

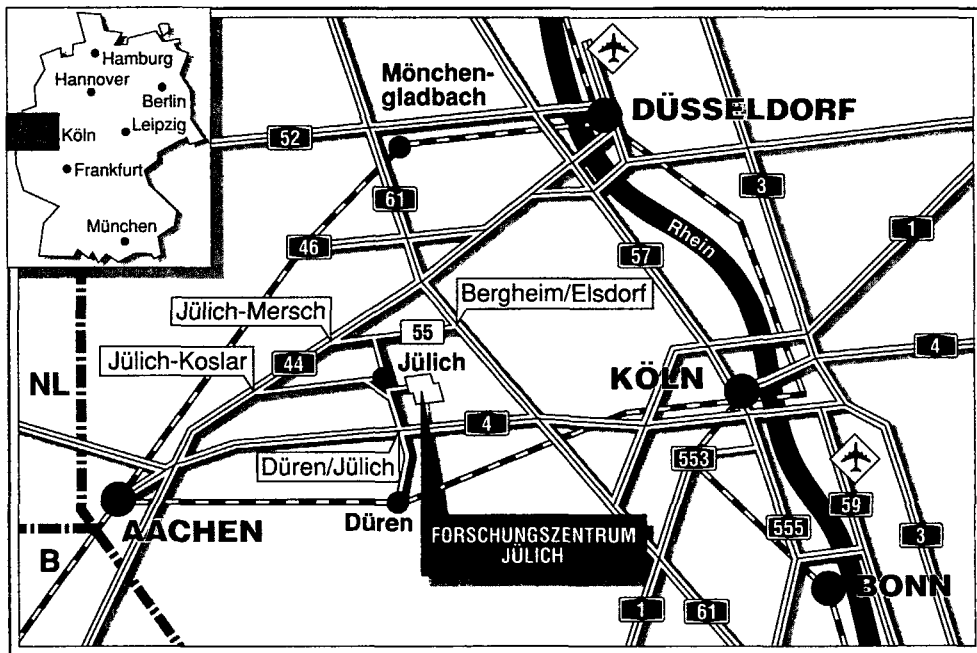
*Institut für Sicherheitsforschung
und Reaktortechnik*

**Forschungsvorhaben MAW- und
HTR-BE-Versuchseinlagerung
in Bohrlöchern (Projekt MHV)**

**Einlagerungs- und Bohrlochverschlußtechnik
(Teilprojekt EBT)**

Abschlußbericht

E. Barnert H. Brücher K. Kroth



Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 2883

ISSN 0944-2952

Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik Jül-2883

Zu beziehen durch: Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek

D-52425 Jülich · Bundesrepublik Deutschland

Telefon: 024 61 / 61 - 61 02 · Telefax: 024 61 / 61 - 61 03 · Telex: 833 556-70 kfa d

Forschungsvorhaben MAW- und HTR-BE-Versuchseinlagerung in Bohrlöchern (Projekt MHV)

**Einlagerungs- und Bohrlochverschlußtechnik
(Teilprojekt EBT)**

Abschlußbericht
für die Projektphase 1.10.1989 – 31.12.1992

E. Barnert H. Brücher K. Kroth

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen KWA 5302 B6 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kurzfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens MAW- und HTR-BE-Versuchseinlagerung in Bohrlöchern (Projekt MHV) wurden von 1983 bis 1992 F&E-Arbeiten zur Entwicklung und Erprobung einer Endlagertechnik für wärmeentwickelnde mittelradioaktive Abfälle (MAW-(Q)) und für bestrahlte Hochtemperaturreaktor-Brennelemente (HTR-BE) durchgeführt. Die Projektarbeiten waren dabei auf die zwei Teilprojekte "Einlagerungs- und Bohrlochverschlußtechnik" (EBT) und "Rückholbarer Einlagerversuch" (REV) mit unterschiedlichen Arbeitsschwerpunkten und Zielsetzungen aufgeteilt.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Arbeitsergebnisse des Teilprojekts "Einlagerungs- und Bohrlochverschlußtechnik" in seiner dritten Projektphase vom 1. 10. 1989 bis zum 31. 12. 1992.

In dem Bericht wird eingangs die Atmosphäre im Endlagerbohrloch während der Betriebs- und der Nachbetriebsphase beschrieben. Die Bohrlochatmosfera wird maßgeblich beeinflusst durch Gas- und Feuchtigkeitsfreisetzungen aus den Gebinden und aus dem anstehenden Steinsalz, durch die Ausbreitung der Gase im unbefüllten und im mit Salzgrus versetzten Teil des Bohrlochs, sowie durch die Durchlässigkeiten von Bohrlochverschluß und Anstehendem. Wasserstoffgas kann durch ein Zuschlagmittel oxidiert werden.

Referenzkonzept für die Bohrlochlagerung ist die Einbettung der Gebinde in Salzgrus. Der dafür erforderliche Salzgrusversatz wird charakterisiert, die Druckverteilung im Versatz bei der Stapelung der Gebinde im Bohrloch wird modelliert. Schließlich wird die Flammenlöschwirkung von Salzgrus beschrieben.

Sicherheitsbetrachtungen und der Konzeptentwurf eines Bohrlochversatzbehälters schließen die Arbeiten in dieser Projektphase ab.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|---|----|
| | Vorwort | 1 |
| 1. | Einleitung und Zielsetzung | 2 |
| 2. | Bohrlochatmosferae | 5 |
| 2.1 | Freisetzung von Gasen und Feuchtigkeit aus den Abfallgebinden | 5 |
| 2.1.1 | Freisetzung von Gasen aus den WAK-Gebinden | 5 |
| 2.1.2 | Freisetzung von Gasen aus homogen zementiertem Feedklaerschlamm | 8 |
| 2.1.3 | Freisetzung von Gasen aus COGEMA- und BNFL-Gebinden | 11 |
| 2.2 | Freisetzung von Gasen und Feuchtigkeit aus dem anstehenden Steinsalz | 16 |
| 2.3 | Ausbreitung von Gasen im befuellten Teil des Bohrlochs | 19 |
| 2.3.1 | Experimente zum Ausbreitungsverhalten von Gasen im Bohrlochversatz | 19 |
| 2.3.2 | Modellierung des Gastransports im befuellten und mit Salzgrus versetzten Teil des Bohrlochs | 22 |
| 2.4 | Maßnahmen zur Beeinflussung der Bohrlochatmosferae | 25 |
| 2.4.1 | Ausbreitung von Gasen im offenen Teil des Bohrlochs | 25 |
| 2.4.2 | Chemische Umsetzung von Wasserstoff | 32 |
| 3. | Salzgrus als Bohrlochversatzmaterial | 37 |
| 3.1 | Kennwerte von Salzgrus | 37 |
| 3.2 | Druckverteilung im Salzgrusversatz | 44 |
| 3.3 | Orientierende Versuche zur Lastabtragung mit Salzgrus | 49 |
| 3.4 | Salzgrus als Flammensperre | 54 |
| 4. | Sicherheitstechnische Randbedingungen | 61 |
| 4.1 | Konzentrationsgrenzwerte und Sicherheitsbetrachtungen | 61 |
| 4.2 | Druckaufbau im Bohrloch | 63 |
| 5. | Basiskonzept | 69 |
| 6. | Komponentenentwuerfe | 73 |
| 7. | Bohrlochverschluß | 78 |
| 8. | Literaturverzeichnis | 79 |

Vorwort

Nach den Planungen des Bundes sollen alle Arten von radioaktiven Abfällen, insbesondere aber diejenigen mit merklicher Wärmeentwicklung, im Salz endgelagert werden. Zu diesen wärmeentwickelnden Abfällen zählen der verglaste hochradioaktive Abfall, bestimmte zementierte mittelradioaktive Abfälle aus der LWR-Brennelemente-Wiederaufarbeitung sowie bestrahlte (abgebrannte) HTR- und LWR-Brennelemente, die ohne Wiederaufarbeitung direkt endgelagert werden sollen. Die wärmeentwickelnden Abfälle sollen in tiefen vertikalen Bohrlöchern oder in horizontalen Strecken eingelagert werden.

Die Arbeiten zur sog. MAW-Bohrlochlagerung sind im Projekt "MAW- und HTR-BE-Versuchseinlagerung in Bohrlöchern" (Projekt MHV) zusammengefaßt, das seit 1983 von der KFA Jülich geleitet wird. Das Projekt ist unterteilt in die beiden Teilprojekte "Einlagerungs- und Bohrlochverschlußtechnik" (EBT) und "Rückholbarer Einlagerversuch" (REV).

Nach erheblichen Kürzungen im Kalenderjahr 1992 hat der Bundesminister für Forschung und Technologie der KFA Jülich Ende 1992 mitgeteilt, daß er aus übergeordneten Gründen das Projekt MHV nicht über den 31. 12. 1992 hinaus fortführen kann. Im Frühjahr 1993 hat sich das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) grundsätzlich bereiterklärt, bestimmte Arbeiten aus dem Teilprojekt EBT auf der Basis der Endlager-Vorausleistungsverordnung in den Haushalt des BfS zu übernehmen.

In dem vorliegenden Bericht werden die Arbeiten und Ergebnisse im Teilprojekt EBT für den Zeitraum 1. 10. 1989 bis 31. 12. 1992 zusammenfassend und abschließend dargestellt.

1. Einleitung und Zielsetzung

Nach den Planungen des Bundes sollen alle Arten von radioaktiven Abfällen, insbesondere aber diejenigen mit merklicher Wärmeentwicklung, im Salz endgelagert werden. Zu diesen wärmeentwickelnden Abfällen zählen der verglaste hochradioaktive Abfall (HAW), bestimmte zementierte Abfälle (MAW(Q)) aus der Wiederaufarbeitung von Leichtwasserreaktor-Brennelementen (LWR-BE) sowie verbrauchte Hochtemperaturreaktor (HTR)- und LWR-Brennelemente, die ohne Wiederaufarbeitung direkt endgelagert werden sollen. Die wärmeentwickelnden Abfälle sollen in 300- bis 600-m-tiefen Bohrlöchern unter Verwendung von Kokillen (für HAW und LWR-BE) bzw. Bohrlochtechnik-Behältern (für MAW(Q) und HTR-BE) eingelagert werden. Für bestimmte Abfälle und Brennelemente wird außerdem eine Lagerung in Strecken untersucht.

Der Bundesminister des Innern bzw. die Reaktorsicherheits-Kommission gehen in ihren Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk /1/ davon aus, "...daß die Einlagerung radioaktiver Abfälle mit bereits erprobten Techniken durchgeführt wird". Die Techniken zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung sind entwickelt und erprobt und sind Bestandteil des Konzeptes der Bundesrepublik Deutschland für ein zu errichtendes Endlager. Die Bohrlochlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen befindet sich dagegen noch in der Entwicklung.

So können schwach radioaktive Abfälle ohne nennenswerte Strahlung und Wärmeentwicklung untertage in Strecken, Kammern oder Kavernen endgelagert werden. Entsprechende Stapel-, Abkippl-, Absenk- oder Verfülltechniken sind entwickelt, getestet und z. T. auch im Salzbergwerk Asse eingesetzt worden /2/. Die dabei gewonnenen Erfahrungen können wegen der grundsätzlich unterschiedlichen Randbedingungen (Einlagergeometrie; kaum Strahlung, Temperatur und Gase) nur in sehr geringem Umfang auf die Endlagerung von wärmeentwickelndem MAW übertragen werden.

Weiterhin wurden in der Vergangenheit im Salzbergwerk Asse mehrere Temperaturversuche mit elektrischen Erhitzern zur Simulation von wärmefreisetzenden radioaktiven Abfällen durchgeführt /3/, /4/, /5/, /6/. Von 1983 bis 1985 fand der "Brine Migration Test" als amerikanisch-deutsches Gemeinschaftsprojekt statt, bei dem neben elektrischen Erhitzern Kobalt-60-Großquellen eingesetzt wurden /7/. Diese Experimente dienten im wesentlichen der Simulation der Einlagerung hochaktiven Abfalls, bei der neben der hohen

Dosisleistung auch ein großer Wärmeeintrag ins Gebirge erfolgt. Die Fortsetzung dieser Versuchsreihe ist die ebenfalls im Salzbergwerk Asse vorbereitete HAW-Versuchseinlagerung, deren dritte Projektphase 1989 begonnen hat /8/.

Bei der Einlagerung von MAW(Q) in Bohrlöchern liegen insofern andere Verhältnisse vor, als der Wärmeeintrag und die Dosisleistung deutlich geringer als bei HAW sind. Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist die Tatsache, daß die MAW-Gebinde im Gegensatz zu Kokillen mit verglastem HAW Gase freisetzen, wobei neben radioaktiven Komponenten (Kr-85, C-14 als CO₂, HTO) insbesondere auch die Wasserstoff-Freisetzung von sicherheitstechnischer Bedeutung ist. Außerdem werden die MAW-Gebinde im Bohrloch in Salzgrus eingebettet, um die Stapellasten besser abtragen und die Gase besser beherrschen zu können.

Die Arbeiten zur sog. MAW-Bohrlochtechnik sind im Projekt "MAW- und HTR-BE-Versuchseinlagerung in Bohrlöchern" (Projekt MHV) zusammengefaßt, das seit 1983 von der KFA Jülich geleitet wird. Untersucht werden die mit der Bohrlochlagerung von MAW(Q) (im wesentlichen die sog. Headendabfälle aus der LWR-BE-Wiederaufarbeitung, das sind Feedklärschlämme, Brennelementhülsen und -strukturteile) und von bestrahlten HTR-Brennelementen in vertikalen Bohrlöchern im Salz zusammenhängenden Probleme. Das Projekt ist unterteilt in die beiden Teilprojekte "Einlagerungs- und Bohrlochverschlußtechnik" (EBT) und "Rückholbarer Einlagerversuch" (REV).

Mit Schreiben vom 21. 12. 1992 hat der Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) der KFA Jülich mitgeteilt, daß er aus übergeordneten Gründen das MHV-Projekt nicht über den 31. 12. 1992 hinaus fortführen kann. Gleichzeitig wurde die KFA aufgefordert abzuklären, welche Projektteile eventuell vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) im Rahmen der Endlager-Vorausleistungsverordnung (VLV) finanziert werden können.

Mit Schreiben vom 15. 3. 1993 hat das BfS den BMFT darüber informiert, daß die Arbeiten zum Teilprojekt REV nicht auf der Basis der Endlager-VLV durchgeführt werden können. Dieser Projektteil wird daher vom BfS nicht übernommen. Dagegen können bestimmte Arbeiten aus dem Teilprojekt EBT, die auch für die Streckenlagerung von MAW und für die Bohrlochlagerung von HAW von Bedeutung sind, vorbehaltlich einer abschließenden Entscheidung über die VLV finanziert werden.

Der vorliegende Bericht faßt die Ergebnisse der Arbeiten zum Teilprojekt EBT für den letzten Projektzeitraum vom 1. 10. 1989 bis 31. 12. 1992 zusammen. Über die Ergebnisse des Teilprojekts REV mit dem in situ-Versuch in der SchachanlageASSE wird getrennt berichtet /9/.

2. Bohrlochatmosferae

In die Atmosphaere eines Endlagerbohrlochs koennen aus den Abfallgebinden radioaktive (H-3, C-14, Kr-85, J-129) und konventionelle Gase (Radiolyse- bzw. Korrosionswasserstoff) sowie Feuchtigkeit freigesetzt werden. Aus dem umliegenden Salzgestein koennen konventionelle Gase (z. B. CO₂, CH₄, H₂S) und Feuchtigkeit in das Bohrloch gelangen. Aus Sicherheitsgruenden duerfen waehrend der Betriebsphase des Bohrlochs bestimmte Grenzkonzentrationen fue Gase an keiner Stelle im unverfuellten Bohrloch ueberschritten werden. Ebenso duerfen bestimmte Freisetzungsmengen aus dem Bohrloch in die Strecke nicht ueberschritten werden.

Ziel der Untersuchung ist die Beschreibung der Atmosphaere in einem Endlagerbohrloch bei der Beladung mit Abfallgebinden, wobei ggf. zwischen verfuelltem und nicht verfuelltem Bohrlochabschnitt zu unterscheiden ist. Moegliche Maessnahmen zur Reduzierung der Gas-konzentrationen (z. B. Zugabe von Oxidationsmitteln) sind zu beruecksichtigen.

2.1 Freisetzung von Gasen und Feuchtigkeit aus den Abfallgebinden

2.1.1 Freisetzung von Gasen aus den WAK-Gebinden

Im Rahmen eines Heisszellenexperiments wurde die Freisetzung von Wasserstoff und von radioaktiven Gasen (H-3, C-14 und Kr-85) an sechs MAW-Gebinden aus der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) mit zementierten Head-End-Abfaellen in der KFA Juulich untersucht. Das Untersuchungsprogramm wurde abgeschlossen, die Ergebnisse dokumentiert /10/, /11/.

Die an den Versuchsgebinden gemessenen Freisetzungsraten dienen einerseits als Antragswerte fue den rueckholbaren Einlagerversuch in der Asse. Andererseits wurde auf der Basis der Versuchsergebnisse eine Abschaeztung der fue COGEMA- und BNFL-Gebinde zu erwartenden Gasfreisetzungsraten vorgenommen (vgl. Kap. 2.1.3).

Eines der untersuchten Gebinde enthielt die Strukturteile eines LWR-BE, zwei weitere ausgelaugte Zirkaloy-Huellaehrschnitte. In den restlichen drei Gebinden waren Filterbeutel mit Feedklaerschlamm konditioniert. Die nuklearen Daten der WAK-Abfallgebinde zeigt Tabelle 1. Tabelle 2 zeigt die mittleren Freisetzungsraten fue Wasserstoff und Kr-85,

Tab. 1: Zusammenfassung der WAK-Gebindedaten /9/

| | Feedklärschlamm | Brennelement- Hüllrohrstücke | Brennelement- Strukturteile |
|---|------------------------------------|---|--|
| Anzahl der Gebinde | 3 | 2 | 1 |
| Verpackung | 200-l-Rollsickenfaß | 200-l-Rollsickenfaß | 200-l-Rollsickenfaß |
| Bezeichnung der Verpackung/ des Abfalls | FKS-1 / FKS-2 / FKS-3 | H-187/ H-190 | S-190 |
| Dichtheit der Verpackung in mPa × l / s | keine / Belüftung über Mikrofilter | keine / Belüftung über Mikrofilter | keine / Belüftung über Mikrofilter |
| Gesamtmasse in kg | 280 / 281/ 298 | 324 / 338 | 321 |
| Abfallbehälter | 120-l- Einsatzbehälter | 120-l- Einsatzbehälter | 120-l- Einsatzbehälter |
| Fixierungsmatrix | Stahlgefäß + Zementstein+Bleistein | Zementstein | Zementstein |
| Abfallmasse in kg | ≈ 0,08 / ≈ 0,14 / ≈ 0,01 | ≈ 60 / ≈ 74 | ≈ 49 |
| Masse Abfall +Matrix in kg | 203 / 204/ 223 | ≈ 251 / ≈ 265 | ≈ 228 |
| Gesamtaktivität in TBq | ≈ 12 / ≈ 21,5 / ≈ 16,8 | ≈ 29,4 / ≈ 36,2 | ≈ 141 |
| Gesamtwärmeleistung in W | ≈ 1,5 / ≈ 2,8 / ≈ 2,2 | ≈ 8 / ≈ 10 | ≈ 34 |
| Oberflächendosisleistung in Gy / h | ≈ 1 / ≈ 1,5 / ≈ 0,5 | ≈ 10 / ≈ 15 | ≈ 90 |
| Urangehalt insgesamt in g | ≈ 7 / ≈ 12,6 / ≈ 9,9 | ≈ 245 / ≈ 309 | -- |
| U 235 - Gehalt in g | 0,03 -- 0,6 | ≈ 1,7 / ≈ 2,2 | -- |
| Plutoniumgehalt insgesamt in g | 0,3 -- 0,5 | ≈ 2,4 / ≈ 3,1 | -- |
| Pu 239- Gehalt in g | 0,2 -- 0,3 | ≈ 1,4 / ≈ 1,8 | -- |
| Pu 241- Gehalt in g | 0,03 -- 0,06 | ≈ 0,2 / ≈ 0,3 | -- |

Bezugsdatum: Juli 1986, Wiederaufarbeitung 4 Jahre nach Reaktorentnahme (GKN-BE Nr. 182, 187 u. 190)

die während des 2,5 Jahre dauernden Meßprogramms an den sechs WAK-Gebinden ermittelt wurden.

Tab. 2: Mittlere H₂- und Kr-85-Freisetzungsraten der sechs WAK-Gebinde

| Gebinde | mittlere H ₂ -Freisetzungsrates | mittlere Kr-85-Freisetzungsrates |
|--------------------|--|----------------------------------|
| Strukturteile | 85 Nml/d | - |
| Hülsen, 187 | 6,4 Nml/d | 0,77 MBq/d |
| Hülsen, 190 | 2,2 Nml/d | 1,6 MBq/d |
| Feedklärschlamm, 1 | 28 Nml/d | 0,11 MBq/d |
| Feedklärschlamm, 2 | 77 Nml/d | 0,36 MBq/d |
| Feedklärschlamm, 3 | 65 Nml/d | 0,13 MBq/d |

Die weiteren Ergebnisse des Versuchsprogramms können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die H₂-Freisetzungsraten nehmen z. T. mit der Zeit deutlich schneller ab, als aufgrund des nuklearen Inventars zu erwarten wäre.
- In der Zementsteinmatrix wird kein Wasserstoff gespeichert, der beim Aufheizen auf Temperaturen bis zu 80°C freisetzbar ist.
- Die Kr-85-Freisetzungsraten nehmen bei konstanter Temperatur mit der Zeit ab. Das freisetzbare Inventar verarmt.
- Beim Aufheizen der Gebinde wird kurzzeitig (wenige Monate) vermehrt Kr-85 freigesetzt. Langzeitlich nimmt jedoch die Kr-85-Freisetzungsrates bei erhöhten Temperaturen Werte an, die unter den Raumtemperaturwerten vorangegangener Zeitabschnitte liegen.
- Neben Kr-85 wird H-3 und C-14 in sehr geringen Mengen aus den Gebinden freigesetzt. Die Freisetzungsrates sind so gering, daß durch diese Radionuklide keine radiologischen Auswirkungen für das Betriebspersonal während der Einlagerung zu erwarten sind.

2.1.2 Freisetzung von Gasen aus homogen zementiertem Feedklärschlamm

Nach Plänen der BNFL soll der bei der Auflösung des bestrahlten Brennstoffs anfallende Feedklärschlamm (FKS) homogen in einer hydraulisch abbindenden Matrix fixiert werden. Es stand zu erwarten, daß unter diesen Bedingungen in gewissem Umfang Radiolysewasserstoff in den Gebinden erzeugt bzw. aus diesen freigesetzt wird.

Das Ziel der Arbeiten bestand darin, die H_2 -Produktionsraten durch ein Experimentalprogramm /12/, /13/ zu quantifizieren. Da reale Großbinde mit homogen zementiertem FKS nicht zur Verfügung standen, wurden die Versuche an Kleinproben durchgeführt, die eigens zu diesem Zweck hergestellt wurden.

Der benötigte Feedklärschlamm wurde durch chargenweise Auflösung von etwa 1 kg LWR-Brennstoff hergestellt. Insgesamt wurden zehn Auflöserversuche durchgeführt. Der Brennstoff wurde von der WAK bezogen und stammte aus dem Kernkraftwerk Stade. Der Abbrand betrug 35.523 MWd/t. Der bei der Auflösung in HNO_3 angefallene FKS wurde durch Zentrifugation aus der Brennstofflösung abgetrennt. Gemittelt über die zehn Auflöserversuche fielen 8,6 g FKS pro Kilogramm Uran an.

Zur Herstellung der Probekörper wurde der FKS jeweils einer Auflösecharge mit 36 g Wasser und 75 g Portlandzement PZ 35 F intensiv vermischt. Aus der Suspension wurden Proben entnommen, an denen das Aktivitätsinventar (Ru-Rh-106, Sb-125, Cs-Ba-137m, Cs-134, Ag-110m) durch γ -spektrometrische Analyse ermittelt wurde. Nach dem Aushärten wurden die Probekörper aus den Formen ausgekleidet und in gasdichten Autoklaven verschlossen. Aus diesen wurden in zeitlichen Abständen Gasproben entnommen, an denen die H_2 -Konzentration gaschromatographisch analysiert wurde.

Abbildung 1 zeigt einen Blick in eine Heiße Zelle des Chemiezellen-Gebäudes in der KFA, in der die Auflöserversuche durchgeführt wurden.

Aus dem gemessenen Aktivitätsinventar wurde die in den Probekörpern absorbierte β/γ -Wärmeleistung und die im Innern der Körper herrschende β/γ -Dosisleistung berechnet. Zusätzlich wurde die nukleare Wärmeleistung von drei Probekörpern kalorimetrisch mit Hilfe eines totalabsorbierenden Wärmeflußkalorimeters gemessen. Die letztgenannten Messungen wurden im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK), Hauptabteilung Ingenieurtechnik, durchgeführt. Aus der inneren Dosisleistung wurde die zu erwartende H_2 -

Produktionsrate der Probenkörper abgeschätzt. Hierbei wurde von einem G_{H_2} -Wert für die radiolytische Produktion von Wasserstoff in Zementstein von 0,45 Nml H_2 pro kJ absorbierter Strahlungsenergie ausgegangen. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Abschätzung.

