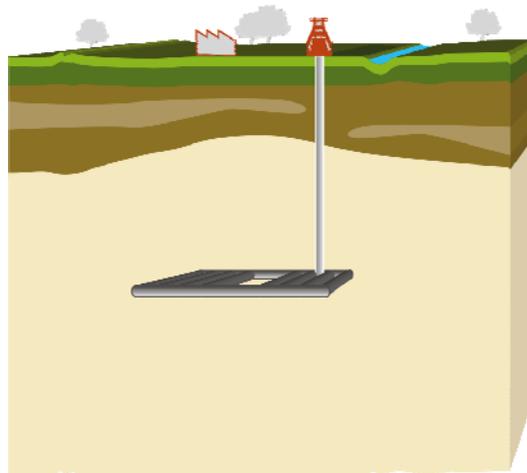


Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland

Anhang Verfüllen

Technische Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in einem Endlager



30.09.2008

Bearbeiter:

Brasser, T.

Miehe, R.

**Braunschweig / Darmstadt
September 2008**

**Anhang zu GRS-247
ISBN 978-3-939355-22-9**

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter den Kennzeichen 02E9783 und 02E9793 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Verfüll- und Verschlussmaßnahmen	3
2	Maßnahmen zum Verfüllen und Verschließen von Grubenbauen	5
2.1	Verfüllen von Einlagerungsbereichen	5
2.2	Verschluss von Einlagerungsbereichen	7
2.3	Rückbau betrieblicher Einrichtungen	9
2.4	Verfüllung und Verschluss von Schächten und sonstigen Zugängen	10
2.5	Betriebsschluss und Stilllegung	13
3	Verfüll- und Verschlusskonzept für ein deutsches Endlager im Steinsalz.....	15
4	Literatur.....	22
5	Weiterführende Literatur	26

1 Verfüll- und Verschlussmaßnahmen

In der Errichtungs- und Betriebsphase eines Endlagers für radioaktive Abfälle ist zu gewährleisten, dass die in der Strahlenschutzverordnung /BMU 01/ festgelegten Grenzwerte für die Strahlenexposition des Betriebspersonals und der Bevölkerung sowie für die radiologischen Emissionen und Immissionen eingehalten werden. Auch für die Nachbetriebsphase besteht die Anforderung, dass bestimmte radiologische Schutzkriterien für einen Nachweiszeitraum in der Größenordnung von 1 Million Jahren erfüllt werden. In den deutschen Endlager-Sicherheitskriterien von 1983 /PTB 83/, die derzeit aktualisiert werden, ist als Schutzziel die Einhaltung der Grenzwerte des § 47 der Strahlenschutzverordnung („Begrenzung der Ableitung radioaktiver Stoffe“) gefordert. Dadurch wird die Strahlenexposition in der Biosphäre durch Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem Endlager z. B. für eine erwachsene Referenzperson auf eine Effektivdosis von 0,3 mSv pro Jahr begrenzt.

Durch Einsatz geeigneter geotechnischer Barrieren kann die Ausbreitung von eventuell freigesetzten Radionukliden (z. B. in der Betriebsphase über den Abluftpfad über die Bewitterung oder in der Nachbetriebsphase über Wässer oder Salzlösungen) verhindert bzw. verzögert werden. Anforderungen an Verfüll- und Verschlussmaßnahmen sind erstmals zusammenfassend in den „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Endlagerbergwerk“ /PTB 83/ festgelegt worden.

Man unterscheidet zwischen Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in den Einlagerungsbereichen und solchen in den übrigen Bereichen des Endlagerbergwerks, wie z. B. den für den Zugang notwendigen Schächten, Verbindungs- und Zugangsstrecken und Infrastrukturbereichen.

Für Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in den Einlagerungsbereichen gilt die Anforderung, dass bereits während, aber auch nach der Betriebsphase eines Endlagers sichergestellt werden muss, dass keine Wässer oder Salzlösungen in den Endlagerbereich zutreten können. Zum anderen ist auch eine Ausbreitung von eventuell gelösten Radionukliden in die noch in Betrieb befindlichen Endlagerbereiche und in die Biosphäre zu verhindern bzw. zu verzögern. In der Nachbetriebsphase eines Endlagers dienen die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen dem Ziel, die Isolation der Radionuklide im Zusammenwirken mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu gewährleisten.

Dazu werden verschiedene (geo-) technische Barrieren vorgesehen, wie der Versatz von Kammern und Strecken sowie Bohrloch-, Strecken- und Schachtverschlüsse (siehe Abb. 1). Diese Barrieren werden zusammenfassend auch als „Engineered Barrier System (EBS)“ bezeichnet /STO 94/. Die entsprechenden Maßnahmen müssen an das jeweilige Wirtsgestein (Steinsalz, Tonstein, gegebenenfalls Granit) angepasst werden. Durch Verfüll- bzw. Versatzmaßnahmen muss auch übertägigen Bergschäden vorgebeugt werden, die durch Setzungen hervorgerufen werden.

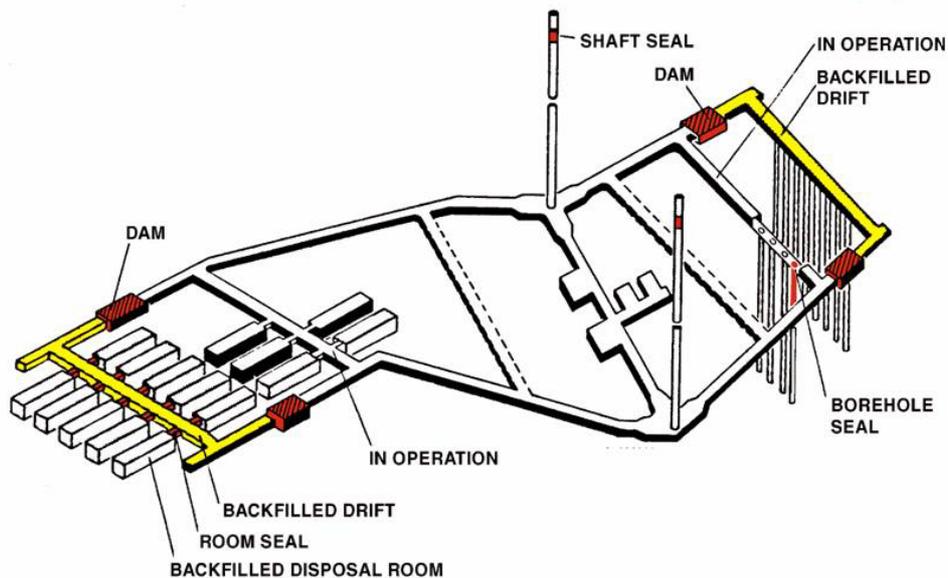


Abb. 1 Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in einem Endlager im Salzgestein /ROT 04/

Nach Abschluss der Einlagerung müssen alle betrieblichen Einrichtungen rückgebaut und alle von übertage angelegten Schächte und ggf. sonstigen Zugänge zum Endlager verschlossen werden. Im Rahmen der Stilllegung muss das Betriebsgelände rekultiviert und für einen festgelegten Zeitraum hinsichtlich möglicher radiologischer Auswirkungen überwacht werden.

2 Maßnahmen zum Verfüllen und Verschließen von Grubenbauen

2.1 Verfüllen von Einlagerungsbereichen

Die nach der Einlagerung der radioaktiven Abfälle in Kammern, Strecken oder Bohrlöcher verbleibenden Resthohlräume müssen mit einem geeigneten Material verfüllt werden, um einerseits das Grubengebäude zu stützen und andererseits die Strahlenexposition innerhalb des Grubengebäudes während des Einlagerungsbetriebs so gering wie möglich zu halten. Durch die Verfüllung wird auch das Speichervolumen für eventuell zutretende Wässer oder Lösungen verringert, die bei Kontakt mit den Einlagerungsbehältern zu einer unerwünschten korrosionsbedingten Gasbildung führen können. Das Verfüllmaterial muss über eine ausreichende Wärmeleitfähigkeit verfügen, um die bei der Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen anfallende Wärme abführen zu können. Die Stützwirkung des Versatzmaterials und eine Verringerung des verbleibenden Restvolumens können durch eine Kompaktion des Versatzes, die eine Folge der Hohlraumkonvergenz ist, positiv beeinflusst werden.

