

KFK-205

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

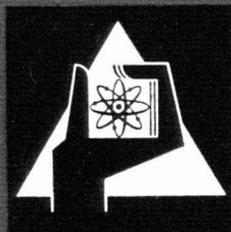
März 1964

KFK 205

Schriftumsübersicht über Endlagerung radioaktiver
Abfallstoffe in Salzformationen

H. Ramdohr

*Geellschaft für Kernforschung m. B. H.
Karlsruhe
3. 1964*



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt.

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor.

Gesellschaft für Kernforschung m. b. H.

Karlsruhe

702

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

März 1964

KFK 205

Schrifttumsübersicht über Endlagerung radioaktiver
Abfallstoffe in Salzformationen

H. Ramdohr

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H.
Zentralbücherei

3 Juni 1964

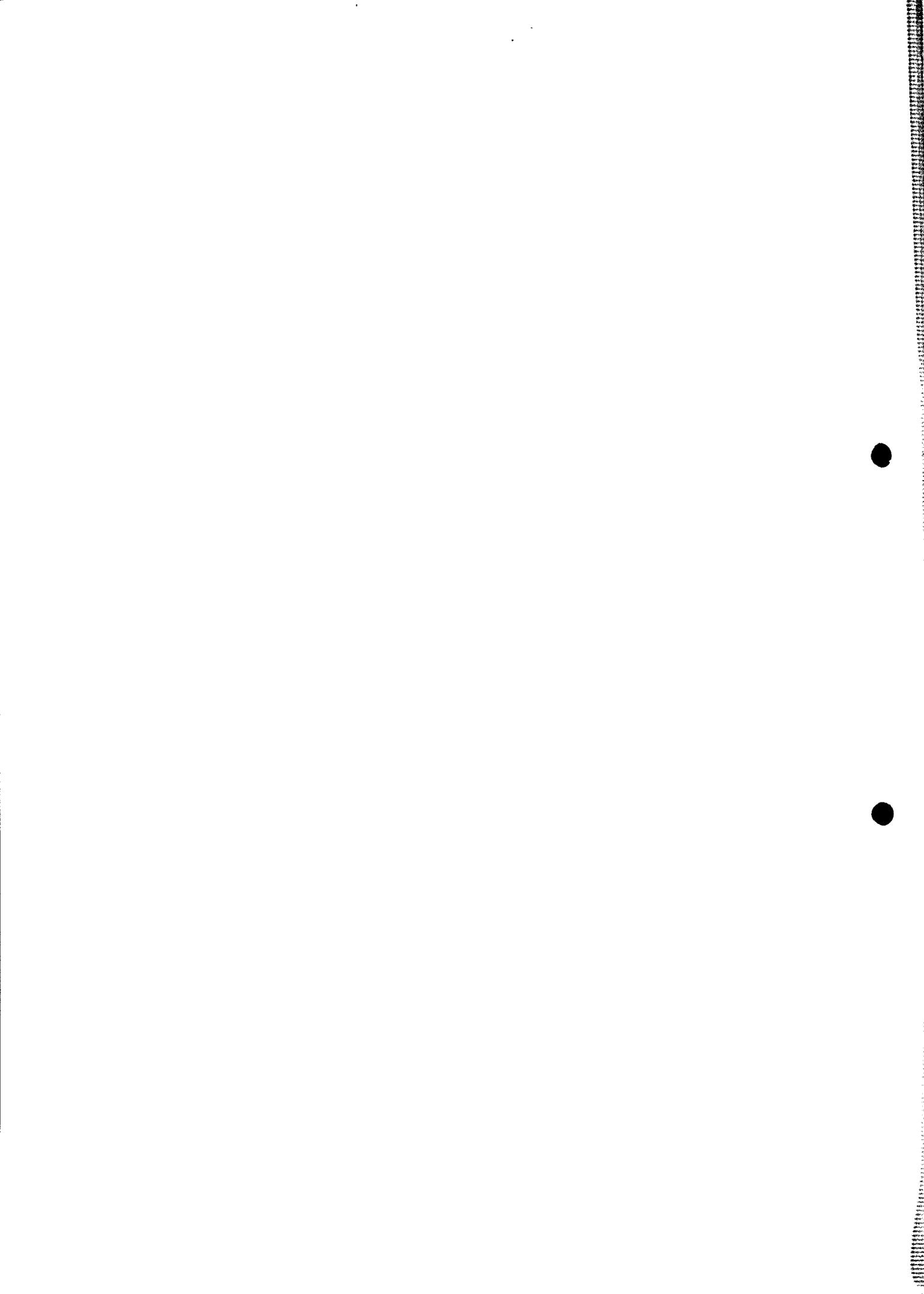
GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M.B.H. KARLSRUHE

Büroexemplar

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe

Nr.

2



<u>G l i e d e r u n g</u>		Seite
1.	Einführung	2
2.	Physikalische Eigenschaften von Salz und Salzgestein	3
2.1	Reines Steinsalz	3
2.2	Salzgestein	4
3.	Art und Vorkommen von Salzgesteinen	9
4.	Möglichkeiten der Lagerung in Salzgesteinen	10
4.1	Herstellung einer Kaverne	11
4.2	Einrichtung eines Bergwerkes	12
5.	Praktische Versuche zur Lagerung von Abfällen in Salz	13
6.	Ökonomische Untersuchungen über Kosten der Endlagerung	18
7.	Zusammenfassung	19
8.	Schlußfolgerung	20
8.1	Ort der Herstellung eines Endlagers	20
8.2	Anlage einer Kaverne	21
8.3	Bergwerk als Endlager	23
9.	Schrifttum	26
10.	Anhang	42

1. Einführung

Die Unterbringung radioaktiver Abfälle läßt sich nach der augenblicklichen Praxis in 6 Gruppen einteilen:

1. Ableitung in Oberflächengewässer und in die Atmosphäre
2. Vergraben und Versickern im Boden
3. Versenkung ins Meer
4. Aufbewahrung in Behältern
5. Einbringen in tiefere geologische Formationen
6. Lagerung im Polareis

Die vorliegende Arbeit fällt in die Gruppe 5, die nochmals in 3 Untergruppen aufgeteilt werden kann:

- a) Lagerung in Salzformationen
- b) Einleiten in poröse Speichergesteine
- c) Einbringen in Festgestein

Ogleich in den USA bereits im September 1955 die Unterbringung in tiefere geologische Formationen als aussichtsreiches Verfahren erkannt worden war (42), (50), (81), hat diese Art der Unterbringung von Abfällen noch keine praktische und großtechnische Anwendung gefunden. Es gibt bisher lediglich eine Anzahl von theoretischen Überlegungen und praktischen Versuchsarbeiten, von denen diejenigen zur Unterbringung in Salzformationen am weitesten fortgeschritten sind.

Es wird im folgenden ausschließlich diese Art der Endlagerung in Salzgesteinen des tieferen geologischen Untergrundes behandelt.

2. Physikalische Eigenschaften von Salz und Salzgestein

2.1 Reines Steinsalz

Reines Steinsalz (NaCl) ist weiß und kristallisiert kubisch (Gitterkonstante 5,628 Å). Es hat eine ausgeprägte Spaltbarkeit nach 100 (Flächen des Würfels). Folgende Tabelle zeigt einige Eigenschaften des Salzes:

T A B E L L E 1

Eigenschaften von Steinsalz

Dichte	2.165 g/cm ³
Schmelzpunkt	801°C
Siedepunkt	1413°C
Löslichkeit in Wasser	35.7 g/100 ml bei 0°C 39.12 g/100 ml bei 100°C (43)
Wärmeleitfähigkeit	0,0146 cal/cm·sec °C bei 0°C 0,0105 " " " 100°C (5), (17)
Spez. Wärme	0,44 cal/°C·cm ³ bei 0°C 0,45 " " " 100°C
Wärmeausdehnungskoeffizient	1,01 · 10 ⁻⁵ /°C bei 20°C

2.2

Salzgestein

Salzgesteine sind durch Verdampfung von abgeschlossenen Meeresteilen entstanden. Je nach dem jeweiligen Feststoffgehalt und der Salzkonzentration während des Eindampfens im Becken erhält das entstehende Sediment neben dem Steinsalz wechselnde Anteile von Verunreinigungen an Ton, Anhydrit oder anderen Salzen. Vielerorts ist es darüber hinaus zur Ablagerung von Kalisalzen gekommen. Diese sollten wegen ihres volkswirtschaftlichen Wertes möglichst nicht zur Einlagerung von radioaktiven Abfällen herangezogen werden (82). Lagerstätten von Steinsalz gibt es dagegen in so reichem Maße, daß eine Beeinträchtigung der Salzversorgung auch in ferner Zukunft durch die Benutzung der Salzgesteine als Lager für radioaktive Abfälle nicht gegeben ist. In den USA betragen die Salzvorräte 1943 $6 \cdot 10^{10}$ t. Das Volumen der Salzstöcke in Louisiana und Texas bis zu einer Teufe von 1650 m allein reicht aus, um den Salzbedarf der Erde unter Zugrundelegung des jetzigen Verbrauchs für mehr als 6000 Jahre zu decken (52, 53, 54).

