Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

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

GRS - 143

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

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

Ingo Müller-Lyda

Dezember 1999

Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) im Rahmen des Vorhabens 9G 213 762 erstellt worden.

Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor.

GRS - 143
ISBN 3-931995-02-X

Deskriptoren:
Ausbreitung, Kenndaten, Konferenz, Modell, Salz, Technische Barriere

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Programm des Workshops 3

3 Eigenschaften und Kenngrößen von Salzgrusversatz 7

3.1 Kennwerte von losen Salzgrusschüttungen 8

3.2 Lastabtragung bei der Lagerung in vertikalen Bohrlöchern 10

3.3 Datenbasis für Temperatur- und Transportrechnungen 12

3.4 Stoffgesetz für Salzgrus 12

3.5 Permeabilität von Salzgrus 16

3.6 Radionuklidrückhaltung 19

4 Modellierung der Schadstoffausbreitung 21

4.1 Bedeutung der Versatzeigenschaften in Langzeitsicherheitsanalysen 21

4.2 Zweiphasenströmungen in Salzgrus 22

5 Zusammenfassung 25

6 Literaturverzeichnis 29

7 Anhang: Abstracts zu den Einzelvorträgen 31

1 Einleitung

Salzgrus wird wegen seiner mineralogischen, chemischen und thermomechanischen Verträglichkeit mit dem Wirtsgestein als Versatz und Baumaterial für technische Barrieren in Endlagern im Salinar favorisiert. Neben diesen Gründen sprechen außerdem die gute Verfügbarkeit und Kostenvorteile für einen Versatz mit reinem Salzgrus oder mit einem hydraulisch abbindenden Versatz mit Salzgrus als Zuschlagstoff. Neben der konventionellen Stützwirkung hat der Versatz in einem Endlager eine Vielzahl von weiteren sicherheitsrelevanten Funktionen zu erfüllen. Hieraus ergeben sich besondere Anforderungen an das Material und die Versatzeinbringung und ein Bedarf an Daten, auf denen die technischen Auslegungen und die Sicherheitsnachweise beruhen. Mit der Erfüllung der verschiedenen Aufgaben soll der Versatz in der Betriebsphase des Endlagers zum Strahlenschutz und zur bergmännischen Sicherheit beitragen. Daneben soll der Versatz auch dazu beitragen, daß die Ausbreitung von Schadstoffen aus den eingelagerten Abfällen in einem Maß verhindert, reduziert oder verzögert wird, das aus den Schutzzielen für die Endlagerung vorgegeben ist.

Wegen der relativ großen Bedeutung des Versatzes für die Sicherheit eines Endlagers im Salzgestein wurden seit langem in verschiedenen Forschungseinrichtungen FuE-Arbeiten durchgeführt, in denen die vielen besonderen Eigenschaften von Salzgrus untersucht wurden. In Deutschland wurden diese Arbeiten entweder vom BMBF als anwendungsorientierte Grundlagenforschung gefördert oder als anlagenbezogene FuE vom Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) in Auftrag gegeben. Durch die Ergebnisse aus diesen und aus weiteren ausländischen FuE-Arbeiten liegen umfangreiche Kenntnisse über die Eigenschaften und das Verhalten von Salzgrus unter den Bedingungen in einem Endlager vor. Damit erhob sich die Frage, ob der mittlerweile erreichte Kenntnisstand ausreicht, die Eignung von Salzgrus als Versatz in einem Endlager im Salinar festzustellen, bzw. welche Lücken hierfür aus heutiger Sicht noch bestehen.

Auf Grund dieser Fragestellung wurde vom Bundesamt für Strahlenschutz und vom Projektträger des BMBF/BMWi für Entsorgung (PTE) gemeinsam ein Workshop über die Eigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial im Wirtsgestein Salz veranstaltet. Der Workshop fand am 18. und 19. Mai 1999 im BfS in Salzgitter mit ca. 60 Teilnehmern statt und wurde von der GRS organisiert. Ziel war es, die aktuellen Ergebnisse der FuE-Arbeiten zum Salzgrus aus den verschiedenen nationalen Forschungseinrichtungen vorzustellen und im Expertenkreis zu diskutieren. Damit sollte der aktuelle

Kenntnisstand ermittelt und die Grundlage für die Bewertung der Eignung von Salzgrus als Versatz in einem Endlager im Salinar geschaffen werden.

Die Errichtung, der Betrieb und die Stillegung eines Endlagers unterliegen einer Reihe rechtlicher Bestimmungen, in denen jeweils Schutzziele festgelegt sind, deren Einhaltung durch entsprechende Sicherheitsanalysen nachgewiesen werden muß. Die verschiedenen Sicherheitsanalysen umfassen

- den bestimmungsgemäßen Endlagerbetrieb,
- betriebliche Störfälle,
- die thermomechanische Beanspruchung des Wirtsgesteins, des Deck- und Nebengebirges,
- die thermische Beeinflussung des Grundwassers,
- Hebungen und Senkungen der Geländeoberfläche,
- die Kritikalität sowie
- die Langzeitsicherheit.

Die Anforderungen an den Salzgrus, die sich aus den einzelnen Schutzzielen ableiten, können für die Betriebsphase und die Nachbetriebsphase gleich, aber auch konkurrierend sein. So kann beispielsweise beim Einbringen von Blas- oder Schleuderversatz Lauge zur Staubbekämpfung zugesetzt werden, wodurch sich in der Nachbetriebsphase Beeinflussungen u.a. bei der Gasbildung und bei der Versatzkompaktion ergeben. Die Analyse der einzelnen Vorgänge im Salzgrusversatz und in den technischen Barrieren eines Endlagers erfordert neben den Materialdaten auch geeignete Modelle, mit denen sich die einzelnen Vorgänge quantitativ beschreiben lassen. Insofern ist die Modellierung bzw. die Entwicklung geeigneter Modelle von großer Bedeutung für die Sicherheitsnachweise für ein Endlager; sie sind daher ein wichtiger Bestandteil der diesbezüglichen FuE-Arbeiten.

2 Programm des Workshops

Das Programm des Workshops wurde in eine Sitzung mit Übersichtsvorträgen und drei Einzelsitzungen zu den Themenkomplexen: Betriebsphase, Nachbetriebsphase und Modellierung unterteilt. Bei den Einzelbeiträgen zu übergreifenden Themen, wie der Kompaktion oder der Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus, war die Zuordnung nicht eindeutig, d.h. die Themenkomplexe sind nicht als scharf voneinander abgegrenzt anzusehen. Die Themen und Referenten der Einzelvorträge sind in den folgenden Tabellen aufgeführt. Zu jedem Vortrag wurde von den Referenten eine ca. 2-seitige Kurzfassung zur Verfügung gestellt. Diese Abstracts sind im Anhang in Kapitel 7 dieses Berichts enthalten.

Auf dem Workshop wurden insgesamt 24 Fachvorträge gehalten. Die erste Sitzung beinhaltete drei Übersichtsvorträge von BfS und PTE (Nr. 1 bis 3 in Tabelle 1) und zwei Beträge von der DBE und der GRS, in denen die verschiedenen Aufgaben des Versatzes innerhalb der Betriebs- und der Nachbetriebsphase des Endlagers (Nr. 4 und 5 in Tabelle 1) dargestellt wurden.

Tabelle 1 Übersichtsvorträge

1. Endlagerkonzept und Projektstatus	G. Tittel	BfS
2. Aufgaben des Versatzes im Wirtsgestein Salz	H. Illi	BfS
3. Überblick über durchgeführte und laufende FuE-Arbeiten zum Salzversatz	K.-D. Closs	PTE
4. Aufgaben und Bedeutung von Salzgrusversatz während der Betriebsphase	N. Müller-Hoeppe	DBE
5. Relevanz des Versatzes für die Langzeitsicherheit	D. Buhmann	GRS

Die nächste Sektion enthielt sechs Vorträge (Nr. 6 bis 11 in Tabelle 2) über experimentelle FuE-Arbeiten, deren Thematik überwiegend Fragestellungen aus der Betriebsphase berührt. Die im Beitrag Nr. 7 angekündigten Ergebnisse über Messungen zur Lastabtragung konnte wegen Ausfalls des Referenten nur verkürzt wiedergegeben werden. Aus diesem Grund ist im Anhang zu diesem Bericht auch kein Abstract zu diesem Thema enthalten. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse über die Lastabtragung bei der Bohrlochlagerung durch die Einbettung der Gebinde in Salzgrus ist in der Publikation [6] des Forschungszentrums Jülich enthalten.

Tabelle 2 Vorträge über Meßergebnisse an Salzgrus mit überwiegendem Bezug auf die Eigenschaften von Salzgrus mit Relevanz für die Betriebsphase

6. Schüttgutmechanische Eigenschaften	D. Höhne	TU-FG
7. Lastabtragung bei der Bohrlochlagerung	W. Feuser	FZJ
8. Abschirmung und Rückhaltewirkung	V. Kunze	BfS
9. Salzgrus als Flammensperre	H. Brücher	FZJ
10. Versuche zur Versatzeinbringtechnik	W. Bollingerfehr	DBE
11. Laborversuche an Versatzvarianten in der Oedometerzelle	D. Stührenberg	BGR
12. Erfahrungen aus dem Betrieb des ERAM	G. Fischer	DBE
13. Ergebnisse der begleitenden Untersuchungen bei der Verfüllung des FB Asse	G. Gommlich	GSF

Da in der Oedometer- und Triaxialzelle der BGR sowohl die Kompaktion als auch die Permeabilität von Salzgrus gleichzeitig gemessen werden, wurden diese Ergebnisse gemeinsam in einem Beitrag dargestellt, der wegen des großen Umfangs auf zwei Einzelvorträge aufgeteilt wurde (Nr. 11 und Nr. 14). Den Abschluß dieses Themenkomplexes bildeten zwei Vorträge über Erfahrungen mit Salzgrus aus dem Betrieb des ERA Morsleben und bei der Verfüllung des Salzbergwerks Asse.

Tabelle 3 Vorträge über Meßergebnisse an Salzgrus mit überwiegendem Bezug auf die Eigenschaften von Salzgrus mit Relevanz für die Nachbetriebsphase

14. Triaxiale Kompaktionsversuche, Permeabilitätsversuche und Langzeitprognosen	D. Stührenberg	BGR
15. Entwicklung und Validierung eines Stoffgesetzes für den Referenzversatz	E. Korthaus	FZK
16. Ergebnisse aus In-situ-Versuchen (Überblick)	T. Rothfuchs	GRS
17. Materialmodelle und Benchmark-Berechnungen	S. Heusermann	BGR
18. Wärmeleitfähigkeit	W. Bechthold	FZK
19. Zusammenhang von Permeabilität und Porosität von Salzgrus	I. Müller-Lyda	GRS
20. Durchlässigkeitsverhalten von Steinsalzversatz gegenüber Laugen unter Berücksichtigung von Lösungsvorgängen	H. Fröhlich	BIG
21. Experimentelle Bestimmung der Zweiphasenfluß-Parameter von verdichtetem Salzgrus	G. Pusch	TU CLZ
22. Radionuklidrückhaltung in Salzgrus und Einfluß von Zuschlagstoffen	B. Kienzler	FZK

Im dritten Teil des Workshops standen die hydraulischen Kennwerte und die Transportparameter von Salzgrus im Vordergrund (Beiträge Nr. 14 bis 22 in Tabelle 3). Daneben befaßte sich der letzte Vortrag mit den chemischen Wechselwirkungen zwischen Salzgrus und den Schadstoffen. Zum Themenkomplex der Modellierung wurden

zwei Beiträge präsentiert, deren Schwerpunkt auf den besonderen Problemen der Beschreibung von Zweiphasenströmungen lag, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4 Modellierung des Fluidtransports durch Versatz

23. Prinzipmodelle zur Beschreibung des Fluidtransports	K.-P. Kröhn	GRS
24. Zweiphasige Modellierung des Fluid- und Radionuklidtransports in Salzgrus	W. Müller	ISTec

Nach Abschluß der Fachvorträge wurden die Vorträge zu den einzelnen Themenkomplexen und die Ergebnisse der darüber geführten Diskussionen in kurzen Reviews zusammengefaßt.

3 Eigenschaften und Kenngrößen von Salzgrusversatz

Bei den meisten der in Deutschland durchgeführten Messungen an Salzgrus wurde Material verwendet, das als „Referenzversatz" bezeichnet wird. Obwohl hierfür keine verbindliche Spezifikation existiert, wird darunter Salzgrus aus dem Forschungsbergwerk Asse mit einer maximalen Korngröße von 31,5 mm und dem natürlichen Feuchtegehalt von ca. 0,1 Gew.-% verstanden, der bei Auffahrungen mit Teilschnittmaschinen anfällt und untertägig gelagert wurde. Eine ausführliche Zusammenstellung der Eigenschaftsdaten des Referenzversatzes mit ihren zugehörigen Bandbreiten findet sich in [1].

In einigen Beiträgen wurde der Begriff "feuchter Salzgrus" mit unterschiedlicher Bedeutung verwendet. Da einige Kenngrößen von Salzgrus, wie der Kompaktionswiderstand oder die Permeabilität, durch den Feuchtigkeitsgehalt erheblich beeinflußt werden können, muß die jeweils zugrunde gelegte Definition beachtet werden. In den Beiträgen 9, 10, 11 besagt dieser Begriff, daß dem Salzgrus Flüssigkeit in Form von Wasser oder Lauge zugemischt ist, die durch Kapillarkräfte im Porenraum fixiert ist. Hierbei werden in der Regel Wassergehalte bis zu etwa 2 bis 3 Gewichts-% eingestellt.

Im Unterschied zu dieser Definition wird in den Beiträgen 19 und 20 Salzgrus, der Wasserdampf aus der Umgebungsluft adsorptiv gebunden hat, als feucht bezeichnet. Solange die relative Luftfeuchtigkeit unterhalb von 76% liegt, wird kein NaCl gelöst, und es entsteht noch keine flüssige Phase. Dagegen können sich leichter lösliche Bestandteile des natürlichen Steinsalzes, wie z.B. $MgCl_2$, bereits bei niedrigeren Luftfeuchten auflösen. Damit können sich auch Laugen bilden, wenn die relative Feuchtigkeit der Luft im Porenraum des Versatzes geringer ist. Diese benetzen die Oberflächen der Salzkristalle und können dadurch die mechanischen Eigenschaften oder die Permeabilität verändern. Nach den in [5] wiedergegebenen gemessenen Wasser-Sorptionsisothermen von natürlichem Steinsalz liegen dessen Feuchtegehalte bei 75% relativer Luftfeuchte im Bereich von 1 Gewichts-%.

Demgegenüber hat sich für Salzgrus mit dem natürlichen Feuchtegehalt, der für Asse-Salz ungefähr 0,1 Gewichts-% beträgt, die Bezeichnung „trockener Salzgrus" eingebürgert. Natürlicher Salzgrus, bei dem die Feuchte durch Aufheizung künstlich reduziert wurde, wird üblicherweise als „getrocknet" bezeichnet.

3.1 Kennwerte von losen Salzgrusschüttungen

Die schüttgutmechanischen Kennwerte von trockenem Salzgrus wurden in einem umfangreichen Programm von der TU Freiberg in Abhängigkeit von den wesentlichen Materialparametern innerhalb der betrieblich bedingten Bandbreiten der Temperatur, Feuchte, Lagerzeit und Korngrößenverteilung gemessen (siehe Beitrag 6). Die wichtigsten dieser Kennwerte sind die

- Schüttgutdichte,
- der innere (effektive) Reibungswinkel,
- die Druckfestigkeit ,
- der Wandreibungswinkel und der Seitendruckbeiwert für verschieden rauhe Materialien als Reibpartner einschließlich festes Steinsalz.

Die Daten wurden ursprünglich für die Interpretation von Meßdaten und die Modellierung der Lastabtragung in vertikalen Bohrlöchern (siehe Beitrag 7) ermittelt. Wegen der Ausrichtung des Meßprogramms auf die Untersuchungen zur Lastabtragung wurde ein im Vergleich zum Referenzversatz feineres Material mit 10 bzw. 20 mm oberem Korndurchmesser untersucht. Die Messungen haben keine nennenswerten Unterschiede zwischen dem 10-mm- und dem 20-mm-Material ergeben. Ebenso hat auch der Vergleich der Ergebnisse für Salzgrusproben aus Auffahrungen im Älteren und im Jüngeren Steinsalz keine signifikanten Unterschiede gezeigt.

Die Meßergebnisse sind bereits weitgehend publiziert [10] oder werden demnächst publiziert. Insgesamt steht eine sehr umfangreiche Datenbasis für die schüttgutmechanischen Kennwerte zur Verfügung, die als ausreichend für die technischen Planungen und Auslegungen für den bestimmungsgemäßen Betrieb anzusehen sind. Zu berücksichtigen ist nur die Tatsache, daß die Messungen an Material mit maximal 20 mm oberem Korndurchmesser erfolgten.

Aus Gründen der betrieblichen Sicherheit müssen untertägige Explosionen verhindert oder zumindest in ihren Auswirkungen beschränkt werden. Innerhalb des Endlagers besteht die Möglichkeit der Bildung zündfähiger Wasserstoff-Luft- oder Methan-Luftgemischen. Da insbesondere die Verbrennung von Wasserstoff-Luftgemischen bereits bei sehr niedrigen Zündenergien ausgelöst wird (H_2: 13 µJ, CH_4: 300 µJ), können Explosionen in einem Endlager nicht ausgeschlossen werden. Zur Begrenzung der Aus-

wirkungen solcher Explosionen können vorsorglich Flammensperren eingerichtet werden, an denen deflagrierende Mischungen aus Brenngasen und Sauerstoff unter ihre Verbrennungstemperatur abgekühlt und dadurch gelöscht werden. Auf Grund der spezifischen Oberfläche, Wärmeleitung und –kapazität von Salzgrus können Flammensperren durch Salzgrusschüttungen realisiert werden.

Hierzu wurden vom Forschungszentrum Jülich umfangreiche Deflagrations-Durchschlagversuche im Labor durchgeführt, bei denen die als wesentlich identifizierten Parameter variiert wurden ([2] und Beitrag Nr.4). Diese Parameter sind der Feinkornanteil, die Temperatur, die Feuchte und die Lagerbedingungen des Salzgruses, die H_2-Konzentration, die Zündrichtung und –position und die Dicke und Querschnittsfläche der Salzgrusschüttung Bei den Untersuchungen wurde die Löschwahrscheinlichkeit empirisch aus einer Vielzahl von Durchschlagversuchen ermittelt, und daraus mit statistischen Verfahren eine extrapolierte sichere Schüttungshöhe abgeleitet. Diese Größe ist definiert als Mindesthöhe einer Salzgrusschüttung, die einen Zünddurchschlag mit einer Restunsicherheit von 10^{-6} verhindert.

Die Messungen ergeben, daß der Feinkornanteil, der als relativer Massenanteil der Kornfraktionen des Salzgruses mit Durchmessern unter 2 mm definiert wurde, der Parameter mit dem größten Einfluß auf die Löschwirkung ist. Die Diagramme im Abstract zum Beitrag Nr. 9 zeigen, daß Salzgrusschüttungen mit Höhen > 20 cm und Feinkornanteilen > 40 Gew.-% Flammensperren darstellen. Bei niedrigeren Feinkornanteilen nimmt das Löschvermögen stark ab und verschwindet bei ca. 10% gänzlich. Versuche, bei denen sich die Salzgrusschüttung beim Auftreffen der Explosionsdruckwelle seitlich unbehindert ausdehnen konnte zeigen, daß die Löschwirkung erheblich reduziert wird, wenn die Schüttung unter der Wirkung des Explosionsdrucks ihre Integrität verliert.

Der Feinkornanteil in Salzgrus aus Auffahrungen mit Teilschnittmaschinen, bei dem die Kornfraktion mit $d > 32$ mm entfernt wurde, liegt im Bereich von 55%. Daher können Schüttungen aus Salzgrusversatz grundsätzlich als Flammensperren wirken. Feucht eingebrachter und anschließend getrockneter Salzgrus weist noch bessere Löscheigenschaften als trocken eingebrachtes Material auf. Alle anderen der untersuchten Parameter haben nur geringen Einfluß auf die Löscheigenschaft. Während die Löscheigenschaft von intakten Salzgrusschüttungen als hinreichend geklärt angesehen werden kann, ist die Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf reale Hohlraumgeome-

trien und –größen noch nicht gesichert, weil nicht bekannt ist, ob die Salzgrusschüttungen hier intakt bleiben. Die Firstspalte, die in mit Salzgrus versetzten Strecken auftreten können, werden als wichtigste potentielle Explosionsvolumina angesehen. Im Beitrag 4 wurde berichtet, daß bei den derzeitigen Planungen für den Endlagerbetrieb ein firstbündiger Abschluß über eine Länge von mindestens 15 cm als ausreichende Flammensperre angesehen wird.

Die Hauptbestandteile von Salzgrus, die Elemente Natrium und Chlor, besitzen wegen ihrer niedrigen Ordnungszahl nur ein relativ geringes Schwächungsvermögen für γ-Strahlung. Diese physikalisch bedingte Eigenschaft von Salzgrus stellt für den Endlagerbetrieb keinen Nachteil dar, da die erforderliche γ-Abschirmung einfach durch Salzgrusabdeckungen mit entsprechenden Schichtdicken erzielt werden kann. Die γ-Abschirmung von Salzgrusabdeckungen ist mit allgemein verfügbaren kommerziellen Programmen berechenbar (siehe Vortrag 8).

3.2 Lastabtragung bei der Lagerung in vertikalen Bohrlöchern

Die mit zunehmender Befüllung der vertikalen Bohrlöcher anwachsenden Stapellasten auf die unteren Abfallgebinde können durch allseitige Einbettung der Gebinde in Salzgrus größtenteils durch Scherkräfte auf die Bohrlochwand übertragen werden. Dadurch wird die mechanische Belastung der Abfallgebinde innerhalb der Beladephase eines Bohrloches begrenzt. Die Größe des Lastabtragungseffekts gestattet, daß die mechanische Integrität der Abfallgebinde ohne besondere Auslegung gegen hohe Stapellasten gewährleistet werden kann. Die Begrenzung der auf die Gebinde einwirkenden Drücke muß nur so lange gewährleistet sein, bis das Bohrloch vollständig befüllt und verschlossen wird.