Die Verfüllmaterialien müssen entsprechend den an sie gestellten Anforderungen ausgewählt und an das jeweilige Wirtsgestein angepasst werden. Als Verfüllmaterial kann arteigenes Material, wie z. B. Salzgrus im Falle eines Endlagers im Steinsalz, eingesetzt werden. Zum anderen können auch artfremde Stoffe wie Tone, Ton-Mineral-Gemische, Aschen, Fabrikrückstände oder Schlämme Verwendung finden. Tone weisen beispielsweise den Vorteil auf, bei Zutritt von Wasser zu quellen, was sich positiv auf ihre Dichteigenschaften auswirkt. Die zur Anwendung kommenden Verfüllmaterialien müssen beständig gegenüber Salzlösungen, Gasen und thermischen Einwirkungen sein.

Bei der Verwendung trockener Verfüllmaterialien ist darauf zu achten, dass die resultierende Staubbelastung der Wetter gering gehalten wird. Dies kann zum einen durch den Einsatz einer Entstaubungsanlage in Verbindung mit einer Absaugvorrichtung und zum anderen durch Zugabe von Wasser oder Salzlösungen erfolgen. Zur Gewährleistung der an die Verfüllmaterialien gestellten Anforderungen, insbesondere im Hinblick auf die mechanischen und abdichtenden Eigenschaften, muss mit den eingesetzten Einbringtechniken eine ausreichende Verdichtung des Versatzes erzielt werden.

Das Einbringen von trockenem Verfüllmaterial kann bei der Kammer- und Bohrlochlagerung als Blasversatz erfolgen, wie es bei der Verfüllung der Schachanlage Asse praktiziert wurde /GSF 04/. Dabei kann es sich aus technischen Gründen, wie beispielsweise der Staubbekämpfung, als notwendig erweisen, dem trockenen Verfüllmaterial Wasser oder Salzlösungen in einem angemessenen Anteil zuzusetzen. Zur Aufbereitung und Zwischenlagerung des Versatzmaterials sind u. a. Brecher, Siebanlagen, Bunker und Kompressoren notwendig. Die für das Verblasen notwendigen Einrichtungen können, wie bei der Verfüllung der Schachanlage Asse, über Tage und bei entsprechendem Raumangebot auch unter Tage (gegebenenfalls dezentral) eingerichtet werden. Das zu verblasende Material wird über vor Ort installierte Blasleitungen in die zu verfüllenden Bereiche eingebracht.

Bei der Streckenlagerung wird, wie im Forschungsvorhaben „Thermische Simulation der Streckenlagerung“ erprobt, das Verfüllmaterial mittels Schleuderverfahren (Schleuderversatz) eingebracht /SCH 93/, /DRO 96/, /DRO 01/, /ROT 03/, /BEC 04/. Das Verfüllen der Einlagerungsstrecken bei der Bohrlochlagerung kann ebenfalls mittels Schleuderversatz erfolgen. Der Schleuderversatz kann sowohl mit gleisgebundenen Versatzfahrzeugen als auch mit nichtgleisgebundenen Schleudertrucks eingebracht werden. Bei gleisgebundener Technik ist die Möglichkeit gegeben, unter Verwendung von Förderwagen eine größere Menge Versatzmaterial vor Ort zu transportieren.

Bei der Strecken- und Bohrlochlagerung kann der Resthohlraum zwischen den Einlagerungsbehältern und dem Gebirge auch durch vorgefertigte Tonformteile ausgefüllt werden /ENR 00/, /DAH 98/, /DEB 04/. Bei den hierbei verwendeten Tönen handelt es sich in der Regel um spezielle, ausgewählte Bentonite. Ebenso sind Ton-Sand-Gemische einsetzbar. Durch die Wahl unterschiedlicher Mischungsverhältnisse ist die Möglichkeit gegeben, die hydraulischen Eigenschaften des Materials bezüglich seiner Durchlässigkeit gegenüber Fluiden so zu beeinflussen, dass einerseits der Anforderung Rechnung getragen wird, den Aufbau zu hoher Gasdrücke infolge einer Korrosion der Abfallbehälter in Kontakt mit Wasser/Lösungen zu verhindern, andererseits aber auch die Dichtheit gegenüber Wässern/Lösungen zu gewährleisten /JOC 00/, /MIE 03/, /ROT 05/.

Die Zugänge zu den Einlagerungsbereichen, wie Richtstrecken oder Querschläge, und die weiteren Hohlräume, wie z. B. Werkstätten, Magazine oder Wetterstrecken, werden mittels Schütt- oder Kippversatz verfüllt. Hierzu wird das Verfüllmaterial aus Bunkern mit Ladern oder Kippfahrzeugen vor Ort transportiert und abgekippt. Verteilung und

Aufhäufung des Versatzes erfolgen mittels Planiermaschinen (z. B. Raupen). Das Verfüllmaterial kann mit Rüttlern weiter verfestigt und damit dessen Einbaudichte erhöht werden. Verbliebene Firstspalte müssen mit geeigneten Maßnahmen, wie z. B. durch Verblasen oder Stopfen, verfüllt werden. Bei der Stilllegung des Endlagers werden sämtliche Strecken und Füllörter bis zu den Tagesschächten oder zu sonstigen Zugängen verfüllt.

2.2 Verschluss von Einlagerungsbereichen

Mit dem Verschließen von Einlagerungsbereichen wird angestrebt, die Einlagerungsstrecken, Einlagerungskammern und Einlagerungsbohrlöcher sowie die Schächte gegen im Störfall zutretende Wässer oder Salzlösungen abzudichten. Um den verschiedenen Einlagerungstechniken Rechnung zu tragen, erfolgt der Verschluss durch verschiedene geotechnische Barrieren in Form eines Mehrbarrierensystems in Verbindung mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Die technischen Komponenten des Mehrbarrierensystems sind im Einzelnen Bohrlochverschlüsse, Streckenverschlüsse (Dämme) und Schachtverschlüsse.

Wie beim Verfüllen der Hohlräume muss zwischen den unterschiedlichen Anforderungen während der Betriebsphase und der Nachbetriebsphase bzw. der Phase der Stilllegung unterschieden werden. In der Betriebsphase muss verhindert werden, dass bei Wasser- oder Lösungszutritten mit Radionukliden kontaminierte Fluide in die noch in Betrieb befindlichen Teile des Grubengebäudes eindringen. In der Nachbetriebsphase bzw. bei der Stilllegung ist langfristig zu gewährleisten, dass eine Ausbreitung der in Lösung gegangenen Radionuklide in der Biosphäre verhindert oder zumindest verzögert wird.

Die Verschlüsse müssen zum einen eine ausreichende Durchlässigkeit besitzen, damit die durch Korrosion der Einlagerungsbehälter in Kontakt mit Wasser oder Salzlösungen gebildeten Gase abgeführt werden können, ohne dass sich unzulässig hohe Drücke in den Einlagerungsbereichen aufbauen. Bei einem solchen Gasdruckaufbau könnte die mechanische Integrität des umgebenden einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beeinträchtigt werden. Zum anderen muss die Durchlässigkeit der Verschlüsse gering sein, um bei einem eventuellen Störfall zutretende Wässer oder Lösungen von den eingelagerten Abfällen fernzuhalten sowie den Austritt von kontaminierten Wässern oder Lösungen aus den Einlagerungsbereichen zu verhindern oder zu verzögern.

Weiterhin müssen die Verschlüsse in der Lage sein, die insbesondere in den wärmeentwickelnden Abfällen zu Beginn der Nachbetriebsphase freigesetzte Zerfallswärme ohne unzulässige Aufheizung des Wirtsgesteins abführen zu können.

Bei der Bohrlochlagerung werden die niedergebrachten Bohrlöcher mit Bohrlochverschlüssen gegen die Zugangs- oder Einlagerungsstrecken abgedichtet. Als Verschlussmaterialien können Ton oder Ton-Mineral-Gemische sowie bei einem Endlager im Steinsalz auch Salzgrus /ROT 99/ verwendet werden. Tonhaltige Verschlussmaterialien haben den Vorteil, bei Zutritt von Wässern zu quellen und damit die Dichtwirkung zu erhöhen. Das Verfüllmaterial wird nach dem Einbringen der Einlagerungsbehälter in die Bohrungen geschüttet und gegebenenfalls abschnittsweise, z. B. mit einem Rüttler, verfestigt.

