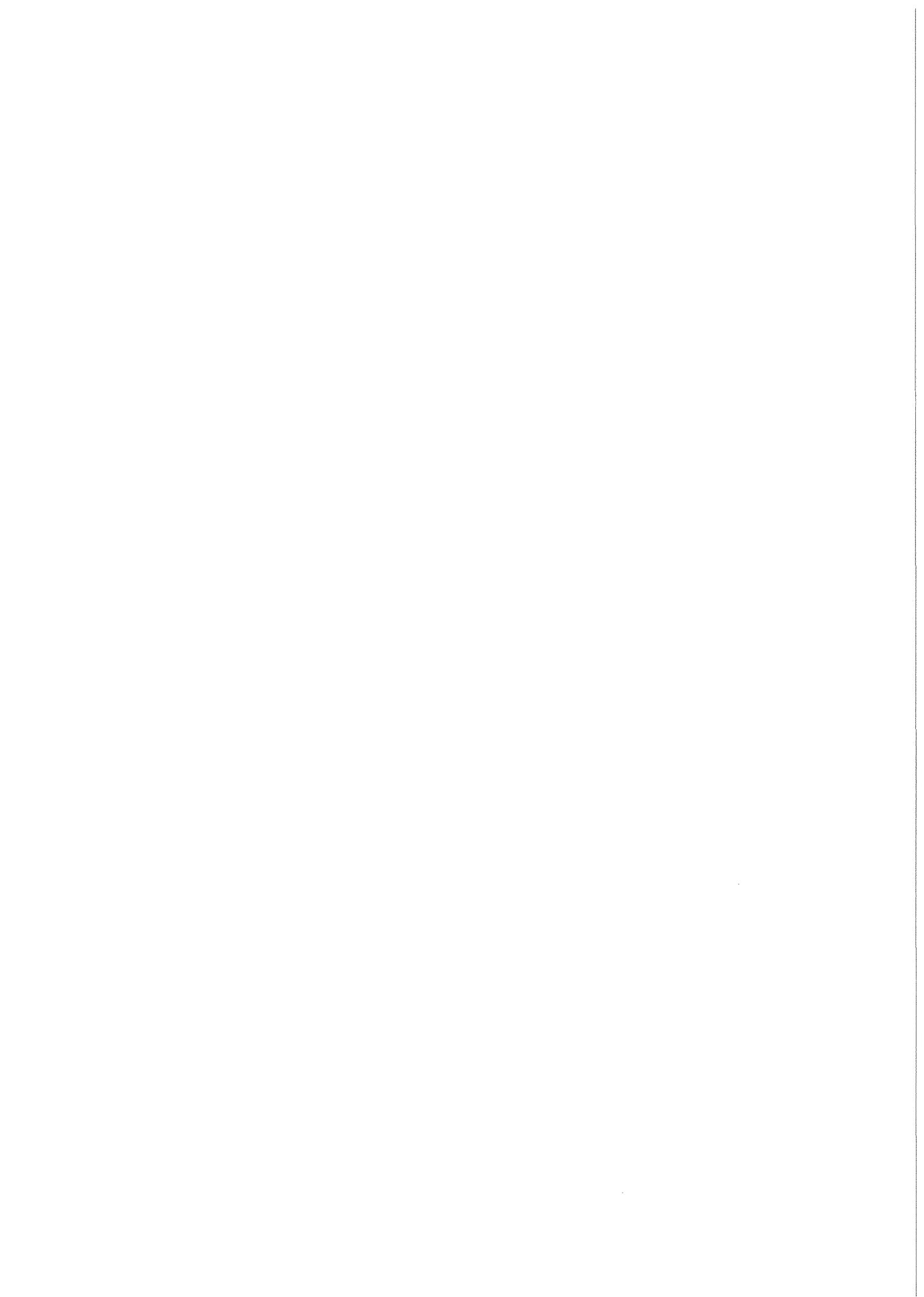
Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung

Jahresbericht 1981



GSF-T133
KfK 3321

Gesellschaft für
Strahlen- und Umweltforschung mbH · München
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH



Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung

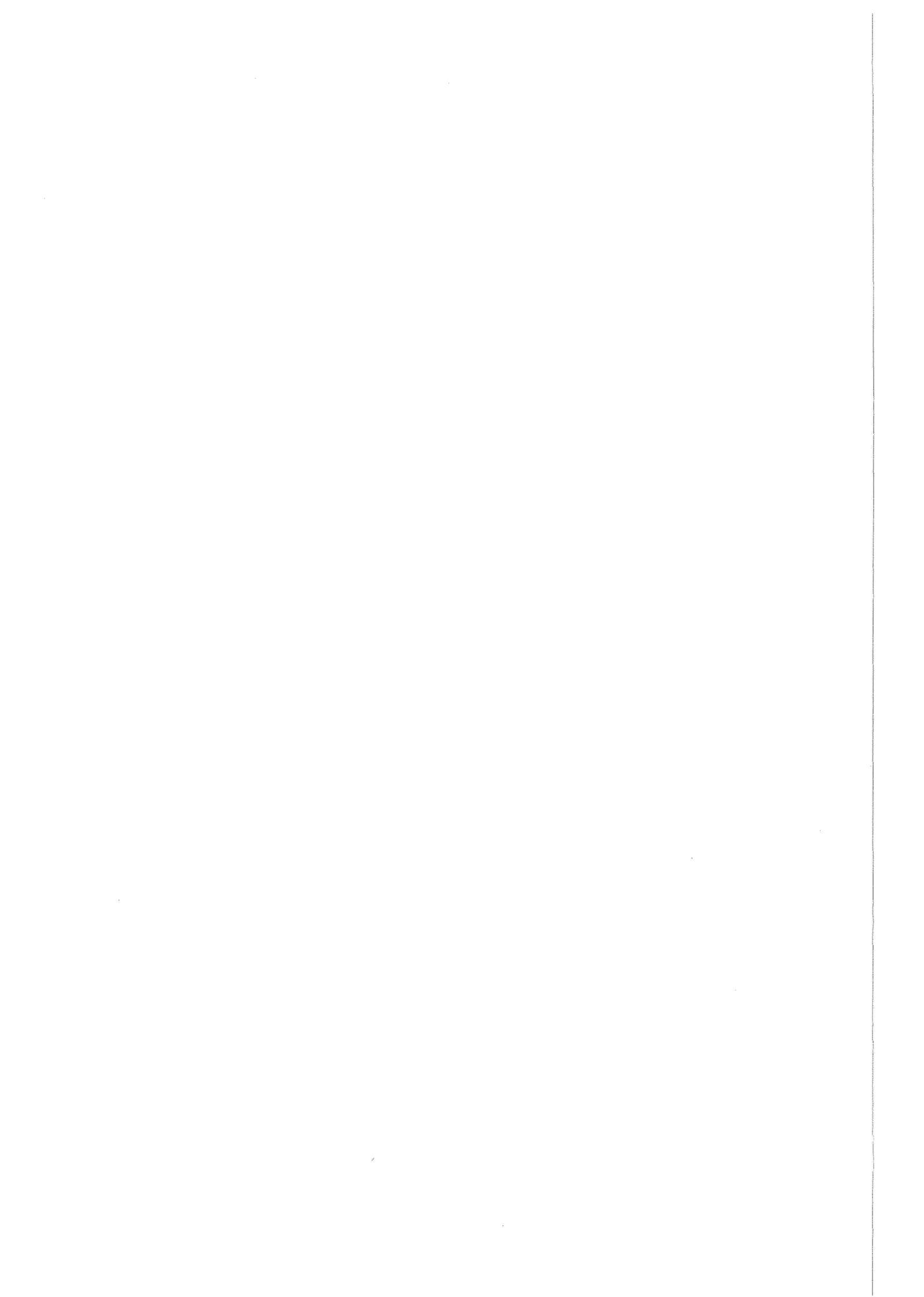
Jahresbericht 1981



GSF-T133

KfK 3321

Gesellschaft für
Strahlen- und Umweltforschung mbH · München
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH



Inhalt

Einleitung	1
1. Ausbau und Betrieb der Versuchsanlage Asse	3
2. Ermittlung endlagerrelevanter Daten und Methoden in der Versuchsanlage Asse	6
3. Weiterentwicklung der Einlagerungsverfahren für schwach- und mittelaktive Abfälle	9
4. Untersuchungen zur Versuchseinlagerung hochaktiver Abfälle	11
5. Lagerung und Verfestigung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen in untertägigen Hohlräumen	19
6. Beurteilung der Eignung der Schachtanlage Konrad für die Einlagerung radioaktiver Abfälle	26
7. Charakterisierung von Abfallprodukten sowie Entwicklung von Verpackungen	32
8. Durchführung von Sicherheitsanalysen	38
9. Vorträge und Veröffentlichungen	40

Einleitung

Die Entwicklungsgemeinschaft Tieflagerung legt mit dem Jahresbericht 1981 den letzten seiner Art vor. Die Ergebnisse von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) und der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF) zur Tieflagerung können künftig den Jahresberichten beider Gesellschaften entnommen werden.

Wie in den bisherigen Jahren, so enthält auch der Jahresbericht 1981 die wesentlichen Ergebnisse der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Institutes für Tieflagerung (GSF) und der Abteilung Endlagerung des Institutes für Nukleare Entsorgungstechnik (KfK) zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen.

Die Arbeiten der EGT für das Planfeststellungsverfahren zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Schachtanlage Asse sind in dem vorliegenden Bericht nicht enthalten. Die Ergebnisse dieser Arbeiten fanden in gesonderten Konzepten und Genehmigungsunterlagen ihren Niederschlag.

Im Berichtszeitraum konnten im Salzbergwerk Asse aus Genehmigungsgründen keine Einlagerungsversuche mit radioaktiven Abfällen durchgeführt werden. Deshalb fehlen entsprechende Ergebnisse im vorliegenden Bericht.

Die F+E-Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit auch mit externen Institutionen durchgeführt. Ihnen sei für ihre konstruktive Mitarbeit gedankt.

Folgende Institutionen sind in besonderem Maße an den F+E-Arbeiten der EGT beteiligt:

- 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
- Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine



1. Ausbau und Betrieb der Versuchsanlage Asse

Die Schachanlage Asse wurde als Versuchsanlage zur Durchführung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten genutzt. Hierfür waren alle bergmännischen, baulichen und maschinellen Einrichtungen sowie das Personal und die Infrastruktur zur Verfügung zu stellen, regelmäßige Prüfungen und Untersuchungen der maschinen- und elektrotechnischen Anlagen sowie aller Seilfahreneinrichtungen und entsprechende Wartungsarbeiten gemäß den geltenden Bergverordnungen durchzuführen.

1.1 Bergmännische Arbeiten und betriebsbezogene Untersuchungen

Die bergmännischen Arbeiten konzentrierten sich auf

- die Einrichtung und Unterhaltung von betriebsnotwendigen Anlagen und Grubenbauen,
- die Bereitstellung von Grubenräumen für Versuchsfelder und für geologische und gebirgsmechanische Forschungsprogramme, einschließlich der Gestellung des für die Einrichtung und Durchführung notwendigen Personals, und
- die Restraumverfüllung in den Kammern, die bis Ende 1978 der Einlagerung radioaktiver Abfälle dienten.

Umfangreiche Beraubearbeiten in verschiedenen Grubenräumen dienten der Erhaltung der Arbeitssicherheit. Mit einer Firstenfräse wurden rd. 16.000 m² Fläche an Firsten und Stößen von Strecken und Abbaukammern beraubt. Dabei sind etwa 5000 m³ Salz angefallen und als Versatzmaterial zur Verfüllung von Einlagerungskammern eingesetzt worden. Mit einer Teilschnittmaschine (Abb. 1.1-1) wurden im Berichtsjahr etwa 300 Meter Strecke aufgefahren. Zur Zeit wird mit dieser Maschine ein Versuchsfeld von ca. 5000 m³ Inhalt zur Untersuchung der Laugenmigration im Älteren Steinsalz auf der 800 m-Sohle hergestellt.

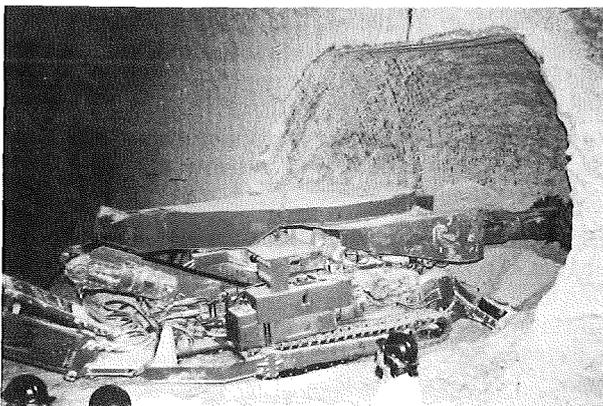


Abb. 1.1-1:
Teilschnittmaschine im Einsatz

Für die Restraumverfüllung in den Kammern, die bis Ende 1978 der Einlagerung von radioaktiven Abfällen dienten, wurden eine Reihe weiterer bergmännischer Arbeiten durchgeführt:

- Verfüllung der Resthohlräume mit Steinsalz.
- Bau einer Salzbetonmauer zwischen der Kammer 3 und der im Vorjahr verfüllten Kammer 2 im Älteren Steinsalz auf der 750 m-Sohle.
- Verschuß der drei Zugänge zur Kammer 6 sowie des Zugangs zur Kammer 7 von der südlichen Richtstrecke auf der 750 m-Sohle mit Salzbetonmauern.

Das Verfüllmaterial wurde teils trocken teils unter Zugabe von Wasser bzw. Lauge in die Kammern einblasen (Abb. 1.1-2). Während die Zugabe von gesättigter Lauge in das Blasgut lediglich eine Verringerung der Staubentwicklung beim Einblasen bewirkt, wurde bei Zugabe von Wasser eine Verfestigung des Haufwerks erreicht. Sie wird auf eine Rekristallisation von durch das Wasser gelöstem Steinsalz zurückgeführt.

Der Verschuß der Kammerzugänge erfolgte in drei Fällen durch Einblasen von Salzbeton mit der Blasanlage, wobei das Anmachwasser dem trockenen Blasgut über eine Ringdüse am Blasrohrstrahler zugegeben wurde. In zwei Zugängen zur Kammer 7 (750 m-Sohle) wurde fertig gemischter Salzbeton mit einer Betonpumpe eingepumpt. Diese beiden vier Meter starken Betonmauern wurden mit Thermoelementen und Druckmeßsonden instrumentiert. Mit den Thermoelementen werden der zeitliche Verlauf der Abbinde temperaturen innerhalb des Betons sowie die Erwärmung des umgebenden Salzes gemessen. Mit den Druckmeßsonden soll festgestellt werden, wann sich das Gebirge im Bereich der Kammerzugänge auf die Betonmauern aufliegt und wie sich der Druck im Laufe der Zeit ändert.

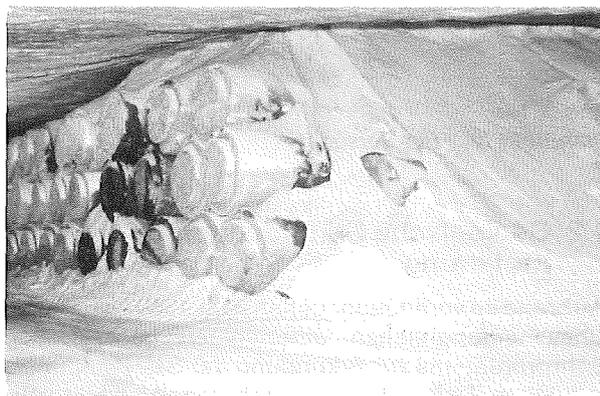


Abb. 1.1-2:
Blasversatz in Kammer 7 auf der 750 m-Sohle

Bei den betriebsbezogenen Untersuchungen standen weitergehende Arbeiten zur Restraumverfüllung und die Optimierung der Standrohrlängen für geologische Erkundungsbohrungen im Vordergrund.

In die Restraumverfüllung sind die Arbeiten zum Verschluß der Kammerzugänge eingeschlossen. Sie befaßten sich mit der

- Bestimmung des Einflusses der in das Blasgut zugegebenen Wassermenge auf die Festigkeit und die Dichte des Versatzstoffes,
- Ermittlung von Kennwerten des für Kammerverschlüsse verwendeten Salzbetons unter den gegebenen klimatischen Bedingungen der Grube,
- Untersuchung verschiedener Materialien und Verfahren zum Herstellen von Abschlußdämmen. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, daß sich Ton als Dichtungsmaterial nicht eignet. Infolge des Wasserentzuges durch die Grubenbedingungen, nämlich relativ hohe Temperatur und geringe Luftfeuchte, verringert sich das Volumen der Dichtungsmaße, und die gewünschte Dämmwirkung geht damit verloren. Neben Ton werden weitere Stoffe auf ihre Eignung als Dichtungsmaterial untersucht.

Im Berichtsjahr wurden systematische Untersuchungen begonnen, um mit Hilfe von Frac-Versuchen festzustellen, welche optimalen Standrohrlängen für geologische Erkundungsbohrungen erforderlich sind, um einem evtl. auftretenden Lauge- bzw. Gasdruck standzuhalten. Bei diesen Untersuchungen werden Standrohre mit unterschiedlichen Längen in Bohrlöcher einzementiert. In den Standrohren wird mittels einer Pumpe ein Öldruck aufgebaut, der ein Aufreißen des Salzes bzw. der Zementierung bewirkt (Abb. 1.1-3).

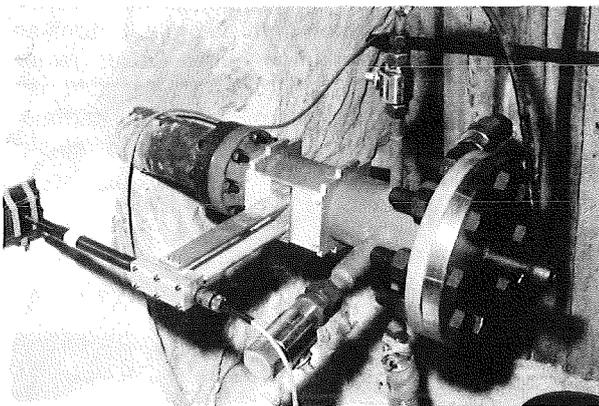


Abb. 1.1-3:
Standrohr für Frac-Versuche

1.2 Geologische Erkundung und Kartierung

Während im vorangegangenen Jahr 1980 im Rahmen eines umfangreichen untertägigen geologischen Bohrprogramms zur Erkundung der Salzstruktur bis in 1000 m Tiefe zahlreiche Bohrungen erstellt wurden, sind 1981 vor allem die wissenschaftliche Bearbeitung und Auswertung des erbohrten Kern-

materials und vergleichende Untersuchungen vorgenommen worden. Die Auswertung der Bohrerergebnisse zeigt, daß die Schichtenfolge zwischen Staßfurt-Hauptsalz und Liniensalz der Leine-Serie in dem durch Bohrungen erschlossenen Faltenscharnier der Leinesalzmulde in etwa 900 bis 950 m Teufe am vollständigsten auftritt, während die meisten dieser Schichtglieder im Grubengebäude der SchachtanlageASSE nicht oder nur vereinzelt vorkommen. Es wurde festgestellt, daß in der südlichen Leinesalzmulde über dem carnallitischen Kaliflöz Staßfurt ein 2 m mächtiges polyhalitisches Hartsalzlager, ein 1 m mächtiges Decksteinsalz und ein etwa 1,5 m gebänderter Deckanhydrit auftreten. Darüber beginnt die Leine-Serie, ebenfalls auf diese Mulde begrenzt, mit Grauem Salzton (bis 4 m mächtig), Hauptanhydrit (bis 13 m mächtig) und dem Basissalz (bis 16 m mächtig). Kaliflöze fehlen in der Leine-Serie, statt dessen tritt ein bemerkenswerter Polyhalitanteil auf.

Aus der Auswertung der Bohrkerns hat sich die wichtige Erkenntnis ergeben, daß auf der Südwestflanke das Rötalinaren sich an das Salz des Zechsteins anschmiegt und mit ihm vereinigt hat. Das Rötalinaren konnte durch lithostratigraphische Vergleiche, Schwefelisotopenbestimmungen und palynologische Befunde (Mikroflora) belegt werden. Damit konnte auch das geologische Profil durch den SchachtASSE II verbessert werden. Die in die Einzelheiten gehende Überarbeitung für die zuständigen Behörden erfolgte mit Unterstützung der Markscheiderei, berücksichtigt die fortlaufenden Ergebnisse der systematischen Sohlenkartierungen und steht wie diese kurz vor dem Abschluß. Die Teilsohlen zwischen 750 m und 490 m Tiefe wurden geologisch überprüft und teilweise neu kartiert.

Zur Stützung der lithostratigraphischen Gliederungen und zum Verständnis der Genese wurden bisher 488 Proben für Brombestimmungen genommen. 99 Proben aus einem Profil vom Staßfurt-Hauptsalz über Speisesalz, Polyhalitbänkchensalz, Kieseritisches Übergangssalz bis an das Kaliflöz Staßfurt wurden bereits analysiert und lassen eine systematische Entwicklung bei der Genese bzw. den Umwandlungen dieser Salzgesteine erkennen.

Anhand von zwei horizontalen Kernbohrungen, die zur Erstellung eines Spannungsmessfeldes gebohrt worden waren, konnten die geologischen Verhältnisse im Bereich des Blindschachts 4 auf der 800 m-Sohle genauer erfaßt werden. Zum gleichen Zweck wurde auf der 775 m-Sohle eine Strecke aufgefahren und eine vertikale Kernbohrung 25 m tief geteuft. Die geologische Aufnahme der Strecke und der Bohrkerns ergab, daß sich die besonderen geologischen Strukturen von der 800 m-Sohle in die 775 m-Sohle fortsetzen.

Das gesamte geologische Kartenwerk der SchachtanlageASSE, bestehend aus den Sohlenkartierungen und Überprüfungen zwischen 800 m und 490 m Tiefe sowie drei Querprofilen und einem Längsschnitt durch den Salzstock, wird bis Ende 1982 fertiggestellt sein.

Die Detailplanung für vier Tiefbohrungen von über-tage auf der Südflanke des Assesattels zur Erkun-

dung der geologischen Verhältnisse bis zur Salzbasis wurde abgeschlossen.

1.3 Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung

Die Überwachung des untertage beschäftigten Personals, der eingelagerten radioaktiven Abfälle sowie der Emissionen und der Umgebung der Schachanlage Asse wurde fortgeführt. Die Überwachung des Personals mit Dosimetern zeigte in keinem Fall eine Überschreitung der gesetzlich festgelegten Grenzwerte.

Ein fahrbarer Ganzkörperzähler wurde aus dem Fahrzeug ausgebaut und in einem untertage eingerichteten Meßraum auf der 490 m-Sohle fest installiert. Nach der Neukalibrierung kann die Inkorporationsüberwachung des Personals in diesem Ganzkörperzähler erfolgen.

Die zur Umgebungsüberwachung in regelmäßigen Abständen entnommenen Wasser-, Luft- und Bodenbewuchsproben aus der näheren und weiteren Umgebung der Schachanlage Asse lagen mit ihrem Aktivitätsgehalt im Bereich der natürlichen Umweltradioaktivität. Sie lassen keine Beeinflussung durch die eingelagerten radioaktiven Abfälle erkennen. Mit Thermolumineszenz-Dosimetern (TLD) wurde die Strahlendosis an 24 Stellen, verteilt auf 12 Sektoren im Abstand von einem und zwei Kilometern von der Schachanlage Asse, ermittelt. Die Ergebnisse lagen in gleicher Höhe wie die Meßwerte des vorhergehenden Jahres.

Bei den Messungen der Ortsdosis, der Ortsdosisleistung und des Aktivitätsgehaltes der Luft unter und über Tage an vielen repräsentativen Stellen konnten keine Überschreitungen der Grenzwerte festgestellt werden. Eine ausführliche Darstellung aller gemessenen Werte erfolgt im Jahresbericht „Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachanlage Asse“.

In Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde wurden die Programme zur Emissions- und Immisionsüberwachung überarbeitet und teilweise ergänzt. Sie umfassen sowohl routinemäßig notwendige Überwachungsmessungen als auch wissenschaftliche Begleituntersuchungen im Rahmen von Forschungsvorhaben.

1.4 Genehmigungssituation

Aufgrund der im Jahr 1980 zwischen den zuständigen Bundesministerien geführten Ressortgespräche wurden Antragsunterlagen für ein umfassendes Planfeststellungsverfahren Asse erarbeitet und im April 1981 der für die Antragstellung zuständigen Physikalisch-Technischen Bundesanstalt übergeben.

In einem Gespräch zwischen den zuständigen Ministern des Bundes und des Landes Niedersachsens über ein gemeinsames Konzept zur Entsorgung schwachradioaktiver Abfälle wurde Einigkeit darüber erzielt, daß im Salzbergwerk Asse die Fortsetzung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten Vorrang haben. Ob ein Antrag auf ein Planfeststellungsverfahren gestellt wird, soll später entschieden werden. In der Zwischenzeit sollen die Unterlagen weiter detailliert und entsprechend dem Untersuchungsfortschritt aktualisiert werden.

Das seit 1979 bei dem Landgericht Braunschweig anhängige Verfahren der „Freunde der Asse e.V.“ gegen die GSF mit dem Ziel, alle bergmännischen Arbeiten in der Schachanlage Asse zu unterbinden, wurde am 16. September 1981 mit der Abweisung der Klage abgeschlossen.

1.5 Information der Öffentlichkeit

Die im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gewonnenen Erkenntnisse über Endlagerungsmöglichkeiten im Salz wurden interessierten Besuchergruppen vor Ort dargelegt. Im Laufe des Berichtsjahres fanden wieder sechs „Tage der offenen Tür“ statt, an denen rund 2400 Besucher das Informationsangebot ausnutzten. Etwa 11.000 Besucher aus dem In- und Ausland konnten auf der Schachanlage Asse durch Film, Vortrag und Untertage-Führung umfassend informiert werden. Insgesamt besuchten im Jahre 1981 ca. 13.500 Personen die Asse.

Vertretern von Presse und Fernsehen aus dem In- und Ausland wurde unter- und übertage Gelegenheit gegeben, sich über den Stand von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle durch Filme und Reportagen zu informieren. Im September 1981 wurde ein Pressegespräch mit Journalisten wichtiger deutscher Presseorgane durchgeführt.

Während der Ausstellung „Harz und Heide“ in Braunschweig im Mai 1981 stellte das Institut für Tieflagerung im Rahmen einer Sonderschau seine F+E-Arbeiten vor.

2. Ermittlung endlagerrelevanter Daten und Methoden in der Versuchsanlage Asse

Das Salzbergwerk Asse steht der Entwicklungsgemeinschaft Tief Lagerung als Versuchsanlage zur Ermittlung von Daten und Methoden, die insbesondere für die Errichtung und den Betrieb des Bundesendlagers im Salzstock Gorleben Anwendung finden sollen, zur Verfügung. Die Daten dienen dem Nachweis der Sicherheit der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen, die neben anderem wesentlich von den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen des Deckgebirges und des Salzstockes selbst sowie von der Standfestigkeit der untertägigen Hohlräume abhängt.