Nach den Ergebnissen des Forschungszentrums Jülich (Beitrag Nr. 7 und [6]) steigt der maximale Druck in einem mit Salzgrus befüllten Bohrloch mit Lastabtragung auf einen beschränkten Wert $p(z)_{max}$ an. Die Größe dieses Drucks ist proportional zum Bohrlochdurchmesser, hängt jedoch nicht von der Bohrlochtiefe z ab.

$$p(z)_{\max} = \frac{\rho_S \cdot g \cdot R_B}{2 \cdot \mu \cdot k} \quad \text{für} \quad z \geq z_0 = \frac{R_B}{\mu \cdot k}$$

Hierbei bedeuten ρ_S die Schüttgutdichte des Salzgruses, g die Erdbeschleunigung, R_B den Borlochradius, μ den Reibungskoeffizienten zwischen Salzgrus und der Bohrlochwand und k den Seitendruckbeiwert. Mit typischen Werten für die Parameter (ρ_S = 1400 kg/m^3, R_B = 1 m, $\mu = 0{,}5$, $k = 0{,}4$) liegt die Größenordnung für $p(z)_{max}$ im Bereich von 35 kPa. Ohne Lastabtragung ($\mu = 0$) betrüge der hydrostatische Druck am Tiefsten eines 300 m tiefen Bohrlochs dagegen 4,2 MPa. Die Gültigkeit der obigen Relation wurde für weite Bereiche der Eingangsparameter experimentell im Technikumsmaßstab verifiziert. Insbesondere wurde gezeigt, daß der Druck bei Tiefen oberhalb der zu erwartenden z_0-Werte nicht weiter ansteigt. Bei der Interpretation der Meßwerte konnte auf die separat ermittelten schüttgutmechanischen Kennwerte von Salzgrus (vgl. Beitrag Nr. 6) zurückgegriffen werden.

Versuche mit geringer Wandreibung zeigen nach dem Ende der Befüllung einen geringen Zuwachs des Maximaldrucks durch die Kompaktion des Salzgruses. Der Effekt ist aber klein (ca. 40% in 2 Jahren) und stellt die Wirksamkeit der Lastabtragung innerhalb der Betriebszeit eines Bohrloches nicht in Frage. Neben Experimenten mit homogener Salzgrusbefüllung wurden auch solche mit simulierten, z.T. beheizten Abfallgebinden durchgeführt, die in Salzgrus eingebettet waren. In diesen Versuchen mit inhomogener Dichteverteilung wurde außerdem der Abstand der Abfallgebinde bzw. die Dicke der dazwischen liegenden Salzgrusschicht variiert. Die Druckverteilung läßt sich auch für diese komplizierteren Situationen mit der oben genannten Beziehung beschreiben, wobei dann entsprechend modifizierte Eingangsparameter, wie z.B. die mittlere Dichte der Abfälle und des Versatzes, einzusetzen sind.

Mit den bereits vorliegenden und den noch zu erwartenden experimentellen Ergebnissen aus den Lastabtragungsexperimenten und den Meßwerten der Schüttgutparameter läßt sich die Druckverteilung auf die in Salzgrus eingebetteten Abfallgebinde bei der Bohrlochlagerung für die Betriebszeit eines Bohrloches befriedigend quantitativ beschreiben. Bei der Verwendung von Salzgrus bleiben die Drücke auf einem sicherheitstechnisch unproblematisch niedrigen Niveau. Diese Aussage beruht auf einer Extrapolation von Meßdaten aus Versuchen im Technikumsmaßstab mit einem weitgehend validierten Übertragungsgesetz; insofern wurde die Wirksamkeit der Lastabtragung für tiefe Bohrlöcher noch nicht direkt demonstriert. Unklar und auch durch die noch andauernden Untersuchungen nicht abgedeckt sind die Auswirkung von starken Erschütterungen durch betriebliche Vorgänge oder seismische Aktivitäten.

3.3 Datenbasis für Temperatur- und Transportrechnungen

Durch die Laborexperimente und thermischen Analysen von Erhitzerversuchen, die im Rahmen des BAMBUS-Projekts zwischen 1996 und 1998 durchgeführt wurden, konnte die in den 80er Jahren erstellte Datenbasis für die Beschreibung des Wärmetransports in Salzgrus erheblich erweitert werden (siehe Beitrag Nr. 4). Die wichtigsten Daten hierfür sind die Dichte, die spezifische Wärme sowie die Wärme- und die Temperaturleitfähigkeit. Die Funktionen für Salzgrus basieren auf den entsprechenden Relationen für massives Steinsalz und berücksichtigen den Porositätseinfluß durch Faktoren, die ihrerseits linear von der Porosität abhängig sind. Diese, per linearer Regression abgeleiteten Relationen sind im Temperaturbereich zwischen 20 °C und 200 °C und für Porositäten zwischen 0% und ca. 30% durch Meßwerte abgesichert und werden in der Kurzfassung zum Beitrag Nr. 4 wiedergegeben.

Die Beziehungen sind innerhalb der erforderlichen Bandbreiten der Temperatur und Porosität durch Labormeßdaten abgedeckt und gestatten eine hinreichend genaue Berechnung der Wärmeausbreitung und Temperaturverteilung im Versatz. Bedarf an weiteren Untersuchungen wurde nicht festgestellt.

3.4 Stoffgesetz für Salzgrus

Im Vortrag Nr. 5 wurde gezeigt, daß die Stützwirkung und das Leervolumen des Versatzes zu den bestimmenden Faktoren der Schadstoffausbreitung aus einem Endlager zählen. In Langzeitsicherheitsanalysen daher hat die Modellierung der Versatzkompaktion, die unter der Einwirkung der Gebirgskonvergenz abläuft, einen hohen Stellenwert. Dementsprechend erfordern solche Modellierungen ein Stoffgesetz für Salzgrus, das die Kompaktion unter den im Endlager erwarteten Randbedingungen der Temperatur, des Druckes und der Feuchtigkeit in Abhängigkeit von der Zeit beschreibt. Als weitere, möglicherweise wichtige Einflußgrößen kommen noch materialabhängige Eigenschaften in Betracht, wie die Korngrößenverteilung oder die mineralogische Zusammensetzung.

Die Kompaktion von Salzgrus wurde auf dem Workshop in sechs Beiträgen (Nr. 5, 11, 14, 15, 16 und 17) behandelt oder angesprochen. Für die Beschreibung der Kompaktion von trockenem Salzgrus werden meistens die Stoffgesetz-Formulierungen von Hein [7] oder Zhang [15] oder auf diesen basierende Weiterentwicklungen, von de-

nen eine im Beitrag Nr. 15 beschrieben ist, verwendet. Die Relation nach [15] beruht auf einem phänomenologischen Ansatz, während die nach [7] eine physikalisch begründete Ableitung auf der Grundlage salzmechanischer Beziehungen darstellt. Im europäischen Rahmen werden auch noch weitere Formulierungen des Stoffgesetzes verwendet. Über diese und die Ergebnisse von Benchmark-Rechnungen, die im Rahmen des BAMBUS-Projekts [1] durchgeführt wurden, gab der Beitrag Nr. 17 eine Übersicht.

Aus dem Vergleich zwischen den Resultaten der Benchmark-Rechnungen und experimentellen Ergebnissen wurde als ein Ergebnis des BAMBUS-Projekts festgestellt, daß eine Prognose des thermomechanischen Verhaltens verfüllter Strecken und Bohrungen mit den derzeit verfügbaren Stoffgesetzen und Programmsystemen grundsätzlich möglich ist ([1], sowie Beitrag Nr. 17). Diese Aussage wird durch Vergleiche zwischen Experimenten im Labormaßstab und aus dem DEBORA-Vorhaben (Beitrag Nr. 16) untermauert. Dem entgegen steht die Tatsache, daß die Versatzkompaktion in dem In-situ-Großversuch zur Thermischen Simulation der Streckenlagerung (TSS-Versuch), insbesondere für die Bereiche mit hoher Temperatur, deutlich überschätzt wurden. Dieselbe Überschätzung zeigte sich auch bei dem Versuch der Validierung einer Variante der Heinschen Formulierung des Stoffgesetzes, die auf der Grundlage neuer, bei FZK/INE gemessener Kompaktionsraten erstellt worden war (Beitrag Nr. 15).

Der Grund für diese Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der Modellierung und des In-situ-Experiments ist nicht eindeutig geklärt. In den Laborexperimenten, bei denen die Kompaktion besser vorhergesagt bzw. nachträglich berechnet werden konnte, war immer eine homogene Korngrößenverteilung im Salzgrus gewährleistet. Daher kommen mögliche Entmischungen zwischen grob- und feinkörnigen Fraktionen des Salzgrusversatzes beim Einbringen mit der angewandten Schleudertechnik als Erklärung in Frage. Daneben ist zu berücksichtigen, daß die Modellierungen der Kompaktion wegen der Größe des für den TSS-Versuch einzubeziehenden Gebiets auf Grund der verfügbaren Rechnerkapazität nur mit zweidimensionalen Berechnungsmodellen möglich waren. Dieses stellt möglicherweise eine unzulässige Vereinfachung dar. Als weiterer Grund für die Abweichungen zwischen den Vorausberechnungen und den experimentellen Beobachtungen kann daneben auch eine fehlerhafte Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Kompaktionsraten vermutet werden. In den Stoffgesetzen für Salzgrus wird üblicherweise die Temperaturabhängigkeit der sekundären Kriechgeschwindigkeit von Steinsalz zugrunde gelegt, da für Salzgrus keine experimentellen Daten verfügbar sind.

Die meisten der Kompaktionsmessungen an trockenem Salzgrus wurden bei der BGR durchgeführt. Dabei wurde als primäre Meßgröße der Versatzwiderstand bestimmt. Dieses ist die Spannung, die bei der axialen Kompaktion mit konstanter Deformationsrate auftritt. Bei Raumtemperatur wurden diese Kompaktionsversuche wie auch die bei KfK/INE mit linearen Deformationsraten in der Größenordnung zwischen $7 \cdot 10^{-7}$ und $7 \cdot 10^{-10}$ s^{-1} (2000-2%/a) durchgeführt. Bei höheren Temperaturen wurde z.T. mit noch höheren Geschwindigkeiten gemessen. Der mit den Labormessungen abgedeckte Bereich der Deformationsraten reicht bis an den Bereich der typischen Konvergenzraten im Salzgestein bei 800 m Teufe heran. Trotzdem ist festzuhalten, daß die Kompaktionsmessungen im Labor in den meisten Fällen mit Deformationsgeschwindigkeiten durchgeführt werden mußten, welche die Geschwindigkeit der Gebirgskonvergenz um 1 bis 3 Größenordnungen übersteigen.

In den grundlegenden Untersuchungen wurde der sogenannte Referenzversatz aus dem Salzbergwerk Asse verwendet. Bei Vergleichsmessungen an mineralogisch unterschiedlichen Salzgrusproben vom Standort Gorleben wurden Versatzwiderstände gemessen, die im Fall des Zechsteinsalzes um bis zu 4 Größenordnungen höhere, für Hauptsalz dagegen aber vergleichbare Werte ergeben haben. Dazu stellt die BGR fest, daß die Ergebnisse aus den Kompaktionsmessungen am Referenzversatz grundsätzlich auf Gorlebener Hauptsalz übertragbar sind.

Erste Meßergebnisse für angefeuchteten Salzgrus zeigen, daß der Versatzwiderstand durch Zugabe bereits geringer Laugemengen drastisch abnimmt. Im Beitrag der BGR (Nr.14) wurde über einen Kompaktionsversuch berichtet, in dem der Versatzwiderstand einer anfänglich trockenen Salzgrusprobe mit ca. 17% Porosität nach der Sättigung mit NaCl-Lauge um eine Größenordnung abnahm.

Der Versatzwiderstand von trockenem Salzgrus wird auch durch Zusatz von Bentonit verringert. Kompaktionswiderstandsmessungen der BGR an trockenem Salzgrus mit systematischer Variation des Bentonitgehaltes, über die im Beitrag Nr. 11 berichtet wurde, zeigten z.B. bei der Porenzahl $e = 0{,}2$ und der Kompaktionsrate $\dot{\varepsilon} = 7 \cdot 10^{-10}$ s^{-1} ($\cong$ 2%/a) bis zu einem Bentonitanteil von 15% eine kontinuierliche Abnahme des Kompaktionswiderstands auf etwa 1/3 des entsprechenden Wertes für reinen Salzgrus. Änderungen dieser Größenordnung werden auch bei anderen Porenzahlen im Bereich zwischen $e = 0{,}05$ und $e = 0{,}5$ beobachtet. Bei höheren Bentonitgehalten steigt der Versatzwiderstand wieder an. Bei einer Einzelmessung an einer Probe mit 15% Bento-

nitanteil ergab der Zusatz von 1,2 Gewichts-% Lauge noch eine weitere Reduktion des Versatzwiderstands um etwa 50%.

Der aktuelle Kenntnisstand über das Kompaktionsverhalten von Salzgrus kann nach den Ergebnissen der Vorträge und der Diskussionen auf dem Workshop folgendermaßen zusammengefaßt werden:

- Es liegen umfangreiche Ergebnisse aus Labormessungen vor, bei denen primär der Versatzwiderstand bei festen Deformationsraten, die in der Regel erheblich höher waren als die Gebirgskonvergenz, ermittelt wurde.

- Für das Stoffgesetzes von Salzgrus existieren verschiedene Formulierungen, mit denen die Ergebnisse der Laborexperimente befriedigend wiedergegeben werden können. Es ist unklar, ob eine dieser Formulierungen für die Modellierung der In-situ-Verhältnisse besonders geeignet ist.

- Die Modellierung der Versatzkompaktionen bei erhöhter Temperatur, die in einem In-situ-Versuch beobachtet wurden, auf der Grundlage der aus Laborergebnissen abgeleiteten Stoffgesetze, zeigte keine befriedigende Übereinstimmung. Es ist unklar, ob die Diskrepanz auf unzureichende Stoffgesetze, insbesondere bei der Beschreibung der Temperaturabhängigkeit, oder auf besondere Randbedingungen im Versuch zurückzuführen ist.

- Im Endlager wird die Versatzkompaktion durch die Gebirgskonvergenzrate und den Versatzwiderstand bestimmt. Der Versatzwiderstand läßt sich durch Zusätze innerhalb weiter Bandbreiten kontrolliert beeinflussen. Feuchte und Bentonit reduzieren die Stützwirkung bzw. führen zu schnellerer Verdichtung. Die Gesetzmäßigkeiten der quantitativen Änderungen des Versatzwiderstands infolge Zusatzes von Fremdmaterialien sind nicht bekannt.

- Der Zusatz von Fremdmaterialien ändert neben dem Kompaktionswiderstand auch noch andere Eigenschaften, insbesondere die Permeabilität und das Rückhaltevermögen für Radionuklide. Diese Veränderungen müssen berücksichtigt werden, damit sich solche Zusätze trotz der angestrebten Verbesserung der Kompaktionseigenschaften insgesamt sicherheitstechnisch nicht gegenläufig auswirken. Durch Feuchtezugaben kann außerdem die Bildung von Korrosionswasserstoff beschleunigt werden.

3.5 Permeabilität von Salzgrus

Die Permeabilität von trockenem und getrocknetem kompaktiertem Salzgrus wurde in mehreren FuE-Programmen gemessen (siehe Beiträge Nr.3 und 16 sowie [4], [14]) bzw. deren Ergebnisse in Verbindung mit bereits bekannten Daten zusammenfassend ausgewertet (Beitrag 19, und [1], [3], [11]). Die nachfolgend aufgeführten Messungen haben gemeinsam, daß bei ihnen ausschließlich inerte Fluide verwendet wurden, mit denen keine oder nur vernachlässigbare Wechselwirkungen mit dem Salzgrus auftreten. Dadurch ergeben sich Permeabilitäten, die nur durch Eigenschaften des Salzgruses bestimmt und unabhängig vom verwendeten Meßfluid sind.

In Beitrag 19 werden Relationen zur Beschreibung der Salzgruspermeabilität für inerte Fluide in Abhängigkeit von der Porosität angegeben, die mit einer statistischen Analyse von ca. 500 Meßwerten aus den oben genannten Untersuchungen abgeleitet wurden. Die Meßwerte decken den Porositätsbereich zwischen 0,3% und 42% ab. Die Permeabilität wird durch ein Potenzgesetz beschrieben, in das die Porosität als dominierender Parameter mit einem Exponenten von 4,5 eingeht. Die Unterschiede der Permeabilitäts-/Porositätsrelationen von trocken und feucht gelagertem Salzgrus (vgl. die Definitionen für feuchten Salzgrus am Anfang dieses Kapitels auf Seite 7) sind statistisch signifikant. Dieser Unterschied kann ggf. durch entsprechende Relationen mit modifizierten Porositätsexponenten berücksichtigt werden. Verglichen mit der Porosität und der Feuchte sind die weiteren Parameter für Rechnungen im Rahmen von Sicherheitsnachweisen von untergeordneter Bedeutung. Deren Einfluß kann in probabilistischen Rechnungen berücksichtigt werden, wobei die Koeffizienten der Permeabilitäts-Porositätsrelation in den einzelnen Läufen entsprechend ihrer statistischen Verteilung gezogen werden. Die Verteilungsfunktionen, mit denen die nicht von der Porosität abhängige Variabilität der Koeffizienten bzw. der Permeabilität berücksichtigt werden kann, sind im Abstract zum Beitrag 19 angegeben.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind ausführlich in [11] wiedergegeben. Entsprechend der dieser Analyse zugrunde gelegten Datenbasis ist der Anwendungsbereich dieser Relationen auf die Modellierung einphasiger Gasströmungen im Zusammenhang mit der Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern beschränkt.

Im Vergleich zu den Messungen mit inerten Fluiden ist die Anzahl der Daten für die Permeabilität von Salzgrus für feuchte Fluide, wie Gase mit hohem Wasserdampfgehalt, Laugen oder Wasser, sehr gering. Erste Ergebnisse über die Permeabilität von

kompaktiertem Staßfurt-Salzgrus bei Durchströmung mit feuchter Luft und gesättigter, arteigener Salzlauge aus [5] wurden in dem Beitrag Nr. 20 präsentiert. Auch bei der BGR wurden, wie im Beitrag Nr. 14 berichtet wurde, Messungen an Referenzversatz mit gesättigter Steinsalzlauge als Meßfluid durchgeführt. Die bisher vorliegenden Ergebnisse zeigen insgesamt, daß das Kompaktions- und Permeabilitätsverhalten von Salzgrus bei Durchströmung mit gesättigter Lauge grundlegend von dem abweichen, das mit inerten Fluiden beobachtet wird. Festgestellt wurden neben der bereits im Beitrag Nr. 14 dargestellten beträchtlichen Erhöhung der Kompaktionsgeschwindigkeiten auch eine wesentlich stärkere Porositätsabhängigkeit der Permeabilität. Die Permeabilitäten für Lauge sind bei gleicher Porosität des Salzgruses zudem deutlich geringer als für inerte Fluide. Die Unterschiede zwischen den Gas- und Laugenmessungen werden auf Umlöse- und Transportprozesse zurückgeführt und sind um so ausgeprägter, je niedriger der Anhydritanteil des Salzgruses ist.

Die von der BGR durchgeführten orientierenden Versuche an Salzgrus mit einem Zusatz von 15 Gewichts-% Bentonit zeigen eine um mehrere Größenordnungen niedrigere Permeabilität als reiner Salzgrus mit derselben Porosität.

Für die Modellierung der Ausbreitung bzw. der gegenseitigen Verdrängung von Gasen im Versatz in Verbindung mit potentiellen Laugenzutritten müssen die Funktionen für den Kapillardruck und der relativen Permeabilität in Abhängigkeit von den Sättigungen der beiden Phasen mit relativ hoher Genauigkeit bekannt sein. Hierzu wurden von der TU Clausthal erste Messungen an NaCl-Modellmaterial durchgeführt (siehe Beitrag Nr. 21).

Als Ausgangsmaterial für die in diesen Untersuchungen verwendeten Proben wurde kein Referenzversatz, sondern feinkörniges Speisesalz mit einem mittleren Korndurchmesser von 0,3 mm verwendet. Dieses wurde unter Zugabe von 0,3% Feuchte unter einem Druck von 90 MPa zu homogenen Prüfkörpern mit Porositäten zwischen 2% bis 5% und einer Permeabilität von ca. 10^{-15} m^2 verdichtet. Bestimmt wurden der Kapillardruck und die relativen Permeabilitäten für Gas und Lauge in Abhängigkeit von der Laugensättigung, die residuale Laugensättigung und der Durchbruchsdruck für die Gasphase bei Laugensättigung. Die Meßwerte können durch Relationen nach Corey und Brooks approximiert werden, wobei die Koeffizienten mit Regressionsrechnungen bestimmt wurden. Hieraus ergab sich für den Porengrößen-Verteilungskoeffizienten λ mit 1,6 ein relativ niedriger Wert, der auf eine äußerst homogene Struktur des Kapillarnetzwerks im kompaktierten Salzgrus hindeutet. Aus dem Verlauf der Kapilllardruck-

Sättigungsbeziehung kann auf zwei miteinander verbundene Netzwerke von Kapillaren mit unterschiedlichen Weiten geschlossen werden. Auf dieser vermuteten Struktur gründet sich ein Modell, das zur Charakterisierung des untersuchten Materials herangezogen wurde.

Zusammenfassend kann der aktuelle Kenntnisstand über die Permeabilität von kompaktiertem Salzgrus durch die folgenden Feststellungen beschrieben werden:

- Die Porosität von kompaktiertem Salzgrus ist die dominierende Einflußgröße für die Permeabilität. Der Zusammenhang zwischen Permeabilität und Porosität läßt sich mit guter Näherung durch Potenzgesetze mit Porositätsexponenten > 5 beschreiben.

- Die Porositätsabhängigkeit wird bereits durch sehr niedrige Feuchtegehalte, d.h. von weniger als 1 Gew.-%, beeinflußt, bei denen im Salzgrus noch keine flüssige Phase erkennbar ist.

- Für die Modellierung einphasiger Darcy-Strömungen mit inerten Fluiden ist der Zusammenhang zwischen Porosität und Permeabilität hinreichend bekannt.

- Die Einflüsse weiterer Parameter können in probabilistischen Rechnungen mit Variation der Koeffizienten in der Permeabilitäts-Porositätsrelation berücksichtigt werden. Die statistischen Verteilungen dieser Koeffizienten, die aus einer großen Datenbasis abgeleitet wurden, sind hinreichend bekannt.