In vielen Fällen sind die ursprünglichen horizontalen Ablagerungen durch den Druck der spezifisch schwereren überliegenden Schichten an Schwächezonen oder Störungen nach oben ausgewandert und bilden die sog. Salzstöcke oder Diapire. Derartige Gebilde gibt es an vielen Orten der Erde. Besonders häufig sind die Salzstöcke in Norddeutschland und, wie erwähnt, im Gebiet der Golfküste in den USA (53, 54). Ihr Vorhandensein deutet auf eine hervorstechende Eigenschaft der Salzgesteine hin, auf ihre Plastizität.

Im Gegensatz zu der ungestörten sedimentären Ablagerung des Salzes, die sich infolge der Einlagerung von Verunreinigungen oder mikroskopisch feinen Fe_2O_3 -Schüppchen in Form einer gleichmäßigen Bänderung zeigt, ist das Salzgestein in den Salzstöcken infolge der Aufpressung vielfach durchbewegt. Die Dichte von Salzgesteinen bewegt sich im allgemeinen von $2,14 - 2,26 \text{ g/cm}^3$ (28).

Die Würfeldruckfestigkeit von Salzgestein schwankt zwischen etwa 65 kg/cm^2 für Carnallit (Kalisalz) bis zu etwa 400 kg/cm^2 für Hartsalz (29). Im Steinsalz kann mit etwa 350 kg/cm^2 gerechnet werden, das entspricht etwa der Festigkeit von Beton (53). Etwas geringere Druckfestigkeit des Salzes wird von Serata angegeben, 3600 psi entsprechen etwa 270 kg/cm^2 (76). Unter Druckbelastung verformt es sich, wobei die Verformungsgeschwindigkeit mit steigender Temperatur zunimmt (17, 31). Um einen untertägigen Hohlraum in Salzgesteinen bildet sich ein Spannungszustand aus (77, 78), der in Abb. 1 für einen zylinderförmigen Hohlraum dargestellt ist (34). Die Belastung ist durch den Belastungsfaktor ausgedrückt. Dieser durch die den Quotient aus der tatsächlichen Belastung am Ort der Messung und der errechneten Belastung durch das überliegende Gebirge gebildet wird. Man sieht, daß die auftretenden Belastungen in der Zylinderwandung am höchsten sind und sich mit zunehmendem Abstand dem Belastungsfaktor 1 nähern (das Minuszeichen deutet Druckbelastung an). Die Verformung, die sich aus diesem Belastungszustand ergibt, ist kurz nach der Herstellung eines Hohlraumes am höchsten und nimmt dann langsam ab (17), (30), (31), (69), so daß

Grubenräume theoretisch unendlich lange offen stehen bleiben können (18). An Abbauräumen und Strecken wurden Verformungsgeschwindigkeiten gemessen, wie sie in Tab. 2 eingetragen sind.

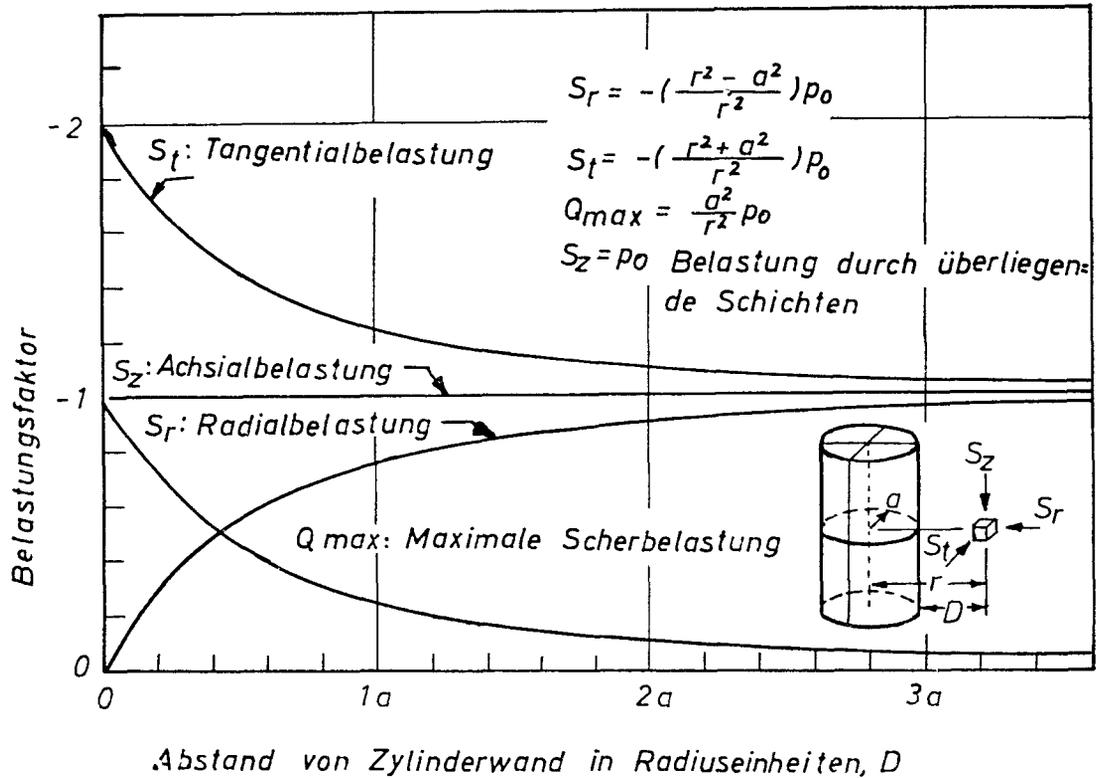


Abb.1 Belastungsverteilung um zylindrischen Hohlraum

T A B E L L E 2

Verformungsgeschwindigkeiten von Salzgestein (69)

Meßpunkt	Verformung cm/cm . y . 10 ⁻⁴	Ort der Messung
AV 1	9,9	linkes Drittel im Querschnitt 15.4 m
AV 2	9,5	rechtes " " " 15.4 m
AV 3	6,1	etwa 2 m vom Stoß im Querschnitt 15.4 m
AH 1	1,05	quer über 15 m von Stoß zu Stoß
BV 1	15,2	2 m vom Stoß im Querschnitt 15.4 m
BV 2	17,8	Mitte Querschnitt 15.4 m
BV 3	17,8	rechtes Drittel im Querschnitt 15.4 m
BV 4	16,2	2 m vom Stoß im Querschnitt 15.4 m
BH 5	4,2	quer über 15 m von Stoß zu Stoß

Diese Werte der Tabelle 2 sind in Grubenräumen mit einer mittleren Temperatur von 20° ermittelt. Bei Anstieg der Temperatur von 80° F auf 770° F (28° auf 334°C) steigt die Verformungsgeschwindigkeit um das 75fache (34). Derartige Verformungswerte sind neben der Temperatur von der Höhe der überliegenden Gesteinssäule (21) und der Öffnung des Grubenraumes abhängig.

Beim Anlegen von untertägigen Hohlräumen in Salzgesteinen ist kein Ausbau (Abstützung) erforderlich (77). Daher ist die Herstellung derartiger Räume wenig kostspielig. Zwischen den einzelnen Räumen müssen jedoch Pfeiler stehen bleiben, deren Grundfläche mit der Teufe zunimmt.

Bei Überschreiten der Druckfestigkeit der Pfeiler bilden sich schalenartige Ablösungen, zugleich ist ein Aufwölben der Sohle und der Firste zu bemerken (29).

Für bergmännisches Herstellen von Hohlräumen werden Kosten von 2 \$ für die Tonne Salz genannt (66), für das Aussohlen durch Bohrlöcher (74) 1,05 \$ je barrel, entsprechend 17,20 DM / m³ bzw. 26,20 DM / m³. Diese Kosten sind niedriger als die der Hohlraumherstellung in Festgestein (63). Der Verkaufspreis des Salzes beträgt rd. 3 \$ / t ab Grube (53).

Da Salz in Wasser sehr stark löslich ist (vgl. Abschnitt 2.1), können Hohlräume auch durch einfaches Ausspülen, sog. Solen erzeugt werden (20). Einzelheiten dazu werden in Abschnitt 4 mitgeteilt. Diese Technik ist in der Erdölindustrie zur Anlage unterirdischer Gasspeicher seit einer Reihe von Jahren in Gebrauch.