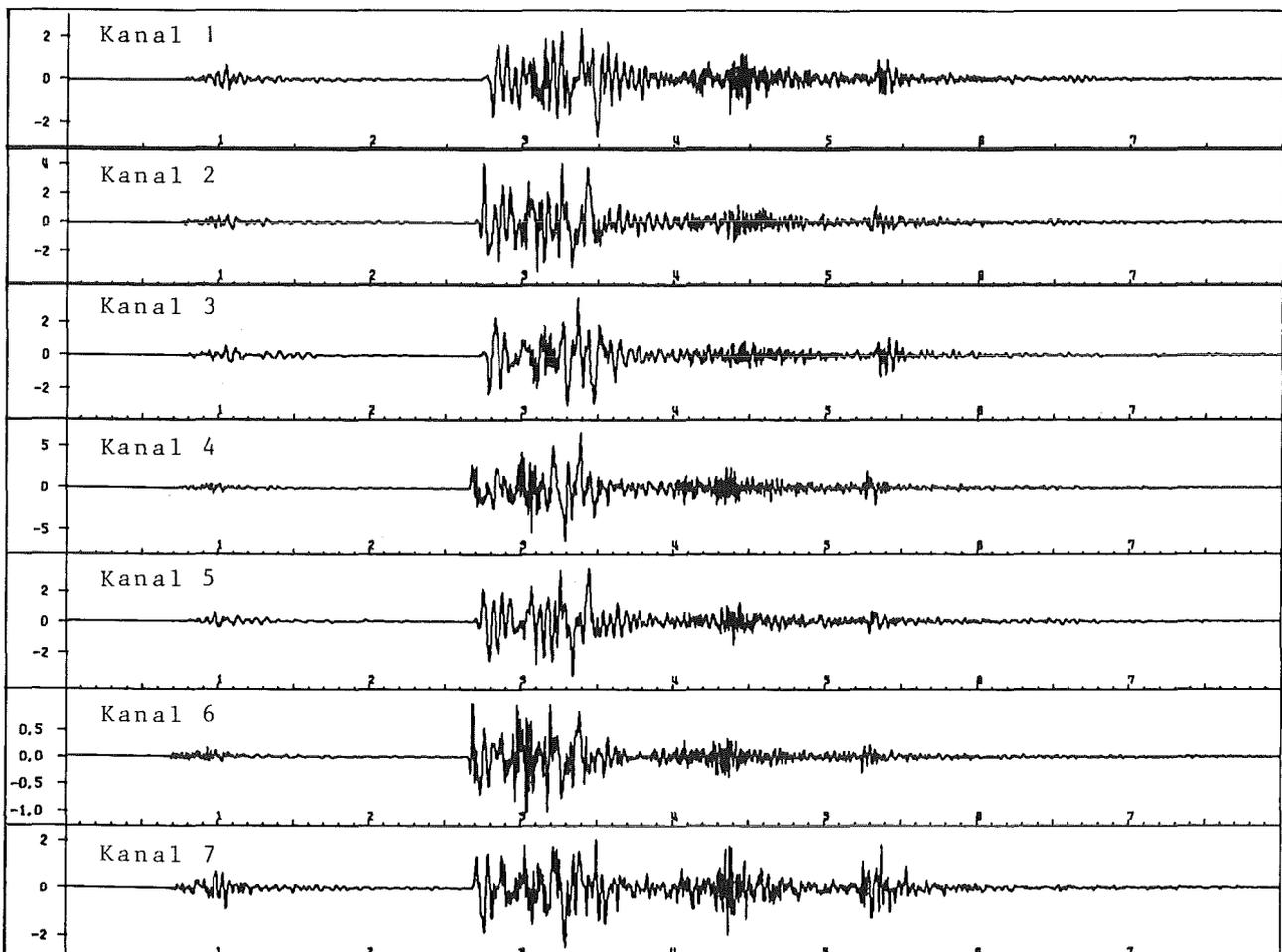
2.1 Seismische Überwachung des Grubengebäudes

Die seismischen Stationen auf der 750 m-Sohle der Schachtanlage Asse und der 1200 m-Sohle der Schachtanlage Konrad (19 km voneinander entfernt) dienen der Erfassung von Nahbeben zur Bestimmung der Seismizität. Bei der Interpretation der Registrierungen ist eine Unterscheidung von möglichen lokalen Beben und Sprengerschütterungen von Bedeu-

tung. Es wurde eine statistische Bearbeitung aller beobachteten Ereignisse des Jahres 1980 mit Ausnahme der durch andere Observationen identifizierten europäischen Beben begonnen. 456 Ereignisse, nach Wochen-, Sonn- und Feiertagen unterschieden, wurden in halbstündigen Intervallen aufsummiert. Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigt eine deutliche Häufung von Ereignissen an Wochentagen zwischen 10 Uhr und 16 Uhr. Damit wurde bestätigt, daß 80% bis 90% aller Ereignisse in der üblichen Arbeitszeit auftreten.

In der Schachtanlage Asse konnte das Geophon-Netz zur Überwachung des Grubengebäudes und zur Ortung von lokalen Ereignissen mit kurzzeitigen Unterbrechungen während des gesamten Berichtszeitraumes betrieben werden. Es können jetzt insbeson-

Abb. 2.1-1:
Registrierbeispiel für ein mikroseismisches Ereignis durch Firstfall (Löser)



dere durch Firstfall (Löser) verursachte Erschütterungen erkannt und z.T. geortet werden. Der bei der Ablösung in der Firste auftretende Entspannungsvorgang erzeugt ein kleines seismisches Signal (Vorläufer), das um die Fallzeit vor dem Aufprall-Impuls (Hauptsignal) registriert wird. Abbildung 2.1-1 zeigt ein Beispiel aus dem Abbau 9/10 auf der 700 m-Sohle, bei dem mit ca. 20 m Höhe eine Fallzeit von ca. 2,0 Sekunden zu messen ist. Alle Ereignisse mit derartigen Vorläufern zeigen ein ähnlich komplexes Seismogramm. Diejenigen spontanen Ereignisse, die aufgrund fehlender Vorläufer nicht auf Löser zurückgeführt werden können, haben einfachere Seismogramme.

Ortungsfehler aufgrund der Abweichung der seismischen Geschwindigkeitsverteilung von einem homogenen Modell konnten reduziert werden. Dazu wurden an einer Reihe von genau bekannten, im Grubengebäude verteilten Punkten kleinere Sprengladungen gezündet. Die resultierenden Einsatzzeiten an den verschiedenen Geophonen wurden in einer Datei gesammelt. Mit dem neu entwickelten Ortungspro-

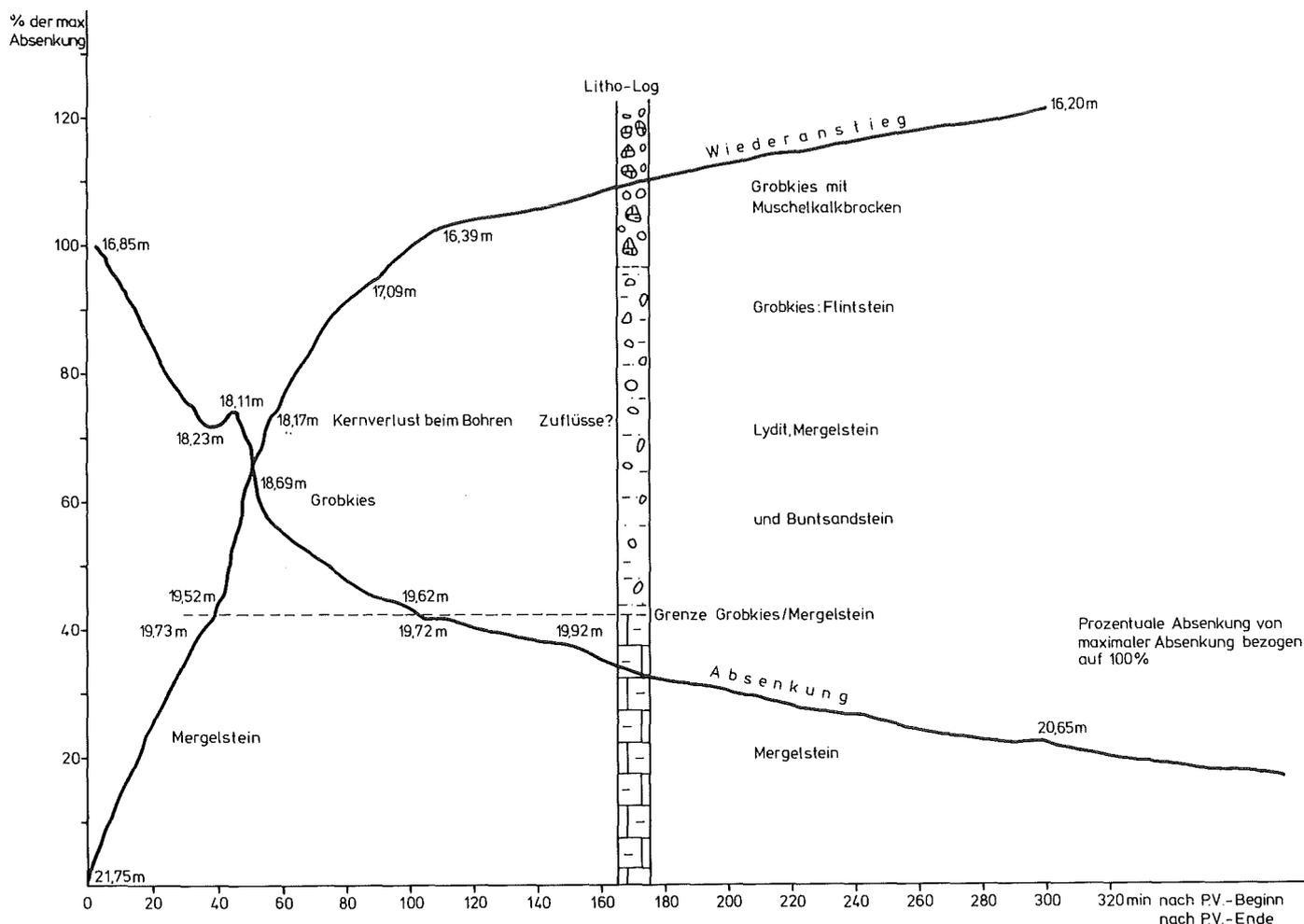
gramm können unbekannte Erschütterungsherde durch „Anhängen“ an den nächstgelegenen Bezugsschub geortet werden.

Im Bereich des Temperatur-Versuchsfeldes 4 wurden für hammerschlagseismische Untersuchungen feste Meßstrecken von bis zu 90 m Länge eingerichtet. Erste Messungen ergaben Ausbreitungsgeschwindigkeiten von 4350 m/s für die Kompressions- und von 2500 m/s für die Scherwellen. Diese Daten werden für die Berechnung mechanischer Kenngrößen des Gebirges benötigt.

2.2 Hydrogeologisches Forschungsprogramm

Die im Hydrogeologischen Forschungsprogramm Ende 1980 begonnenen Leistungspumpversuche mußten in einer ersten Bauphase bereits Ende März abgeschlossen werden, um die von der Genehmigungsbehörde erteilte Auflage zu erfüllen, nur in der vegetationsarmen Zeit zu pumpen. Es wurde Grundwasser aus Schichten des Unteren Buntsandsteins und Oberen Buntsandsteins, des Buntsandsteins in verstärkter Lagerung, des Unteren Muschelkalks und Oberen Muschelkalks, aus dem Keuper und aus dem Lias bis zu 300 Stunden Dauer pro Versuch in mehreren Leistungsstufen der Fördermenge und in vier Bohrungen aus zwei durch Packer getrennte Grundwasserhorizonte gepumpt. Die bisherige Vorauswertung der Pumpversuchsergebnisse ergab, daß bei

Abb. 2.2-1:
Summenkurve der Absenkung und des Wiederanstiegs des Grundwasserspiegels im Verlauf des Pumpversuches in der Bohrung H 6



teilweise sehr geringen Fördermengen von 0,02 l/s bis maximal 4 l/s niemals ein echter Beharrungszustand der Grundwasserspiegelabsenkung, sondern nur bei einem Teil der Versuche ein quasi stationärer Zustand erreicht wurde. Die bisher ermittelten hydraulischen Kennziffern, wie z. B. die Durchlässigkeitsbeiwerte, variierten im Bereich von mehreren Größenordnungen von Bohrung zu Bohrung.

Da die herkömmlichen Auswerteverfahren von Pumpversuchen sich alle auf Porengrundwasserleiter beziehen, an der Asse jedoch vornehmlich geklüftete Grundwasserleiter existieren, gelten errechnete Werte der Durchlässigkeit und der Porosität nur für kleine gleichmäßig verteilte Klüfte mit laminaren Strömungsgeschwindigkeiten, wie sie im Buntsandstein bereits beobachtet wurden. Aus der Wiederanstiegskurve des Grundwassers nach jedem Pumpversuch lassen sich durch Unstetigkeiten im Kurvenverlauf im Vergleich mit der Absenkkurve Rückschlüsse auf wasserleitende Horizonte ziehen, wie dieses in der Bohrung H 6 beobachtet wurde (Abb. 2.2-1).

In hydrochemischen Untersuchungen wurden die Sättigungen an den verschiedenen Hauptkationen (Ca, Mg, Na) und Hauptanionen (Cl, SO₄, HCO₃) der verschiedenen Grundwässer ermittelt und anhand von Spurenelementanteilen Rückschlüsse auf die Herkunft der Wässer gezogen. Dabei zeigte sich, daß durch Chlorid verunreinigte oberflächennahe Grundwässer in der Nähe der Schachtanlage Asse II sehr wahrscheinlich aus ehemaligen Steinsalzhalden stammen. Das Verhältnis von Chlorid- zu Bromidionen, das bei normalen Grundwässern immer bei 680 liegt, zeigt bei Wässern, die Steinsalz gelöst haben, einen viel größeren Wert und bei solchen, die Carnallit gelöst haben, einen geringeren Wert, da der Bromanteil sich bei der Salzgenese in den kaliumreichen Restlaugen anreichert. Das zeigt auch das Verhältnis von Natrium- zu Kaliumionen, das für Halitwässer > 50, für Carnallitwässer < 50 ist. So ließen sich zahlreiche versalzene Grundwässer auf ihren Ursprung hin identifizieren, z. B. entlang hydraulisch wirksamer Querstörungen, wobei nur Wässer, die Carnallit auflösten, mit einem Cl/Br-Verhältnis von > 680 und einem Ca/K-Verhältnis von > 50 nicht aus dem Zechstein stammen müssen, sondern ihre Herkunft auch aus jüngeren steinsalzführenden Schichten des Röts, Mittleren Muschelkalks und Mittleren Keupers haben können.

2.3 Gebirgsbeobachtungsprogramm im Salzbergwerk Asse

Zur großräumigen Standsicherheitsüberwachung des Grubengebäudes wurden die Polygonmessungen mit Anschluß an übertägige Festpunkte fortgesetzt. Es ist dabei erstmalig ein Instrumentensystem vom Typ Elta 2 verwendet worden. Das Elta 2 ist ein Kompaktgerät zur hochpräzisen Ausführung von kombinierten Längen- und Winkelmessungen (Tachymeter), mit dem eine Optimierung der Meßgenauigkeit erwartet werden kann. Wegen dieses Instrumentenwechsels waren umfangreiche Eich- und Vergleichsmessungen mit dem bisher verwendeten Instrumentarium zur Absicherung der Ergebnisse notwendig.

Die Auswertung der Messungen ist noch nicht abgeschlossen. Für die Punkte in der Wendelstrecke steht jedoch bereits fest, daß die Veränderungen vom Sattelkern in Richtung des Abbauswerpunktes auf die Südwestflanke gerichtet sind. Sie passen damit sehr gut in Richtung und Betrag in das Gesamtbild der Deformationen des Grubengebäudes.

Die in Abstimmung mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und dem Oberbergamt Clausthal 1980 begonnene Erweiterung von Extensometerstationen zur gebirgsmechanischen Überwachung einzelner Elemente des Grubengebäudes wurde abgeschlossen. Damit stehen nunmehr 66 Stationen vorrangig in Pfeilern und Abbauen zur ständigen Kontrolle der Standsicherheit zur Verfügung. Wegen des großen Umfanges des bei diesen Deformationsmessungen anfallenden Datenmaterials wurden die Auswertung und Darstellung der Meßergebnisse automatisiert. Über die Meßergebnisse wurde vierteljährlich berichtet. Hiernach befindet sich der Steinsalzkörper im Zustand des stationären Kriechens. Hinweise auf eine akute Verminderung der Standsicherheit wurden nicht festgestellt.

Für den Pfeiler zwischen den Abbauen 4 und 5 auf der 553 m-Sohle wurde der Versuch unternommen, die dauerregistrierten Pfeilerdeformationen mit den gleichzeitig aufgezeichneten akustischen Emissionen des Salzgesteins zu korrelieren. Generelles Ergebnis der Untersuchung ist, daß die parallele Anwendung beider Überwachungsmethoden eine sinnvolle Basis für die Beurteilung der Standsicherheit von Stützelementen eines Grubengebäudes bildet.

Um evtl. Bewegungsvorgänge im Bereich des Schachtes 2 in die Standsicherheitsbeurteilungen mit einbeziehen zu können, wurden Teufenmessungen in der Schachtröhre, die 1971/72 aus bautechnischen Gründen durchgeführt worden sind, 1979 und 1981 wiederholt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Daraus resultiert, daß die Schachtröhre vom unteren Ende der Vorbausäule bis oberhalb des Bereiches, in dem der Schacht im Kaliflöz Staßfurt steht, sich gleichmäßig um 7 bis 9 mm / Jahr gesenkt hat. Im gleichen Zeitraum hat sich im Niveau der 750 m-Sohle der Schacht um etwa 25 mm / Jahr gehoben. Als Ausgleichszone werden vorrangig der Carnallitit und die darin vorhandenen Abbauhohlräume angesehen.

3. Weiterentwicklung der Einlagerungsverfahren für schwach- und mittelradioaktive Abfälle

Im Mittelpunkt dieses Vorhabens standen Forschungsarbeiten zur Verfüllung von Hohlräumen, insbesondere die Untersuchung von Verfüllmaterialien für mittelaktive Abfälle sowie gebirgsmechanische Untersuchungen.

3.1 Untersuchungen zur Barrierenwirkung von Verfüllmaterialien

Beim derzeitigen Konzept zur Endlagerung von mittelaktiven Abfällen ist vorgesehen, die Lagerkammer nach Einlagerung der Abfallprodukte mit den beim Auffahren des Endlagers angefallenen Steinsalz zu verfüllen. Eine Barrierenwirkung des Steinsalzes gegenüber einer Aktivitätsausbreitung ist aufgrund der Eigenschaften des NaCl nur durch physikalische Effekte, wie Filtration und Adsorption, nicht aber aufgrund von Ionenaustauschereigenschaften zu erwarten.

Diese Annahme konnte experimentell durch Schüttelversuche bei 40° C mit NaCl-Bodenkörper und NaCl- bzw. quinärer Lösung (Pkt. Q) bestätigt werden, wobei die Lösungen jeweils Tracermengen der Nuklide Cs-137, Sr-85, Co-60 und Tc-99 (als TcO_4^-) enthielten. Die Versuche wurden durch analoge Testreihen mit einem speziellen Ca-Bentonit als Bodenkörper ergänzt. Der verwendete Ca-Bentonit bewirkt als Zusatzmittel bei der Zementierung von MAW-Konzentrat eine deutliche Cs-Retention. Die Schüttelversuche wurden bei pH-Werten von 6 für quinäre Lösung bzw. von 8 für NaCl-Lösung durchgeführt.

Die ermittelten Verteilungskoeffizienten sind in Tabelle 3.1-1 zusammengestellt.

Das Ergebnis zeigt, wie erwartet, daß mit NaCl als Bodenkörper für alle verwendeten Nuklide keine Rückhaltung auftritt. Mit Bentonit als Bodenkörper zeigt sich für Sr-85 ebenfalls keine Wechselwirkung, während für Cs-137 und Co-60 eine Wechselwirkung auftritt, die eine deutliche Abhängigkeit von der verwendeten Salzlösung zeigt. Bei NaCl-Lösung werden

Bodenkörper	Salzlösung	Verteilungskoeffizient [$cm^3 \cdot g^{-1}$]			
		Sr-85	Cs-137	Co-60	99 TcO_4^-
NaCl	ges. NaCl	0,15	0,20	0,11	0,11
NaCl	Q-Lösung	0,17	0,21	0,04	0,14
Bentonit	ges. NaCl	0,30	10,58	88,6	0,15
Bentonit	Q-Lösung	1,74	4,72	2,6	0,13

Tabelle 3.1-1:
Verteilungskoeffizienten „ K_d “ für verschiedene Radionuklide in unterschiedlichen Bodenkörpern und Salzlösungen

Jeweils deutlich höhere „ K_d “-Werte erhalten als in quinärer Lösung. Dies deutet darauf hin, daß der Ca-Bentonit bevorzugt mit Mg^{2+} -Ionen in Wechselwirkung tritt.

Die Schüttelversuche zur Ermittlung von „ K_d “-Werten unter den beschriebenen Bedingungen werden mit Untersuchungen zur Pu- und Am-Retention abgeschlossen.

Neben der Barrierenfunktion üben die Verfüllmaterialien eine abdichtende Wirkung gegenüber Flüssigkeiten, die Kontrolle der chemischen Umgebungsbedingungen (pH-Wert, Redoxpotential) und eine gebirgsmechanische Stützfunktion aus. Deshalb werden künftig Verfüllmaterialien untersucht, die beim Kontakt mit wäßrigen Salzlösungen eine abdichtende Wirkung erwarten lassen.

3.2 Gebirgsmechanische Untersuchungen

Am Schacht Asse IV wurden im unverrohrten Teil die manuellen Konvergenzmessungen an neun Horizonten weitergeführt. Damit liegen für einen Schacht im Salinar bis in ca. 1000 m Teufe Konvergenzmessungen über den Zeitraum von fünf Jahren vor.

Die Konvergenzgeschwindigkeit erfährt über die Zeit eine drastische Verringerung innerhalb der ersten 50 Tage nach dem Auffahren. Bis zum 400. Tag erfolgt dann der Übergang zu einem Verlauf, der streng genommen immer noch eine abnehmende Rate aufweist, für technische Belange jedoch als „quasi-stationär“ bezeichnet werden soll. An der Schnittstelle Bohrloch/Tragring der Kaverne nimmt die Konvergenzrate überproportional zu. Es erscheint daher ratsam, eine Aufweitung des Beschickungsbohrloches im kavernennahen Bereich (größenordnungsmäßig 50 m über dem Top der Kaverne) vorzusehen. Damit kann ein Auflaufen des Gebirges auf die Bohrlochinstallation in diesem höher mobilen Bereich verhindert werden.

Die Einschnürung des Schachtes IV im Carnallitbereich ist nicht eindeutig zu erklären. Ursachen können die höhere Kriechgeschwindigkeit des Carnallits sein oder eine Kluft, die den Schacht in diesem Bereich schneidet. Als Konsequenz läßt sich ableiten, daß Diskontinuitäten dieser Art eine erhöhte Mobilität des Gebirges erwarten lassen.

In der Prototyp-Kaverne wurden die fernelektrischen Beobachtungen an den Extensometern planmäßig weitergeführt. Sämtliche relativen Verschiebungen der Extensometer wurden als Funktion der Zeit graphisch dargestellt. Der Verlauf dieser Verschiebungen in Abhängigkeit von der Standzeit zeigt bei fast sämtlichen Meßstellen auch im Jahre 1981 keine grundsätzlichen Änderungen in ihrer bisherigen Tendenz. Allerdings zeigen die Meßwerte bei dem in der Mittelebene gelegenen und nach Süden reichenden Extensometer seit etwa Mitte 1980 gewisse Abweichungen von dem bisherigen allgemeinen Bild

der relativen Verschiebungen. Diese Änderungen waren aber erst im Verlaufe der diesjährigen Beobachtungen als verhältnismäßig signifikant zu beurteilen. Die Ursachen hierfür können zur Zeit noch nicht eindeutig interpretiert werden, zumal eine Inspektion des Extensometerkopfes in der Kaverne bisher nicht möglich war.

Eine gesonderte Analyse der relativen vertikalen Verschiebungen im Kavernendach, ermittelt mit dem Vertikal-Extensometer, zeigt, daß diese Verschiebungen über dem Teufenabschnitt von 926 m bis 967 m linear auch mit der Teufe zunehmen. Mit zunehmender Beobachtungszeit ist auch hier eine Abnahme der Verschiebungsraten festzustellen.

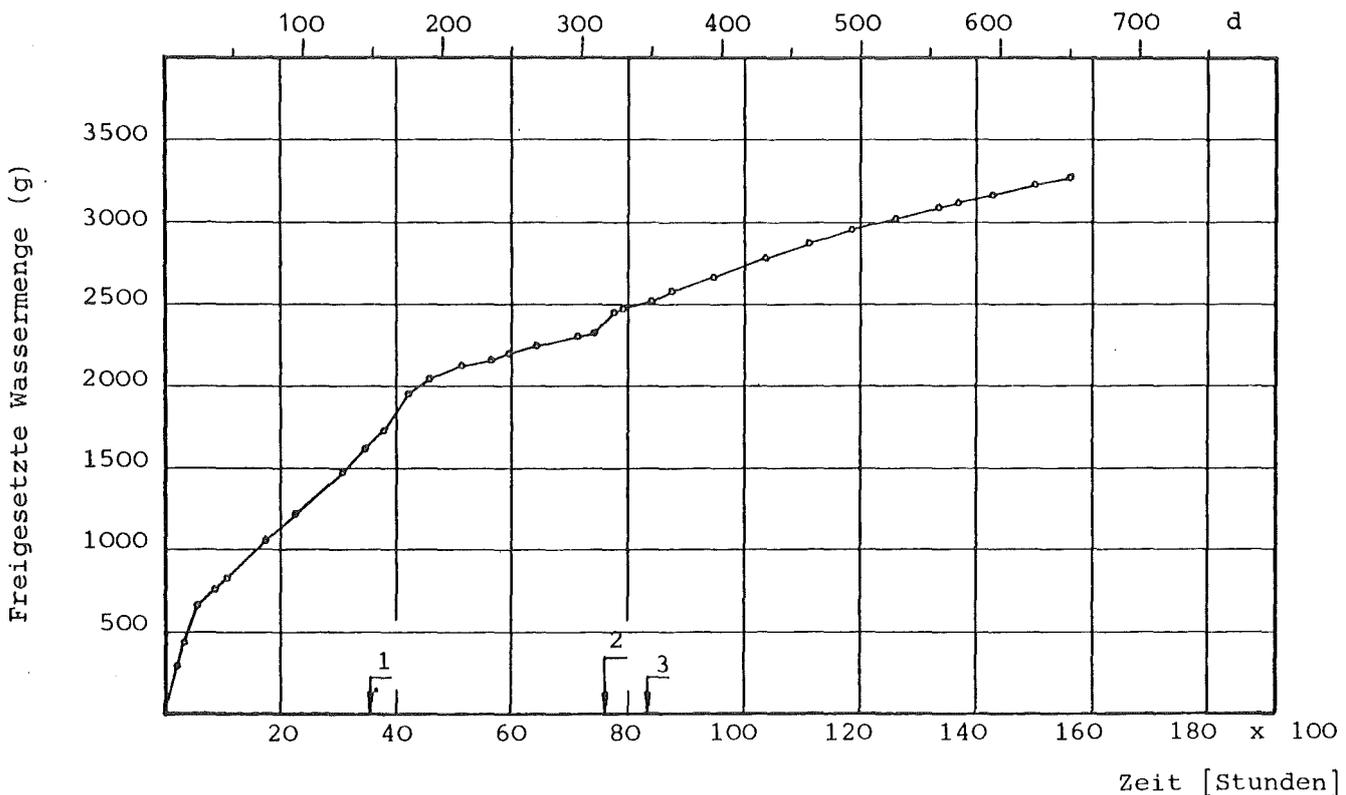
4. Untersuchungen zur Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfälle

4.1 Thermophysikalische in situ-Untersuchungen zur HAW-Einlagerung im Steinsalz

In zwei speziellen Versuchsfeldern des Salzbergwerks Asse wurde die Durchführung von Simulationsversuchen zur HAW-Einlagerung fortgeführt. Der im Temperaturversuchsfeld 4 im Jahre 1980 begonnene „Simulationsversuch im Älteren Steinsalz“ dient der Untersuchung der thermisch induzierten Freisetzung von Wasser- und Gaskomponenten bei der Aufheizung des Steinsalzes infolge der Einlagerung hochradioaktiver Abfälle.

Die Wärmeproduktion der Abfälle wird durch elektrische Erhitzer simuliert, die in ein 15,0 m tiefes vertikales Bohrloch mit 350 mm Durchmesser im Bereich zwischen 9,6 m und 15,0 m Tiefe eingebaut wurden. Die Gesamtleistung der Erhitzer beträgt 9000 Watt, entsprechend 1667 Watt/m oder 53 Watt/Liter. Das Bohrloch wurde im oberen Drittel (5 m) mit einem einzementierten Standrohr und aufgeflanschten Deckel druckdicht verschlossen. Die Temperaturverteilung in der Umgebung des Bohrloches wird in zwei Meßbohrlochfächern dreidimensional erfaßt.