- Die vorliegenden experimentellen Ergebnisse zeigen, daß Zusätze von Fremdstoffen zur Verbesserung des Kompaktionsverhaltens oder der Sorptioneigenschaften, wie Lauge oder Bentonit, die Permeabilität erheblich reduzieren. Die Relationen, mit denen die Permeabilität für reinen Salzgrus als Funktion der Porosität beschrieben wird, sind dann nicht gültig. Die entsprechenden Relationen für Salzgrus mit solchen Zusätzen sind nicht bekannt.

- Die für die Modellierung von Zweiphasenströmungen erforderlichen sättigungsabhängigen Kapillardrücke und relativen Permeabilitäten sind unzureichend bekannt. Erste Ergebnisse für ein einfaches System liegen vor, diese sind aber für reale Fälle ohne weitere Untersuchungen nicht anwendbar.

3.6 Radionuklidrückhaltung

Die bisher vorliegenden Ergebnisse über die Sorption und Rückhaltung von Radionukliden in Salzgrus wurden in dem Beitrag des Forschungszentrums Karlsruhe (Nr. 22) zusammenfassend dargestellt. Der Abstract zu diesem Beitrag enthält ein Literaturverzeichnis, in dem die wesentlichen aktuelle Berichte aufgeführt sind.

Im Vergleich zu anderen Versatzstoffen besitzt reiner Salzgrus für Radionuklide nur ein geringes Rückhalte- und Sorptionsvermögen. Die Messungen an Bodenkörpern aus dem ERA Morsleben und aus Gorleben in verschiedenen Salzlaugen haben ergeben, daß aus der Elementgruppe der Actinoiden nur Plutonium und Thorium in nachweisbarem Umfang sorbiert werden. Neptunium wird nur aus NaCl-Lösungen und Uran überhaupt nicht sorbiert. In jedem Fall ist das Sorptionsvermögen empfindlich von den pH-Bedingungen abhängig.

Die Anzahl der publizierten Meßwerte für Spalt- und Aktivierungsprodukte ist gering. Die gemessenen Retardationsfaktoren für Salz-Salzlösungs-Systeme weichen nur geringfügig von dem Wert 1 ab, d.h. die Retardation ist praktisch vernachlässigbar. Das geringe Sorptions- und Rückhaltevermögen von Salzgrus kann aber durch Zusatzstoffe entscheidend verbessert werden. Hierfür kommen Stoffe in Frage, die wie beispielsweise Zement, die pH- und Redox-Bedingungen in günstige Bereiche verschieben. Alternativ zur Änderung des chemischen Milieus kann eine Verbesserung auch mit Stoffen erreicht werden, die wie Hydroxylapatit (HAP) die Radionuklide in festen Phasen binden oder wie Tone oder Braunkohlefilterasche (BFA) selbst gute Sorbenten sind. Bei einer Verwendung von Zusatzstoffen zur Verbesserung der Sorption müssen die damit einher gehenden Änderungen der Festigkeitseigenschaften und der Durchlässigkeit berücksichtigt werden.

4 Modellierung der Schadstoffausbreitung

Die Schadstoffausbreitung aus einem verschlossenen Endlager im Salinar ist ein sehr komplexer Vorgang, der von den unterstellten Störfallszenarien, der geologischen Situation etc., aber auch durch die Verfüllung und die technischen Barrieren direkt oder indirekt beeinflußt wird. Bei einer Verwendung von Salzgrus als Versatz oder als Bestandteil von technischen Barrieren wird somit die Schadstoffausbreitung bei einem potentiellen Laugenzutritt durch die Eigenschaften von Salzgrus direkt oder indirekt mitbestimmt.

4.1 Bedeutung der Versatzeigenschaften in Langzeitsicherheitsanalysen

Die Ausbreitung von Lauge und der Transport von Schadstoffen durch das Mehrbarrierensystem eines Endlagers werden mit speziellen Simulationsprogrammen berechnet. Diese Programme beinhalten eine Vielzahl von Einzelmodellen, mit denen die Bewegungen der Lauge und der Schadstofftransport in den unterschiedlichen Bereichen im Grubengebäude beschrieben werden. In einigen dieser Modelle werden die Ergebnisse in hohem Maße durch die Eigenschaften von Salzgrus, der im Endlager als Versatz oder als Baumaterial für technische Barrieren Verwendung findet, beeinflußt. In dem Beitrag der GRS (Nr. 5) werden als wichtigste Auswirkungen des Versatzes bzw. der Versatzeigenschaften die

- Stützwirkung gegenüber der Gebirgskonvergenz,
- Verringerung des Resthohlraumvolumens,
- Erhöhung des Strömungswiderstands durch geringere Permeabilität,
- Sorption von Schadstoffen und die
- Verbesserung des Einschlusses in Bohrlöchern durch Zwischenstopfen

angeführt. Die Größe der Auswirkungen wurde an Hand von Beispielsrechnungen belegt, in denen entweder die potentiellen Strahlenexpositionen in der Biosphäre oder der Radionuklidstrom aus einem Segment ermittelt wurden. Bei diesen Beispielsrechnungen wurden unterschiedliche Versatzeigenschaften, wie z.B. die Kompaktierbarkeit, angenommen, um die Auswirkungen und die Bedeutung dieser Parameter zu identifizieren.

Die Hohlraumreduktion durch den Versatz hat die positiven Konsequenzen, daß nur wenig Lauge in das Grubengebäude eindringen kann und die Strömungswiderstände erhöht werden. Dadurch werden die Laugenströme, die durch die Gebirgskonvergenz hervorgerufen werden, und damit der potentielle Schadstofftransport reduziert. Die Ergebnisse der vorgestellten Beispielsrechnungen sind nicht allgemein gültig und können bei anderen als den darin unterstellten Randbedingungen, beispielsweise für die Referenzkonvergenzrate oder den Gasquellterm, gegensätzliche Aussagen liefern. Auf Grund seiner Kompaktierbarkeit ist Salzgrus im Fall hoher Konvergenzraten als Versatzmaterial gut geeignet, während sonst stützender Versatz im allgemeinen zu geringeren potentiellen Schadstofffreisetzungen führt.

In Strecken verhindert der Versatz außerdem die unverzügliche Durchmischung von kontaminierten und unkontaminierten Laugen, die in großen, freien Volumina einfacher möglich ist als in versetzten Bereichen, in denen sich nur entsprechend verzögerte Kolbenströmungen ausbilden können. Dem entgegen wirkt die im Vergleich zu unversetzten Strecken größere Ausbreitungsgeschwindigkeit. Insofern sind durch einen Versatz der Strecken wegen des Einflusses auf die Konvergenz, das Leervolumen, die Transportgeschwindigkeit und die Strömungsarten gegenläufige Auswirkungen zu erwarten, und daher ist bei der Planung ein optimales Versatzkonzept festzulegen, das durch die jeweiligen Verhältnisse an einem Standort bestimmt wird und nicht allgemein gilt.

Das grundsätzlich nachteilige geringe Sorptionsvermögen von Salzgrus kann durch Zuschlagstoffe erheblich verbessert werden. Dann ist aber zu beachten, daß dadurch auch andere Eigenschaften oder Vorgänge, wie der Versatzwiderstand, Löslichkeiten, Umlösungen, Korrosionsgasbildung usw., eventuell ungünstig verändert werden können. Salzgrusversatz kann außerdem auch gezielt eingesetzt werden, um im Fall eines Zutritts ungesättigter Lösungen diese soweit aufzusättigen, daß Umlösungen, insbesondere im Bereich von Kalilagern, minimiert werden.

4.2 Zweiphasenströmungen in Salzgrus

Für die Modellierung der Zweiphasenströmungen von Gas und Lauge durch poröse Materialien wie Salzgrus müssen die Zusammenhänge zwischen dem Kapillardruck und der relativen Permeabilität in Abhängigkeit von der Sättigung der beiden Phasen bekannt sein. Die experimentelle Bestimmung dieser sättigungsabhängigen Funktionen

ist meßtechnisch sehr schwierig und im Vergleich zur Messung der Permeabilität wesentlich aufwendiger. Aus diesem Grunde existieren erst sehr wenige Meßwerte für Salzgrus-Lauge-Gassysteme.

Im Beitrag der TU Clausthal (Nr. 21) wurden erste Resultate aus Untersuchungen an Prüfkörpern mit effektiven Porositäten zwischen 2% und 5% und effektiven Permeabilitäten von $1\text{-}5\cdot10^{-15}$ m^2 vorgestellt. Diese Prüfkörper wurden durch Kompaktion von NaCl-Kristallen mit 0,3 mm mittlerer Korngröße unter Zugabe von 0,3 Gewichts-% Lauge hergestellt.

Aus dem Verlauf der gemessenen Kapillardruckkurven kann auf ein System von zwei miteinander verbundenen Netzwerken mit unterschiedlichen Weiten der Fließwege geschlossen werden. Die Restgas- und Laugensättigungen in den untersuchten Prüfkörpern lagen zwischen 15% und 18% bzw. zwischen 20% und 23%, und die Durchbruchdrücke für die Gasphase zwischen 30 und 54 kPa. Die Meßkurven für die relative Permeabilität können analytisch durch eine Corey-Brooks-Relation dargestellt werden, deren Koeffizienten per Regression aus den Meßdaten ermittelt wurden.

Ebenfalls noch in den Anfängen steckt die Modellierung der Zweiphasenströmungen von Lauge und Gas durch Salzgrus. Für solche Modellierungen stehen erprobte Zweipasen-Rechencodes wie beispielsweise TOUGH2 (siehe den Beitrag Nr. 24) oder MUFTE [8] –(s. Beitrag 23) zur Verfügung. Diese Programme, die ursprünglich für inerte, nichtkompaktierbare Medien entwickelt wurden, können durch über die Materialeigenschaftsdaten oder über spezielle Programmodule an die speziellen Aufgabenstellungen in salinaren Systemen oder zur Berechnung des Schadstofftransports angepaßt werden. Solche Erweiterungen sind beispielsweise die Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls oder der Kompaktion, Lösung und Kristallisation von Salz. Ein weiterer Code, der ursprünglich speziell für Modellierungen von Zweiphasenströmungen in Steinsalz und Salzgrus entwickelt wurde, ist der spanische CODE_BRIGHT [12].

In dem Beitrag der GRS (Nr. 23) wurden Ergebnisse über Simulationsrechnungen für Zweiphasenströmungen in bzw. aus Endlagerbohrlöchern für drei verschiedene Störfallszenarien präsentiert. Bereits die Rechnungen für stark vereinfachende Prinzipmodelle belegen, daß die Zweiphasenflußeffekte die Dynamik der Laugenintrusion und der Gasausbreitung in einem Einlagerungsbohrloch haben. Zwar sind in den Ergebnissen die einzelnen Wirkungsmechanismen der Strömung in den jeweiligen Modellen

schlüssig interpretierbar; aber die Rechnungen zeigen auch, daß diese äußerst empfindlich von den verwendeten Modellparametern abhängen. Diese hohe Empfindlichkeit ist dadurch zu erklären, daß hier ein gekoppeltes System der beiden stark nichtlinearen Gleichungen für den Kapillardruck und die relative Permeabilität in Abhängigkeit von der Sättigung vorliegt. Diese Situation wird durch die hohen Kontraste in den Materialeigenschaften innerhalb der Modellgebiete weiter kompliziert. Daher müssen für belastbare Prognosen der Zweiphasenströmungen die sättigungsabhängigen Materialkennwerte von kompaktierendem Salzgrus, d.h. die relative Permeabilität und der Kapillardruck, mit entsprechend hoher Genauigkeit bekannt sein.

Die vorliegenden Ergebnisse von ISTec (Beitrag Nr. 24) zeigen, daß die Konvergenz bzw. die Kompaktion des Salzgruses der dominierende Einflußfaktor für die relevanten Strömungsprozesse darstellt. Dabei hat sich gezeigt, daß die Effekte der konvergenzbedingten Porositätsänderung und der daraus resultierenden Permeabilitätsreduktion gegenläufig sind.

Insgesamt wurde festgestellt, daß die Modellierung von Zweiphasenströmungen besonders in Systemen mit Salz bzw. Salzgrus äußerst schwierig ist und trotz der anerkannten erreichten Fortschritte erst in einem Anfangsstadium befindet. Wegen der geringen Anzahl der durchgeführten Rechnungen für Zweiphasenströmungen und der Unsicherheiten bei den Ergebnissen ist derzeit ein Vergleich mit entsprechenden Rechnungen möglich, bei denen Zweiphaseneffekte vernachlässigt wurden. Ein solcher Vergleich könnte aufzeigen, in welchem Maß die Zweiphaseneffekte im Hinblick auf die Schadstoffausbreitung in die Biosphäre überhaupt eine Rolle spielen.

5 Zusammenfassung

Der Workshop wurde gemeinsam vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und vom Projektträger des BMBF/BMWi für Entsorgung (PTE) veranstaltet und von der GRS organisiert. Ziel war es, die aktuellen Ergebnisse der FuE-Arbeiten mit Bezug zu Salzgrus aus den verschiedenen nationalen Forschungseinrichtungen vorzustellen und im Expertenkreis zu diskutieren. Damit sollte der aktuelle Kenntnisstand ermittelt und die Grundlage für die Bewertung der Eignung von Salzgrus als Versatz in einem Endlager im Salinar geschaffen werden. Das Programm des Workshops war in die Themenfelder

- Eigenschaften von Salzgrus im Hinblick auf Anforderungen in der Betriebsphase,
- Eigenschaften von Salzgrus mit Relevanz für die Sicherheit in der Nachbetriebsphase,
- Modellierung des Fluidtransports durch Salzgrusversatz

untergliedert. Der Workshop hat gezeigt, daß die Datenbasis für die erforderlichen Nachweise der Sicherheit beim ungestörten Betrieb und bei Störfällen in der Betriebsphase (Kritikalitäts- und radiologische Sicherheit, Beherrschbarkeit von Gasdrücken, Dichtheit gegenüber Flüssigkeiten, Standsicherheit) nahezu vollständig ist. Die Eigenschaften von Salzgrus werden optimal genutzt, wenn der Versatz frühestmöglich, trocken, einschließlich der Feinfraktion und weitgehend firstbündig eingebracht wird. Durch Rechnungen und Experimente im Technikumsmaßstab ist belegt, daß die Stapelkräfte bei der Bohrlochlagerung durch die Einbettung der Gebinde in Salzgrus so auf die Bohrlochwand abgeleitet werden, daß der Druck auf die Abfallgebinde auf ein sicherheitstechnisch beherrschbares Niveau reduziert wird. Hierzu sind noch In-situ-Demonstrationen mit stationärer und dynamischer Lastaufbringung erforderlich. Die Eignung von Salzgrus als Flammensperre ist zwar experimentell belegt, trotzdem müssen zur Begrenzung der Auswirkungen von Wasserstoffexplosionen Resthohlräume beim Versatz beschränkt und längere Firstspalte vermieden werden.

Salzgrus besitzt als Versatz und als Baumaterial für Verschlüsse viele Eigenschaften, die für die Sicherheit in der Nachbetriebsphase günstig sind. Mit den verfügbaren Techniken kann das Material mit geringen Resthohlraumvolumina firstbündig eingebracht werden. Dieses ist für ein HLW-Endlager vorteilhaft, kann aber bei starker Gasbildung zum Aufbau zu hoher Drücken führen. Das Kompaktionsverhalten von trockenem Salzgrus ist weitgehend geklärt. Bei hoher Gebirgskonvergenz setzt die Stützwirkung frühzeitig ein. Für Grubenbaue mit langsamer Konvergenz ist u.U. nicht kompaktierender Versatz erforderlich.

Die Datenbasis für die Salzgrus-Stoffgesetze ist umfangreich, Defizite bestehen insbesondere noch für feuchtes Material. Bereits bei Feuchtezugabe von etwa 1 Gew.-% können sich einzelne Parameter wie der Kompaktionswiderstand um Größenordnungen ändern. Unsicherheiten bestehen außerdem hinsichtlich der Zulässigkeit der Extrapolation von Labormeßdaten auf die Zeiträume in Langzeitsicherheitsanalysen.

Für Sicherheitsanalysen sind die Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen Permeabilität und Porosität von Salzgrus für die Modellierung einphasiger Darcy-Strömungen hinreichend bekannt. Die Sorptionsfähigkeit von Salzgrus ist sehr niedrig, kann aber erforderlichenfalls durch Zuschlagstoffe erhöht werden. Einzelne Eigenschaften von Salzgrus lassen sich durch Zusatzstoffe verbessern oder im Hinblick auf spezielle Anforderungen optimieren. Dabei muß in Kauf genommen werden, daß das Endlagersystem eventuell weiter verkompliziert und dadurch der Bedarf an Daten erhöht wird und die Modellierungen für die einzelnen Sicherheitsnachweise erschwert werden können.

Weil bei den Szenarien für die Nachbetriebsphase Fließ- bzw. Verdrängungsvorgänge von Laugen und Gasen innerhalb des Versatzes angenommen werden, müssen diese Bewegungen als Zweiphasenströmungen modelliert werden. Erste Modellierungen wurden bereits durchgeführt und haben sich sowohl hinsichtlich der Numerik als auch der Anforderungen bei den Materialparametern als äußerst anspruchsvoll erwiesen. Mit dem verfügbaren Instrumentarium läßt sich die Laugenintrusion und die Gasausbreitung in einem Endlager im Salinar qualitativ beschreiben.

Diese Einschätzung beruht auf der Feststellung, daß die wesentlichen physikalischen Effekte erfaßt werden und die Ergebnisse mit solchen von Zweiphasenflußuntersuchungen in inerten porösen Medien kompatibel sind. Die Sicherheit quantitativer Aussagen ist dagegen wegen der noch unzureichenden Kenntnis der Stoffkennwerte, wie der sättigungsabhängigen Funktionen für die relative Permeabilität und den Kapillardruck in Salzgrus, insbesondere bei variabler Porosität, gering. Ein weiteres Manko besteht in der Verwendung z. T. stark vereinfachender, noch nicht experimentell abgesicherter Modelle, insbesondere für den Gasquellterm.

Von großer Bedeutung für die Permeabilität sind offenbar Einflüsse der mineralogischen Zusammensetzung des Salzgruses und der Lauge, die aber bisher noch unberücksichtigt sind. Bei der Integration von Zweiphasenflußmodellen in Modelle für Langzeitsicherheitsanalysen wurden in der jüngsten Vergangenheit Fortschritte erzielt, die notwendige Qualifizierung, etwa durch Vergleiche der Ergebnisse mit denen anderer Codes, Ergebnissen von In-situ-Untersuchungen oder natürlichen Analoga, steht aber

noch aus. Es fehlen außerdem Vergleichsrechnungen in Form vollständiger generischer Langzeitsicherheitsanalysen jeweils mit und ohne Berücksichtigung der Zweiphaseneffekte, die den Einfluß auf die berechnete Radionuklidausbreitung und die Strahlenexposition in der Biosphäre aufzeigen.

6 Literaturverzeichnis

[1] Bechthold, W. et al: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt. (BAMBUS Project). Final Report. Commission of the European Communities, EUR-Report 19124, Luxemburg (1999)

[2] Barnert, E.; Wetzler, H.: Die Löschwirkung von Salzgrus als Flammensperre Berichte des Forschungszentrums Jülich 3494, Januar 1998.

[3] Fein, E.; Müller-Lyda, I.; Storck, R.: Ableitung einer Permeabilitäts-Porositäts-beziehung für Salzgrus und Dammbaumaterialien. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, GRS-132, Braunschweig (1996)

[4] Fröhlich, H.; Förster, S.; Hohenthanner, C.R.: Bestimmung des Diffusions- und Permeabilitätsverhaltens von Wasserstoff in Steinsalz und kompaktiertem Salzgrus. Battelle, Eschborn (1995)

[5] Fröhlich, H., Conen, O.: Durchlässigkeitsverhalten von Steinsalzversatz gegenüber Laugen unter Berücksichtigung von Lösungsvorgängen. In: Tagungsband zum 49. Berg- und Hüttenmännischen Tag, 18.-19. Juni 1998, Kolloquium 3. Wagner, St. (ed) Freiberg, 1998

[6] Feuser, W.; Vijgen, H.; Barnert, E.: Validierung der Modelle zur Lastabtragung durch Einbettung in Salzgrus. Berichte des Forschungszentrums Jülich 3493, Januar 1998.

[7] Hein, H.-J.: Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgranulat. Diss. RWTH Aachen (1991)

[8] Helmig, R.; Braun, C.; Emmert, M.: MUFTE- A numerical Model for simulation of multiphase flow processes in porous and fractured-porous mrdia. Programmdokumentation (HG 208) Technical Report 94/3, Institut für Wasserbau, Universiät Stuttgart (1994)

[9] Hirsekorn, R.P.; Boese, B.; Buhmann, D.: LOPOS: Programm zur Berechnung der Schadstofffreisetzung aus netzwerkartigen Grubengebäuden. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, GRS-157. Braunschweig, Juni 1999

[10] Höhne, D.; Schünemann, U.; Husemann, K.: Schüttgutmechanische Eigenschaften von Salzgrus. Berichte des Forschungszentrums Jülich 3492, Januar 1998.