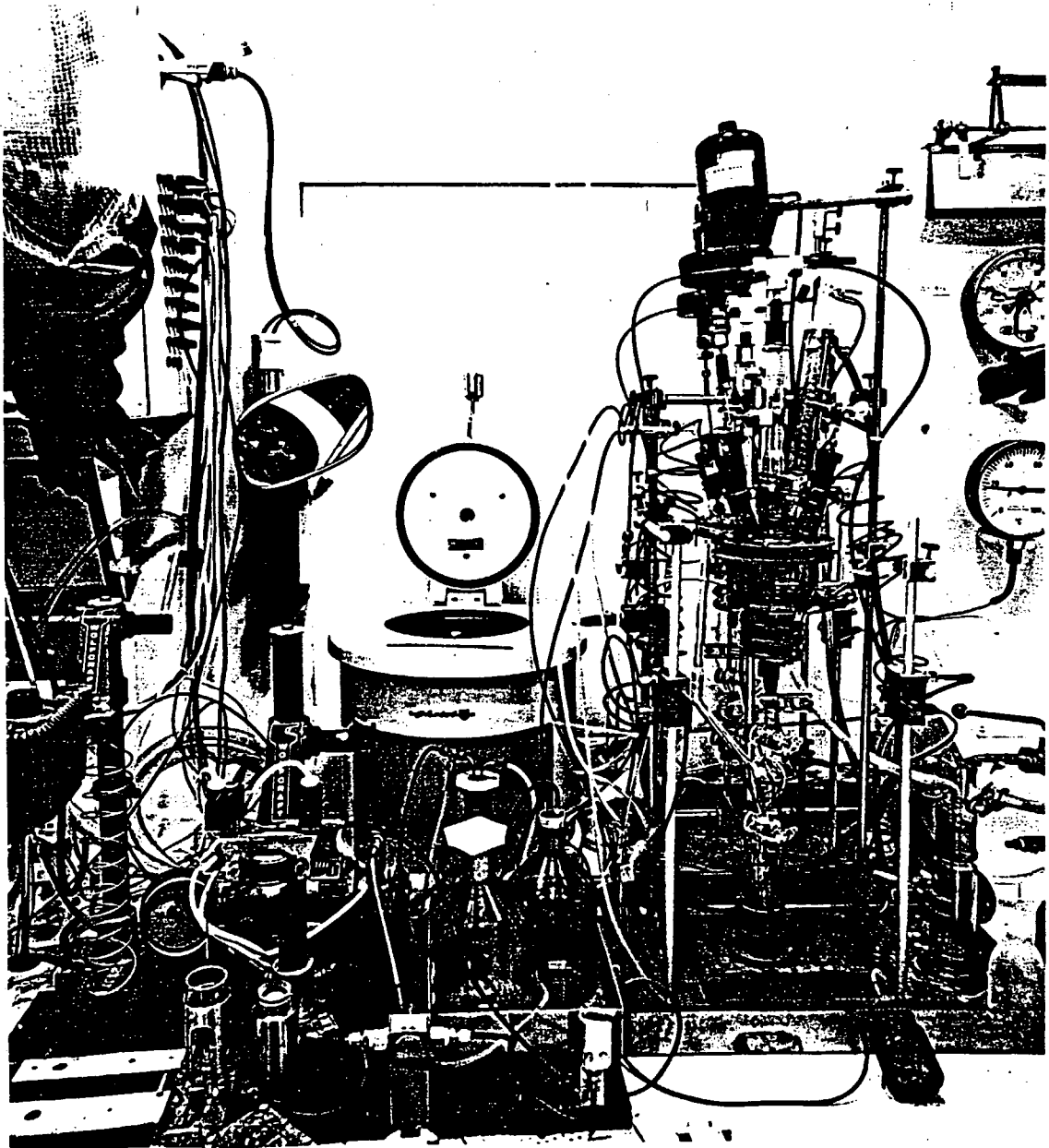


Abb. 1: Heißzelleneinrichtung zur Auflösung des Brennstoffs und zur Präparation der Probekörper

Tab. 3: Nukleare Wärmeleistung, innere Dosisleistung und abgeschätzte H₂-Produktionsrate der Probekörper (die Zahlen in Klammern geben die in den Proben absorbierte Wärmeleistung an)

| Pr. Nr. | FKS-Masse mg | Wärmeleistung ¹⁾ mW | | innere ¹⁾ Dosisleistung Gy/h | H ₂ -Produktions- ¹⁾ rate Nml/Tag |
|---------|--------------|--------------------------------|-----------|---|---|
| | | Kal. | gamma | | |
| 1 | 238 | 4,9 | 4,0 (2,8) | 104 | 0,11 |
| 2 | 541 | - | 4,5 (3,0) | 124 | 0,12 |
| 4 | 1072 | - | 6,8 (4,6) | 147 | 0,18 |
| 5 | 1193 | - | 6,9 (4,6) | 174 | 0,18 |
| 6 | 1153 | 8,0 | 8,3 (5,6) | 219 | 0,22 |
| 7 | 442 | 4,6 | 3,9 (2,6) | 107 | 0,10 |
| 9 | 2142 | - | 5,0 (3,4) | 110 | 0,13 |

¹⁾ Bezugszeitpunkt: 30. 6. 89 = 5,3 a

Die Ergebnisse des Untersuchungsprogramms lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die gemessenen H₂-Produktionsraten sind sehr gering. Sie liegen z. T. bis zu zwei Größenordnungen unterhalb der Raten, die auf der Basis des Aktivitätsinventars und des G_{H2}-Werts abgeschätzt wurden.
- Unter Wasserstoffatmosphäre aufbewahrte Probekörper produzieren nicht nur keinen Radiolysewasserstoff, sondern nehmen Wasserstoff aus der Gasphase auf. Die typische Aufnahmekapazität beträgt 1 Nml H₂ pro mg Feedklärschlamm.
- Feedklärschlamm in unfixierter Form nimmt ebenfalls begierig Wasserstoff auf. Die Reaktionskinetik ist wesentlich schneller als bei zement-fixierten Proben.
- Der aufgenommene Wasserstoff wird bei erhöhten Temperaturen bis 450°C vollständig wieder abgegeben. Aufnahme und Abgabe von Wasserstoff sind reversible Prozesse, die durch die Temperatur gesteuert sind.

- Knallgas (67 Vol% H₂ und 33 Vol% O₂) wird vollständig zu Wasser katalytisch "verbrannt", wenn es in einem geschlossenen System in Kontakt mit den Probenkörpern gebracht wird.

Diese Ergebnisse können folgendermaßen interpretiert werden:

Feedklärschlamm besteht u. a. aus metallischen Phasenausscheidungen der Spaltelemente Zr, Mo, Tc, Ru, Rh und Te und der Aktiniden U und Pu. Von den meisten dieser Metalle ist bekannt, daß sie unter Aufnahme von Wasserstoff zu Hydridbildung neigen. Es kann unterstellt werden, daß die Aufnahme von Wasserstoff durch Hydridbildung dieser metallischen FKS-Phasen verursacht wird.

Weiterhin enthält der Feedklärschlamm in nennenswerten Mengen die Platin-Elemente Pd, Rh und Ru. Diese Elemente sind wegen ihrer katalytischen Eigenschaften bekannt. Einerseits kann der FKS wegen dieser katalytischen Eigenschaften in den Rekombinationsprozeß der primär durch Radiolyse entstandenen Radikale eingreifen und auf diesem Weg die Netto-Bildung von Wasserstoff unterdrücken. Ebenso ist denkbar, daß der Radiolyse-Wasserstoff zwar erzeugt, aber in Anwesenheit von Luftsauerstoff durch Katalyse zu Wasser rekombiniert wird.

Eine Kombination der beiden o. g. Interpretationsansätze wird dafür verantwortlich gemacht, daß die an den Probekörpern gemessenen H₂-Produktionsraten z. T. um mehrere Größenordnungen geringer als theoretisch erwartet sind. Den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen zufolge ist daher nicht zu erwarten, daß BNFL-Gebinde mit homogen zementiertem Feedklärschlamm in relevanten Mengen Radiolyse-Wasserstoff produzieren bzw. freisetzen.

2.1.3 Freisetzung von Gasen aus COGEMA- und BNFL-Gebinden

Auf der Basis der an den WAK-Gebinden gemessenen Gasfreisetzungsraten (vgl. Kap. 2.1.1) wurden die zu erwartenden Produktionsraten von BNFL- und COGEMA-Gebinden mit zementierten Headend-Abfällen abgeschätzt.

Die Abschätzung basiert auf den von BNFL bzw. von COGEMA herausgegebenen Spezifikationen /14/, /15/ für zementierte Headend-Abfälle, die - soweit sie hier interessieren - in Tabelle 4 zusammengestellt sind. Zum Vergleich werden in der Tabelle ebenfalls Inhalt

und Inventar der in der KFA untersuchten WAK-Fässer mit zementierten Hülsen und Strukturteilen aufgeführt.

Bei der Abschätzung der H_2 -Produktionsraten wurde davon ausgegangen, daß der Wasserstoff durch Radiolyse des Porenwassers der Verfestigungsmatrix erzeugt wird. Unter dieser Annahme ist die H_2 -Produktionsrate proportional zum Wassergehalt der Matrix und zur inneren Dosisleistung, der die Matrix ausgesetzt ist. Die innere Dosisleistung wird bestimmt von der nuklearen Wärmeleistung bzw. vom Aktivitätsinventar der Gebinde.

Zur weiteren Vereinfachung der Abschätzung wurde angenommen, daß unabhängig vom Wassergehalt der jeweiligen Matrix die H_2 -Produktionsrate nur abhängig ist von der Masse der in dem jeweiligen Gebinde konditionierten Hülsen und Strukturteile. Unter diesen Annahmen läßt sich die zu erwartende H_2 -Produktionsrate der BNFL- und COGEMA-Gebinde auf einfache Weise durch eine gewichtete Mittelung der an den WAK-Gebinden gemessenen Raten abschätzen. Entscheidend für die Zuverlässigkeit der Abschätzung ist in erster Linie der Grad der Co-Verunreinigung der Strukturmaterialien. Co-60 als Aktivierungsprodukt ist Hauptaktivitätsträger der Strukturteile und ist somit weitgehend bestimmend für die Menge des produzierten Radiolysewasserstoffs.

In Tabelle 5 werden die in der eben beschriebenen Weise abgeschätzten H_2 -Produktionsraten der BNFL- und COGEMA-Gebinde zusammengestellt. Aufgrund der Ergebnisse unserer Untersuchungen an Kleinproben mit homogen zementiertem Feedklärschlamm (vgl. Kap. 2.1.2) ist zu erwarten, daß in den BNFL-Gebinden mit zementiertem FKS kein radiolytisch erzeugter Wasserstoff produziert wird. Zusätzlich wird in Tabelle 5 die mittlere H_2 -Produktionsrate von WAK-Gebinden mit zementierten Headend-Abfällen aufgeführt. Diese mittlere Rate wurde auf der Basis der gemessenen H_2 -Freisetzungsraten (vgl. Tab. 2) durch gewichtete Mittelung über die Gesamtzahl der in der WAK erzeugten Headend-Abfallgebäude abgeschätzt.

In Abb. 2 werden die Ergebnisse der Abschätzung mit den von BNFL bzw. COGEMA spezifizierten H_2 -Produktionsraten verglichen. Die auf der Basis unserer experimentellen Ergebnisse abgeschätzten Raten liegen deutlich unterhalb der jeweiligen Spezifikationswerte. Die zeitliche Abnahme der Spezifikationswerte beruht darauf, daß die in der Matrix absorbierte Strahlungsleistung infolge des abklingenden Aktivitätsinventars abnimmt.

Tab. 4: Verwendete BNFL- und COGEMA-Spezifikationen sowie Vergleich mit WAK-Gebinden
 1) Kühlzeit = 10 a 2) Kühlzeit: 3 a 3) Kühlzeit: 4 a
 4) Mittelwert der beiden Hülsen-Gebinde H-187 und H-190 der WAK

| Gebinde | Nutzvolumen | Abfall/Inventar | Matrix |
|----------------------------------|-------------|---|---|
| BNFL "Hulls and Ends" | 500 l | Hülsen; 363-449 kg Zircaloy Strukturteil.; 68-78 kg Edelstahl + Inconel Wärmel.: = 7-21 Watt ¹⁾ A _{ges.} = 0,8-1,8 · 10 ¹⁴ Bq ¹⁾ | Hochfenasche/Portlandzement 7:1 Wasser/Zement = 0,36 |
| BNFL "Centrifuge Cake Slurry" | 500 l | 12 kg Feedklärschlamm Wärmel.: 3,5 Watt ¹⁾ A _{ges.} = 4 · 10 ¹³ Bq ¹⁾ | Hochfenasche/Portlandzement 10:1 Wasser/Zement = 0,35 homogenes Produkt |
| COGEMA "Hulls and End Caps" | 1300 l | Hülsen; 653 kg Zircaloy Strukturteil.; 138 kg Edelstahl + Inconel Wärmel.: ≤ 115 Watt ²⁾ A _{ges.} ≤ 8 · 10 ¹⁴ Bq ²⁾ | Zement CPA 55 + Fontainebleau Sand Wasser/Feststoff = 0,28 |
| WAK H-187, H-190 | 120 l | Hülsen; 74 kg Zircaloy ⁴⁾ Wärmel.: 10 Watt ³⁾⁴⁾ A _{ges.} = 3,7 · 10 ¹³ Bq ³⁾⁴⁾ | Portlandzement PZ 35 F Wasser/Zement = 0,45 |
| WAK S-190 | 120 l | Strukturteile; 49 kg Edelstahl + Inconel Wärmel.: 34 Watt ³⁾ A _{ges.} = 1,4 · 10 ¹⁴ Bq ³⁾ | Portlandzement PZ 35 F Wasser/Zement = 0,45 |

Tab. 5: Abgeschätzte H₂- und Kr-85-Produktionsraten der BNFL-, COGEMA- und WAK-Gebinde mit zementierten Headend-Abfällen für eine Kühlzeit von 7 a

| Gebinde | H ₂ -Produktionsrate | Kr-85-Produktionsrate |
|--|---------------------------------|-----------------------|
| BNFL "Hulls and Ends" | 139-161 Nml/Tag | 5,8-7,2 MBq/Tag |
| BNFL "Centrifuge Cake Slurry" | 0 Nml/Tag | - |
| COGEMA "Hulls and End Caps" | 277 Nml/Tag | 10,5 MBq/Tag |
| WAK mittleres 200 l-Faß mit zementierten Head End Abfällen | 58 Nml/Tag | 0,87 MBq/Tag |

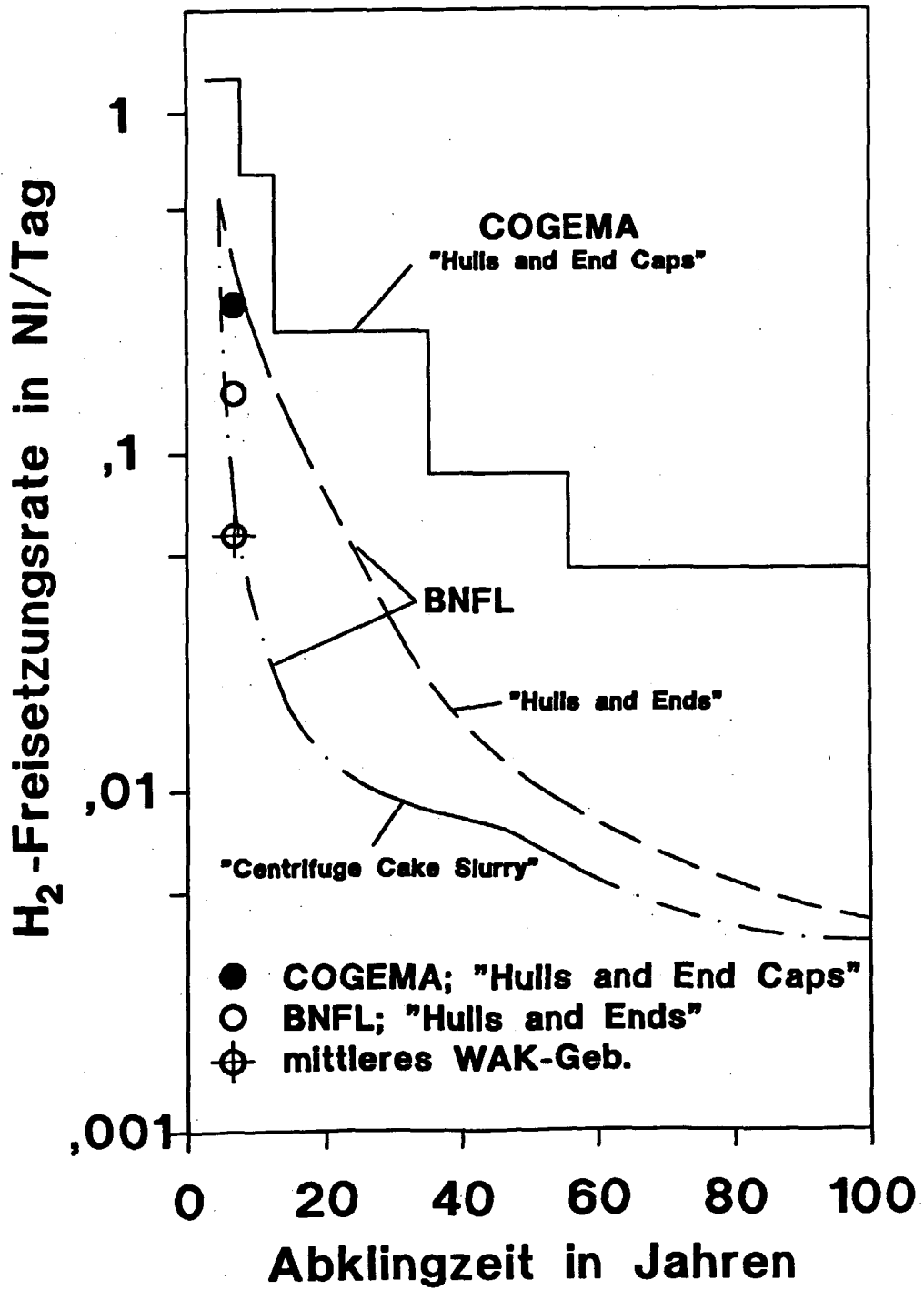


Abb. 2: Vergleich der abgeschätzten H_2 -Produktionsraten mit den BNFL- bzw. COGEMA-Spezifikationen
Symbole: abgeschätzte H_2 -Produktionsraten nach 7 a

An dem WAK-Gebinde mit zementierten BE-Strukturteilen wurde naturgemäß keine Freisetzung von Kr-85 festgestellt, da die metallischen Komponenten nicht mit bestrahltem Kernbrennstoff in Kontakt waren. Es wurde deshalb angenommen, daß der jeweilige Gehalt der Gebinde an Hülsenmaterial maßgeblich für die Kr-85-Freisetzung ist. Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der Hochrechnung für die BNFL- und COGEMA-Gebinde. Die Kr-85-Freisetzungsrates von BNFL-Gebinden mit Feedklärschlamm (Centrifuge Cake Slurry) konnte nicht abgeschätzt werden, da hierfür keine Ausgangsdaten vorlagen.

Unsere Untersuchungen an den WAK-Gebinden haben gezeigt, daß die Freisetzung von Kr-85 durch Verarmung mit der Zeit abnimmt. Die Datenbasis ist jedoch zu gering, um die zeitliche Abnahme über längere Zeiträume zu quantifizieren. Es ist daher konservativ, von einer zeitlich konstanten Kr-Freisetzung auszugehen.

2.2 Freisetzung von Gasen und Feuchtigkeit aus dem anstehenden Steinsalz

Zu der Ende 1990 an die Fa. Noell Freiberg vergebenen Studie, in deren Rahmen die heute bestehenden Kenntnisse zur Charakterisierung von Steinsalz zusammengestellt und im Hinblick auf eine Verwendung der Daten zur Entwicklung der Bohrlochtechnik bewertet werden sollten, liegt der Endbericht als Projektbericht /16/ vor.

In dem Bericht werden die im internationalen Maßstab durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich der Lagerstättenverhältnisse, des Versuchsaufbaus, der Versuchsdurchführung sowie der Analysendaten dokumentiert und einer Bewertung bezüglich der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse unterzogen.

Für die Gasfreisetzungen aus dem Anstehenden sind die lagerstättentypischen großräumigen Gasprovinzen bestimmend, die für vorliegende Belange eine Vergleichbarkeit im norddeutschen Salinar vermuten lassen, örtlich darüber hinaus aber dies in Frage stellen.

Der vorhandene Ausbildungsgrad natürlicher Wegsamkeiten für flüchtige Stoffe im Gestein in Gestalt von Schichtflächen kann im untertägigen Aufschlußbereich (Streckenstoß oder Bohrlochwand) zur unterschiedlichen Stofffreisetzungsrates beitragen. Darin unterscheidet sich z. B. das flächenarme "Asse"-Salz vom "Allertal"-Salz.

Schließlich ist die Schichtenlagerung selbst direkt wie auch indirekt als Kennzeichen des tektonischen Schicksals der Gesteinseinheit von Einfluß auf den Stoffhaushalt des Gesteins und seiner Entbindungsmöglichkeit. Unvergleichbar sind deshalb stark durchgearbeitete Salzdiapire (Gorleben) mit tafelförmigen Salzlagerstätten, die nur eine schonende tektonische Beeinflussung erfahren haben (Salt Vault und WIPP).

Neben diesen Lagerstättenunterschieden ergeben sich auch aus den untersuchungstechnischen Unvollkommenheiten Beschränkungen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse. Als Hauptproblem ist hierbei die Undichtigkeit der Meßbohrlöcher anzusprechen, die bei allen bisherigen Versuchsfeldern die Ergebnisse der Langzeitversuche in Frage stellt.

Demzufolge wird für Prognosen zur möglichen Stofffreisetzung aus dem Anstehenden im Interesse einer konservativen Aussage als Modellvorstellung eine vollständige Freisetzung des freien Gas- und Feuchteinhalts im Bereich der Gesteinsentspannungszone in Erwägung gezogen. Für die Definition der maximalen Rate der Stofffreisetzung müßte dabei angenommen werden, daß eine vollständige Gesteinsentspannung eingetreten ist.

Die infolge der Radiolyse von Zementwässern und der Korrosion der Metallbehälter an den Lagerkörpern möglichen Wasserstoffbildungen können unter Umständen umfangreicher sein als die der Gesteinsentgasung. In diesem Fall wäre der Abfallkörper in Abhängigkeit von seiner Materialbeschaffenheit eine entscheidende Einflußgröße der Bohrloch-sicherheit.

Als weitere wichtige Einflußgröße sind die Permeabilitätsverhältnisse des Gebirges anzusehen.

Zum Nachweis eines spezifischen Haushalts an flüchtigen Stoffen im Bohrloch sowie zur Stützung von Modellvorstellungen zum Prozeßablauf der Bildung, Umbildung, Akkumulation und Freisetzung des betrachteten sicherheitsrelevanten Wasserstoffs sind nach Auffassung der Autoren des Berichtes folgende weiterführende Untersuchungen erforderlich zum Stoffinhalt und Materialverhalten des Bohrlochwandgesteins:

- Labormäßige Bestimmung des natürlichen Stoffinhalts an Feuchte und Gas (bei ausreichend großer Probe, um punktuell Gehaltsunterschiede zu überstreichen und Nachweisgrenzen zu genügen; ohne vorherige Stoffverluste; bei vollständiger Stofffreisetzung).

- Bestimmung der Stofffreisetzung (Gas und Feuchte) aus dem Anstehenden (unter Laborbedingungen und bei minimaler Leckrate am Analysensystem).
- Untersuchung zur Ausbildung der Gesteinskriechzone in der Bohrlochwand (bei einem Permeabilitätsnachweis unter Berücksichtigung der Zeit, Wärme und Strahlung als Einflußgrößen unter Laborbedingungen).
- Nachweis einer korrelativen Abhängigkeit der Freisetzung flüchtiger Stoffe vom Gesteinskriechen (unter Anwendung von Labor- und In-situ-Messungen).

Zur Wasserstoffbildung im Bohrloch werden folgende Untersuchungen für erforderlich gehalten:

- Labormäßige Ermittlung des Bedarfs an $MgCl_2$ -reicher Sole für die Erzeugung einer Mengeneinheit Wasserstoff durch Korrosion von Eisen in Abhängigkeit von der Temperatur.
- Bestimmung der Druckabhängigkeit der Korrosionsgeschwindigkeit von Eisenwerkstoffen unter endlagerrelevanten Bedingungen.
- Untersuchungen zur Sauerstofferzeugung durch Radiolyse und zur Rekombination von Wasserstoff und Sauerstoff in der Gasphase unter endlagerrelevanten Bedingungen.

Zur Wasserstoffmigration aus dem Bohrloch sollte untersucht werden:

- Bestimmung der Permeabilität des Bohrlochwandgesteins für Wasserstoff (unter Berücksichtigung der spezifischen petrografischen, textuellen und geodynamischen Bedingungen).
- Bestimmung der Permeabilität des Bohrlochversiegelungsmaterials für Wasserstoff (unter Berücksichtigung des stofflichen Aufbaus und der Stoffverdichtung).

Die systematische Untersuchung der Wasserstoffentwicklung durch anaerobe Korrosion von Metallen unter Endlagerbedingungen ist eines der Themen, die im Rahmen des MHV-Projekts mit BfS-Finanzierung weitergeführt werden. Die übrigen angesprochenen Fragestellungen (Stoffinhalte/-freisetzungen aus Salzgestein; Wasserstoffmigration) sind zum überwiegenden Teil in den Untersuchungsprogrammen anderer Forschungsgruppen enthalten.

2.3 Ausbreitung von Gasen im befüllten Teil des Bohrlochs

2.3.1 Experimente zum Ausbreitungsverhalten von Gasen im Bohrlochversatz

Es ist zu erwarten, daß aus den Gebinden radiolytisch erzeugter Wasserstoff und in geringem Umfang flüchtige Radionuklide, insbesondere das Edelgasisotop Kr-85, in das Porenvolumen des Versatzes während der Beladung freigesetzt werden.

Diese Gaskomponenten breiten sich im Porenraum des Versatzmaterials durch Diffusion und im Falle von Druckgradienten (z. B. atmosphärische Druckschwankungen) durch Darcy-Strömung aus. Letzten Endes können diese Gase teilweise in den noch unbeladenen Teil des Bohrlochs (Explosionsrisiko) bzw. in die Strecke (Dosisbelastung des Betriebspersonals) entweichen. Von entscheidender Bedeutung für die Beurteilung der o.g. sicherheitstechnischen Konsequenzen ist das Ausbreitungsverhalten der freigesetzten Gase im Porenraum des Versatzes.

Das Ausbreitungsverhalten von Wasserstoff und von Kr-85 in unkompaktiertem Salzgrusversatz wurde mit einer Experimentiersäule (Höhe = 320 cm, ϕ = 30 cm, siehe Abb. 3) untersucht. Der verwendete Salzgrus hatte ein breites Kornspektrum von 0 - 16 mm mit einem hohen Gewichtsanteil von Körnern unter 1 mm. Die Porosität des unverdichteten Versatzes betrug 41 %.

Bei einem Teil der Versuche wurde Wasserstoff bzw. mit Kr-85-getracerte synthetische Luft kontinuierlich am Boden der Säule mit einer typischen Rate von 1 NI/h eingespeist. Gemessen wurde die H₂- und Kr-85-Konzentration am Säulenausgang als Funktion der Zeit. Zusätzlich wurden von Zeit zu Zeit an insgesamt 24 über die Säule verteilten Meßstellen Gasproben aus dem Porenraum des Versatzes entnommen. Die Gasproben wurden hinsichtlich ihrer H₂- und Kr-85-Konzentration ausgemessen.

Bei weiteren Versuchen wurde einmalig in der Mitte der Säule ein definiertes Volumen der interessierenden Gase kurzzeitig eingespeist. Die achsiale Verteilung der injizierten Gaskomponenten wurde in diesem Fall durch sporadische Beprobung der Säule ermittelt.

Stellvertretend für die übrigen Meßergebnisse zeigt Abbildung 4 die achsiale Verteilung von Wasserstoff über den Porenraum der Grussäule nach Injektion von 2,15 NI H₂ in der Mitte der Säule. Die gefüllten Symbole stellen die gemessenen H₂-Konzentrationen 0,67 h, 1,31 h bzw. 4,00 h nach Beginn des Experiments dar. Der injizierte Wasserstoff breitet sich

im Porenraum des Salzgrusversatzes in beiden Richtungen in einer Weise aus, die für die Diffusion von Gasen typisch ist.