Abb. 4.1-1:
Temperaturversuchsfeld 4 — Zeitlicher Verlauf der Wasserfreisetzung (1 = 40%, 2 = 43%, 3 = 56% Leistungsabfall der Erhitzer)



Der Bericht des Vorjahres schloß etwa mit dem 180. Versuchstag ab. Danach hatte sich die Wasserfreisetzungsrates auf einen mittleren Wert von 2 bis 4 g/Tag stabilisiert, was wahrscheinlich auf die Abnahme der Gesteinstemperatur im Niveau der Erhitzer E2 und E3 und auf die zwischenzeitlich erhöhte Freisetzungsrates zurückgeführt werden muß. An den Versuchstagen 315 und 346 ereigneten sich zwei weitere Leistungsabnahmen, die nach bisheriger Übersicht auf Korrosion der Heizelemente zurückzuführen sind. Nach Versuchstag 315 steigt die Freisetzungsrates von 2-3 g/Tag auf 5-6 g/Tag an. Nach Versuchstag 346 stabilisiert sich die Freisetzungsrates dann zunächst mit 3-4 g/Tag. Dies bedeutet gegenüber der Freisetzungsrates von 2-4 g/Tag zwischen Versuchstag 180 und 315 eine Steigerung von ca. 1 g/Tag (vgl. Abb. 4.1-1).

Langfristig gesehen nimmt die Freisetzungsrates jedoch, ähnlich wie nach dem ersten Leistungsabfall, vermutlich infolge der Abnahme der Gesteinstemperatur ab. Sie beträgt bei Versuchstag 650 noch ca. 1,8 g/Tag.

Die höchste Temperatur von 280°C wurde im Niveau der Erhitzermittellebene auf der Bohrlochwand registriert. Der zugehörige Temperaturgradient betrug im Bereich der Bohrlochwand 8,5°C/cm und in einer Entfernung von 20 cm 6,5°C/cm. Die Aufheizung wurde im November 1981 beendet, nachdem keine weiteren signifikanten Ergebnisse zu erwarten waren.

Der Simulationsversuch im Temperaturversuchsfeld 5 ist dem vorausgehenden Versuch ähnlich. Der Hauptunterschied besteht in der Aufheizprozedur sowie einer Reihe zusätzlicher Messungen (erstmalig in situ-Messungen der Permeabilität).

Anstelle einer konstanten Erhitzerleistung wird die Leistung des Erhitzers stufenweise erhöht, um analog zu den Laborversuchen den temperaturabhängigen Einsatz der Kristallwasserfreisetzung der hydratisierten Nebenminerale Polyhalit (und evtl. Kieserit) zu erfassen. Im Jahre 1981 wurde der technische Aufbau des Versuchs beendet. Es ist geplant, mit dem Versuch im ersten Quartal 1982 zu beginnen.

4.2 Freisetzung und Diffusion der im Steinsalz enthaltenen Wasser- und Gaskomponenten (Laboruntersuchungen)

Bei der Untersuchung des im Steinsalz enthaltenen Wassers wurde festgestellt, daß dessen Hauptanteil von den hydratisierten Nebenmineralen Polyhalit und Kieserit herrührt. Durch die erhöhte Temperatur der eingelagerten wärmeproduzierenden Abfälle kann dieses Wasser in den Intergranular- und Porenraum freigesetzt werden und dann infolge Gesamtdruck-, Partialdruck-, Konzentrations- und Temperaturgradienten diffundieren. Zur mathematischen Erfassung dieser Diffusionsvorgänge wurde ein Modell entwickelt, mit dem es möglich ist, die in ein Endlagerbohrloch eindringende Feuchtigkeitsmenge zu bestimmen. Für diese Betrachtung wurde ein poröses Medium zugrunde gelegt und im Intergranular- und Porenraum ein Zweikomponentensystem bestehend aus Wasserdampf und Luft angenommen. Die Gleichungen für die zeitliche Änderung der Dichte des Wassers im Porenraum wurde in differentieller und integraler Form für kartesische und zylindrische Koordinaten aufgestellt.

Die verschiedenen Transportvorgänge wurden im Labor an Steinsalzproben untersucht und die für die Berechnung der ins Bohrloch eindringenden Wassermenge erforderlichen Diffusionsparameter ermittelt. Hierfür dienten zylindrische Steinsalzproben von Kernbohrungen aus verschiedenen Teufen und stratigraphischen Horizonten. Für die Diffusionskonstante von Wasserdampf im polykristallinen Steinsalz ergaben sich Werte zwischen $0,12 \cdot 10^{-4}$ und $3,10 \cdot 10^{-4}$ cm^2/sec und für die dimensionslosen Koeffizienten der Partialdruck- und Thermoeffusion Werte zwischen -5 und 225.

Die Diffusionskonstante zeigte eine Abhängigkeit von der Temperatur und der Konzentration. Bei gleichen Wasserdampfpartialdrücken ist eine Abnahme mit steigender Temperatur zu erkennen. Diese Abhängigkeit der Diffusionskonstanten einer Probe für verschiedene Temperaturen und Wasserdampfpartialdrücke ist in Abbildung 4.2-1 dargestellt. Die bisherigen Messungen der Porosität ergaben Werte zwischen 0,01 und 0,74 Volumenprozent.

Bei der Bestimmung der Permeabilität, die mit Stickstoff gemäß dem Darcy'schen Gesetz für kompressible Medien durchgeführt wird, zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit vom triaxialen Umgebungsdruck.

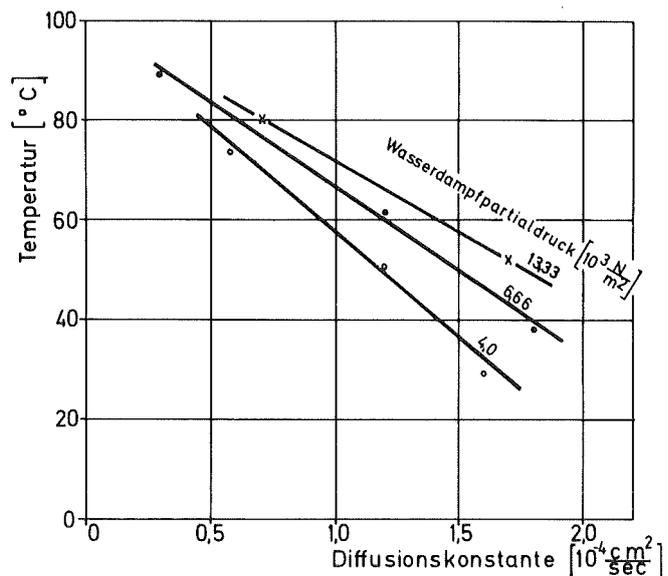


Abb. 4.2-1:
Diffusionskonstante von Wasserdampf im polykristallinen Steinsalz in Abhängigkeit von der Temperatur für die Wasserdampfpartialdrücke 4,0, 6,66 und 13,33 [10^3 N/m^2]

Bei 20 bar Umgebungsdruck variiert die Permeabilität zwischen $< 0,05$ und $121 \mu\text{D}$ und nimmt mit Erhöhung des Umgebungsdruckes auf 140 bar um den Faktor 30 bis 100 ab.

Die thermogravimetrische Untersuchung des natürlichen Steinsalzes ergab, daß in diesem neben dem Wasser noch verschiedene Gaskomponenten, die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle ebenfalls Bedeutung haben können, enthalten sind. An 20 Steinsalzproben aus neuaufgefahrenen Strecken sowie frischen Bohrkernen wurden die folgenden Gaskomponenten gefunden:

- H_2S mit einem Anteil von 0 bis 5 ppm,
- CO_2 mit einem Anteil von 0 bis 300 ppm,
- thermisch erzeugtes HCl , infolge Zersetzung von Spuren- und Nebenmineralen mit einem Anteil von 0 bis 150 ppm,
- gasförmige Kohlenwasserstoffe mit einem Anteil von 0 bis 60 ppm.

Die Angabe ppm bezieht sich immer auf das Salz, d. h. 1 ppm entspricht 1 mg Gas pro 1 kg Salz.

Der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Gaskomponenten und der mineralogischen Zusammensetzung des Salzes wurde ebenso wie die verschiedenen Freisetzungs- und Bildungstemperaturen bisher noch nicht untersucht.

Nachdem an mehreren hundert Steinsalzproben aus dem Bergwerk Asse der Wassergehalt ermittelt wurde, wurden erstmals auch Proben aus den Kalibergwerken Bergmannsseggen-Hugo und Siegfried Giesen sowie aus den Bohrungen 1002 und 1003 des Salzstockes bei Gorleben untersucht. Dabei zeigte sich, daß hinsichtlich des Wassergehaltes zwischen diesen Proben und denen aus dem Salzbergwerk Asse kein grundsätzlicher Unterschied besteht. An den Proben aus dem Salzstock bei Gorleben, die von

übertage mit Lauge- (1002) bzw. mit Ölspülung (1003) gebohrt wurden, sollte ermittelt werden, ob an derartigen Proben eine Wassergehaltsbestimmung sinnvoll möglich ist. Dabei ergab sich, daß an mit Ölspülung gebohrten Proben die im natürlichen Steinsalz enthaltene Wassermenge ermittelt werden kann. Proben, die aus größeren Teufen mit Laugespülung erbohrt wurden, haben über Entspannungsrisse Feuchtigkeit aufgenommen, weshalb der natürliche Wassergehalt dieser Proben nur noch bedingt ermittelt werden kann.

4.3 Untersuchung der Vorgänge beim Eindringen von Wasser oder Lauge in ein Endlager für hochradioaktive Abfälle

Der Einfluß natürlicher Grundwässer, die in ein Endlager für hochradioaktive Abfälle eindringen könnten, wurden weiter untersucht. Im Jahre 1981 konzentrierten sich diese Untersuchungen auf Geländemessungen in vollgelaufenen Schächten, auf Laborversuche zum Übergang von Ionen aus hochgesättigten Lösungen in weniger konzentrierte Phasen und auf Löslichkeitsbestimmungen von Am-241 in unterschiedlich konzentrierten Lösungen.

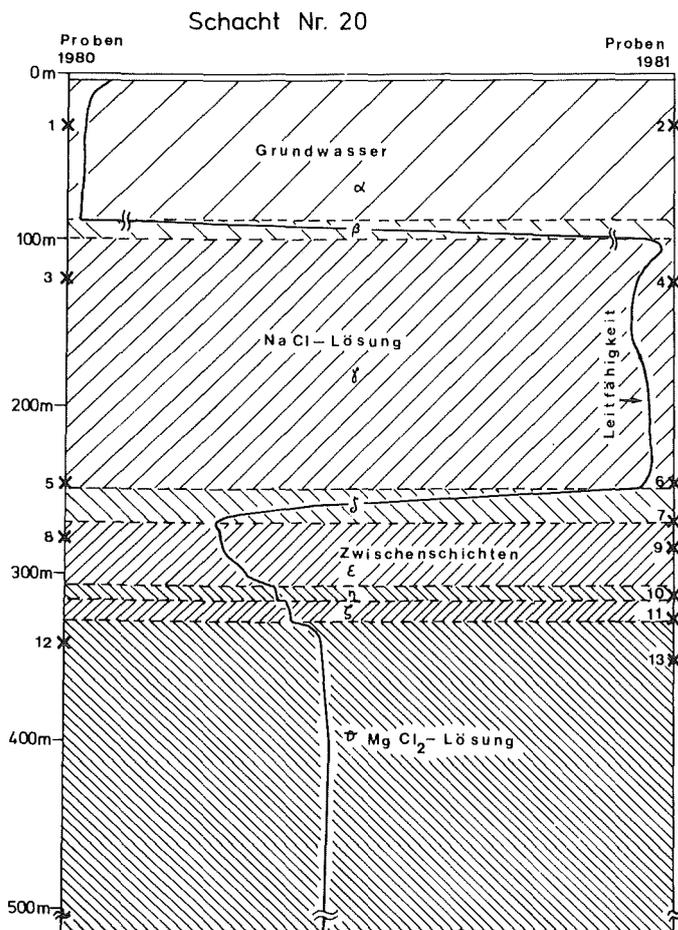


Abb. 4.3-1: Schichtung unterschiedlicher Lösungskörper in einem vollgelaufenen Schacht

Geländemessungen in vollgelaufenen Schächten

Geländemessungen dienen dem Verständnis von Vorgängen, die selbsttätig in vollgelaufenen Schächten ablaufen. Chemische Reaktionen hängen von den Temperaturen der zur Verfügung stehenden Minerale und den vorliegenden Lösungen ab. Das System ist nicht geschlossen und es existiert weder ein thermisches noch ein mechanisches Gleichgewicht innerhalb der flüssigen und der festen Phasen. Trotz mancher nicht repräsentativer Randbedingungen liefern die Meßergebnisse nützliche Informationen über die Verhältnisse in Endlagern in der Nachbetriebszeit.

In acht Schächten wurden Temperatur, Leitfähigkeits- und Strömungslogs aufgenommen sowie Wasserproben entnommen. Da inzwischen mehrjährige Meßergebnisse zur Verfügung stehen, konnten langsame Auf- und Abbewegungen verschiedener Wasserkörper nachgewiesen werden. Die Flüssigkeitsgrenzflächen bewegen sich in vertikaler Richtung mit einer Geschwindigkeit von 0,5 bis 3 cm pro Tag. Ebenfalls konnte gezeigt werden, daß die Zusammensetzung der Lösungen von dem Vorhandensein der Minerale Halit, Carnallit, Sylvin, Polyhalit oder Kieserit abhängt.

Laborversuche

Die Versuche konzentrieren sich auf Transportphänomene in Laugen. Der Versuchsaufbau stellt ein einfaches Modell eines vollgelaufenen Schachtes dar (vgl. Abb. 4.3-1). Die Konzentration der Mg^{++} -Ionen in der oberen Schicht wurde bestimmt. Die untere Schicht wurde zusätzlich mit Zn^{++} -Ionen versetzt, so daß sich dort eine Konzentration von 10 mg/l Zink einstellte. Zink wurde gewählt, da es sehr gut löslich ist und sich mit polarographischen Mitteln (HMDE) gut nachweisen läßt.

Die Konzentration von Mg^{++} und Zn^{++} wurde über 8000 Stunden gemessen. Nach einem steilen Anstieg zu Beginn des Versuches flacht die Konzentrations-Zeit-Kurve allmählich ab. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt scheint die Diffusion durch die scharfe Grenzschicht zwischen der $MgCl_2$ - und $NaCl$ -Schicht zu sein.

Feldversuche im Salzbergwerk Asse

Der Versuchsablaufplan für den ersten Versuch in einer gefluteten Strecke wurde erstellt. Das Versuchsfeld 1 wurde geologisch detailliert kartiert. Die mineralogischen Untersuchungen der verschiedenen stratigraphischen Horizonte sind abgeschlossen. Es ist vorgesehen, einen Erhitzer von 2 m Länge und 38 cm Durchmesser 3 m unter der Sohle einzubauen. Die Verfüllung erfolgt mit Salzbeton. Die Temperaturen werden an verschiedenen Punkten im Salzgestein und in der Salzlösung registriert. Daneben werden Konzentrationen, Strömungen und Auflösungen beobachtet. Ein direkter Zugang zu der beheizten Fläche ist vorgesehen. Hauptziele dieses Versuchsfeldes sind die Untersuchung des Stofftransportes aus dem beheizten Bohrlochverschluss und der Vergleich von gemessenen und vorhergesagten Strömungs- und Auflösungsbeiträgen.

4.4 Deformationsmessungen in untertägigen Hohlräumen im Zusammenhang mit in situ-Versuchen

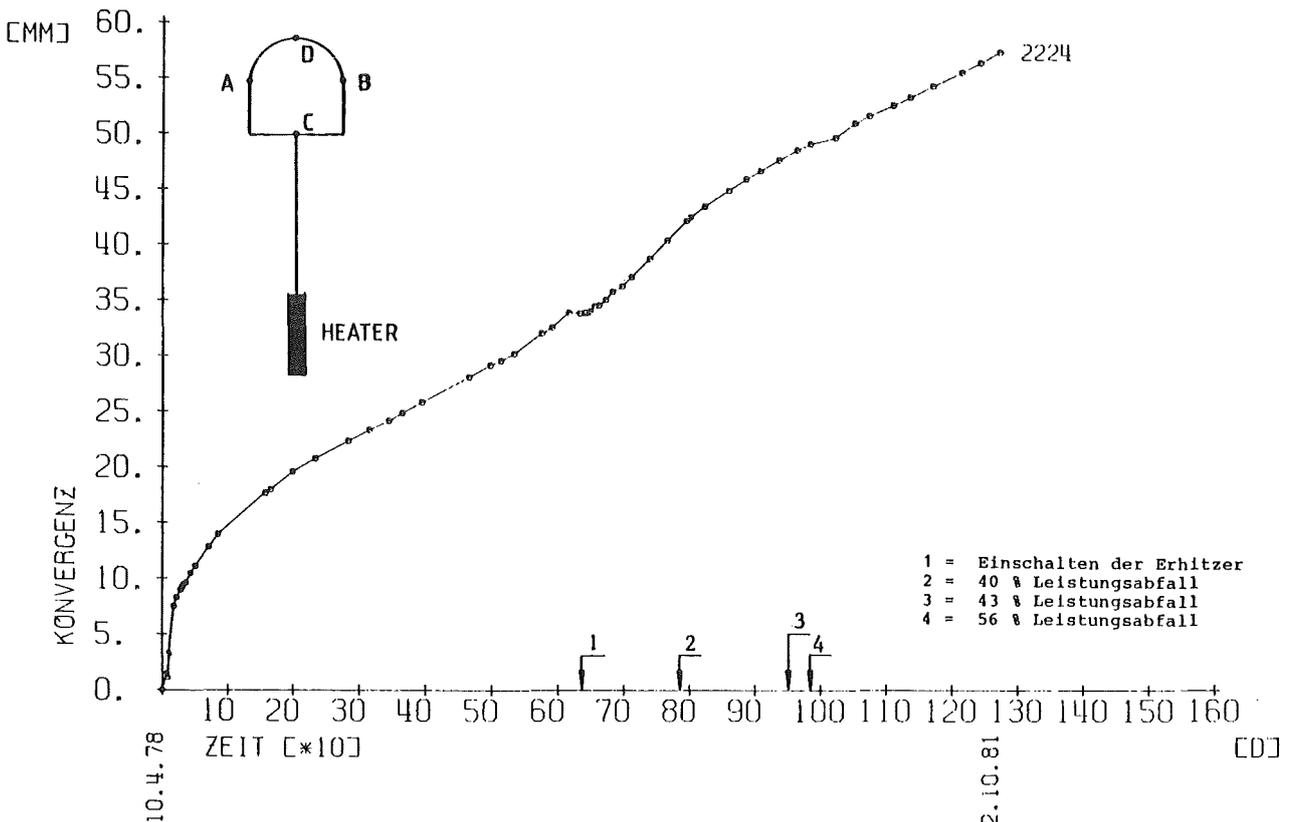
Zur Ermittlung des rheologischen Gebirgsverhaltens werden sowohl vor und während als auch nach den Aufheizungen des Gebirges Extensometer- und Konvergenzmessungen durchgeführt. Mit Hilfe der gewonnenen Meßdaten werden die in der Entwicklung befindlichen Rechenprogramme und die darin verwendeten rheologischen Modelle auf ihre Aussagefähigkeit hin überprüft.

Deformationsmessungen im Temperaturversuchsfeld 4 (TVF 4)

Die Messungen wurden fortgesetzt. Die Anordnung der Extensometer- und Konvergenzmeßstellen ist im Jahresbericht 1978 ausführlich beschrieben, während über die Ergebnisse bis zum 800. Versuchstag im Vorjahr berichtet wurde.

Nach Meßtag 900 (vgl. Abb. 4.4-1) betrug die Konvergenzrate wieder $3,2 \cdot 10^{-2}$ mm / Tag bei noch abnehmender Tendenz. Nach Meßtag 1100 beträgt sie $2,9 \cdot 10^{-2}$ mm / Tag und liegt damit unter dem Betrag, der vor der Aufheizung registriert wurde. Diese Abnahme der Konvergenzrate ist vermutlich auf den Abbau der Gebirgsspannungen infolge von Kriechverformung zurückzuführen.

Abb. 4.4-1:
Horizontale Streckenkonvergenz (AB) im Temperaturversuchsfeld 4



Messung der Bohrlochkonvergenz

Zusätzlich zu den Streckenkonvergenzmessungen wurde auch die Konvergenz im noch nichtaufgeheizten Bohrloch 3 des TVF 4 gemessen. Das Bohrloch wurde parallel zum Bohrloch 2 in einer Entfernung von 20 m vertikal nach unten angelegt. Es hatte einen Anfangsdurchmesser von 350 mm. Die Messungen wurden 6 Monate nach der Bohrlocherstellung aufgenommen. Dem Verlauf der Konvergenz in der Bohrlochtiefe A (12,8 m) kann entnommen werden, daß kurz nach Einschalten der Erhitzer im Bohrloch 2 ein leichter Anstieg der Konvergenzraten zu verzeichnen ist. Die Konvergenzrate stieg von $0,15 \cdot 10^{-2}$ mm / Tag auf $0,17 \cdot 10^{-2}$ mm / Tag. Nach 160 Tagen Aufheizung betrug sie jedoch wieder $0,15 \cdot 10^{-2}$ mm / Tag bei noch abnehmender Tendenz. Nach 633 Tagen Aufheizung im Bohrloch 2 beträgt die Konvergenzrate nunmehr $0,13 \cdot 10^{-2}$ mm / Tag.

4.5 Ermittlung von Absolutspannungen im nicht aufgeheizten und aufgeheizten Gebirge

In situ-Spannungsmessungen werden durchgeführt, um Kenntnis über Entwurfparameter von untertägigen Hohlräumen zu erhalten. Während z. B. in Tunneln oder im unterirdischen Kraftwerksbau bisher oberflächennah gemessen werden konnte, werden in der angewandten Felsmechanik an die Spannungsmessungen im Zusammenhang mit der Gewinnung geothermischer Energie, der in situ-Kohlevergasung und nicht zuletzt für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in großen Teufen erhöhte Anforderungen an die Meßmethoden gestellt.

Im Laufe des Jahres 1981 wurden auf der Schachanlage Asse zwei Spannungsmeßverfahren angewandt, das Hydro-frac-Verfahren und der Einbau von flachen Druckzellen (Monitor-Station). Ein wesentliches Ziel war es, die technische Handhabung der Verfahren im Salzgestein zu erproben. Das Hydro-frac-Verfahren ist vom Prinzip her geeignet, Spannungsmessungen in großen Teufen durchzuführen. Die Monitor-Station bietet die Möglichkeit, Änderungen der Spannungskomponenten über einen längeren Zeitraum zu registrieren. Im Gegensatz zu den häufig angewandten Überbohrverfahren (Bohrlochentlastungsverfahren) ist bei den Hydro-frac-Messungen keine Kenntnis des YOUNG'schen Moduls erforderlich. Hydro-frac-Messungen, die im Bereich der 800 m-Sohle durchgeführt wurden, ergaben, daß

- der Spannungszustand nicht lithostatisch ist,
- die Richtung der größten Hauptspannung von der vertikalen abweicht.

4.6 Experimentelle Untersuchung der rheologischen Eigenschaften von Salzgestein

Einaxiale Versuche

An einer 200-MP-Druckprüfmaschine, die mit einem Drei-Zonen-Prüfofen ausgerüstet wurde, wurden bei Temperaturen von 23, 50, 100, 150 und 200° C je fünf einachsige Druckversuche an zylindrischen Prüfkörpern aus Jüngerem Steinsalz durchgeführt. Die Belastung sowie die Zwischenbelastung und -entlastung der Proben wurde mit einer Spannungsgeschwindigkeit von 10 bar/min vorgenommen. Die Versuche ergaben, daß die Bruchspannung linear mit der Temperatur abnimmt. Bei 200° C ist sie gegenüber Raumtemperatur um 30% abgesunken. Die Bruchdehnung steigt im gleichen Temperaturintervall exponentiell von 2,5% auf 14%.

In Ergänzung zu den im Jahre 1980 durchgeführten Spaltzugversuchen wurden weitere mittelbare Zugversuche in Form von 25 Biegezugversuchen (100 mm Ø x 100 mm) und 10 Torsionsversuchen (50 mm Ø x 100 mm) an Jüngerem und Älterem Steinsalz durchgeführt. Während die Biegezugfestigkeitswerte gegenüber der einaxialen Zugfestigkeit recht groß sind (Faktor 3), stimmen die Zugfestigkeiten aus dem Torsionsversuch recht gut (Abweichung ±5%) mit der einaxialen überein.

Triaxiale Experimente

Die Triaxial-Versuche an Asse-Salzgestein wurden im Berichtsjahr mit folgenden Schwerpunkten fortgesetzt:

- Aufnahme von Spannungs-Verformungskennlinien des Jüngerem Steinsalzes in dehnungsgeregelten quasi-statischen Experimenten unter Mantelspannungen bis zu 20 MPa.
- Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher axialer Stauchungsraten auf die Bruchspannung und Bruchverformung bei einer konstanten Mantelspannung.
- Durchführung erster Experimente unter erhöhten Temperaturen bis zu 423 K.

Der im Vorjahr mitgeteilte Befund, ermittelt mit einer geringeren Probenzahl und einem weniger gespreizten Manteldruckbereich, muß insoweit korrigiert werden, als zwischen der maximalen Oktaederschubspannung im Scheitelpunkt der Spannungs-Verformungs-Kennlinie und der dieser zugeordneten logarithmischen axialen Bruchstauchung kein linearer Zusammenhang besteht. Die Regression der Versuchsdaten ergibt für den erwähnten Manteldruckbereich einen exponentiellen Zusammenhang. Experimente bei unterschiedlichen Mantelspannungen ergaben, daß die maximale oktaedrische Schubspannung sehr stark von der Verformungsrate bzw. axialen Stauchungsrate beeinflusst wird.

Erste Untersuchungen an Jüngerem und Älterem Steinsalz Na₃ und Na₂ bei Temperaturen von 323, 373 und 423 K und Mantelspannungen von 10 bzw. 15 MPa zeigen, daß bei Temperaturen ≥ 373 K die Proben nicht mehr im Sinne eines Bruches versagen, sondern, bei allerdings verminderter Deviatorspannung, unter ganz erheblicher axialer Stauchung und Querdehnung allmählich ihre Grenztragfähigkeit überschreiten.

Eine Serie von Langzeitkriechversuchen an Proben des Älteren Steinsalzes aus dem Temperatur-Versuchsfeld 4 wurde nach 485 Tagen abgeschlossen. Die Temperatur betrug 27° C und der einaxiale Druck 153 bar. Aus der Längenänderung und der Zeit wurden Kriechkurven, primäre und sekundäre Kriechgeschwindigkeiten sowie die Bruchdehnung berechnet.

Bei einem der Versuche konnte die Gesamtdehnung beim Kriechbruch ermittelt werden, drei Versuche wurden abgebrochen, nachdem der tertiäre Kriechbereich etwa zur Hälfte durchlaufen war. Die Gesamtdeformation von 2,6% beim Kriechbruch stimmt recht gut mit der Bruchdehnung der unter gleichen Bedingungen durchgeführten Kurzzeitdruckversuche von 2,5% überein.

4.7 Geophysikalische Untersuchung und Überwachung des Gebirgsverhaltens in der Umgebung untertägiger Temperaturversuche

Als Folge des Erhitzens von Gestein müssen Änderungen seiner mechanischen Eigenschaften sowie der Spannungsverteilung erwartet werden. Plötzliche Entspannungsvorgänge und Rißbildung sind dabei möglich. Es soll untersucht werden, inwieweit solche Vorgänge mit zerstörungsfreien seismischen Methoden überwacht werden können. Da Änderungen der mechanischen Eigenschaften auch die Ausbreitungsgeschwindigkeiten seismischer Wellen beeinflussen, sollen die Kompressionswellen (P)- und die Scherwellengeschwindigkeit (S) regelmäßig zwischen verschiedenen festen Punkten in der Umgebung von Temperaturversuchen gemessen werden. Gegenwärtig werden die Anfangswerte (ohne Erhitzung) bestimmt.