[11] Müller-Lyda, I.: Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsrelationen für Salzgrus. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, GRS 148. Braunschweig, 1999

[12] Olivella, S.; Gens, A.; Carrera, J.; Alonso, E.E.: Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. Engineering Computations Vol. 13 No 7, 1996, pp. 87-112

[13] Rothfuchs, T.; Kröhn, K.P.; Poley, A.; Wieczorek, K.: The DEBORA-Project. Development of Borehole Seals. Abschlußbericht Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Braunschweig (in Vorbereitung)

[14] Stührenberg, D.; Zhang, C.: Untersuchungen zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus als Versatzmaterial für Endlagerbergwerke im Salz. Abschlußbericht zum Vorhaben 02 E 8552 8. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover (1995)

[15] Zhang, C.; Schmidt, M. W.; Staupendahl, G.; Heemann, U.: Entwicklung eines Stoffansatzes zur Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus. Bericht Nr. 93-73 Institut für Statik der Tu Braunschweig und GSF-Institut für Tieflagerung Braunschweig (1993)

7 Anhang: Abstracts zu den Einzelvorträgen

Aufgaben des Versatzes im Wirtsgestein Salz 33

Überblick über durchgeführte und laufende FuE-Arbeiten zum Salzversatz 37

Aufgaben und Bedeutung von Salzgrusversatz während der Betriebsphase 39

Relevanz des Versatzes für die Langzeitsicherheit eines Endlagers 41

Schüttgutmechanische Eigenschaften von Salzgrus 43

Abschirmung und Rückhaltewirkung von Salzgrus 45

Die Löschwirkung von Salzgrus als Flammensperre LÖSA 47

Versuche zur Versatzeinbringtechnik 49

Kompaktion und Permeabilität von Salzgrus, Laborversuche an Versatzvarianten in der Oedometerzelle 51

Erfahrungen aus dem Betrieb des ERA Morsleben 53

Ergebnisse der begleitenden Untersuchungen bei der Verfüllung des FB Asse 55

Triaxiale Kompaktionsversuche, Permeabilitätsversuche und Langzeitprognosen 57

Entwicklung und Validierung eines Stoffgesetzes für den Referenzversatz 59

Ergebnisse aus In-situ-Versuchen 61

Eigenschaften von Salzgrus in der Nachbetriebsphase, Materialmodelle und Benchmark-Berechnungen 63

Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus 65

Zusammenhang von Permeabilität und Porosität von Salzgrus 67

Durchlässigkeitsverhalten von Steinsalzversatz gegenüber Laugen unter Berücksichtigung von Lösungsvorgängen 69

Experimentelle Bestimmung der Zweiphasenfluß-Parameter von verdichtetem Salzgrus 71

Radionuklidrückhaltung in Salzgrus und Einfluß von Zuschlagstoffen 73

Prinzipmodelle zur Beschreibung des Fluidtransports 75

Zweiphasige Modellierung des Fluid- und Radionuklidtransportes in Salzgrus 77

Aufgaben des Versatzes im Wirtsgestein Salz

Heinrich Illi
Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter-Lebenstedt

Die Einhaltung der für den Betrieb und die Nachbetriebsphase eines Endlagers geltenden Schutzziele soll u.a. durch ein Mehrbarrierensystem aus geologischen und technischen Barrieren erreicht werden. Die geologischen Barrieren bilden die Endlagerformation und das Deckgebirge/Nebengebirge des Endlagerwirtsgesteins. Zu den technischen Barrieren zählen die aus der Konditionierung der radioaktiven Abfälle resultierenden Abfallprodukte, die Verpackungen der Abfälle und alle Systeme und Komponenten, die beim Verfüllen und Verschließen eines Endlagers zur Anwendung kommen. Hierbei ist es naheliegend, auch das bei der Auffahrung von Hohlräumen anfallende Haufwerk des Wirtsgesteins einzusetzen. Bei einem Endlager im Salz wäre dies Salzgrus oder ein hydraulisch abbindender Versatz mit dem Zuschlagstoff Salzgrus.

Die Aufgaben des Versatzes beim Verfüllen und Verschließen eines Endlagers sind vielfältig. Das Hauptziel ist die Verhinderung bzw. Verzögerung der Ausbreitung von aus den Abfallgebinden freigesetzten Schadstoffen. Im folgenden werden die Aufgaben des Versatzes im einzelnen dargestellt. Hierbei wird eine Gliederung gewählt, die sich an der Vorgehensweise orientiert, die bei der Nachweisführung für die Einhaltung von Anforderungen/Schutzzielen üblich geworden ist.

Die wichtigsten Anforderungen/Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle ergeben sich aus dem Atomgesetz (AtG), dem Bundesberggesetz (BBergG) und dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG). Das Instrumentarium, mit dem der Nachweis der Einhaltung von Anforderungen/Schutzzielen geführt wird, die aus dem genannten Rechtsgebieten bestehen, sind Sicherheitsanalysen zum bestimmungsgemäßen Betrieb, Störfallanalysen, Analysen zur mechanischen/thermomechanischen Beanspruchung des Wirtsgesteins, des Deck- und Nebengebirges, zur thermischen Beeinflussung des Grundwassers und zu Hebungen oder Senkungen der Geländeoberfläche, Analysen zur Kritikalitätssicherheit in der Betriebs- und Nachbetriebsphase und Langzeitsicherheitsanalysen.

Bestimmungsgemäßer Betrieb

Aus den Abfallprodukten werden flüchtige Radionuklide freigesetzt, die die Wetter und auch die Oberfläche von Hohlräumen kontaminieren. Diese Kontaminationen sind derart zu beschränken, daß Schutzziele des AtG und der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) für das Betriebspersonal (§ 49 StrlSchV) und die Anlagenumgebung (§ 45 StrlSchV) eingehalten werden. Der Versatz in Einlagerungskammern/ -strecken hat hier die Aufgabe, die Ausbreitung von aus den Abfallgebinden in die Wetter des Endlagers freigesetzte flüchtige Radionuklide zu verzögern bzw. zu verhindern. Unter Berücksichtigung der Barrierewirkung von Abschlußbauwerken für Einlagerungskammern/ -strecken und von Einlagerungsbohrlöchern müssen Werte für die Gaspermeabilität des Versatzes abgeleitet und bei der Verfüllung der Resthohlräume von Einlagerungsorten erreicht werden, mit denen sich eine ausreichende Verzögerung bzw. Verhinderung bei der Ausbreitung von flüchtigen Radionukliden in noch betriebene Grubenräume erzielen läßt. Durch Zuschlagstoffe mit sorbierender Wirkung für die flüchtigen Schadstoffe läßt sich die Rückhaltewirkung des Versatzes erhöhen. Die vorstehenden Ausführungen gelten auch für sonstige flüchtige aus den Abfallprodukten freigesetzte Schadstoffe.

Störfallanalysen (Betriebsphase)

Aus der Korrosion von Metallen, die entweder in den Abfällen enthalten sind oder für die Herstellung von Abfallbehältern verwendet werden, bildet sich im Falle der anaeroben Korrosion in

feuchter Atmosphäre (atmosphärische Korrosion) oder bei Zutritt von Salzlösungen an die eingelagerten Abfälle Wasserstoffgas. Neben Wasserstoff entstehen weitere Gase wie CO2 aus der mikrobiellen Zersetzung von Zellulose und CO2 sowie CH4 aus anderen organischen Abfallbestandteilen. Einen weiteren Gasquellterm liefern radiolytische Prozesse bei der Wechselwirkung der radioaktiven Strahlung mit Materie.

Bei einem Volumenanteil von 4% Wasserstoff in der Luft werden explosionsfähige Wasserstoff-Luftgemische (Knallgas) gebildet, für deren Zündung außerordentlich niedrige Zündenergien ausreichen. Die Auswirkungen derartiger Knallgasexplosionen lassen sich auf ein sicherheitstechnisch unbedeutendes Maß reduzieren, wenn die Porosität und die Kornverteilung eines Salzgrusversatzes entsprechend gewählt werden und die unverfüllten Resthohlräume von Einlagerungsorten ein Mindestvolumen nicht überschreiten.

Mit einem pumpfähigen Dickstoffversatz lassen sich die Resthohlräume in den Einlagerungsbereichen bei entsprechend gewählter Fließfähigkeit dieser Versatzvariante fast lückenlos verfüllen. Damit läßt sich der Knallgas-Störfall ebenfalls beherrschen. Beim Projekt Konrad ist diese Vorgehensweise gewählt worden. Auch für die Stillegung des Endlagers Morsleben (ERAM) soll dieses Konzept zur Anwendung kommen.

Mechanische/thermomechanische Beanspruchung des Wirtsgesteins und des Deck- und Nebengebirges

Nichtwärmeentwickelnde Abfälle werden heute so konditioniert, daß sie eine gewisse Restfeuchte enthalten. Damit liegen Bedingungen für eine Gasproduktion aus den vorstehend genannten Prozessen vor. Das Salzgestein ist außerhalb der Auflockerungszone, die sich immer beim Ausbruch eines Hohlraumes konturnah im Wirtgestein ausbildet, undurchlässig für Gase. Werden Einlagerungsorte mit Verschließkomponenten, z. B. Dammbauwerken, weitgehend gasdicht abgeschlossen, können bei entsprechender Gasproduktion im Zusammenspiel mit der Hohlraumverringerung durch die Konvergenz des Salzgesteins Gasdrücke in den Einlagerungsorten entstehen, die zu einem Aufreißen von Klüften im Salz oder zum Versagen der Verschließkomponenten führen. Der geschilderte Lastfall läßt sich durch die Schaffung von Gasspeichern beherrschen. Geeignet hierfür wäre ein Versatz aus Kiessand, dessen Porenraum den Gasspeicher bildet. Modellrechnungen zeigen, daß das kriechfähige Salzgestein nur randlich in den Porenraum eines derartigen Versatzes eindringen kann und der übrige Porenraum für die Gasspeicherung erhalten bleibt.

Bei der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle sollte der Versatz nicht als Wärmestauer wirken, sondern eine gute Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Bei dem FuE-Projekt „Thermische Simulation der Streckenlagerung“ wurde Salzgrus für die Resthohlraumverfüllung von Einlagerungsstrecken im Versuchsbergwerk Asse verwendet, in denen mit elektrisch betriebenen Heizern in Behältern, die den für die Endlagerung von abgebrannten Brennelementen bisher vorgesehenen Pollux-Behältern nachgebildet waren, die Wärmeproduktion der Abfälle simuliert wurde. Auch hier hat sich gezeigt, wie komplex das thermomechanische Verhalten von Salzgrus ist. Einen wesentlichen Einfluß auf das Kompaktionsverhalten des Salzgruses hat der Wassergehalt des Salzgrusversatzes.

Beim Einbringen von Schleuder- und Blasversatz in Hohlräume ist zur Verringerung der Staubbildung unter Gesichtspunkten des Arbeitsschutzes eine Zugabe von Wasser oder Salzlösungen zum Salzgrus vorteilhaft. Auch das Kompaktionsverhalten dieses Versatzes ist im angefeuchteten Zustand besser als beim trockenen Salzgrus. Sicherheitstechnisch gegenläufig ist die Feuchtigkeitszugabe jedoch unter dem Aspekt der Gasproduktion aus den vorstehend genannten Gasbildungsprozessen. Je weniger feucht hier der Versatz ist, um so kleiner werden die gebildeten Gasmengen sein.

Thermische Beeinflussung des Grundwassers

Aus den bisherigen Untersuchungen lassen sich, bis auf die bereits genannte Forderung nach einer günstigen Wärmeleitfähigkeit, keine weiteren Anforderungen an den Versatz erkennen.

Hebungen und Senkungen der Tagesoberfläche

Hebungen der Tagesoberfläche ergeben sich bei der Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle aus der wärmebedingten Ausdehnung des Gesteins. Anforderungen an den Versatz über das hinaus, was bereits bei der Wärmeabfuhr genannt wurde, ergeben sich aus heutiger Sicht nicht. Anders verhält es sich bezüglich der Vermeidung von unzulässigen Senkungen der Tagesoberfläche. Das ERAM hat z. B. in einigen Bereichen einen hohen Durchbauungsgrad mit weitgehend unverfüllten Hohlräumen. Zur Vermeidung von unzulässigen Senkungen der Tagesoberfläche wird ein größerer Anteil der leeren Hohlräume mit Versatz zu füllen sein. In diesem Zusammenhang sind auch Auf- und Umlöseprozesse von Kalilagern, die im ERAM als Hartsalz oder carnallititisch ausgebildet vorkommen, von großer Bedeutung. Je größer das Hohlraumvolumen ist, das für eine Lösungsaufnahme von Zuflüssen aus dem Deckgebirge und Nebengebirge zur Verfügung steht, um so ungünstiger ist auch der Einfluß auf die Stabilität des Grubengebäudes. Nur mit einer Minimierung des Resthohlraumes durch das Einbringen von Versatz lassen sich hier die Anforderungen aus dem Bundesberggesetz erfüllen. Aus diesem Grunde sehen die in Bearbeitung befindlichen Stillegungskonzepte des ERAM eine weitgehende Hohlraumverfüllung vor. Ein pumpfähiger Dickstoffversatz ist in diesem Fall einem Salzgrusversatz vorzuziehen, da er u. a. die Hohlräume besser ausfüllt.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß mit einem Dickstoffversatz, der als Bindemittel Zement erfordert und Steinkohlefilterasche oder auch ein Gemisch aus Salzgrus und Steinkohlefilterasche als Zuschlagstoff verwendet, auch chemotoxische Stoffe enthält, die bezüglich der für das Grundwasser bestehenden Anforderungen negative Aspekte beinhalten.

Kritikalitätssicherheit

Unter dem Gesichtspunkt der Kritikalitätssicherheit ist eine salinare Umgebung wegen der neutronenabsorbierenden Wirkung der Chloridionen vorteilhaft. Bei einem Endlager im Salz ist diese Wirkung bereits durch das Wirtsgestein gegeben. Aus den USA sind Überlegungen bekannt geworden, abgereichertes Uran als Neutronenabsorber bei der Endlagerung größerer Plutoniummengen einzusetzen. Das Uran könnte auch dem Versatz beigefügt werden. Darüber hinausgehende Anforderungen an einen Versatz sind derzeit nicht erkennbar.

Langzeitsicherheit

Wie bereits eingangs erläutert, soll mit dem Versatz eine Verzögerungs- bzw. Rückhaltewirkung im Falle einer Radionuklidfreisetzung bei einem nicht ausschließbaren Lösungszutritt an die eingelagerten Abfälle erreicht werden. Der Quellterm der Radionuklide im Nahfeld, d.h. im Wirtsgestein des Endlagers, hängt vom chemischen Milieu in diesem Bereich und dem auf den weiteren Ausbreitungswegen ab. Vorteile bringt hier ein reduzierendes Milieu, da sich dann bei tri- und tetravalenten Radionukliden geringe Löslichkeiten im Bereich von 10^{-8} mol/l bis 10^{-10} mol/l einstellen. In diesen Valenzzuständen ist die Sorption der Radionuklide an Mineraloberflächen ebenfalls begünstigt. Auch die Korrosionsprodukte von Eisen schaffen ein Milieu, das für die Rückhaltung von Radionukliden vorteilhaft ist. Die große Oberfläche der Korrosionsprodukte beinhaltet eine hohe Sorptionskapazität. Darüber hinaus werden die Radionuklide in neue feste Phasen der Korrosionsprodukte eingebaut. Durch die Prozesse erniedrigt sich für viele Radionuklide die Konzentration auf Werte um 10^{-8} mol/l bis 10^{-10} mol/l. Durch Salz allein ist keine wesentliche Sorption der Radionuklide erreichbar.

Die Konzepte für die Barrierenausbildung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle stehen noch am Anfang. Ein Optimum bei konkurrierenden Effekten in diesem Bereich zu finden, ist eine anspruchsvolle Aufgabe, die gelöst werden muß. Hierbei wird es auch darauf ankommen, die ablaufenden Prozesse und die Wirkung der Barrieren im Verfüll- und Verschließkonzept des Endlagers durch Modelle berechenbar zu machen. Im Einzelfall kann das schwierig werden. Als Beispiel seien die Bemühungen genannt, die Permeabilität und die Porosität von kompaktiertem Salzgrus adäquat zu beschreiben. Dies gilt auch für das Wirtsgestein Salz, wo die Arbeiten zur Beschreibung einer Lösungspermeation oder eines Zweiphasentransportes durch dieses Gestein noch ziemlich am Anfang stehen. Modelle zur Beschreibung des Barrierenverhaltens unter Einfluß von Temperatur, dem Spannungszustand des Gebirges und einer zutretenden Lösung sind Aufgabenfelder, die auch zukünftig noch zu bearbeiten sein werden. Das BfS hat zu einigen Themenstellungen im Laufe der letzten Jahre einige Vorhaben im Rahmen seiner Möglichkeiten initiiert, deren Ergebnisse im Workshop vorgestellt werden.

Überblick über durchgeführte und laufende FuE-Arbeiten zum Salzversatz

Klaus-Detlef Closs
Forschungszentrum Karlsruhe, Projektträger des BMWi und BMBF für Entsorgung

Bei der Endlagerung in einer Salzformation ist der Salzversatz eine wichtige geotechnische Barriere. Seine Eigenschaften und sein Langzeitverhalten spielen im Hinblick auf die Langzeitsicherheit des gesamten Endlagersystems eine äußerst wichtige Rolle.

Zum Verhalten von Versatz bei sowohl der Strecken- als auch die Bohrlochlagerung wurden in den letzten Jahren Demonstrationsversuche im 1:1 Maßstab im Forschungsbergwerk Asse durchgeführt. Es handelt sich einmal um den Versuch „Thermische Simulation der Streckenlagerung" (TSS) *, zum anderen um die „Untersuchung der Langzeit-Dichtwirkung von Bohrlochverschlüssen aus Salzgrus" (DEBORA-Projekt). Beide Vorhaben wurden in den letzten Jahren auch von der EU im Rahmen des sog. BAMBUS-Projektes kofinanziert. Der Abschlußbericht befindet sich in der Endredaktion. Über diese beiden In-situ-Versuche sowie über die Vorversuche zur Versatzeinbringung im Rahmen des TSS-Versuchs wird in getrennten Beiträgen berichtet.

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über BMFT/BMBF/BMWI geförderte Laborexperimente zum Salzversatz gegeben, die entweder unabhängig oder ergänzend zu den bereits erwähnten In-situ-Experimenten durchgeführt wurden bzw. werden. Über die Ergebnisse wird in verschiedenen Beiträgen zu diesem Workshop berichtet.

1. Untersuchungen mit Schwerpunkt „Kompaktionsverhalten von Salzgrus"

Die Laboruntersuchungen wurden im Zusammenhang mit der Entwicklung von Stoffgesetzen zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus durchgeführt.

Bei der **BGR** lag der Schwerpunkt bei Oedometer-Versuchen, die bereits Anfang der 80er Jahre im Rahmen des „Projektes Sicherheitsstudien Entsorgung" (PSE) begonnen wurden /1/. Die Kompaktionsversuche wurden später durch zwei weitere BMBF-geförderte Vorhaben /2,3/ fortgesetzt und ergänzt durch eigenständige Arbeiten im Rahmen der institutionellen Förderung. Teilweise wurde dabei auch eine Triaxialzelle für Proben mit 10 cm Probendurchmesser verwendet. Ein großer Teil der Kompaktionsversuche wurde am sog. Referenzversatz durchgeführt, daneben wurde auch Material mit anderen Korngrößen eingesetzt. Die maximalen Temperaturen lagen bei den Kompaktionsversuchen bei 200 °C, allerdings erfolgten die Versuche in der Triaxialzelle bisher nur bei Raumtemperatur. Bei einem Großteil der durchgeführten Versuche wurde auch die Gas-Permeabilität als Funktion der Porosität und Korngrößenzusammensetzung bestimmt; bei einem Teil der Proben (PSE) wurden auch Laugendurchlässigkeiten ermittelt.

Im Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (INE) des **Forschungszentrums Karlsruhe** wurde von 1989 bis 1992 eine echte triaxiale Meßeinrichtung entwickelt, die günstige Voraussetzungen für Untersuchungen zum deviatorischen Stoffverhalten bietet. Es handelt sich um eine kubische Meßzelle mit 25 cm Kantenlänge. Die hohe Meßgenauigkeit der Einrichtung erlaubt Messungen bei niedrigen, für Endlagerverhältnisse repräsentativen Verformungsraten /4/. Bisher wurden am Referenzversatz 16 Untersuchungen bei Temperaturen bis 150 °C durchgeführt.

Die Kompaktionsmessungen der **GRS-Braunschweig** waren schwerpunktmäßig auf das DEBORA-Projekt /5/ ausgerichtet, das heißt auf Salzgrus ohne Grobkorn, wie er für die Ver-

* später: „Verhalten von Versatz in Strecken" (VVS)

wendung in Bohrlöchern vorgesehen ist. Daneben wurden auch einige Untersuchungen an Versatz mit anderen Korngrößen durchgeführt. Es handelte sich um hydrostatische bzw. deviatorische Oedometer-Versuche an zylindrischen Proben mit 10 oder 28 cm Durchmesser. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur gefahren. Außerdem wurden an den kompaktierten Proben Permeabilitätsmessungen durchgeführt.

Ergänzend sei vermerkt, daß Anfang der 90er Jahre am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der **Universität Karlsruhe** einige orientierende Triaxial-Großversuche an Salzgrus mit maximalen Korndurchmessern von 16, 32 und 64 mm durchgeführt wurden, die insbesondere der Bestimmung der Kompressions-, Verformungs- und Elastizitätsmoduli sowie der Poissonzahl, des Reibungswinkels und der Kohäsion dienten /6/.

2. Untersuchungen mit Schwerpunkt „Permeabilität von kompaktiertem Salzgrus"

Ausgelöst durch Forderungen der Modellierer nach experimentell abgesichertem Datenmaterial für die Permeabilität von Salzgrus geringer Porosität wurde in der ersten Hälfte der 90er Jahre ein Gemeinschaftsvorhaben der **Battelle Ingenieurtechnik** (BIG) und der **TU Bergakademie Freiberg** (BAF) zur Ermittlung der Permeabilität und der Diffusionskoeffizienten von Wasserstoff in Steinsalzbohrkernen und vorkompaktiertem Salzgrus in Abhängigkeit von endlagertypischen Temperaturen und Gebirgsdrücken durchgeführt /7/. Untersucht wurde der Einfluß verschiedener Parameter wie Kompaktierungsdrücke, Versatzfeuchte, Fraktionierung, Einschlüsse etc. auf die Permeabilität. Darauf aufbauend wird z.Zt. wiederum ein Gemeinschaftsvorhaben von BIG und BAF gefördert, das sich mit dem Durchlässigkeitsverhalten von kompaktiertem Steinsalzgrus gegenüber Laugen befaßt /8/. Das Vorhaben wird demnächst abgeschlossen.

3. Untersuchungen mit Schwerpunkt „Rückhaltevermögen gegenüber Radionukliden"

Anfang der 80er Jahre befaßte sich das Institut für Nukleare Entsorgungstechnik des **Forschungszentrums Karlsruhe** mit dem Rückhaltevermögen von Salzgrus mit und ohne Zuschlagstoffen gegenüber ausgewählten Radionukliden /9/. Über diese Untersuchungen wird an anderer Stelle berichtet. Darüber hinaus wurde in der zweiten Hälfte der 80er Jahre von der **Fa. Siemens** die Rückhaltefähigkeit von lockerem und verdichtetem Salzgrus gegenüber Gasen untersucht /10/. Die untersuchten Gase waren CH_4, CO, CO_2, HT, HTO, I_2-131, CH_3I-131, Kr-85 und Rn-222. Außer bei HTO und molekularem Jod wurde keine Rückhaltung festgestellt.