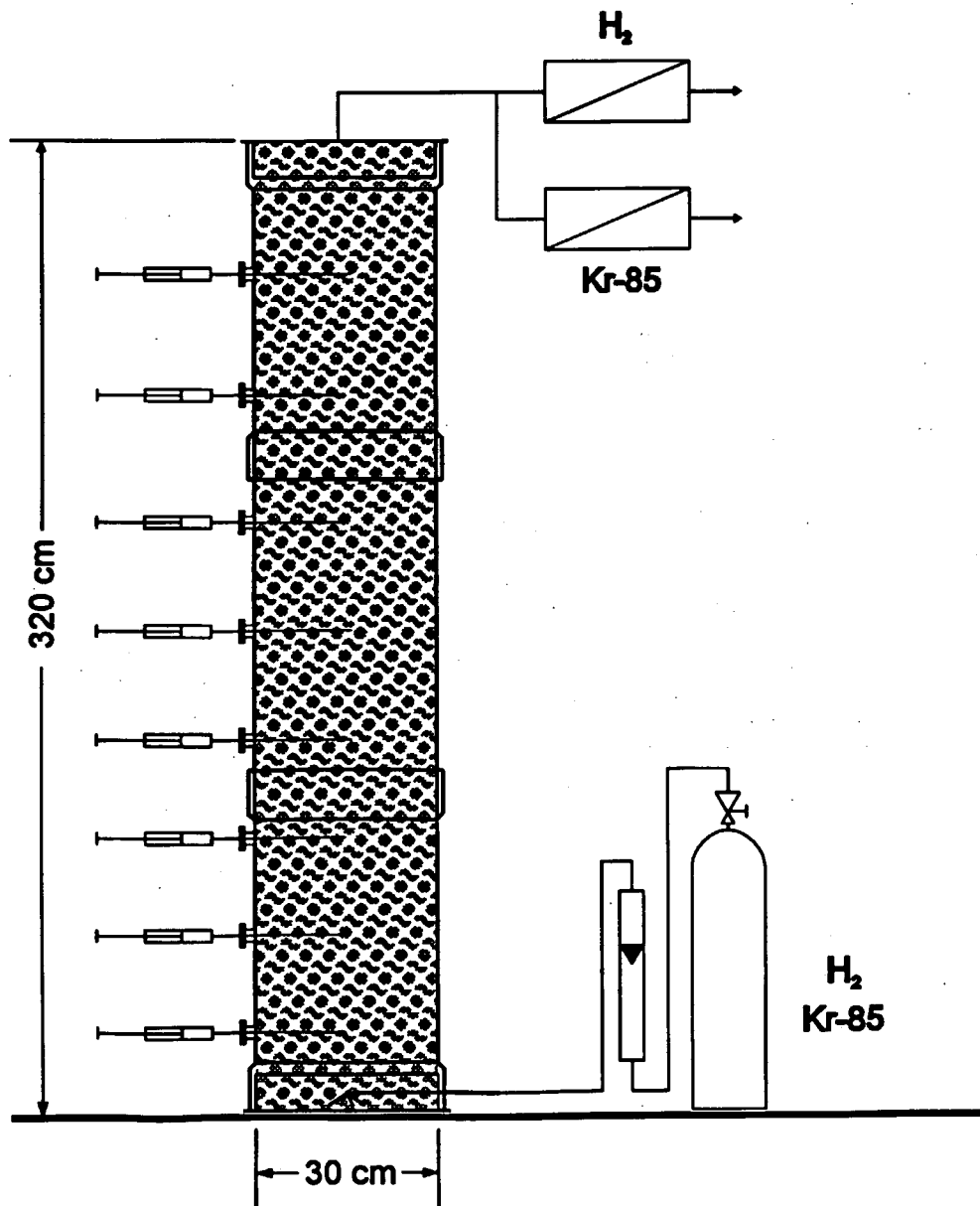


Abb. 3: Experimentiersäule zur Untersuchung des Gasausbreitungsverhaltens im Salzgrusversatz

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurde ein Rechenmodell entwickelt, mit dem die Ausbreitung von Gasen in Zylindergeometrie berechnet werden kann. Das Modell berücksichtigt die Gasdiffusion sowie den Darcy-Transport und wurde auf die gegebenen Säulenverhältnisse angepaßt.

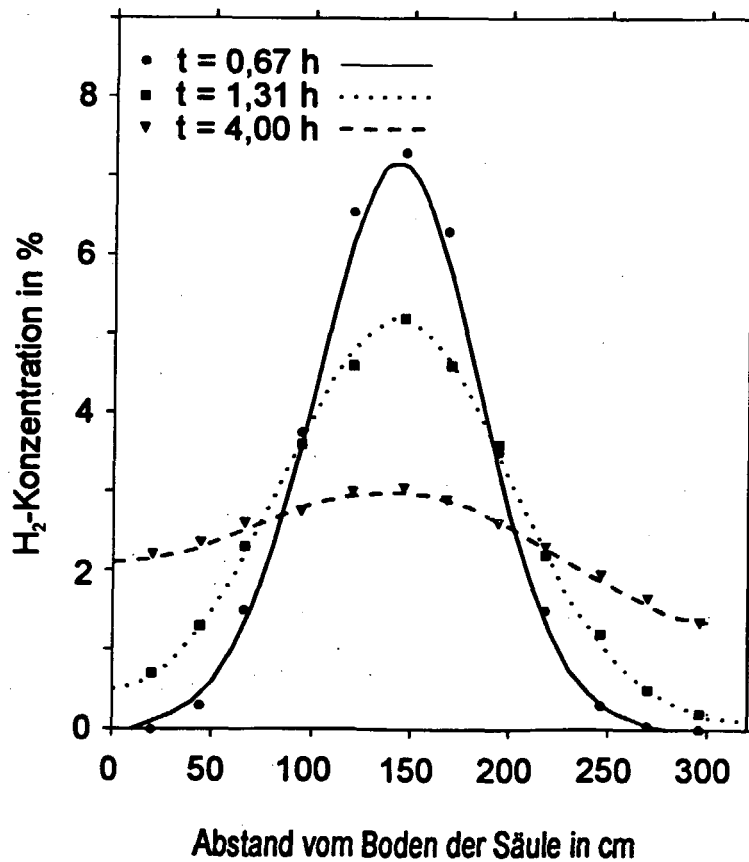


Abb. 4: H₂-Konzentration im Porenraum der Versuchssäule nach Injektion von 2,15 NI Wasserstoff in der Mitte der Säule

Die ausgezogenen Kurven in Abbildung 4 stellen die Ergebnisse der Modellrechnungen dar. Die Modellrechnungen stimmen mit den experimentellen Ergebnisse überein. Die Rechnungen liefern eine Diffusionskonstante für Wasserstoff in unkompaktiertem Salzgrus von 0,35 cm²/sec.

Neben den Gasausbreitungsmessungen wurden mit der Versuchssäule Durchströmungsversuche zur Bestimmung der Gaspermeabilität des unkompaktierten Salzgrusversatzes durchgeführt.

Die Ergebnisse des Untersuchungsprogramm lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Ausbreitung von Gasen in unkompaktiertem Salzgrus wird durch Diffusion und Darcy-Transport hinreichend genau beschrieben.
- Der Auftrieb hat keine beschleunigende Wirkung auf den Transport und die Ausbreitung von Wasserstoff.
- Die Permeabilität von unkompaktiertem Grus ist so groß, daß atmosphärische Druckschwankungen momentan bis auf den Grund des Einlagerbohrlochs wirksam sind.

2.3.2 Modellierung des Gastransports im befüllten und mit Salzgrus versetzten Teil des Bohrlochs

In einer Zusammenarbeit zwischen der KFA Jülich und der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH wurden Modellrechnungen zur Ausbreitung von Gasen im unteren, d. h. mit Gebinden befüllten und mit Salzgrus versetzten Teil des Bohrlochs durchgeführt. Im Rahmen der Arbeiten wurden zwei Modelle zur Gasausbreitung entwickelt. Mit diesen Modellen wurden numerische Beispielrechnungen durchgeführt /17/:

Modell 1 (GORWA)

Betrachtet wird eine mit Salzgrus versetzte Gebindegssäule einer bestimmten Höhe (z. B. 300 m) in einem zylindrischen Bohrloch. Aus allen Gebinden wird mit einer gewissen Produktionsrate (z. B. 1 NI/Tag) Wasserstoff in den Porenraum des Versatzes freigesetzt. Das Modell 1 unterstellt, daß sich der aus den Gebinden freigesetzte Wasserstoff im Porenraum des Versatzes aufgrund folgender physikalischer Phänomene ausbreitet:

1. Globale aufwärtsgerichtete Strömung (Darcy), verursacht durch die in der Gebindegssäule enthaltenen Gasquellen.

2. Diffusive Ausbreitung des Wasserstoffs in Richtung des Konzentrationsgradienten.
3. Atmosphärische Druckschwankungen bewirken einen Pumpeffekt ("Bohrloch-atmung"). Bei steigendem Luftdruck wird wasserstofffreie Streckenluft in das Bohrloch gedrückt, bei fallendem Umgebungsdruck strömt wasserstoffangereicherte Luft aus diesem aus.
Im Modell 1 wird der Pumpeffekt durch periodische Luftdruckschwankungen mit frei wählbarer Amplitude und Frequenz simuliert.
4. Thermische Konvektion und die durch den leichten Wasserstoff bedingten Auftriebs-effekte werden nicht berücksichtigt (siehe Kapitel 2.3.1.)

Zur Beschreibung der Gasausbreitungsvorgänge wurden die beschreibenden partiellen Differentialgleichungen aufgestellt. Das System gekoppelter Differentialgleichungen wurde nach Umwandlung in entsprechende Differenzgleichungen und Festlegung der entsprechenden Rand- und Anfangsbedingungen numerisch gelöst. Hierzu wurde der Rechencode GORWA entwickelt.

Als Rechenergebnis liefert GORWA die räumliche Verteilung der H_2 -Konzentration und des Bohrlochdrucks als Funktion der Zeit. Zusätzlich wird das aus dem Bohrloch austretende H_2 -Volumen bilanziert.

Modell 2 (GORWAS)

Modell 1 beschreibt die Gasausbreitungsvorgänge in einer Gebindesäule einer vorgegebenen festen Höhe. Modell 2 stellt eine Weiterentwicklung dar. In diesem Modell werden die ablaufenden Gasausbreitungsvorgänge während der Befüllphase eines MAW-Bohrlochs - also bei variabler Stapelhöhe - betrachtet. Die beschreibenden physikalischen Grundlagen sind ansonsten die gleichen wie bei Modell 1. Auf die Berechnung des Bohrlochdrucks wurde im Modell 2 jedoch verzichtet, da sich die Druckgradienten über die Bohrlochlänge wegen der hohen Permeabilität des Versatzes als unbedeutend erwiesen hatten.

Zur numerischen Lösung der entsprechenden Differenzgleichungen wurde der Rechen-code GORWAS entwickelt. Mit diesem Rechenprogramm wurde ein Satz von Beispiel-rechnungen mit möglichst repräsentativen Eingangsparametern durchgeführt.

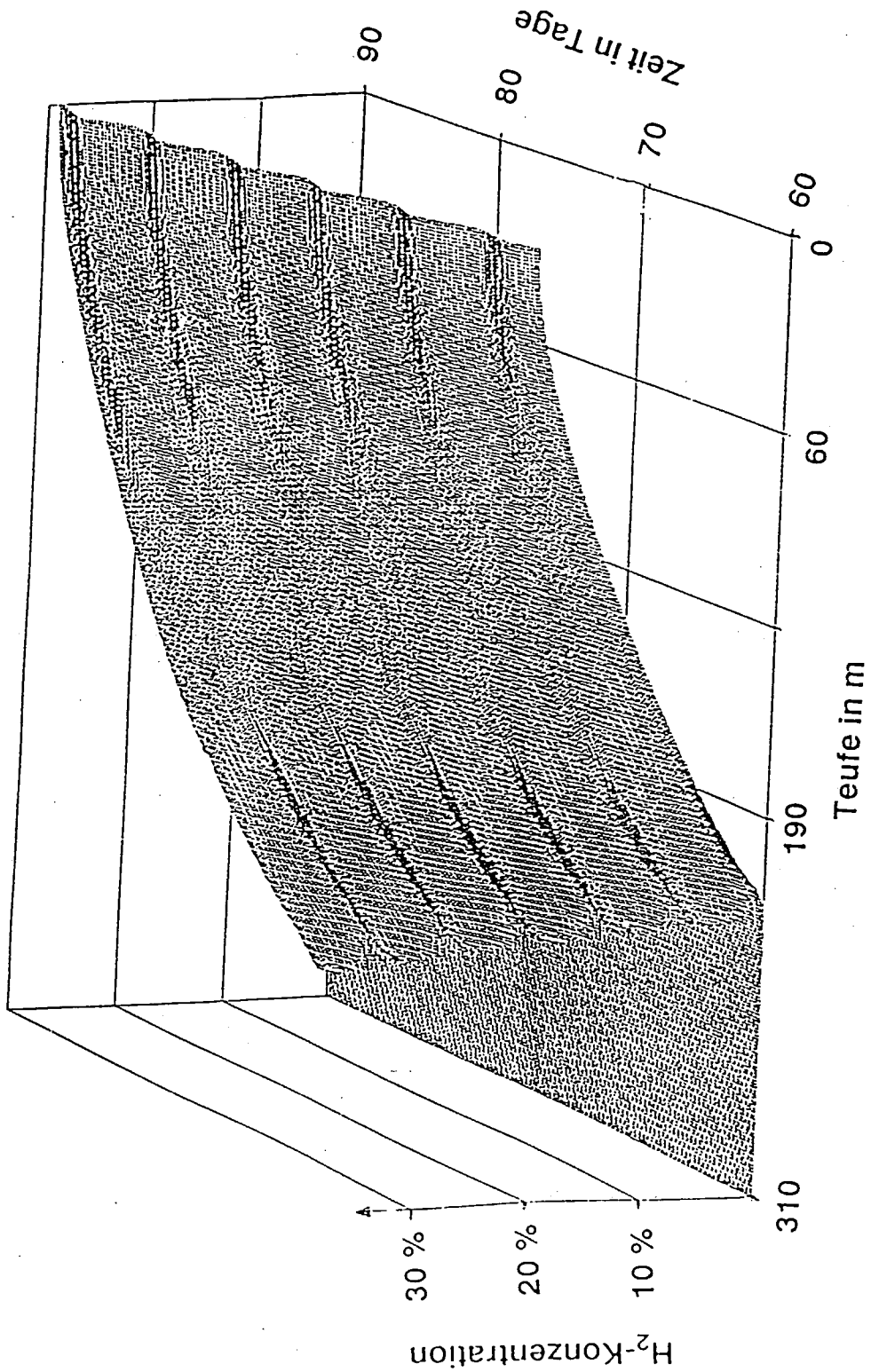


Abb. 5: Ergebnis einer Beispielrechnung mit dem Programm GORWAS; achsiales H₂-Konzentrationsprofil 60 - 90 Tage nach Einlagerbeginn /17/

Als Beispiel zeigt Abbildung 5 das mit dem Programm GORWAS berechnete achsiale H_2 -Konzentrationsprofil für Zeiten von 60 - 90 Tagen nach Beginn der Einlagerung. Unterstellt wurde in diesem Fall eine Einlagerfrequenz von drei Gebinden pro Tag. Nach 60 Tagen ist die Gebindesäule etwa 200 m hoch, nach 90 Tagen ist das 300 m tiefe Bohrloch vollständig befüllt.

Man erkennt, daß die H_2 -Konzentration bei fortwährender Einlagerung weiterer Gebinde am Kopf der Stapelsäule immer nahe Null ist. Dies bedeutet, daß kein Wasserstoff - und natürlich auch keine radioaktiven Gase - unter diesen Bedingungen während der Einlagerung aus dem Versatz entweichen. Die Modulation der H_2 -Konzentration wird durch die periodischen Luftdruckschwankungen hervorgerufen.

Für die in Abbildung 5 dargestellte Beispielrechnung wurde eine H_2 -Produktionsrate von 1 Nm³ pro Tag und Gebinde unterstellt. Diese Rate stellt eine konservative Obergrenze der Produktionsrate realer MAW-Abfallgebände dar.

Aufgrund der Ergebnisse der Modellrechnungen ist zu erwarten, daß die aus den MAW-Gebinden freigesetzten Gase (H_2 und Kr-85) praktisch vollständig im Grusversatz der Gebindesäule zurückgehalten werden, solange stetig neue Gebinde in das Bohrloch eingelagert werden.

Nur nach längeren Einlagerpausen (im Bereich von mehreren Wochen) ist mit einer teilweisen Freisetzung der Gase in den noch unbefüllten Teil des Bohrlochs zu rechnen.

Nur für den Fall, daß solche Einlagerpausen nicht vermieden werden können, muß eine Bohrlochspülung zum gezielten Abtransport der kritischen Gase vorgesehen werden.

2.4 Maßnahmen zur Beeinflussung der Bohrlochatmosfera

2.4.1 Ausbreitung von Gasen im offenen Teil des Bohrlochs

Im Auftrag der KFA Jülich wurde von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, GRS, eine Studie zur Ausbreitung von Gasen im offenen, d. h. noch nicht befüllten Teil von MAW-Bohrlöchern durchgeführt /18/, /19/.

MAW-Gebinde setzen während ihrer Einlagerung in tiefe Bohrlöcher hauptsächlich radiolytisch erzeugten Wasserstoff frei. Bei Einlagervarianten mit Salzgrusversatz kann der untere, bereits befüllte Teil des Bohrlochs wegen der Flammensperrwirkung des Versatzes als explosions sicher angesehen werden (vgl. Kap. 3.4). Aus dem unteren Teil kann aber nach längeren Einlagerpausen wasserstoffreiche Luft in den oberen, noch nicht befüllten Bohrlochteil transportiert werden (vgl. Kap. 2.3.2). Daher muß untersucht werden, ob für diesen Fall die untere Zündgrenze für Wasserstoff-Luftgemische im offenen Bohrlochteil überschritten wird.

Ob und unter welchen Umständen sich zündfähige Gemische ausbilden können, hängt vom H_2 -Quellterm, aber auch von dem Ausbreitungsverhalten von Wasserstoff in der vertikalen Bohrlochgeometrie ab. Das Transportverhalten von spezifisch leichten Gasen wie Wasserstoff, die von unten mit einer geringen Rate in ein langes Bohrloch eingespeist werden, wird im wesentlichen durch Konvektion bestimmt. Es ist zu erwarten, daß sich im Bohrloch hauptsächlich infolge des Auftriebs, aber auch wegen des geothermisch bedingten Temperaturgradienten Konvektionsströmungen ausbilden, die zu einer vertikalen Durchmischung der Bohrlochatmosfera führen. Dabei wird ein Teil des zugeführten Wasserstoffs aus dem Bohrloch entweichen, wenn das Bohrloch während der Beladung nicht gasdicht verschlossen ist, oder wenn der Bohrlochkopf gezielt mit Streckenluft durchspült wird. Im Vergleich zur Konvektion ist die Diffusion ein langsamer Ausbreitungsvorgang, der gegenüber der Konvektion wahrscheinlich zu vernachlässigen ist.

Das Ziel der GRS-Studie bestand darin, ein rechentechnisches Instrumentarium zu entwickeln, mit dem das Gastransportverhalten in vertikalen Bohrlöchern beschrieben werden kann. Im Rahmen der Studie wurden von der GRS drei Rechenmodelle zur Beschreibung der Gastransportvorgänge entwickelt:

1. Halbmodell (180°-Sektor) mit hydrostatischer Näherung.
2. Halbmodell (180°-Sektor) mit hydrostatischer Näherung und verbesserter Dichtebe-
rechnung im Hinblick auf eine Minimierung von Auslöschungsfehlern.
3. Vollmodell (360°-Sektor) mit hydrostatischer Näherung; höhenabhängige Berechnung der Dichte und Berücksichtigung des Temperatureinflusses.

Alle drei Modelle basieren auf dem fluid-dynamischen Rechencode PHOENICS, der auf einem PC lauffähig gemacht und dem vorliegenden Anwendungsfall angepaßt wurde. Für die numerischen Rechnungen wurde das Bohrloch mit einem Maschennetz überzogen, das

für das Halbmodell in Abbildung 6 dargestellt ist. Die Rechenmodelle liefern die Konzentration der betrachteten Gaskomponente und das Strömungsfeld in den Zellen des Maschennetzes.

Mit den Rechenmodellen wurde ein festgelegter Satz von Testrechnungen zum Transportverhalten von Helium und von Kr-85 durchgeführt. Diese Rechnungen sollten durch Gasausbreitungsversuche an einem 220 m tiefen Bohrloch im ehemaligen Salzbergwerk Asse validiert werden. Hierbei sollte anstelle des sicherheitstechnisch problematischen Wasserstoffs als Testgas Helium eingesetzt werden. Aus genehmigungstechnischen Gründen konnte dieser Versuch letztendlich nicht realisiert werden.

Zur Validierung der entwickelten Rechenmodelle wurden fünf unterschiedliche Rechenfälle behandelt:

Fall 4b: (Ausbreitung von Kr-85)

Es wurde unterstellt, daß einmalig am Grund des Bohrlochs eine bestimmte Menge Kr-85 freigesetzt wird. Die Verteilung des Kr-85 durch Diffusion und Konvektion wurde für unterschiedliche Zeiten berechnet.

Fall 4c: (Ausspülung von Kr-85)

Nachdem sich eine bestimmte Verteilung des Kr-85 eingestellt hat (Fall 4b), wird der Kopfbereich des Bohrlochs mit Bohrlochluft durchspült. Der Einfluß der Bohrlochspülung wurde im Hinblick auf einen gezielten Abtransport des Kr-85 untersucht.

Fall 5b: (Ausbreitung von Helium)

Es wurde unterstellt, daß am Grund des Bohrlochs reines Helium mit einer Rate von 100 NI/Tag kontinuierlich eingespeist wird. Das eingespeiste Helium breitet sich sowohl durch Konvektion als auch durch Diffusion aus. Berechnet wurden das Strömungsfeld und die He-Konzentration im Bohrloch für unterschiedliche Zeiten.

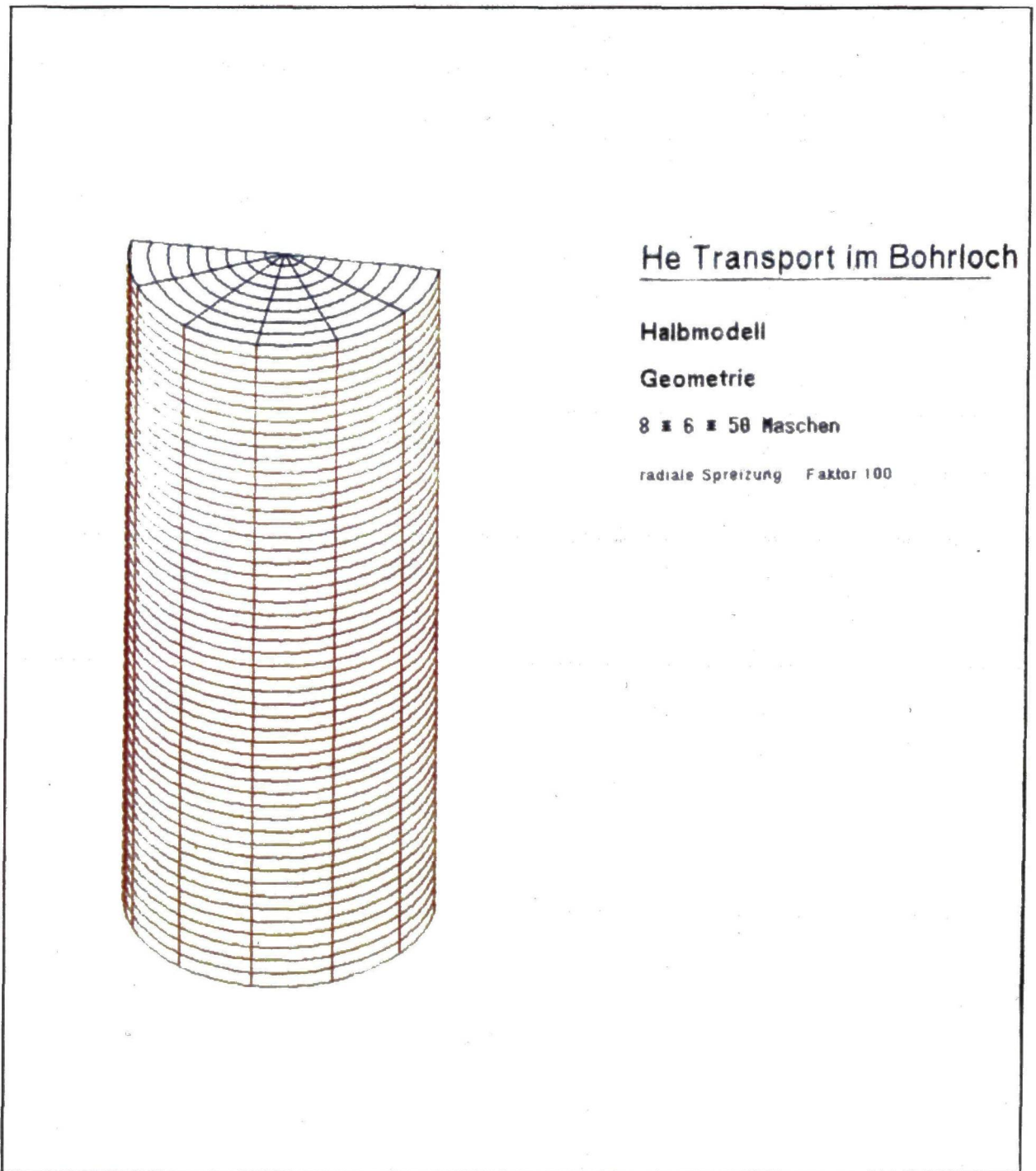


Abb. 6: PHOENICS Maschennetz des Halbmodells (perspektivisch) /19/

Fall 5c: (Ausspülung von Helium)

In diesem Fall wird das Austreiben des Heliums durch Inbetriebnahme der Bohrlochspülung untersucht. Hierzu wird angenommen, daß am oberen Ende mit einer Absaugvorrichtung eine definierte Menge Bohrlochluft abgeführt und eine gleich große Menge Streckenluft an einer etwas tieferen Stelle in das Bohrloch eingespeist wird. Untersucht wird die durch die Bohrlochspülung erzielbare Ausspülung des vorher zudosierten Heliums.

Fall 5f: (kontinuierliche Einspeisung von Helium bei gleichzeitiger Bohrlochspülung)

Der Rechenfall 5f) ist eine Kombination der Fälle 5b) und 5c).

Als Beispiel zeigt Abbildung 7 die stationäre He-Konzentration und das zugehörige Strömungsfeld im Bohrloch bei einer Einspeiserate von 100 NI/Tag am Grund des Bohrlochs. In der Darstellung werden Bereiche unterschiedlicher He-Konzentration durch verschiedene Farben wiedergegeben (siehe die nebenstehende Farbskala). Die Richtung und Länge der eingezeichneten Vektoren kennzeichnen das Strömungsfeld. Die in der Abbildung gezeigten Ergebnisse wurden mit dem Rechenmodell Nr. 3 berechnet. Der Einfluß der Temperatur auf das Ausbreitungsverhalten wurde in diesem Fall noch nicht berücksichtigt.

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse derselben Rechnung in Isotachendarstellung. Die Schnittebene befindet sich 50 m unterhalb des Bohrlochmundes. Unterschiedliche Farben kennzeichnen die Größe der z-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit.