Mikroseismische Aktivität

Das passive Überwachungssystem, das aus sieben Geophonen besteht, die im Grubengebäude der Asse

verteilt sind, ist seit Mai 1981 in Betrieb. Die Ortungsgenauigkeit konnte durch die Registrierung einer Reihe von Kleinsprengungen an bekannten Orten verbessert werden. Mit dieser Methode kann ein unbekannter Erschütterungsherd durch „Anhängen“ an eine nahegelegene Kleinsprengung beurteilt werden. Im Gegensatz zum bisher angewandten Verfahren werden damit großräumige Inhomogenitäten der seismischen Geschwindigkeitsverteilung sowie Anisotropien berücksichtigt.

In der unmittelbaren Umgebung des Temperaturversuchsfeldes 4 konnte keine mikroseismische Aktivität festgestellt werden. Gelegentlich gab es geringere Aktivität in der Umgebung von Temperaturversuchsfeld 5, zuletzt am 15. Mai 1981. Dies wird mit Entspannungsvorgängen infolge der erst kürzlich erfolgten Auffahrung erklärt.

Durchschallungsmessungen

In der Umgebung des Hexagons und des Temperaturversuchsfeldes 5 sind Vorkehrungen getroffen worden, um zwischen fest installierten Schlag- und Meßpunkten wiederholt seismische Laufzeiten bestimmen zu können.

Die ersten Messungen sind erfolgt. Die Ergebnisse können an Ort und Stelle vom Bildschirm abgelesen werden, es besteht aber auch die Möglichkeit, die Signale für weitere Analysen auf Digitalband zu registrieren.

Die bisher gemessenen P-Geschwindigkeiten liegen im Bereich 4540 bis 4670 m/s parallel zum Streichen und 4270 bis 4380 m/s senkrecht zum Streichen (Steinsalz).

Die S-Geschwindigkeiten sind 2500 bis 2620 m/s bzw. 2450 bis 2520 m/s. Diese Werte ergeben dynamische Poisson-Verhältnisse von 0,24 bis 0,27.

4.8 Entwicklung von Rechenmethoden für Standfestigkeitsberechnungen unter Berücksichtigung erhöhter Temperaturen

Thermomechanische Berechnungen für den Nahbereich eines HAW-Lagerfeldes

Im Berichtszeitraum wurden Entwicklungsarbeiten zur Verbesserung der Rechenmethoden (Rechenmodelle) ausgeführt, um eine realistische Betrachtung der thermomechanischen Probleme im Nahbereich eines HAW-Lagerfeldes zu ermöglichen. Dabei standen die Formulierung einer Stoffgleichung zur Beschreibung des Deformationsverhaltens eines plastisch-kompressiblen Versatzmaterials (wie z. B. Salzgrus) und eines temperaturabhängigen Festigkeitskriteriums zur Berücksichtigung einer endlichen Materialfestigkeit und Einbau im FEM-Programm MAUS im Mittelpunkt.

Weiterhin wurden Modellrechnungen zur in situ-Erprobung der entwickelten Bohrlochkonvergenzmeßsonde (Standardsonde) durchgeführt. Wie bereits früher berichtet, bestand zwischen Rechen- und Meßergebnissen eine gute Übereinstimmung. Zur Absi-

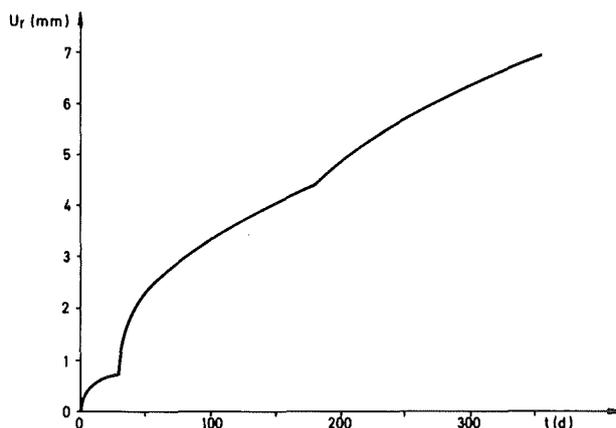


Abb. 4.8-1: Radiale Verschiebung der Bohrlochwand als Funktion der Zeit in der Mitte der Wärmequelle (Simulationsversuch)

cherung der Ergebnisse wurden weitere Rechnungen mit dem Ziel durchgeführt, die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber der Variation von verschiedenen Parametern des Stoffgesetzes zu überprüfen sowie den Einfluß der Spannungsbedingungen einschließlich der horizontalen Spannungsanisotropien im Gebirge bzw. am Versuchsort zu ermitteln.

Modellrechnungen zum „Simulationsversuch im Salzbergwerk Asse“ wurden ebenfalls durchgeführt. Zweck dieser Rechnungen waren die Abschätzung der Geschwindigkeit der Bohrlochkonvergenz bis zum Auflaufen des Salzes auf die Verrohrung sowie die Ermittlung der zu erwartenden Druckbelastungen auf die Bohrlochkonvergenz nach der stufenweisen Erhöhung der Wärmeleistung. Der Anfangsdurchmesser der Bohrlöcher betrug 330 mm.

In Abbildung 4.8-1 ist die radiale Verschiebung der Bohrlochwand in der Mitte der Wärmequelle als Funktion der Zeit dargestellt.

Optimierung der vorliegenden Rechenprogramme zur Bestimmung der Temperaturentwicklung

Die bisher verfügbaren zweidimensionalen Rechenprogramme in RZ-Geometrie, TEFELD, ASYTE und ASTEFE, sind hinsichtlich der Modellgeometrie, d. h. der Einteilung des betrachteten Volumens in Zonen und unterschiedliche Materialeigenschaften, relativ unflexibel und schwer zu erweitern. Es wurde daher ein neues zweidimensionales Grundprogramm in RZ-Geometrie erstellt, ausgehend von dem 3D-Programm CUBSIT. Aufgrund des bisher verwendeten modalen Verfahrens werden damit weitgehend Möglichkeiten zur Vorgabe vieler unterschiedlicher Materialzonen sowie eine wesentlich bessere Rechenökonomie erreicht.

Für dieses Programm FAST-RZ wurde ein Rechenalgorithmus zur Überprüfung der Rechengenauigkeit entwickelt, der die Grundlage für eine optimale Zeitschrittsteuerung bilden soll. Dieser Algorithmus kann auch für die übrigen verfügbaren Rechenprogramme verwendet werden.

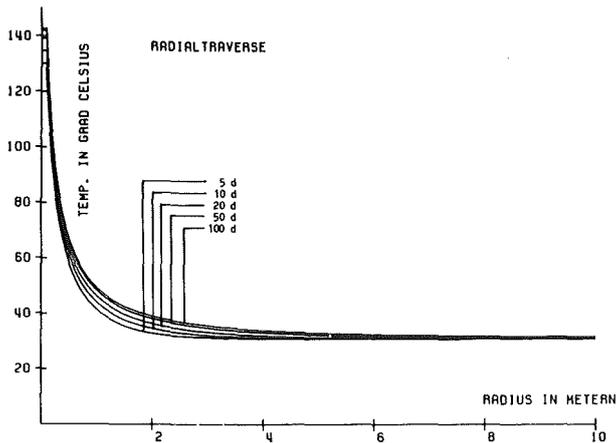


Abb. 4.8-2:
Radiale Temperaturverteilung in der Erhitzermittelebene der Konvergenzmeßsonde

Für die verfügbaren 2- und 3-dimensionalen Rechenprogramme CUBSIT, FASTBEST, DUB3DG, GERA und ASYTEIKA wurden zusätzlich Unterprogramme erstellt, die eine graphische Darstellung der verwendeten räumlichen Diskretisierung und Zonenaufteilung ermöglichen. Dies ist von großem Nutzen sowohl für die optimale Gestaltung der Diskretisierung wie auch für das Aufdecken von Eingabefehlern. Von besonderer Bedeutung wird diese Möglichkeit für das durch Kopplung mehrerer Programme bzw. Modelle zu erstellende Programmsystem zur Erfassung realistischer Einlagerungsbedingungen sein. Bei dessen Anwendung werden pro Rechnung bis zu vier verschiedene geometrische Modelle mit unterschiedlicher Diskretisierung und Zonenaufteilung benötigt.

Als Anwendung der Rechenprogramme wurden die Temperaturen für die inzwischen angelaufenen in situ-Versuche mit der Standard-Sonde berechnet und für thermomechanische Analysen bereitgestellt. In Abbildung 4.8-2 sind die auftretenden räumlichen Temperaturen in Form von Radialtraversen in der Erhitzermittelebene zu verschiedenen Zeiten dargestellt.

4.9 Entwicklung von technischen Einrichtungen und Geräten für Transport und Endlagerung

In situ-Untersuchung der Standfestigkeit von Verrohrungen in Bohrlöchern

Unter dem Aspekt einer rückholbaren Versuchseinlagerung von hochaktiven Glasblöcken wurde zur Ermittlung der Druckbelastung einer Verrohrung durch das Salz infolge wärmeinduzierter Bohrlochkonvergenz eine Rohrstrecke aufgebaut und mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) instrumentiert.

Parallel dazu wurden in einem Hochdruckversuchsstand Laborversuche zur Ermittlung des Driftverhaltens der DMS durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß der DMS-Typ 1 eine lineare Driftrate ($< 0,16 \mu \epsilon / \text{Tag}$)

aufweist und die Meßwerte einfach korrigiert werden können. Beim in situ-Versuch wurde zuerst eine Leistung von 1,5 kW eingespeist, sie war jedoch zu gering. Erst nach einer Erhöhung auf maximal 3,6 kW (maximale Temperatur an der Rohroberfläche ca. 310°C) erhielt das Salz nach 320 Meßtagen Kontakt mit der Verrohrung. Die Belastung der Rohrstrecke betrug im Mittel $360 \pm 50 \text{ bar}$. Mit einer größeren Anzahl von Meßstellen würde diese Einrichtung erlauben, mittlere Druckbelastungen der Rohrstrecke zu ermitteln und auch evtl. vorhandene Abweichungen von der axialen Symmetrie des radialen Spannungsfeldes, wie sie sich aus den Schwankungen der bisher gewonnenen Meßwerte andeuten, festzustellen.

In situ-Messungen der Konvergenz von beheizten Bohrlöchern in Salzformationen

Die hierzu entwickelte Konvergenz-Meßsonde (Abbildung 4.9-1) wurde in drei in situ-Versuchen auf der 775 m-Sohle im Salzbergwerk Asse eingesetzt. Die im Labor erprobte Handhabung der einzelnen Komponenten kann ohne Schwierigkeiten beim in situ-Einsatz angewendet werden. Das Bohrloch wurde über einen Zeitraum von 104 Tagen, sieht man von den Ausfällen des Grubennetzes ab, konstant mit 1,2 kW beheizt.

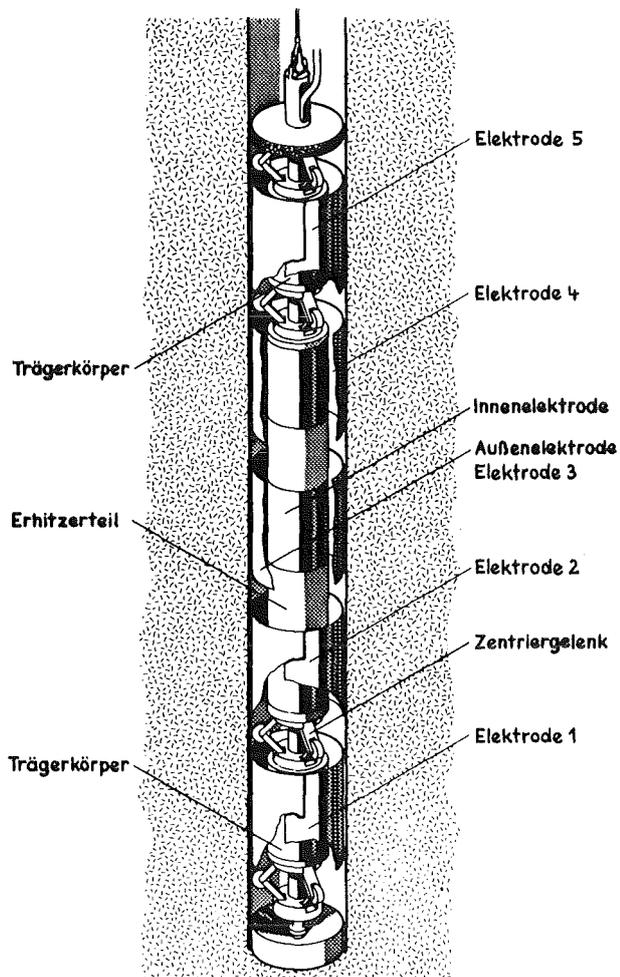


Abb. 4.9-1:
Schematischer Aufbau der Konvergenzmeßsonde

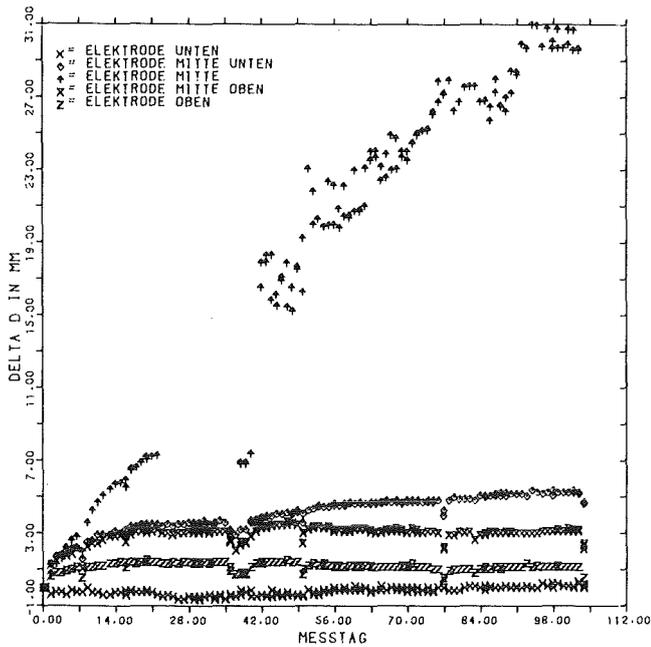


Abb. 4.9-2:
Änderung des Bohrlochdurchmessers D als Funktion der Zeit (Konvergenzmeßsonde, 1. in situ-Versuch)

In Abb. 4.9-2 ist die zeitliche Änderung des Bohrlochdurchmessers an den 5 Meßstellen dargestellt. Elektrode 1 und Elektrode 5 zeigen nahezu keinen Anstieg der Konvergenz. Hingegen ist an den Elektroden 3 und 4 entsprechend der höheren Temperatur ein deutlicher Anstieg der Konvergenz bei Aufheizbeginn zu erkennen (bis zu 0,8 mm/d). Die Meßwerte für Elektrode 2 wurden mit den Werten des Rechenprogramms „ADINA“ verglichen. Es zeigte sich bei den gewählten Stoffparametern und Randbedingungen eine gute Übereinstimmung.

Die Meßwerte der Elektrode 3 konnten erst nach Beendigung des Versuchs interpretiert werden. Durch eine Salzausblühung im Bohrloch wurde die Außenelektrode an dem überlappenden Ende nach innen gedrückt, d. h. es wurde keine Konvergenz des Salzes, sondern das Anwachsen der Laugenausblühung gemessen. Um solche Effekte durch geeignete Positionierung der Außenelektroden auszuschließen bzw. voraussagen zu können, wäre es sinnvoll, von jedem Bohrloch eine Kernbohrung zur Lokalisierung von laugeführenden Schichten zu ziehen.

Abschließend kann festgestellt werden, daß die entwickelte Sonde ihre Eignung für systematische in situ-Konvergenzmessungen gezeigt hat.

Entwicklung eines HAW-Transport- und Einlagerungssystems

Nach erfolgreicher Erprobung der für die Einlagerung und Rückholung hochradioaktiver Abfälle notwendigen technischen Komponenten in Technikumversuchen wurde eine ausbaufähige und variable Versuchsstation in der Asse auf der 775 m-Sohle installiert und erprobt (Abbildung 4.9-3). In der ersten Ausbaustufe können alle Komponenten des Manipulationssystems wie Tragkabelwindenanlage, Greifer und Kokille im Betriebsablauf und in Störfallsituationen getestet werden. Die Erprobung des Einlagerungs- und Rückholvorganges von Kokillen erfolgt in einer 15 m tiefen und in ihrem unteren Teil beheizten Rohrstrecke.

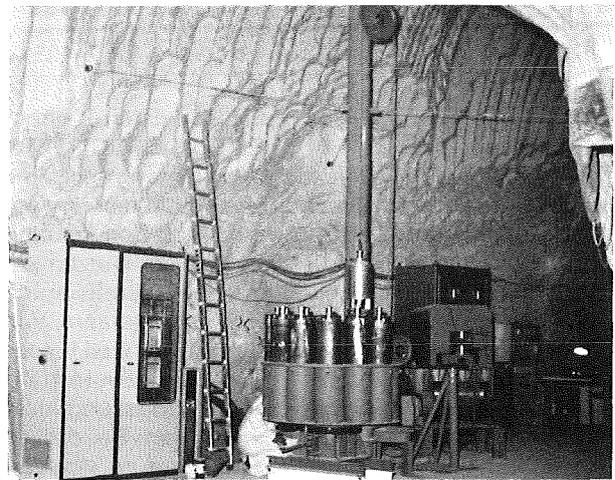


Abb. 4.9-3:
Versuchsstation zur Erprobung von technischen Komponenten für die Einlagerung und Rückholung hochradioaktiver Abfälle in der Schachtanlage Asse auf der 775 m-Sohle

Durch den weiteren Ausbau des Versuchsfeldes mit den im Entwurf fertiggestellten Komponenten, wie Bohrlochschieber, Transportbehälter sowie Be- und Entlademaschine kann das HAW-Einlagerungssystem Schritt für Schritt unter in situ-Bedingungen erprobt werden.

5. Lagerung und Verfestigung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen in untertägigen Hohlräumen

Die zweite Phase des Projektes „Lagerung und Verfestigung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen in untertägigen Hohlräumen“ wurde im Jahre 1981 abgeschlossen. Ziel dieser Projektphase war es, durch sicherheitstechnische, verfahrenstechnische und Produktuntersuchungen die technische Durchführbarkeit des Konzeptes zu belegen und Daten für ein sicherheitstechnisches Konzeptgutachten bereitzustellen. Die Arbeiten wurden durch die Leitung des Projektes „Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung“ (Kernforschungszentrum Karlsruhe) koordiniert.

Die Arbeiten der EGT konzentrieren sich dabei hauptsächlich auf die Bereitstellung von Daten für ein bergtechnisches und sicherheitstechnisches Konzept und beinhalten im wesentlichen

- Untersuchungen zur Tritiumfreisetzung,
- die Temperaturentwicklung im Produkt und in der salinaren Umgebung,
- Untersuchungen zur gebirgsmechanischen Standsicherheitsanalyse,
- die Herstellung des Kavernensystems und
- in situ-Untersuchungen an Modellkavernen.

5.1 Untersuchungen zur Tritiumfreisetzung aus dem Referenzprodukt

Bei der behälterlosen Endlagerung zementierter flüssiger LAW/MAW-Abfälle in Großkavernen sind für die HTO-Freisetzung aus der Kaverne zwei Freisetzungspfade zu betrachten. Wird zum Anmachen der Zwickelfüllung HTO-haltiges Abfallwasser (die Tritiumaktivität der betrachteten Abwässer beträgt ca. 130 Ci/m^3) verwendet, kann es aufgrund der beim Abbinden des Zementes auftretenden erhöhten Temperaturen zu einer HTO-Freisetzung in die Kavernenatmosphäre als H_2O (HTO)-Dampf kommen. Der zweite Freisetzungspfad muß für den angenommenen Störfall „Wassereinbruch“ betrachtet werden. Hier kann das im Produkt enthaltene HTO beim Kontakt mit wäßrigen Salzlösungen ausgelaugt werden.

Tritiumfreisetzung über die Gasphase

Würde für die als Lagerräume vorgesehenen Kavernen eine Zwangsbelüftung zugrunde gelegt, kann in Abhängigkeit vom Luftdurchsatz der Luftaustauschrate im Kavernenhals und der Temperatur in der Kaverne HTO über die Gasphase an die Umgebung übertage abgegeben werden. Um die HTO-Freisetzung aus dem Produkt unter „in situ“-Bedingungen experimentell zu ermitteln, wurden entsprechende Versuche mit dem Referenzprodukt durchgeführt (vgl. Tab. 5.1-1).

Ein Vergleich der theoretisch möglichen mit den ermittelten Freisetzungsmengen bei vollständiger Aushärtung des Produkts zeigt, daß bei 40°C innerhalb

Bestandteile	Anteil [Gew. %]
HOZ 35L - NW/HS	18,6
Normsand (DIN 1164)	18,6
Granulat ($\sim 52 \text{ Vol}\%$)	54,8
Wasser	7,4
Addiment VZ1 (Verflüssiger)	0,3
CFR - 2 (Verzögerer)	0,3

Tabelle 5.1-1:
Zusammensetzung des Referenzproduktes

von 28 Tagen etwa der theoretisch mögliche Wasseranteil freigesetzt wird.

Tritiumfreisetzung über den Wasserpfad

Die HTO-Freisetzung über den Wasserpfad kann beim Kontakt des verfestigten Produktes mit wäßrigen Salzlösungen erfolgen. Zur Ermittlung der dabei zu erwartenden Freisetzungsmengen wurden eine Reihe von Laborversuchen mit HTO-haltigen Zementprodukten (PZ 35F) durchgeführt. Die HTO-Freisetzung wurde als Funktion der Parameter Abbindezeit, Wasser/Zement-Wert und Auslaugmedium erfaßt.

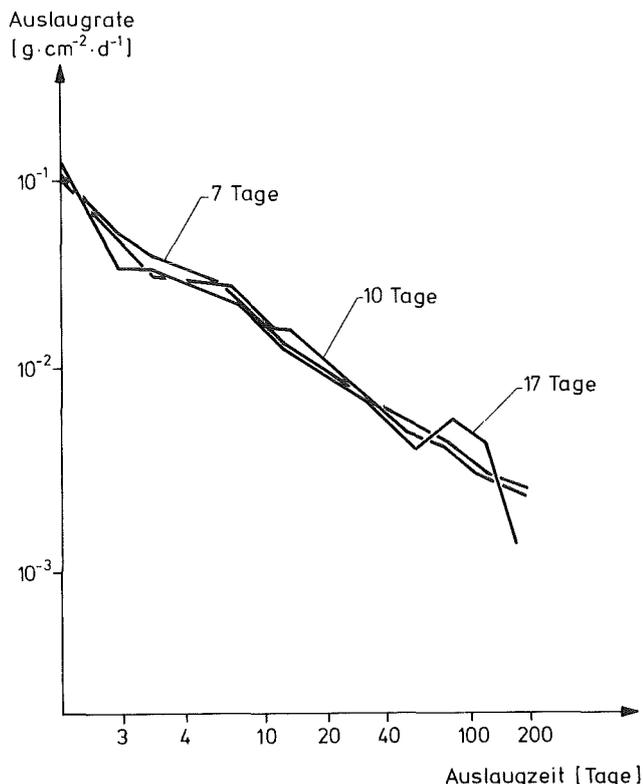


Abb. 5.1-1:
Differenzielle HTO-Auslaugraten für Zementprodukte mit unterschiedlichen Vorlagerzeiten

Zur Untersuchung des Auslaugverhaltens als Funktion der Abbindezeit wurden drei verschiedene Aushärtzeiten, 7, 10 und 17 Tage, gewählt. Abbildung 5.1-1 zeigt den zeitlichen Verlauf der differentiellen HTO-Auslaugraten. Nach einer Auslaugzeit von 100 Tagen beträgt die insgesamt freigesetzte HTO-Aktivität ca. 4,2% der HTO-Gesamtaktivität. Das Ergebnis zeigt, daß Abbindezeiten zwischen 7 und 17 Tagen keinen Einfluß auf die HTO-Auslaugung haben.

Abbildung 5.1-2 zeigt den zeitlichen Verlauf der differentiellen HTO-Auslaugraten in Abhängigkeit vom W/Z-Wert.

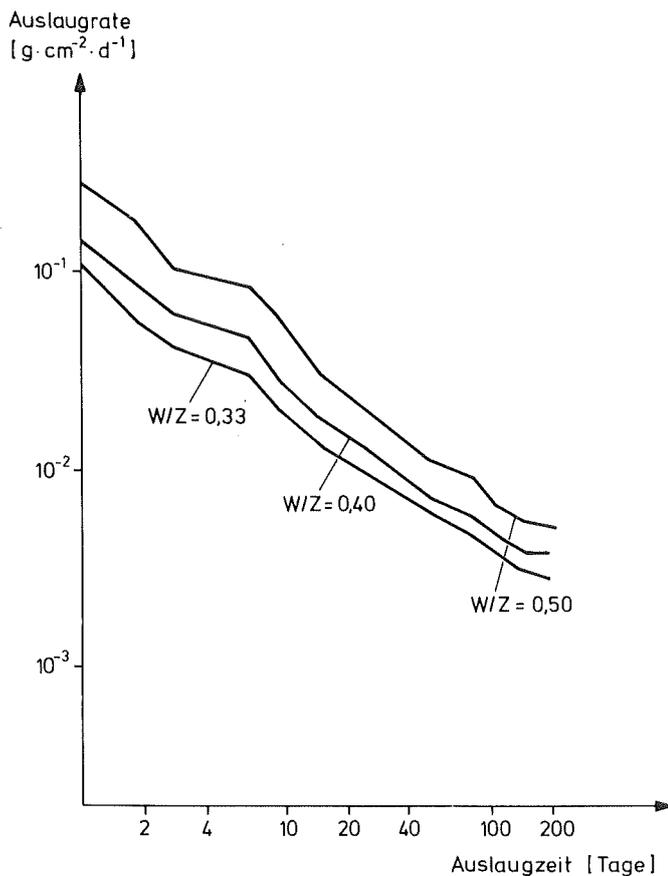


Abb. 5.1-2:
Differentielle HTO-Auslaugraten für Zementprodukte mit unterschiedlichem W/Z-Wert

Die Ergebnisse zeigen sehr deutlich, daß ein steigender W/Z-Wert mit einer Erhöhung der Auslaugraten verbunden ist. Sind bei einem W/Z-Wert von 0,33 nach 100 Tagen 4,1% der eingesetzten Aktivität ausgelaugt, so sind es bei einem W/Z-Wert von 0,4 schon 5,7% bzw. bei einem W/Z-Wert von 0,5 bereits über 10%. Für die weiteren Untersuchungen wurde deshalb ein W/Z-Wert von 0,33 und ein Fließmittelzusatz von 2 Gew.-% im Endprodukt benutzt, um eine hinreichende Verarbeitung zu gewährleisten.

Weitere Versuche ergaben, daß die HTO-Freisetzung von der Zusammensetzung des Auslaugmediums nicht beeinflußt wird.

5.2 Temperaturentwicklung im Produkt und in der salinaren Umgebung

Für sicherheitstechnische Betrachtungen ist die Kenntnis der zu erwartenden Wärmeentwicklung und der damit im Produkt und im Gebirge auftretenden Temperaturen von Bedeutung. Die insbesondere durch den Abbindevorgang des Fixiermittels Zement sowie die durch den radioaktiven Zerfall der Abfälle freigesetzte Wärme könnten im Laufe der Lagerzeit unzulässig hohe Temperaturen im Abfallprodukt bewirken, die eine negative Änderung einzelner Produkteigenschaften als Folge haben würden. Um solche unerwünschten Vorgänge zu vermeiden, wurde für die Untersuchungen die maximal zulässige Produkttemperatur auf 90°C begrenzt, d. h. eine Temperatur, die unterhalb des Siedepunktes des in Zementstein enthaltenen freien Wassers liegt.