Streckenverschlüsse oder Dämme dienen zur Abdichtung der Einlagerungsbereiche vom übrigen Grubengebäude. In der Nachbetriebsphase haben sie die Aufgabe, die Einlagerungsbereiche vor Wasser- oder Lösungszutritten zu schützen. Streckenverschlüsse können aus Beton (im Falle eines Endlagers im Steinsalz auch aus Salzbeton), Ton oder Ton-Mineral-Gemischen sowie Natursteinen, Asphalt und Bitumen bestehen. Bei der Konstruktion der Streckenverschlüsse oder Dämme ist eine Kombination unterschiedlicher Baumaterialien möglich. Um die Langzeitsicherheit zu gewährleisten, müssen die verwendeten Materialien gegenüber Salzlösungen, Gasen und thermischen Einwirkungen beständig sein.

Ein Streckenverschluss oder Damm besitzt als Hauptkomponenten eine Dichtung und ein Widerlager, wobei die Dichtung aus jeweils einer Kurzzeit- und einer Langzeitdichtung zusammengesetzt sein kann. Ein Beispiel für den Aufbau eines Endlagerdammwerks im Salzgebirge, bei dem verschiedene Verschlussmaterialien wie z. B. Salzbeton, Bitumen und Salzbriketts (hochverfestigte Salzformsteine) Verwendung finden, wird von /ENG 91/ beschrieben.

Für die Dichtungskomponente kann Beton verwendet werden, der in die Strecke gepumpt und von Stützmauerwerken gehalten wird. Eine andere Möglichkeit sind hochverdichtete Bentonitformsteine, die in die Strecke eingesetzt werden /WIT 96/. Weiterhin werden als Baumaterial kompaktierte Formsteine aus einem Bentonit-Sand-Gemisch verwendet /ALA 99/, /SIT 01/. Besondere Aufmerksamkeit muss hierbei auf die Firstverfüllung gelegt werden, da bei unzureichendem Formschluss mit dem Gebirge unerwünschte Wegsamkeiten für Fluide entstehen können.

Der Einsatz von Ton-Sand-Gemischen wird in /DEB 04/ beschrieben. Ton-Sand-Gemische haben den Vorteil einer im Vergleich zu reinem Ton erhöhten Wärmeleitfähigkeit. Zum anderen bieten sie die Möglichkeit, die hydraulischen Eigenschaften innerhalb bestimmter Bandbreiten gezielt einzustellen.

Das Widerlager hat die Funktion, die Dichtungskomponenten bei einem Druckaufbau abzustützen und an ihrem Einbauort zu halten. Die Widerlager bestehen in der Regel aus Beton und werden durch das Ausschneiden einer entsprechenden Streckenkontur mit dem Wirtsgestein verzahnt. Hierdurch wird der auf die Abdichtung einwirkende Druck in das Gebirge abgeleitet /ALA 99/.

2.3 Rückbau betrieblicher Einrichtungen

Im Zuge der Verfüll- und Verschlussmaßnahmen erfolgt der Rückbau der für den Einlagerungsbetrieb notwendigen Einrichtungen. Der Rückbau kann bereits während des Einlagerungsbetriebs beginnen, wenn z. B. einzelne Einlagerungsbereiche bereits befüllt, andere aber noch im Betrieb sind, oder auch erst nach dem Ende des Einlagerungsbetriebs nach dem Verschluss aller Einlagerungsbereiche. Der Rückbau umfasst sowohl die untertägigen als auch die übertägigen Einrichtungen.

Beim untertägigen Rückbau werden alle beim Einlagerungsbetrieb eingesetzten Maschinen ausgebaut, wie Einlagerungsfahrzeuge (Krane), Transportfahrzeuge, Lader und Streckenauffahrungsmaschinen mit deren Fahrwegen (z. B. gleisgestützte Einrichtungen) sowie die für die Infrastruktur notwendigen Einrichtungen, wie Tankanlagen, Stromversorgung, Frischwasserversorgung, Kabel, Rohre sowie zur Bewetterung eingesetzte Lutten und Lüfter. Die nicht mehr benötigten Schachtausbauten und Schachtförderanlagen in Blindschächten und Förderschächten werden sukzessive entfernt. Sämtliche Bohrungen und Strecken sowie die Schächte werden verfüllt bzw. versetzt (siehe oben).

Bereits parallel zum Einlagerungsbetrieb erfolgt der Rückbau von Einrichtungen, die für bereits verschlossene Einlagerungsbereiche verwendet wurden und nicht mehr benötigt werden. Der Rückbau wird in einer Weise geplant und vorgenommen, dass der weitere Einlagerungsbetrieb und insbesondere die betriebliche Sicherheit nicht beeinträchtigt werden.

2.4 Verfüllung und Verschluss von Schächten und sonstigen Zugängen

Bei der Stilllegung eines Endlagers müssen alle Schächte und sonstigen Zugänge (letztere sind für ein deutsches Endlager nicht relevant) nach Rückbau sämtlicher untätiger Ausbauten und technischer Einrichtungen verfüllt und verschlossen werden. Hierdurch soll die Isolation der radioaktiven Abfälle im Zusammenwirken mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich gewährleistet werden.

Die Anforderungen an Schachtverschlüsse werden in /SCH 96/ näher definiert. Im Einzelnen werden hier u. a. die Tragfähigkeit, die Wartungsfreiheit sowie die Gewährleistung der technischen Dichtigkeit auch unter langzeitsicherheitlichen Gesichtspunkten genannt. Konzepte zum konstruktiven Aufbau eines Schachtverschlusses wurden in einer Studie von /SCH 96/ und von /BRE 01/ im Rahmen eines Forschungsvorhabens zur Entwicklung von Schachtverschlüssen vorgelegt.

Die Abb. 2 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau eines verfüllten und abgedichteten ehemaligen Tageschachts eines Endlagerbergwerks mit Schachtverschluss und verfüllten Abschnitten. Realistische Planungen gehen von einem komplizierten System aus. Nach /SCH 96/ sollte ein Schachtverschluss aus folgenden, zwischen dem Bergwerk und der Tagesoberfläche einzubauenden Elementen bestehen:

- dem Füllortbereich zur Sicherung der gesamten Schachtverfüllsäule an den Schachtabgängen gegen ein Auslaufen in das Grubengebäude,
- einer Verfüllsäule vom Füllortbereich bis zur Dichtung mit Stützwirkung auf den Schachtstoß und zur Positionierung des Dichtsystems,
- dem eigentlichen Dichtsystem, das aus mehreren Dichtelementen zusammengesetzt sein kann. Es kann sich als notwendig erweisen, neben der Hauptdichtung, die als hydraulische Sperrschicht zwischen dem Salinar und dem wasserführenden Deckgebirge an der Unterkante des wasserdichten Ausbaus angeordnet ist, zwei weitere Dichtelemente einzubauen. Eines dieser Dichtelemente befindet sich in der oberen Verfüllsäule und trennt unter der Annahme möglicher Undichtigkeiten des wasserdichten Ausbaus verschiedene Grundwasserstockwerke sowie Bereiche mit gespannten Lösungen. Ein zweites Dichtelement wird bei eventuellen Zuflüssen, z. B. über den Hauptanhydrit bei Steinsalz als Wirtsgestein oder

bei Wasserwegsamkeiten durch Hinterlösung der Schachtmauer, in der oberen Verfüllsäule platziert.

- einer oberen Verfüllsäule von der Dichtung bis zur Tagesoberfläche mit Stützwirkung auf den Schachtstoß bzw. den wasserdichten Ausbau sowie zum Massenausgleich,
- einem Schachtkopfbereich, der zusammen mit der unteren Verfüllsäule zur Sicherung der Tagesoberfläche dient.