Die beiden Abbildungen verdeutlichen, daß sich im Bohrloch hauptsächlich infolge des Auftriebs eine ausgeprägte Konvektionswalze aufbaut. Auf der einen Seite des Bohrlochs strömt heliumreiche, d. h. leichte Bohrlochluft nach oben, während auf der gegenüberliegenden Seite heliumarme Luft nach unten strömt. Durch die Konvektionswalze entweicht das Helium teilweise aus dem Bohrloch, was zu einer globalen Verringerung der He-Konzentration führt.

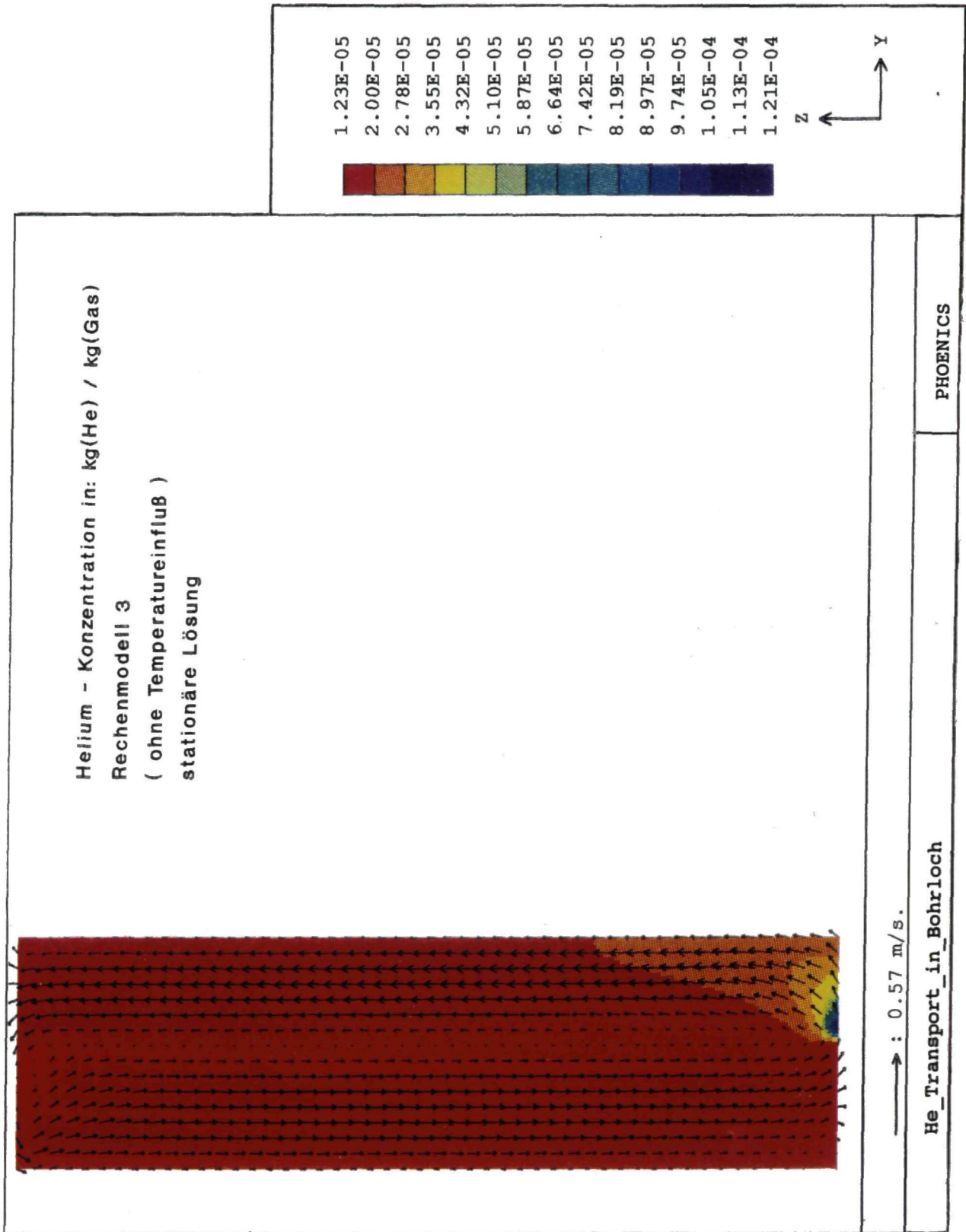


Abb. 7: He-Konzentration und Strömungsfeld im Bohrloch /19/

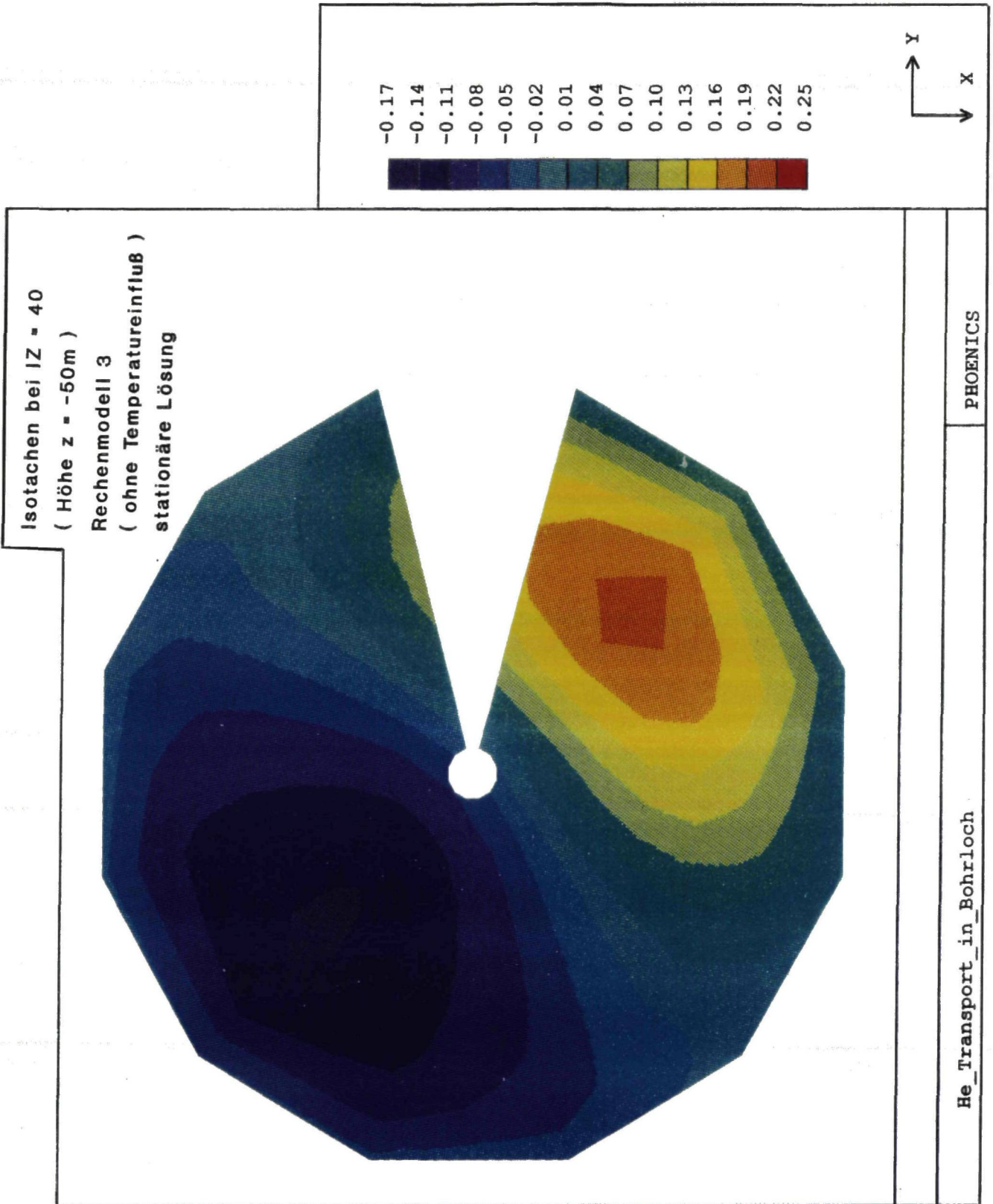


Abb. 8: Isotachendarstellung des Strömungsfelds 50 m unterhalb des Bohrlochmundes /19/

Alle Rechnungen haben gezeigt, daß sich bei Einspeisung von Helium im Bohrloch ausgeprägte Konvektionswalzen ausbilden, die zu einer raschen Durchmischung der Bohrlochatmosfera führen. Ist das Bohrloch offen oder wird der Bohrlochkopf mit Streckenluft durchspült, sind im Gleichgewicht zwischen Einspeiserate (100 NI/Tag) und Abtransport an der ungünstigsten Stelle He-Konzentrationen von kleiner 0,088 % zu erwarten. Dieser Wert ist etwa eine Zehnerpotenz kleiner als die maximal zulässige H₂-Konzentration in untertägigen Betriebsräumen eines Endlagers.

Für Wasserstoff sind wegen des höheren Auftriebs und wegen der noch nicht berücksichtigten geothermischen Effekte noch geringere Konzentrationen zu erwarten als für Helium.

2.4.2 Chemische Umsetzung von Wasserstoff

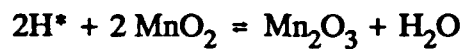
Abfallgebinde mit zementierten mittelradioaktiven Abfällen setzen radiolytisch und korrosiv gebildeten Wasserstoff ins Bohrloch frei. Dadurch könnten sich während der Beladephase insbesondere im noch nicht befüllten Teil des Bohrlochs explosive Wasserstoff-Luftgemische ausbilden. Nach Verschuß mit einem gasdicht ausgelegten Stopfen könnten sich im Bohrloch infolge der Gasbildung schon während der Betriebsphase der Einlagerstrecke unerwünscht hohe Gasdrücke aufbauen.

Die angesprochenen sicherheitstechnischen Probleme werden vermieden, wenn der sich bildende Wasserstoff während seiner Entstehung mit Hilfe eines Oxidationsmittels im Bohrloch auf chemischem Wege umgesetzt wird. Hierzu bietet es sich an, mit Reaktionsmaterial befüllte Spezialbehälter zusätzlich in die Bohrlöcher einzulagern.

Das Ziel der Arbeiten bestand darin, ein für den speziellen Anwendungsfall optimiertes Reaktionsmaterial zu entwickeln und unter endlagerrelevanten Bedingungen zu testen.

Als Ergebnis der Arbeiten erwies sich elektrolytisch hergestelltes MnO₂, das mit geringen Mengen (typischerweise 1 %) Ag₂O katalytisch aktiviert ist, als geeignetes Oxidationsmittel zur Kaltverbrennung von Wasserstoff /20/, /21/. Der Reaktionsmechanismus kann folgendermaßen beschrieben werden:

Wasserstoff, der molekular auf den Oberflächen des Materials adsorbiert ist, wird an der Kontaktstelle zwischen dem Ag_2O -Katalysator und dem MnO_2 -Partikel dissoziiert. Die entstehenden Wasserstoffradikale reduzieren das MnO_2 gemäß der Reaktionsgleichung



Das Reaktionswasser wird mit einem Trocknungsmittel gebunden. Als Trocknungsmittel wird pulverförmiges CaO vorgeschlagen, das als Pulvermischung mit dem Reaktionsmaterial eingesetzt werden soll.

Das Verfahren zur Herstellung des katalytisch aktivierten Materials wurde im Hinblick auf Reaktionskapazität und Reaktionskinetik optimiert. Die besten Resultate wurden mit folgender Präparationstechnik erzielt:

Unter Ausnutzung der Ionenaustauschereigenschaften von elektrolytisch hergestelltem Mangandioxid werden die Oberflächen der MnO_2 -Kristalle mit Ag^+ -Ionen aus einer Silbernitratlösung beladen. Die anhaftenden Ag^+ -Ionen werden in einem zweiten Schritt in 1 M Natronlauge zu Ag_2O oxidiert. Abschließend wird das Material gewaschen, bei erhöhten Temperaturen getrocknet, aufgemahlen und mit pulverförmigem Calciumoxid vermischt.

Abbildung 9 zeigt die Reaktionskonstante als Funktion des Ausschöpfungsgrades (als "age of the material" bezeichnet) für Reaktionsmaterialien, die unter Vakuum bzw. bei unterschiedlich hohen Temperaturen getrocknet worden sind. Man erkennt, daß die Reaktivität stark von der Art der Trocknung abhängt. Unabhängig von der Trocknung kann aber bei allen Materialien die Reaktionskapazität zu mehr als 100 % ausgeschöpft werden. Dies bedeutet, daß pro Mol MnO_2 mehr als 0,5 Mol $\text{H}_2 = 11,2 \text{ NI H}_2$ umgesetzt werden.

Die chemische Stabilität des Reaktionsmaterials gegenüber den im Steinsalz vorkommenden Spurengasen H_2S und HCl wurde untersucht. Die Reaktivität des Materials wird zwar durch die Einwirkung der Spurengase verschlechtert, ist aber immer noch um mehrere Größenordnungen besser als notwendig, um unter realistischen Bedingungen mit der zu erwartenden H_2 -Produktion Schritt zu halten. Durch Strahlendosen von bis zu 1 MGy wird die Reaktivität des Materials eher verbessert. Die radiolytische Abspaltung von Wasserstoff aus CaO , das zuvor mit Feuchte beladen war, ist unbedeutend.

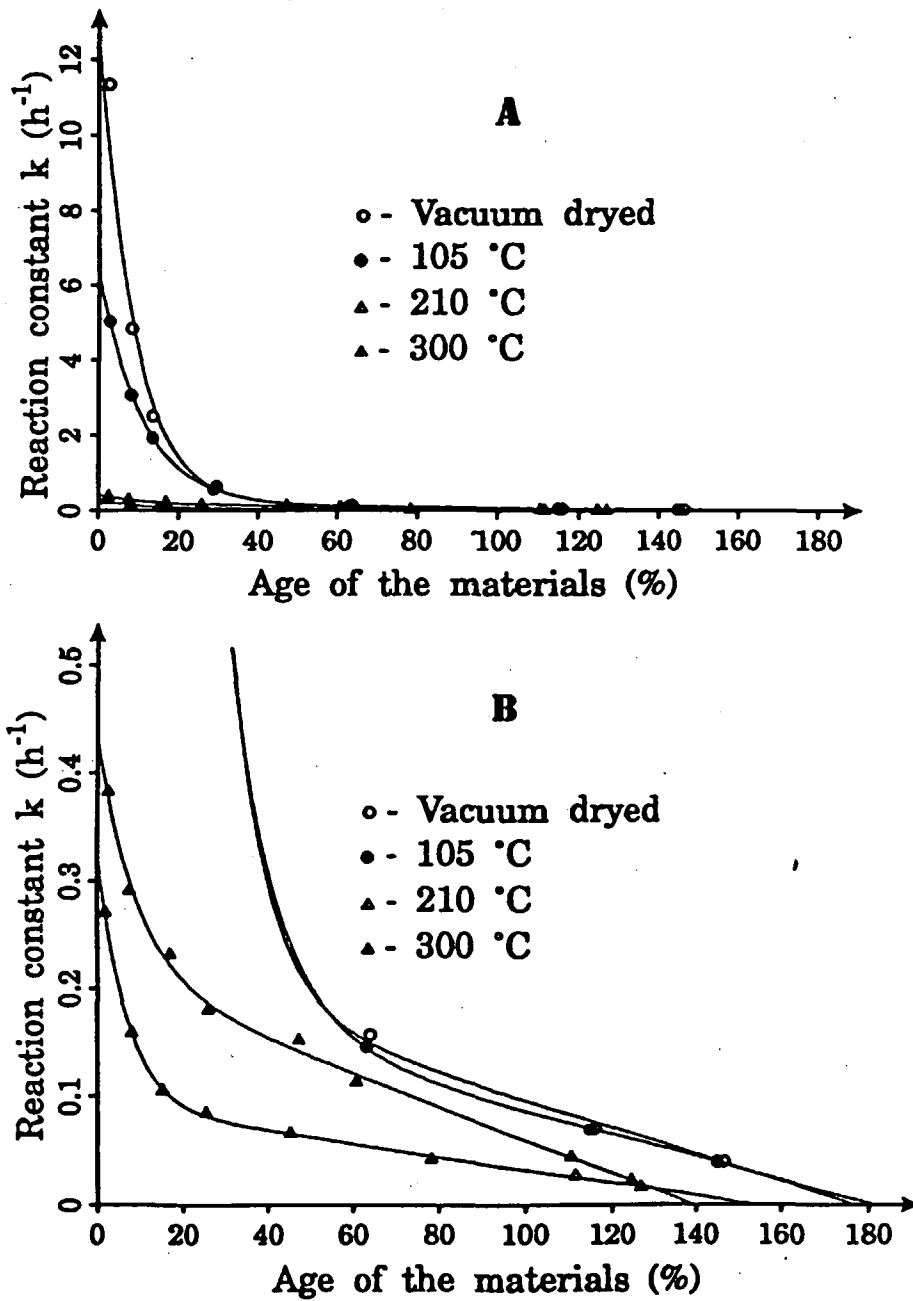


Abb. 9: Reaktionskonstante als Funktion des Ausschöpfungsgrades für $\text{MnO}_2 + 1\%$ Ag_2O ; der untere Teil der Abbildung (B) ist eine Ausschnittsvergrößerung des oberen Teils (A)

Die Kaltverbrennung von Wasserstoff wurde unter endlagertypischen Bedingungen durch einen Demonstrationsversuch nachgewiesen. In einem 200-l-Faß, das mit Salzgrus befüllt war und eine Absorberkartusche (18 kg CaO und 4,5 kg MnO₂ + 1 % Ag₂O) enthielt, wurden innerhalb von 28 Tagen 0,9 Nm³ Wasserstoff umgesetzt. Abbildung 10 zeigt schematisch den Demonstrationsversuch.

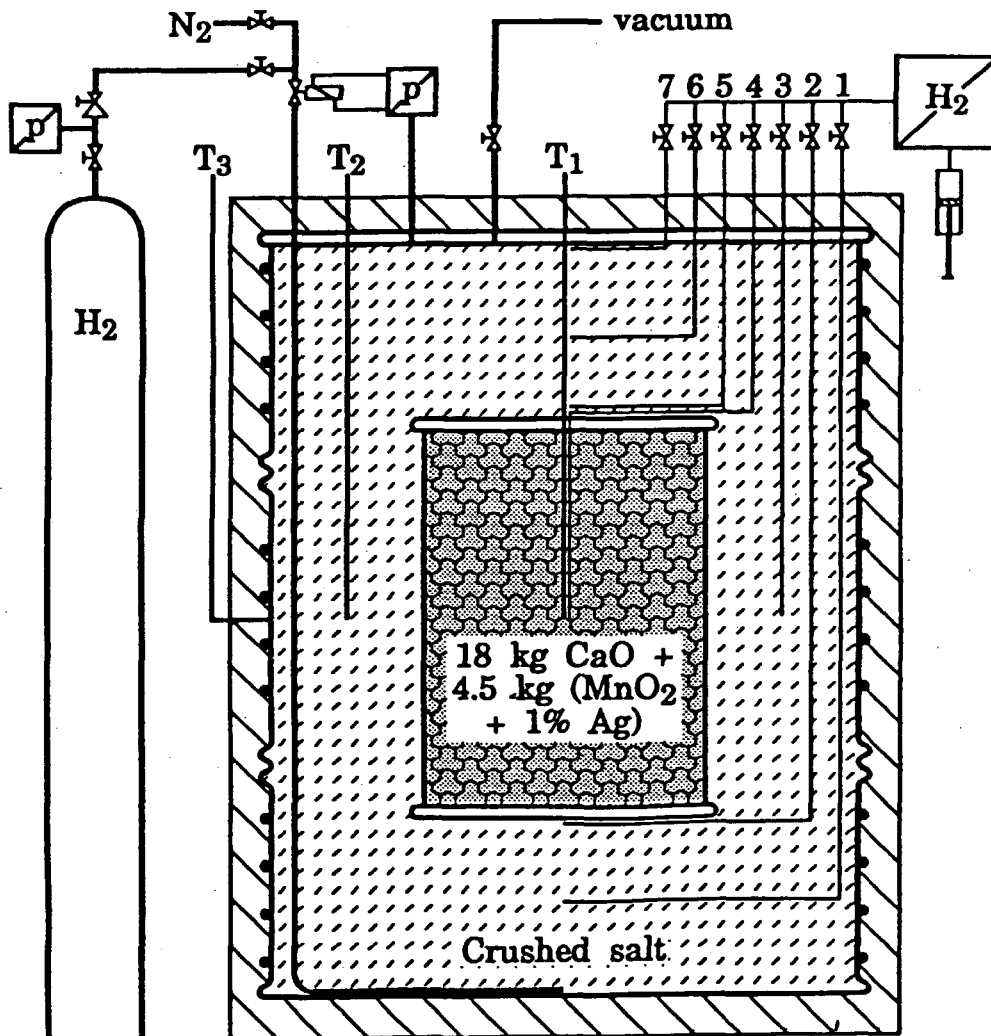


Abb. 10: Demonstrationsversuch zur Kaltverbrennung von H₂

Neben den experimentellen Untersuchungen wurden theoretische Rechnungen zum Druckaufbau in Einlagerbohrlöchern durchgeführt. Abbildung 11 zeigt den berechneten H_2 -Partialdruck in einem dicht verschlossenen Einlagerbohrloch, das mit COGEMA-Gebinden befüllt ist. Ohne Zusatz des Reaktionsmaterials würde sich infolge der Wasserstoffbildung (Korrosionsrate = $1 \mu\text{m/a}$ + Radiolyse) in den ersten 100 Jahren ein Druck von etwa 10 bar aufbauen. Bei einer Zugabe von 50 kg Reaktionsmaterial pro COGEMA-Gebinde wird der in den ersten 100 a gebildete Wasserstoff größtenteils chemisch umgesetzt. Entsprechend steigt der H_2 -Partialdruck erst an, wenn das Reaktionsmaterial nach etwa 70 Jahren erschöpft ist.

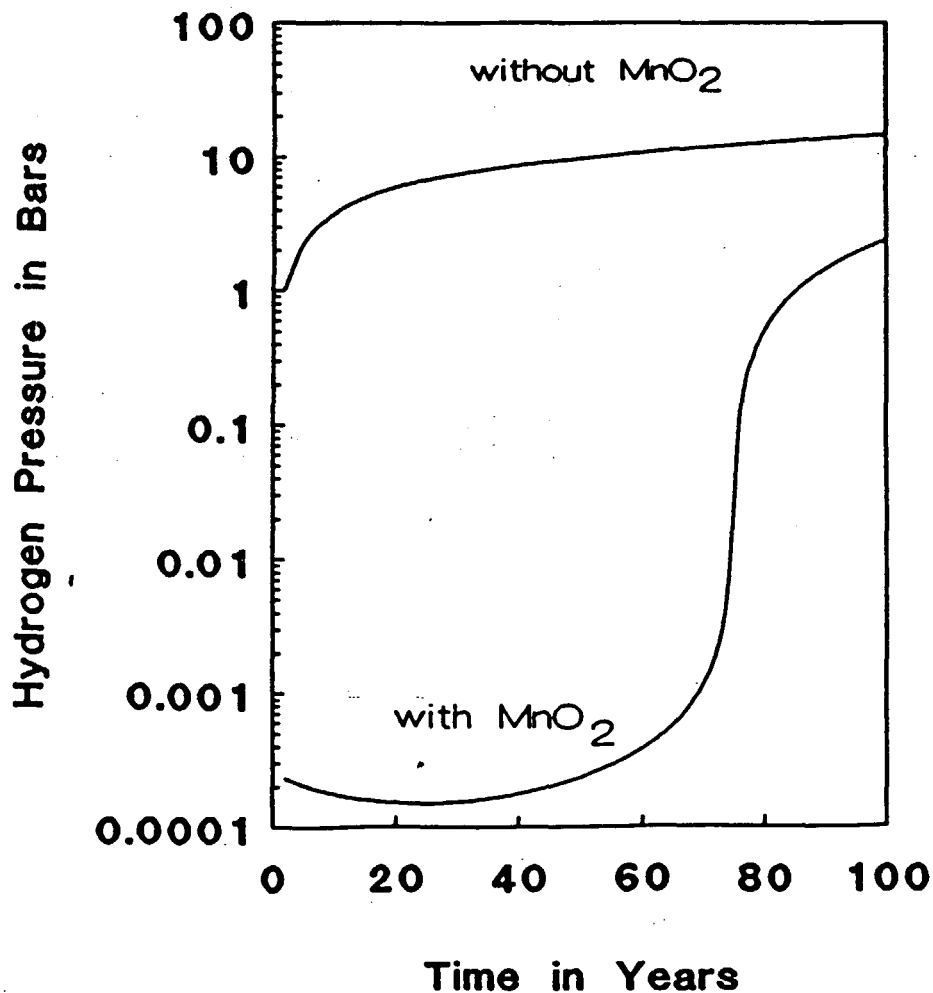


Abb. 11: H_2 -Partialdruck im Bohrloch mit/ohne Reaktionsmaterial

3. Salzgrus als Bohrlochversatzmaterial

Unter verschiedenen Gesichtspunkten wie beispielsweise Minimierung des Resthohlraumvolumens, Beherrschung der Stapellasten, Rückhaltung von Gasen und Aerosolen oder Verhinderung einer Flammenausbreitung in zündfähigen H₂-Luft-Gemischen (nach postulierter Zündung) ist die Verfüllung des Bohrloch-Resthohlraumes mit Salzgrus vorgesehen. Hierfür ist die Kenntnis der physikalisch- und chemischtechnischen Eigenschaften des Salzgrus erforderlich.

3.1 Kennwerte von Salzgrus

Die Fa. Noell Freiberg wurde beauftragt, im Rahmen einer Literaturstudie die heute vorhandenen Daten zur Charakterisierung von Salzgrus zusammenzustellen und auf ihre Brauchbarkeit für die Bohrlochtechnik hin zu untersuchen. Die Studie liegt als Projektbericht /22/ vor.

Die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen zur Charakterisierung und Verwendung von Salzgrus als Verfüllmaterial in untertägigen Räumen beinhalten

- Technologische Untersuchungen
- Geotechnische In-situ-Experimente
- Laboruntersuchungen zur Ermittlung von Materialparametern
- Erstellung von konstitutiven Modellen zum Stress-Strain-Verhalten von Salzgrus

Da viele Arbeiten jedoch wenig systematisch erfolgten und häufig undifferenziert von Bergbauarbeiten vorhandener Salzgrus als Probenmaterial verwendet wurde, auch später weder Probengeometrien noch Versuchstechniken und Versuchsbedingungen zwischen den einzelnen Institutionen koordiniert worden sind, ist eine Analyse und Bewertung der doch in großer Zahl vorliegenden Ergebnisse und Daten von unterschiedlichen Materialien schwierig und eine Einschätzung von mehr qualitativer Art.