Die Permeabilität von Salzgestein ist in Laborversuchen unter Drucken entsprechend dem an der Entnahmestelle herrschenden Gebirgsdruck zu $0 - 1,5 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$ für Proben aus Salzstöcken und zu $0 - 2,3 \cdot 10^{-13} \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$ für Proben aus flach gelagertem Salz ermittelt worden. Die verwendeten Proben waren vorher aus dem Gebirgsverband herausgelöst worden. Dadurch entwickeln sich Sprünge, auf denen ein Durchdringen von Lösungen möglich wird. Die Permeabilitäten in Situ sind offensichtlich wesentlich geringer (35), (69).

Die Porosität von Salzgestein ist niedrig. Sie liegt in der Größenordnung von 1%. Reynolds (69) gibt 1,71% für Grand Saline Salt und 0,59% für Hutchinson Salt an.

Dreyer findet Werte von 0,5 - 1,1% (28).

Die Wärmeleitfähigkeit des Salzes ist höher als die der meisten Gesteine (53), etwa 2,8 mal so gut wie die eines Mittelwertes für die Gesteine der Erdkruste, so daß eine gute Ableitung der Wärme von hochaktiven Abfällen gegeben ist.

3. Art und Vorkommen von Salzgesteinen

Salzformationen sind weltweit verbreitet. Sie finden sich beispielsweise in Nordamerika, Columbia, Deutschland, Rumänien, Frankreich, Polen, Spanien, Persien, Arabien, Palästina, Rußland, Marokko, Tunesien, Algerien (34). Die Verhältnisse in den Vereinigten Staaten sind vom Geological Survey untersucht worden (64). Dabei sind auch die Gesichtspunkte für Standortwahl eines Endlagers in Salzformationen aus geologischer Sicht aufgezeigt (49), (59), (79). Unter den sechs genannten europäischen Ländern nimmt Deutschland in der Produktion von Kali- und Steinsalz einen bedeutenden Platz ein.

Abb. 2 zeigt die Verbreitung von Salzgesteinen in der Bundesrepublik Deutschland. Man kann in dieser Abbildung ein Hauptverbreitungsgebiet im Norden und 3 einzelne Verbreitungsgebiete im Süden erkennen. Es sind dies die Zechsteinsalze des Werragebietes, die Kali führen und vielerorts abgebaut werden, die Salze des Mittleren Muschelkalkes, in denen z. B. im Raume Heilbronn Salzbergbau umgeht und die Tertiärsalze des Oberrheintalgrabens. Diese werden auf der elsässer und auf der badischen Seite auf Kalisalze abgebaut. Nach Norden hin bis in den Raum südlich Karlsruhe sind sie in der Hauptsache steinsalzführend.

Im Norden der Bundesrepublik finden sich neben den mehr oder weniger horizontal gelagerten Salzvorkommen im Zechstein, Buntsandstein und Jura etwa 200 emporgepreßte Salzstöcke. Diese sind für eine Endlagerung radioaktiver Abfälle besonders geeignet, da die Salz Mächtigkeiten in horizontaler und vertikaler Richtung von mehreren Kilometern aufweisen können. Die Salzstöcke reichen oft bis 100 m unter die Erdoberfläche empor, während die salzführenden Schichten, aus denen das Salz ursprünglich stammt, zum Teil erst einige 1000 m tief anzutreffen sind. Das Salz in den Salzstöcken ist je nach seiner Herkunft reines NaCl, mehr oder weniger mit Ton oder Anhydrit durchsetzt und führt teilweise Kalisalze.

4. Möglichkeit der Lagerung in Salzgesteinen

Das geologische Vorkommen des Salzes kann nach dem vorher Gesagten in 2 Gruppen eingeteilt werden (64), nämlich in horizontal abgelagertes Salz (bedded salt) und in emporgedrücktes Salz (dome salt). In beiden Vorkommensformen können radioaktive Abfälle gelagert werden. Man hat grundsätzlich 2 Möglichkeiten vorgeschlagen und in Labor- und Großversuchen untersucht:

1. Herstellung einer Kaverne (20), (45), (51), (52) (79), (80)
2. Einrichtung eines Bergwerks für Endlagerungszwecke (41), (53), (54)

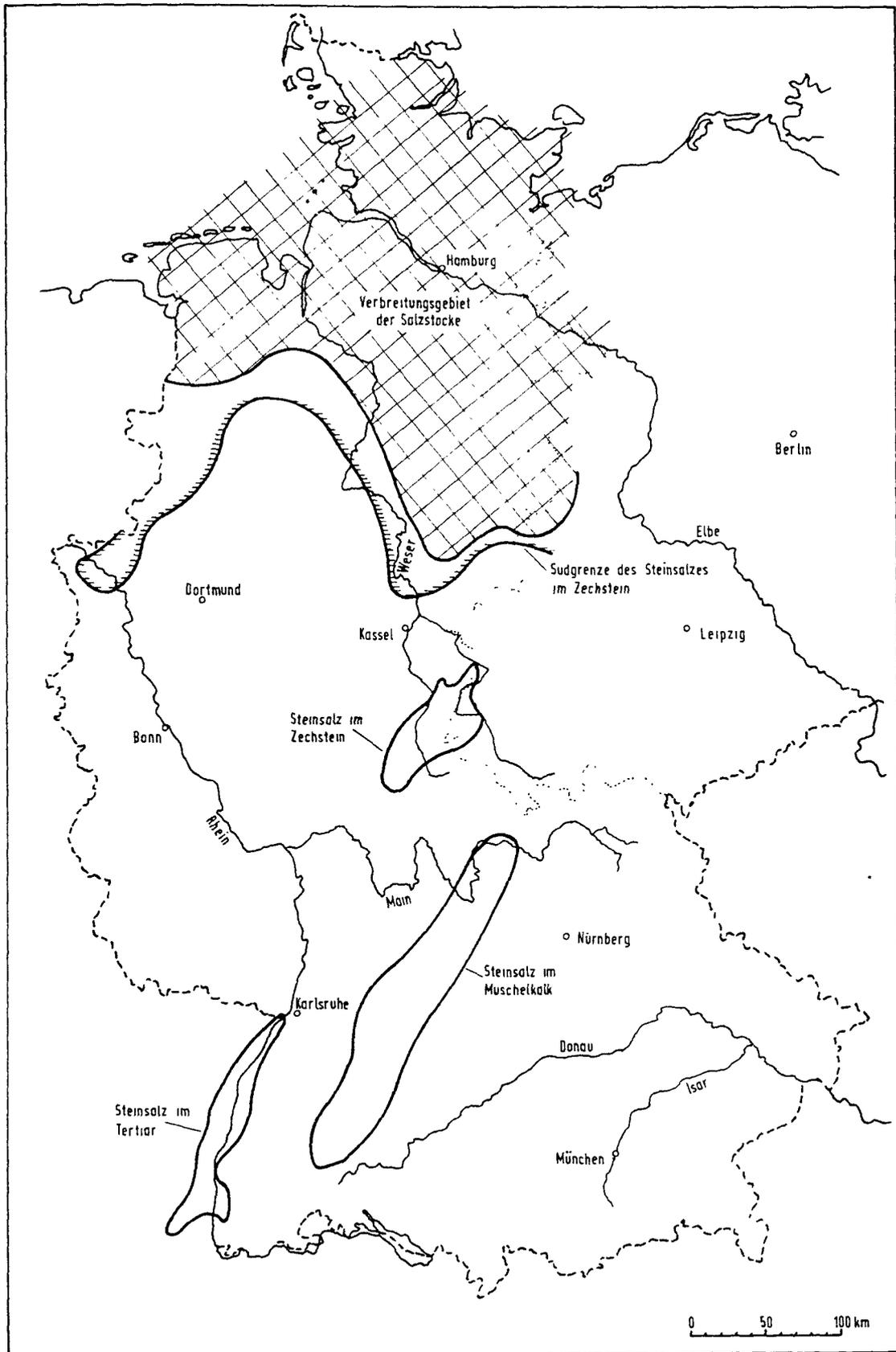


Abb.2: Salzvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland
 (Nach Unterlagen der Bundesanstalt für Bodenforschung)