Literatur

/1/ BGR: Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Fachband 11 „Standsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben". KWA 5106 2. 07/81 bis 12/84.

/2/ BGR: „Untersuchungen zum Materialverhalten von Versatz unter Berücksichtigung der Wechselwirkung Gebirge/Versatz und anderer Verschlußkomponenten in einem Endlager im Salinar". KWA 5801 9. 03/88 bis 12/90.

/3/ BGR: „Untersuchungen zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus". 02E 8552 8. 01/93 bis 12/94.

/4/ E. Korthaus: „Experiments on Crushed Salt Consolidation with True Triaxial Testing Device as a Contribution to an EC Benchmark Exercise". FZKA 6181, Oktober 1998.

/5/ GRS: „Untersuchung der Langzeit-Dichtwirkung von Bohrlochverschlüssen aus Salzgrus (DEBORA-Projektphase 2)". 02E 8715. 10/95 bis 06/99.

/6/ Uni-KA: „Grundlagenuntersuchungen zu Salzhaufwerk mit Korndurchmesser bis 65 mm in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und des Spannungsniveaus". 02E 8040. 01/90 bis 06/91.

/7/ BIG bzw. BAF: „Bestimmung des Diffusions- und Permeabilitätsverhaltens von Wasserstoff in Steinsalz und kompaktiertem Salzgrus". 02E 8492 bzw. 8462. 04/92 bis 09/95.

/8/ BIG bzw. BAF: „Durchlässigkeitsverhalten von Steinsalzversatz gegenüber Laugen". 02E 8886 bzw. 8876. 02/96 bis 04/99.

/9/ L. Kahl et al: „Entwicklung von Puffermaterialien für MAW-Lagerkammern; Verteilungsversuche mit ausgewählten Radionukliden". Kernforschungszentrum Karlsruhe, Primärbericht 05.12.03P13A, November 1982.

/10/ Siemens/KWU: „Rückhaltevermögen von Salzgesteinen". 02U 5836. 01/87 bis 10/89.

Aufgaben und Bedeutung von Salzgrusversatz während der Betriebsphase

Nina Müller-Hoeppe, Christian Lerch
Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH

Für das potentielle Endlager Gorleben, in dem wärmentwickelnde, hochradioaktive Abfälle eingelagert werden sollen, ist Salzgrus als Versatzmaterial vorgesehen. Neben einer ausreichenden Verfügbarkeit sprechen vor allem Sicherheitsaspekte für Salzgrus als Versatzmaterial. Salzgrus weist wie das Salz selbst Kriecheigenschaften auf, die zum Verschluß von Hohlräumen führen. Des weiteren tritt eine Verheilung von Rissen und Klüften auf, so daß die einzelnen Versatzkörner im Laufe der Zeit wieder miteinander verwachsen. Aus diesem Grund ist Salzgrus unter dem Aspekt der Langzeitsicherheit ein geeignetes Versatzmaterial, da es langzeitlich einen wesentlichen Faktor für den sicheren Einschluß der radioaktiven Abfälle darstellt.

Aber auch in der Betriebsphase des Endlagers kommt dem Salzgrus eine wichtige Bedeutung zu. Während für Fragestellungen der Langzeitsicherheit Kompaktions- und Verheilungseigenschaften des Salzgruses im Vordergrund stehen, sind in der Betriebsphase die Eigenschaften des Salzgruses von Interesse, die das Kurzzeitverhalten kennzeichnen. In dem vorliegenden Beitrag wird untersucht, welche Auswirkungen der Salzgrusversatz auf die fünf, in der Betriebsphase des Endlagers wesentlichen Sicherheitsanalysen hat. Dabei handelt es sich im einzelnen um die

- Kritikalitätssicherheit
- radiologische Sicherheit
- Beherrschbarkeit von Gasen
- Dichtheit gegenüber Flüssigkeit
- Standsicherheit.

Vielfach wird auch die „thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins" als gesonderter Aspekt der Sicherheitsanalyse zugeordnet. Das ist insofern nur eingeschränkt zutreffend, da die thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins unter Ansatz von Grenztemperaturen keinen eigenständigen Sicherheitsaspekt darstellt, sondern dazu dient, die Zustände, denen das Endlagersystem in seiner Geschichte unterworfen sein wird, innerhalb definierter, „einfach" zu beherrschender Grenzen zu halten. Deshalb muß auch die Einhaltung der Temperaturgrenzbedingung von 200 °C ständig begleitend überprüft werden, um sicherzustellen, daß sich das Endlagersystem innerhalb der Bandbreite von Systemeigenschaften befindet, für die im Rahmen der Endlagerforschung Daten ermittelt wurden. So kommt dem Salzgrusversatz auch unter dem Aspekt der thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins eine Bedeutung zu.

Im Falle der Analyse der radiologischen Sicherheit ist zu unterscheiden zwischen dem bestimmungsgemäßen Betrieb und der Störfallanalyse. So sind im Rahmen der Störfallanalyse der Einfluß des Salzgruses im Hinblick auf den Ausschluß von Explosionen/Detonationen zündfähiger Gasgemische in Einlagerungskammern zu betrachten, während im Rahmen der Sicherheitsanalyse „Beherrschbarkeit von Gasen" auch der Ausschluß von Explosionen und Detonationen in Grubenbauen zu betrachten ist, die nicht zum Einlagerungsbereich zählen. Letztere ist demnach nicht zwangsläufig endlagerspezifisch, sondern beinhaltet auch die bergrechtlichen Vorschriften.

Aus der Untersuchung der Bedeutung des Salzgruses für die einzelnen Sicherheitsaspekte in der Betriebsphase des Endlagers werden Anforderungen abgeleitet und zwar sowohl im Hinblick auf die Salzgruseigenschaften als auch die Qualität der Einbringung. Die Spezifizierung der Anforderungen an den Salzgrus und an seine Einbringung als Versatzmaterial erfolgt dabei im Sinne des Nachweises der Endlagersicherheit in der Betriebsphase.

Relevanz des Versatzes für die Langzeitsicherheit eines Endlagers

Dieter Buhmann
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Das Einbringen von Versatz in ein Endlager in einer Salzformation wird mit unterschiedlichen Zielsetzungen diskutiert:
- Stützwirkung gegenüber der Gebirgskonvergenz,
- Verringerung des Hohlraumvolumens,
- Sorption von Schadstoffen,
- Lastabtrag in Bohrlöchern,
- Verhinderung von Umlösevorgängen durch Aufsättigung von Lauge.

Das letztgenannte Ziel wird in diesem Vortrag nicht behandelt.

Die Sicherheit eines Endlagers in einer Salzformation wird durch die Gebirgskonvergenz wesentlich beeinflußt. Der Konvergenzprozeß entsteht durch das plastische Verhalten des Steinsalzes, d.h. das Bestreben des Salzes, in vorhandene Hohlräume zu kriechen und diese damit zu verschließen. Durch die Konvergenz wird eingelagerter Abfall einerseits im Laufe der Zeit fest und langzeitsicher eingeschlossen, andererseits werden in einem Störfall eingedrungene, kontaminierte Laugen wieder ausgepreßt.

Versatz wirkt stützend gegenüber der Konvergenz und verringert das Resthohlraumvolumen. Beide Prozesse beeinflussen die Langzeitsicherheit wesentlich. Die Stützwirkung kann durch Verwendung anderer Materialien als Salzgrus, beispielsweise Kies, oder bei Salzgrus durch Zuschlagstoffe verbessert werden.

Zum Lastabtrag in tiefen Bohrlöchern können jeweils nach einer bestimmten Anzahl von Abfallcontainern Zwischenstopfen eingebracht werden. Deren Wirkung auf die Langzeitsicherheit kann wie für Versatz berücksichtigt werden.

Die aus den Abfällen freigesetzten Schadstoffe werden mit der Lauge durch das Grubengebäude transportiert. Wird Versatz eingebracht, so können die Schadstoffe am Versatzmaterial sorbieren, wodurch der Transport verzögert wird. Durch Zuschlagstoffe zum Versatz kann die Sorption verstärkt werden.

Um die Auswirkungen des Versatzes zuverlässig berechnen zu können, müssen die für die Modellierung benötigten Parameter über lange Zeiträume bekannt sein. Dies ist aber oft nicht der Fall, so daß über kurze Zeiten gemessene Parameter auf lange Zeiträume extrapoliert werden müssen. Die damit verbundenen Probleme sind zum Teil noch ungelöst.

Die Auswirkungen des Versatzes auf die Langzeitsicherheit sind von den standortspezifischen Gegebenheiten abhängig, beispielsweise von der Größe der Konvergenzrate. Je nach Anforderung und Standort können geeignete Versatzmaterialien verwendet werden, wobei die Eignung jeweils über eine Langzeitsicherheitsanalyse bewertet werden muß.

Daten und Modelle für eine Langzeitsicherheitsanalyse sind u.a. für die Versatzmaterialien Salzgrus und Kies vorhanden. Datenunsicherheiten werden gegebenenfalls durch Parametervariationen berücksichtigt. Gut erforscht sind die Zusammenhänge von Porosität und Permeabilität von Salzgrus. Weiterer Forschungsbedarf besteht u.a. bei dem Langzeitverhalten der Stützwirkung von Versatz und bei den Daten zur Sorption.

Schüttgutmechanische Eigenschaften von Salzgrus

Detlef Höhne, Ulrich Schünemann, Karl Weber, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik

1. Aufgaben- und Zielstellung

Ein wichtiges Problem bei der beabsichtigten Bohrlochlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen ist die Lastabtragung infolge Wandreibung zwischen der Salzgrusschüttung und der Bohrlochwand. Die Lastabtragung ist abhängig von den schüttgutmechanischen Eigenschaften des Salzgruses. Im Rahmen des Teilprojektes waren diese Eigenschaften in solchem Umfang zu ermitteln, daß sie zusammen mit den experimentellen Untersuchungen im FZ Jülich zur Validierung des Lastabtragemodells von W. FEUSER nutzbar sind und andererseits wesentliche Parameter der realen Bohrlochlagerung berücksichtigt werden.

2. Versuchseinrichtungen und Methodik

Für die Scherversuche wurde ein auf 300 mm Zellendurchmesser vergrößertes Jenike-Schergerät, ein in der Schüttguttechnik weit verbreitetes Translationsschergerät, genutzt. Das Gerät erlaubt Messungen der inneren und der Wandreibung sowie der Zeitverfestigung im Normalspannungsbereich $\sigma \leq 100$ kPa bei Temperaturen bis t = 150 °C. Wichtige Kenngrößen im Sinne der Aufgabenstellung sind die Schüttgutdichte, der effektive innere Reibungswinkel und der Wandreibungswinkel, die jeweils in Abhängigkeit von der Verfestigungshauptspannung bestimmt werden.
Mit diesen Kennwerten könnte man auf Basis bekannter Beziehungen auch den Seitendruckbeiwert k (bzw. λ) abschätzen, der im Modell von FEUSER benötigt wird. Diese Beziehungen gelten jedoch unter Voraussetzungen, die im Bohrloch nicht realistisch sind. Direkte Messungen von λ in den LEISA-Versuchsständen des FZ Jülich haben große Fehlermöglichkeiten. Deshalb wurde im zweiten Projekt-Zeitraum ein Lambdameter zur direkten Messung des Seitendruckbeiwertes entwickelt und gebaut. Das Gerät gewährleistet die einaxiale Verdichtung der Probe bei extrem geringer horizontaler Dehnung. Die Ringdehnung dient als Maß für die Horizontalspannung σ_h. Bei der Messung wird die Vertikalspannung stufenweise bis auf σ_v = 70 kPa erhöht. In der Regel bleibt $\lambda = \sigma_h/\sigma_v$ bei hohen Spannungen konstant, so daß der Wert für σ_v = 70 kPa angegeben wird. Um die Wandreibung zu variieren, wurde geprägte Aluminiumfolie in den Meßring eingeklebt. Durch Messung der Abstützkräfte des Meßringes und des Zellenbodens können der Seitendruckbeiwert und auch der mobilisierte Wandreibungswinkel ohne Annahmen bestimmt werden. Das Meßgerät arbeitet automatisch.

3. Versuchsprogramm

Für die Versuche mit dem Schergerät wurden folgende Parameter des Salzgruses variiert:

- Die obere Korngröße der natürlichen Korngrößenverteilung auf x_o =10 mm und 20 mm
- Der Anteil X_F an Feingut mit x < 2 mm in der natürlichen Korngrößenverteilung
- Die Temperatur des Salzgruses, t = 20 bis 150 °C
- Die chemisch-mineralogische Zusammensetzung (je eine Probe aus dem Na2 und dem Na3)
- Die Feuchte des Salzgruses von lufttrocken bis w = 1,0 %
- Die Verfestigungszeit bis T = 90 d bei t = 150 °C
- Die Wandreibungswinkel durch Veränderung der Wandrauhigkeit und der Feuchte
- Die Schüttgutart, als Vergleichsschüttgut wurde Sand untersucht

Die Lambdameter-Versuche wurden an Sand, Plastgranulat und einigen Proben Salzgrus mit unterschiedlichem X_F und zwei Wandrauhigkeiten durchgeführt. Die Messungen erfolgten in Serien von 10 Versuchen bei einmaliger Probeneinfüllung.

4. Ergebnisse

4.1 Ergebnisse Scherversuche

- Alle Salzgrusproben zeigen eine sehr geringe Kohäsion. Damit sind der effektive und der innere Reibungswinkel fast identisch. Sie liegen im Bereich von $41° \leq \varphi_e \leq 48°$. Alle Fließorte sind als Geraden ausgleichbar.
- Unter Normalbedingungen zeigt der Salzgrus deutliche Slip-Stick-Erscheinungen.
- Der Einfluß der Verfestigungsspannung σ_1 auf alle Kennwerte ist wegen der geringen Verdichtbarkeit des Salzgruses nur sehr schwach.
- Der Feinkornanteil X_F wirkt sich besonders deutlich auf die Schüttgutdichte aus, bei $X_F \approx 0{,}6$ ergibt sich ein Maximum. Eine ähnliche, schwächer ausgeprägte Abhängigkeit zeigt der effektive Reibungswinkel. Die Kohäsion und damit die einaxiale Druckfestigkeit steigen bis $X_F \approx 0{,}8$ an und bleiben dann konstant.
- Der Wandreibungswinkel φ_w hängt in erster Linie von der Rauhigkeit der Wand ab. Das für die Versuchsstände im FZ Jülich verwendete CFK-rauh hat etwa den Wandreibungswinkel eines rauhen Salzblocks. Mit X_F steigen die φ_w –Werte an.
- Die gewählte Variation der oberen Korngröße sowie der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung (Na2 bzw. Na3) wirkt sich nur unwesentlich auf alle Kenngrößen aus.
- Bei erhöhten Temperaturen ist kein Slip-Stick-Verhalten mehr erkennbar. Der effektive Reibungswinkel fällt mit der Temperatur leicht ab, der Wandreibungswinkel zeigt je nach Wandmaterial unterschiedliche Abhängigkeiten.
- Der Feuchteeinfluß im Bereich bis 1% äußert sich in einer leichten Abnahme der Schüttgutdichte und einer Zunahme der Kohäsion. Der Reibungswinkel φ_e ändert sich kaum.
- Die Zeitverfestigungsversuche an trockenem Salzgrus (x_0 = 20 mm; X_F = 0,51) bei t = 150°C über T = 90 d weisen eine Erhöhung der Scherfestigkeit um ca. 30% aus, wobei die Zunahme noch nicht abgeschlossen ist. Testversuche lassen aber erkennen, daß die Zeitverfestigung bei anderem Aufheizregime oder anderer Ausgangsfeuchte sehr hoch werden kann und dadurch eine andere Betrachtungsweise der Lastabtragung erfordern würde.

4.2 Ergebnisse Lambdameterversuche

- Bei der Messung des Seitendruckbeiwertes bestehen noch methodische Einflüsse (Einfüllmethode, Lastankopplung). Bei der gewählten Versuchsweise erreicht λ mit zunehmender Spannung konstante Werte, während die Meßwertstreuung sehr gering wird.
- Alle Meßwerte für Salzgrus liegen im Bereich $0{,}24 \leq \lambda \leq 0{,}53$, die Werte für Sand und Plastgranulat liegen höher. Letztere stimmen mit Meßergebnissen der TU Braunschweig gut überein.
- Die Wandreibung zwischen Schüttgut und Zellenwand wird meist nur teilweise mobilisiert.
- Der Seitendruckbeiwert fällt mit zunehmender Wandrauhigkeit der Zelle. Dies kann durch die unvollständige Mobilisierung der Wandreibung und/oder durch stärkere Horizontaldehnungen infolge der eingeklebten Aluminiumfolie bedingt sein.

5. Schlußfolgerungen und offene Probleme

Die bisher vorliegenden Untersuchungsergebnisse geben keinen Anlaß für Zweifel, daß Salzgrus aus schüttgutmechanischer Sicht als Einbettungsmaterial im Hinblick auf die Lastabtragung geeignet ist.
Zur vollständigen Absicherung dieser Aussage sind allerdings noch weitere Parameter zu berücksichtigen. Dies betrifft einerseits die Zeitverfestigung unter realistischeren Bedingungen, auch bezüglich der Wandreibung und bei den Lambdameter-Messungen.
Andererseits muß im Hinblick auf die praxisrelevante Erfassung des Seitendruckbeiwertes der Einfluß des Deformationsverhaltens der Zelle und der Probe, einschließlich eingebetteter Gebinde, geprüft werden.

Abschirmung und Rückhaltewirkung von Salzgrus

Volker Kunze
Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter

Abschirmung

Aufgrund seiner geringen Dichte, die je nach Kornfraktion und Kompaktierungsgrad etwa zwischen 1,0 und 1,6 g/cm^3 variiert, und der geringen Ordnungszahl der Konstituenten Natrium und Chlor besitzt Salzgrus im Vergleich zu anderen Materialien schlechte Abschirmeigenschaften für Gammastrahlung. Da es im Endlager jedoch kostengünstig und praktisch unbegrenzt zur Verfügung steht, lassen sich diese Nachteile leicht durch den Einsatz entsprechender Mengen kompensieren.

Das Ausmaß der Abschirmung hängt stark von den geometrischen Randbedingungen, insbesondere der Aktivitätsverteilung in der Quelle, ab. Für die Verhältnisse im Ostfeld des Endlagers Morsleben, wo die Gebinde mit einer Salzgrusschicht von 1,2 m ($\rho \approx 1{,}25$ g/cm^3) überdeckt wurden, ergeben die Berechnungen mit dem Programm MicroShield 4.21 je nach Homogenität der Quellverteilung Abschirmfaktoren von etwa 400 bis 6000. Die Messungen der Ortsdosisleistung vor und nach der Gebindeüberdeckung ergeben einen Abschirmfaktor > 200. Eine genauere Angabe war aufgrund des Meßbereichs des verwendeten Gerätes nicht möglich.

Rückhaltewirkung

Flüchtige radioaktive Stoffe werden aus den Abfällen im Endlager mit einer bestimmten Rate in die Grubenluft oder das Versatzmaterial freigesetzt. Der Transport durch den Versatz erfolgt aufgrund von Diffusion und Konvektion. Mögliche Antriebsmechanismen dabei sind: Gasbildung durch Korrosion und mikrobielle Zersetzung, Druckschwankungen und ggf. Radiolyse. In diesem Fall eines unverzögerten Transports ist der sog. Retardationsfaktor $R = 1$. Sofern Wechselwirkungen, wie chemische Bindungen oder Austauscheffekte, zwischen den flüchtigen Radionukliden und dem Versatz stattfinden, sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Bei einer reversiblen Bindung tritt eine Verzögerung bis zum Erreichen eines Sorptions-/Desorptionsgleichgewichts mit einer Gleichgewichtskonstanten K auf. Der Retardationsfaktor ist dann gegeben durch $R = 1 + K$.
2. Im Fall einer irreversiblen Bindung erfolgt eine dauerhafte Rückhaltung, d.h. $R = \infty$.

Zur quantitativen Ermittlung des Rückhaltevermögens von Salzgrus wurden im Rahmen eines BMFT-Forschungsvorhabens Säulenversuche von der Firma Siemens/KWU durchgeführt [1], deren Ziel es war, Retardationsfaktoren und Diffusionskoeffizienten für radioaktive Gase unter endlagerrelevanten Temperaturbedingungen ($T = 48$ und 200 °C) zu ermitteln.

Zunächst wurde in Vorversuchen mit HTO und I-131 der Einfluß verschiedener Parameter untersucht. Dabei zeigte sich, daß die Rückhaltung als Funktion der Korngröße etwa proportional zur spezifischen Oberfläche des Salzes ist. Für die Hauptversuche wurde eine Kornfraktion von 2 - 6 mm ausgewählt, die auch der im ERAM verwendeten ähnlich ist. Das Salz wurde aus der Schachtanlage Asse entnommen und entspricht mit 96 % Halit und 4 % Anhydrit dem Gorlebener Salz. Als Trägergas wurde Luft mit leicht erhöhtem CO_2-Anteil verwendet, wie sie in einem unbewetterten Bereich der Schachtanlage Asse vorgefunden wurde. Beimengungen von H_2S oder HCl wurden nicht hinzugefügt, da in den Vorversuchen keine Beeinflussung des Retardationsfaktors dadurch festgestellt wurde. Das heißt, auch wenn Isotopenaustausch mit H_2S oder HCl stattfindet, führt dies weder zu einem verzögerten noch zu einem beschleunigten Transport durch den Salzgrusversatz. Auf eine Anfeuchtung von Salz und Trägergas wurde ebenfalls verzichtet, da es bei einem Wassergehalt des Salzes von > 4 % zum Abfließen von Salzlauge aus

der Säule kam und sich ferner bei Kontakt mit Raumluft durch Austrocknen rasch ein Wassergehalt von ≤ 1,7 Gewichts-% einstellte.