Bei der Konzipierung des Schachtverschlusses wird zugrunde gelegt, dass eine hydraulische Druckeinwirkung auf die Dichtung sowohl von oben aus den Grundwasserhorizonten des Deckgebirges als auch von unten aus dem Grubengebäude erfolgen kann. Die Wirksamkeit des Dichtelements muss auch im Falle setzungsbedingter axialer Verschiebungen gewährleistet bleiben. Widerlager können, wie in /SCH 96/ aufgeführt wird, zur Tragfähigkeit beitragen. Eine entscheidende Voraussetzung für die Dichtfunktion ist ein vollständiger Kontakt des Dichtelements mit dem Schachtstoß. Dabei ist es gegebenenfalls notwendig, den Schachtstoß nachzuschneiden, damit eine glatte Kontur zur Verfügung steht /SIT 03/, /SCH 96/.

Die Auswahl der für die Dichtung zu verwendenden Materialien muss sich an dem jeweiligen Wirtsgestein, dessen gebirgsmechanischen Eigenschaften und den geologischen und chemisch/mineralogischen Gegebenheiten des Standortes orientieren. Dabei müssen besonders die Aspekte der Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit und der damit in Verbindung stehenden Korrosion beachtet werden.

Im Wirtsgestein Steinsalz kommen für das Dichtelement als Materialien Tone, Ton-Sand-Gemische und Asphalte / Bitumina, die mit Füllstoffen, wie z. B. Sand, angereichert werden, in Frage /SIT 03/, /SCH 96/. Zementgebundene Materialien sind aufgrund ihrer nicht sichergestellten Stabilität gegenüber Salzlösungen in Salzgestein nicht geeignet /SIT 03/. Bei Endlagern im Wirtsgestein Granit kommt auch ein Einsatz von Beton in Betracht. Inwieweit zementhaltige Materialien in Tonformationen geeignet sind, muss noch im Hinblick auf mögliche Wechselwirkungen zwischen den Zementbestandteilen und den Tonmineralien überprüft werden.

das Quellen des Tons zu erzielen, ist eine entsprechende Einbaudichte notwendig /BRE 01/.

Als Material für Verfüllsäulen hat sich Hartgesteinsschotter als vorteilhaft erwiesen.

Im Füllortbereich müssen die vom Füllort abgehenden Strecken vor dem Einbau des Schachtverschlusses versetzt werden. Die Verfüllung muss in einer Weise erfolgen, dass die Schachtverfüllsäule nicht in den Füllortbereich ausfließen kann. Als Material für die Verfüllung des Füllortbereiches ist, wie bei den Verfüllsäulen des Schachtverschlusses, Hartgesteinsschotter geeignet. Beim Einbringen des Schotters muss in den Schachtabgängen die Ausbildung einer Schotterböschung mit einem Böschungswinkel von 40° bis 45° erreicht werden /SCH 96/.

Bei langen Standzeiten wird es aufgrund von Verwitterung und Korrosion notwendig sein, den Schachtkopfbereich, z. B. durch Nachspritzarbeiten, zu sanieren. Um späteren Verkehrslasten Rechnung zu tragen, muss sichergestellt werden, dass der Schachtkranz die notwendigen Lasten aufnehmen kann /SCH 96/. Inwieweit und in welcher Form der Schacht bis zur Tagesoberfläche verfüllt wird, ob z. B. die nach oben hin verbleibende Schachtsäule mit Beton vergossen wird oder ob Raum für Überwachungseinrichtungen vorgesehen wird, muss bei der Planung und Ausführung des Schachtdeckels berücksichtigt werden.

Andere Zugänge zum Endlagerbergwerk, wie Rampen und Stollen, sind - ähnlich wie beim Schachtverschluss - so zu verschließen, dass eine Ausbreitung der Schadstoffe soweit wie möglich verhindert oder behindert wird. Hier bieten sich vergleichbare Vorgehensweisen unter Einsatz von Schotter als Hohlraumverfüllung und Streckenverschlussbauwerken z. B. aus Ton oder Ton-Mineral-Gemischen an. Der Abschluss zum Mundloch hin, z. B. mit Beton, hängt, wie beim Schachtverschluss, davon ab, ob im äußeren Bereich des Zugangs zusätzliche Überwachungsmaßnahmen vorgesehen sind.

2.5 Betriebsschluss und Stilllegung

Nach Verfüllung und Verschluss sämtlicher untertägiger Hohlräume sowie aller Tageschächte (Wetterschächte, Transport- und Förderschächte) werden die übertägigen Betriebsanlagen zurückgebaut mit dem Ziel, das ehemalige Betriebsgelände anderweitig nutzen zu können. Hierbei werden alle verwendeten Übertageeinrichtungen wie

Förderturm, Fördermaschine, Verladeanlagen, Maschinenhallen, Werkstätten, Kauen und Verwaltungsgebäude abgebaut. Halden werden entfernt und das gesamte übertägige Grubengelände rekultiviert. Alle markscheiderischen Aufnahmen, sowohl der übertägigen als auch der untertägigen Gegebenheiten, wie Lage der Einlagerungskammern, Einlagerungsstrecken und Einlagerungsbohrlöcher, Verläufe der Zufahrtsstrecken und sämtlicher Bohrlöcher und Schächte sowie die Nivellementmessungen, sind zu dokumentieren und zu archivieren.

Zur Überwachung der Biosphäre sind übertägige Überwachungsmaßnahmen vorzusehen, die eine Überprüfung auf eventuelle radiologische Auswirkungen sowie die Kontrolle des Grundwassers (Wasserspiegelmessungen, chemische Zusammensetzung) mittels Überwachungsbohrungen in der Umgebung des Endlagers beinhalten.

3 Verfüll- und Verschlusskonzept für ein deutsches Endlager im Steinsalz

Entsprechend dem aktuellen deutschen Konzept für ein Endlager im Steinsalz (Abb. 3) besteht das (geo-)technische Barrierensystem (Engl.: Engineered Barrier System - EBS) im Wesentlichen aus Bohrlochverschlüssen, Streckenverschlüssen (Dämmen) und Schachtverschlüssen. In Ergänzung zu diesen Verschlüssen werden Bohrungen, Zugangs- und Transportstrecken mit Salzgrus verfüllt, um der generellen Anforderung nachzukommen, das Resthohlraumvolumen im Endlager zu minimieren und auch möglichst schnell nach Befüllung eines Einlagerungsbereiches eine Stützwirkung des Versatzes zu erzielen.

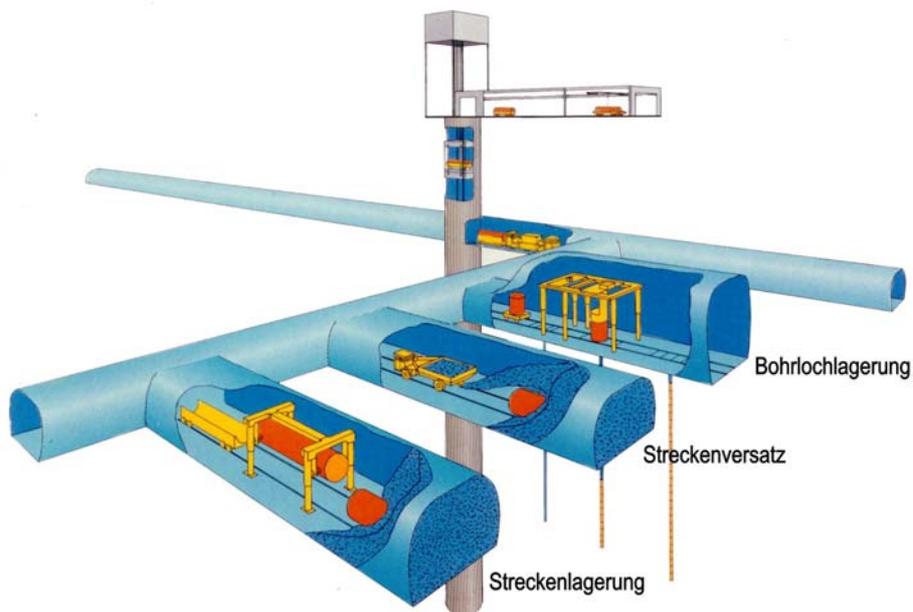


Abb. 3 Schematische Darstellung von Bohrloch- und Streckenlagerung sowie Versatzmaßnahmen bei einem Endlager im Steinsalz /BOL 08/

Bei der Bohrlochlagerung von HAW-Behältern (mit bis zu 200 Behältern in 300 - 600 m tiefen Bohrungen von 60 cm Durchmesser) wird zunächst der Ringraum zwischen Behältern und Bohrlochwand mit Salzgrus verfüllt, um die Stapelkräfte in das umgebende Gebirge abzuleiten und so den Druck auf die eingelagerten Gebinde auf einen sicherheitstechnisch beherrschbaren Wert zu begrenzen. Der eingebrachte Salzgrus wird durch den Druck des konvergierenden Bohrloches kompaktiert und erreicht in der aufgeheizten Umgebung der Behälter innerhalb von ca. 10 Jahren ein ähnliches Abdichtvermögen wie das umgebende Steinsalz /ROT 04/.