Salzgrus ist durch folgende wesentliche Parameter zu charakterisieren:

Korngrößenverteilung

- Die Korngrößenverteilung eines Haufwerkes kennzeichnet die Mengenanteile bezüglich vorgegebener Korngrößenklassen.
- Die Korngrößenverteilung von bergmännisch gewonnenen Haufwerken hängt neben der Gewinnungsart und den geologisch/mineralogischen Bedingungen in der Lagerstätte wesentlich auch von seiner Behandlung zwischen dem Ort seiner Gewinnung und dem Einsatzort sowie der für den Transport verwendeten Technologie ab.
- Die Siebkennlinien entsprechender verschieden behandelter Haufwerke weisen deutliche Unterschiede auf. Infolgedessen können Korngrößen und Kornverteilungen in Haufwerken stark variieren.
- In Abhängigkeit von der Versatzart und den Einsatzbedingungen sind zulässige obere und untere Korngrößenordnungen zu definieren. Sie liegen, falls Bohrlöcher oder kleinere Hohlräume versetzt werden sollen und technische Fördereinrichtungen zum Einsatz kommen, etwa in den Grenzen von 0,06 ... 30 mm.
- In Analogie zu Festlegungen der Baustoffindustrie (z. B. in den USA) sollte zur Ausfüllung von Ringräumen in Bohrlöchern der Durchmesser des Größtkorns $1/5$ der engsten Dimension nicht übersteigen.

Fließfähigkeit

- Salzgrus ist ein hygroskopisches, in trockenem Zustand freifließendes, kohäsionsloses Schüttgut mit einer Geraden als Fließort und einem bestimmten Winkel der inneren Reibung. An Kalisalzen wurde beobachtet, daß bereits bei Feuchtegehalten von 0,02 % eine gewisse Einschränkung der Fließfähigkeit einsetzt. In den USA wurde 0,5 Gew.% Feuchte für Versatzmaterial zugelassen, welches als Bohrlochverfüllmaterial eingesetzt werden soll.
- Bei länger gelagertem Versatzmaterial muß die Fließfähigkeit durch Scherversuche oder Festigkeitsuntersuchungen geprüft werden.

Bodenmechanische Parameter

- Für die Bestimmung von Materialeigenschaften von Salzgrus können bestimmte Methoden der Bodenmechanik herangezogen werden. Nicht anwendbar sind bodenmechanische Gesetzmäßigkeiten hinsichtlich des rheologischen Verhaltens von Steinsalzgrus.
- Salzgrus reagiert ebenso wie kompaktes Steinsalz auf Druckbelastungen mit viskoplastischem Verhalten.
- Typische bodenphysikalische Parameter wie Schüttdichte, Verdichtungsverhalten und Scherfestigkeit sind bei Salzgrus stark probenabhängig. Entsprechende Untersuchungsergebnisse sind nur qualitativ zu verallgemeinern.
- Die zeitlichen Verläufe von Verdichtungsvorgängen weisen prinzipielle Ähnlichkeiten auf. Nach einer raschen Zunahme der Kompaktierung streben die entsprechenden Meßkurven asymptotischen Grenzwerten, den theoretischen Endsetzungswerten, zu. Diese Werte werden wesentlich durch die Anfangsschüttdichte des Haufwerkes bestimmt.
- Je höher die Anfangsschüttdichte ist, um so geringer ist die Endsetzung des Materials und umso schneller wird die Tragfähigkeit eines Versatzstoffes erreicht.
- Zwischen Setzung und Anfangsschüttdichte besteht ein linearer Zusammenhang.
- Die Kornverteilung hat einen wesentlichen Einfluß auf die Zusammendrückbarkeit und das Kompaktierungsvermögen des Korngemisches.
- Der größte Verdichtungsgrad eines Haufwerkes wird durch eine möglichst ungleichförmige Korngrößenverteilung erreicht. Gute Korngrößenverteilungen sollen einen Ungleichförmigkeitsfaktor zwischen 6 und 12 besitzen.
- Die dichteste Packung eines Korngemisches läßt sich nach einer FULLER-Gleichung ermitteln.

- Die Korngrößenverteilung eines Haufwerkes spielt eine wichtige Rolle hinsichtlich der Verfestigungsdauer. Z. B. wurde für eine Reduzierung der Korngröße von 1 cm auf 0,1 cm unter Beibehaltung aller Bedingungen eine Verkürzung der Zeit bis zur totalen Verfestigung um den Faktor 1000 abgeschätzt.
- In der Literatur fehlen direkte Hinweise bezüglich des Dämpfungsverhaltens von Salzgrus bei stoßartiger Belastung, etwa im Falle eines Gebindeabsturzes in ein teilversetztes Endlagerbohrloch.

Kompression und Kriechverhalten

- Bei Kriechversuchen an kompaktiertem Steinsalzgrus zeigt sich eine kontinuierliche Abnahme der Kriechrate mit abnehmender Porenzahl und mit wachsender Zeit.
- Bei Versuchen an ASSE-Steinsalzgrus zeigte sich, daß bei Zugabe von Lauge zum Steinsalz (3 Gew.%) und bei höheren Drücken (bis 80 MPa) Kompressionskriechprozesse beendet werden.
- Die einachsigen Druckfestigkeiten und die erforderlichen Bruchkräfte sind von der Kompressionszeit abhängig. Bei einer vierfach verlängerten Kompressionszeit wurde z. B. eine doppelt so hohe Druckfestigkeit gegenüber den Normalproben beobachtet.
- Die Grenztragfähigkeit von Salzgrus hängt von der Porenzahl, der Verformungsgeschwindigkeit und den Spannungsverhältnissen ab.
- Aus Vergleichen druckabhängiger Kompressionsmoduli läßt sich ableiten, daß diese mit abnehmender Verformungsgeschwindigkeit kleiner werden. So ließ sich extrapolieren, daß ein Druck von mindestens 100 MPa für Salzgrus unter trockenen Bedingungen erforderlich wäre, um den Kompressionsmodul und damit die Dichte und Festigkeit von kompaktem Steinsalz zu erreichen.
- Die Temperaturabhängigkeit der Kompressibilität ist im Temperaturbereich bis 100°C gering; entscheidend sind die Druckbedingungen.

- Bei einer Zugabe von ca. 3 ... 5 Vol.-% Flüssigkeit zum Salzgrusmaterial wird bei Drücken um 1 MPa eine Kompaktierungsrate erreicht, bei der sich nach ca. einem Jahr etwa 95 % der Dichte von kompaktem Steinsalz einstellt. Die optimale Flüssigkeitsmenge muß differenziert untersucht werden, da eine zu große Flüssigkeitszugabe das Ergebnis verschlechtert.
- Vergleiche von Salzen aus unterschiedlichen Lagerstätten der USA haben bestätigt, daß sich die Kriechraten um 2 - 3 Größenordnungen unterscheiden können. Entsprechend unterschiedlich fallen die Verfestigungsraten und damit die Verfestigungszeiten aus. So können Salzgrusfüllungen in Hohlräumen sowohl nach einigen 100 als auch nach einigen 1000 Jahren verfestigt sein.

Permeabilität

- Aus den Permeabilitätsmessungen ist ablesbar, daß die Permeabilität mit Abnahme der Porosität stark absinkt.
- Versuchstechnisch wurde eine Kompaktierung von Steinsalzgrus bis zur Porosität kompakten Steinsalzes nicht erreicht, weil sich auf Grund der im Porenraum befindlichen Luft vermutlich nur eine Grenzdicke erzielen läßt.
- Bei Porositäten von 30 - 40 % wirken Salzgruse im unverdichteten Zustand stark durchlässig gegenüber Flüssigkeiten und Gasen.
- Bei einem Vergleich verschiedener Mischungen mit unterschiedlichen Korngrößenverteilungen zeigt die Körnung nach FULLER die niedrigste Permeabilität.
- Eine Verringerung der Permeabilität bis zu etwa 95 % der Permeabilität des kompakten Gesteins erfordert eine Zugabe von 3 ... 5 % Flüssigkeit zur Salzgrusmischung.
- Bei einem Druck von ca. 1 MPa wird innerhalb eines Jahres unter feuchten Bedingungen eine so niedrige Permeabilität erreicht, daß gegenüber einem Flüssigkeitszutritt (gesättigte Lauge) eine effektive Barrierenwirkung gewährleistet ist.

Thermische Eigenschaften

- Eine direkte Bestimmung thermischer Eigenschaften von Salzgrus ist bisher nicht erfolgt. Die Wärmeleitfähigkeit wurde über eine Analogiebeziehung bestimmt.

Gasmigration

- Locker geschütteter Salzgrus ohne jegliche Vorverdichtung besitzt keine wesentliche Barrierenfunktion gegenüber einer Radionuklidmigration auf der Basis von Gasfluiden.
- Mit zunehmender Verdichtung und Abnahme der Porosität verbessern sich aber die Retentionsbedingungen.
- Sorptionsuntersuchungen an Salzgrusen haben nicht stattgefunden.
- Hinweise auf Untersuchungen zur Zweiphasenströmung von Gasen und Flüssigkeit durch Salzgrusschüttungen wurden in der Literatur nicht gefunden.

Modellierung

- Materialgesetze beschreiben den funktionalen Zusammenhang der Stress-Strain-Beziehungen. Auf der Basis von Meßdaten wurde eine Reihe konstitutiver Modelle erstellt, die in gewissen vorgegebenen Zeitintervallen (i. a. waren die Versuchszeiten zur Formulierung universeller Gesetzmäßigkeiten zu gering) die Verknüpfungen von Spannung und Verformung unter definierten Bedingungen widerspiegeln und in Rechenprogrammen implementiert sind.
- Extrapolationen sind auf Grund noch nicht ausreichender Datensätze nur eingeschränkt zulässig.
- Die meisten Modelle basieren auf einer makroskopischen Betrachtungsweise, bei einem an Sinterprozesse angelehnten Modell wird eine mikroskopische verwendet.

Schlußfolgerungen

Obwohl durch die Literaturübersicht eine große Menge an Versuchen und Daten dokumentiert ist, sind die Resultate auf Grund der unterschiedlichen Versuchsbedingungen kaum zu systematisieren und deswegen hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit nur von eingeschränkter Bedeutung.

Auf der Basis der vorliegenden Erfahrungen wird deshalb vorgeschlagen, bei einer Verwendung von Steinsalzgrus als Verfüllmaterial, besonders z. B. bei einem Einsatz als Bohrlochverfüllstoff, eine gezielte Materialauswahl vorzunehmen und ein auf den Anwendungsfall zugeschnittenes spezielles Untersuchungsprogramm durchzuführen.

Das Versuchsprogramm könnte minimiert werden, falls die Einsatzbedingungen eines potentiellen Versatzgutes den Versuchsbedingungen entsprechen, die bei den Untersuchungen an ASSE-Salzproben zugrundegelegt worden sind.

Folgende Herangehensweise ist zu empfehlen:

- Auswahl eines Ortes für die Gewinnung von Versatzmaterial nach geologisch/ mineralogischen Gesichtspunkten sowie örtlichen und betrieblichen Gegebenheiten; Prüfung der Homogenität des Materials durch Stichproben mit analytischer Auswertung.
- Festlegung des in einer Haufwerksmischung zulässigen Größtkorns in Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen (z. B. Dämpfungswirkung bei Gebindeabsturz im Bohrloch).
- Definition eines optimalen Haufwerkes mit einer klassierten Korngrößenverteilung nach FULLER, falls eine frühe Lastaufnahme und geringe Endsetzung angestrebt wird.
- Prüfung der Fließfähigkeit des Haufwerkes durch Bestimmung des Feuchtegehaltes.
- Bestimmung der wichtigsten bodenphysikalischen Parameter unter Anwendung relevanter Druck/Temperatur/Feuchtebedingungen für den geplanten Einsatzfall in einer repräsentativen Versuchsserie; Bestimmung der Grenzparameter für trockene und extrem feuchte Bedingungen (6 % Feuchteanteil).

- Bestimmung des Kompressions- und Kriechverhaltens im Hinblick auf die Festigkeitseigenschaften des Versatzgutes.
- Es ist zu prüfen, ob bei einem Versatzeinbringen in tiefe Bohrlöcher Fluidisierungsmaßnahmen nötig sind, um die Homogenität der Kornverteilung aufrecht zu erhalten.

In Zusammenarbeit mit KAI e. V. Berlin in Freiberg/Sa (früher FIA Freiberg) wurde ein umfangreiches Programm zur Ermittlung der schüttgutmechanischen Eigenschaften von Salzgrus durch KAI e. V. Berlin erarbeitet. Wegen finanzieller Engpässe wurde dieses Programm vorerst auf ein Minimalprogramm reduziert. Die Ergebnisse dieses Minimalprogramms liegen vor und sind in einem Bericht zusammengestellt /23/. Danach ist Salzgrus als ein weitgehend kohäsionsloses bzw. leicht fließendes Schüttgut einzuordnen. Die innere Reibung des Salzgrus kann durch einen einzigen Reibungswinkel charakterisiert werden, da die inneren Reibungswinkel und der effektive innere Reibungswinkel nahezu zusammenfallen. Der Meßwert für φ_e liegt zwischen 45° und 47° . Der Wandreibungswinkel zwischen Salzgrus und walzrauhem Stahl beträgt $\varphi_w = 27^\circ$.

Ein an die Bergakademie Freiberg vergebener Auftrag zur Messung des Seitendruckbeiwertes von Salzgrus ist nahezu abgeschlossen. Der vorläufige Abschlußbericht liegt vor /24/. Die Messungen gestalteten sich wegen der spezifischen Eigenschaften des Salzgrus (Fließen) sehr aufwendig und schwierig. Je nach Vorgeschichte der Proben und je nach Versuchsdauer wurden Seitendruckbeiwerte von $k_o = 0,3$ bzw. $k_o = 0,7$ gemessen.

Die Weiterführung dieser Untersuchungen zum schüttgutmechanischen Verhalten von Salzgrus (Seitendruckbeiwert; Reibungswinkel; Einfluß von Temperatur, Feuchte u. a. m. auf diese Kennwerte) ist in dem Programm des MHV-Projekts enthalten, dessen Finanzierung das BfS übernommen hat.

3.2 Druckverteilung im Salzgrusversatz

Die TH Aachen wurde beauftragt, ein Modell zu entwickeln, mit dessen Hilfe die Druckbelastung berechnet werden kann, die Abfallgebände, die im Endlagerbohrloch vollkommen in Salzgrus eingebettet sind (Basiskonzept für die Endlagerung, früher hydrostatische

bzw. semihydrostatische Einlagerung genannt), erfahren. Der Abschlußbericht zu diesen Arbeiten liegt vor und wurde als Jül-Bericht veröffentlicht /25/.

Basierend auf der Jansen-Theorie aus der Bodenmechanik haben die Autoren zwei Rechenmodelle, das Scheibenmodell und das Ringmodell aufgestellt. Dabei wird in erster Näherung davon ausgegangen, daß Salzgrus und eingelagerte Gebinde ein homogenes Medium bilden. In diesem homogenen Modell wird die Druckverteilung betrachtet.

Das Scheibenmodell

Beim Scheibenmodell (siehe Abb. 12) wird die Salzgrusschüttung samt eingelagerten Gebinden in Scheibenelemente zerlegt, und die Kräfte, die auf die Scheiben wirken, werden bilanziert. Es wird vereinfachend angenommen, daß die vertikalen Drücke gleichmäßig auf der Querschnittsfläche verteilt sind.

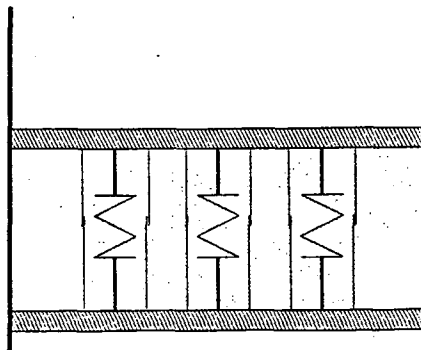


Abb. 12: Mechanische Ersatzkonstruktion für eine Scheibe des Scheibenmodells

Die Lösung der sich aus der Kräftebilanz ergebenden Differentialgleichung für den Vertikaldruck setzt sich aus einem exponentiell auf Null abklingenden Anteil aus der Auflast und einem gegen einen Grenzwert strebenden Anteil aus dem Eigengewicht der Schüttung (Gebinde und Salzgrus) zusammen. Abbildung 13 zeigt den Verlauf eines vertikalen Druckes für in einem Bohrloch mit Radius $R_B = 0,5$ m eingelagerte 400-I-Gebinde - die mittlere Wichte aus Salzgrus und Gebinde beträgt $\gamma_m = 23,21$ kN/m³ - und einer Auflast $p_o = 0$.

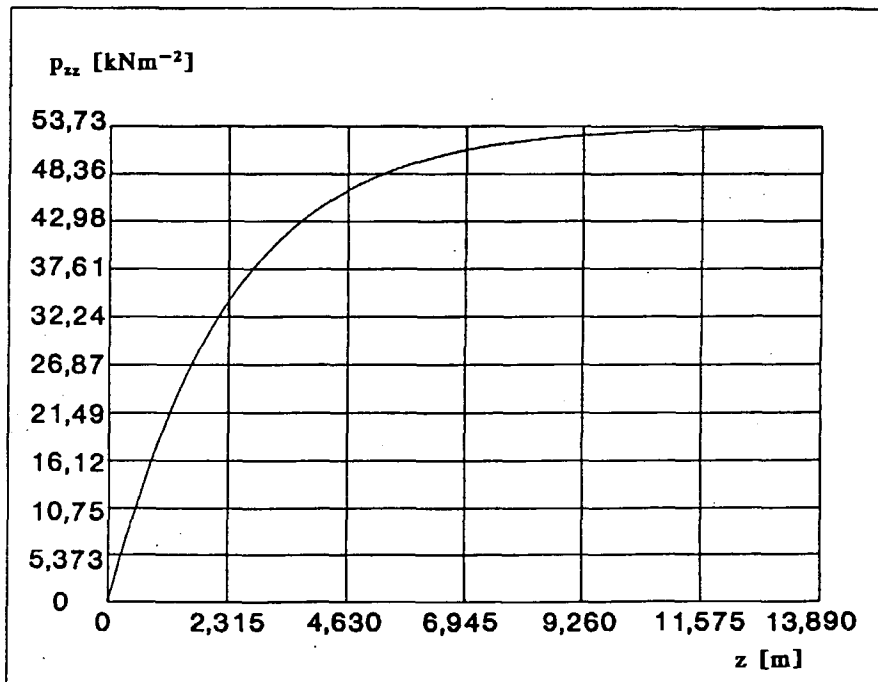


Abb. 13: Vertikaler Druck p_{zz} nach dem Scheibenmodell als Funktion der Tiefe ($R_B = 0,5 \text{ m}$, $\gamma_m = 23,21 \text{ kN/m}^3$, $p_o = 0$)

Die eingelagerten und vollkommen in Salzgrus eingebetteten 400-l-Gebinde werden lt. Rechnung nach dem Scheibenmodell mit einem maximalen vertikalen Druck $p_{zz} = 53,7 \text{ kN/m}^2$ (0,53 bar) belastet. Diese maximale Belastung wird in etwa 14 m Tiefe, bezogen auf das jeweils zuletzt eingelagerte Gebinde, erreicht. In Tiefen größer 14 m bleibt die Belastung konstant.

Das Ringmodell

Die beim Scheibenmodell geltende Einschränkung, daß der Vertikaldruck $p_{zz}(z)$ in allen horizontalen Ebenen der homogenen Schüttung konstant ist, gilt nur in erster Näherung. Sie entfällt beim Ringmodell.

Statt der Scheiben werden im Ringmodell konzentrische Ringe angenommen, bei denen durch die radialen Flächen radiale und axiale Kräfte übertragen werden. Die Ringe können sich in axialer Richtung zueinander verschieben. Diese Relativbewegung wird durch Reibungskräfte behindert. Abbildung 14 zeigt die mechanische Ersatzkonstruktion des Ringmodells.

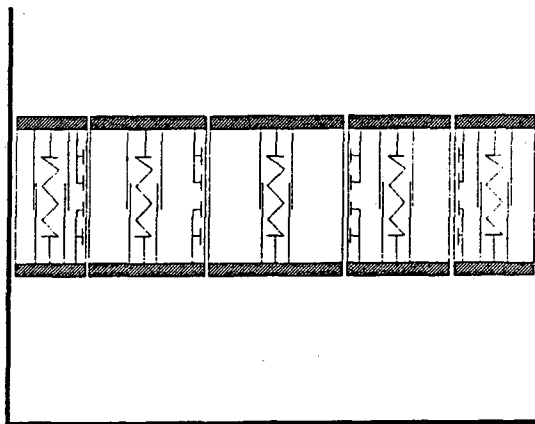


Abb. 14: Mechanische Ersatzkonstruktion für einen Ring des Ringmodells

Die Anwendung des Ringmodells zur Bestimmung der Druckbelastung von in Salzgrus eingebetteten 400-l-Gebinden ergibt, daß der Vertikaldruck in axialer Richtung zunächst unterlinear ansteigt und dann an einer durch die Materialparameter des Salzgrus und der eingelagerten Gebinde gekennzeichneten Stelle in einen konstanten Wert übergeht. Der maximal auftretende vertikale Druck p_{zz} ist wie beim Scheibenmodell $p_{zz} = 53,7 \text{ kN/m}^2$. Er wird hier aber bereits in einer Tiefe von $z = 4,63 \text{ m}$ erreicht (vgl. Abb. 15).

In Abbildung 16 ist der vertikale Druck in Abhängigkeit des Radius angegeben. Er steigt in radialer Richtung zunächst linear mit dem Radius an. Von der materialparameterabhängigen Stelle bis zur Bohrlochwand hin wird der Anstieg mit zunehmendem Radius kleiner. Der maximale vertikale Druck beträgt wieder $p_{zz} = 53,7 \text{ kN/m}^2$.

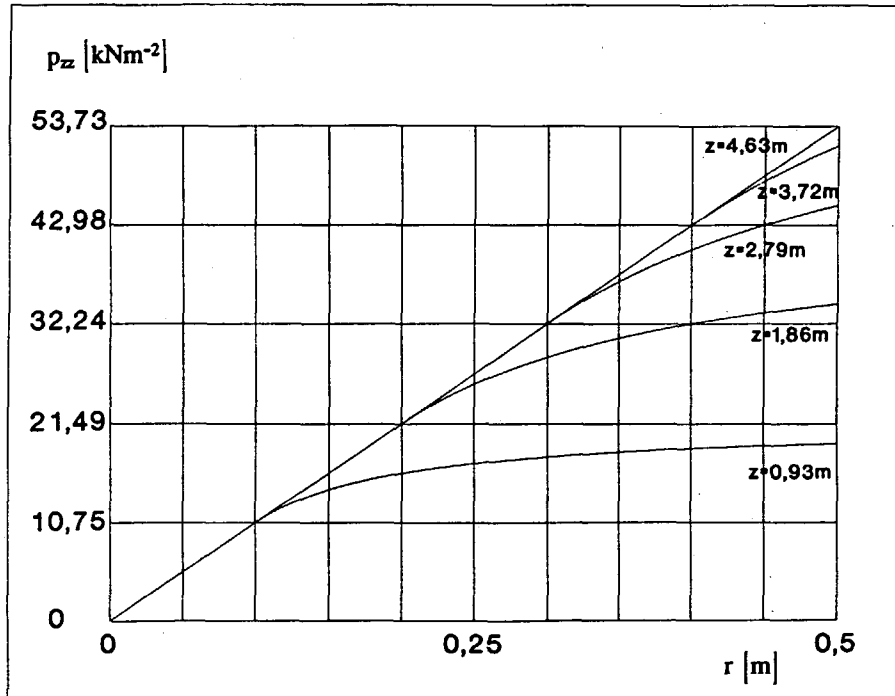


Abb. 15: Nach dem Ringmodell berechneter vertikaler Druck p_{zz} als Funktion der Tiefe z für verschiedene radiale Abstände r von der Bohrlochmitte ($R_B = 0,5$ m, $\gamma_m = 23,21$ kN/m³, $p_o = 0$)

Die für die obigen Modelle abgeleiteten Gleichungen enthalten Kenngrößen des Verfüllmaterials wie Dichte, Reibungsbeiwerte und Seitendruckbeiwert. Diese Kenngrößen wurden der allgemeinen Literatur für Schüttguttechnik entnommen. Sie sind daher eher geschätzt und nicht unbedingt salzgrusspezifisch. Zu einer exakten Bestimmung der schüttgutmechanischen Eigenschaften von Salzgrus sind umfangreiche Untersuchungen in Abhängigkeit von Kornspektrum, Feuchte, Temperatur, Zeit, aufgegebenem Druck sowie den Druckrichtungen notwendig. Erst solche experimentell gesicherten Kenngrößen lassen eine verlässlichere Aussage über die maximal im Bohrloch zu erwartenden Drücke zu.

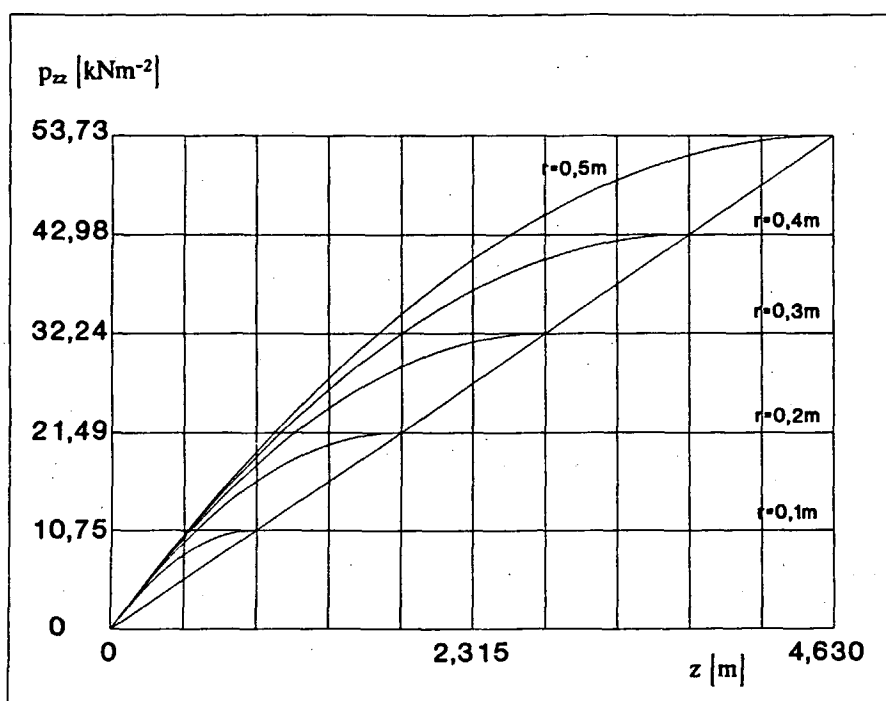


Abb 16: Nach dem Ringmodell berechneter vertikaler Druck p_{zz} als Funktion des radialen Abstands r von der Bohrlochmitte für verschiedene Tiefen z ($R_B = 0,5 \text{ m}$, $\gamma_m = 23,21 \text{ kN/m}^3$, $p_o = 0$)

Die oben angeführten Resultate zeigen jedoch bereits, daß die Einbettung der Abfallgebinde in Salzgrus (semihydrostatische Lagerung) keineswegs zu übergroßen Beanspruchungen der Gebinde führt, so daß diese relativ einfache Einlagervariante technisch erfolgversprechend ist.