Ziel der durchgeführten Temperaturberechnungen ist es festzustellen, unter welchen Bedingungen (z. B. Produktzusammensetzung, Einlagerungsrate) die Lagerung und Verfestigung der LAW/MAW-Abfälle in großräumigen Kavernen ohne Überschreitung der hier festgesetzten Temperaturgrenze von 90°C möglich ist.

Frühere Berechnungen haben gezeigt, daß bei Einlagerung und Verfestigung einer Abfall/Zementbinder-Suspension in einer großvolumigen Kaverne unzulässig hohe Temperaturen infolge der Abbindewärme der Zemente auftreten. Eine Herabsetzung der maximal auftretenden Produkttemperaturen auf Werte unter 90°C wurde bei der Lagerung eines Granulat/Zwickelfüllungs-Gemisches erreicht. In diesem Falle wird durch die Einbindung der flüssigen LAW/MAW-Abfälle in ein Granulat die Abbindewärme des Zements übertage abgeführt.

Für die Berechnungen zur Temperaturentwicklung im Produkt und im umgebenden Salzgestein wurde ein dreidimensionales Rechenprogramm verwendet. Der den Berechnungen zugrunde gelegte Modellkörper wurde der elliptischen Kavernengeometrie durch Verwendung eines flächengleichen quadratischen Kavernenquerschnitts angenähert. Die Produktzusammensetzung entspricht dem Referenzprodukt. Die verschiedenen Wärmequellen wurden im Rechenmodell berücksichtigt. Neben allen wichtigen Radionukliden ist darin auch die experimentell bestimmte spezifische Hydrationswärmeentwicklung in guter Näherung durch die charakteristischen Parameter des radioaktiven Zerfalls (Halbwertszeit und Anfangswärmeleistung) enthalten.

Das Rechenprogramm kann die reale kontinuierliche Befüllung in drei Kampagnen pro Jahr nur durch Simulation über eine instantane Befüllung in bestimmter Schichtstärke behandeln. Um den Rechenaufwand in Grenzen zu halten, wurden drei instantane Einlagerungskampagnen pro Jahr mit je 5,5 m Schichtdicke angenommen.

Für das umgebende Salzgestein wurden temperaturabhängige Werte verwendet. An den Außenflächen des betrachteten Salzquaders betrug die Gebirgstemperatur 40°C entsprechend einer Tiefe von ca. 1000 m.

Die durchgeführten Berechnungen haben gezeigt, daß für die Dauer der Einlagerung des Abfallprodukts (5 Jahre) die Temperaturen in der Kaverne hauptsächlich durch die kurzzeitig auftretende Hydrationswärme des abbindenden Zementes bestimmt werden. Nach Beendigung der Einlagerung hingegen werden die auftretenden Temperaturen durch die wesentlich niedrigere Zerfallswärme der in den Abfällen befindlichen Radionuklide verursacht.

Der berechnete zeitliche Verlauf der Produkttemperatur in der Zeitspanne zwischen der Einlagerung der ersten drei Schichten bzw. nach Einlagerung der letzten Schicht in die Kaverne ist in Abbildung 5.2-1 dargestellt. Die Berechnungen haben gezeigt, daß bereits 47 Tage nach Einbringen der ersten Schicht 95% des Temperaturmaximums in der Kaverne erreicht werden. Danach fällt die Temperatur in dieser Schicht wieder ab. Die höchste Produkttemperatur wird nach Befüllung der letzten Schicht, also nach fünf Jahren, erreicht. Sie liegt im hier diskutierten Fall bei 80°C und damit 10°C unter der festgelegten maximal zulässigen Produkttemperatur. Nach Beendigung der Einlagerung nimmt die Temperatur in der Kaverne wieder ab, wobei die Produkttemperatur in der zuletzt eingelagerten Schicht nach 10 Jahren nur noch ca. 4°C über der Gebirgstemperatur liegt.

Die höchsten Gebirgstemperaturen treten im umgebenden Salzgestein direkt an der Kavernenoberfläche auf (Abb. 5.2-2). Diese Oberflächentemperaturen betragen im dargelegten Fall maximal 54°C. Innerhalb von 15 - 20 m Abstand von der Kaverne fallen die Salztemperaturen bis auf 40°C ab, d. h. bis auf die ungestörte Gebirgstemperatur entsprechend einer Tiefe von 1000 m.

Abschließend kann festgestellt werden, daß aus der Sicht der Wärmeentwicklung das hier diskutierte Konzept für die Einlagerung des betrachteten LAW/MAW-Abfallproduktes keine Temperaturprobleme aufwirft.

5.3 Gebirgsmechanische Standsicherheitsanalyse

Unter Standsicherheit soll hier die Erhaltung des offenen Hohlraumes während der Bau- und Betriebs-

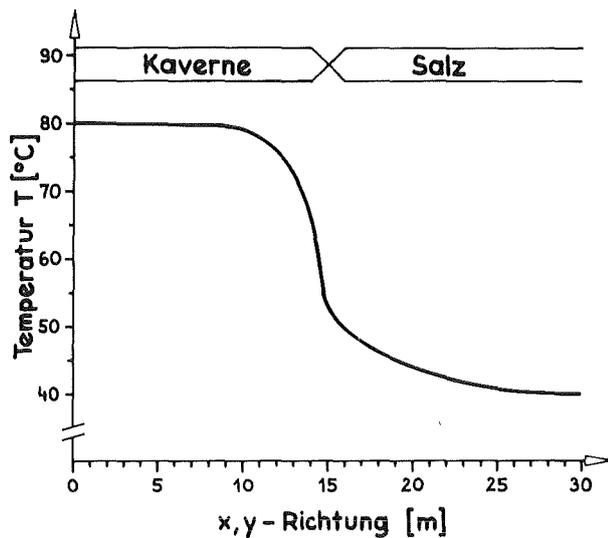


Abb. 5.2-2:
Radiales Temperaturprofil zum Zeitpunkt des durch die Hydrationswärme bedingten Temperaturmaximums in der Kaverne

phase verstanden werden. Ziel der Untersuchungen ist es, die Standsicherheit einer 75.000 m³-Kaverne abzuschätzen und die Kavernengeometrie zu optimieren.

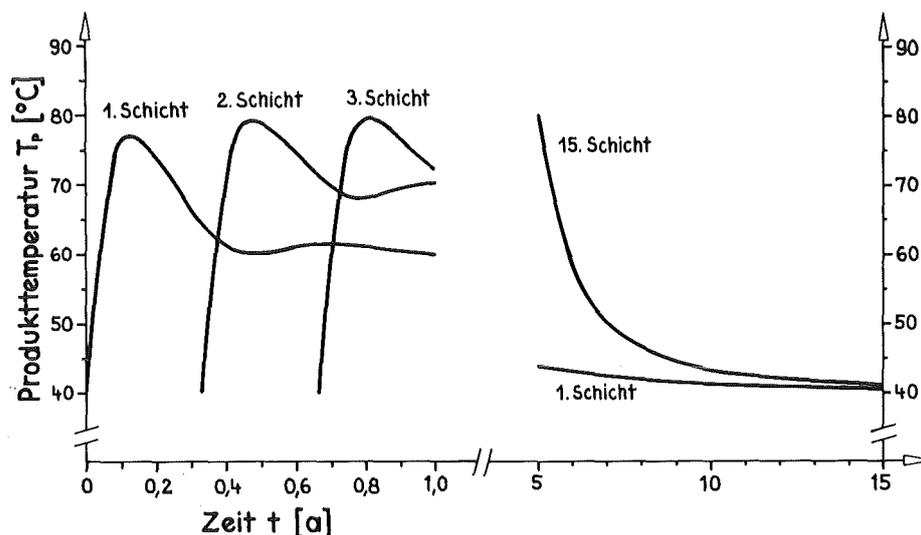
Abschätzung der Standsicherheit einer 75.000 m³-Kaverne

Die Standsicherheitsanalyse besteht aus drei sich ergänzenden Teilen:

- Auswertung von Erfahrungen aus Herstellung und Betrieb von vergleichbaren untertägigen Hohlräumen,
- Erstellung von Modellen zur rechnerischen Abschätzung der Gebirgsbeanspruchungen sowie des Zeit-Deformationsverhaltens, z. B. mit Hilfe der Finite-Element-Methode (FEM),
- Verifikation der Modellergebnisse mit in situ-Messungen.

Leider können die vielfältigen Erfahrungen über Bau und Betrieb von Ölspeicherkavernen (bis 600.000 m³

Abb. 5.2-1:
Zeitlicher Verlauf der Produkttemperatur in der Zeitspanne zwischen der Einlagerung der ersten drei Schichten bzw. nach Einlagerung der obersten (15.) Schicht in die Kaverne



Volumen) und Erdgasspeichern im norddeutschen Raum nur bedingt für die vorliegende Standsicherheitsanalyse herangezogen werden, da diese Kavernen unter Innendruck betrieben werden und somit ein dem Gebirgsdruck vergleichbarer Gegendruck im Innern der Kaverne herrscht. Weit mehr geomechanische Erkenntnisse können aus dem Untersuchungsprogramm an der Prototypkaverne in der Schachtanlage Asse II für das vorliegende Problem übertragen werden, da es sich hier um eine der selten anzutreffenden Kavernen im Salinar handelt, die infolge ihrer Begehrbarkeit und der frühzeitig eingebauten Instrumentierung einen hohen Erkundungsgrad nach geotechnischen Gesichtspunkten zuläßt.

Die nunmehr über einen Zeitraum von mehr als vier Jahren vorliegenden geotechnischen Beobachtungen an der Kaverne einschließlich des Schachtbereiches lassen folgende generelle Schlußfolgerungen zu:

- Die Gebirgsverschiebungen um die Kaverne vollziehen sich mit abnehmender Rate.
- Die Standsicherheit der Kaverne im oben definierten Sinne ist gewährleistet.
- Das aus Extensometermessungen abgeleitete Deformationsbild ist weitgehend homogen und durch FEM-Berechnungen nachvollziehbar.

Weiterhin gibt es in der Schachtanlage Asse übereinanderliegende Kammern, die durch spätere Herausnahme der Schweben auf etwa das doppelte Volumen, ca. 70.000 m³, vergrößert wurden. Obwohl diese sog. Doppelabbau nach gebirgsmechanischen Gesichtspunkten keine günstige Geometrie aufweisen, sind sie seit mehr als 20 Jahren standsicher im oben definierten Sinne.

Optimierung der Kavernengeometrie

Es wurden zwei Varianten zur Hohlraumform untersucht, die einmal gebirgsmechanischen und zum anderen herstellungstechnischen Kriterien genügen.

- a) Das Rotationsellipsoid mit vertikaler Längsachse ($H/D = 2$) stellt die gebirgsmechanisch optimale Lösung dar, benötigt aber einen relativ großen bergmännischen Aufwand (kurze Abschlöße, laufende meßtechnische Überwachung, manuelles Nacharbeiten der Stöße).
- b) Dagegen ist der Herstellungsaufwand für einen Kreiszyylinder mit oben und unten aufgesetzten Kegelkappen wesentlich (ca. 30%) geringer und die Maßhaltigkeit bedeutend einfacher sicherzustellen.

FEM-Berechnungen über die Spannungsverhältnisse der Variante b) ergaben bei der Übergangsebene vom Zylinder zur Kegelkappe um den Faktor 1,28 größere Vertikalspannungen als beim Rotationsellipsoid auf der Halbebene. Diese werden aber in relativ kurzen Zeiten durch das plastische Verhalten des Steinsalzes wieder abgebaut.

Bei der Optimierung der Kavernengeometrie ist die offene Standzeit während der Bauphase ein wichtiger Parameter, die bei Variante b) deutlich kleiner ist. Bezieht man außerdem noch den geringeren Herstellungsaufwand mit in die Optimierung ein, so sind die Varianten gleichwertig.

Standsicherheit der Basisstrecken

Für eine vollständige Beurteilung der Standsicherheit des betrachteten Kavernensystems ist auch das Spannungs- und Deformationsverhalten der für eine bergmännische Auffahrung notwendigen Basisstrecken abzuschätzen.

Zum Tragverhalten des Gebirges um die Strecken können folgende Aussagen getroffen werden:

- Die üblichen Streckenprofile im Salzbergbau zeigen in den Eckbereichen beim Übergang von der Firste zur Sohle örtliche Spannungskonzentrationen, die nach 20 m fast wieder den Primärspannungszustand des Gebirges erreichen. Außerdem werden sie zeitlich rasch wieder abgebaut wegen des plastischen Verhaltens des Steinsalzes.
- Die praktischen Erfahrungen im Salzbergbau bestätigen die theoretischen Ergebnisse.
- Für Bau und Betrieb der Strecken kann nach heutiger Kenntnis von einer ausreichenden Standsicherheit ausgegangen werden.

Standsicherheitsaussage des Kavernensystems

Der Bau und Betrieb der für die Lagerung und Verfestigung von schwach- und mittlerradioaktiven Abfällen erforderlichen Strecken, Bohrungen und auf 75.000 m³ Ausbruchvolumen dimensionierten Kavernen sind technisch sicher beherrschbar.

Das Langzeitverhalten wird infolge der deutlich begrenzten offenen Standzeit der Lagerräume besonders günstig beurteilt, da entsprechend dem mechanischen Verhalten des eingelagerten Produktes ein dem ursprünglichen primären Gebirgszustand sehr nahekommende Verhalten bereits ein Jahrzehnt nach Auffahrung zu erwarten ist.

5.4 Herstellung des Kavernensystems

Für die Herstellung von drei Kavernen mit je 75.000 m³ Hohlraum war ein technisches Konzept zu erarbeiten. Es waren die folgenden Voraussetzungen zu beachten:

- Gegenüberstellung und Bewertung von zwei unterschiedlichen Herstellungstechnologien, nämlich konventionelle bergmännische Auffahrung einschließlich Anschlußstrecken für die Abförderung des Haufwerkes durch den Hauptschacht des begehbaren Bergwerkes und soltechnische Erstellung der Kavernen.
- Für den bestimmungsgemäßen Betrieb muß die Gesamtanordnung der Kavernen so ausgelegt werden, daß jede Kaverne über eine vertikal angeordnete Förderleitung direkt von über Tage aus befüllt werden kann. Eine Minimierung der Deckgebirgsdurchörterungen ist anzustreben.
- Für den Fall der bergmännischen Auffahrung ist sowohl für den Betrieb als auch für die Stillengungsphase zu gewährleisten, daß über die aufgefahrene Anschlußstrecken der übrige Endlagerbereich nicht gefährdet wird. Beide Bereiche, d. h. in situ-Kaverne und das begehbare Endlager, müssen so gegeneinander abgedichtet werden, daß

<u>Kriterien</u>	<u>Solkaverne</u>	<u>Firstenbau-Kaverne</u>
1. <u>Geologische Standort-Eignung</u>		
- Standortwahl	flexibel, da keine Anbindung an das begehbare Endlager, aber nur im Salinar möglich.	Alternativer Standort nur bei eigenem Schachtausbau dann auch im Nicht-Salinargestein möglich.
- max. nutzbare Tiefen	bis ca. 1500 m. Begrenzung durch max. zul. Produkttemperatur beim Abbinden des Zements gegeben.	bis ca. 1100 m aus bergtechnischen, wettertechnischen und ergonomischen Gründen.
- erforderliches Gebirgsvolumen	groß, wegen Unsicherheiten bei der geologischen Prognose. Erst nach Abteufen der Erkundungsbohrung abschätzbar.	kleiner, da Erkundungsgrad wegen der Begehbarkeit des Hohlraumes und die Einhaltung der geplanten Kavernengeometrie deutlich besser.
- Wirksamkeit der geologischen Barriere	gut, weil nur ein möglicher Pfad über die Bohrung abgedichtet werden muß. Unzulässige Verbindungen zwischen 2 Kavernen sind nur durch Einhaltung größerer Sicherheitsabstände vermeidbar.	Nur durch zusätzlichen Aufwand machbar. Wegen der Anbindung an das begehbare Endlagerbergwerk müssen vor Inbetriebnahme der Kavernen die Verbindungsstrecken abgedichtet werden. Die Abdichtung der Bohrung ist aufwendiger, da größerer Bohrdurchmesser.
2. <u>Gebirgsmechanik</u>		
- Einhaltung gezielter Kavernengeometrie	Nur zylindrische Hohlräume mit unregelmäßiger Stoßausbildung möglich. Dachausbildung kann stufenweise verjüngt werden.	Alle gebirgsmechanisch sinnvollen Kavernengeometrien möglich.
- schonende Gebirgsbehandlung	gut	vermindert wegen Bohr- und Sprengauflockerung
- geomechanische in situ-Überwachung in Bau- und Betriebsphase	nur in geringem Umfang möglich.	durch Einbau von in situ-Instrumentierung (z.B. Extensometer) ausreichend möglich.
- offene Standzeit	Konvergenz der Kaverne kann durch Stützdruck bis zur Inbetriebnahme abgefangen werden.	nur drucklos möglich. Bei Firstenbau ist eine Teilentlastung durch das Haufwerk gegeben.
3. <u>Herstellungstechnik</u>		
- Erfahrungen	vielseitig aber nur unter Stützdrücken vorhanden	vorhanden im niedersächsischen Salzbergbau (Riedel) und Prototypkaverne (ASSE)
- Untertagearbeiten	nein	ja
- Bewetterung	nicht notwendig	notwendig und aufwendig
- Beseitigung des Ausbruches bzw. der Sole	nur als flüssige Sole: - Pipeline in das Meer - Verpressung - Verklappung - Verfüllung eines alten Bergwerkes - Verkaufen, wenn Markt vorhanden	nur als fester Ausbruch: - als Versatz im begehbaren Endlager oder Fremdversatz - Aufhaldung über Tage - Verkaufen, wenn Markt vorhanden
- Anordnung der Kavernen übereinander	Schwer möglich, da Dichtproblem zwischen den Kavernen.	technisch möglich, doch lange offene Standzeiten der oberen Kavernen.
- Herstellungszeit	ca. 2 Jahre mit Bohrung	Wegen Anbindung an das Endlager Terminabhängigkeit und durch Schachtauslastung evtl. Verzögerungen bei der Beseitigung des Abraumes gegeben. Reine Herstellungszeit mit Bohrung und Auffahrstrecke ca. 3 Jahre.
4. <u>Kosten</u>	55 - 67 DM/m ³ Hohlraum	120 - 150 DM/m ³ Hohlraum.

Tab. 5.4-1:
Gegenüberstellung der beiden Verfahren zur Herstellung der in situ-Kavernen

- selbst bei einem potentiellen Wassereinbruch in einen der Bereiche der andere Bereich weiterbetrieben werden kann.
- Die Abmessungen der Kaverne einschließlich der seitlichen und vertikalen Abstände sind vorgegeben.
 - Die Tiefbohrungen zum Anschluß der Kavernen in die übertägige Beschickungsanlage werden vor der Herstellung der Kavernen niedergedrückt, verrohrt und auf Dichtigkeit geprüft. Die Tiefbohrungen sollen möglichst genau im Lot liegen (maximale Abweichung = 1,5 Bogengrad) und einen lichten Durchmesser der verrohrten Bohrung von ca. 600 mm haben.
 - Die schonende Behandlung des Gebirges wird sowohl für die Streckenauffahrung als auch für die Kavernenherstellung vorausgesetzt. Begleitende Maßnahmen zur Erhaltung der mechanischen Integrität des Gebirges sind gegebenenfalls vorzusehen.

Kavernenbau über eine konventionelle bergmännische Auffahrung

Für das Auffahrkonzept wurden zwei Verfahren ausgewählt, die Herstellung im Strossenbau und im Firstenbau. Die bergmännische Auffahrung der Kaverne nach beiden Herstellungsverfahren entspricht dem Stand der Technik und benötigt keine neuen Entwicklungsarbeiten.

Bei Kavernenanordnungen übereinander wären zunächst alle vorgesehenen Kavernen (zwei oder drei) — beginnend mit der tiefsten — aufzufahren. Dabei ist eine erhöhte offene Standzeit der obersten Kaverne, die zuletzt befüllt wird, in Kauf zu nehmen. Die niveaugleiche Anordnung ermöglicht eine unabhängige Herstellung und Beschickung der einzelnen Kaverne. Dadurch wird eine geringere offene Standzeit erreicht.

Vor Inbetriebnahme der bergmännisch aufgefahrenen Kaverne müssen die Kavernenzugänge (Vorschacht und Auffahrungsstrecke) hermetisch, auch unter Störfallbedingungen, gegen das begehbare Endlager abgedichtet werden. Grundsätzlich wird hier gefordert, daß die Permeabilität des Abschlußbauwerkes für Gase und Flüssigkeiten etwa die gleiche Qualität wie das umgebende nicht aufgelockerte Salzgestein hat. Für die Aufnahme der Dammbauten stehen der Vorschacht (Pfropfen) und die Unterfahrungsstrecke (Horizontaldamm) zur Verfügung. Durch eine Neigung in der Unterfahrungsstrecke lassen sich zusätzliche Abdichtungen in den Verschluß einbauen.

Soltechnische Erstellung der Kavernen

Das Solverfahren wurde wegen einiger grundsätzlicher Vorteile mit in die in situ-Konzeptfindung aufgenommen. Zu den Vorteilen sind zu rechnen:

- Zeitliche und räumliche Entkoppelung von Bau und Betrieb des begehbaren Endlagers.
- Schonender Gebirgsingriff wegen Wegfalls von Bohr-, Spreng- und Ladearbeiten.
- Keine wieder zu verschließenden Auffahrstrecken.
- Kostengünstige Hohlraumbereitstellung.

Das Solkonzept für die Herstellung einer in situ-Kaverne besteht aus drei Phasen:

1. Nach Fertigstellung der Tiefbohrung muß zunächst eine Sumpfkaverne zur Aufnahme der zu erwartenden unlöslichen Bestandteile (Anhydrit und Ton) gesolt werden.
2. Danach erfolgt die Erstellung der Hauptkaverne nach dem „indirekten“ Solprozeß. Hierbei strömt das Frischwasser durch den Ringraum zwischen äußerer und innerer Rohrtour in die Kaverne und steigt wegen seiner geringeren Dichte zum Dach auf. Mit zunehmender Aufsättigung sinkt die Sole abwärts und wird mit nahezu Sättigungswerten am Kavernentiefsten abgezogen.

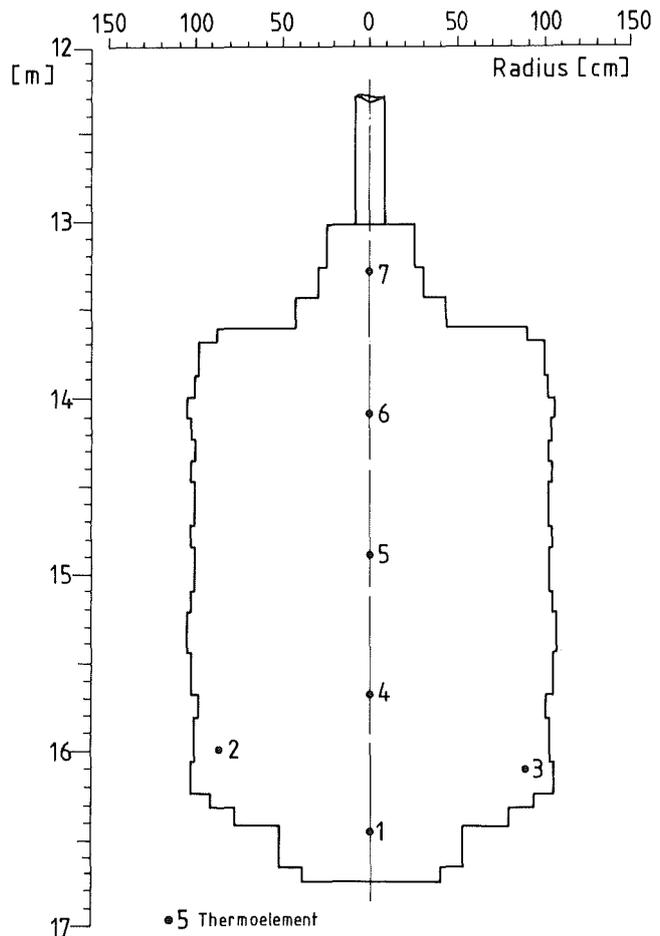


Abb. 5.5-1: Anordnung der Thermoelemente für die Erfassung der Abbindetemperaturen

3. Die Ausbildung einer vorgegebenen Dachform erfolgt in der letzten sog. Dachsolphase, wobei der Blanketspiegel z. B. in Form von Flüssiggas über mehrere Stufen bis zum vorgegebenen Höchstpunkt hochgezogen wird.

Eine vorgegebene Kavernenform kann auch bei absolut homogener Salzqualität nicht realisiert werden, so daß für Festen und Schweben ein entsprechender Sicherheitszuschlag einkalkuliert werden muß.

Die Zeit für die Herstellung einer gesolten in situ-Kaverne von 75.000 m³ Hohlraum beträgt insgesamt 84 Wochen.

Die Vor- und Nachteile beider Herstellungsverfahren sind in Tabelle 5.4-1 gegenübergestellt. Eine endgültige Bewertung sollte jedoch erst vorgenommen werden, wenn sich eine Realisierungschance und ein Standort für das in situ-Konzept abzeichnen.

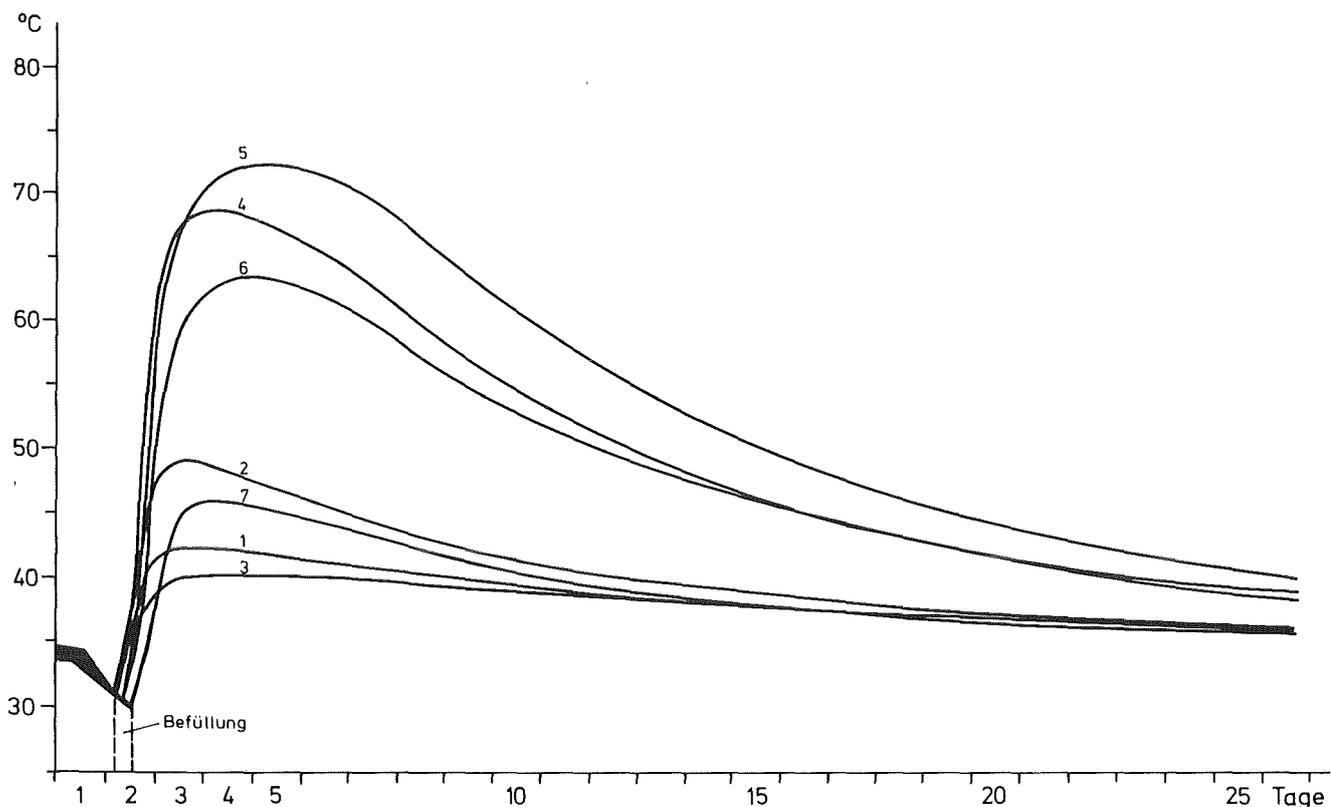
5.5 In situ-Untersuchungen in Modellkavernen

Für die Durchführung von in situ-Untersuchungen wurde ein Modellkavernenfeld auf der 800 m-Sohle der Schachtanlage Asse aufgefahren. Gemeinsam mit der Kavernenbau- und Betriebsgesellschaft wurden fünf Kleinstkavernen von je 10 m³ Volumen ca. 13 bis 17 m unter Sohlenniveau ausgesolt und gesümpft. In drei Kavernen wurde in unterschiedlichen Chargen inaktives Produkt zur Simulation eingebracht.