Am oberen Ende jedes HAW-Bohrloches wird ein aus Salzgrus bestehender, 30 m langer Verschluss eingebaut (Abb. 4). Zusätzliche Abdichtmaßnahmen sind bei dieser Art der Bohrlochlagerung nicht erforderlich. Durch die Kompaktion des Versatzmaterials werden innerhalb von ca. 150 Jahren sehr niedrige Porositäten und Permeabilitäten erreicht, so dass nach diesem Zeitpunkt eventuell in das Endlager eindringende Lösungen die Abfallbehälter nicht mehr erreichen können.

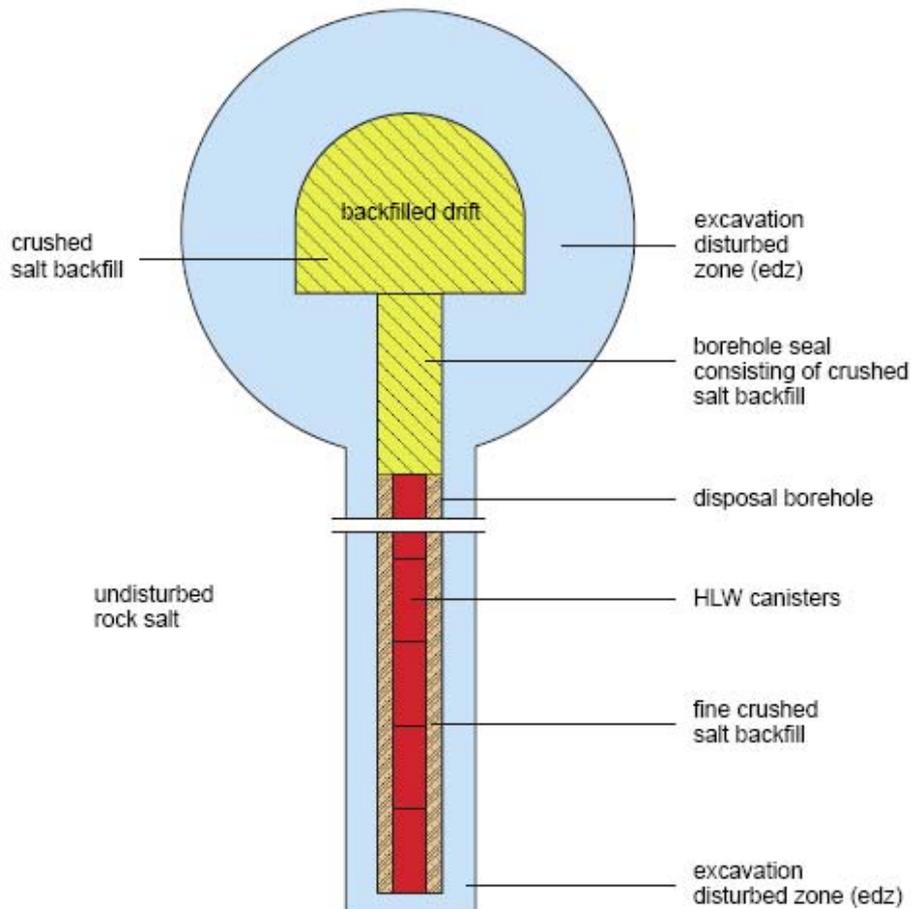


Abb. 4 Prinzip der HAW-Bohrlochlagerung mit den vorgesehenen Verfüll- und Verschlussmaßnahmen /ROT 04/

Nach dem deutschen Konzept zur direkten Endlagerung von abgebrannten Brennelementen sollen so genannte Pollux-Behälter in ca. 200 m lange Strecken mit einer Streckenbreite von 4,50 m und einer Streckenhöhe von 3,50 m eingelagert werden. Simultan mit der Einlagerung der Behälter werden die jeweiligen Einlagerungsstrecken mit Salzgrus verfüllt. Einzelheiten hierzu werden ausführlich in /BEC 04/ dargestellt.

Bei beiden Konzepten führen plastische Kriechverformungen im umgebenden Salzgestein zu einem Schließen der Einlagerungshohlräume infolge von Konvergenz. Die Permeabilität des Versatzmaterials erreicht allmählich die für die Isolation der Abfälle erforderlichen sehr geringen Werte. Darüber hinaus wird durch die fortlaufende Versatzkompaktion ein kontinuierlich zunehmender Stützdruck gegen das auflaufende Gebirge aufgebaut, was schließlich zu einer überwiegend homogenen Spannungsverteilung im Umfeld der Bohrungen und Strecken führt. Diese Effekte werden bei der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle durch die Aufheizung des Gebirges in der Umgebung der Einlagerungsbereiche noch beschleunigt.

Im Anschluss an die Betriebsphase des Endlagers werden Streckenverschlüsse zwischen dem Schachtbereich und den Einlagerungsbereichen errichtet, die auch als „Dämme“ bezeichnet werden. Ein vorläufiges Streckenverschlusskonzept mit verschiedenen Komponenten zur Gewährleistung der Standsicherheit und Funktionsfähigkeit des Dammbauwerkes wurde bereits von /STO 94/ entwickelt.

Das vorgeschlagene Konzept (Abb. 5) umfasst eine aus einem Multikomponentensystem bestehende Kurzzeitdichtung, die - nach Einbau des kompletten Dammes - benötigt wird, um bereits während der Betriebsphase eine wirkungsvolle Abdichtung zu garantieren, eine Langzeitdichtung aus vorkompaktierten Salzbriketts sowie ein Widerlager aus Salzbeton. Das statische Widerlager dient zur Aufnahme des Gebirgsdruckes sowie zur Ableitung der bei Aufbringung eines Gas- oder Lösungsdruckes, z. B. bei einer vollständigen Flutung des Endlagerbergwerks, auftretenden Kräfte in das Gebirge. Die Langzeitdichtung soll die Dichtfunktion übernehmen und diese nach einem Ausfall der Kurzzeitdichtung langfristig gewährleisten. Diese Dichtfunktion der Langzeitdichtung nimmt aufgrund ihrer durch die Streckenkonvergenz verursachten Kompaktion mit der Zeit zu.

Im Rahmen der aktuellen Stilllegungsmaßnahmen für das Endlager für schwachradioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) wurde der in Abb. 6 dargestellte Streckenverschluss konzipiert.