3.3 Orientierende Versuche zur Lastabtragung mit Salzgrus

Bei der Einlagerung von Abfallgebänden mit zementiertem MAW und mit HTR-Brennelementen in tiefen Bohrlochern könnten Stapelkräfte auftreten, die einen Verlust der Gebindeintegrität schon während der Betriebsphase des Bohrlochs verursachen. Als Folge

könnten das Bohrloch und weitere Bereiche des Endlagers mit aerosolgebundener Aktivität kontaminiert werden.

Aufgrund von schüttguttheoretischen Untersuchungen ist zu erwarten, daß die Stapelkräfte in der Gebindesäule durch Versatz der Hohlräume und/oder durch Zwischenpfropfen auf ein solches Maß begrenzt werden können, daß selbst dünnwandige Abfallgebände diesen Kräften standhalten.

Zur Ergänzung der theoretischen Überlegungen wurden erste orientierende Technikversuche zur Demonstration der Abtragung von Stapelkräften durch Salzgrusversatz durchgeführt /26/. Die Versuche wurden in verkleinertem Maßstab durchgeführt. Untersucht wurde die Verteilung der Radial- und Vertikalspannungen in Gebindesäulen, die gemäß der "semihydrostatischen" Einlagertechnik aufgebaut waren. Weiterhin wurde das Lastabtragungsverhalten von Salzgruspfropfen untersucht.

Der Versuchsaufbau bestand aus einer etwa 3 m langen Betonrohrsäule mit einem Innendurchmesser von 45 cm, die zur Erfassung der Spannungszustände mit einer größeren Zahl von Druck- bzw. Kraftaufnehmern bestückt war. In Abbildung 17 wird der Versuchsaufbau schematisch dargestellt.

Die auf die innere Grundfläche der Säule wirkende Gewichtskraft (Vertikalspannung am Boden) wurde mit einer auf drei Kraftaufnehmern ruhenden Grundplatte ermittelt. Zur Erfassung der Radialspannungen war die Säule mit vier Seitendruckaufnehmern ausgerüstet.

Bei einem Teil der Versuche wurde die Säule mit maßstabverkleinerten Fässern beladen, die allseitig in Salzgrus (semihydrostatische Einlagerung) eingebettet waren. Der Boden der Kleinfässer war als Doppelboden ausgeführt. Zur Erfassung der auf die Fässer einwirkenden Vertikalspannungen befanden sich zwischen den beiden Bodenplatten jeweils drei Kraftaufnehmer.

Bei weiteren Versuchen wurde das Lastabtragverhalten von Salzgruspfropfen untersucht. In diesem Fall standen vier Druckmeßplatten zur Verfügung, mit denen die Verteilung der Vertikalspannung über die Pfropfenlänge ermittelt wurde. Die Säule wurde bei einem Teil der Versuche mit Gewichten belastet. Das Abtragverhalten von zusätzlich aufgebrachten Auflasten wurde untersucht. Elf Stahlplatten mit einem Gesamtgewicht von etwa 5 kN standen zur Verfügung.

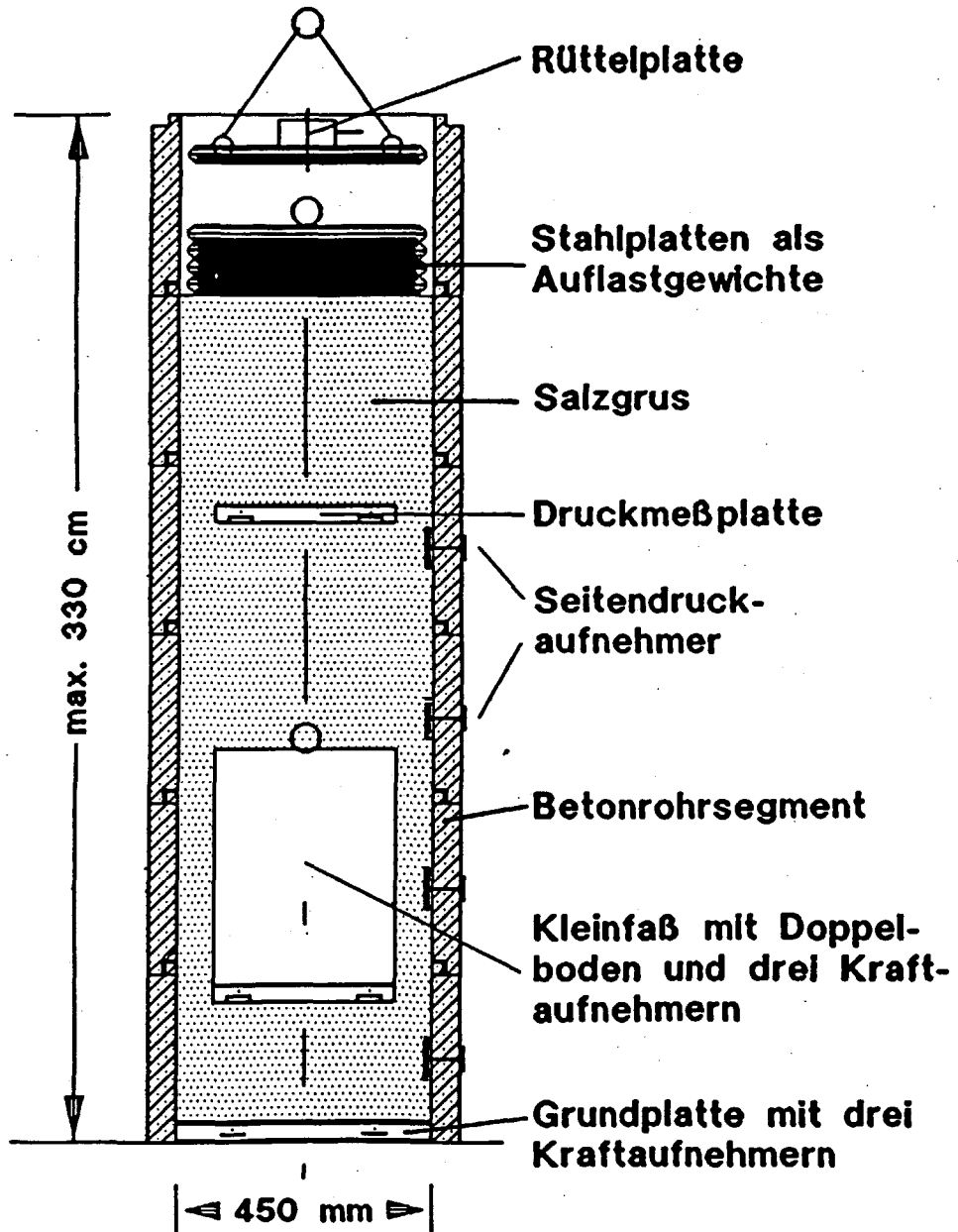


Abb. 17: Schematische Darstellung der Versuchssäule zur Untersuchung der Lastabtragung

Bei weiteren Versuchen wurde der Salzgrus abschnittsweise verdichtet, um den Einfluß der Verdichtung auf das Lastabtragverhalten zu ermitteln. Zur Verdichtung wurde eine Rüttelplatte verwendet.

Abbildung 18 zeigt exemplarisch die Verteilung der Vertikalspannung in einem etwa 3 m langen Salzgruspfpfropfen während vier aufeinanderfolgender Versuchsphasen.

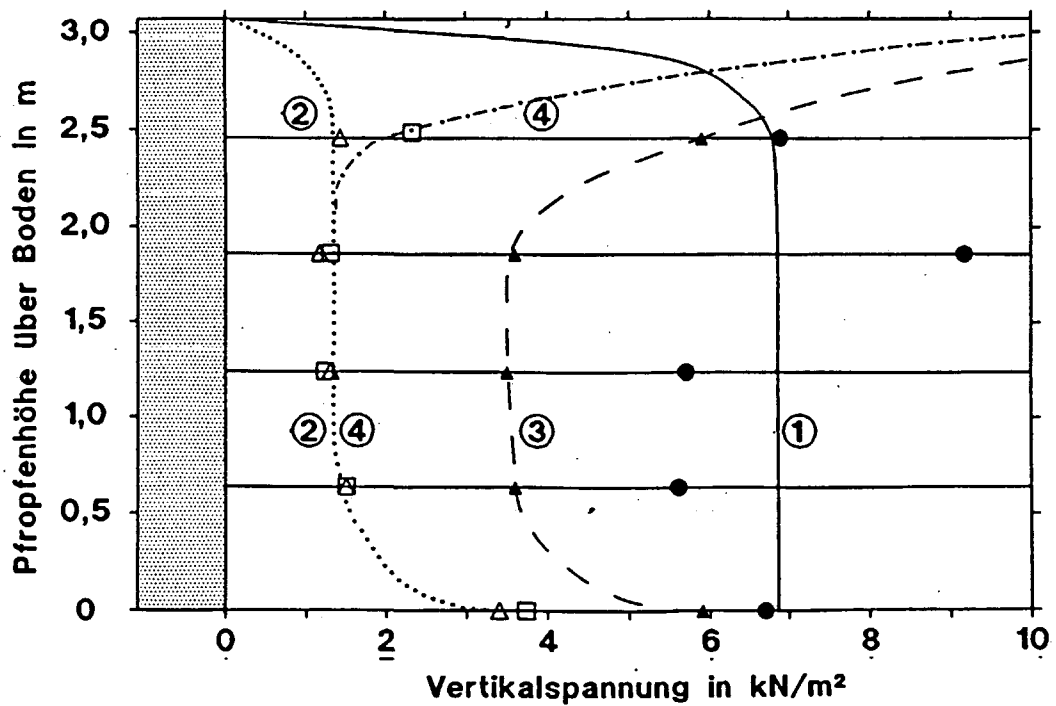


Abb. 18: Verteilung der Vertikalspannung über die Höhe eines 3 m langen Salzgruspfpfropfens während der vier Versuchsphasen

- Phase 1: unmittelbar nach Erstellung des Pfropfens (volle Kreise)
- Phase 2: nach 64 stündigem Entspannen des Pfropfens (offene Dreiecke)
- Phase 3: unmittelbar nach Belasten des Pfropfens mit einer Auflast von 4,89 kN (volle Dreiecke)
- Phase 4: 64 Stunden nach Aufbringen der Auflast (offene Quadrate)

Das Gesamtgewicht des belasteten Pfropfens betrug 12,35 kN; dies entspricht unter hydrostatischen Bedingungen einer Vertikalspannung am Boden der Säule von 78 kN/m². Gemessen wurde in der 4. Phase des Experiments eine Bodenspannung von etwa 3,5 kN/m². Die lastabtragenden Eigenschaften von Salzgruspfpfropfen werden durch dieses Ergebnis eindrucksvoll demonstriert.

Die wichtigsten Ergebnisse der orientierenden Versuche zur Lastabtragung sollen nachfolgend zusammengestellt werden:

- Die schüttguttheoretischen Modelle zur Abtragung von Stapelkräften über Salzgruspfpfropfen bzw. durch überdeckende Ringspaltverfüllung werden grundsätzlich (qualitativ) bestätigt.
- Die Wandrauhigkeit hat einen entscheidenden Einfluß auf das Lastabtragverhalten. Auf glatte Bohrlochwände können nur geringe Stapellasten übertragen werden.
- Gruspfpfropfen tragen sowohl ihr Eigengewicht als auch zusätzlich aufgebrachte Auflasten in hervorragender Weise ab. Bei einem Durchmesser von $\phi = 45$ cm und einer Pfropfenlänge von $H = 3$ m werden beispielsweise lediglich 5 - 10 % des Gesamtgewichts am Boden des Pfropfens wirksam. Der Rest wird in die Wand abgetragen.
- Stapelsäulen, die allseitig in Salzgrus eingebettete Abfallgebinde enthalten, tragen ebenfalls sowohl ihr Eigengewicht als auch zusätzlich aufgebrachte Auflasten hervorragend ab. Beispielsweise werden 10 - 15 % des Gesamtgewichts am Boden der Stapelsäule wirksam ($\phi = 45$ cm, $H = 3$ m), während der Rest in die Wand eingetragen wird.
- Das Lastabtragverhalten wird in Stapelsäulen durch exzentrische Positionierung bzw. Schrägstellung der Fässer eher verschlechtert. Faßsicken führen ebenfalls eher zu einer Verschlechterung der Lastabtragung.
- Die Vertikal- und Radialspannungen, die sich in Salzgruspfpfropfen bzw. in salzgrusversetzten Stapelsäulen unmittelbar nach deren Erstellung einstellen, verringern sich innerhalb weniger Tage bis auf etwa die Hälfte. Als Ursache für die zeitliche Entspannung ("Ausheilvorgänge") werden strukturverändernde Vorgänge vermutet, die die Fließfähigkeit des Salzgrusversatzes verringern. Entscheidend für das "Ausheilverhalten" ist der Feuchtegehalt des Materials. Getrockneter Salzgrus zeigt nur sehr geringe Tendenzen zur Entspannung durch "Ausheilen".

3.4 Salzgrus als Flammensperre

Eine Schüttung aus körnigem Material kann unter bestimmten Voraussetzungen durch Oberflächeneinflüsse die Ausbreitung einer Flammenfront in einem zündfähigen Gemisch behindern oder ganz unterbinden. Dieser Effekt ist als "Löschen" (quenching) bekannt. Die Nutzung der Löschwirkung von Salzgrus bei der Einlagerung radioaktiver Abfallgebinde in Bohrlöchern im Salz ist in /27/ beschrieben.

Von der Fachhochschule Aachen wurde die Löschwirkung von Salzgrus in einer Wasserstoff-Luft-Atmosphäre in zahlreichen Versuchsreihen untersucht /28/, /29/. Dabei wurde mittels einer Versuchsapparatur die sichere Schütthöhe h von Salzgrusschüttungen gegen Flammendurchschlag ermittelt.

Als sichere Höhe ist die Schütthöhe h definiert, die gerade verhindert, daß die in einem Zündvolumen stattfindende Zündung auf ein Reaktionsvolumen, also einen benachbarten Raum, übergreift, wobei beide Volumina mit dem gleichen Wasserstoff-Luft-Gemisch gefüllt und lediglich durch die Salzgrusschüttung voneinander getrennt sind.

Der bei den Versuchen verwendete Salzgrus stammt aus dem Salzbergwerk ASSE und ist das Produkt, das beim Auffahren von untertägigen Strecken mit den dort eingesetzten Teilschnittmaschinen entsteht. Der Salzgrus hat einen Feuchtigkeitsgehalt im Bereich von 0,15 ‰ bis 0,5 ‰. Die Korngrößenverteilung zeigt Abbildung 19. Der größte Korndurchmesser liegt bei $d = 32$ mm. Ein Anteil von etwa 50 Gew.-% des Salzgrus hat die Korngröße $d = 0$ bis 1,5 mm.

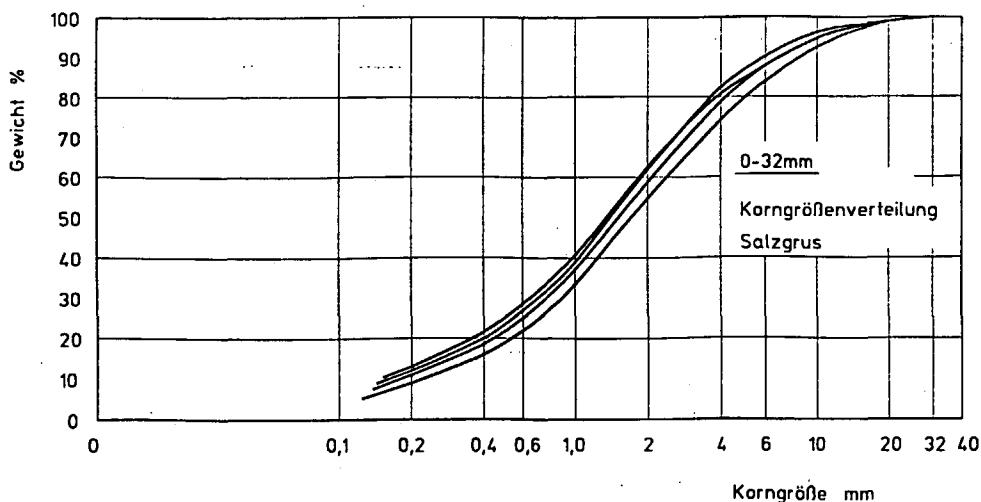


Abb. 19: Korngrößenverteilung des Salzgrus (unfraktioniert)

Der Einfluß folgender Parameter auf die sichere Schütthöhe h wurde untersucht:

- Korngröße
- Wasserstoffkonzentration in Luft
- Temperatur der Schüttung
- Wandbeschaffenheit
- Zündvolumen
- Geometrie des Zündvolumens
- Zündposition
- Zündrichtung
- Feuchte.

Einfluß der Korngröße

Zur Bestimmung des Einflusses der Korngröße des Salzgrus auf die Flammendurchschlag-Sicherheit wurden, unter sonst gleichen Bedingungen, verschiedene Kornfraktionen untersucht. Es zeigte sich, daß die sichere Schütthöhe mit kleiner werdender Körnung kleiner wird; d. h. die Sicherheit gegen Flammendurchschlag wird größer. Beispielhaft ergibt eine Fraktion des Salzgrus von 0 - 2 mm eine sichere Schütthöhe von $h = 60$ mm, während eine Fraktion von 5 - 16 mm bei einer Schütthöhe von $h = 300$ mm noch keine Löschwirkung zeigt. Gleiche Versuche mit unfraktioniertem Salzgrus nach Abbildung 19 ergeben eine sichere Schütthöhe von $h = 100$ m.

Eine wesentliche Voraussetzung zur Verwendung von Salzgrusschüttungen als Flammensperre ist also, daß die Schüttungen einen gewissen Anteil Material feiner, rieselfähiger Körnung von 0 bis 2 mm enthalten.

Einfluß der Wasserstoffkonzentration

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluß der H_2 -Konzentration im Gasgemisch auf die sichere Schütthöhe zeigt Abbildung 20.

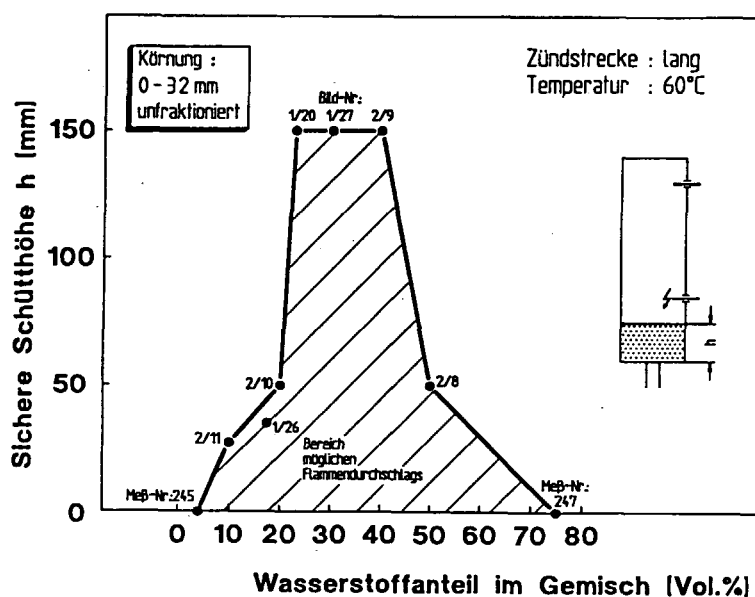


Abb. 20: Sichere Schütthöhe h als Funktion des Wasserstoffanteils im Gemisch

Die Versuche wurden mit "trockenem" ($X_w = 0,15 - 0,5 \text{ ‰}$), unfraktioniertem (Körnung 0 - 32 mm) Salzgrus bei einer Temperatur der Salzgrusschüttung $\vartheta = 60^\circ\text{C}$ durchgeführt. Das Zündvolumen betrug $V = 1,27 \text{ l}$ und die Zündposition lag 60 mm oberhalb der Schüttungsoberfläche.

Bei Wasserstoffanteilen unter 4 Vol.-% und über 75 Vol.-% ist eine Zündung der Gemische nicht möglich. Dementsprechend ist bereits bei einer Schütthöhe Null die Sicherheit des Systems gegeben. Zwischen diesen Grenzen folgt die sichere Schütthöhe h dem in Abbildung 20 gezeigten Verlauf, wobei die maximal erforderliche Schütthöhe mit $h = 150 \text{ mm}$ bei einer H_2 -Konzentration von etwa 22 Vol.-% bis 40 Vol.-% auftritt.

Bei dem in Abbildung 20 dargestellten Polygonzug fallen die steilen Flanken auf, die scharf ausgeprägte Zündgrenzen darstellen.

Einfluß der Schüttungstemperatur

Um die Abhängigkeit der Löschwirkung des Salzgrus von der Temperatur zu ermitteln (im hier interessierenden Bereich), wurde je eine Versuchsserie mit $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$ und $\vartheta = 60^{\circ}\text{C}$ durchgeführt. Als Resultat ergibt sich eine vernachlässigbare Änderung der sicheren Schütthöhe mit der Temperatur. Sie ist bei $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$ um etwa 20 % größer als bei $\vartheta = 60^{\circ}\text{C}$.

Einfluß der Wandbeschaffenheit

Mit dem Einsatz einer Shenkin-Spirale als Turbulenzgenerator wurde während einer Versuchsreihe die natürliche Wandrauigkeit von Hohlräumen im Salzgrus simuliert. Es konnte kein Einfluß der Wandrauigkeit des Zündvolumens auf die Löschwirkung des Salzgrus festgestellt werden.

Einfluß des Zündvolumens

Der Einfluß des Zündvolumens auf die sichere Schütthöhe ist in Verbindung mit der Zündposition in Abbildung 21 gezeigt. Dabei bedeutet Zündposition "nah" bzw. "fern", daß die Zündung des Gemisches 60 mm bzw. 160 mm oberhalb der Salzgrusschüttung erfolgte.

Aus Abb. 21 geht hervor, daß die Schütthöhe h bei kleinen Zündvolumina (unter 0,5 l) unabhängig von der Zündposition ist. Bei Volumina größer als 0,5 l wirkt sich die Zündposition recht stark auf die sichere Schütthöhe aus. Sie ist im Bereich $1,25 \text{ l} \leq V \leq 2,5 \text{ l}$ für die Zündposition "nah" mit $h = 150 \text{ mm}$ um den Faktor 2 größer als für die Zündposition "fern".

Einfluß der Geometrie des Zündvolumens

Zur Untersuchung des Einflusses der Geometrie des Zündvolumens standen "schlanke" und "gedrungene" (52 mm bzw. 101 mm Durchmesser, $V = 2,5 \text{ l}$) Volumina zur Verfügung. Die Versuche zeigen, daß bei den hier eingesetzten Zündvolumina die Form keinen Einfluß auf die sichere Schütthöhe des Salzgrus hat.

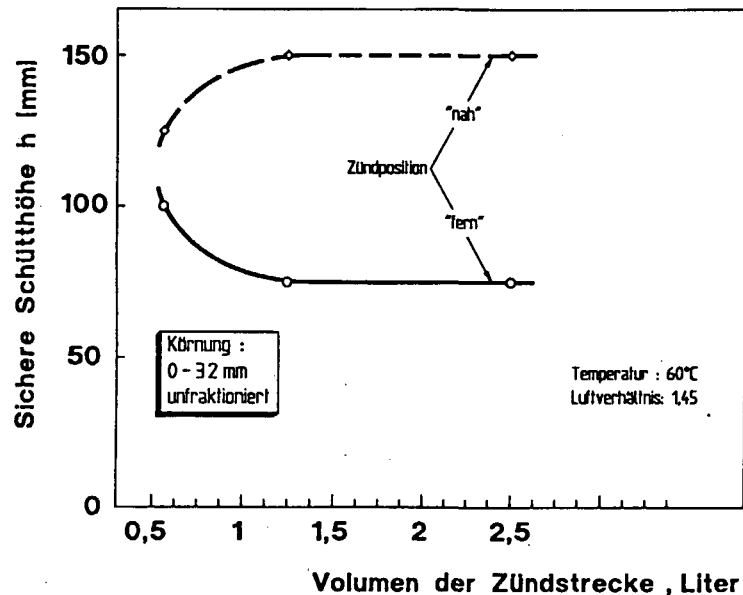


Abb. 21: Einfluß des Zündvolumens und der Zündposition auf die sichere Schütthöhe

Einfluß der Zündposition

Der Einfluß der Zündposition ist aus Abbildung 21 ersichtlich und wurde im Zusammenhang mit der Größe des Zündvolumens behandelt.

Einfluß der Zündrichtung

Die Abhängigkeit der Löschwirkung des Salzgrus von der Zündrichtung wurde untersucht, indem die Resultate einer Versuchsserie mit Zündung "von oben" und Zündung "von unten" miteinander verglichen wurden. Zündung "von oben" bzw. "von unten" bedeuten dabei, daß das Zündvolumen oberhalb bzw. unterhalb der Salzgrusschüttung angeordnet ist und sich die Flammenfront bei Zündung in Richtung der Schwerkraft bzw. entgegen der Richtung der Schwerkraft ausbreitet.

Die Erwartung, daß die Löschwirkung der Zündung "von unten" wegen des Aufwirbelns des Salzgrus und der damit verbundenen Auflockerung der Schüttung infolge des Explosionsdruckes geringer sein müßte als bei der Zündung von oben, konnte generell nicht bestätigt werden. Eine eindeutige Tendenz wurde nicht gefunden.

Einfluß der Feuchte

Alle bisher untersuchten Parametereinflüsse wurden in Versuchen mit "trockenem" Salzgrus ermittelt. Unter "trocken" ist hier ein Wassergehalt entsprechend einem Massenanteil von weniger als 0,05 % zu verstehen. Charakteristisch für den trockenen Salzgrus ist seine gute Rieselfähigkeit auch der feinen und feinsten Anteile der Körnung. Diese Rieselfähigkeit nimmt generell mit steigender Feuchte des Salzgrus ab. Um jedoch einen erkennbaren negativen Einfluß auf die Löschwirkung des Salzgrus zu erhalten, mußten vergleichsweise große Wassergehalte eingestellt werden. In Abbildung 22 ist der Einfluß der Feuchte auf die Löschwirkung des Salzgrus bei Zündung von oben und von unten dargestellt.

Bei Zündung von unten wird die Löschwirkung der Salzgrusschüttung zunächst durch eine leichte Anfeuchtung des Salzgrus verbessert. Fügt man jedoch soviel Wasser hinzu, daß die feineren Körnungen und Staubanteile in der Schüttung gebunden werden, verliert die Schüttung im Falle der Zündung von unten ihre Sperrwirkung gegen Flammendurchschlag weitgehend.