Mittels eingebauter Thermosonden konnte der zeitliche Verlauf der Abbinde-temperatur erfaßt werden. Abbildungen 5.5-1 und 5.5-2 zeigen die Anordnung der Thermo-elemente in den Modellkavernen und den Temperaturverlauf einer instanten Befüllung.

Von der Amtlichen Material-Prüfanstalt in Clausthal-Zellerfeld wurden kalorimetrische Messungen zur Bestimmung der freiwerdenden Hydrationswärme des Zementleimes durchgeführt. Die Meßergebnisse werden zur Berechnung der Temperaturentwicklung in Kavernen herangezogen und dienen damit der theoretischen Untermauerung sowie der Extrapolation auf Kavernen mit einem Hohlraum von 75.000 m³. Die gemessenen Temperaturen haben zu keiner Zeit kritische Grenzen erreicht, so daß das wesentliche Problem der Temperaturentwicklung infolge Hydratation als beherrscht anzusehen ist.

Abb. 5.5-2:
Abbinde-temperatur bei instantaner Befüllung der Modellkaverne (Thermo-elemente 1 - 7)



6. Beurteilung der Eignung der Schachtanlage Konrad für die Endlagerung radioaktiver Abfälle

Die Eignungsprüfung des Eisenerzbergwerkes Konrad für die Endlagerung schwachradioaktiver und Stilllegungsabfälle aus Kernkraftwerken wurde schwerpunktmäßig mit Untersuchungen zu Fragen des Strahlenschutzes und der Umweltbeeinflussung sowie mit der Datenermittlung für die Sicherheitsanalyse des geologischen Systems fortgesetzt. Daneben wurden die langjährigen Meßprogramme zur Ermittlung meteorologischer, hydrogeologischer, gebirgsmechanischer und seismischer Standortdaten weitergeführt. Auf dem Gebiet der Bergtechnik wurden besonders Fragen der Auffahrung, Befüllung, Bewetterung und Versetzen von Einlagerungshohlräumen bearbeitet. Zum Jahresende 1981 wird das laufende Forschungsprogramm mit seiner bisherigen Zielsetzung abgeschlossen. Auf der Basis aller bis dahin erarbeiteten wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse wird der Abschlußbericht erstellt, der als eine Grundlage für die Einleitung eines Genehmigungsverfahrens zur Errichtung des Endlagers dienen soll.

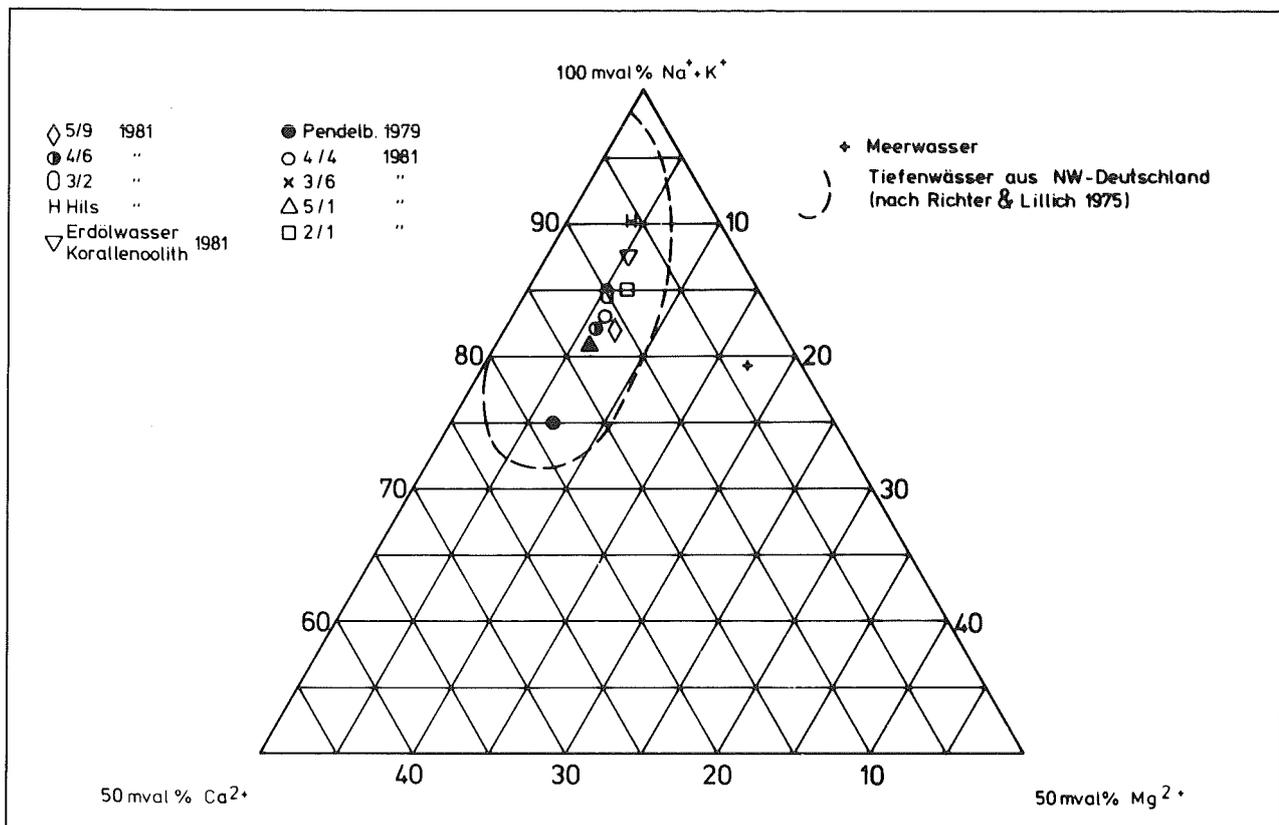
Abb. 6.2-1:
Darstellung der Kationenverhältnisse der Korallenoolithwässer aus der Schachtanlage Konrad

6.1 Petrographische und geochemische Untersuchungen

Vorbereitend für die Sorptionsversuche wurden petrographische Untersuchungen an Tonsteinen aus dem Deckgebirge des Eisenerzlagers zur Ermittlung der genauen Mineralinhalte und der Wasseraufnahmefähigkeit der Gesteine durchgeführt. Zusätzlich wurde die Kationenaustauschkapazität der Gesteine bestimmt, die in dem montmorillonithaltigen Tonstein des Albs besonders hohe Werte erreicht.

Das Sorptionsverhalten der Festgesteine wurde an 15 Proben ausgewählter Tonsteine für verschiedene Radionuklide, die in den Abfällen enthalten sein können, durch Laborversuche ermittelt. Dabei wurde mit getracerten Versuchslösungen unter Verwendung der Isotope Cs-134, Co-60 und Sr-85 gearbeitet. Meßreihen mit Pu-239 und Am-241 sind begonnen worden.

Die Experimente zur Bestimmung der Verteilungskoeffizienten wurden im statischen batch-Verfahren unter atmosphärischen Bedingungen gehandhabt. Bei den Versuchen wurde jeweils auf die größtmögliche Annäherung an die in situ-Bedingungen Wert gelegt, d. h., das Probematerial wurde schonend aufbereitet und die Versuchslösungen entsprachen den natürlichen Formationswässern. Als Ergebnis wur-



den die K_d -Koeffizienten in Abhängigkeit vom Lösungsschemismus und den aufgegebenen Radionuklidkonzentrationen ermittelt.

Darüber hinaus sind Versuche zur Bestimmung der Diffusionskoeffizienten an Konrad-Gesteinsproben begonnen worden. Zuerst mußten besondere Diffusionszellen zur Aufnahme der Probekörper entwickelt werden. Die Probekörper wurden für den Diffusionsversuch mit den Radionukliden Sr-85, Cs-134, Co-60 und Pu-239 im „Sandwich-Verfahren“ imprägniert. Aufgrund des hohen Rückhaltevermögens der Gesteine gegenüber den Radionukliden Cs, Co, Pu und der äußerst geringen Diffusionsgeschwindigkeiten sind diese Versuche noch nicht abgeschlossen. Basisdaten für die Diffusionskoeffizienten von Wasser, die mittels Tritium-getracerter Lösungen ermittelt wurden, liegen bereits vor. Zusätzlich wurden an Gesteinsproben aus dem Deckgebirge Messungen der natürlichen Gamma-Aktivität durchgeführt. Das oolithische Eisenerz wurde auf seine natürlichen Gehalte an Ra-226, Pb-214, Tl-208, Ac-228 und Uran analysiert.

6.2 Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen

Die hydrogeologischen Untersuchungen wurden mit der chemischen Analyse der Grubenwässer an zehn Proben von verschiedenen Pumpstellen fortgesetzt (vgl. Abb. 6.2-1). Gegenüber den vorjährigen Ergebnissen wies auch im Jahre 1981 der Chemismus der Wässer keine entscheidenden Abweichungen auf. Eine Änderung der hydrogeologischen Situation durch evtl. eindringendes Fremdwasser kann daher ausgeschlossen werden.

Zusätzlich wurden aus dem Übertagebereich der Grube Quartärwasserproben entnommen und auf den gleichen Ionengehalt wie die Untertagewässer untersucht. Die Daten werden zur Standortbeweissicherung gesammelt. Ebenfalls im Übertagebereich der Grube wurden an sechs Grundwasserbeobachtungspunkten Automatikpegel installiert, mit denen die Grundwasserhöhenstände im Gebiet des Senkungstrogos gemessen werden. Diese Messungen werden in Ergänzung der bisherigen manuellen Wasserstandsmessungen durchgeführt, für welche die langjährigen Meßreihen durch weitere Ablesungen ergänzt werden.

Eine spezielle geochemische Untersuchung wurde an den sekundären Salzmineralvorkommen der Grube durchgeführt. Aufgrund ihrer Erscheinungsformen wurden zehn verschiedene Salztypen festgestellt und in einer Grubenkartierung in ihrer örtlichen Verbreitung ausgewiesen. Als Haupttypen können Salzstalaktiten, Salzkrusten und Salzhaare (siehe Abb. 6.2-2) unterschieden werden. An 47 Salzproben der verschiedenen Salztypen wurden quantitativ Na, K, Rb, Mg, Ca, Sr, Cl, Br, J, SO_4 , BO_3 , NO_3 bestimmt. In allen Proben stellen Natrium und Chlor mit zusammen 90-99% die Hauptbestandteile dar. Zusätzlich wurden an zwei Sickerwasserstellen und 18 Salzproben S-Isotopenmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse geben keinen Hinweis darauf, daß saline

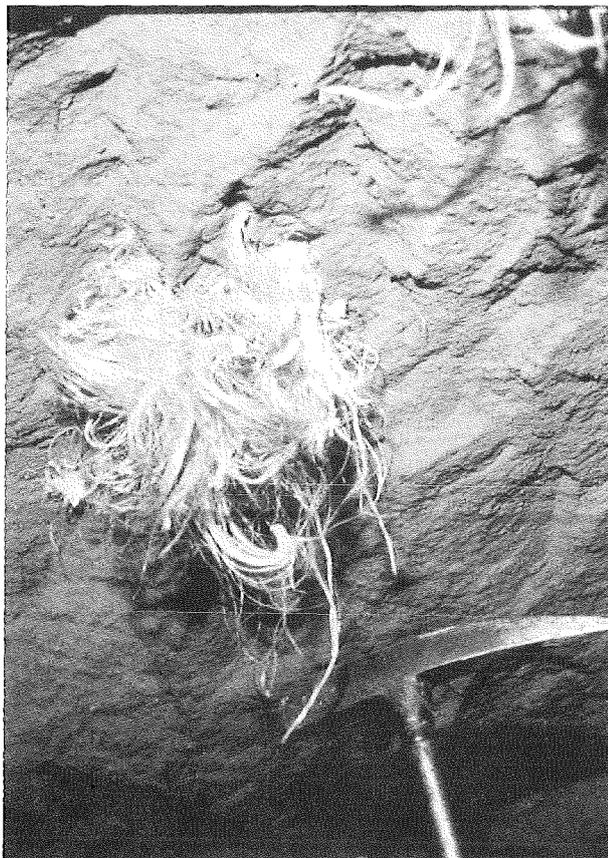


Abb. 6.2-2:
Typische Salzhaarbildung am Streckenstoß im Korallenoolitherz

Subrosionslaugen des benachbarten Salzstocks an den Mineralbildungen beteiligt sind. Vielmehr können die Sekundärsalze als Kristallisationsprodukte der salinaren Restfeuchte des Korallenooliths gedeutet werden.

Zur genauen Untersuchung der Feuchtemigration im Eisenerz wurde der bereits im Vorjahr begonnene Wettertest in einem abgeschlossenen Streckenteil weitergeführt. Mit der Einstellung eines angenäherten Sättigungsdampfdrucks in der unbelüfteten Streckenatmosphäre wurde die erste Versuchsphase beendet. Die relative Luftfeuchtigkeit beträgt konstant 80% bei einer Lufttemperatur von 42°C (Abb. 6.2-3). Mittels einer geoelektrischen Versuchsauslegung, für die je ein Elektrodenprofil in Sohle und Unterstoß der Wetterstrecke versenkt sind, sollen über die Leitfähigkeitsmessungen Verteilung und Änderung der Gebirgsfeuchte in der Auflockerungszone des Streckenmantels bestimmt werden. Bisher wurden in der Umgebung der Wetterteststrecke Gebirgsleitfähigkeiten gemessen, die 35% über denjenigen älterer Strecken liegen, die durch Grubenbewetterung ausgetrocknet zu sein scheinen. Aus allen Messungen geht deutlich hervor, daß die Leitfähigkeit des Gebirges mit der Entfernung vom Streckenstoß abnimmt. In der Sohle wird das Plateau niedriger Leitfähigkeit erst in größeren Eindringtiefen erreicht. Dies ist eine Folge der größeren Gebirgsauflockerung und der stärkeren Durchfeuchtung.

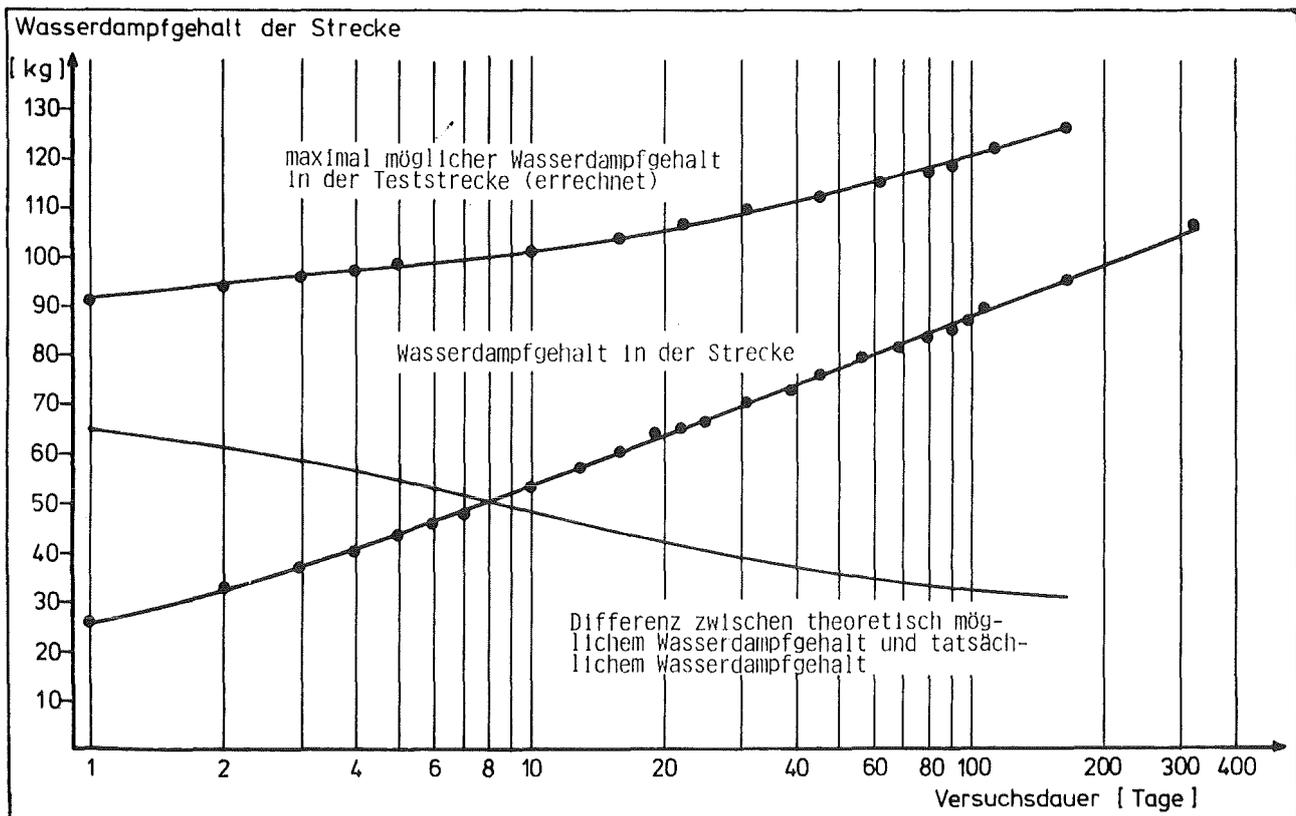


Abb. 6.2-3:
Gemessene Feuchtezunahme der Grubenluft in der abgeschlossenen und nicht belüfteten Wetterteststrecke

6.3 Gebirgsmechanische und seismische Untersuchungen

Zur genaueren Klärung der gebirgsmechanischen Verhältnisse wurden an zwei Extensometerstationen in der Untersuchungsstrecke die Verformungsmessungen fortgesetzt. Zusätzlich wurden sechs weitere Drahtextensometermeßstationen auf verschiedenen Teilsohlen der 4. und 5. Sohle in Betrieb genommen. Sie dienen der Bestimmung des Spannungsumlagerungsverhaltens eines Strecken-Pfeiler-Systems, wie es aufgrund der bergmännischen Erfahrungen für einen späteren Einlagerungsbetrieb vorstellbar ist. Zur besonderen Beobachtung der gebirgsmechanischen Verformung der Streckenprofils zum Zeitpunkt der Auffahrung sind an zwei Meßpunkten von einer Parallelstrecke aus erstmalig zwei Stangenextensometer mit je 29 m Länge eingebaut worden. Derzeit werden manuell noch die unbeeinflußt ablaufenden Gebirgsbewegungen gemessen, bevor sich der Streckendurchgang dem Meßpunkt soweit nähert, daß eine schnelle Änderung der Gebirgsverformung eintritt. Zu diesem Zeitpunkt wird die Anlage auf automatische Meßwerterfassung umgeschaltet, um ein größeres zeitliches Auflösungsvermögen für die gemessenen Bewegungsabläufe zu gewährleisten, als es bei der Handmessung der Fall ist.

Durch Ultraschallmessungen in einem der Stangenextensometerbohrlöcher konnte die Ausdehnung der Auflockerungszone im Oberstoß der Versuchsortes genauer festgestellt werden. Die Laufzeitkurven und Geschwindigkeitsverteilungen wurden mittels eines breitbandigen Schallimpulses für das durchteufte Gestein bis in 25 m Bohrlochtiefe gemessen. Danach zeigen häufig wechselnde Werte bis in 15 m Tiefe einen durch die Spannungsumlagerungen mechanisch überprägten Gebirgsverband an.

Die Untersuchungen zum Scherfestigkeitsverhalten tektonischer Trennflächen im Eisenerzlager wurden mit einer Fernsehsondierung in zwei bis zu 30 m langen horizontalen Beobachtungsbohrlöchern weitergeführt. Dabei wurde versucht, den von der bergbaulichen Tätigkeit unbeeinflußten natürlichen Klüftigkeitsgrad zu bestimmen. Zusammen mit einer feintektonischen Kartierung und den Auswertungen von gebirgsmechanischen Laborversuchen dienen die Ergebnisse einer vertieften Standfestigkeitsabschätzung für Einlagerungskammern im Eisenerzlager.

Die seismische Überwachung des Grubengebäudes wurde mit der seit mehreren Jahren in Betrieb befindlichen Station fortgesetzt. Aufgrund der hohen Meßempfindlichkeit der Anlage wurde eine überwiegende Mehrzahl von Ereignissen registriert, die eindeutig betrieblichen Vorgängen in der Umgebung der Schachtanlage zugeordnet werden können. Besonders deutlich wird dies aus der Verteilung der Ereignisse auf die Wochentage und dabei insbesondere auf die Zeit zwischen 10 und 16 Uhr. In den Nachtstunden und den arbeitsfreien Tagen nimmt dagegen die industrieerzeugte Bodenunruhe ab. Gegenüber diesen künstlichen Ereignissen sind die tektonischen

Ereignisse sowohl in ihrer Häufigkeit als auch mit ihren Signalstärken so unbedeutend, daß sie von den am nächst gelegenen Erdbebenstationen schon nicht mehr registriert werden konnten. Das Verfahren zur Messung ultralanger periodischer und aperiodischer Gebirgsbewegungen mit Hilfe geophysikalischer Neigungsmesser wurde weiterentwickelt.

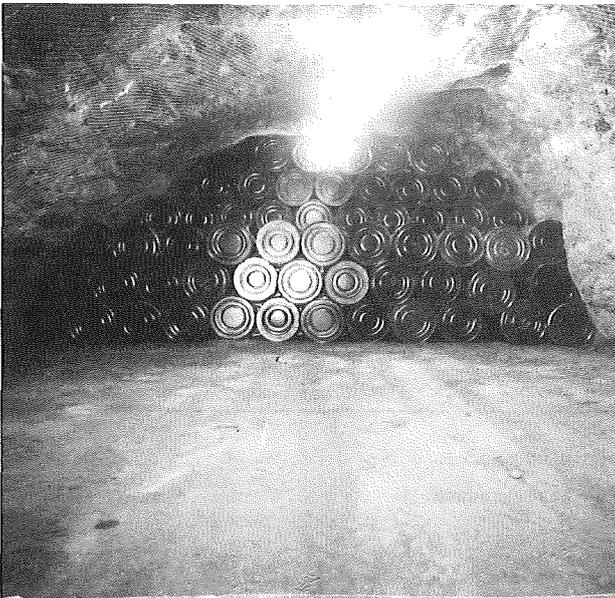
6.4 Bergtechnische Untersuchungen

Die Entwicklungsarbeiten für ein Versatzverfahren zur Kammverfüllung wurden mit einer technischen Studie fortgesetzt, bei der die besonderen Sicherheitserfordernisse für endgelagerte Abfälle berücksichtigt wurden. In einen Bewertungskatalog wurden Faktoren, wie das zu verwendende Versatzgut, die Dichtigkeit des Materials, die Staubentwicklung des Verfahrens sowie Mobilität, Bauabmessungen und Verfülleistungen in Frage kommender Anlagen aufgenommen. Als ein zusammenfassendes Ergebnis ist festzustellen, daß sich Blasversatz und mit Abstrichen auch Schleuderversatz eignen. Begleitend dazu wurden an gebrochenem Eisenerz bodenmechanische Parameter ermittelt und in Plattendruckversuchen die Verdichtbarkeit des Materials geprüft. Ziel der Untersuchungen ist es, Erz, wie es beim Auffahren von Einlagerungskammern anfällt, als geeigneten Restversatz einsetzen zu können.

Auf dem maschinentechnischen Sektor wurde erstmals ein Bohrergerät zur Herrichtung großdimensionaler Wetterbohrlöcher im trockenen Verfahren erprobt. Die Ergebnisse können bis jetzt positiv bewertet werden. Auch wurde erstmalig eine Teilschnittmaschine eingesetzt, um das Verfahren des schneidenden Vortriebs im Korallenoolith-Eisenerz und seine Vorteile für die Auffahrung von Einlagerungskammern zu er-

Abb. 6.4-1:

Versuchsstapelung von inaktiven 400 l-Faßgebinden in einem 40 m² Rundbogenquerschnitt mit Teilüberdeckung der Fässer durch Verfüllmaterial



kunden. Im Rahmen der Schneideversuche wird gleichzeitig die Erstellung und Beherrschung eines sogenannten Rundbogenprofils erprobt.

Als Vorbereitung für simulierte Einlagerungsversuche mit nichtradioaktiven Abfallfässern wurden mit Faßgebinden und Paletten erste Handhabungs- und Stapelversuche durchgeführt (vgl. Abb. 6.4-1).

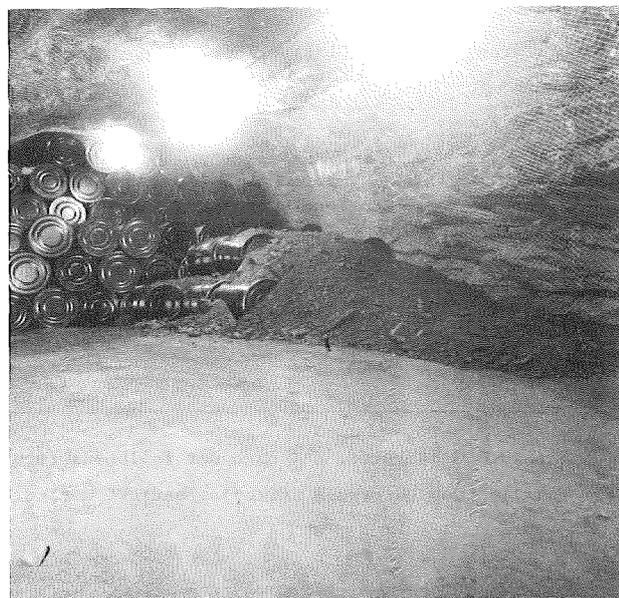
Im Rahmen von Beweissicherungsmaßnahmen wurden die natürlichen Aktivitätskonzentrationen im Wetterstrom des Bergwerks bestimmt, wie sie heute als Folge des Erzabbaus und der im Erz enthaltenen Spuren der radioaktiven Elemente Thorium, Uran und Radium normalerweise vorkommen. Dazu wurde die Grubenluft aus vier verschiedenen Teilwetterströmen für kurze Zeit jeweils über einen Filter geleitet und die darin angesammelte Aerosolaktivität getrennt in einem Alpha- und Beta-Meßplatz ausgemessen. Die ermittelten Radon-Aktivitätskonzentrationen zeigen, daß die Werte in den Grubenwettern über denen der Umgebungsluft liegen. Unter der Annahme, daß im übrigen Grubengebäude die Radonkonzentrationen nicht wesentlich über den gemessenen liegen, sind die Bergarbeiter nicht als beruflich strahlenexponierte Personen einzustufen.

6.5 Kerntechnische Untersuchungen

Untersuchungen an Beschichtungssystemen von Abfallfässern

Die für die Einlagerung im Erzbergwerk Konrad vorgesehenen zementierten schwachaktiven Abfälle müssen zunächst für einen längeren Zeitraum oberirdisch zwischengelagert werden. Während dieser Zwischenlagerzeit und bei der Einlagerung im Endlager muß die Integrität der Abfallfässer gewährleistet werden. Für die Endlagerung ist es vorteilhaft, wenn die Fässer bei angemessenem Kostenaufwand als zusätzliche Barriere gegen eine Nuklidfreisetzung dienen können.