Abb. 3

Süßwasser

Aussolen einer Kaverne

Kohlenwasserstoffe als Sperrflüssigkeit

Zement

Sole

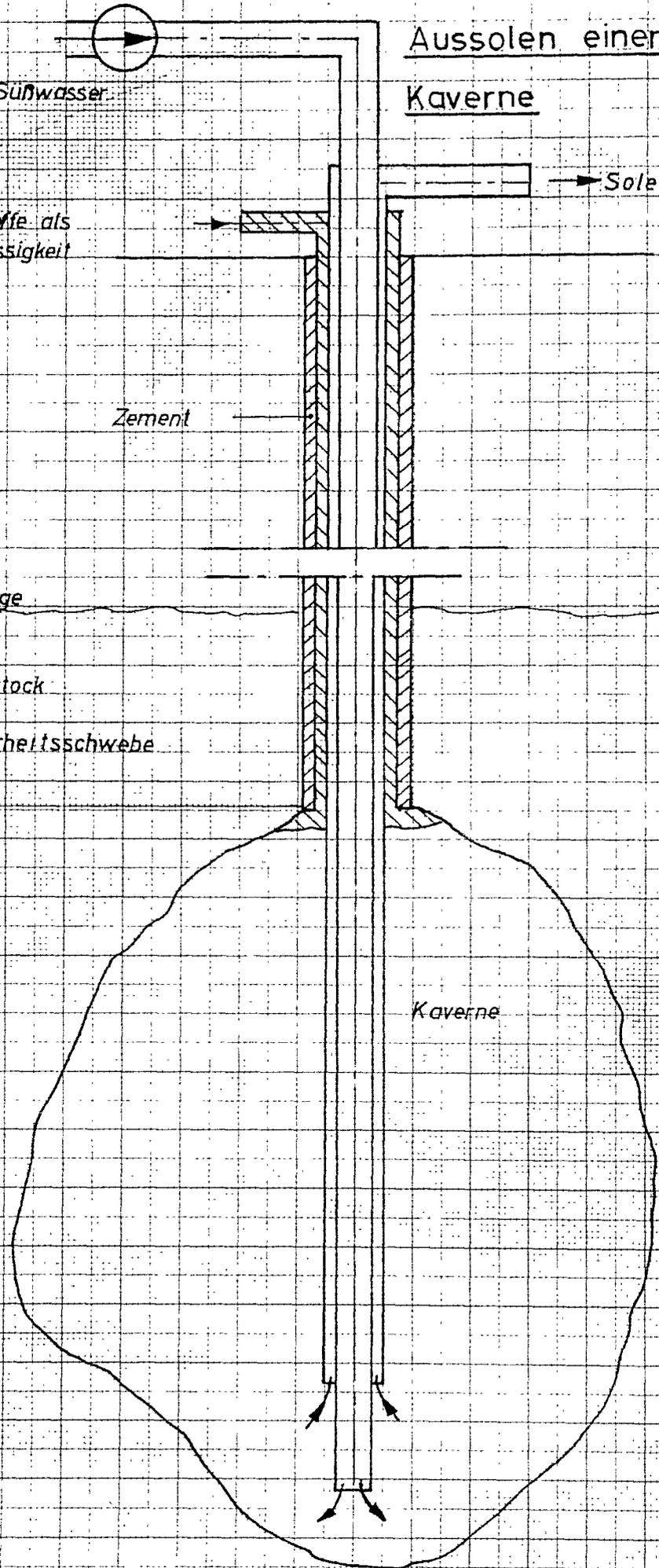
Deckgebirge

ca 100m

Salzstock

Sicherheitsschwebe

Kaverne



4.1 Herstellung einer Kaverne

Durch Tiefbohrung wird zunächst ein Bohrloch durch das Deckgebirge bis in das Salzgestein hinein niedergebracht (vgl. Abb. 3) Nach Verrohrung wird im Deckgebirge und ein Stück ins Salz hinein zementiert. In das Bohrloch wird eine erste Rohrtour zum Abführen der Sole eingebracht. Darin befindet sich eine zweite Rohrtour zum Zuführen von Süßwasser. In dem Ringraum zwischen der Bohrlochwand und der ersten Rohrtour werden leichte Kohlenwasserstoffe als Schutzflüssigkeit eingebracht, die als Kappe auf dem Solespiegel aufsitzen und ein Auslaugen der Kaverne nach oben verhindern. Das Salz wird durch Zupumpen von Süßwasser um das Bohrloch aufgelöst und fließt als Sole ab. Die Unterbringung dieser Sole kann auf 3 Arten erfolgen:

1. Ableitung in Vorfluter mit ausreichender Wasserführung oder ins Meer
2. Einpressen in poröse geologische Formationen
3. Ableitung in Salinen zur Salzgewinnung

Durch geeignete Wahl des Ortes des Süßwasseraustritts und des Soleablaufs in der Kaverne kann deren Form beeinflusst werden (20). Man kann kugelförmige, flaschenartige oder pilzförmige Hohlräume erzielen. Nach Beendigung des Solens werden die verbleibende Sole und die leichten Kohlenwasserstoffe aus der Kaverne gepumpt.

Die amerikanischen Überlegungen gingen bisher dahin, flüssige hochaktive Abfälle direkt in die ausgesolten Hohlräume einzubringen. Es wurden daher nur kleine Kavernen von etwa 6 m Durchmesser vorgeschlagen, damit die Wärmeprobleme beherrscht werden können (55). Eine

Permeabilitätsbetrachtung für eine Kaverne hatte ergeben, daß die Lagerung in Salz über Zeiträume von 6500 Jahren keinen Austritt von Radioaktivität in überliegende Schichten zur Folge hat (69).

In letzter Zeit wurden aber auf anderen Gebieten, wie später noch gezeigt wird, nachteilige Erfahrungen mit der direkten flüssigen Abfallagerung in Salzgestein gemacht, so daß sich die neueren Versuche fast ausschließlich auf die Lagerung verfestigter Abfälle beziehen (4).

4.2 Einrichtung eines Bergwerks

Versuche zur Abfallagerung wurden vornehmlich in Salzbergwerken durchgeführt. Man bediente sich entweder stillgelegter Gruben (41) oder abgebauter Teile noch in Betrieb befindlicher Schachtanlagen (31). Auch die Einrichtung eines neuen Bergwerks ausschließlich zur Endlagerung von Abfällen ist vorgeschlagen worden (53). Das Abteufen eines Schachtes und die Anlegung der unterirdischen Räume erfordert einen großen Kapitalaufwand. Für den Bereich der Bundesrepublik können die Kosten für die Erstellung eines solchen Bergwerks überschläglich auf 10 - 15 Mio DM geschätzt werden. Daher ist man für Versuche zunächst von vorhandenen Anlagen ausgegangen. Hierbei muß man den jeweiligen Zustand der Anlage berücksichtigen. Alte Bergwerke erfordern dauernde Überwachung und Instandhaltung, vor allem in der Schachtröhre. Durch die frühere Gewinnung von Salz kann es zu Bewegungen im Gebirge

kommen, die sich beispielsweise in Rissen oder Verschiebungen im Schacht zeigen. An diesen Stellen kann Wasser aus überliegenden wasserführenden Schichten eindringen und im Extremfall zum Vollaufen der Grube führen. Handelt es sich nur um kleinere Undichtigkeiten, dann kann man sich durch Zementieren der schadhafte Stellen vor größerem Schaden schützen.

Die Benutzung eines stillgelegten Bergwerkes als Endlager erfordert in jedem Fall eine genaue Prüfung der Gegebenheiten. Zu achten ist vor allem auf

1. Eignung der Lagerstätte als Einlagerungsmedium (z.B. Reinheit (47) und Ausdehnung des Salzes)
2. Standsicherheit des Grubengebäudes, Zustand und Größe der Strecken im Hinblick auf den Transport von Abfällen.

5: Praktische Versuche zur Lagerung von Abfällen in Salz

Die praktischen Untersuchungen sind von zwei Forschergruppen durchgeführt worden. Die erste Gruppe mit Boegly, Bradshaw, Parker, Struxness und anderen arbeitete am Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. Die zweite Gruppe mit Gloyna, Reynolds und Serata hatte ihren Sitz an der Universität von Texas in Austin, Texas. Die ersten praktischen Arbeiten in den Jahren 1958 - 1962 beschäftigen sich mit der direkten flüssigen Lagerung der Abfälle in Bassins, die untertage in vorhandenen Grubenräumen im Salz ausgehauen wurden. Nach Vorversuchen an kleinen Bassins in Salzblöcken (56) wurden zwei größere Typen hergestellt. Sie waren etwa je 2,5 m lang, breit und tief. Das erste Bassin enthielt 15,6 m³ simulirte

saure Purex-Abfälle (7-molare Salpetersäure) und das zweite die gleiche Menge neutralisierten Purexabfall. Zur Simulierung der Zerfallswärme diente elektrische Heizung. Mit diesen Versuchen in der Hutchinson-Mine in Kansas, die sich über 197 bzw. 392 Tage erstreckten (18), wurden die Einflüsse auf das plastische Verhalten des Gebirges um den Versuchsraum, auf die Gasentwicklung durch Zersetzung von Salz und auf Veränderungen der Hohlraumform untersucht. Es ergab sich:

1. die Wärmeleitfähigkeit des vorliegenden Salzgesteins war mit $0,011 \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ bei 60° mit geringer Abweichung gleich der Leitfähigkeit für Einkristalle.
2. die Temperaturerhöhung hatte keinen Einfluß auf die strukturelle Haltbarkeit der untertägigen Hohlräume, obwohl die Verformungsrate bei Erwärmung stark erhöht wird. Die Verformungsgeschwindigkeit steigt nach Einsetzen der Erwärmung zunächst stark an und geht dann nach etwa 250 Tagen in einen flacheren, stetigen Verlauf über. Nach Beendigung der Erwärmung geht die Verformung wieder etwas zurück und sie steigt dann etwa mit der gleichen Steigung wie vor der Erwärmung weiter an.
3. Verdampfung aus der Lösung und anschließende Kondensation bewirkt eine Formänderung des Bassins. Dabei bilden sich innerhalb des Flüssigkeitsspiegels Auskolkungen, während sich auf dem Boden Salz abscheidet.