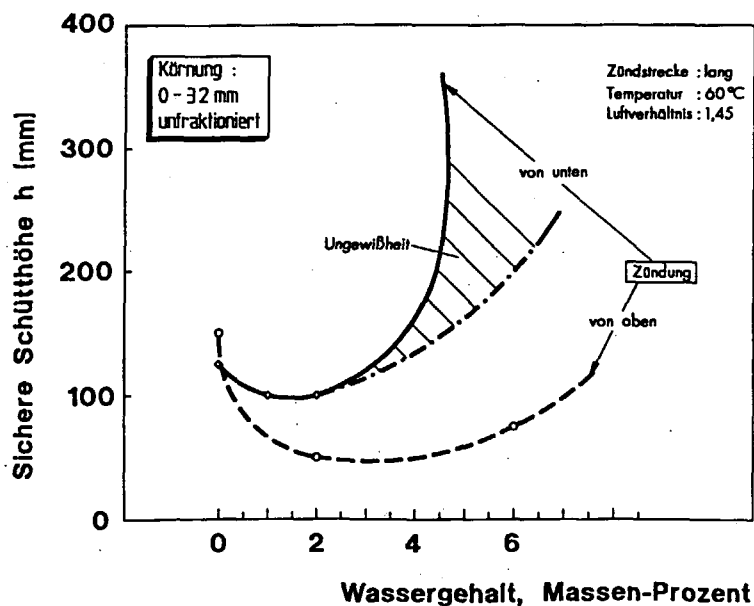


Abb. 22: Sichere Schütthöhe h von Salzgrusschüttungen in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Salzgrus

Eine Überprüfung des Feuchteinflusses bei der Zündrichtung von oben ergab eine deutlich bessere Sperrwirkung als bei der Zündung von unten. Sie verbessert sich, ausgehend vom trockenen Grus, durch Befeuchten zunächst deutlich. Von $h = 150$ mm reduziert sich die sichere Schütthöhe bei 2 Massen-% Wassergehalt auf $h = 50$ mm. Bei 6 Massen-% nimmt sie nur unwesentlich zu.

4. Sicherheitstechnische Randbedingungen

Die Abfallgebinde müssen unter Einhaltung der Arbeitsschutz- und Strahlenschutzbedingungen sicher in die Bohrlöcher eingelagert (Betriebsphase) und dort langfristig sicher aufbewahrt werden (Nachbetriebsphase). Dabei dürfen im bestimmungsgemäßen Betrieb und bei Störfällen bestimmte Konzentrationsgrenzwerte für radioaktive Gase, für konventionelle Gase wie beispielsweise Wasserstoff und für Aerosole in offenen bzw. zugänglichen Hohlräumen nicht überschritten werden.

4.1 Konzentrationsgrenzwerte und Sicherheitsbetrachtungen

An die Firma Brenk Systemplanung, Aachen, wurde ein Auftrag zum sicherheitstechnischen Vergleich von Einlagerungsvarianten vergeben. Der Abschlußbericht zu diesen Arbeiten liegt vor /30/.

Der aus den Bohrlöchern ausströmende Wasserstoff und die radioaktiven Gase Krypton-85, Tritium und Kohlenstoff-14 stellen eine potentielle Gefahr für das Betriebspersonal in der Einlagerstrecke dar. Zur sicheren Vermeidung zündfähiger H₂-Gemische wird von folgendem konservativen Kriterium ausgegangen:

Die H₂-Konzentration darf im nicht versetzten Teil des Bohrloches sowie in anderen freien Räumen (Strecken und Schächte) des Endlagers 0,8 Vol.-% nicht überschreiten, solange die O₂-Konzentration nicht unter 1 Vol.-% liegt oder umgekehrt. Es wird davon ausgegangen, daß die Einlagerbereiche zu Kontrollbereichen erklärt werden. Damit gelten dann u.a. die folgenden Grenzwerte (für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A):

- Ganzkörperdosis pro Jahr : 50 mSv
- Hautdosis pro Jahr : 300 mSv.

Für den bestimmungsgemäßen Betrieb konnte unter Zugrundelegung großer Gasfreisetzungsraten in die Bohrlöcher, insbesondere durch starke Korrosion (10 µm/a gleichmäßige Flächenkorrosion), und eines sehr durchlässigen Bohrlochstopfens (Permeabilität 3×10^{-12} m²) folgendes Ergebnis gewonnen werden:

Sowohl die H₂-Konzentration als auch die Jahresdosen aufgrund von Inhalation und äußerer Bestrahlung durch die o. g. radioaktiven Gase unterschreiten in der Einlagerstrecke die

o. a. Kriterien bzw. die Grenzwerte um mehrere Größenordnungen. Für die Strahlengesamtexposition ist daher die Direktstrahlung aus den Abschirmbehältern die bestimmende Größe.

Die Frage der H₂-Konzentration im unversetzten Teil des Bohrlochs bleibt offen. Für Einlagervarianten ohne Ringspaltversatz führen die konservativen Abschätzungen dieser Untersuchung zu Grenzwertüberschreitungen. Es dürfte schwer sein nachzuweisen, daß in der Realität keine zündfähigen Gasgemische entstehen können. Einlagervarianten ohne Ringspaltversatz sollten daher nicht verwendet werden.

Für Einlagervarianten mit Ringspaltversatz soll eine von der Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH (GRS) durchgeführte Untersuchung (siehe Kap. 2.4.1) den Sicherheitsnachweis für den noch unbefüllten Teil des Bohrlochs bringen bzw. zu entscheiden erlauben, ob zusätzliche Maßnahmen zur Herabsetzung der H₂-Konzentration notwendig sind.

Abschließend werden in der Brenk-Studie einige Störfallszenarien (bzw. betriebliche Störungen) erörtert. Die Eintrittswahrscheinlichkeit wird dabei nicht diskutiert, sondern ihr Auftreten einfach postuliert. Die betrachteten Szenarien sind

- der Ausfall der Streckenbewetterung,
- der Gebindeabsturz,
- das Versagen (undicht werden) des Bohrlochstopfens.

Zusätzlich wird noch der hypothetische Fall einer ungeschützten Direktstrahlung aus dem vollständig befüllten, aber unverschlossenen und nicht durch den Bohrlochschieber abgedeckten Bohrloch untersucht, um daraus evtl. weitere Unterscheidungsmerkmale für die verschiedenen Einlagervarianten zu gewinnen.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die durch die betrachteten Ereignisse hervorgerufene H₂-Konzentration in der Strecke liegt in allen Fällen mehrere Größenordnungen unter dem eingangs genannten Konzentrationsgrenzwert.
- Die durch sehr konservative Überlegungen abgeschätzten Ganzkörperdosisleistungen liegen bei den drei Szenarien in der Größenordnung von 10⁻³ µSv/h, während die

Hautdosisleistung bei ca. $1 \mu\text{Sv/h}$ (Bewetterungsausfall und Gebindeabsturz) bzw. $16 \mu\text{Sv/h}$ (Versagen des Bohrlochstopfens) liegt. Damit sind die Strahlenexpositionen für die drei betrachteten Szenarien weit unterhalb der Grenzwerte.

- Außer acht gelassen wird beim Störfall "Gebindeabsturz" die Bildung und der Transport von radioaktiven Aerosolen. Diese können unter Umständen der bestimmende Faktor bei der Strahlenexposition sein. Der damit zusammenhängende Fragenkomplex sollte daher unbedingt weiter untersucht werden.
- Die effektiven Dosisleistungen für den hypothetischen Fall der ungeschützten Direktstrahlung unterscheiden sich bei den einzelnen Einlagervarianten nur minimal und liegen bei ca. 3 mSv/h .

4.2 Druckaufbau im Bohrloch

Im Auftrag der KFA Jülich wurde von Brenk Systemplanung eine Studie zum Druckaufbau in MAW-Bohrlöchern durchgeführt /30/. Die Studie hatte über den sicherheitstechnischen Vergleich (siehe Kap. 4.1) hinaus folgende Zielsetzungen:

- Schaffung eines rechen-technischen Instrumentariums zur Berechnung des Druckaufbaus und der Gasflüsse in Einlagerbohrlöchern und -strecken.
- Gewinnung von Auslegungsdaten für die Durchlässigkeit des Bohrlochstopfens.

Im Rahmen der Studie wurde das Rechenprogramm DRAUFER entwickelt. DRAUFER berechnet den zeitlichen Verlauf des Gasdrucks in den Einlagerbohrlöchern in den ersten 50 Jahren nach deren Verschluß mit einem Stopfen. Ebenso werden der Gasdruck in der versetzten Einlagerstrecke sowie die Gasflüsse durch die Bohrlochstopfen bzw. durch das Abschlußbauwerk berechnet.

Das Rechenprogramm DRAUFER berücksichtigt den Einfluß folgender physikalischer Effekte:

Gebirgskonvergenz

Die Gebirgskonvergenz führt zu einer Verringerung des freien Volumens der Bohrlöcher bzw. der Strecke, wodurch sich die Drücke erhöhen bzw. entsprechende Gasflüsse induziert werden.

Temperaturentwicklung

Der Wärmeeintrag führt zu einem Temperaturanstieg in den Bohrlöchern; dadurch kommt es durch Erhöhung der Gastemperatur zu einem Druckaufbau. Auf mittelbarem Weg verursacht der Wärmeeintrag durch Beschleunigung der Konvergenz einen Druckanstieg.

Gasquellen

In den MAW-Gebinden wird (mit Ausnahme der HTR-BE-Fässer) durch radiolytische Zersetzung der wasserhaltigen Matrix Wasserstoff erzeugt. Weiterhin sind die Behälterwerkstoffe in einer feuchtehaltigen Umgebung Korrosionsprozessen ausgesetzt. Unter anaeroben Bedingungen führt die Korrosion zu einer Bildung von Wasserstoff. Die dritte hier betrachtete Gasquelle ist das ausgasende Salzgestein. Ist der Gasdruck in den Hohlräumen geringer als im Salzgestein, werden Gaskomponenten aus dem Gestein ausgegast.

Gassenken

Nach dem Verschuß der Bohrlöcher wird der Luftsauerstoff durch Oxidation von metallischen Werk- und Abfallstoffen verbraucht.

Die Permeation der Gase durch den Bohrlochstopfen bzw. durch das Abschlußbauwerk ist der wichtigste druckbestimmende Vorgang. Bei der Modellierung wurden sowohl Stopfen mit konstanter Permeabilität als auch solche mit einer konvergenzbedingt abnehmenden Permeabilität berücksichtigt.

Eine weitere wichtige Gassenke stellt das Salzgestein dar, falls seine Durchlässigkeit nicht weit unter den bisher aus Messungen bekannten Werten liegt. Der Gastransport in das Salzgestein wird in dem Modell wahlweise als Darcy-Transport oder als Knudsen-Diffusion modelliert.

Die aufgrund der sich verändernden Gaszusammensetzung (wachsender H_2 -Anteil) abnehmende Viskosität wurde im Modell ebenfalls berücksichtigt.

Radioaktive Gase

Die MAW-Gebinde setzen während ihrer Lagerung leicht flüchtige radioaktive Gase wie z. B. H-3 (HT und HTO), C-14 (CO_2) und Kr-85 frei. Zum Druckaufbau tragen diese Gase nicht bei. Jedoch ist der Transport der leicht flüchtigen Radionuklide durch die Bohrlochstopfen bzw. durch das Abschlußbauwerk für die Abschätzung der radiologischen Belastung des Betriebspersonals von grundlegender Bedeutung.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde die Empfindlichkeit des Druckverlaufs bzw. der Gasflüsse gegen die Variation der folgenden Einflußgrößen untersucht:

- (Ausgas-)Zeit zwischen Auffahren der Strecke bzw. Bohren der Bohrlöcher und Versatz der Strecke,
- Porenvolumen der Gebinde,
- Porosität des Streckenversatzes,
- dynamische Viskosität des Gases,
- Gesteinsparameter: Porosität, Gasdruck, Randbedingung,
- Konvergenzraten für Bohrlöcher und Strecke,
- Temperaturparameter: Wärmeeintrag, Leitfähigkeit im Ringspalt,
- Korrosionsrate.

Die meisten dieser Einflußgrößen haben eine nur untergeordnete Bedeutung für den Bohrlochdruck und die Gasflüsse. Einige Größen, wie die Parameter für den Gastransport im Gestein, spielen nur unter spezifischen Bedingungen (z. B. nur bei extrem dichtem Bohrlochstopfen) eine größere Rolle. Von genereller Bedeutung sind die Korrosionsrate und die dynamische Viskosität des Bohrlochgases.

Die Viskosität läßt sich relativ zuverlässig aus den bekannten Viskositäten der Gaskomponenten berechnen. Schwieriger ist die Situation bei der Korrosionsrate. Da die Datenbasis keine belastbare Abtragungsrate liefert, muß die Korrosionsrate in relativ weiten Grenzen variiert werden.

Abbildung 23 zeigt als Beispiel den Druckverlauf für unterschiedliche Korrosionsraten in einem Bohrloch, das mit COGEMA-Gebinden gemäß der unkontrollierten Stapeltechnik mit überdeckender Ringspaltverfüllung befüllt ist. Für den Bohrlochstopfen wurde eine konstante Permeabilität von $1 \times 10^{-18} \text{ m}^2$, für das Salzgestein eine Permeabilität von $5 \times 10^{-26} \text{ m}^2$ angenommen.

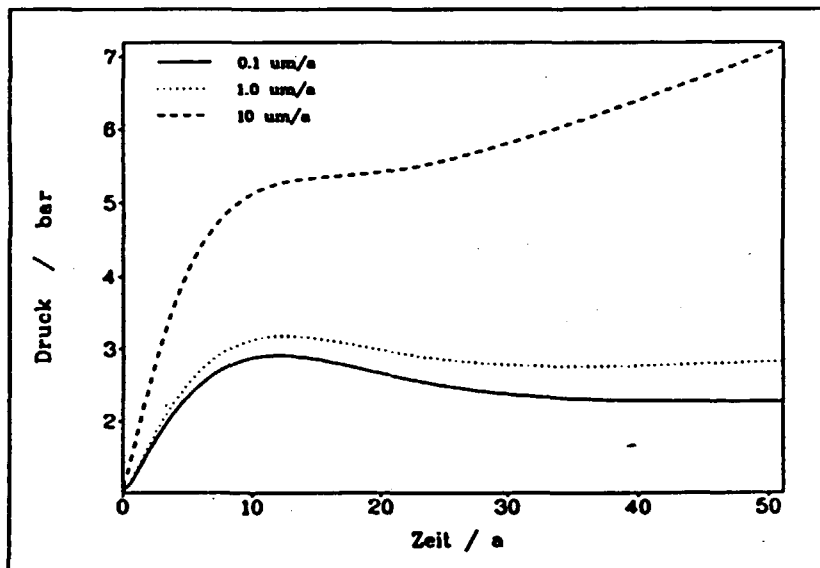


Abb. 23: Zeitlicher Druckverlauf in einem Bohrloch in Abhängigkeit von der Korrosionsrate (oben angegeben: Korrosionsrate)

Bei der Untersuchung wurden insgesamt rund 100 Rechenfälle behandelt, um den Einfluß folgender Einflußgrößen auf den Bohrlochdruck und die Gasflüsse im bestimmungsgemäßen Betrieb zu ermitteln:

- **Gebindetypen:**
COGEMA, BNFL, 400-l-Fässer mit Hülsen, Feedklärschlamm und Strukturteilen und 400-l-Fässer mit HTR-Brennelementen
- **Einlagervarianten:**
acht unterschiedliche Einlagervarianten mit und ohne Versatz
- **Permeabilität des Bohrlochstopfens:**
konstante und variable Permeabilität
- **Gastransport im Gestein**

Zur Illustration der Ergebnisse werden hier zwei Beispiele (Abb. 24 und 25) aufgeführt, bei denen COGEMA-Gebinde betrachtet werden, die gemäß der unkontrollierten Stapeltechnik mit überdeckender Ringspaltverfüllung eingelagert sind. In Abbildung 24 wurde die Permeabilität des Stopfens bei festgehaltener Korrosionsrate ($1 \mu\text{m/a}$) und fester Gesteinspermeabilität (10^{-21}m^2) variiert.

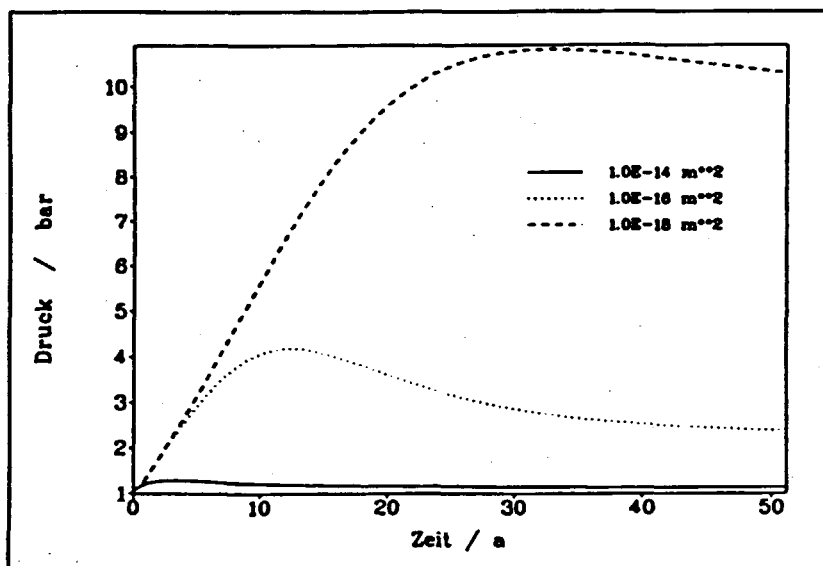


Abb. 24: Zeitlicher Druckverlauf in einem Bohrloch in Abhängigkeit von der Dichtigkeit des Stopfens (oben angegeben: Permeabilität des Stopfens)

Für Abbildung 25 wurde dagegen die Permeabilität des Gesteins bei festgehaltener Permeabilität des Stopfens (10^{-18}m^2) und bei einer festen Korrosionsrate ($1 \mu\text{m/a}$) variiert.

Die wichtigsten Ergebnisse der Studie zum Druckaufbau in den Einlagerbohrlöchern sind folgende:

- Der Druckaufbau im Bohrloch ist relativ unabhängig von der Einlagervariante. Varianten mit Salzgrusversatz führen zu geringfügig höheren Drücken und Gasflüssen.

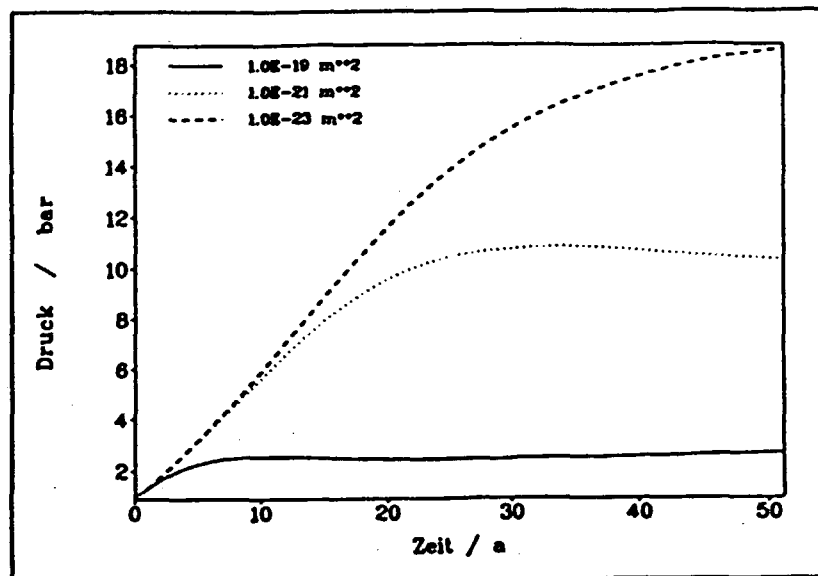


Abb. 25: Zeitlicher Druckverlauf in einem Bohrloch in Abhängigkeit von der Gesteinspermeation (oben angegeben: Gesteinspermeabilität)

- Am Ende der einjährigen Betriebsphase einer Einlagerstrecke beträgt der Bohrlochdruck selbst unter konservativen Annahmen bzgl. der Gasquellen und Gassenken maximal 1,5 bar.
- Bei Auslegungen des Bohrlochstopfens mit Permeabilitäten größer 10^{-18} m^2 und nicht allzu großer Korrosion ($\leq 1 \mu\text{m/a}$) ist nicht zu erwarten, daß der Bohrlochdruck in den ersten 50 Jahren 10 bar übersteigt.
- Für den Druckaufbau im Bohrloch spielt das Salzgestein eine wichtige (dämpfende) Rolle. Steigt der Druck im Bohrloch aufgrund eines dicht ausgelegten Bohrlochstopfens über 20 bar, so sind nach heutiger Datenlage bezüglich der Durchlässigkeit des Gesteins druckreduzierende Effekte in der Größenordnung von einigen 10 % zu erwarten.

5. Basiskonzept

Im Verlaufe der Projektarbeit wurde, abhängig von den verschiedensten Parametern, eine Vielzahl von möglichen Varianten für die Einlagerung radioaktiver Abfallgebinde in Bohrlöchern erarbeitet. Diese unterschiedlichen Varianten bilden die Grundlage für die Definition eines Basiskonzeptes, das die nach derzeitigem Wissen gestellten Anforderungen an eine Bohrlochtechnik am besten erfüllt.

Von der Firma Dornier, Friedrichshafen, wurde auf der Grundlage eines ersten Konzeptentwurfs sowie der von der Projektleitung festgelegten fünf Grundvarianten (Abb. 26) für die Bohrlochtechnik /31, 32/ ein Basiskonzept vorgeschlagen.

In dem zur Verfügung stehenden Zeit- und Finanzrahmen konnten aber nicht alle Fragen zufriedenstellend beantwortet werden. Den von Dornier entwickelten Leitfaden zur Ableitung der Einlagerungsvarianten zeigt Abbildung 27, in Tabelle 6 ist der Dornier-Vorschlag zur Bewertung der Einlagervarianten aufgeführt. Obgleich die Basis dieses Bewertungsvorschlags nicht ausreichend ist und die quantitativen Unterschiede zwischen den Gesamtbewertungsziffern z. T. sehr gering sind, ist die Tendenz für Einlagerungsvarianten mit Ringspaltverfüllung dennoch eindeutig und belastbar.

Die Einbettung der Gebinde in Salzgrus (früher: semihydrostatische Lagerung) sollte daher als Referenzkonzept für die Endlagerung von radioaktiven Abfallgebänden in tiefen Bohrlöchern weiterverfolgt werden. Als Konsequenz aus dieser Empfehlung wird im weiteren Verlauf des vom BfS finanzierten MHV-Projekts die Lastabtragung durch Salzgrus für diese Einlagerkonfiguration weiter untersucht.

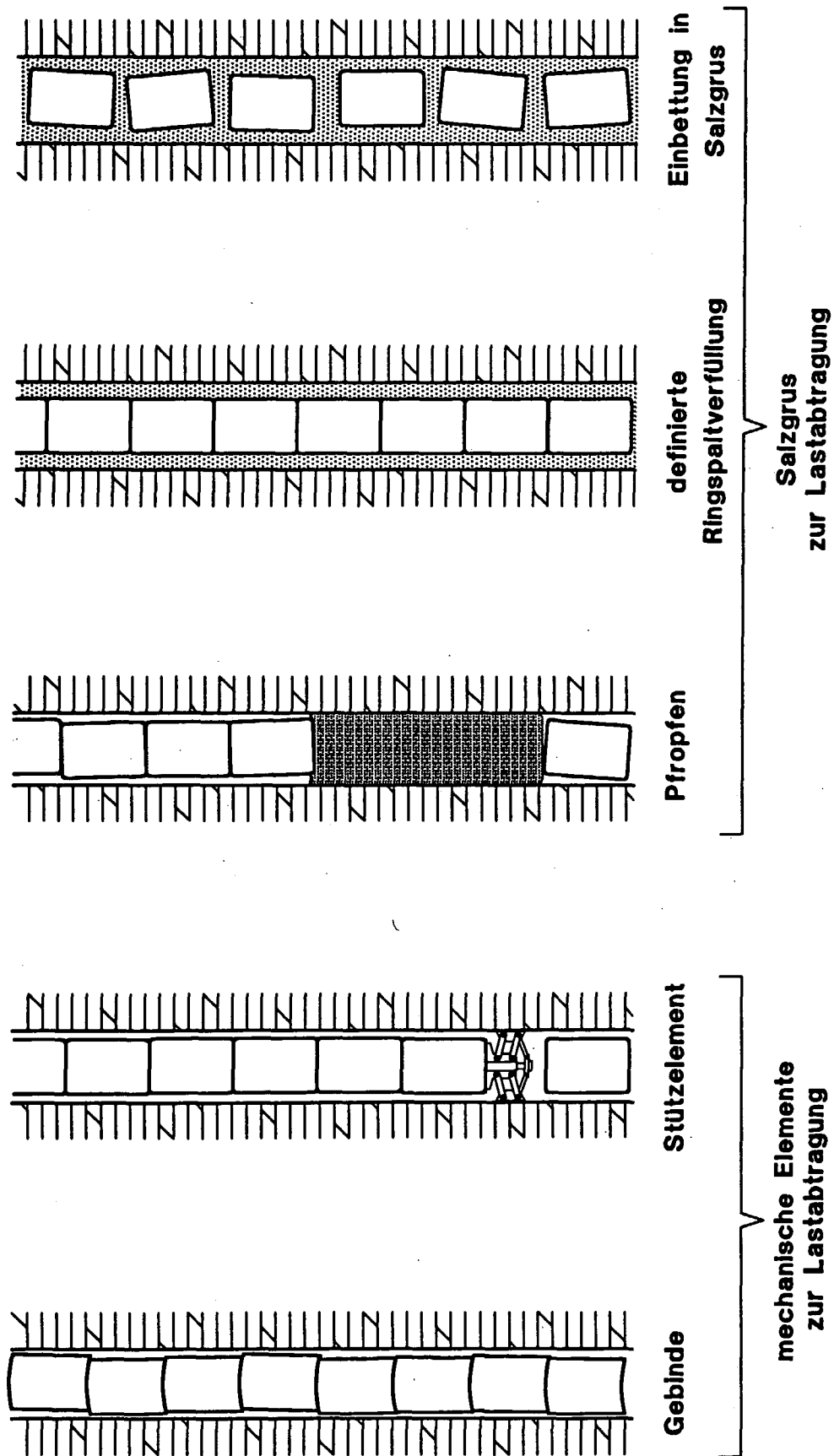


Abb. 26: Grundvarianten für die Einlagerung von Abfallgebänden in tiefen Bohrlöchern