Unter diesen Aspekten wurde ein neues Blechfaß entwickelt, das aufgrund verbesserter Konstruktion und



Lack-Beschichtungssysteme (innen und außen) eine höhere Korrosionsbeständigkeit als das bisherige Faß aufweist.

Im Berichtszeitraum wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Dortmund eine Eignungsprüfung von zwölf Beschichtungssystemen (sechs Innen- und sechs Außenbeschichtungssysteme) unter simulierten Zwischenlager- und Endlagerbedingungen durchgeführt. Dabei wurden lackbeschichtete Prüfbleche den in Tabelle 6.5-1 aufgeführten Beanspruchungen für eine Zeitdauer von vier Wochen ausgesetzt. Die anschließenden Prüfungen haben ergeben, daß von den zwölf geprüften Beschichtungssystemen zwei Lacksysteme (ein Innen-, ein Außensystem) auf Epoxid-Basis deutlich besser als alle übrigen waren. Als Beispiel sind die Untersuchungsergebnisse für das beste Innensystem in Tab. 6.5-1 dargestellt.

Bewertet man die Ergebnisse nach den Einzeluntersuchungen, so zeigt sich für das Innensystem keine Veränderung der Haftung bzw. des elastischen Verhaltens der Beschichtung nach den durchgeführten

Beanspruchungen. Allerdings ist eine Neigung zur Unterrostung nach Lackbeschädigungen festzustellen und zwar sowohl beim Schwitzwasserkonstantklima (3 mm Unterrostung nach 28 Tagen) als auch bei der Lagerung in Zementlösung plus Natriumnitrat (1,5 mm Unterrostung nach 28 Tagen). Solche Unterrostungen können in der Praxis nur bei starken Lackbeschädigungen, wie z.B. bei bis auf das Blech gehenden Kratzern, auftreten. Damit ist dieses Lacksystem unter der für alle Beschichtungssysteme gültigen Einschränkung, daß große Beschädigungen der Beschichtung vermieden werden sollen, als Innenbeschichtung für Abfallfässer gut geeignet.

Die Untersuchungen werden mit der Prüfung zweier weiterer Beschichtungssysteme einschließlich des Korrosionsverhaltens beschichteter Fässer unter Konrad-Störfallbedingungen fortgesetzt.

Einlagerungsversuche mit inaktiven Abfallbehältern

Im Rahmen eines Untersuchungsprogramms soll die Einlagerung von radioaktiven Abfällen inaktiv mit folgender Zielsetzung simuliert werden:

- Erprobung der für die Einlagerung vorgesehenen technischen Einrichtungen und Abfallgebäude,
- Ermittlung der möglichen Einlagerungsleistungen,

Tabelle 6.5-1:
Ergebnisse der Prüfung von Innenbeschichtungssystemen für Abfallfässer

Beanspruchungen	Prüfungen					
	Aussehen	Schichtdicke [µm]	Dornbiegeversuch 50 mm Dorn	Kugelstrahlversuch DIN 53154	Hochspannungsprüfung 5000 Volt	Unterrostung [mm]
Normalklima (NK)	Halbmatte, leicht genarbte, braunbeige-farbige Oberfläche	ca. 500	keine Risse	≥ A 10 000 ⁺⁾	keine Durchschläge	--
Schwitzwasserkonstantklima DIN 50017 28 Tage	Glanzverlust, sonst wie NK	ca. 500	keine Risse	≥ A 10 000	keine Durchschläge	3
Ofenalterung 80° C 28 Tage	Glanzverlust, sonst wie NK	ca. 480	keine Risse	≥ A 10 000 ⁺⁾	keine Durchschläge	--
Zementmörtelschlämme 1 Tag 80° C 27 Tage 40° C	Glanzverlust, mäßige Aufhellung sonst wie NK	ca. 520	keine Risse	≥ A 10 000 ⁺⁾	keine Durchschläge	--
Zementmörtelschlämme + Natriumnitrat 1 Tag 80° C 27 Tage 40° C	Glanzverlust, leichte Aufhellung	ca. 520	keine Risse	≥ A 10 000 ⁺⁾	keine Durchschläge	1,5

⁺⁾ ≥ A 10 000 bedeutet, daß nach der Fallbeanspruchung von 10 000 Kugeln der Anstrich den Untergund lückenlos bedeckt hat, d.h. keine Beanstandung.

- Festlegung des Raumbedarfs für die Lagerung unterschiedlicher Abfallgebinde,
- Berechnung der Strahlenbelastung des Betriebspersonals unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einlagerungstechniken und Behältertypen.

Auf der Basis der Ergebnisse soll die optimale Einlagerungstechnik hinsichtlich Minimierung der Strahlenbelastung des Betriebspersonals bei größtmöglicher Einlagerungsleistung projiziert werden.

Die Erprobung der Handhabung der Abfallgebinde mit und ohne Paletten wurde begonnen. Dabei wurden Zeitstudien für den Transport der Fässer im Schachthallenbereich durchgeführt. Die Versuche

erbrachten auch Hinweise für die Auslegung der technischen Einrichtungen. So zeigte es sich, daß Rollsickenfässer den Kräften, die bei der Handhabung mit dem Faßgreifer auftreten, nicht gewachsen sind, wenn sie vollständig gefüllt sind. Weiterhin wurde festgestellt, daß die gelieferten Einweg-Paletten schweren Transportbeanspruchungen (Fahrt durch ein Schlagloch) nicht standhalten.

Da der von der Betriebsleitung des Eisenerzbergwerks Konrad eingereichte Betriebsplan vom Bergamt Goslar bislang nicht genehmigt worden ist, konnten die untertägigen Einlagerungsversuche noch nicht begonnen werden.

7. Charakterisierung von Abfallprodukten sowie Entwicklung von Verpackungen

7.1 Charakterisierung von MAW-Abfallprodukten

Die Arbeiten zur Charakterisierung von MAW-Abfallprodukten beinhalten Untersuchungen von Zement- und Bitumenprodukten. Die Untersuchungen werden sowohl im Labor- als auch im 200 l-Maßstab durchgeführt. Dabei wird im wesentlichen die Aktivitätsfreisetzung über den Wasserpfad (Auslaugung, Korrosion) und den Luftpfad (thermische und mechanische Belastung) ermittelt.

7.1.1 Untersuchungen zur Aktivitätsfreisetzung über den Wasserpfad

Vergleichende Auslaug- und Korrosionsuntersuchungen

Tabelle 7.1-1 zeigt die ermittelten Diffusionskonstanten von inaktivem Cs in bentonithaltigen Produkten (PZ 35 F) bei der Auslaugung mit Wasser und quinärer Lösung. Man sieht, daß bereits Zusätze von 0,1 Gew.-% Cs die Cs-Freisetzung deutlich erhöhen. Eine weitere Zugabe von Cs bewirkt dann nur noch eine geringfügige Erhöhung. Die Diffusionskonstanten für Cs-Zusätze über 0,1 Gew.-% entsprechen den Werten für Produkte ohne Bentonitzusatz. Dies bedeutet, daß bei der Ermittlung der Cs-Freisetzung aus bentonithaltigen Proben die inaktiv simulierten Produkte keine realistischen Werte liefern und daß derartige Effekte auch bei Freisetzungsuntersuchungen mit anderen Nukliden geprüft werden müssen.

Cs-Gehalt im Produkt	Auslaugmittel dest. Wasser		Auslaugmittel Q-Lauge	
	Cs	Sr	Cs	Sr
2 %	3.7E-13	6.2E-15	1.1E-13	1.1E-15
1 %	3.4E-13	5.5E-15	1.0E-13	1.2E-15
0.1%	2.0E-13	5.4E-15	8.5E-14	1.1E-15
Tracer	1.6E-16	3.8E-15	4.4E-17	7.3E-16

Tabelle 7.1-1: Diffusionskonstanten ($m^2 \cdot s^{-1}$) in Zementprodukten mit erhöhtem Cäsiumgehalt (Produkte aus PZ 35 F mit 5% Bentonit und 10% simulierten Abfallsalzen)

Tabelle 7.1-2 zeigt die Diffusionskonstanten für Produkte aus HOZ-35 L NW/HS mit Aushärtezeiten von 28 bzw. 90 Tagen bei der Lagerung in destilliertem Wasser und quinärer Lösung bei Raumtemperatur. Im bisherigen Untersuchungszeitraum traten keine signifikanten Unterschiede auf. Die Weiterführung der Versuche über längere Zeit wird zeigen, ob die längere Vorlagerzeit der Produkte die erwartete Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit bewirkt.

Bentonit-gehalt	Auslaugmittel	Cs		Sr	
		Abbindezeit		Abbindezeit	
		28 Tage	3 Monate	28 Tage	3 Monate
0%	dest. Wasser	7.5E-14	8.7E-14	2.2E-15	6.7E-15
	Q-Lauge	2.1E-13	9.8E-14	2.0E-15	1.6E-15
5%	dest. Wasser	1.9E-16	1.2E-16	1.4E-14	2.2E-14
	Q-Lauge	4.3E-17	3.1E-17	1.5E-15	2.6E-15

Tabelle 7.1-2: Diffusionskonstanten ($m^2 \cdot s^{-1}$) in Produkten aus Hochofenzement HOZ 35 L-NW/HS nach 28 Tagen und 3 Monaten Abbindezeit (10% simulierte Abfallsalze im Produkt)

Untersuchungen zur Formulierung eines Quellterms

Die bisher zur Herstellung von MAW-Produkten verwendeten bzw. untersuchten Zementsorten (PZ 35 F, PZ 45 HS, HOZ 35 L-NW/HS, TrZ 35 L) sind trotz unterschiedlicher Korrosionsbeständigkeit alle gegenüber $MgCl_2$, bedingt durch den Ca/Mg-Austausch, thermodynamisch nicht beständig.

Zur Ermittlung von experimentellen Daten für eine Extrapolation der längerfristigen Aktivitätsfreisetzung werden detaillierte Korrosionsuntersuchungen mit Produkten ausgewählter Zusammensetzung durchgeführt.

Zylinderproben werden so präpariert, daß der Angriff der korrosiven quinären Lösung nur von der Stirnseite her erfolgen kann. Durch eine weitreichende chemische und mineralogische Untersuchung (REM, Röntgenbeugung, Polarisationsmikroskop, ICP-Analyse) werden die gebildeten Korrosionsprodukte in Abhängigkeit von der Versuchszeit und dem Abstand von der Probenoberfläche ermittelt.

In Ergänzung hierzu werden Untersuchungen unter Bedingungen durchgeführt, die in kürzeren Zeiträumen Ergebnisse liefern. Zu diesem Zweck wurden Zementprodukte nach dem Aushärten (28 Tage) gemahlen und eine Fraktion definierter Korngröße (0,5 - 1,0 mm) ausgesiebt. Durch die Auslaugung dieser gemahlene Produkte sollte die Aktivitätsfreisetzung aus weitgehend korrodierten Produkten simuliert werden. Die Proben enthielten Tracermengen Cs-137 und Sr-85. Die Abbildungen 7.1-1 und 7.1-2 zeigen den zeitlichen Verlauf der Cs- und Sr-Freisetzung aus 35 F-Proben ohne und mit 5 Gew.-% Bentonitzusatz PZ bei der Lagerung in quinärer Lösung bei 40° C. Die erhaltenen Kurvenverläufe sind typisch für alle untersuchten Zementsorten. Sie zeigen, daß aus bentonitfreien Proben Cs und Sr bereits nach relativ kurzer Zeit vollständig freigesetzt werden. Enthalten die Proben 5 Gew.-% Bentonit, wird die Sr-Freisetzung nicht beeinflusst, für Cs ergibt sich jedoch eine deutliche Erniedrigung der Freisetzung.

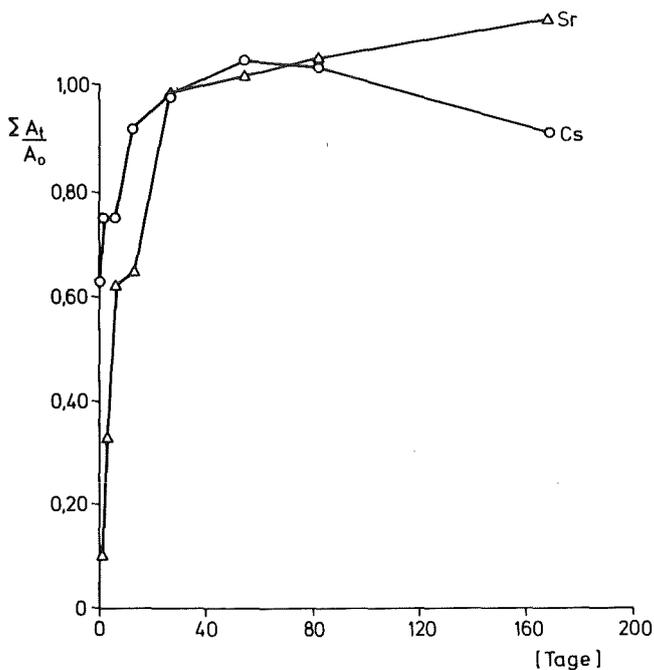


Abb. 7.1-1:
Cs- und Sr-Freisetzung aus gemahlene Zementproben ohne Bentonitzusatz bei der Lagerung in quinärer Lösung bei 40° C

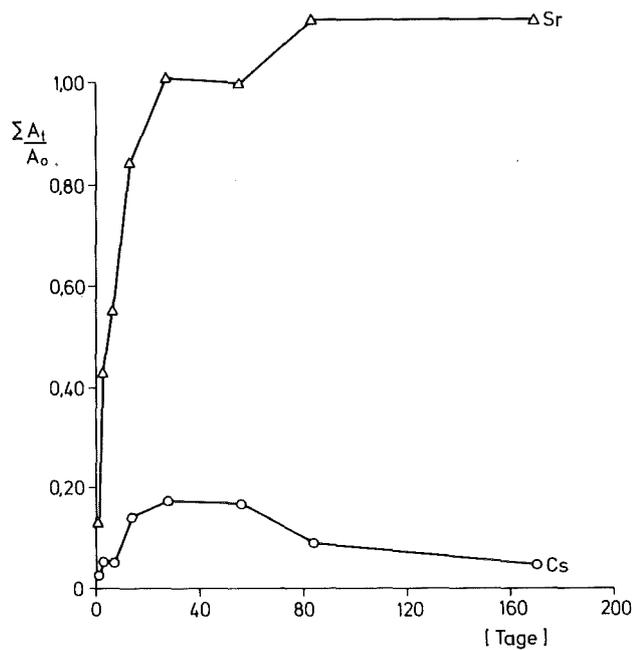


Abb. 7.1-2:
Cs- und Sr-Freisetzung aus gemahlene Zementproben mit Zusatz von 5 Gew.-% Bentonit bei der Lagerung in quinärer Lösung bei 40° C

Die hohe Sr-Freisetzung aus dem Produkt in quinärer Lösung kann mit dem hier schnell ablaufenden Ca/Mg-Austausch erklärt werden. Die Proben zeigen bereits nach einer Lagerzeit von einer Woche deutliche Anzeichen von Korrosion. Bemerkenswert ist der Verlauf der Cs-Freisetzung aus bentonithaltigen Proben. Nach ca. 40 Tagen wird ein Maximum erreicht, das einer Freisetzung von 20-40% der Cs-Aktivität entspricht. Danach verringert sich die Cs-Freisetzung und erreicht nach einer Versuchszeit von bisher 170 Tagen einen Wert von 5-10% der Gesamtaktivität.

Durch den Vergleich der Cs- und Sr-Freisetzungen mit der Freisetzung aus einer kompakten Probe gleicher Masse wird z. Zt. versucht, eine Extrapolation der maximalen Aktivitätsfreisetzung aus korrodierten Proben abzuleiten.

Zur Formulierung des Quellterms für die MAW-Zementprodukte ist auch die Ermittlung von Pu-Freisetzungsraten in gesättigten Salzlösungen bei einer Temperatur von 40-55° C notwendig. Hierzu werden die MAW-Zementproben eine bestimmte Zeit bei 50° C in dem Auslaugmedium gelagert und dann in neue Auslauggefäße mit frischem Auslaugmedium umgesetzt.

7.1.2 Untersuchungen zur Aktivitätsfreisetzung über den Luftpfad bei thermischer Belastung von MAW-Produkten

Zur Ermittlung der Pu-Freisetzung aus ungeschützten Bitumen / NaNO₃-Produkten beim Brand wurden Laboruntersuchungen und Untersuchungen mit Produkten im Originalmaßstab durchgeführt. Da Versu-

che zur direkten Bestimmung der Pu-Freisetzung aus 175 l-Produkten nicht möglich sind, wurde zur Ableitung der Pu-Freisetzung wie folgt verfahren:

Im Labormaßstab wurde die Pu-Freisetzung direkt ermittelt. Parallel dazu wurde mit inaktiven Proben, die Eu₂O₃ als Simulat für PuO₂ enthielten, in Labor- und Feldversuchen die Freisetzung von Eu bestimmt. Eu₂O₃ wurde als Pu-Simulat verwendet, da es durch Aktivierungsanalyse noch in sehr geringen Konzen-

Bitumenprodukt	Zusammensetzung	Anteil [Gew. %]
Modellprodukt für aktive Laborversuche	Bitumen R85/40	60
	NaNO ₃	35,8
	PuO ₂	4,2
Slurry Typ A (entsprechend dem Abfallbehandlungsverfahren der Eurochemic)	Bitumen R85/40	60
	NaNO ₃	25,2
	CaSO ₄	4,8
	CaF ₂	2,1
	Ca ₃ (PO ₄) ₂	1,6
	ZrO ₂	0,8
	Fe ₂ O ₃	0,8
	Al ₂ O ₃	0,5
PuO ₂	4,2	
Modellprodukt für inaktive Labor- und Feldversuche	Bitumen B15	60
	NaNO ₃	39,8
	Eu ₂ O ₃	0,2

Tabelle 7.1-3:
Zusammensetzung der Bitumenprodukte für die Abbrandversuche

trationen nachweisbar ist. Neben den Pu- (Eu-) -Verlusten wurden bei den Versuchen noch die Massenverluste und bei den inaktiven Proben die Na-Verluste ermittelt. In Tab. 7.1-3 sind die Zusammensetzungen der aktiven und inaktiven Bitumenprodukte für die Versuche angegeben. Die mit PuO_2 -dotierten Proben waren auf Alpha-Dosen von $2 \cdot 10^9 \text{ rad} - 2,5 \cdot 10^9 \text{ rad}$ bestrahlt.

Für die Ermittlung der totalen Freisetzung in Laborversuchen wurden die Produkte in einem DTA-Tiegel auf die Endtemperatur (800°C bzw. 900°C) gebracht und nach dem Abkühlen der Gewichtsverlust und die Restaktivität bestimmt.

Die in offene 175 l-Einsatztrommeln abgefüllten, mit Eu_2O_3 -dotierten Produkte wurden einem 30 minütigen Ölfeuer von 800°C ausgesetzt. Während der Versuche wurde ein Teil der freigesetzten Aerosole über Quarzfaserfilter abgesaugt.

Nach Abschluß der Versuche wurden die Gewichtsverluste bestimmt und die Verbrennungsrückstände auf den Gehalt an Na untersucht. Auf den Filtern wurde die Menge an Na und Eu bestimmt (Neutronenaktivierungsanalyse).

Aus den Gewichtsverhältnissen von Na / Eu auf den Filtern und den durch Analyse der Verbrennungsrückstände ermittelten Na-Verlusten können die Eu-Verluste bestimmt werden. Die Auswertung der Abscheidung von Eu und Na auf den Filtern als Funktion der Zeit gestattet zudem wichtige Hinweise über die Dynamik der Aktivitätsfreisetzung bei einem Brand.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse der Untersuchungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die mittleren Pu-Verluste bei den Laborversuchen liegen je nach Zusammensetzung der Bitumenprodukte bei 4% (Produkt mit 25% NaNO_3) bzw. bei 14% (Produkt mit 36% NaNO_3). Die mittleren Massenverluste betragen 73% bzw. 80%.

- Die mittleren Na-Verluste bei den Feldversuchen betragen 32%. Die mittleren Massenverluste betragen 74%.
- Aus dem zeitlichen Verlauf der Eu-Abscheidung auf den Filtern läßt sich bei den Feldversuchen eine Induktionsperiode von ca. 15-20 Minuten zwischen Versuchsbeginn und erster Eu-Freisetzung ableiten. Nach ca. 50-60 Minuten wird ein Maximum erreicht. Danach verringert sich die differentielle Eu-Freisetzungsrage stetig. Abbildung 7.1-3 zeigt die kumulierte Eu-Abscheidung auf den Filtern.

Die bisher festgestellten Freisetzungsraten wurden an Produkten in 175 l-Einsatztrommeln ermittelt, die in dieser Form nicht für eine Zwischen- oder Endlagerung in Frage kommen. Der überwiegende Teil der im Kernforschungszentrum Karlsruhe hergestellten radioaktiven Bitumenprodukte wurde in Betonbehälter verpackt (Wandstärke ca. 20 cm). Frühere Untersuchungen zeigen, daß bei einem 45minütigen Schadensfeuer die Betonabschirmung in Takt bleibt. Die Temperatur der Bitumenprodukte erhöhte sich mit starker zeitlicher Verzögerung (4-5 Stunden) nur auf etwa $70-80^\circ \text{C}$. Durch diese Versuche wurde der wirksame Schutz der verpackten Bitumenprodukte durch die Betonabschirmung bei Einwirkung eines externen Feuers aufgezeigt. Eine Aktivitätsfreisetzung kann für diesen Fall ausgeschlossen werden.

7.1.3 Untersuchungen zur Aktivitätsfreisetzung über den Luftpfad bei mechanischer Belastung von MAW-Zementprodukten

Für die Betrachtung von Störfällen beim Betrieb eines Endlagers, wie z. B. Förderkorbabsturz, sind Untersuchungen zur Ermittlung der Aktivitätsfreisetzung durch mechanische Belastung der Abfallprodukte von wesentlicher Bedeutung. Dazu wurden orientie-

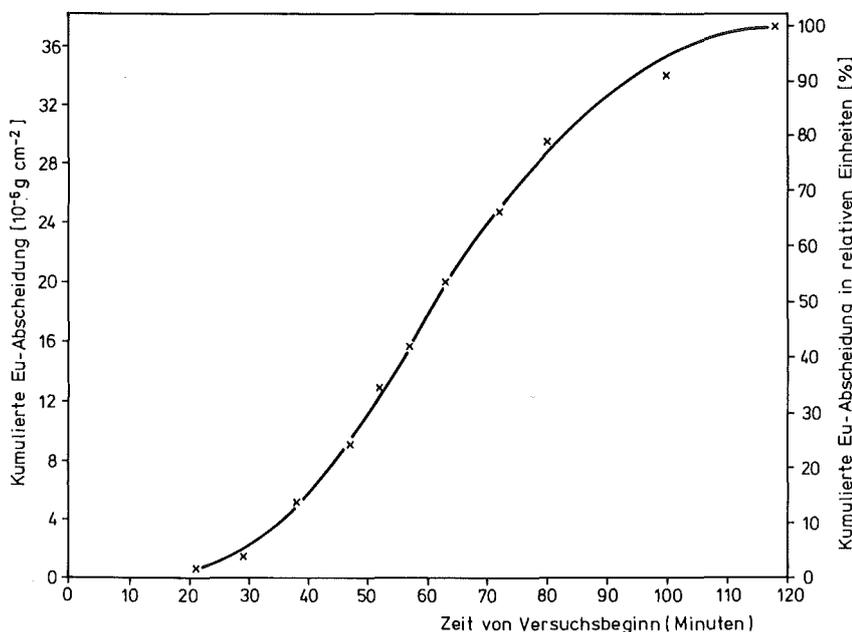


Abb. 7.1-3:
Kumulierte Abscheidung von Eu auf den Filtern in Abhängigkeit von der Versuchszeit

rende Fallversuche mit simulierten Produkten im Originalmaßstab durchgeführt, um Erkenntnisse zur quantitativen Ermittlung der Staubfreisetzung zu erhalten. Es wurden 6 Proben eingesetzt, die Fallhöhe betrug 60 m, die Aufschlagfläche bestand aus einer 80 mm dicken Stahlplatte (2,5x3 m) mit Betonfundament.

Für die Versuche wurden Zementprodukte in 200 l-Rollreifensäcken verwendet. Bei einem Gesamtgewicht von ca. 500 kg und einer Fallhöhe von 60 m wirkt beim Aufprall die Energie von ca. $3 \cdot 10^5$ Nm auf das Gebinde ein. Durch die definierte Aufhängung der Produkte am Lastseil konnte der Aufschlag variiert werden.

Das Ergebnis der Versuche läßt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die gewählte Versuchsanordnung hat sich bewährt. Es läßt sich eine hohe Treffsicherheit erreichen, so daß eine geeignete Vorrichtung zur direkten und quantitativen Erfassung des freigesetzten Feinstaubanteils angebracht werden kann.
- Der Zerstörungsgrad der Produkte und die Freisetzung sind sehr stark vom Aufschlag der Behälter abhängig. Geringe Schäden treten beim Aufschlag der Produkte mit dem Faßboden auf. Beim Aufschlag auf die Kante wird der Zerstörungsgrad erhöht. Die stärkste Deformation von Faß und Produkt tritt beim Aufschlag auf die Mantelfläche ein.

Mit den bei den Fallversuchen angefertigten Filmen und Fotos lassen sich der Verlauf des Aufschlags und die auftretende Staubfreisetzung und -ausbreitung gut dokumentieren.

Insgesamt zeigten die Fallversuche, daß es möglich sein wird, den beim Aufprall freigesetzten Feinstaubanteil direkt und quantitativ zu erfassen und die Korngrößenverteilung zu ermitteln.

7.2 Entwicklung von Verpackungen

7.2.1 Korrosionsuntersuchungen an HAW-Behälterwerkstoffen

Die selektierenden Korrosionsuntersuchungen an metallischen und nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffen zur Ermittlung geeigneter Materialien für die Auslegung von HAW-Behältern als Barriere in einem Endlager in einer Salzformation wurden fortgesetzt.

a) Metallische Werkstoffe

Es wurden Korrosionsuntersuchungen an drei Nickelbasislegierungen (Inconel 625, Incoloy 825, Hastelloy C 4) sowie an den Werkstoffen Ti 99,8-Pd und dem Stahl X 1 CrMoTi 182 (ELA-Ferrit) durchgeführt. Da im Rahmen von Störfallbetrachtungen für ein Endlager im Salinar als potentiell angreifendes Medium Salzlösungen betrachtet werden, erfolgten die Korrosionsuntersuchungen in einer quinären Salzlösung ($MgCl_2$, KCl, $MgSO_4$, NaCl, H_2O) bei $170^\circ C$ und 1 bar. Zur Erfassung des Einflusses von Schweißen und Wärmebehandlung auf das Korrosionsverhalten der Werkstoffe wurden neben dem Anlieferungszustand verschiedene Materialzustände

(z. B. geschweißt, wärmebehandelt etc.) untersucht. Die Werkstoffe wurden auf allgemeine Korrosion (Massenverlusten) und lokale Korrosionserscheinungen, wie z. B. Spannungsrißkorrosion, Lochkorrosion untersucht. Die Massenverlusten nach den beiden letzten Probenahmen sind in Tabelle 7.2-1 angegeben. Die Prüfung auf lokale Korrosion zeigte, daß Inconel 625, Incoloy 825, Ti-Pd und ELA-Ferrit zwar gegen Spannungsrißkorrosion beständig sind, jedoch eine Anfälligkeit gegen Lochkorrosion aufweisen. Der Werkstoff Hastelloy C 4 zeigte hohe Beständigkeit gegen lokale Korrosionsangriffe jeglicher Art. Sein Korrosionsabtrag nach einer Versuchszeit von 432 Tagen war sehr gleichmäßig und betrug weniger als $30 \mu m / a$.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse zeigen, daß mit Hastelloy C 4 ein Werkstoff mit hoher Korrosionsbeständigkeit zur Verfügung steht. Endgültige Aussagen über die Eignung von Hastelloy C 4 und weiterer Werkstoffe als Langzeitbarriere im Endlager können erst nach weitergehenden Untersuchungen getroffen werden. Hierzu gehört insbesondere neben dem Studium des Korrosionsmechanismus die Ermittlung des Einflusses der Gammastrahlung auf das Korrosionsverhalten der Werkstoffe.