Die Hauptversuche wurden mit einer Packungsdichte des Salzes entsprechend dem Mittelwert aus dichtester und lockerster Lagerung nach DIN 18126 und einer Säule von 40 cm Höhe und 4 cm Durchmesser durchgeführt. Als radioaktive Indikatoren wurden HT, HTO, $(C\text{-}14)H_4$, (C-14)O, $(C\text{-}14)O_2$, Kr-85, Rn-222, $CH_3(I\text{-}131)$ und $(I\text{-}131)_2$ verwendet. Es wurden jeweils zwei Versuche mit Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 0,2 und 1 cm/s durchgeführt. Es wurden sowohl die Einzelversuche integral ausgewertet als auch aus dem zeitlichen Verlauf nach der "Momentenmethode" die Retardationsfaktoren R und Diffusionskonstanten D ermittelt.

Bei 48 °C ergab sich nur für HTO eine deutliche Verzögerung beim Passieren der Säule mit Retardationsfaktoren von $R = 7{,}3 \ldots 15{,}1$. Während bei geringer dosierter $(I\text{-}131)_2$-Konzentration 70 bis 80 % des Iod in der Säule zurückgehalten wurde, ergab sich für den durchgeleiteten Anteil von $(I\text{-}131)_2$ etwa $R = 2$. Für alle übrigen radioaktiven Indikatoren wurden Retardationsfaktoren nahe $R = 1$ gemessen.

Die Hauptversuche bei 200 °C wurden mit HTO, $CH_3(I\text{-}131)$ und $(I\text{-}131)_2$ bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten ($v = 0{,}5 \ldots 2$ cm/s) und Packungsdichten (Porosität $\varepsilon \approx 0{,}20$ und 0,46) durchgeführt. Bei den lockeren Packungen ergaben sich ähnliche Resultate wie bei den 48 °C-Versuchen. Bei dichterer Packung dagegen wurden für HTO um den Faktor 2 bis 10 höhere Retardationsfaktoren ($R = 40 \ldots 93$) gefunden. Im Fall des $(I\text{-}131)_2$ verblieb wiederum ein Anteil von 27 bis 70 % der dosierten Aktivität auf der Säule. Diese Werte liegen zwischen den bei 48 °C gefundenen Werten für eine höhere und niedrigere Iodkonzentration.

Die Ergebnisse der bislang dargestellten Laborversuche lassen sich leider nur unzureichend mit den im Endlager Morsleben gewonnen Betriebserfahrungen vergleichen, wo im wesentlichen Braunkohlefilterasche als Versatzmaterial zum Einsatz kam. So wurde lediglich 1985 im Westfeld in den Abbauen 4 und 5, die heute nicht mehr zugänglich sind, eine Überdeckung von Abfällen mit Salzgrus vorgenommen und darauf die Einlagerung fortgesetzt. Diese Technologie wird auch im Ostfeld angewandt, wo die Einlagerung im Oktober 1997 begonnen und die erste Einlagerungsebene im Februar 1998 komplett mit Salzgrus versetzt wurde.

Die dabei vor und nach der Gebindeüberdeckung mit Molekularsieb durchgeführten Beprobungen des Abwetterstroms aus dem Ostfeld zeigen zumindest eine kurzfristige Rückhaltung für HTO (Faktor 1,6) und HT (> Faktor 3,8) sowie für $(C\text{-}14)O_2$ (> Faktor 3,0) und ansatzweise auch für organische Verbindungen von C-14, z.B. $(C\text{-}14)H_4$ (> Faktor 1,0). Diese Zahlen sind jedoch wenig belastbar, da außer für HTO der Meßwert nach der Gebindeüberdeckung jeweils unter der Nachweisgrenze lag. Außerdem kann angesichts der äußerst geringen Luftaktivitätskonzentrationen (Tritium: 2...7 Bq/m^3, C-14: 0,1...0,4 Bq/m^3) eine zeitweise Vorbelastung der Wetter aus anderen Grubenbereichen nicht ausgeschlossen werden. Ferner kann aus den Messungen nicht geschlossen werden, wie lange diese Reduzierung der Freisetzung andauert, da unmittelbar danach die Einlagerung fortgesetzt wurde und der Beitrag aus den frisch eingelagerten Abfällen nicht separiert werden kann.

Die für die Betrachtung der Freisetzung, z.B. im Rahmen einer Sicherheitsanalyse, notwendigen Rückhaltefaktoren, die für die gesamte Betriebsphase gelten müssen, sind nicht direkt aus den im Labor ermittelten Retardationsfaktoren ableitbar. Dazu müssen im einzelnen die Einlagerungs- und Versatzgeometrie sowie die Zeiten bis zum Erreichen des Sorptions-/Desorptionsgleichgewichts bekannt sein. Hier besteht weiterer Untersuchungsbedarf.

Literatur

[1] H. Beyer, R. Beck, E.W. Haas: "Rückhaltevermögen von Salzgesteinen", Forschungsprogramm Reaktorsicherheit, Abschlußbericht Förderungsvorhaben BMFT 02U5836, Siemens Unternehmensbereich KWU, KWU E141/89/244

Die Löschwirkung von Salzgrus als Flammensperre LÖSA

Eike Barnert, Herbert Wetzler
Forschungszentrum Jülich GmbH

Im Forschungszentrum Jülich wurden im Rahmen des vom Bundesamt für Strahlenschutz vergebenen Vorhabens „MAW(Q)- und HTR-BE-Versuchsprogramm" experimentelle Arbeiten zur Löschwirkung von Salzgrus als Flammensperre durchgeführt.

Der bei den Versuchen verwendete Salzgrus stammte aus dem Salzbergwerk Asse bei Wolfenbüttel. Er läßt sich durch folgende Größen charakterisieren:

NaCl-Anteil	$\approx$ 97 Gew.-%
Korngröße	$0 < d_o < 32$ mm
Schüttdichte	$\rho_s = 1{,}37$ g/cm^3
Feuchtegehalt	$X_W \leq 0{,}04$ Gew.-%

Zur Beschreibung der Löschwirkung des Salzgruses wurde, abhängig von verschiedenen Parametern, dessen sichere Schüttungshöhe hs gegen Flammendurchschlag bestimmt. Dabei ist hs die Schüttungshöhe, die gerade verhindert, daß eine in einem Zündvolumen initiierte Zündung auf ein Reaktionsvolumen, also einen benachbarten Raum, übergreift, wobei beide Volumina nur durch eine Schüttung voneinander getrennt und diese, wie auch der Porenraum der Schüttung, mit dem gleichen Wasserstoff-Luft-Gemisch gefüllt sind.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse, Zünddurchschlag durch die Salzgrusschüttungen unterschiedlicher Höhen ja oder nein, erfolgte mittels eines auf Methoden der mathematischen Statistik basierenden Rechenprogramms. Als Resultat erhält man u.a. die mittleren extrapolierten sicheren Schüttungshöhen $hmed_6$ für die Durchschlagswahrscheinlichkeit von 10^{-6} und ein Konfidenzintervall von 95 %.

Abb. 1 und Abb. 2 zeigen die ermittelten sicheren Schüttungshöhen $hmed_6$ als Funktion des Feinkornanteils (Körnung $0 < d_o < 2$ mm) des Salzgruses bei Zündung des H_2-Luft-Gemisches im Zündvolumen oberhalb bzw. unterhalb der Schüttung. Als feste Parameter sind zu nennen:

Salzgruskörnung	0	$< d_o < 32$ mm
Salzgrusfeuchte	X_W	$\leq 0{,}04$ Gew.-%
Temperatur	T	$= 25$°C
Kritische Wasserstoffkonzentration	K_{krit}	$= 28$ Vol.-%
Inhalt des Zündvolumen	$V_{Zünd}$	$= 2{,}5$ dm^3

Weitere Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die Temperatur hat im Bereich $25°C \leq T \leq 150°C$ keinen Einfluß auf die Löschwirkung des Salzgruses.
- Proben aus angefeuchtetem Salzgrus ($X_W = 1$ Gew.-%), die anschließend getrocknet wurden, weisen eine sehr viel bessere Löschwirkung als Proben aus trockenem ($X_W \leq 0{,}04$ Gew.-%), rieselfähigem Salzgrus auf.
- Die Löschwirkung von gealtertem Salzgrus (der Salzgrus war für 3 Monate einer Luftatmosphäre von 35°C und 20 % relativer Feuchte ausgesetzt) ist geringfügig schlechter als die des normalen ($X_W \leq 0{,}04$ Gew.-%) Salzgruses.

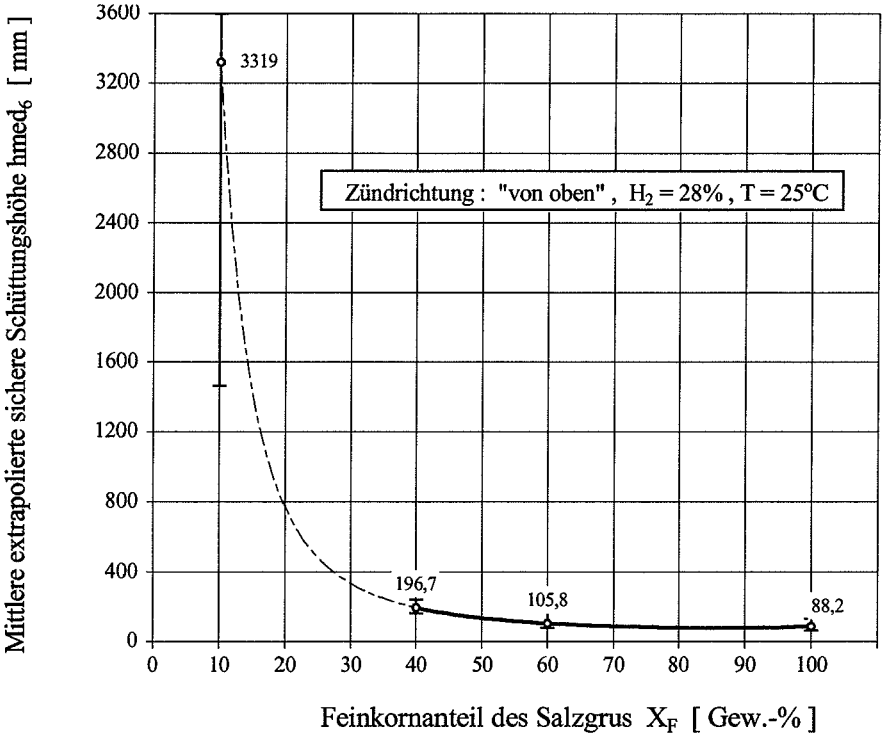


Abb.1 Mittlere extrapolierte sichere Schüttungshöhe $hmed_6$ mit 95%-Konfidenzintervall als Funktion des Feinkornanteils X_F des Salzgruses; Zündrichtung „von oben"; Versuchstemperatur 25°C.

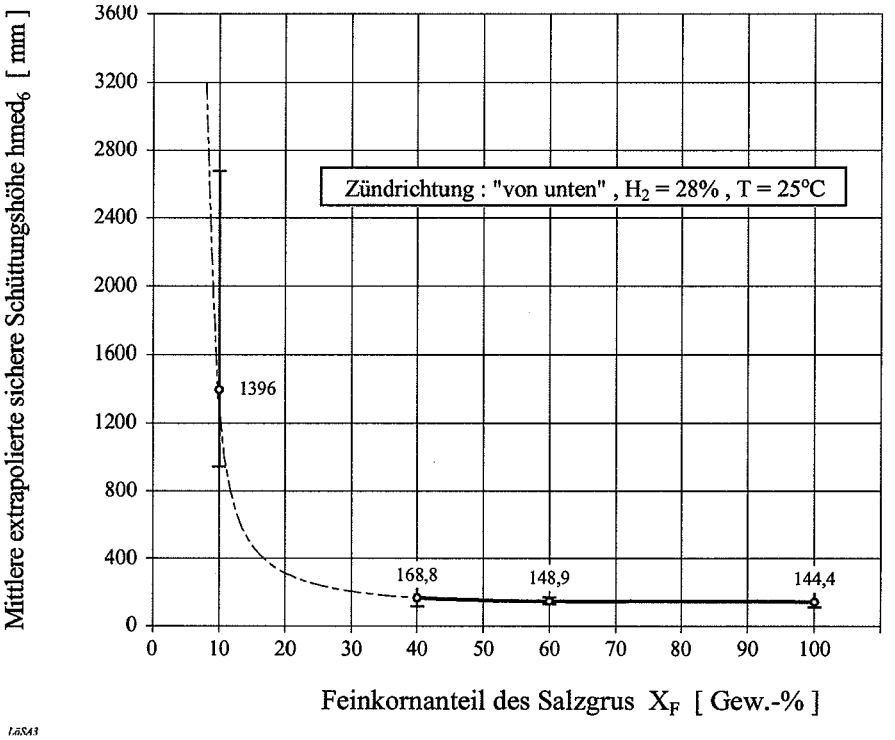


Abb.2 Mittlere extrapolierte sichere Schüttungshöhe $hmed_6$ mit 95% -Konfidenzintervall als Funktion des Feinkornanteils X_F des Salzgruses; Zündrichtung „von unten"; Versuchstemperatur 25°C.

Versuche zur Versatzeinbringtechnik

Wilhelm Bollingerfehr
Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH

Bei der Endlagerung von Endlagerbehältern (POLLUX) in den Strecken eines Endlagerbergwerkes in Salzgestein wird eine unmittelbare Verfüllung des verbleibenden Resthohlraumes mit Salzgrus vorgesehen. Die Anforderungen an eine derartige Versatztechnik lassen sich wie folgt darstellen:

- Erreichen einer hohen Anfangsdichte des Versatzes
- keine Hohlräume im Versatz zwischen oder seitlich neben den Behältern
- firstbündiger Einbau
- Gewährleistung der visuellen Kontrolle des Versatzfortschrittes
- geringer Personalbedarf beim Versatzbetrieb, um die Strahlenexposition zu minimieren
- hohe Flexibilität durch leichte Umsetz- und Handhabbarkeit der Geräte
- keine oder nur geringe Wasserzugaben zur Staubbekämpfung
- leistungsfähiger Versatzbetrieb (Durchführung eines Versatzzyklus innerhalb einer Schicht)
- geringe Störanfälligkeit (Verfügbarkeit)
- Wirtschaftlichkeit des Verfahrens

Im Rahmen von Demonstrationsversuchen zur Direkten Endlagerung wurde der Stand der Technik dafür geeigneter Versatzverfahren aufgezeigt. Es konnte dabei herausgearbeitet werden, daß nur zwei Verfahren für die geforderte Aufgabenstellung in Frage kommen; die Blas- und die Schleuderversatztechnik. Alle anderen im Bergbau angewandten Verfahren konnten entweder aufgrund begrenzter räumlicher Verhältnisse (z. B. Sturzversatz) oder wegen der Verwendung von Flüssigkeit als Fördermittel nicht berücksichtigt werden.

Zur Auswahl des Verfahrens, das zum Versetzen von Hohlräumen um Pollux-Behälter in Strecken empfohlen werden konnte, wurden im Forschungsbergwerk Asse zwei Versuchsreihen durchgeführt. Unter endlagerrelevanten Bedingungen wurde dabei die jeweils erzielbare Qualität des Versatzes untersucht. Umfangreiche Probenahmen und Analysen der bodenmechanischen Kenngrößen sowie In-situ-Dichtemessungen mit einer Gamma-Gamma-Sonde lieferten die Daten für eine vergleichende Bewertung der beiden Verfahren.

Die ermittelten Ergebnisse zur Bestimmung der Versatzdichte (Bandbreite und Mittelwert der In-situ-Dichten) ergaben für beide Verfahren keine wesentlichen Unterschiede und lagen im Bereich von 1,4 bis 1,6 t/m^3.

Zur Entscheidungsfindung, welches Versatzverfahren angewendet wird, wurde deshalb eine Bewertung unter Berücksichtigung der Kriterien Sicherheit, Technik und Wirtschaftlichkeit vorgenommen. Die dabei erforderliche Punkteverteilung erfolgte in Anlehnung an eine entsprechende VDI- Richtlinie. Als Ergebnis stellte sich dabei heraus, daß die Schleuderversatztechnik eine deutlich bessere Zielerfüllung erreichte, so daß dieses Verfahren für die Resthohlraumverfüllung bei der Streckenlagerung von POLLUX-Behältern empfohlen wurde.

Kompaktion und Permeabilität von Salzgrus

Laborversuche an Versatzvarianten in der Oedometerzelle

Dieter Stührenberg
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Die BGR betreibt seit 1995 im Rahmen des Leistungskatalogverfahrens BfS/BGR anlagenbezogene Forschung mit dem Versatzmaterial Salzgrus und mit zu seiner Ertüchtigung erforderlichen Additiven (salinare Lösungen, mineralische Stoffe). Vor 1995 wurden entsprechende F.u.E.-Arbeiten vom BMFT/BMBF gefördert. Die Ziele sind die Darstellung der mechanischen Versatzmaterialeigenschaften in berechenbarer Form und Aussagen über die Eignung des Materials als Langzeitbarriere.

Wesentliche Anforderungen an den Versatz sind die Funktion als geotechnische Langzeitbarriere gegen potentielle Radionuklidträger (= Hauptaufgabe), die mechanische und chemische Kompatibilität mit dem Wirtsgestein (Duktilität, Langzeitstabilität), die anfängliche Gasdurchlässigkeit (Behälterkorrosion), die Stabilisierung der geologischen Barriere und die Ableitung der Zerfallswärme aus den Abfällen.

Wegen der erforderlichen Gasdurchlässigkeit ist ein poröses Versatzmaterial vorzusehen, das erst durch den Gebirgsdruck im Laufe der Zeit zu einer langzeitbarrierewirksamen Dichte kompaktiert wird. Für den Nachweis der Langzeitbarriere wird i. a. die Kompatibilität mit dem Wirtsgestein als unabdingbar angesehen. Handwerkliche Arbeiten (Vermauern, Verdichten) unmittelbar am Endlagergut sind aufgrund des gebotenen Arbeitsschutzes sehr aufwendig. Vorgefertigte Versatzelemente (Preßlinge) werden aus wirtschaftlichen Gründen nicht für den Massenversatz in Betracht gezogen. Abbindender und erhärtender (mineralischer) Pumpversatz mit geringer Kriechfähigkeit wirft ebenso wie ein pumpfähiger Solebeton (hoher Feuchteeintrag ins Endlager) besondere Probleme auf und war nicht Gegenstand der BGR-Untersuchungen.

Aus diesen Überlegungen ist ersichtlich, daß auf Salz(-grus) als Hauptkomponente für eine Langzeitbarriere im Salinar nicht verzichtet werden kann. Es werden in den verschiedenen Grubenteilen unterschiedliche Anforderungen an den Versatz gelten, die sich in ihrer Barrierewirkung ergänzen bzw. vervollständigen.

Die Vorteile des "trockenen" Salzgruses, d.h. Salzgrus mit natürlicher Bergfeuchte ($W < 0{,}2$ Gew. %) sind die anfängliche Gasdurchlässigkeit und die hohe Verfügbarkeit. Bei einer Einbauporosität von ca. 30 % ($e \approx 0{,}45$) besteht jedoch hoher Kompaktionsbedarf, der nur durch die Gebirgskonvergenz erfolgen kann. Überschlägige Berechnungen haben ergeben, daß die Barrierewirksamkeit, d. h. die Forderung nach einer Permeabilität von $k < 10\text{-}18$ m2, von trockenem Salzgrus unter normalen Gebirgsverhältnissen ohne erhöhte Temperaturen nur nach sehr langen Zeiträumen erreicht wird, was besonders für den bis dahin auftretenden Störfall "Lösungszutritt" problematisch ist.

Feuchter Salzgrus (z. B. $W = 1$ Gew. %) kompaktiert wegen seines geringeren Versatzwiderstands schneller und kann darüber hinaus auch durch technische Maßnahmen beim Einbau vorverdichtet werden. Jedoch sind hinsichtlich der damit ins Endlager eingebrachten Lösung und ihres Langzeitverhaltens noch mehrere Fragen zu beantworten.

Salzgrus mit mineralischen Zusätzen, z. B. Bentonit, verringert die Permeabilität bei gleicher Porenzahl und darüber hinaus auch den Versatzwiderstand. Jedoch muß dieses wirtsgesteinfremde Material hinsichtlich der Forderung "Kompatibilität mit dem Wirtsgestein" gesondert untersucht werden.

Salzgrus wird durch die Streckenkonvergenz kompaktiert. Mit abnehmender Porenzahl steigt sein nach außen wirkender Widerstand an, der die Konvergenz zunehmend behindert. Die Spannungsdifferenzen zwischen Versatz und Gebirge werden geringer, jedoch kompaktiert

Salzgrus auch bei sehr geringen Differenzspannungen weiter (Kriechkompaktion). Für die Langzeitbarriere wird ein geringer Versatzwiderstand angestrebt, um eine möglichst schnelle Kompaktion zu erreichen.

Kompaktionsuntersuchungen mit dem Lockergestein Salzgrus werden im Labor der BGR im Oedometer durchgeführt. Dabei ist das Volumen (Porenzahl) klar definierbar, während die dreidimensionale Spannungsverteilung in der Probe nicht genau abgeschätzt werden kann. Die von der starren seitlichen Begrenzung bewirkte Stützkraft ist erheblich geringer als die eingeprägte axiale Kolbenspannung. In der bis 200 °C beheizbaren Oedometerzelle TRE-3002 der BGR werden vorwiegend dehnungs- bzw. weggeregelte Kompaktionsversuche zur Simulation der Streckenkonvergenz gefahren. Als "Versatzwiderstand" wird ein Wert bestimmt, der sich aus der aufgebrachten axialen Spannung abzüglich gemessener Reibkräfte ergibt. Er eignet sich gut zum Vergleich der Kompaktionseinflüsse bzw. Materialvarianten.

Die geringen Hohlraumkonvergenzraten in situ lassen sich aus Zeitgründen im Labor nur vorübergehend simulieren. Um ein extrapolierbares Datenspektrum zu erhalten, werden standardmäßig vier verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten im Abstand von je einer Größenordnung gewählt, wovon die zwei kleinsten den in situ beobachteten Konvergenzraten unter erhöhten Temperaturen recht nahe kommen. Bei konstanter Temperatur ergibt sich für jede Kompaktionsgeschwindigkeit eine mit abnehmender Porenzahl exponentiell ansteigende Versatzwiderstandskurve, die auch nach vorübergehendem Wechsel der Kompaktionsrate wieder erreicht wird. Dabei muß der Übergang zu geringeren Kompaktionsraten durch ausreichend lange Relaxationsphasen überbrückt werden. Die charakteristische Kurve, die durch die jeweils vorliegende Porenzahl bestimmt ist, wird auch nach einer längeren Versuchsunterbrechung (Versuch Oedo-065/-070, > 5 Monate) wieder erreicht.