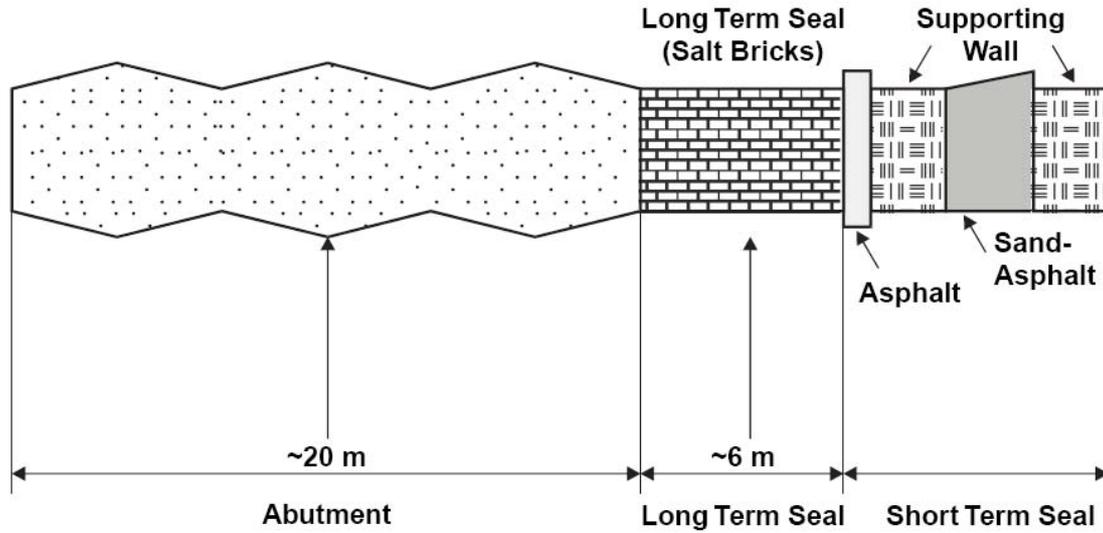


Abb. 5 Prinzipskizze eines Streckenverschlusses (Damm) /ROT 04/

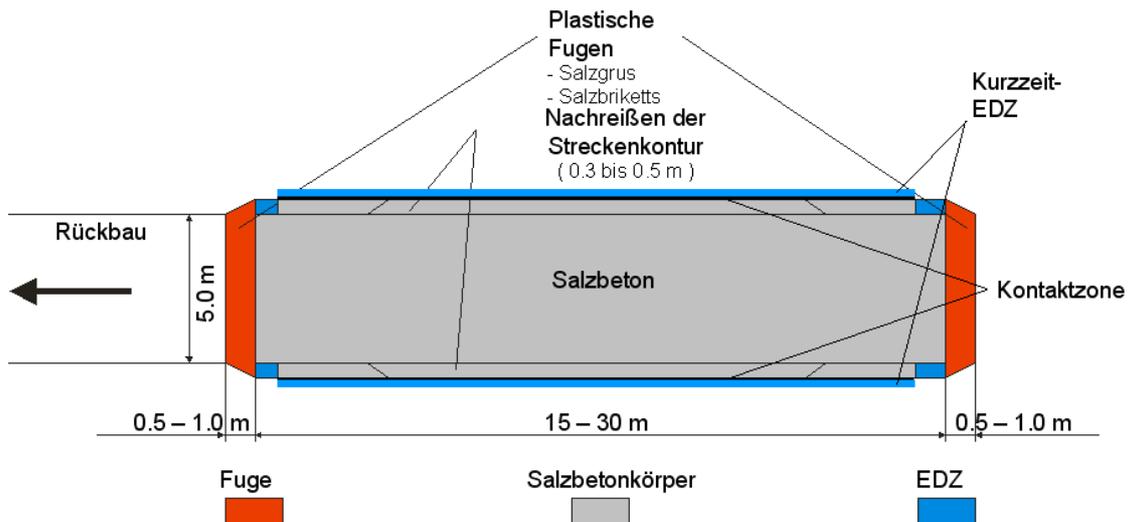


Abb. 6 Entwurf eines Streckenverschlusses für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) /BOL 08/

In Ergänzung zum Konzept der Streckenverfüllung mit Salzgrusversatz wird gegenwärtig ein Konzept eines so genannten „Selbst Verheilenden Versatzes (SVV)“ entwickelt. Hierbei handelt es sich um ein feinkörniges, trockenes Versatzmaterial auf Basis eines wasserfreien Magnesiumsulfats, das pneumatisch in die zu versetzenden Hohlräume eingebracht werden kann /HER 05/.

Das Versatzmaterial reagiert bei Lösungszutritt unter Volumenzunahme. Die Bildung hydratisierter Minerale führt in einem geschlossenen Volumen zum Aufbau eines Kristallisationsdruckes, der das Porenvolumen reduziert und zur Abdichtung führt. Ein weiteres Zutreten von Lösungen wird damit unterbunden. Die zutretende Lösung wird bei dieser Reaktion vollständig verbraucht, so dass der Versatz am Ende fast trocken ist.

Das System wurde im Rahmen von Labor- und In-situ-Versuchen erprobt. Die Experimente erfolgten mit identischem Versuchsaufbau, aber in unterschiedlichem Maßstab, um Skalierungseffekte beim Bau von Abdichtungen in einem Endlager zu vermeiden. Die ersten Laborversuche erfolgten in kleinen Druckzellen. Für die anschließenden Technikumsversuche wurden Rohre von 1 m Länge und 40 cm Durchmesser verwendet (Abb. 7). Die In-situ-Versuche wurden auf der 850-m-Sohle der Schachanlage Asse in Bohrlöchern von 15 m Länge und 50 cm Durchmesser durchgeführt (Abb. 8).

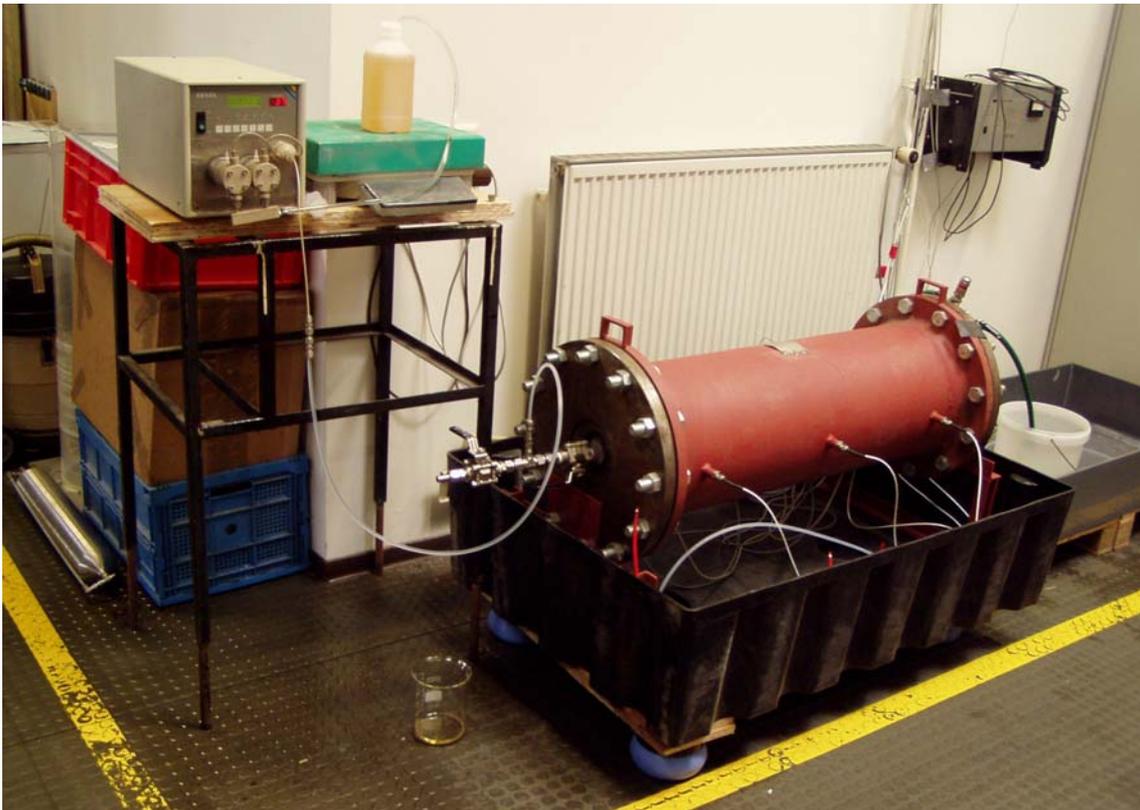


Abb. 7 Technikumsversuch mit „Selbst Verheilendem Versatz (SVV)“: Messung des Kristallisationsdruckes in einem Rohr von 1 m Länge und 40 cm Durchmesser



Abb. 8 In-situ-Versuch mit „Selbst Verheilendem Versatz (SVV)“ in der Schachanlage Asse in Bohrlöchern von 15 m Länge und 50 cm Durchmesser

Die bisherigen Untersuchungen haben eine signifikante Reduzierung der Versatzporosität von ursprünglich 50 % auf ca. 2 % nachgewiesen /HER 05/. Es wurden Permeabilitätswerte von ca. 10^{-18} - 10^{-19} m² erreicht. Die gesteinsmechanischen Eigenschaften der entstandenen Abdichtung sind mit den Werten von ungestörtem Steinsalz vergleichbar. Die geochemischen Modellierungen ergeben eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Die Berechnungen zeigen, dass sich langfristig stabile Mineralphasen einstellen.