4. Es entwickeln sich NOCl und Cl_2 . Dabei steigt der Gasanfall mit der Temperatur und mit der Säurekonzentration (31), (44).
5. Ein Einfluß der Strahlung auf die Festigkeit des Salzgesteins macht sich erst bei Dosen ab $5 \cdot 10^8$ r bemerkbar. Bei dieser Dosis zeigt sich ein Nachlassen der Festigkeit um etwa 10% (17), (36), (56).

In zahlreichen Arbeiten werden Berechnungen über die Erwärmung des umliegenden Gesteins durch die Spaltprodukte angegeben. In der Arbeit von Maltzev, der einzigen aufgefundenen russischen Schrifttumsstelle, wird die Lagerung in Salzformationen erwähnt (48). Nähere Angaben über Versuche wurden von russischen Autoren nicht aufgefunden. Birch (5) berechnet die Erwärmung in ausgedehnten Schichten poröser Gesteine mit 20% Porosität für Schichtdicken von 1, 10 und 100 m sowie in Salzgesteinen bei flächenhafter Ausbreitung der Abfälle und Einbringung in kugelförmige Kavernen von 5, 10 und 20 m Radius. Bei einer angenommenen (niedrigen!) Abfallwärmeleistung von 0,01 W/gal ergeben sich nachstehende Werte (Tabelle 3).

T A B E L L E 3

Erwärmung von Kavernen, die mit flüssigen Abfällen gefüllt sind (aus (5))

Kavernenradius (m)	Endtemperatur- erhöhung des Abfalls(°C)	Zeit zur Erreichung von Prozenten des Endwertes	
		77 % (Jahre)	50%
5	2,6	2,45	0,4
10	10,4	9,8	1,6
20	41,6	39,2	6,2

Berechnungen über Erwärmungen um kugelförmige Hohlräume finden sich auch bei (25), (37), (73), (80).

In anderen Arbeiten wird die Erwärmung des Salzgesteins durch feste Abfälle berechnet (39), (60) und aus den Werten für die max. zulässige Salztemperatur der Platzbedarf für ein Endlager ermittelt. Zugrundegelegt ist eine max. Salztemperatur von etwa 200°C, da Versuche gezeigt hatten, daß ein Teil der Salzgesteine bei 280° zerplatzt, d.h. infolge Verdampfung von Flüssigkeitseinschlüssen in den Kristallen dekrepitiert (40), (41), (67). Die Berechnung geht weiterhin von einem Reaktorprogramm von 56 000 Mw (th) (26) oder 15 000 Mw (e) (15) aus. Dabei sollen jährlich 1500 t Uran und 270 t Thoriumbrennstoff aufbereitet werden. Es ergeben sich beispielsweise Platzbedarfswerte von 20 acres/Jahr für 0,65 Jahre alten Purex-Abfall und 2 acres/Jahr

für 30 Jahre Purex-Abfall (1 acre = 0,4047 ha). Dazu wird vorgeschlagen, jeweils 0,65 km² große Lagerstätten-
teile (2600 . 2700 ft) zu umfahren und 6 Reihen zu je
23 Kammern herzustellen und dort die Abfälle einzu-
lagern (11), (67).

Man stellt sich die Einlagerung so vor, daß zylinder-
förmige feste Abfallstäbe in Löcher in der Sohle der
Abbauräume eingebracht werden. Es ist an Durchmessern
von 6, 12, 24 inch entsprechend 15, 30 und 60 cm ge-
dacht. Der Lochabstand untereinander richtet sich nach
der Strahlungstemperatur der Festkörper. Da die Ver-
festigungsanlagen zur Zeit noch nicht betriebsbereit
sind, wird der Abfall für die Versuche durch ausge-
brannte Brennelemente simuliert. Diese kommen in
10 ft tiefe Löcher von 10 inch = 25 cm Durchmesser,
dann wird ein Deckel aus Blei oder Uran zum Verschluss
daraufgesetzt. (4) Diese Versuche wurden in der be-
reits stillgelegten Schachtanlage Lyons Mine in Kansas
durchgeführt. Das alte Grubengebäude wurde durch einen
2. Schacht von 300 m Teufe erweitert. Durch diesen
Schacht sollen die Brennelemente von einem Spezial-
güterwagen direkt nach Untertage befördert werden.
Der Transportwagen in der Grube, ein dieselgetrie-
bener Traktor mit einem heb- und kippbaren Bleibe-
hälter, fährt unter den Schacht, nimmt das Brennelement
auf, und transportiert es in den vorgesehenen Lager-
raum. Hier soll das Verhalten des Salzgesteins unter
Strahlungs- und Wärmeeinfluß bei Dosen von 8×10^8 r
untersucht werden. Neben dieser heißen Versuchsan-
ordnung ist noch eine elektrothermische Anordnung vor-
gesehen. Ein Salzpfiler soll auf elektrischem Wege
erwärmt werden, um sein Fließverhalten zu studieren
(2, 4). Derartige Versuche wurden bereits in kleinerem

Maßstab an einen Hohlraum von 2 x 8 x 10 Fuß (61 x 24 x 305 cm) und Erwärmung auf 160° durchgeführt (41), der in einem Salzgesteinspfeiler ausgeschrämt worden war. Die Verformungsgeschwindigkeit stieg von $1,8 \times 10^{-4}$ cm/Tag vor Erwärmung auf $1,3 \times 10^{-2}$ cm/Tag nach Erwärmung. Dividiert man diese Werte durch die Länge der Meßstrecke, dann erhält man jährliche Verformungswerte von 11×10^{-4} cm / cm x Jahr vor Erwärmung und $7,3 \times 10^{-2}$ cm/cm x Jahr nach Erwärmung. Der Wert vor Erwärmung entspricht in seiner Größenordnung den in Zahlentafel 2 genannten Werten aus der Hutchinson Mine.

6. Ökonomische Untersuchungen über Kosten der Endlagerung

Das Oak Ridge National Laboratory hat eine größere Studie über die Kosten der Endlagerung, bezogen auf die kWh erzeugter Leistung durchgeführt. In sechs Teilabschnitten wurden die einzelnen Schritte bis zur endgültigen Lagerung in Salzformationen untersucht (19, 61, 62). Als Gesamtergebnis zeigen sich beispielsweise für 2,8 Jahre alten sauren Purex-Abfall in 6-Zoll- (15 cm)-Zylindern Kosten von 0.027 mills / kWh (24). Die Untersuchungen haben weiter gezeigt, daß eine Spaltproduktabtrennung von 90% die Kosten für die 12-Zoll- (30 cm)-Zylinder von 6 Jahre altem Abfall beispielsweise von 0.0265 mills für unbehandelten Abfall auf 0.0215 mills / kWh senkt. Eine Abtrennung von 99% bringt dann keine wesentliche Verbesserung des Gesamtkostenbildes mehr, obgleich die Lagerung im Salz wegen der geringeren Strahlungsintensität der abgereicherten Abfälle weniger Platzbedarf hat und deswegen

billiger ist als die der unbehandelten Abfälle. Wirtschaftliche Untersuchungen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, da sie für die speziellen amerikanischen Verhältnisse gelten, finden sich noch in (15, 27, 33).

7. Zusammenfassung

Die Schrifttumsübersicht hat gezeigt, daß Salzgesteine für die Einlagerung radioaktiver Abfallstoffe geeignet sind. Salzlagerstätten sind weltweit verbreitet. Salzgesteine sind infolge ihrer Plastizität weitgehend undurchlässig, während andere Festgesteine, wie Granit oder Sandstein, von Klüften und Spalten durchzogen sind, auf denen eine Zirkulation von Wasser erfolgen kann. Salzgesteine haben eine gute Wärmeleitfähigkeit, so daß Wärme vom Zerfall der Abfälle schnell abgeführt werden kann. Sie sind festigkeitsmäßig zur Herstellung großer Hohlräume ohne Abstützung (Ausbau) geeignet. Die Herstellung der Hohlräume ist einfach und billig. Salz ist gegen Strahleneinwirkungen weitgehend unempfindlich. Die genannten Punkte machen es zu einem erstrebenswerten Einlagerungsmedium. In diesem Medium ist die Anlage von Hohlräumen sowohl im horizontal gelagerten Salz als auch im Salz der Diapire (Salzstöcke) möglich.