Geringere Kompaktionsraten vermindern bei gleicher Porenzahl den Versatzwiderstand z. T. erheblich. Der gleiche Effekt wird bei steigenden Temperaturen, bei erhöhtem Feuchtegehalt und - wenn auch in abgeschwächter Form - bei hinzugefügtem Bentonit beobachtet, das primär zur Herabsetzung der Permeabilität gewählt wurde.

Die grundlegenden Untersuchungen wurden mit Salzgrus aus der Schachtanlage Asse ("Referenzversatz") durchgeführt. Die Kornverteilung entspricht dem mit einer Teilschnittmaschine aufgefahrenen Haufwerk, jedoch mit dmax ≤ 31,5 mm. Der deutlich höhere Versatzwiderstand bei feinkörnigem Material macht sich erst bei maximalen Korngrößen von weniger als etwa 2,0 mm bemerkbar. Die bei Oedometerversuchen mit konstanter Last (Kriechkompaktion) gemessenen Kompaktionsraten stehen mit den Ergebnissen aus den weggeregelten Versuchen größenordnungsmäßig in Einklang. Die Streuung der Meßdaten bei den weggeregelten Oedometerversuchen ist relativ gering, wie die Zusammenstellung aller Versuche zu den verschiedenen Temperaturstufen zeigt.

Die Kornverteilungen der gelieferten Salzgrusproben aus Gorleben differieren im Rahmen einer begrenzten Bandbreite von der Asse-Kennlinie, was aber offensichtlich keinen nennenswerten Einfluß auf das Kompaktionsverhalten hat. Wählt man im σ - e - Diagramm anschaulich den orthogonalen Abstand der Kurven für die vier verschiedenen Kompaktionsraten als Maßstab, liegt der Versatzwiderstand des Gorleben-Salzgruses aus dem Zechstein 3 (z3BK/BD, z3OSO) um etwa vier Größenordnungen höher als der des Asse-Materials, d. h. ungünstiger im Sinne einer schnellen Kompaktion. Das Hauptsalz z2HS3 liegt dagegen nur um maximal eine halbe Größenordnung höher. Neueste Ergebnisse mit dem Hauptsalz z2HS1 zeigen sogar etwas günstigere Ergebnisse als das Asse-Material, so daß sich zwischen z2HS1 und z2HS3 ein Unterschied von einer Größenordnung ergibt. Dies steht mit den Ergebnissen von Kriechuntersuchungen an entsprechenden Bohrkernen qualitativ in Einklang.

Unter Berücksichtigung dieser Unterschiede sind die mit dem Referenzversatz gewonnenen Versuchsergebnisse auf Gorleben-Hauptsalz übertragbar.

Erfahrungen aus dem Betrieb des ERA Morsleben

Heinz Fischer
Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH

Im ERA Morsleben wurden seit Oktober 1997 im Ostfeld Grube Bartensleben schwachradioaktive Abfälle in Form von Fässern sowie zylindrischen Betonbehältern eingelagert. Als Einlagerungshohlräume stehen zwei großräumige ehemalige Abbaukammern zur Verfügung.

Die Einlagerung der Abfallgebinde erfolgt in mehreren Stapelebenen, wobei jede Ebene aus den stehend übereinander gestapelten Gebinden und Versatz besteht, der sich sowohl zwischen den Gebinden als Zwickelverfüllung als auch über den Gebinden als Überdeckung und Fahrplanum für die nächst höhere Stapelebene befindet.

Aufgaben des Versatzes sind hierbei:

- Schaffung eines tragfähigen Fahrplanums für die Einstapelung der Gebinde in der nächst höheren Ebene

- Verfüllung des Hohlraums zwischen den Abfallgebinden (Zwickelverfüllung) zur Volumenreduktion eines eventuell sich bildenden explosiblen Gasgemisches und zur Verhinderung des Flammendurchschlags bei einer eventuellen Zündung eines solchen Gasgemisches

- Strahlenschutz durch Überdeckung der Abfallgebinde mit erforderlicher Schichtdicke

Das Einbringen des Versatzes erfolgt im Schüttverfahren mit Fahrladern.

Aufgrund der o. g. Aufgaben und unter Berücksichtigung des angewandten Versatzverfahrens bestehen folgende Anforderungen an das Versatzmaterial:

- gute Rieselfähigkeit und Einhaltung eines bestimmten Größtkorns für die Zwickelverfüllung der Abfallgebinde

und

- ausreichende Verdichtbarkeit für die Überdeckungsschicht als Fahr- und Stapelplanum.

Zur Überprüfung der Eignung des im ERAM als potentielles Versatzmaterial zur Verfügung stehenden Salzhaufwerkes wurden vorab bodenmechanische Untersuchungen durchgeführt. Dabei erfolgte sowohl die Bestimmung des Anteils an verwertbarer Körnung des Ausgangsmaterials als auch die Ermittlung von Kennwerten des verwertbaren Kornbereichs (z. B. Schüttdichte, Lagerungsdichten, Proctordichte, Wassergehalt).

Zur Beurteilung der Verdichtung von Haufwerk, die durch das Überfahren mit Fahrladern bei der Gebindeüberdeckung erreicht werden kann, wurde ein untertägiger Feldversuch an aufgeschütteten Salzhaufwerk durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser vorlaufenden Untersuchungen zeigten, daß das Haufwerk für die Verwendung als Versatzmaterial geeignet ist.

Zur Vergrößerung des verwendbaren Kornbereiches mit dem erforderlichen Größtkorn wurde das Ausgangsmaterial später für den Versatzbetrieb in einer Brechanlage weiter zerkleinert.

Die Kennwerte (Kornverteilung, Schüttdichte) des so aufbereiteten Versatzmaterials lagen in einem mit den Ergebnissen der Voruntersuchungen vergleichbaren Bereich. Die im Fahrplanum der eingebrachten Gebindeüberdeckung errechnete Dichte liegt in der Nähe der Proctordichte der Voruntersuchungen. Die Eignung des eingesetzten Versatzmaterials hinsichtlich Rieselfähigkeit und erreichbarer Tragfähigkeit als Fahrplanum ist gegeben.

Ergebnisse der begleitenden Untersuchungen bei der Verfüllung des Forschungsbergwerks Asse

Dr. Götz Gommlich, Klaus Müller
*gsf - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH **FB** Asse*

Das Versetzen der in der Vergangenheit aufgefahrenen Abbaue im Bereich der 700-m- bis 490-m-Sohle des Forschungsbergwerks Asse dient dem Schutz des Grubengebäudes und der Tagesoberfläche durch Erhöhung der Standsicherheit des Kammer-Pfeiler-Systems und Verringerung der im Neben- und Deckgebirge ablaufenden Verformungen.

Das Verhalten des Versatzmaterials wird durch eine Anzahl von Eigenschaften bestimmt, die wiederum quantitativ durch Kennzahlen beschrieben werden.

Zu den vom Zustand des Versatzkörpers unabhängigen Eigenschaften gehören die chemisch-mineralogische Zusammensetzung und die Korndichte. Beim Versatz handelt es sich um Rückstandsalz von der Halde Ronnenberg mit etwa 90% NaCl bzw. Halit. Die Korndichte beträgt 2,17 g/cm³.

Vom Zustand abhängig ist beim Ronnenbergversatz bereits die Korngrößenverteilung. Das untertägig verblasene Material hat nach der Kornzerkleinerung durch den Förderprozess eine über die vergangenen Jahre hinweg gleichbleibende Korngröße (Medianwert 0,5 mm) und Korngrößenverteilung. Der Aufbau des Versatzkörpers ist allerdings, u.a. durch Entmischungseffekte, inhomogen. Oberflächennah kann mit einer Trockendichte von etwa 1,15 g/cm³ und nach Setzung mit 1,25 g/cm³ (Durchschnitt über den ganzen Versatzkörper) gerechnet werden. Die Dichte bei lockerster Lagerung wurde zu 1,07 g/cm³ bestimmt. Die Inhomogenität innerhalb des Versatzkörpers wurde durch Ramm- und durch Drucksondierungen nachgewiesen. Dabei wurde die ermittelte Durchschnittsdichte größenordnungsmäßig bestätigt.

Die Festigkeitseigenschaften ergeben sich u.a. aus den im Labor ermittelten Spannungs-Verformungsbeziehungen. Dabei ist es von ausschlaggebender Bedeutung, als Verformungsgeschwindigkeit einen Wert zu wählen, der den in den Abbauen tatsächlich vorhandenen Geschwindigkeiten entspricht. Bei der relevanten Verformungsgeschwindigkeit von 10^{-10} s^{-1} ergab sich beispielsweise, daß ausgehend von einer Anfangsdichte von 1,19 g/cm³ zunächst die Kompaktion bei behinderter Seitendehnung mit schwach ansteigendem Druckaufbau erfolgt. Nach 50 Jahren wird beispielsweise eine Dichte von 1,40 g/cm³ (e = 0,6) und eine Spannung im Versatz von lediglich etwa 0,25 MPa erreicht, nach 100 Jahren 1,72 g/cm³ (e = 0,3) aber bereits 1,3 MPa.

Aussagen zur Wirksamkeit des Versatzes über die mikroseismische Aktivität sind möglich. Die stützende Wirkung des eingebrachten Versatzes zeigt sich in der Beruhigung der seismischen Aktivität im Bereich der bereits verfüllten Abbaue und der Verlagerung der Aktivität in die oberen noch leeren Sohlenbereiche und in Bereiche außerhalb des Grubengebäudes. Auch in Bezug auf die Pfeilerstauchungen deutet sich das Wirksamwerden des Versatzes an.

Insgesamt kann festgestellt werden, daß die Versatzmaßnahme unter den gegebenen Bedingungen zufriedenstellend verläuft und positive Wirkungen zeigt.

Triaxiale Kompaktionsversuche, Permeabilitätsversuche und Langzeitprognosen

Dieter Stührenberg
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Die im Vergleich zu Oedometerversuchen genauere **Bestimmung des Spannungszustands** in der Versatzprobe erfolgt mit erheblich höherem Versuchsaufwand **unter triaxialer Belastung** in einer Kàrman-Zelle (BGR-Anlage TRE-2001). Die Volumenänderung der Probe wird während des Versuchs mit Hilfe einer eigens konstruierten Anlage gelöst, indem das verdrängte Luftvolumen über einen Ölpegel abgelesen wird. Der erforderliche Kompressibilitätsbeiwert C für die Luft in der Probe und im Leitungssystem wurde mit Hilfe von vergleichbaren Versuchen im Einaxialpermeameter ermittelt. Es treten zwar erhebliche Kalibrierprobleme durch Einflüsse aus Temperatur, Luftdruck, Verdunstung und geringen Leckagen auf, bevorzugt an vorverdichteten Proben mit entsprechender Anfangsfestigkeit können aber mit der Anlage belastbare Ergebnisse erzielt werden.

Bisher wurden die Versuche unter weitgehend hydrostatischer Belastung gefahren. Aus dem während einer konstanten Spannungsstufe (Mittelspannung σ_m) verdrängten Volumen werden die Kompaktionsraten errechnet. Im unmittelbaren Vergleich zum Oedometerversuch liegen diese Raten bei gleicher Porenzahl erwartungsgemäß etwas höher, d. h. der Versatzwiderstand wird bei gleicher Porenzahl und Kompaktionsgeschwindigkeit geringer sein als nach der Spannungsdefinition im Oedometerversuch.

Die für die Funktion einer Langzeitbarriere letztlich entscheidende **Permeabilität** des Versatzmaterials ist an Salzgrus und Salzgrus-Bentonit-Gemischen unter schrittweiser Verdichtung im **Einaxialpermeameter** mit den Durchströmungsmedien Öl und gesättigte Salzlösung untersucht worden. Hierbei zeigt sich, daß trotz Berücksichtigung der hydraulischen Parameter beider Medien in der Auswertung nach Darcy für gleiches Versatzmaterial der Einsatz von Salzlösung eine stärkere Permeabilitätsreduktion bewirkt.

Der Zusatz von 15 % Bentonit setzt im Vergleich zu "reinem" Salzgrus die Permeabilität bei gleicher Porenzahl um mehrere Größenordnungen herab.

Um einen Lösungszutritt im unkompaktierten Zustand des Versatzes simulieren zu können, wurde die **Oedometerzelle** TRE-3002 1998 mit einer Benetzungs- bzw. Durchströmungsanlage ausgerüstet. Analog zum Einaxialpermeameter (s. u.) kann Flüssigkeit während des Versuchs über die untere Druckplatte der Probe zugeführt werden und ggf. über den oberen Druckkolben wieder abfließen, so daß die Anlage auch für Durchströmungsversuche nutzbar ist. Die im ersten Versuch (Oedo-073) unter der Kompaktionsgeschwindigkeit $6{,}9 \cdot 10^{-9}$ s^{-1} bei einer Porenzahl von e = 0,20 zugeleitete gesättigte Salzlösung ergab einen sofortigen Rückgang des Versatzwiderstands von 14,4 auf 1,5 MPa. Danach verhielt sich die Probe ähnlich wie ein 1994 belasteter Salzgrusprüfkörper, der vor dem Einbau mit 1,2 Gewichts-% Salzlösung besprüht worden war. Die während der weiteren Verdichtung (bis e = 0,019) durchgeführten 7 Durchströmungskampagnen beeinflussen das Kompaktionsverhalten nicht mehr.

Die Auswertung der Durchflußmengen nach Darcy aus dem Versuch Oedo-074 ergab erheblich höhere Permeabilitäten als die früher im Einaxialpermeameter gemessenen Werte. Mögliche Ursachen sind eventuell vorhandene bevorzugte Wegsamkeiten aufgrund der geringeren Probenhöhe und größeren Anströmfläche im Oedometerversuch, die vermutlich homogenere Verdichtung des Salzgruses oder auch chemische Umlösungen. Eine chemische Analyse der ausgeflossenen Lösung ergab gegenüber der zugeführten (gesättigten) Salzlösung einen höheren Kalium- und Sulfatanteil und einen verringerten Calciumanteil.

Weitere Versuche, u. a. auch mit Q-Lösung, sind geplant. Zur Absicherung der Ergebnisse für die Kompaktions-Permeabilitäts-Beziehungen sollen auch Durchströmungsversuche in der Triaxialanlage TRE-2001 (nur mit Spindelöl) durchgeführt werden.

Mit einem vereinfachten Berechnungsmodell (Kreisringscheibe), dem BGR-Berechnungsansatz für stationäres Kriechen von Steinsalz, dem Stoffgesetz von ZHANG für die Kompaktion von Salzgrus, den Ergebnissen aus den BGR-Oedometerversuchen (Versatzwiderstand) und einer gewählten "Anfangskonvergenzrate" für den Hohlraum ist der Kompaktionsverlauf von Versatzvarianten abgeschätzt worden. Die dabei zu erwartenden Permeabilitäten wurden unter Verwendung der Ergebnisse aus den Durchlässigkeitsuntersuchungen im Einaxialpermeameter angegeben. Vorweg wurden die Berechnungen mit den Randbedingungen des TSS-Großversuchs in der Schachtanlage Asse durchgeführt und mit den dortigen Meßergebnissen verglichen. Für den vorliegenden Meßzeitraum von 5 Jahren ergeben sich für Konvergenz, Versatzdruck und -porosität eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

Aus der langfristigen Prognose für die Versatzvarianten, "trockener" Salzgrus, feuchter Salzgrus und Salzgrus-Bentonit-Gemisch geht hervor, daß der Zeitbedarf, den "trockener" Salzgrus für die Kompaktion bis hin zu einer wirksamen Barriere benötigt, für Temperaturen unter 100 °C möglicherweise zu groß ist (> 1000 a). Dagegen können feuchter Salzgrus und Salzgrus-Bentonit-Gemische je nach gesetzter Anfangskonvergenzrate durchaus in akzeptablen Zeiträumen zu einer wirksamen Barriere kompaktieren.

Für numerische Berechnungen und Prognosen ist unter Erweiterung des Rechenansatzes von ZHANG ein Kompaktionsstoffgesetz in das FE-Programm ANSALT implementiert worden. Im Rahmen der Benchmark-Studien CS2 im F.u.E.-Projekt BAMBUS wurden erfolgreiche Testrechnungen durchgeführt.

Entwicklung und Validierung eines Stoffgesetzes für den Referenzversatz

Ekkehard Korthaus
Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (INE)

Für die Beschreibung des Kompatierungs- und Verformungsverhaltens des Referenzversatzes unter hydrostatischer und deviatorischer Belastung wurde eine Stoffgesetzformulierung von *Hein /1/* herangezogen, die in ihrer Gesamtheit sowohl die Vorgänge der Kornverschiebungen als auch der viskoplastischen Kornverformungen beinhaltet. Als wesentliche Vereinfachung wurde angenommen, daß unter Endlagerbedingungen, anders als bei üblichen Laborversuchen, nur die Kornverformungen einen wesentlichen Beitrag zur Gesamtverformung liefern. Dies ist dadurch gerechtfertigt, daß im Endlager nur niedrige Verformungsraten zu erwarten sind, und damit, gemessen am jeweiligen Kompaktionsgrad, nur relativ geringe Belastungen. Stark deviatorische Verhältnisse sind ebenfalls unwahrscheinlich. Dies bedeutet, daß nennenswerte Kornverschiebungen allenfalls in der Anfangsphase der Endlagerung auftreten. Da zu dieser Zeit die Stützwirkung des Versatzes ohnehin niedrig und daher von geringer Bedeutung ist, kann hier auf eine genauere Modellierung verzichtet werden.

Das Stoffgesetz lautet damit: $$\partial\varepsilon/\partial t = A \cdot e^{-Q/R/T} \cdot (h_1 \cdot p^2 + h_2 \cdot q^2)^{(n-1)/2} \cdot (h_1 \cdot p/3 \cdot \mathbf{1} + h_2 \cdot \mathbf{S})$$

Dabei ist $\partial\varepsilon/\partial t$ die Verformungsrate, Q die Aktivierungsenergie, R die Gaskonstante, p die mittlere Normalspannung, q die deviatorische Spannungsinvariante, n der Spannungsexponent, **1** der Einheitstensor und **S** der Tensor der deviatorischen Spannung. Die Funktionen h_1 und h_2 hängen vom Kompaktionsgrad und der Anfangsporosität ab.

Für die Funktion h_1 wurde in Abänderung der Formulierungen von *Hein* die folgende Wahl getroffen:

$$h_1 = a / (((\eta_0/\eta)^c - 1)/\eta_0^r)^m$$

Mit dieser Formulierung wird einerseits die Grenzbedingung $h_1 \rightarrow 0$ für verschwindende Porosität η erfüllt (Kompaktionsrate null) und außerdem eine bei *Hein* nicht enthaltene Abhängigkeit von der Anfangsporosität η_0 berücksichtigt.

Für h_2 wurde die ursprüngliche Form mit geänderter Normierung übernommen: $h_2 = b \cdot h_1 + 1$

Als Grundlage für die Anpassung des Stoffgesetzes an den Referenzversatz wurde eine Reihe von Messungen mit der echt triaxialen Meßeinrichtung des INE /2//3/ durchgeführt: An 16 Proben wurden 80 Lastfälle in Form von Phasen mit konstanter Spannung und einer typischen Dauer von 4 – 6 Tagen untersucht. Die Messungen sind durch folgende Daten gekennzeichnet:

Spannungen:	2 – 20 MPa	Kleinste Endporosität:	3.5 %
Temperaturen:	20 – 150°C	Kompaktionsraten:	$5 \cdot 10^{-5}$ – 10^{-3}/d
Anfangsporositäten:	30 – 38 %		

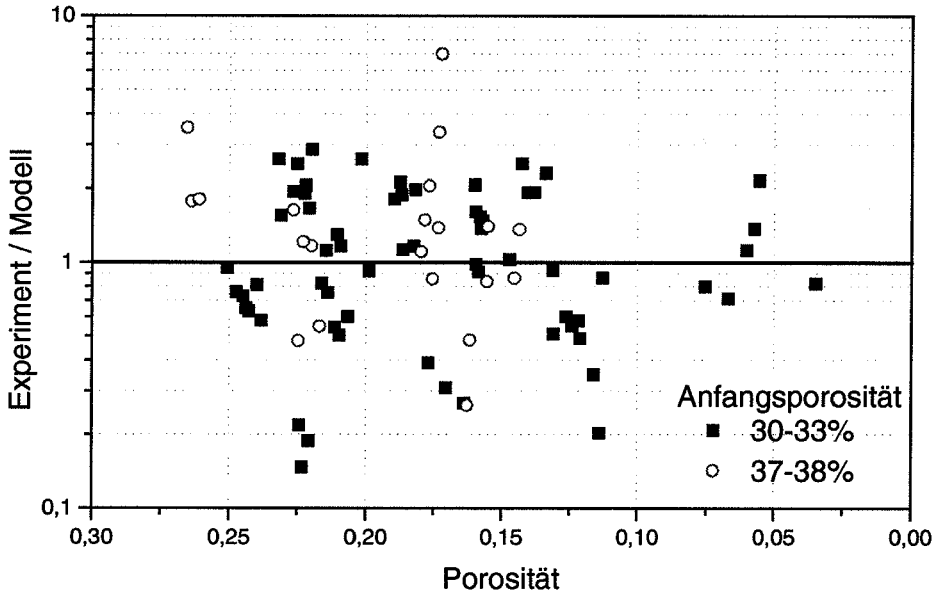
Von den 80 Lastfällen waren 42 hydrostatisch und 38 deviatorisch. Es wurden verschiedene Arten von Deviatoren gewählt: Symmetrischer Deviator, Oedometer-Bedingungen und Manteldruck-Belastung.

Bei der Anpassung des Stoffgesetzes an die Meßdaten wurden Q und n entsprechend den Werten des Asse-Salzes (Q=54.2 kJ/mol, n=5) gewählt, was von den Messungen in guter Näherung bestätigt wird, und womit bei η=0 der gewünschte Übergang zum Stoffgesetz für das kompakte Salz erreicht wird.