Am Ende der Betriebsphase eines Endlagers werden die Schächte mit Schachtverschlüssen verschlossen und die Schachtröhren verfüllt. Durch den Schachtverschluss wird der lokale Verlust des Isolationsvermögens im Schachtbereich infolge der Verletzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches kompensiert. Die Schachtverschlüsse sollen sowohl den Eintritt von Grundwasser über die Schachtröhren in das Endlagerbergwerk als auch einen Austritt von Gasen und Lösungen über die Schachtröhren aus dem Endlager verhindern.

Schachtverschlüsse sind vom Prinzip her ähnlich aufgebaut wie ein Streckenverschluss. Ein Konzept für einen Schachtverschluss im Salinar wurde bereits in den 1990er Jahren von /SCH 96/ entwickelt, das in (Abb. 9) dargestellt ist. Dieser Schachtverschluss besteht aus einem gleitfähigen Dichtelement im oberen Salinarbereich, das auf einer setzungsarmen Verfüllsäule als statischem Widerlager aufbaut.

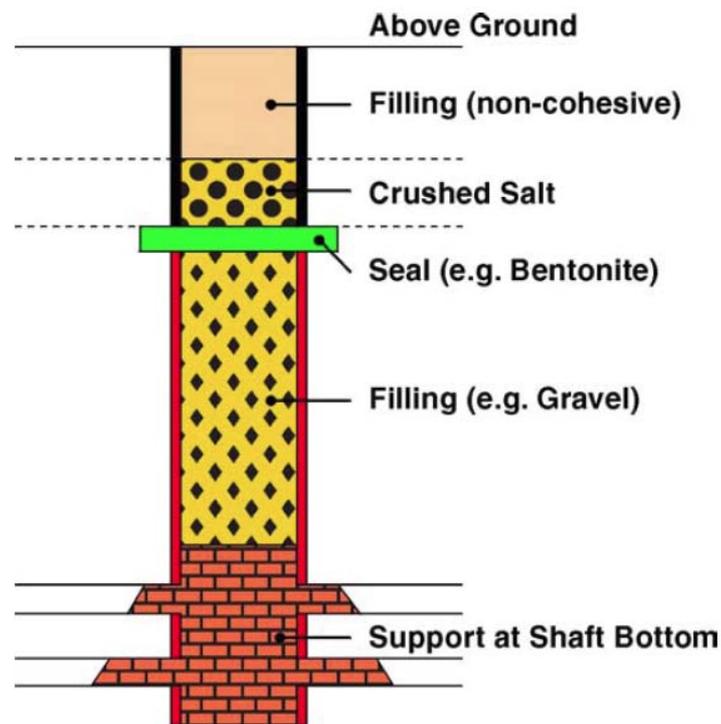


Abb. 9 Wesentliche Elemente eines Schachtverschlusses im Salinar /ROT 04/

In einem in-situ Experiment in Salzdetfurth wurden Effektivität und Stabilität eines im Wesentlichen aus Bentonit-Pellets bestehenden Schachtverschlusses erfolgreich getestet /BRE 01/.

Basierend auf dem Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit und Wirksamkeit eines Schachtverschlusses werden die Detailplanungen für den Schachtverschluss eines Endlagers im Verlauf der Betriebsphase an den jeweiligen Stand von Wissenschaft und Technik angepasst.

4 Literatur

(Hinweis: dieses Literaturverzeichnis enthält alle in diesem Anhang zitierte Literatur)

- /ALA 99/ Aland, H.J.; Handke, N.; Leuschner, J.; Bodenstein, J.; Maelzer, K.; Sitz, P.; Gruner, M.; Springer, H.: Langzeitfunktionstüchtiger Streckenverschluss aus kompaktiertem Bentonit im Bergwerk Sondershausen. – Geotechnik, 22 (1), S. 56-62, 1999.
- /BEC 04/ Bechthold, W.; Smailos, E.; Heusermann, S.; Bollingerfehr, W.; Bazargan Sabet, B.; Rothfuchs, T.; Kamlot, P.; Grupa, J.; Olivella, S.; Hansen, F. D.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project). – Final Report, European Commission, Nuclear Science and Technology, EUR 20621 EN, Luxembourg, 2004.
- /BMU 01/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV). - Ausfertigungsdatum: 20. Juli 2001, BGBl. I S. 1714, (2002, 1459), zuletzt geändert durch Artikel 3 § 15 Nr. 1 und 2 des Gesetzes vom 13. Dezember 2007 (BGBl. I S. 2930).
- /BOL 08/ Bollingerfehr, W.: Entwicklung und Stand von Konzepten für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Steinsalz (inkl. Demonstrationsversuche zur Direkten Endlagerung). - Workshop 40 Jahre Endlagerung 06/2008. - http://www.dbetec.de/fileadmin/dbetec/pdf/veroeffentlichungen/2008/oo_Bollingerfehr_Workshop%2040%20Jahre%20Endlagerung_Bo.pdf (23.07.2008).
- /BRE 01/ Breidung, K.P.: Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken - Forschungsvorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht SA II. - In: Untertägige Entsorgung, Fünftes Statusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen am 15. und 16. Mai 2001 in Leipzig, FZKA-PTE Nr. 7, S. 309-392, Karlsruhe, 2001.
- /DAH 98/ Dahlström, L.O.: Testplan for the Prototype Repository. - Svensk Kärnbränslehantering AB, Progress report HRL-98-24, Stockholm, 1998.

- /DEB 04/ De Bock, C.; Londe, L.; Blümling, P.; Rothfuchs, T.; Breen, B.; Huertas Ilera, F.: ESDRED. Deliverable 1 of Module 1, Work Package 1: Input Data and Functional Requirements: Buffer Construction Technology. - European Commission Contract Number FI6W-CT-2004-508851, 23 December 2004 (begrenzter Verteiler).
- /DRO 96/ Droste, J.; Feddersen, H.-K.; Rothfuchs, T.; Zimmer, U.: The TSS-Project: Thermal Simulation of Drift Emplacement. Final Report Phase 2. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-127, Köln, 1996.
- /DRO 01/ Droste, J.; Feddersen, H.-K.; Rothfuchs, T.: Experimental Investigations on the Backfill Behaviour in Disposal Drifts in Rock Salt (VVS-Project). – Final Report, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-173, 138 S., Köln, 2001.
- /ENG 91/ Engelmann, H.J.: Entwicklung von Dammbauwerken für ein Endlager im Salzgestein. - In: Dammbau im Salzgebirge, Untersuchung der Erprobung eines Systems von Baukomponenten zur Entwicklung und Optimierung eines Dammbauwerkes, Informationsveranstaltung am 5. und 6. Dezember 1990, zusammengestellt von Bollingerfehr, W., Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE) (Hrsg.), S. 23-37, Peine, 1991.
- /ENR 00/ ENRESA: Full-Scale Engineered Barriers Experiment for a Deep Geological Repository for High Level Radioactive Waste in Crystalline Host Rock. - Final Report, European Commission Contract No. FI4WCT 95 0006, Madrid, 2000.
- /GSF 04/ GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit: Asse. Ein Bergwerk wird geschlossen. - Broschüre, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Schachtanlage Asse, 2. Auflage, Neuherberg, 2004.
- /HER 05/ Herbert, H.J.; Kull, H.; Müller-Lyda, I.: Weiterentwicklung eines Selbst Verheilenden Versatzes (SVV) als Komponente im Barriersystem Salinar. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-220, 53 S., Köln, 2005.