Die Hohlräume können als Kavernen durch Aussolung oder als Bergwerke erstellt werden. Beide Formen haben Eigenschaften, die ihre Untersuchung als End-

lagermöglichkeit interessant erscheinen lassen.

8- Schlußfolgerung

Aus den Ergebnissen der Schrifttumsübersicht und den geologischen Gegebenheiten in Europa und speziell in der Bundesrepublik Deutschland sollen abschließend einige Schlüsse für die Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe in Salzformationen gezogen werden.

8.1 Ort der Herstellung eines Endlagers

Von den verschiedenen Salzformationen sind in der Bundesrepublik Deutschland Salzstöcke für die Herstellung eines Endlagers am geeignetsten, da sie mächtiger sind als die geschichteten Salze und da sie bis in geringe Teufen von wenigen zehn bis hundert Metern unter die Erdoberfläche hinaufreichen können. Eine Kavernenanlage ist dort zu erstellen, wo eine Ableitungsmöglichkeit für die anfallende Sole gefunden werden kann. Die Ableitung geschieht am einfachsten in Flüsse mit ausreichender Wasserführung oder ins Meer. Das bedeutet, daß als besonders günstig ein Streifen von etwa 30 km Tiefe, entlang der Küste und Flußmündungen der Elbe, Weser und Ems anzusehen ist. In Einzelfällen ist eine Kaverne auch weiter im Inland denkbar, wenn die Sole untergebracht werden kann (Verkauf an Saline zur Salzgewinnung, Einpumpen in Speichergestein oder bereits vorhandene Hohlräume wie alte Bergwerke).

Ein neues Bergwerk wird zur Ersparung von Abteufkosten für den Schacht zweckmäßigerweise in Salzstöcken angelegt, die bis nahe unter die Erdoberfläche heranreichen. Bei Wahl eines alten Bergwerkes ist der Standort gegeben. Es ist hier zu prüfen, ob die Lagerstätte für die Einlagerung geeignet ist.

8.2 Anlage einer Kaverne

Die Herstellung einer Kaverne erfolgt durch gut beherrschte Verfahren der Tiefbohrtechnik und der Solegewinnung. Der Kostenaufwand ist daher mit ziemlicher Sicherheit im voraus zu bestimmen. Er besteht aus zwei Hauptteilen, den Bohrkosten und den Solungskosten. Der Aufwand für das Bohren richtet sich nach dem Bohrlochdurchmesser und nach der benötigten Endteufe. Der Aufwand für das Solen ist bei vorgegebener Ableitungslänge vor allem von der Dauer des Pumpens und damit von der Hohlraumgröße abhängig.

In einer Kaverne können Abfälle in flüssiger oder fester Form eingelagert werden. Bei hochaktiven Reprocessing-Abfällen ist nach amerikanischen Berechnungen eine Lagerung aus thermischen Gründen allerdings auf Kavernen von rund 3 m Radius beschränkt, die demgemäß nur ein kleines Fassungsvermögen haben. Versuche haben weiter gezeigt, daß über längere Zeiten mit einem Wandern des Hohlraumes zu rechnen ist. Die Schwierigkeiten der Wärmeableitung, die bei Lagerung von verfestigten Abfällen eine geometrische Anordnung der heißen Abfall-

zylinder im Salz erfordern, erschweren weiterhin das Einbringen solcher Festabfälle in Kavernen, da hier die geometrische Verteilung der Festkörper nicht kontrolliert und korrigiert werden kann. Der Anwendungsbereich der Kaverne ist demnach vornehmlich die Lagerung mittel- und schwach aktiver Abfälle. Es ist bei diesen denkbar, daß die Transportkosten das flüssige Einfüllen im unaufbereiteten d.h. nicht konzentrierten Zustand beeinträchtigen oder verbieten.

Werden die Abfälle in verfestigtem Zustand eingebracht, dann hat sich nach eigenen Planungen eine untere Grenze der Bohrlochdurchmesser für eine Kaverne von 30 cm ergeben. Eine obere Grenze ergibt sich durch die Maximalgrößen der praktisch verfügbaren Bohrgeräte und Verrohrungen, die etwa 60cm beträgt. Vergleicht man den Bohraufwand für verschiedene Durchmesser, dann zeigt sich, daß eine günstige Bohrlochgröße bei 480 mm liegt. Die Kosten für das Bohren und Verrohren sind in jedem Falle auch bei kleineren Durchmessern als 30 cm recht erheblich, so daß der Aufwand für das Solen und damit die Kavernengröße in einem angemessenen Verhältnis dazu stehen sollte. Das ergibt eine Mindestgröße der Kaverne, die über den in den USA für die Lagerung von hochaktiven Reprozessingabfällen errechneten Durchmessern liegt. Nach Füllung wird die Kaverne durch Zementpfropfen verschlossen. Es können dann im gleichen Salzstock weitere Kavernen angelegt werden, so daß einmal erstellte Tagesanlagen weitgehend wieder verwendbar sind.

8.3 Bergwerk als Endlager:]

Die Errichtung eines Schachtes als Zugang zu einem Bergwerk ist wegen der größeren Dimensionen wesentlich teurer als das Herstellen und Verrohren eines Bohrloches, das als Zugang zur Kaverne dient. Demgegenüber bietet ein Bergwerk den Vorteil, daß neben den mittel- und schwachaktiven auch die hochaktiven Abfälle untergebracht werden können. Durch die allgemeine Zugänglichkeit aller Lagerpunkte können Beobachtungen an den Abfällen und am Gebirge angestellt werden. Eine spätere Wiedergewinnbarkeit von Abfällen ist gegeben.

Schließlich lassen sich in Salzbergwerken auch verschiedenartige Versuche durchführen. Diese Versuche können sich auch auf allgemein interessante Voruntersuchungen über das Verhalten des Salzgesteins unter Wärme- und Druckeinwirkungen ohne und mit Abfall und auf Untersuchungen über Einbringmechanismen und Förderungsfahrzeuge untertage erstrecken. Als Nachteil kann vielleicht angeführt werden, daß das Einbringen der Abfälle im allgemeinen etwas umständlicher ist, da neben der senkrechten Bewegung im Schacht eine horizontale Verteilung in die zuständigen Lagerräume nötig ist.

Der Nachteil der höheren Kosten bei Anlage eines neuen Bergwerkes kann durch Erwerb einer alten Anlage umgangen werden. Wie bereits auf Seite 13 erwähnt, ist dabei die Eignung der Lagerstätte, die

Standesicherheit des Grubengebäudes und der Zustand des Streckennetzes genau zu prüfen.

Bei unsachgemäßer Anlage von Hohlräumen in Salzgesteinen besteht die Gefahr, daß Wasser aus überliegenden Schichten in die Lagerräume eindringt. Das Wasser löst solange Salz auf, bis es gesättigt ist. Dabei kann die strukturelle Stabilität des betreffenden Raumes leiden. Bei genügender Zuflußmenge erfüllt sich schließlich das ganze Grubengebäude mit gesättigter Lauge. Dieser Komplex kann als stagnierender Laugensack ohne unterirdischen Ausgang angesehen werden. In solchem Falle wäre das eingebrachte Abfallgut in der schweren Lauge eingeschlossen und damit geschützt gegen eine etwaige Verdriftung in das zirkulierende Grundwasser hinein.

Bei einer Erfüllung der Grubenräume mit Lauge könnte allenfalls noch mit der Möglichkeit einer thermischen Konvektion gerechnet werden. Da jedoch dieser Laugenkörper aus größeren Bassins im Bereich der Abbaukammern und nur relativ sehr dünnen Verbindungssträngen im Bereich der Strecken und Schächte besteht, wird einer echten Zirkulation erheblicher Widerstand geleistet. Da man voraussichtlich einen mit eingelagerten Abfällen angefüllten Hohlraum zumauern wird, wäre eine Zirkulation zusätzlich erschwert.

Es soll dennoch bemerkt werden, daß bei Anlage eines Endlagers in Salzformationen und besonders bei Kauf eines alten Bergwerks zu Einlagerungsversuchen auf diese Möglichkeit des Versaufens zu achten ist. In einer Sicherheitsbetrachtung sind die möglichen Folgen für eine Grundwasservers~~suchung~~ zu prüfen.

Abschließend sei Frau M. Starch und Herrn Dipl.phys. Homma für ihre Unterstützung beim Aufsuchen und bei der Zusammenstellung des Schrifttums herzlich gedankt.