Tab. 6: Bewertung der Einlagerungsvarianten. Bewertungsziffern von 1 (beste) bis 5 (schlechteste)

| Kriterienfelder und Einzelkriterien | WICHTIGS FAKT. | EINLAGERUNGSVARIANTEN | | | | | 6) Salzgrus als Aerosolfil- ter |
|--|----------------|--------------------------|-----------------------------------|--|--|---------------------------------|---------------------------------------|
| | | 1) selbsttra- pack | 2) mech.- Stütz- element | 3) Salzgrus- pfropfen u. Dichtelement | 4) definierte Ringspalt- verfüllung | 5) Einbettung in Salzgrus | |
| - Flexibilität des Einlagerungsbetr. | 1 | 2 | 2,5 | 4,5 | 2,5 | 1,5 | 2 |
| ◦ Einlagerung unterschiedl. Gebinde | 1 | 3 | 4 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| ◦ Betriebsunterbrechung | 1 | 1 | 1 | 5 | 4 | 2 | 3 |
| - Betriebssicherheit | 2 | 3 | 3,3 | 4 | 2,5 | 2,5 | 2,8 |
| ◦ H ₂ -Problematik | 3 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| ◦ radioaktive Gase | 1 | 4 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| ◦ Störfallquellterm | 2 | 4 | 5 | 5 | 2 | 2 | 3 |
| - Langzeitsicherheit | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| ◦ Hohlräumvolumen | | | | | | | |
| - Bohrlochnutzung | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 3 |
| ◦ Bohrlochnutzungsgrad | | | | | | | |
| - Komplexität der Technik | 2 | 2,8 | 3,3 | 3 | 4,3 | 2,3 | 2,3 |
| ◦ Umpacken der Gebinde | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| ◦ Einlagerungsmaschine, Abschirmbeh. | 1 | 3 | 3 | 3 | 5 | 2 | 2 |
| ◦ Absenktechnik | 1 | 4 | 3 | 3 | 4 | 2 | 2 |
| ◦ Versatztchnik, Lastabtragelemente | 1 | 1 | 4 | 3 | 5 | 2 | 2 |
| - Genehmigungsrisiken/F+E-Aufwand | 2 | 2 | 2,5 | 3,5 | 2,5 | 3 | 3 |
| ◦ Nachweis Lastabtrag/Filterwirkung | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| ◦ Beherrschung H ₂ -Problem | 1 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| - Einlagerungskosten | 1 | 4,5 | 3,5 | 2,5 | 3,0 | 2,5 | 2,5 |
| ◦ verlorene Komponenten | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| ◦ Investitionen | 1 | 4 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 |
| Gesamtbewertung | | 3,00 | 3,18 | 3,25 | 2,92 | 2,71 | 2,72 |

6. Komponentenentwürfe

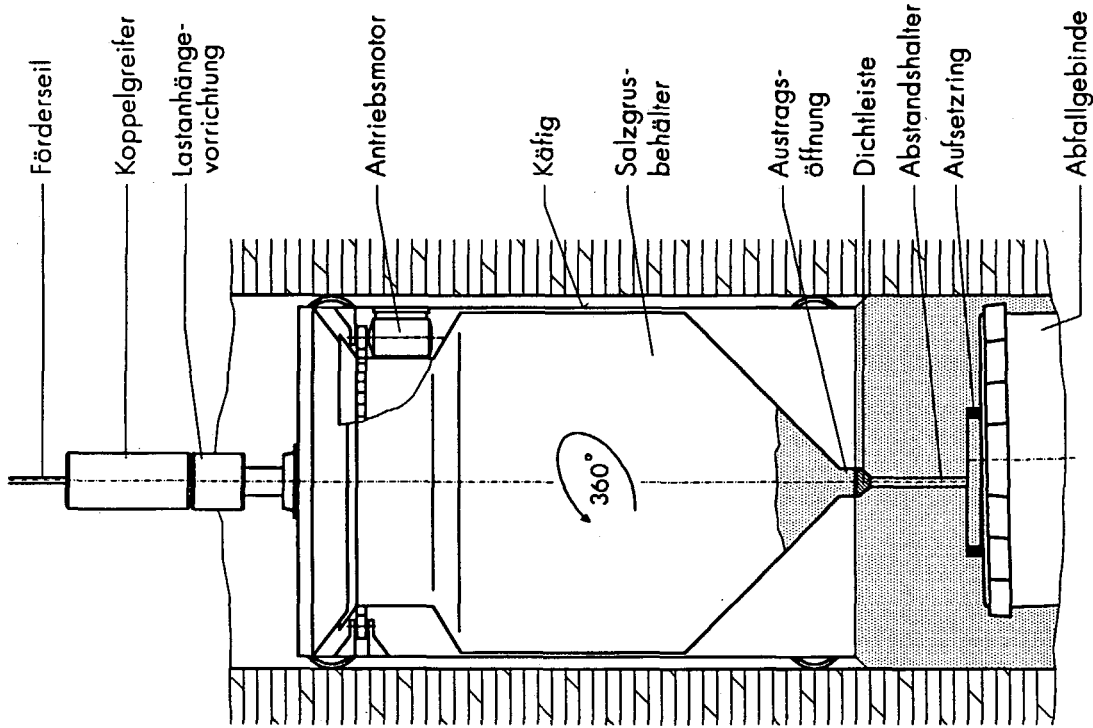
Die favorisierte Variante für die Endlagerung der MAW- und HTR-BE-Abfallgebinde nach der Bohrlochtechnik ist die Einbettung der Gebinde im Bohrloch in Salzgrus. Diese Einbettung erfolgt durch Verfüllen des Ringraumes zwischen dem im Bohrloch auf einer Salzgrusschicht (Überdeckung des zuletzt eingelagerten Gebindes) abgesetzten Abfallgebände und der Bohrlochwand mit gleichzeitiger Überdeckung des Gebindes. Die Verfüllung sollte möglichst homogen ohne größere Hohlräume erfolgen. Die Oberfläche der Salzgrusüberdeckung sollte möglichst glatt und waagrecht sein.

Die Ringraumverfüllung mit gleichzeitiger Überdeckung der Abfallgebinde ist mittels sog. Versatzbehälter geplant. Zwei verschiedene Entwürfe solcher Versatzbehälter werden nachfolgend gezeigt und beschrieben.

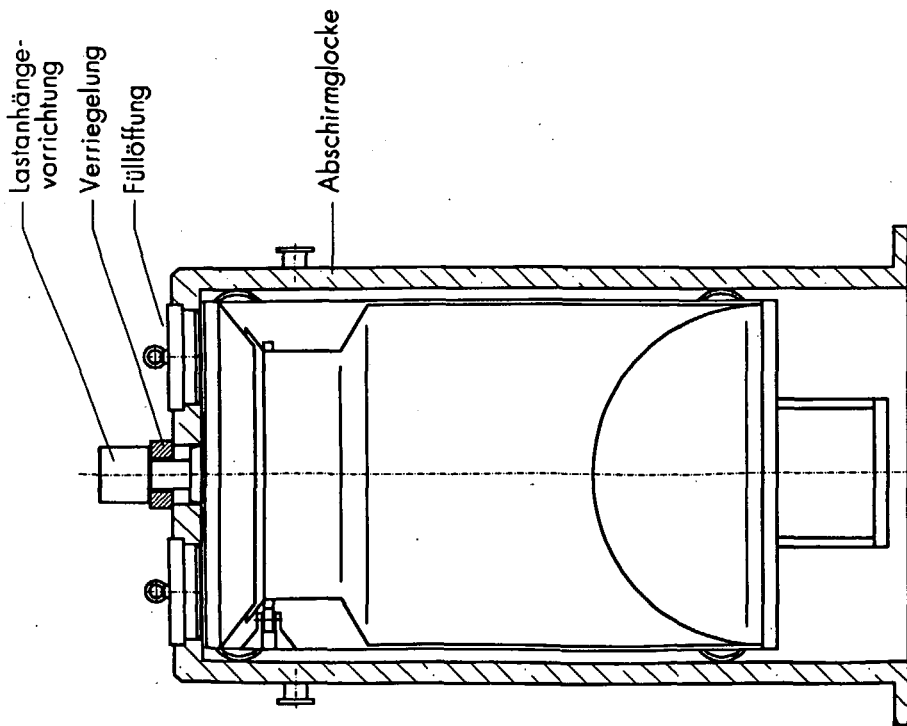
Versatzbehälter 1

Der Versatzbehälter 1 /33/ besteht aus einem Käfig, der einen um seine Längsachse drehbaren Salzgrusbehälter aufnimmt (Abb. 28). Käfig und Innenbehälter sind oben offen. Der Käfig besitzt keinen Boden. Der Salzgrusbehälter verjüngt sich in seinem unteren Teil zu einer Austragsöffnung, die den gesamten Behälterdurchmesser einnimmt (mehrere sternförmig angeordnete Öffnungen sind auch möglich). Die Austragsöffnung wird bei einer bestimmten Stellung des Salzgrusbehälters im Käfig durch eine Dichtleiste, die über den Durchmesser des Käfigs reicht, verschlossen. Am unteren Ende des Käfigs befindet sich ein Abstandshalter mit Aufsetzring. Die Länge des Abstandshalters entspricht der Höhe der geforderten Salzgrusüberdeckung.

Zur Vorbereitung des Verfüllvorganges wird der Salzgrusbehälter des in einer Abschirmglocke mittels einer Lastanhängevorrichtung aufgehängten Versatzbehälters durch verschließbare Öffnungen im Deckel der Abschirmglocke mit Salzgrus gefüllt (siehe hierzu Abb. 28 links). Der Salzgrusbehälter ist dabei so im Käfig positioniert, daß die Austragsöffnungen durch die Dichtleisten verschlossen sind. Das Volumen der Salzgrusfüllung ist größer als das im Bohrloch mit Salzgrus zu füllende freie Volumen.



Versatzbehälter während des Verfüllvorgangs



Versatzbehälter in der Abschirmglocke hängend

Abb. 28: Schematische Darstellung des Versatzbehälters 1

Für den Verfüllvorgang wird die Abschirmglocke mit in ihr hängendem Versatzbehälter auf den Bohrlochschieber, der das Einlagerbohrloch zur Strecke hin verschließt, aufgesetzt. Mittels eines Koppelgreifers, der am Förderseil der Einlagermaschine befestigt ist, wird die Lastanhängevorrichtung gegriffen, der Bohrlochschieber wird geöffnet und der Versatzbehälter kontrolliert in das Bohrloch hinabgelassen. Er wird soweit abgesenkt, bis der Aufsetzring des Abstandshalters auf dem vorher im Bohrloch abgesetzten Gebinde aufsetzt.

Durch Drehen des Salzgrusbehälters um seine Längsachse (mittels mitgeführtem Motor) wird die Austragsöffnung des Behälters frei und der Salzgrus rieselt in den Ringspalt zwischen Gebindemantel und Bohrlochwand und in das freie Volumen zwischen Gebindedekkel und Austragsöffnung. Durch eine Drehung des Salzgrusbehälters um 360° wird der gesamte Raum unterhalb des Behälters gleichmäßig gefüllt. Nach der Drehung ist die Austragsöffnung durch die Dichtleiste wieder verschlossen. Der überschüssige Salzgrus verbleibt im Behälter.

Der Behälter wird in die Abschirmglocke zurückgezogen und dort wieder aufgehängt. Der Bohrlochschieber kann geschlossen und die Glocke mit Versatzbehälter entfernt werden. Ein weiteres Gebinde kann abgesenkt und auf der Salzgrusüberdeckung abgesetzt werden.

Alternativen zu dem in Abbildung 28 gezeigten Abstandshalter zur Festlegung der Höhe der überdeckenden Salzgrusschicht bzw. zur Positionierung des Versatzbehälters gegenüber dem zu überfüllenden Gebinde im Bohrloch sind:

- Absenken des Versatzbehälters, bis er mit dem Boden auf das im Bohrloch abgesetzte Gebinde aufsetzt und anschließendes Anheben des Behälters um den Betrag der Höhe der einzubringenden Salzgrusüberdeckung,
- Einsatz einer rechnerunterstützten Teufensteuerung.

Der Einsatz dieser Alternativen ergibt eine Reduzierung der Bauhöhe der Abschirmglocke um die Länge des Abstandshalters. Allerdings muß dann der Käfig des Behälters beim Verfüllvorgang, z. B. durch Kraftschluß des Käfigs mit der Bohrlochwand, gegen ein Drehen entgegen der Drehrichtung des Salzgrusbehälters gesichert werden. Das kann durch spreizbare Kufen erfolgen.

Versatzbehälter 2

Die Hauptkomponenten des Versatzbehälters 2 /34/ sind der Behältermantel, der Behälterboden mit den konzentrisch angeordneten Austragsöffnungen, die im Schutzrohr axial bewegliche Hubstange mit der Lastanhängevorrichtung am Kopf und die an ihrem unteren Ende befestigten konzentrisch angeordneten Dichtleisten sowie der Abstandshalter mit Aufsetzring (Abb. 29).

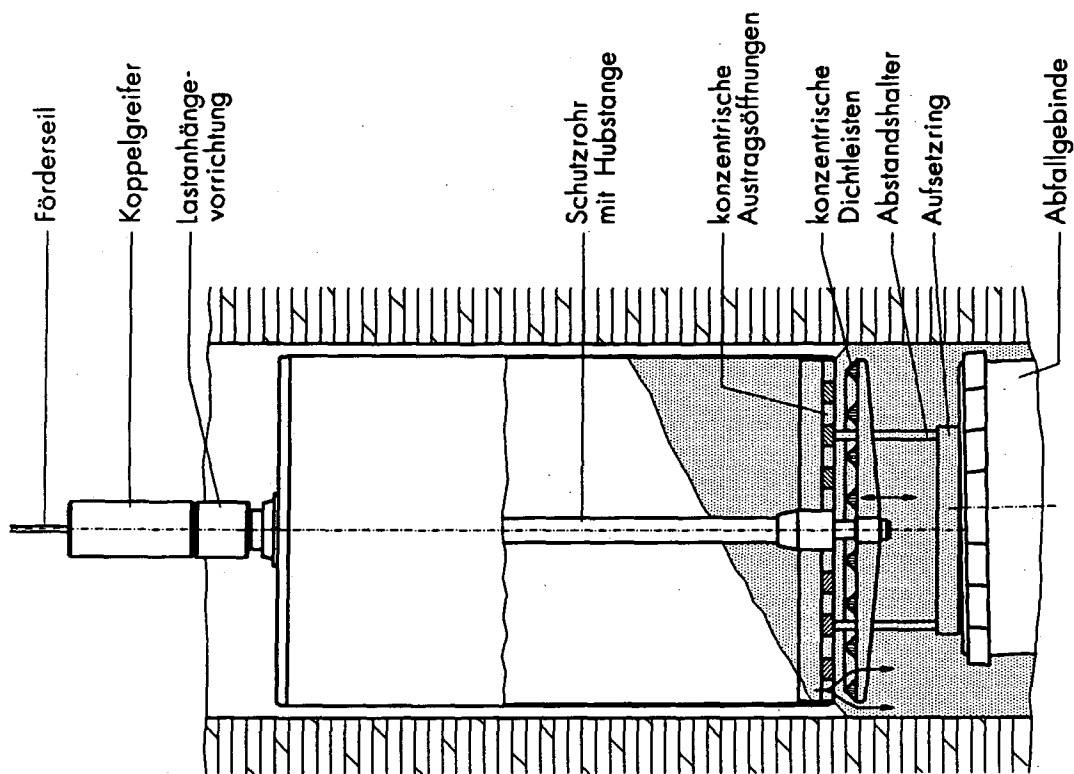
In hängender Position des Behälters sind die Austragsöffnungen im Behälterboden durch die konzentrisch angeordneten Dichtleisten verschlossen. Das Gewicht von Behältermantel, Inhalt und Behälterboden wird über die Dichtleisten und deren Tragkonstruktion in die axial verschiebbare Hubstange eingeleitet.

Der Versatzbehälter wird in der Abschirmglocke hängend mit Salzgrus gefüllt und aus der auf dem Bohrlochschieber positionierten Glocke kontrolliert in das Bohrloch hinabgelassen.

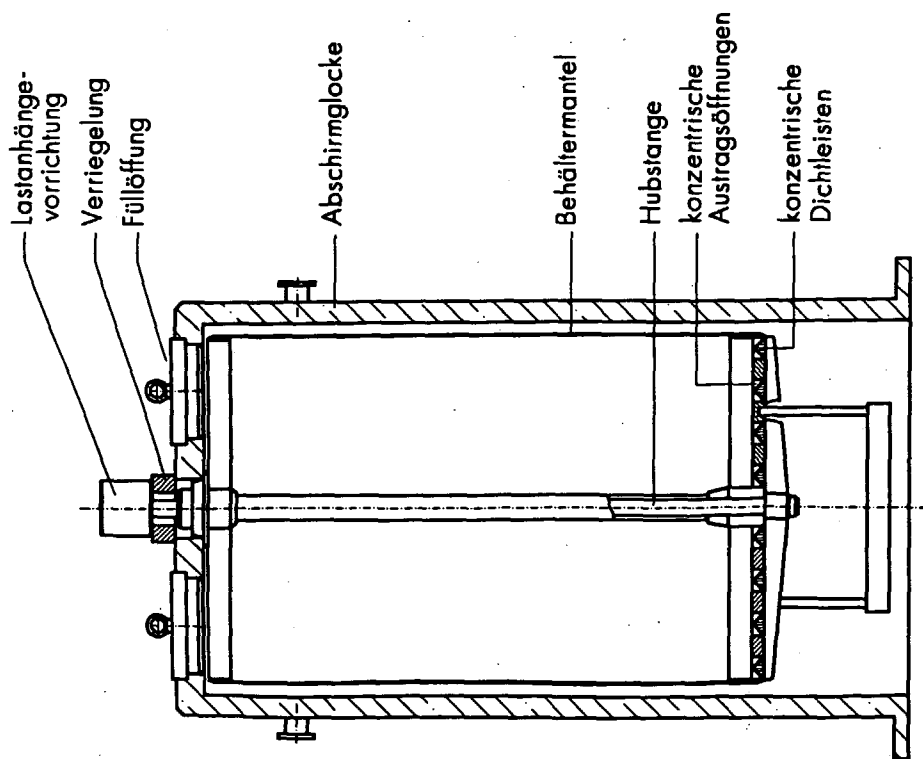
Beim Aufsetzen des Abstandshalters auf dem im Bohrloch abgesetzten Abfallgebände bleibt der Behälter stehen, während sich bei weiterem Nachlassen des Förderseiles die Hubstange und damit die Dichtleisten durch Schwerkraft weiter absenken. Hierdurch werden die Austragsöffnungen im Behälterboden freigegeben und der Salzgrus rieselt in den Ringraum zwischen Behälter und Bohrlochwand und in das freie Volumen zwischen Gebändedeckel und Behälterboden.

Beim Einholen des Förderseiles wird zuerst die Hubstange mit den Dichtleisten angehoben, bis die Dichtleisten die Austragsöffnungen wieder verschließen. Dann wird der gesamte Versatzbehälter angehoben. Der überschüssige Salzgrus verbleibt im Behälter.

Der Behälter wird in die Abschirmglocke zurückgezogen und dort wieder aufgehängt.



Versatzbehälter während des Vüllvorgangs



Versatzbehälter in der Abschirmglocke hängend

Abb. 29: Schematische Darstellung des Versatzbehälters 2

7. Bohrlochverschluß

Nach der Einlagerung der Abfallgebinde werden die Bohrlöcher zur Strecke hin verschlossen. In der Betriebsphase dient dieser Bohrlochverschluß der Strahlenabschirmung, der Gasrückhaltung sowie der Aufnahme des Gasdrucks aus dem Bohrloch. In der Nachbetriebsphase kommt als weitere Aufgabe die Rückhaltung von Lauge hinzu. Im Rahmen der MHV-Projektarbeiten wird die Entwicklung des Bohrlochverschlusses koordiniert.

Das Institut für Tief Lagerung der GSF hat im April 1991 den ersten Entwurf eines "Strategiepapier(s) Bohrlochverschlüsse" vorgelegt, in dem die F+E-Arbeiten zur Entwicklung und zum Test eines MAW-Bohrlochverschlusses aufgezeigt werden. Das Strategiepapier wurde im Fachausschuß Bohrlochverschlüsse diskutiert und Anfang 1992 von der GSF als überarbeiteter zweiter Entwurf vorgelegt. Im weiteren Verlauf konnte keine Einigung über den Inhalt dieses Entwurfs erzielt werden.

Mit Beendigung des Projekts MHV wurde die Koordinierung der F+E-Arbeiten zum MAW-Bohrlochverschluß auf den Projektträger für Entsorgung (PTE) des BMFT übertragen.

8. Literaturverzeichnis

- /1/ Bundesminister des Innern
Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk.
GMBL 13 (1983)**
- /2/ GSF
Salzbergwerk Asse-Forschung für die Endlagerung.
GSF-Bericht, Neuherberg (1989)**
- /3/ K. Dürr
Temperatur-Versuchsfeld 3-Versuchsbericht.
GSF, Neuherberg (1977)**
- /4/ T. Rothfuchs, P. Schwarzianeck, H.-K. Feddersen
Simulationsversuch im Älteren Steinsalz Na 2 Asse-Temperaturversuchsfeld 4.
CEC-Bericht EUR-9137 DE, Brüssel (1984)**
- /5/ T. Rothfuchs
Untersuchung der thermisch induzierten Wasserfreisetzung aus polyhalitischem
Steinsalz unter in situ-Bedingungen - Temperaturversuch 5 im Salzbergwerk Asse.
CEC-Bericht EUR-10392 DE, Brüssel (1986)**
- /6/ H.-K. Feddersen et al.
Results of Temperature Test 6 in the Asse Salt Mine.
CEC-Bericht EUR-10827 EN/I, Brüssel (1986)**
- /7/ T. Rothfuchs et al.
Brine Migration Test - Asse Salt Mine, Federal Republic of Germany: Final Report.
GSF-Bericht 6/88, Neuherberg (1988)**

- /8/ T. Rothfuchs et al.
The HAW-Project: Demonstration Facility for the Disposal of High Level Waste in Salt - Synthesis Report 1985 - 1989.
GSF-Bericht 14/90, Neuherberg (1990)
- /9/ D. Niephaus
Forschungsvorhaben MAW- und HTR-BE-Versuchseinlagerung in Bohrlöchern.
Rückholbarer Einlagerversuch (Teilprojekt REV) Abschlußbericht.
KFA Jülich Bericht Jül-2859 (1993)
- /10/ K. Kroth
Gasquellterme der MAW(Q)-Versuchsgebinde für den MAW- und HTR-BE-Einlagerversuch in der Asse.
KFA Jülich/Projekt MHV Bericht ICT-TB-4/89 (1989)
- /11/ K. Kroth, E. Barnert, P. H. Brücher, D. Niephaus
Formation of Hydrogen and Radioactive Gases in Waste Packages with Cemented Intermediate Level Waste.
Proc. Sympos. on Waste Management at Tucson, Arizona, February 25 - March 1, Vol. II (1990) 363 - 368
- /12/ K. Kroth, H. Lammertz
Versuche zur Radiolysegasbildung in homogen zementiertem Feedklärschlamm.
Proc. Jahrestagung Kerntechnik '90 (1990) 277 - 280
- /13/ K. Kroth, H. Lammertz
Radiolytische Bildung von Wasserstoff in Proben von homogen zementiertem Feedklärschlamm.
KFA Jülich Bericht Jül-2401 (1990)
- /14/ BNFL
Intermediate Level Residues Specification.
British Nuclear Fuels plc, Risley, March 1990

- /15/ **COGEMA**
Specifications des déchets cimentés produit par les usines UP2 800 et UP3 de la Hague.
Compagnie Générale des Matières Nucléaire, Paris, Mars 1990
- /16/ **H. Mosler, K. Ritter**
Charakteristik von Steinsalz.
KFA Jülich/Projekt MHV Bericht ICT-TB-7/91 (1991)
- /17/ **G. Morlock**
Numerisches Rechenprogramm zur Berechnung des Konzentrationsverlaufs von Wasserstoffgas und dessen zeitlicher Veränderung in vertikalen Bohrlöchern zur Einlagerung von MAW-Abfällen und HTR-Brennelementen in Steinsalz.
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
Bericht GRS-A-1653, Köln (1990)
- /18/ **G. Morlock**
Anwendung des PHOENICS-Codes zur Beschreibung der Gasausbreitung in vertikalen Bohrlöchern - Zwischenbericht -
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
Bericht GRS-A-1773, Köln (1991)
- /19/ **G. Morlock**
Anwendung des PHOENICS-Codes zur Beschreibung der Gasausbreitung in vertikalen Bohrlöchern.
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
Bericht GRS-A-1997, Köln (1992)
- /20/ **J. J. Comor, K. Kroth**
Technical Proposal to Consume Hydrogen During its Production in a Final Repository.
KFA Jülich/Projekt MHV Bericht ICT-TB-4/91 (1991)

- /21/ J. J. Comor
Cold Oxidation of Hydrogen in a Final Repository.
KFA Jülich Bericht Jül-2632 (1992)
- /22/ G. Thiele
Charakteristik von Steinsalzgrus.
KFA Jülich/Projekt MHV Bericht ICT-TB-6/91 (1991)
- /23/ D. Höhne, U. Schünemann, U. Reuther, K. Weber
Schüttgutmechanische Eigenschaften von Salzgrus.
KFA Jülich/Projekt MHV Bericht ICT-TB-7/92 (1992)
- /24/ W. Förster, P. Wohrow
Triaxiale Untersuchungen an Salzgrusproben zur Bestimmung des Seitendruckbeiwertes.
KFA Jülich/Projekt MHV Bericht ICT-TB-2/92 (1992)
- /25/ F. R. Block, W. Feuser
Druckverteilung auf der Oberfläche von nach der Bohrlochtechnik eingelagerten und vollkommen in Salzgrus eingebetteten Abfallgebänden.
KFA Jülich Bericht Jül-2481 (1991)
- /26/ K. Kroth, H. Lammertz
Orientierende Versuche zur Abtragung von Stapelkräften durch Salzgrusversatz.
KFA Jülich/Projekt MHV Bericht ICT-TB-05/92 (1992)
- /27/ E. Barnert, F. Suttrop
Verfahren zum Einlagern eines Abfallgebändes in einem Bohrloch innerhalb einer geologischen Salzformation.
Deutsches Patent Nr. P 40 00 383.3-44, erteilt am 14.08.1991
- /28/ S. Deckardt, J. Töpfer, F. Suttrop
Flammendurchschlag-Sicherheit von Salzgrusschüttungen.
KFA Jülich Bericht Jül-Spez-573 (1990)

- /29/ S. Deckardt, J. Töpfer, F. Suttrop**
Flammendurchschlag-Sicherheit von Salzgrusschüttungen
- Ergänzende Untersuchungen -
KFA Jülich Bericht Jül-2491 (1991)
- /30/ A. Nüsser, A. G. Knaup**
Sicherheitstechnischer Vergleich von Einlagervarianten und Berechnung des Druck-
aufbaus im Bohrloch.
KFA Jülich/Projekt MHV Bericht ICT-TB-3/91 (1991)
- /31/ D. Niephaus, E. Barnert, H. Brücher, K. Kroth**
Jahresbericht 1987.
KFA Jülich/Projekt MHV Bericht ICT-TB-1/88 (1988)
- /32/ E. Barnert, H. Loser**
Verfahren zum Einlagern von Abfallgebinden für radioaktiven Abfall in vertikalen
Bohrlöchern einer geologischen Salzformation.
Deutsches Patent Nr. P 3924 625.6-33, erteilt am 4. 10. 1990
- /33/ E. Barnert**
Vorrichtung zum Einbetten eines in ein Bohrloch abgesenkten Abfallgebundes
durch Überschütten mit Schüttgut.
Deutsches Patent Nr. P 42 16 353.6-44 erteilt am 04. 02. 1993
- /34/ E. Barnert, H. Wetzler**
Vorrichtung zur Einbettung von in tiefen Bohrlöchern in einem Salzstock einzula-
gernden radioaktiven Abfallgebinden in Salzgrus.
Deutsche Patentanmeldung Nr. P 43 07 212.7 vom 8. 3. 1993