- /JOC 00/ Jockwer, N.; Miehe, R.; Müller-Lyda, I.: Untersuchungen zum Zweiphasenfluss und diffusiven Transport in Tonbarrieren und Tongesteinen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-167, Köln, 2000.
- /MIE 03/ Miehe, R.; Kröhn, K.P.; Moog, H.: Hydraulische Kennwerte von tonhaltigen Mineralgemischen zum Verschluss von Untertagedeponien KENTON. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-193, Köln, 2003.
- /PTB 83/ Physikalisch-technische Bundesanstalt (PTB): Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. - PTB Info-Blatt 2/83; mit Quellenangabe: Bundesanzeiger 35, Nr. 2 vom 5. Januar 1983, Bonn, 1983.
- /ROT 99/ Rothfuchs, T.; Feddersen, H.K.; Kröhn, K.P.; Miehe, R.; Wieczorek, K.: The DEBORA-Project: Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste – Phase II. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-161, 109 S., Köln, 1999.
- /ROT 03/ Rothfuchs, T.; Dittrich, J.; Droste, J.; Müller, J.; Zhang, C.-L.: Final Evaluation of the Project „Thermal Simulation of Drift Emplacement“ (TSDE-Project). – Final Report, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-194, 137 S., Köln, 2003.
- /ROT 04/ Rothfuchs, T.; Droste, J.; Herbert, H.-J.; Kröhn, K.-P.; Wieczorek, K.; Zhang, C.-L.: CROP - Cluster Repository Project: A Basis for Evaluation and Developing Concepts of Final Repositories for High-Level Radioactive Waste - German Country Annexes. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-201, 177 S., Köln, 2004.
- /ROT 05/ Rothfuchs, T.; Jockwer, N.; Miehe, R.; Zhang, C.L.: Self-sealing Barriers of Clay/Mineral Mixtures in a Clay Repository. SB Experiment in the Mont Terri Rock Laboratory, Final Report of the Pre-Project. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-212, 102 S., Köln, 2005.

- /SCH 93/ Schneefuss, J.; Droste, J.; Gommlich, G.: Arbeiten zur direkten Endlagerung von Brennelementen. Teil I: Thermische Simulation der Streckenlagerung. - GSF-Bericht 26/93, 108 S., Neuherberg, 1993.
- /SCH 96/ Schmidt, M.W.; Fruth, R.; Stockmann, N.: Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken: Vorprojekt. Band 1 und Band 2. - GSF-Bericht 32/95, Neuherberg, 1996.
- /SIT 01/ Sitz, P.; Koch, G.; Gruner, M.: Langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke im Salinar. - In: Untertägige Entsorgung, Fünftes Statusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen am 15. und 16. Mai 2001, Leipzig, FZKA-PTE Nr. 7, S. 393-436, Karlsruhe, 2001.
- /SIT 03/ Sitz, P.; Gruner, M.; Rumphorst, K.: Bentonitdichtelemente für langzeitsichere Schachtverschlüsse im Salinar. - Kali und Steinsalz, Nr.1, S. 6-13, 2003.
- /STO 94/ Stockmann, N.; Beinlich, A.; Droste, J.; Flach, D.; Gläß, F.; Jockwer, N.; Krogmann, P.; Miehe, R.; Müller, J.; Schwägermann, F.; Wallmüller, R.; Walter, F.; Yaramanci, U.: Dammbau im Salzgebirge. Abschlußbericht Projektphase II. Berichtszeitraum vom 01.07.1989 - 31.12.1992. – GSF-Bericht 18/94, 315 S., Neuherberg, 1994.
- /WIT 96/ Wittke, W.: Abdichtung von Strecken im Endlager Morsleben mit hochverdichtetem Bentonit. – Geotechnik, 19 (4), S. 304-311, 1996.

5 Weiterführende Literatur

(Hinweis: Dieses Verzeichnis enthält als Ergänzung wichtige weiterführende Literatur zum Thema dieses Anhangs, die in diesem Anhang nicht explizit zitiert wurde. Zitierte Literatur findet sich im "Literaturverzeichnis")

Boese, B.; Buhmann, D.: Einfluß von Stützversatz und anderen technischen Maßnahmen auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Salinar. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-162, 116 S., Köln, 2000.

Brenner, J.; Feddersen, H.K.; Gies, H.; Miehe, R.; Rothfuchs, T.; Storck, R.: Untersuchung von Altversatz als Analogon zur Konvergenz und Kompaktierung versetzter untertägiger Hohlräume im Salz über lange Zeiträume - Phase 1. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-147, 67 S., Köln, 1999.

Fein, E.; Müller-Lyda, I.; Storck, R.: Ableitung einer Permeabilitäts-Porositätsbeziehung für Salzgrus und Dammbaumaterialien. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-132, 99 S., Köln, 1996.

GRS: Erzeugung und Verbleib von Gasen in einem Endlager für radioaktive Abfälle. - Bericht über den GRS-Workshop vom 29. und 30.05.1996 in Braunschweig, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-129, Köln, 1997.

Herbert, H.J.: Self sealing backfill (SVV) - A salt based material for constructing seals in salt mines. - The Mechanical Behavior of Salt - Understanding of THMC Processes in Salt, 12 S., Taylor & Francis Group, London, 2007.

Herbert, H.J.; Kasbohm, J.; Venz, C.; Kull, H.; Moog, H.C.; Sprenger, H.: Langzeitstabilität von Tondichtungen in Salzformationen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-185, 240 S., Köln, 2002.

Herbert, H.J.; Moog, H.C.: Untersuchungen zur Quellung von Bentoniten in hochsalinaren Lösungen. Abschlußbericht. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-179, 148 S., Köln, 2002.

- Herbert, H.J.; Moog, H.C.; Meyer, L.; Reichelt, C.: Modellentwicklung zur Quellung hochkompakter Bentonite. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-211, 103 S., Köln, 2006.
- Kröhn, K.P.: Modelling the Re-Saturation of Bentonite in Final Repositories in Crystalline Rock. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-199, 135 S., Köln, 2004.
- Kull, H.; Flach, D.; Graefe, V.: Zweiphasenflussbedingungen in einer homogenen granitischen Gesteinsmatrix. Abschlussbericht. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-172, 157 S., Köln, 2001.
- Kull, H.; Herbert, H.J.: A new self sealing backfill material for repositories in salt formations. - Proceedings Waste Management Conference 2005, February 27 – March 3, 2005, Tucson, Arizona (USA), 2005.
- Miehe, R.; Wiczorek, K.: Barriereverhalten von Anhydrit. Phase 2 - BARIANO. Abschlussbericht. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-209, 38 S., Köln, 2005.
- Mönig, J.: Realistische Abschätzung der Strahlenschädigung von Steinsalz bei Einlagerung von HAW in Bohrlöchern. - GRS-142, 92 S., Köln, 1997.
- Müller-Lyda, I.: Eigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial im Wirtsgestein Salz. - Bericht über den Workshop des Bundesamts für Strahlenschutz und des Projektträgers Entsorgung vom 18. und 19. Mai 1999. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-143, 78 S., Köln, 1999.
- Müller-Lyda, I.: Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz. Ableitung einer Permeabilitäts-Druck-Relation für Langzeitsicherheitsanalysen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-151, 77 S., Köln, 1999.
- Müller-Lyda, I.; Birthler, H.; Fein, E.: Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsrelationen für Salzgrus. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-148, 74 S., Köln, 1999.

- Sander, W.; Herbert, H.J.: Wirksamkeit der Abdichtungen von Versatzmaterialien: Geochemische Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Salzversatz mit Zuschlagstoffen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-180, 266 S., Köln, 2002.
- Tix, C.; Hirsekorn, R.P.: Auswertung von In-situ-Konvergenz-Daten und Ableitung eines Konvergenzansatzes. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-133, 39 S., Köln, 1996.
- Zhang, C.L.; Dittrich, J.; Müller, J.; Rothfuchs, T.: Experimental Study of the Hydromechanical Behaviour of the Callovo-Oxfordian Argillites. Part of the MODEX-REP Project. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-187, 75 S., Köln, 2002.
- Zhang, C.L.; Rothfuchs, T.; Dittrich, J.; Müller, J.: Investigations on Self-sealing of Indurated Clay. Final report. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-230, 67 S., Köln, 2008.