9. Schrifttumsverzeichnis

- (1) Belter, W.G.: New Developments in the USAEC Ground Disposal Program 1959-1961
Second Ground Disposal of Radioactive Wastes Conference Held at Atomic Energy of Canada Ltd., Chalk River, Sept. 26-29, 1961, S. 12-16
- (2) Belter, W.G.: Present and Future Programs in the Treatment und Ultimate Disposal of High Level Radioactive Waste in the United States
Proc. Symp. Treatment and Storage of High Level Radioactive Wastes
Wien 1962 S. 3-22 TID-17173
- (3) Belter, W.G.: Waste Disposal of High Activity Liquids for Nuclear Power Plants
Radioactive Wastes
Intern. Sci. Tech. No. 12,42-43 Dec.1962
- (4) Bernard Survey on the Activities in Ultimate Disposal of Radioactive Wastes
Personal communication, Paris Jan. 23, 1964

- (5) Birch, F.: Thermal Considerations in Deep Disposal
of Radioactive Waste
Industrial Radioactive Waste Disposal
Hearings before the Special Subcommittee
on Radiation of the Joint Committee
on Atomic Energy
Jan 28., Febr. 3, 1959, Vol. 3, S. 2201-2222
- (6) Blanco, R.E.: Waste Treatment and Disposal
Struxness, R.E. Progress Report for April and May 1961
Feasibility of Waste Disposal in
Salt Formations
CF-61-7-3
- (7) Blanco, R.E.: Waste Treatment and Disposal Progress
Struxness, R.E. Report for June and July 61
ORNL - TM - 15
- (8) Blanco, R.E.: Waste Treatment and Disposal Progress
Struxness, R.E. Report for Aug. and Sept. 1961, Oct. 31
1961
ORNL-TM-49
- (9) Blanco, R.E.: Waste Treatment and Disposal Progress
Struxness, R.E. Report for Oct. and November 1961
ORNL-TM-133
- (10) Blanco, R.E.: Waste Treatment and Disposal Progress
Struxness, R.E. Report for Dec. 61 and Jan. 62
ORNL-TM-169

- (11) Blanco, R.E.: Waste Treatment and Disposal Progress
Struxness, R.E. Report for Febr. and March 1962
Sept. 19, 1962
ORNL-TM-252
- (12) Blanco, R.E.: Waste Treatment and Disposal Progress
Struxness, R.E. Report for April and May 1962
Nov. 5, 1962
ORNL-TM-376
- (13) Blanco, R.E.: Waste Treatment and Disposal Progress
Struxness, R.E. Report for June and July 1962
ORNL-TM-396
- (14) Blanco, R.E.: Waste Treatment and Disposal Quarterly
Parker, F.L. Progress Report for Aug. and Oct. 62
ORNL-TM-482
- (15) Blomeke, J.O.: Estimated Costs for Management of High
et al Activity Power Reactor Processing
Wastes
13. Mai 1963
ORNL-TM-559
- (16) Boegley, W.J.: Disposal for Radioactive Wastes in
et al Natural Salt-Field experiments
Eng. Bull., Purdue University
Fyt. Ser., No. 106, 577-80 März 1961

- (17) Bradshaw, R.L.: Storage of High-Level Packaged Solid
et al Wastes in Rock Salt
Second Ground Disposal of Radioactive
Waste Conference Held at Atomic
Energy of Canada Ltd., Chalk River
Sept. 26-29 1961
- (18)⁺ Bradshaw, R.L.: Ultimate Storage of High-Level Radio-
et al active Waste Solids and Liquids in
Salt Formations
Proc. Symp. Treatment and Storage of
High-Level Radioactive Wastes
Wien 1962 8.-13. Okt., S. 153-175
- (19)⁺ Bradshaw, R.L.: Evaluation of Ultimate Disposal
et al Methods for Liquid and Solid Radio-
active Wastes.
VI: Disposal of Solid Wastes in
Salt Media
ORNL 3358
(Vergleiche dazu Report I ORNL 3128
II 3192
III 3355
IV 3356(64)
V 3357(62))
- (20) Brown, K.E.: Reactor Fuel Waste Disposal Projekt
et al Pressure-Temperature Effect on Salt
Cavities and Survey of Liquified Gas
Storage 1959
TID-5718

- (21) Busch, B.: Etwas über die Expansivkraft des Salzes
Zeitschrift für Prakt. Geologie
15 (1901), S. 367-371
- (22) Chemical Technology Division
Annual Progress Report for Period
ending May 31, 1961 Sept. 21, 1961
ORNL-3153
Oak Ridge Nat. Lab.
- (23) Chemical Technology Division
Annual Progress Report for Period
ending June 30, 1962 Sept. 21, 1962
ORNL-3314
- (24) Chemical Technology Division
Annual Progress Report for Period
ending May 31, 1963
ORNL-3452
- (25) Crowell, J.: A Thermal Problem Associated with
Parker, F.L.: Underground Storage of Radioactive
Wastes
USAEC-Report Nov. 17, 1960
ORNL-3002
- (26) Culler, F.L. jr.: Chemical Div. Monthly Progress Report
Febr. 62
ORNL-TM-151

- (27) Culler, F.L. jr.: Monthly Report for August 1962
Aug. 31. 1962
ORNL-TM-350
- (28) Dreyer, W.: Über das Festigkeitsverhalten sehr ver-
schiedenartiger Gesteine
Bergbauwissenschaften 2 (1955) H. 7
S. 183-191
- (29) Dreyer, W.: Zur Druckfestigkeit von Salzgesteinen
Kali und Steinsalz H. 7 (1961)
S. 234-41
- (30) Dreyer, W.: Entwicklung eines neuartigen Meßpa-
tronentyps zur Bestimmung des abso-
luten Gebirgsdrucks in Salzgesteins-
pfeilern Kali und Steinsalz
H. 10 (1963) S. 330/37
- (31)⁺ Empson, F.M.: Status Report on Waste Disposal in
Natural Salt Formations, Part III
1961
ORNL-3053
- (32) Empson, F.M.: Storage of Low Level Packaged Solids
in a Salt Mine
Sec. Ground Disposal of Radioactive
Waste Conference Held at Atomic
Energy of Canada Ltd., Chalk River,
Sept. 26-29, 1961, S. 469 f - 476

- (33) George, W.J.: Application of Present Worth to Waste
Bacón, L R. Disposal Economics
Nucleonics 17, No. 11, 173-4,
176, 178, 180 (1959)
- (34)⁺ Gloyna, E.F.: Reactor Fuel Waste Disposal Project
et al Summary Report
Industrial Radioactive Waste Disposal
Hearings before the Special Subcommittee
on Radiation of the Joint Committee
on Atomic Energy
Jan 28.-Febr. 3, 1959, Vol.3, S. 2223-
2279
- (35) Gloyna, E.F.: Permeability Measurement of Rock Salt
Reynolds, R.D. J. Geophys. Research, 66 39/3 - 21
(Nov. 1961)
- (36) Gunter, B.D.: The Physical Properties of Rock Salt
Parker, P.L. as Influenced by Gamma Rays
March 20, 1961
ORNL-3027
- (37) Health Physics Division Annual Progress
Report for Period ending July 31, 1959
ORNL-2806
- (38) Health Physics Division Annual Progress
Report for Period ending July 31, 1960
Oct. 24, 1960
ORNL-2994

- (39) Health Physics Division Annual Progress
Report for Period ending July 31, 1961
Oct. 31, 1961
ORNL-3189
- (40) Health Physics Div. Annual Progress
Report for Period ending July 31, 1962
S. 1 - 46, 12. Nov. 1962
ORNL-3347
- (41) Health Physics Division Annual Progress
Report for Period ending June 30, 1963
Sept. 30, 1963
ORNL-3492
- (42) Hess, H.H.: Disposal of Radioactive Waste on Land
Thurston, W.R.: Trans. Am. Geophys. Union 39
S. 467-8 (1958) June
- (43) Hodgman, C.D.: Handbook of Chemistry and Physics
et al The Chemical Rubber Publishing Co,
1959, S. 652-653
- (44) Kubota, H.: Waste Disposal in Salt
et al I. The HNO_3 - NaCl - reaction
ORNL-2984
- (45) Laguna de, W.: Engineering Geology of Radioactive
Waste Disposal
Rev. Eng. Geol. 1 : 129 - 60 (1962)

- (46) Lieberman, J.A.: The Role of Waste Management in the Development of the Nuclear Energy Industry
Second United Nations Int. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy Vol. 18, S. 3 (1958)
- (47) Lomenick, T.F.: The Geology of a Portion of the Hutchinson Salt Member of the Wellington Formation in the Mine of the Carey Salt Co., Lyons, Kansas
Sept. 3, 1963
ORNL - TM - 597
- (48) Maltsev, E.O.: The Problem of Heat Generation Presented by the Disposal of Liquid Radioactive Waste in Deep Geological Formations.
et al
Atomnaya -Energia 12, 36.-9 (1962) Jan.
- (49)⁺ Nace, R.L.: Contributions of Geology to the Problem of Radioactive Waste Disposal
Disposal of Radioactive Wastes Vol. 2, S. 457 - 480, Proceedings of Monaco Conf. 16. - 21. Nov. 1959
- (50) National Research Council, Committee on Waste Disposal
The Disposal of Radioactive Waste on Land Publ. 519, Sept. 1957
(NP-6503)