Für die Untersuchung der Korrosion unter Gammastrahlung wurde eine Bestrahlungseinrichtung aufgebaut (Abb. 7.2-1), mit der insgesamt 18 Werkstoffproben in quinärer Salzlauge bei einer Temperatur von ca. $90^\circ C$ und externer Gammastrahlung ausge-lagert werden können. Als Strahlenquelle dient eine Co-60-Quelle mit einer Aktivität von ca. 3000 Ci. In den ringförmig um die Strahlenquelle angeordneten,

Werkstoff	Zustand	Versuchsdauer (d)	Massenverlust- raten ($g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)
2.4856 (Inconel 625)	A	148	0,38
		248	0,23
	W	148	0,20
		248	0,16
2.4858 (Incoloy 825)	A	136	0,27
		235	0,19
	W	136	0,34
		235	0,23
2.4610 (Hastelloy C 4)	A	140	0,50
		244	0,87
	W	140	0,36
		244	0,39
1.4591 (ELA-Ferrit)	A	40	7,84
		135	2,7
3.7025.10 (Ti-Pd)	A	33	0,001
		130	0,3

A = Anlieferungszustand

W = wärmebehandelter Zustand

Tabelle 7.2-1:

Massenverlusten der untersuchten metallischen Werkstoffe in quinärer Salzlösung bei $170^\circ C$ und 1 bar nach den beiden letzten Probenahmen

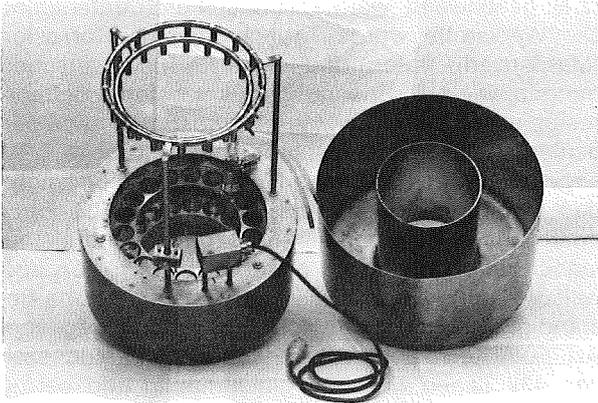


Abb. 7.2.-1:
Thermostatisierter Bestrahlungseinsatz zur Durchführung von Korrosionsuntersuchungen unter Gamma-Be-
strahlung zur Ermittlung geeigneter Werkstoffe für HAW-Behälter

mit Salzlösung gefüllten und beheizten Glasflaschen sind die Metallproben eingehängt. Die Radiolysegase werden über eine Spülleitung abgeführt. Die Gamma-Dosisleistung am Ort der Metallproben beträgt etwa $1 \cdot 10^5$ rad/h und entspricht damit in etwa der Dosisleistung an der Oberfläche einer HAW-Kokille.

Derzeit werden die Werkstoffe Ti-Pd (0,2 Gew.-% Pd) und Hastelloy C 4 sowohl in der Bestrahlungsapparatur als auch in einer Versuchsanordnung ohne Strahlung bei 90°C in quinärer Salzlauge ausgelagert. Bei der Nachuntersuchung der Korrosionsproben sollen Massenabtragsraten gemessen sowie die Proben auf lokale Korrosionserscheinungen untersucht werden. Hierbei sind Versuchszeiten bis zu einem Jahr vorgesehen. Mit der Auswertung der ersten Proben (Versuchszeit drei Monate) wurde begonnen.

b) Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe

Nach orientierenden Korrosionstests wurden Langzeit-Korrosionsuntersuchungen (Dauer: 2 Jahre) an ausgewählten Werkstoffen (Al_2O_3 , Steatit-Porzellan und ZrO_2) begonnen. Als Verbindungsmaterial zwischen Behälter und Deckel wurden auch verschiedene handelsübliche Gläser und Glaslote auf Korrosionsbeständigkeit geprüft. Die Prüfungen erfolgen in einer quinären Salzlösung bei $T = 80^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$ und $p = 130$ bar. Im Berichtszeitraum wurden Ergebnisse nach einer Prüfzeit von vier Monaten (keramische Materialien) bzw. 35 Tagen (Gläser) gewonnen.

Die Korrosionsraten der keramischen Werkstoffe nach vier Monaten Auslagerungszeit in quinärer Salzlösung zeigt Tabelle 7.2-2. Das beste Korrosionsverhalten zeigte das hochreine Al_2O_3 mit einem Gehalt $\geq 99,95$ Gew.-%. Große Behälter können jedoch aus diesem Material nicht hergestellt werden. Die Prüfung dieser Qualität erfolgte aus Vergleichszwecken. Von den restlichen Werkstoffen zeigten ZrO_2 und die Biokeramik Al_2O_3 den niedrigsten Korrosionsabtrag. Deutlich höher, jedoch absolut gesehen immer noch sehr klein, waren die Korrosionsraten bei dem techni-

schen Al_2O_3 und bei Steatit. Bei dem technischen Al_2O_3 wurde allerdings festgestellt, daß bei 200°C Bestandteile der quinären Salzlösung (wasserlösliche Magnesiumsalze) in die Proben eingedrungen und in den Korngrenzen angereichert waren. Hier sind detaillierte Untersuchungen erforderlich, um die Auswirkungen eines evtl. Korrosionsangriffes der Korngrenzen abschätzen zu können.

Werkstoff	Korrosionsrate (μm)
Al_2O_3 (transparent, hochrein) > 99,95 Gew.-% Al_2O_3	0,1
Al_2O_3 (technische Qualität) > 99,7 Gew.-% Al_2O_3	2,7
Al_2O_3 (Biokeramik) > 99,7 Gew.-% Al_2O_3	0,5
ZrO_2	0,5
Steatit-Porzellan	8

Tabelle 7.2-2:
Korrosionsraten keramischer Werkstoffe in quinärer Salzlösung (4 Monate Auslagerungszeit bei 200°C und 130 bar)

Die ersten Untersuchungen an Lötgläsern, an chemisch resistenten Gläsern sowie einem HAW-Modellglas zeigten, daß zwei Gläser von ihrer Korrosionsresistenz hier brauchbar sind. Diese sind das Borosilikatglas 8330 (Apparatglas, Duran) und das HAW-Modellglas (Borosilikatglas). Die gemessenen Massenverluste in der quinären Salzlösung bei 200°C und 130 bar betragen nach einer Versuchszeit von 35 Tagen bei Glas 8330 $4 \cdot 10^{-4}$ g/cm² und bei HAW-Modellglas $2,4 \cdot 10^{-3}$ g/cm².

Die Untersuchungen zum Langzeit-Korrosionsverhalten von keramischen Materialien sowie zur technischen Realisierung großer keramischer Behälter werden fortgesetzt. Hierzu gehören insbesondere Untersuchungen zur Temperaturwechselbeständigkeit des Behälters, zur Spannungsrißkorrosion durch Herstellungsspannungen oder Belastungen von außen und zur Machbarkeit einer Lötverbindung zwischen Behälter und Deckel.

7.2.2 Entwicklung eines Sammel-Abschirmbehälters für HAW-Kokillen aus der PAMELA

Im Rahmen der Arbeiten zur Entwicklung von Verpackungen für hochradioaktiven Abfall aus der Verglasungsanlage in Mol (Belgien) wurde ein detailliertes Konzept für den Transport und eine übertägige Zwischenlagerung von 50-70 Jahren entwickelt. Der in Edelstahlbehältern (Kokillen) gefüllte und dicht verschweißte hochradioaktive verglaste Abfall soll in einem Sammelabschirmbehälter (Abbildung 7.2-2) trocken übertägig zwischengelagert werden. Der Behälter besteht innen aus einem 50 mm dicken druckdicht verschließbaren Gußbehälter zur Aufnahme der Kokillen und außen aus einem 600 mm dicken Betonbehälter. Die Rückholbarkeit der Kokillen und damit die Anpassung an spätere Endlagerbedingungen ist durch die Verschlusskonstruktion des Beton- und Gußbehälters jederzeit möglich.

Entsprechend dem hier dargestellten Konzept werden Behälter-Prototypen gefertigt und deren Sicherheit durch Manipulations-, Wärmelast- und Fallversuche getestet.

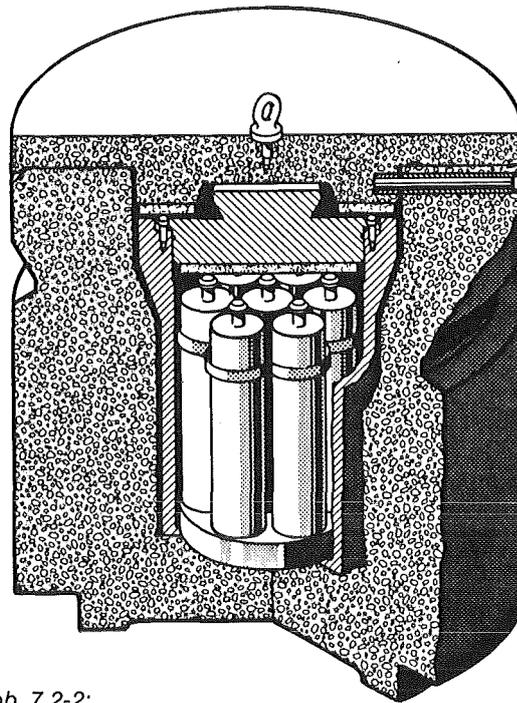


Abb. 7.2-2:
Transport- und Zwischenlagerbehälter für PAMELA
HAW-Kokillen (Gesamtgewicht 25 t)

8. Durchführung von Sicherheitsanalysen

8.1 Aktivitätsfreisetzung aus den Abfallprodukten

Zum analytischen Nachweis der Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle gehören die Beschreibung möglicher Aktivitätsfreisetzungen aus den Abfallprodukten und der Transportvorgänge im Nah- und Fernbereich des Endlagers bis in die Biosphäre. Für den Nahbereich werden Rechnungen zur kurz- und langfristigen Freisetzung von Radionukliden durchgeführt. Mit der Ermittlung mathematischer Beziehungen der Korrosions- und Auslaugprozesse wurde begonnen.

Zur Beschreibung der Vorgänge, die zur Korrosion und Auslaugung von Abfallprodukten führen, wurden mehrere Einzeleffekte untersucht. Solche sind: die Diffusion, konzentrationsabhängige Lösungsvorgänge von Radionukliden, chemische Reaktionen, die zur Änderung der Diffusionskonstanten führen, sowie Vorgänge, die Änderungen des Porenvolumens im Produkt bewirken und so zu einer Porenwasserbewegung beitragen. Die Lösung dieser Gleichungen geschah numerisch mit Hilfe des Crank-Nikolson-Differentialverfahrens für eindimensionale Geometrie.

Die Differentialgleichung, die alle Effekte beinhaltet, hat die Form

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (v \cdot c) + q (c_0 - c)$$

- c : Konzentration
- t : Zeit
- D : Diffusionskonstante
- q : Lösungsgeschwindigkeit
- c₀ : Maximalkonzentration
- x : Ortskoordinate
- v : Porenwassergeschwindigkeit

Die Radionuklidfreisetzung wurde als Funktion der Zeit für folgende Parameterkombinationen untersucht:

- Verschiedene Verhältnisse von Diffusionskonstante zur Lösungsgeschwindigkeit.
- Änderung der Diffusionskonstante als Funktion der Konzentration einer von außen in das Produkt eindringenden Substanz.
- Veränderliche Diffusionskonstanten, Lösung der untersuchten Substanz und dadurch Porenflussigkeitsbewegungen.

Als Beispiel für die untersuchten Modelle zeigt die Abbildung 8.1-1 den zeitlichen Verlauf der Radionuklidfreisetzung (relative Einheiten). Hierbei wurde angenommen, daß ca. 1% der ursprünglich im Produkt vorhandenen Radionuklide gelöst und damit transportierbar vorliegt, die restliche Radionuklidmenge wird erst durch Lösung transportierbar. Zum Vergleich ist in der Abbildung die Freisetzung durch Diffusion ohne sonstige Vorgänge eingezeichnet.

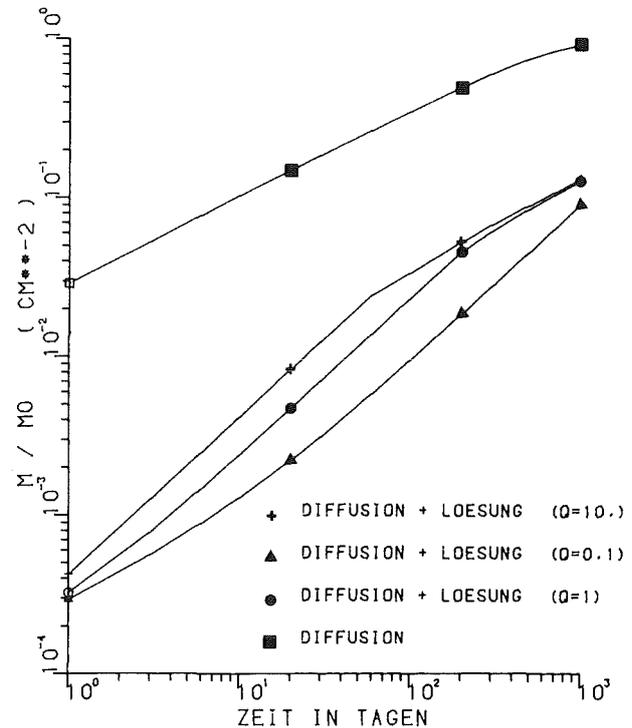


Abb. 8.1-1:

Modellrechnung: Einfluß der Lösegeschwindigkeit auf die Radionuklidfreisetzung aus einem zementierten Produkt

Die Ergebnisse der Rechnungen wurden mit experimentellen Daten verglichen und folgendermaßen interpretiert:

- Bis im Produkt eine nennenswerte Verminderung der transportierbaren (gelösten) Substanzkonzentration erreicht ist, wird die Freisetzung durch Diffusionsvorgänge bestimmt.
- Der Einfluß von sich ändernden Diffusionskonstanten und der Bewegung der Porenflüssigkeit führt zur vertikalen Verschiebung der Kurven.
- Unterschiede im Kurvenverlauf ergeben sich für verschiedene Verhältnisse von gelöster zu ungelöster Substanz im Produkt.
- Ein Vergleich der Rechnungen mit Daten zur Ca²⁺ und OH⁻-Freisetzung zeigt, daß zur Beschreibung dieser Freisetzungen Lösungssysteme innerhalb der Meßzeit nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Untersuchung der Einflüsse verschiedener Parameter auf die Freisetzung von Substanzen aus dem Produkt ist noch nicht abgeschlossen und bedarf einer weiteren Bearbeitung.

8.2 Bestimmung maximal möglicher Americium-Konzentration in Salzlösungen

Für die Untersuchung der Aktivitätsfreisetzung aus den Abfallprodukten und der Transportvorgänge im Endlager ist die Kenntnis der maximalen Konzentration von Radionukliden in Salzlösungen von Bedeutung. In diesem Rahmen wurden Experimente zur Löslichkeit von Americium-241 durchgeführt. Für die

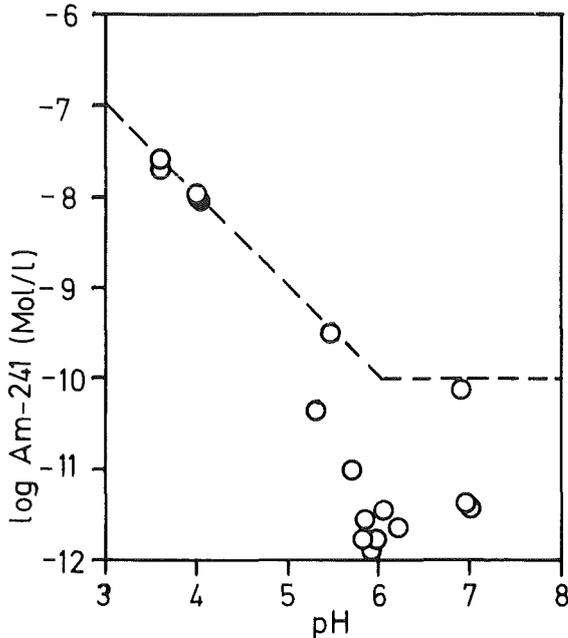


Abb. 8.2-1: Konzentration von Am-241 in Gegenwart verschiedener geologischer Proben (Korngröße $\leq 2 \mu\text{m}$). Die Proben wurden vor der Messung zentrifugiert und filtriert (Porengröße 125 \AA). Die gestrichelte Kurve gibt die oberen Grenzwerte der Am-Löslichkeit wieder.

Versuche wurden verschieden konzentrierte Salzlösungen und 10 verschiedene Gesteinsproben aus dem norddeutschen Raum verwandt. Es sollte geprüft werden, welchen Einfluß die Am-Anfangskonzentration, die Konzentration der Salzlösung, die Art des Gesteins, die Zeit, die Behandlung der Radionuklidlösung und der pH-Wert auf die Am-Löslichkeit ausüben.

Die Versuche ergaben, daß die Am-Anfangs- und Salzkonzentration, unterschiedliche Gesteinsarten sowie die Zeit- und Oberflächenverhältnisse die Am-Löslichkeit nur gering beeinflussen. Ein deutlicher Einfluß auf die Am-Konzentration ist bei der Benutzung unterschiedlicher Filterporengrößen festzustellen. Es ist zu vermuten, daß ein Teil des Americiums an kleinen Schwebeteilchen absorbiert ist, welche von Filtern mit 150 \AA und 18 \AA Porengröße zunehmend aus der Radionuklidlösung entfernt werden.

Gravierend machte sich jedoch der unterschiedliche pH-Wert auf die Löslichkeit von Americium bemerkbar. Aus dem gemessenen Datenmaterial konnten obere Grenzwerte für die Löslichkeit von Am-241 in Anwesenheit von 9 der 10 verwendeten Gesteinsarten abgeschätzt werden. Die Meßwerte und die Grenzbeziehung zwischen dem pH-Wert und der Am-Konzentration sind aus der Abbildung 8.2-1 ersichtlich. Danach gilt für den Bereich pH 3,5 bis pH 6

$$\log \text{Am (Mol/l)} \leq -4 - 1\text{pH}$$

und für den Bereich pH 6 bis pH 10

$$\log \text{Am (Mol/l)} \leq -10.$$

Die ermittelten Werte stehen für die Freisetzungs- und Ausbreitungsrechnungen zur Verfügung.

9. Vorträge und Veröffentlichungen

Vorträge

Albrecht, E.,:

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland. Vortrag: IPTS - Zentralstelle Kiel, 11.11.1981

Batsche, H.; v. Stempel, C.:

Die Verteilung der Süß- und Salzwasser im Bereich des Höhenzuges der Asse und der Einfluß des Salzsattels der Asse auf die Temperatur des Grundwassers.
Tagung der Fachsektion Hydrologie der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Kiel, 13.5.1981

Brewitz, W.; Engelmann, H.-J.:

Stand und Ergebnisse des Forschungs- und Entwicklungsprogramms zur Eignungsprüfung der Schachtanlage Konrad für die Einlagerung radioaktiver Abfälle.
Einführungsvortrag zur außerordentlichen öffentlichen Ratssitzung der Stadt Salzgitter, Salzgitter, 29.1.1981

Brewitz, W.; Reichenbacher,; Stippler, R.:

Erfordernisse und Möglichkeiten für die Endlagerung von Betriebs- und Stilllegungsabfällen aus Kernkraftwerken in dem Eisenerzbergwerk Konrad.
Jahrestagung Kerntechnik, Düsseldorf, 25.3.1981

Brewitz, W.; Gommlich, G.; Rabsilber, K.:

Montangeologische Untersuchungen zur Feststellung der Nutzungsmöglichkeiten der Eisenerzgrube Konrad für die Endlagerung radioaktiver Abfälle.
133. Hauptversammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Clausthal, 16.-18.9.1981

Essaid, S.; Klarr, K.:

Geologische Erkundung im Zechstein der Salzstruktur Asse.
133. Hauptversammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Clausthal-Zellerfeld, 16.-18.9.1981

Fischle, W. R.:

Investigations on Model Caverns Concerning the Interaction between Simulated MLW/LLW and Salt Rock.
NEA-Workshop on Near-Field Phenomena in Geologic Repositories for Radioactive Waste. Seattle, Wash./USA, 31.8.-4.9.1981

Gies, H.; Heremans, R.; Barbreau, A.; Bourke, P.:

Thermal aspects associated with the disposal of waste in deep geological formations.
First European Community Conference on Radioactive Waste Management and Disposal-Luxemburg, 20.-23.5.1980

Gies, H.:

Grundlagen und Probleme der Endlagerung von Radioaktivem Abfall.
Ver. Goslarer Akademiker, Febr. 1981

Gies, H.; Rothfuchs, R.:

Auswirkungen der Produkteigenschaften auf das Endlagermedium Salz und sich daraus ergebende Bedingungen.
Internationales Seminar über Chemie und Verfahrenstechnik bei der Verfestigung flüssiger hochradioaktiver Abfälle, Jülich, 1.-5.6.1981

Gies, H.:

Zur Frage der thermischen Belastbarkeit von Salzen.
133. Hauptversammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Clausthal-Zellerfeld, 16.-18.9.1981

Hente, B.; Gommlich, G.; Glach, D.:

Microseismic monitoring of candidate nuclear waste disposal sites.
3rd Conference on acoustic emission and microseismic activity in geologic structures and materials, Penn. State University University Park, Pennsylvania, USA, 5.-7.10.1981

Jockwer, N.:

Transport Phenomena of Water and Gas Components within Rock Salt in the Temperature Field of Disposed High-Level Waste.
NEA-Workshop on Near-Field Phenomena in Geologic Repositories for Radioactive Waste. Seattle, Wash./USA, 31.8.-4.9.1981

Köster, R.:

Anforderungen, Charakterisierung und Qualitätssicherung mittelradioaktiver Abfallprodukte.
Radioaktiver Abfall, Charakterisierung und Qualifizierung der Produkte. 5. Tagung im Haus der Technik, Essen, 27.10.1981

Kolditz, H.:

Tief Lagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen.
Vortrag: KFA Jülich, 3.11.1981

Kolditz, H.; Schmidt, M.; Schwägermann, H.-F.:

Construction of a cavity for disposal of medium level waste at the Asse Salt Mine.
IAEA Seminar Karlsruhe, 5.-9.10.1981

Kühn, K.; Ollig, R.:

The German Approach for the Disposal of Low Level Radioactive Waste. Part of the German „Entsorgungs“ Policy.
Waste Management 81, Tucson, Arizona /USA, 23.-26.2.1981

Kühn, K.; Proske, R.:

Die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologische Salzformationen in der Bundesrepublik Deutschland.
VGB-Konferenz „Kraftwerke und Umwelt 1981“, Essen, 7.4.1981

Kühn, K.:

Endlagerung von hochaktiven Abfällen in Salzstöcken.
KTG-Seminar „Sicherheitsaspekte bei Transport und Lagerung von hochaktiven Brennelementen und hochaktiven Abfällen“.
Stuttgart, 3.-4.6.1981

Smailos, R.; Kienzler, R.; Köster, R.:

HAW-Behälter als Barriere im Endlager.
Internat. Seminar über Chemie und Verfahrenstechnik bei der Verfestigung flüssiger hochradioaktiver Abfälle, Jülich, 1.-5.6.1981

Staupendahl, G.; Schmidt, M.W.:

Field Investigation of the Long-Term Deformational Behavior of a 10.000 m³ Cavity at the Asse Salt Mine.
First Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Penn. State University, University Park, Pennsylvania, USA, 9.-11.11.1981

Stippler, R.; Kleimann, H.:
Emissionsüberwachung der Schachtanlage Asse.
Poster-Präsentation auf der Gemeinsamen Strahlenschutztagung über radiologische Auswirkungen von Kernkraftwerken und anderen kerntechnischen Anlagen auf den Menschen und seine Umwelt, Lausanne, Schweiz, 30.9.-2.10.1981

Stippler, R.:
Strahlenschutz und Radioaktivität / Gesetzliche Regelungen / Schutzbestimmungen.
Vortrag vor dem Arbeitskreis Betriebsgewerkschaftsaus-schuß Konrad, 31.10.1981

Wallmüller, R.:
Entsorgung von radioaktivem Abfall aus Forschung, Medizin und Technik.
Vortrag: Bürgerverein Buchschlag, 12.6.1981 und Oberstufe Gymnasium Geogianum, Lingen, 26.9.1981

Veröffentlichungen

Böhm, H.; Closs, K.-D.; Kühn, K.:
Radioactive Waste Disposal.
in: Nuclear Science and Technology, Vol. 13, 1-72, Plenum Press, New York, 1981, GSF-T 128

Brewitz, W.; Stippler, R.:
Endlagerung von Stilllegungsabfällen in der Bundesrepublik Deutschland.
Atomkernenergie / Kerntechnik, Vol. 39 (1981), No. 2, 105-111.

Gies, H.:
Geologische Grundlagen der Endlagerung.
In „Entsorgung von Kernkraftwerken“, Verlag TÜV-Rheinland GmbH, Köln, Oktober 1981

Gies, H.; Frommler, G.; Gessler, K.; Lutze, W.; Malow, G.; Winske, P.:
Zulässige thermische Belastung von Gesteinen und Konsequenzen für die Methoden der Endlagerung radioaktiver Abfälle.
Synthese-Studie erstellt im Auftrag der Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 401 s., 91 Abb., 77 Tab., Braunschweig-Clausthal, Mai 1981

Heremans, R.; Barbreau, A.; Bourke, P.; Gies, H.:
Thermal aspects associated with the disposal of waste in deep geological formations.
Radioactive Waste Management and Disposal (Proc. First Europ. Commun. Conf.), Luxemburg, 468-487 (1980)

Jockwer, N.:
Die thermische Kristallwasserfreisetzung des Polyhalits und Kieserits in Abhängigkeit von der absoluten Luftfeuchtigkeit.
Kali und Steinsalz, Band 8, Heft 4, 126-128, GSF-Bericht T 126.

Jockwer, N.:
Laboratory Investigation of Water Content within Rock Salz and its Behavior in a Temperature Field of Disposed High Level Waste.
Scientific Basis for Nuclear Waste Management, Vol. 3, 35-42, Plenum Press, New York, GSF-Bericht T 131.

Klarr, K.:
Grundlagen zur Geologie der Asse.
GSF-Bericht T 117, Neuherberg (1981)

Köster, R.:
Ausgewählte Aspekte der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen.
Festkolloquium aus Anlaß des 25-jährigen Bestehens des Kernforschungszentrums Karlsruhe, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 11.6.1981
KfK-Nachrichten, 13 (1981) S. 197-202.

Krause, H.:
Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Behandlung und Endlagerung radioaktiver Abfälle.
KfK-Nachrichten 13 (1981) No 1-2, S. 68-72.

Moeckel, H.; Köster, R.:
Untersuchungen zur Radiolysegasbildung zementierter LAW / MAW-Produkte.
Atomkernenergie-Kerntechnik, 37 (1981) S. 245-48.

Opp, O., Thielemann, K.; Kleimann, H.:
Zwölf Jahre Erfahrung mit dem Transport radioaktiver Abfälle in einem Salzbergwerk.
6th International Symposium Packaging and Transportation of Radioactive Materials. Berlin, 10.-14.11. 1980.
K. O. Storck & Co, Verlag und Druckerei GmbH, Hamburg (1981).

Stippler, R.; Kleimann, H.:
Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht 1980,
GSF-Bericht T 127.

Rudolph, G.; Vejmelka, P.; Köster, R.:
Leach an corrosion tests under normal and accident conditions on cement products from simulated intermediate level evaporator concentrates.
Moore, J. G. (Hrsg.)
Scientific Basis for Nuclear Waste Management.
3rd Internat. Symp., Boston, Mass., November 17-20, 1980.
New York, N. Y. (usw.): Plenum Pr. 1981. Vol. 3, S. 339-46.