- (51) N.N. Feasibility of Creating Spherical Cavities in Underground Salt Domes Progress Report Dec. 62 - Jan. 63 (Univ. Texas)
TID - 18014
- (52) N.N. Feasibility of Creating Spherical Cavities in Underground Salt Domes Progress Report Febr. - März 63 (Univers. Texas)
TID - 18502
- (53)⁺ Parker, F.L.: Status Report on Waste Disposal in Natural Salt Formations 1958
et al ORNL - 2560
- (54)⁺ Parker, F. L.: Status Report on Waste Disposal in Natural Salt Formations, I. u. II. Industrial Radioactive Waste Disposal Hearings before the Special Subcommittee on Radiation of the Joint Committee on Atomic Energy Jan. 28.-Febr. 3, 1959, Vol. 3
et al Teil I S. 2087 - 2142
Teil II S. 2143 - 2200
- (55)⁺ Parker, F.L.: Status Report on Waste Disposal in Natural Salt Formations II
et al Apr. 23, 1959
ORNL 2700

- (56)⁺ Parker, F.L.: Disposal of Radioactive Waste in
et al Natural Salt
Disposal of Radioactive Waste
Conf. Proc. Monaco 16.-21. Nov. 59
Vol. 2, S. 365 - 384
- (57) Parker, F.L.: Waste Treatment and Disposal Progress
Blanco, R.E Report for Nov.-Dec. 62 - Jan. 63
ORNL - TM - 516
- (58) Pearce, D.W.: IAEA Waste Management Program
Roberts, I.C. Second Ground Disposal of Radioactive
Wastes Conference
Chalk River, Can. Sept. 26.-29. 1961
(1962) S. 590 - 601
TID - 7628
- (59) Peckham, A.E.: Considerations for Selection and
Belter, W.G. Operation of Radioactive Waste
Burial Sites
Second Ground Disposal of Radio-
active Wastes Conference, Held at
Atomic Energy of Canada Ltd.
Sept. 26.-29., 1961, S. 428 - 436
- (60) Perona, I.I.: Calculations of Temperature Rise
Whatley, M.E. in Deeply Buried Radioactive
Cylinders
Febr. 25, 1960
ORNL - 2812

- (61) Perona, I.I.: Evaluation of Ultimate Disposal
Bradshaw, R.L. Methods for Liquid and Solid Radio-
et al active Wastes IV: Shipment of
Calcined Solids
Oct. 18, 1962
ORNL - 3356
- (62) Perona, I.I.: Evaluation of Ultimate Disposal
Bloemeke, I.O. Methods for Liquid and Solid Radio-
et al active Wastes V: Effects of Fission
Product Removal on Costs of Waste
Management
1963
ORNL - 3557
- (63) Perona, I.I.: Comparative Costs for Final Disposal
et al of Radioactive Solids in Concrete
Vaults, Granite, and Salt Formations
1963
ORNL - TM - 664
- (64) Pierce, W.G.: Summary of Rock Salt Deposits in the
Rich, E.I. United States as Possible Disposal
Sites for Radioactive Waste
Geological Survey Bulletin 1048,
1962
- (65) Reactor Fuel Processing Vol. 5, No.2,
1962
Final Disposal Methods; Disposal into
Salt Formations

- (66) Reactor Fuel Processing Vol. 6
No. 1, 1963
Final Storage of Calcined Solids
in Salt Mines
- (67) Reactor Fuel Processing Vol. 6,
No. 2, 1963
Final Disposal Methods
Calcined Solids Storage in Salt Mines
- (68) Recent Developments in the Processing
and Ultimate Disposal of High-Level
Radioactive Wastes
16. annual Purdue Industrial Waste Conf.
May 2, 4., 1961, Lafayette, Indiana
- (69) Reynolds, T.D.: Reactor Fuel Waste Disposal Project
Gloyna, E.F. Permeability of Rock Salt and Creep
of Underground Salt Cavities.
1960
TID - 12383
- (70) Robinson, E.C.: Physical Properties of Salt, Anhydrite
et al and Gypsum, Preliminary Report
US Geological Survey 1958
Trace Elements Memorandum Report 1048
- (71) Rodger, W.A.: Ultimate Disposal of Radioactive
Fineman, P. Wastes Progress in Nuclear Energy, Ser.
III Process Chemistry, Vol. 2,
S. 470 - 485

- (72) Schlechter, R.S. · Thermal Considerations in the Storage
Gloyna, E.F. of Radioactive Wastes in Salt Formations.
Vorgetragen auf der Nuclear Engineering
and Science Conf. April 6-9., 1959
Cleveland Preprint V-4
New York, Engineers Joint Connail 1959
- (73) Schlechter, R.S.: Temperature Rise in Underground Storage
Gloyna, E.F. Sites for Radioactive Wastes
Chem. Eng. Progr. 55, Symposium Ser.
No. 27, 117-124 (1959)
- (74) Serata, S.: Reactor Fuel Waste Disposal Project
et al Development of Design Principle for
Disposal into Underground Salt Formations
TID - 6317 Jan. 1, 1959
- (75) Serata, S.: Developments of Design Principle for
et al Disposal of Reactor Fuel Waste into
Underground Salt Cavities
Vorgetragen auf d. Nuclear Engineering
and Science Conf., April 6-9, 1959
Cleveland, Ohio, Prepoint V-2
New York, Enginees Joint Connail 1959
- (76) Serata, S.: Storage of High Level Radioactive
Waste in Underground Salt Bed Formations
Progress Report
April 1, 1960
(NP - 10 815)

- (77)⁺ Serata, S.: Principles of Structural Stability of
Gloyna, E.F. Underground Salt Cavities
J. Geophys. Research 65, 2979 - 87
(1960) Sept.
- (78) Serata, S.: Transition from Elastic to Plastic
States of Rocks under Triaxial
Compression.
Progress Report No. 2
4. Symposium of Rock Mechanics
Penn State Univ. March 30, April 1, 1961
(NP - 10816)
- (79)⁺ Simpson, E.S.: Summary of Current Geological Research
in the United States of America
Pertinent to Radioactive Waste Disposal
on Land Disposal of Radioactive Wastes
Conference Proc. Monaco
16 - 21 Nov. 1959, Vol. 2, S. 517 - 533
- (80) Struxness, E.G.: Multipurpose Processing and Ultimate
Blomeke, I.O. Disposal of Radioactive Wastes
Second United Nations Int. Conf. on the
Peaceful Uses of Atomic Energy 1958
Vol. 18, S. 43

- (81) Thurston, W.R.: Summary of Princeton Conference on
Disposal of Highlevel
Radioactive Wastes Products in Geologic
Structures
TID - 7517
(Sanitary Engineering Aspects of the
Atomic Energy Industry. Seminar am
R.A. Taft Eng. Center, Cincinnati, Ohio,
Dec. 6-9., 1955
- (82) Wager, R.: Disposal of Radioactive Waste in the
Richter, W. Subsurface of the Federal Republic of
Germany
Disposal of Radioactive Wastes
Conf. Proc. Monaco, 16-21. Nov. 1959
Vol. 2, S. 533 - 546

Mit einem ⁺ versehene Schrifttumsstellen sind als Einführung in
die Versuchsarbeiten besonders wichtig.

10. Anhang

Konferenzen über Probleme der Endlagerung

1. Princeton Conference on Disposal of High-Level Radioactive Waste Products in Geologic Structures. Organisiert vom National Research Council, Committee on Waste Disposal und der J. Hopkins Universität, September 1955
2. Sanitary Engineering Aspects of the Atomic Energy Industry. Seminar am R. A. Taft Engineering Center Cincinnati, Ohio, 6. - 9. Dez. 1955
3. 2. Internationale Konferenz zur friedlichen Nutzung der Atomenergie. Veranstaltet von den Vereinten Nationen, Genf, September 1958
4. Ground Disposal of Radioactive Wastes Conference, Berkeley California 25.-27. August 1959
5. Disposal of Radioactive Wastes Conference Monaco. Veranstaltet von der IAEA vom 16. - 21. Nov. 1959 in Monaco
6. Second Ground Disposal of Radioactive Wastes Conference. Gehalten bei der Atomic Energy of Canada Ltd., Chalk River, 26. - 29. Sept. 1961
7. Symposium on Treatment and Storage of High-Level Radioactive Wastes. Veranstaltet von der IAEA in Wien, 8.-13. Okt. 1962