Die übrigen Parameter des Stoffgesetzes ergaben sich damit zu

$A = 1.09 \cdot 10^{-6}/s/MPa^5$ $a = 0.12$ $c = 0.1$ $r = 0.85$ $m = 2.25$ $b = 0.9$

In der Abbildung ist das Verhältnis sämtlicher am Referenzversatz gemessenen Kompaktionsraten zu den aus dem angepaßten Stoffgesetz folgenden Werten dargestellt. Ein ähnliches Bild ergibt sich beim Vergleich der effektiven Verformungsraten bei deviatorischen Belastungen. Die relativ große Streuung bei den einzelnen Meßwerten läßt sich zum Teil aus experimentellen Unsicherheiten erklären, z.B. den nicht genau definierten Korngrößenverteilungen der einzelnen Proben, sowie aus den teilweise sehr unterschiedlichen Belastungsgeschichten mit hydrostatischen und deviatorischen Spannungszuständen, die von dem relativ einfachen Stoffgesetz nur näherungsweise beschrieben werden können.



Kompaktionsraten: Verhältnis zwischen Meßergebnissen und angepaßtem Stoffgesetz

Anhand der Ergebnisse des TSS-Versuchs in der Asse wurde eine erste Validierung des Stoffgesetzes vorgenommen. Dazu wurde eine spezielle thermomechanische Modellrechnung durchgeführt, bei der durch gezielte Modifikation des Stoffgesetzes für Steinsalz die berechnete Streckenkonvergenz und damit die Versatzkompaktion mit dem im Versuch beobachteten Verlauf in Deckung gebracht wurden. Der Vergleich des berechneten mit dem gemessenen Druckaufbau am Versatz (d.h. an den Streckenwänden) ergab, daß sich der Referenzversatz in situ wesentlich steifer verhält, als es nach dem an die Laborversuche angepaßten Stoffgesetz zu erwarten wäre. Als mögliche Ursache wird vermutet, daß bei der technischen Einbringung des Versatzes in die Versuchsstrecken Entmischungen aufgetreten sind, die zonenweise unterschiedliche Korngrößenverteilungen mit wesentlich schmalerer Sieblinie zur Folge hatten. Im Rahmen der geplanten Nachuntersuchungen zum TSS-Versuch soll untersucht werden, in wieweit diese die beobachteten Diskrepanzen erklären können, und welche Auswirkungen bei stärkerer Kompaktion als der im TSS-Versuch erreichten zu erwarten sind.

Literatur

/1/ *Hein, H.J: Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgranulat, Dissertation RWTH Aachen, 1991.*

/2/ *Korthaus, E., Schwarzkopf, W.: Eine triaxiale Meßeinrichtung zur Untersuchung des Kompaktierungsverhaltens von Salzgrus, KfK 5211, 1993.*

/3/ *Korthaus, E.: Consolidation and Deviatoric Deformation Behaviour of Dry Crushed Salt at Temperatures up to 150°C, 4th Conference on the Mechanical Behaviour of Salt, Montreal, Juni 1996.*

Ergebnisse aus In-situ-Versuchen

Tilmann Rothfuchs, Johannes Droste, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Alexandra Pudewills ,Forschungszentrum Karlsruhe/INE

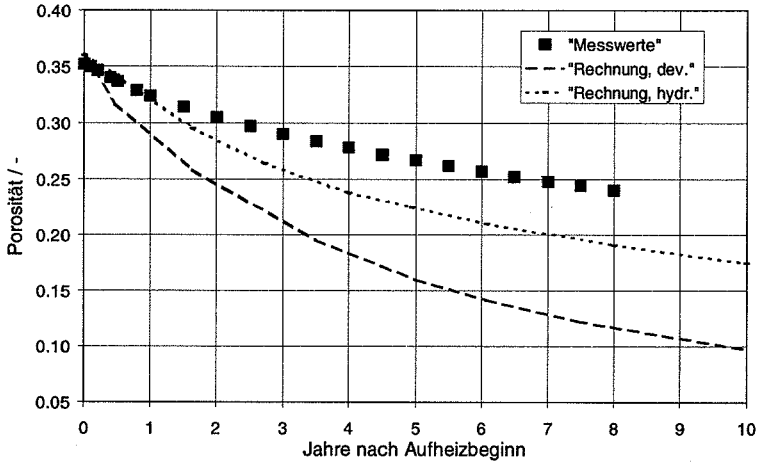
Die notwendige Überprüfung der Modelle zur Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus erfolgte zwischen 1990 und 1998 in drei vom BMBF geförderten In-situ-Experimenten im Forschungsbergwerk Asse. Im VVS-Versuch (ehemals TSS-Versuch (Schneefuß et al., 1993)) wurde das Kompaktionsverhalten von Salzgrusversatz bei der direkten Endlagerung bestrahlter Brennelemente in Polluxbehältern in Strecken untersucht, während bei den zwei DEBORA-Versuchen das Versatzverhalten in Endlagerbohrlöchern für verglaste hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im Vordergrund stand.

Die beiden VVS-Versuchsstrecken auf der 800-m-Sohle der Asse sind jeweils 70 m lang, 3,5 m hoch und 4,5 m breit. In jeder Versuchsstrecke wurden drei simulierte Pollux-Behälter mit einer Länge von 5,5 m, einem Durchmesser von 1,5 m und einer Masse von 65 t installiert. Die Behälter wurden mit einer dem derzeitigen Endlagerkonzept entsprechenden Leistung von jeweils 6,4 kW beheizt. Nach der Installation der Erhitzer und der geotechnischen Instrumentierung wurden die Versuchsstrecken mit Salzgrus versetzt.

Die Aufheizphase begann am 25. September 1990. Bereits nach fünf Monaten wurde auf der Oberfläche der Behälter die maximale Temperatur von 210 °C erreicht. Bis zum Aufheizende am 1. Februar 1999 sank die Temperatur infolge der zunehmenden Wärmeleitfähigkeit des kompaktierenden Versatzmaterials auf ca. 170 °C ab.

Infolge der erhöhten Streckenkonvergenzen kompaktierte der Versatz und die Versatzporosität nahm von ursprünglich 35 % auf am Ende ca. 24 % ab. Ein Vergleich mit den Ergebnissen von Prognoserechnungen zeigt, daß sowohl die Streckenkonvergenz als auch die Versatzkompaktierung im wärmeren Zentralbereich des Versuchs überschätzt wurden. Spätere Begleitrechnungen mit einem verbesserten Materialmodell für Versatz (das Stoffmodell wurde bereits in Benchmark CSCS verwendet) führten zu keiner besseren Übereinstimmung mit der Messung. Abbildung 1 zeigt die in situ ermittelte Porosität im Vergleich mit den Rechenergebnissen von Prognoserechnungen und Parameterstudien.

Vergleiche zwischen den Messungen und den gesamten Rechenergebnissen deuten darauf hin, daß sich das Versatzmaterial in situ wesentlich steifer verhält als in Laborexperimenten. Ein Grund dafür könnte die Entmischung des Salzgruses beim Versetzen der Strecken mittels Schleudertechnik sein. Bei den Laborexperimenten wurde relativ homogenes Material verwendet.



Bei den DEBORA-Versuchen (Rothfuchs et al., 1996) wurde das Kompaktierungsverhalten und die Durchlässigkeit von Salzgrus sowohl im Ringspalt zwischen den wärmeproduzierenden Kokillen und dem Gebirge (DEBORA 1) als auch im Verschlußbereich (DEBORA 2) oberhalb der Kokillensäule untersucht. Beide Experimente wurden in 0,6 m durchmessenden ca. 15 m tiefen Bohrlöchern in einer Strecke auf der 800-m-Sohle der Asse durchgeführt. Der Salzgrus wurde hier im Gegensatz zum VVS-Versuch manuell ohne größere Entmischungen eingebracht. Bei DEBORA 1 wurden die wärmeproduzierenden Kokillen durch eine beheizte Verrohrung innerhalb des Bohrloches simuliert, während der Wärmeeintrag in den Verschlußbereich bei DEBORA 2 durch vier außerhalb des Bohrloches bei 1,1 m Radius installierte Erhitzer erfolgte. Innerhalb der jeweiligen Versuchsdauer von 12 bzw. 15 Monaten wurden maximale Salzgrustemperaturen von 185 °C bzw. 135 °C erreicht. Die gemessenen maximalen Radialspannungen lagen in beiden Versuchen bei etwa 15 MPa.

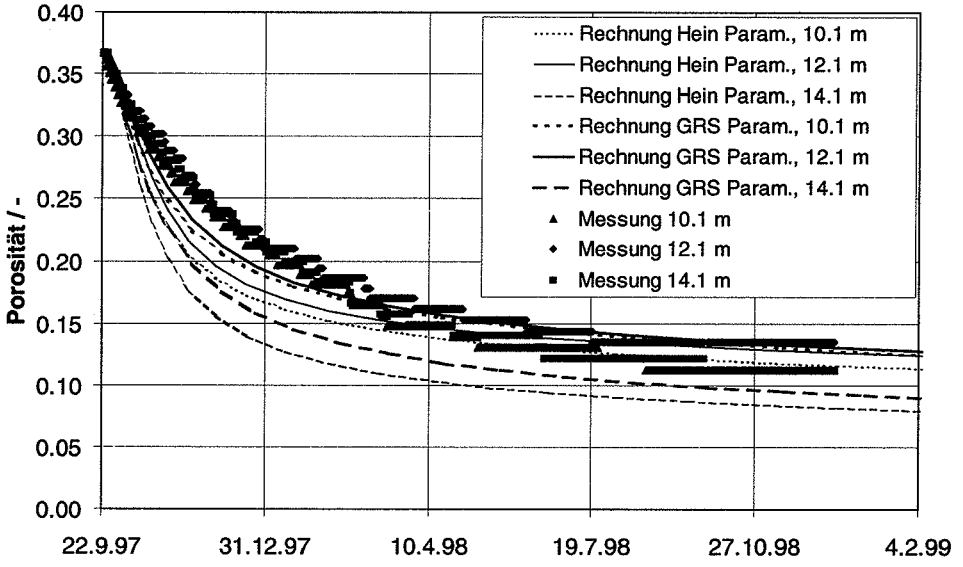


Abb. 2 Porositätsabnahme im Versuch DEBORA 2

Bei den DEBORA-Versuchen wurde eine wesentlich bessere Übereinstimmung der Meß- und Prognoseergebnisse beobachtet (vgl. Abbildung 2). Insbesondere die für das Langzeitverhalten des kompaktierenden Versatzes relevanten geringeren Kompaktionsraten gegen Ende der Versuche wurden vergleichsweise gut prognostiziert, woraus der Schluß gezogen werden kann, daß mit den verwendeten Materialmodellen für relativ homogenen Versatz eine befriedigende Vorhersage des Kompaktionsverhaltens möglich ist. Diese Feststellung schließt allerdings die Notwendigkeit weiterer F+E-Arbeiten, insbesondere zur besseren Absicherung der in den Modellen verwendeten Materialparameter nicht aus.

Das Durchlässigkeitsverhalten des kompaktierenden Salzversatzes wurde ebenfalls untersucht. Aus den gewonnenen Daten wurde zwischen der Permeabilität k und der Porosität ϕ die Relation $k = 1{,}3 \cdot 10\text{-}8 \cdot \phi$ 5,0 m2 abgeleitet.

Literatur

Schneefuß, J., Droste, J., Gommlich, G., Jockwer, N., Kunze, J., Mönig, J.:"Testplan zum Demonstrationsversuch "Thermische Simulation der Streckenlagerung" im Salzbergwerk Asse (Revidierte Fassung)," Hauptband Direkte Endlagerung, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1993).

Rothfuchs, T., Prij, J., Kröhn, K.-P., Van den Horn, B.A., Wieczorek, K., 1996: The DEBORA-Project Phase I: Development of borehole seals for high-level radioactive waste repositories in salt formations, Final Report, Nuclear Science and Technology, European Commission, EUR 16928 EN.

Eigenschaften von Salzgrus in der Nachbetriebsphase
Materialmodelle und Benchmark-Berechnungen

Stefan Heusermann, Ulrich Heemann
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Im Rahmen des EU/BMBF-Forschungsvorhabens „BAMBUS" wurden von Januar 1996 bis Dezember 1998 im Teilprojekt „Comparative Study on Crushed Salt $(CS)^2$" umfangreiche Benchmark-Studien zur numerischen Simulation des thermomechanischen Verhaltens von Salzgrus durchgeführt. Ziel dieser Studien war es, die Zuverlässigkeit und Aussagegenauigkeit von Prognoseberechnungen zum Verhalten versetzter Strecken und Bohrungen im Salzgebirge unter dem Einfluß von Gebirgsspannung und Temperatur zu erhöhen.

An der Durchführung der Benchmark-Studien waren neun Organisationen aus fünf europäischen Ländern beteiligt: BGR, DBE, FZK/INE, GRS (alle Deutschland), CIMNE (Spanien), ENRESA (Spanien), G.3S (Frankreich), NRG (ehem. ECN, Niederlande), WS Atkins (Großbritannien). Die Koordinierung der Benchmark-Studien sowie die Organisation der halbjährlich stattfindenden Benchmark-Treffen oblag der BGR unter Beteiligung eines Experten von WS Atkins und des Projektträgers (FZK/PTE). Die konkrete Aufgabenstellung und Bewertung der Ergebnisse erfolgte gemeinsam von allen Partnern.

Das $(CS)^2$-Projekt wurde in drei Phasen mit zunehmender Komplexität aufgeteilt:

- Phase 1 umfaßte Modellberechnungen zu zwei einfachen hypothetischen Problemstellungen, um die verwendeten Programmsysteme sowie die zum Teil sehr unterschiedlichen Versatzmodelle zu vergleichen und zu verifizieren.
- Phase 2 umfaßte neben komplexeren Modellberechnungen zur Prognose eines Mehrstufen-Kompaktionsversuchs an Salzgrus sowie zur Prognose des Verhaltens eines versetzten Bohrlochs unter dem Einfluß eines Erhitzers zusätzlich auch den direkten Vergleich der Meßergebnisse aus Kompaktionsversuchen, die in drei verschiedenen Labors an gleichem Salzgrus zur Klärung bestehender experimenteller Diskrepanzen durchgeführt wurden.
- Phase 3 umfaßte insbesondere Modellberechnungen zur Simulation des In-situ-Verhaltens von Salzgrus. Dazu erfolgte die Modellierung des auf der Schachtanlage Asse über viele Jahre durchgeführten Versuchs zur „Thermischen Simulation der Streckenlagerung (TSS)".

Von den einzelnen Partnern wurden verschiedene, zum Teil sehr voneinander abweichende Stoffgesetzformulierungen für Salzgrus eingesetzt. Die von DBE, FZK/INE und NRG verwendeten Materialmodelle basieren im wesentlichen auf der Formulierung von HEIN (1991), wurden jedoch z.T. weiterentwickelt oder modifiziert (KORTHAUS, 1998). CIMNE verwendete ein physikalisch begründetes Modell unter Berücksichtigung zweier Deformationsmechanismen (OLIVELLA, 1995). BGR verwendete eine Weiterentwicklung des phänomenologisch begründeten Modells von ZHANG et al. (1995). Von G.3S wurde eine modifizierte Version des konventionellen CAMCLAY-Modells verwendet.

Die Benchmark-Studien führten zu folgenden Ergebnissen:
- Alle Projektpartner konnten mit ihren unterschiedlichen Programmsystemen und Materialmodellen die in den einzelnen Benchmark-Phasen gestellten Aufgaben lösen. Die Abweichungen zwischen den von den einzelnen Partnern erzielten Ergebnisse lagen i.a. in einer zufriedenstellenden Bandbreite.
- Bei einigen Programmen traten erhebliche numerische Probleme auf, die im weiteren Verlauf i.a. überwunden werden konnten.

- Als eine wesentliche Schwierigkeit stellte sich heraus, daß die für die einzelnen Stoffgesetzparameter erforderliche experimentelle Datenbasis widersprüchlich war. Die daraufhin durchgeführten, möglichst ähnlichen Laborversuche an einheitlichem Versatz konnten die Unsicherheit bezüglich der experimentellen Datenbasis deutlich reduzieren.
- Die notwendige Vereinfachung der Simulation des TSS-Versuchs mittels eines zweidimensionalen Berechnungsmodells führte zu einer Überschätzung der in situ gemessenen Temperaturen, Streckenkonvergenzen und Versatzkompaktion.

Die Benchmark-Studien vermittelten einen umfassenden Überblick über den Stand der Entwicklung und Anwendung von Materialmodellen für Salzgrus. Mit den vorhandenen Programmsystemen und den Materialmodellen ist grundsätzlich die Prognose des thermomechanischen Verhaltens verfüllter Strecken und Bohrungen im Salzgebirge möglich. Zukünftige theoretische Untersuchungen sollten insbesondere den Einfluß von Feuchte sowie der Korngrößenverteilung umfassen. Zudem ist es notwendig, die Weiterentwicklung numerisch stabiler und schneller Programmsysteme voranzutreiben, um auch die effiziente Bearbeitung dreidimensionaler Problemstellungen zu ermöglichen.

Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus

Werner Bechthold, Forschungszentrum Karlsruhe (FZK)
Mehdi Ghoreychi, Ècole Polytechnique Palaisau, France (G.3S)

Die Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus ist eine der Voraussetzungen für die Berechnung der Temperaturfelder in der Umgebung eingelagerter wärmeentwickelnder und mit Salzgrus versetzter Abfälle und damit eine Grundlage für die erforderlichen Rechnungen zur Prognose der thermomechanischen Bedingungen im Endlager. Bislang wurde sie durch Interpolation aus Messungen ermittelt, die in den 80er Jahren an Salzgrus mit jeweils konstanter Porenzahl durchgeführt worden waren.

Weitergehende Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und spezifischen Wärme von Salzgrus sind in den Jahren 1996 bis 1998 im Rahmen des von der Europäischen Kommission co-finanzierten Projekts BAMBUS (Backfill and Material Behaviour in Underground Salt Repositories) von G.3S (Groupement pour l'Étude des Structures Souterraines de Stockage) durchgeführt worden /1/. Dabei wurden zum einen die entsprechenden Werte als Funktion der Porosität im Labor gemessen und zum anderen wurden aus den gemessenen Werten allgemein gültige Gleichungen für ihre Abhängigkeit von der Salzgrus-Porosität abgeleitet. Diese Gleichungen wurden in einem weiteren Schritt auf Steinsalz normiert.

Die Messungen wurden bei G.3S an zylindrischen Proben mit Durchmessern von 70 bis 100 mm bei Porositäten von 1,3 % bis 28,5 % bei Raumtemperatur oder bei 80°C vorgenommen. Die Porosität von 1,3 % ist die niedrigste Porosität, die in Oedometer-Tests bei Drücken bis 130 MPa erreicht werden konnte, die Porosität von 28,5 % stellt die Grenze dar, oberhalb derer die Proben zu lose waren, um mit der angewandten Methode noch vermessen werden zu können.

Zur Durchführung der Messungen wurde ein dünner kreisförmiger Heizdraht (Kreisdurchmesser 10 mm) zwischen zwei Salzgrus-Proben positioniert und durch einen kurzzeitigen elektrischen Strom von 2 W etwa 60 Sekunden lang erwärmt. Die Temperaturentwicklung wurde von einem Wärmefühler im Zentrum des Kreises gemessen. Die Wärmeleitfähigkeit λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) und die Temperaturleitfähigkeit k ($m^2 \cdot s^{-1}$) wurden mit Hilfe der Maximaltemperatur T_m und dem Zeitpunkt ihres Auftretens t_m ermittelt. Aus diesen beiden Werten wurde mit $\rho \cdot C = \lambda \cdot k^{-1}$ die spezifische Wärme C ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) berechnet.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Abb.1 (a) bis (d) zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass die gemessenen Werte einen mehr oder weniger linearen Verlauf über der Porosität aufweisen. Daher ist es gerechtfertigt, die Abhängigkeit von der Porosität bei Raumtemperatur durch die in den Abbildungen 1 (a) bis 1 (d) angegebenen Gleichungen näherungsweise darzustellen. Der Vergleich der durch Extrapolation auf die Porosität $\varphi = 0$ für kompaktes Steinsalz errechneten Werte mit den an Asse-Steinsalz gemessenen Werten

$$\lambda_S = 5{,}38 \ \ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1},\ C_S = 859 \ \ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1},\ k_S = 2{,}86 \cdot 10^{-6} \ \ m^2 \cdot s^{-1}$$

zeigt, dass die errechnete Wärmeleitfähigkeit geringer und die spezifische Wärme höher als die gemessenen Werte sind. Andererseits aber sind die relativen Abweichungen gering. Daher wurden die oben angegebenen Gleichungen auf die entsprechenden Werte von Steinsalz normiert (Tabelle 1).

Die Abweichungen der mit den Gleichungen in Tabelle 1 errechneten Werte von den gemessenen Werten sind < 10 %. Angesichts der Streubreite der im Labor gemessenen Werte kann davon ausgegangen werden, dass mit diesen Gleichungen Berechnungen mit zufriedenstellender Genauigkeit möglich sind. Dies wurde durch die Anwendung der Ergebnisse in den im Rahmen des BAMBUS-Projekts durchgeführten thermomechanischen Modellrechnungen bestätigt.

Tab. 1 Thermische Eigenschaften von Salzgrus (Index CS), normiert auf die entsprechenden Werte von Steinsalz (Index S), als Funktion von Temperatur θ und Porosität φ. (Temperaturbereich 20°C – 200°C; Porosität 0 – 0,35)

Eigenschaft	Gleichung	Einheit
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_{cs}(\varphi,\theta) = \lambda_s(\theta) \cdot (1 - 2.7 \cdot \varphi)$ $\lambda_s(\theta) = 5.734 - 1.838 \cdot 10^{-2}\theta + 2.86 \cdot 10^{-5}\,\theta^2 - 1.51 \cdot 10^{-8}\,\theta^3$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Spezifische Wärme	$C_{cs}(\theta) = C_s(\theta)$ $C_s(\theta) = 855 + 0.177\theta$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Wärmekapazität	$(\rho C)_{cs} = \rho_{cs}(\varphi) \cdot C_s(\theta)$	$J \cdot m^3 \cdot K^{-1}$
Temp.leitfähigkeit	$k_{cs} = \lambda_{cs} : (\rho \cdot C)_{cs}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
Dichte	$\rho_{cs}(\varphi) = \rho_s \cdot (1 - \varphi)$	$kg \cdot m^{-3}$

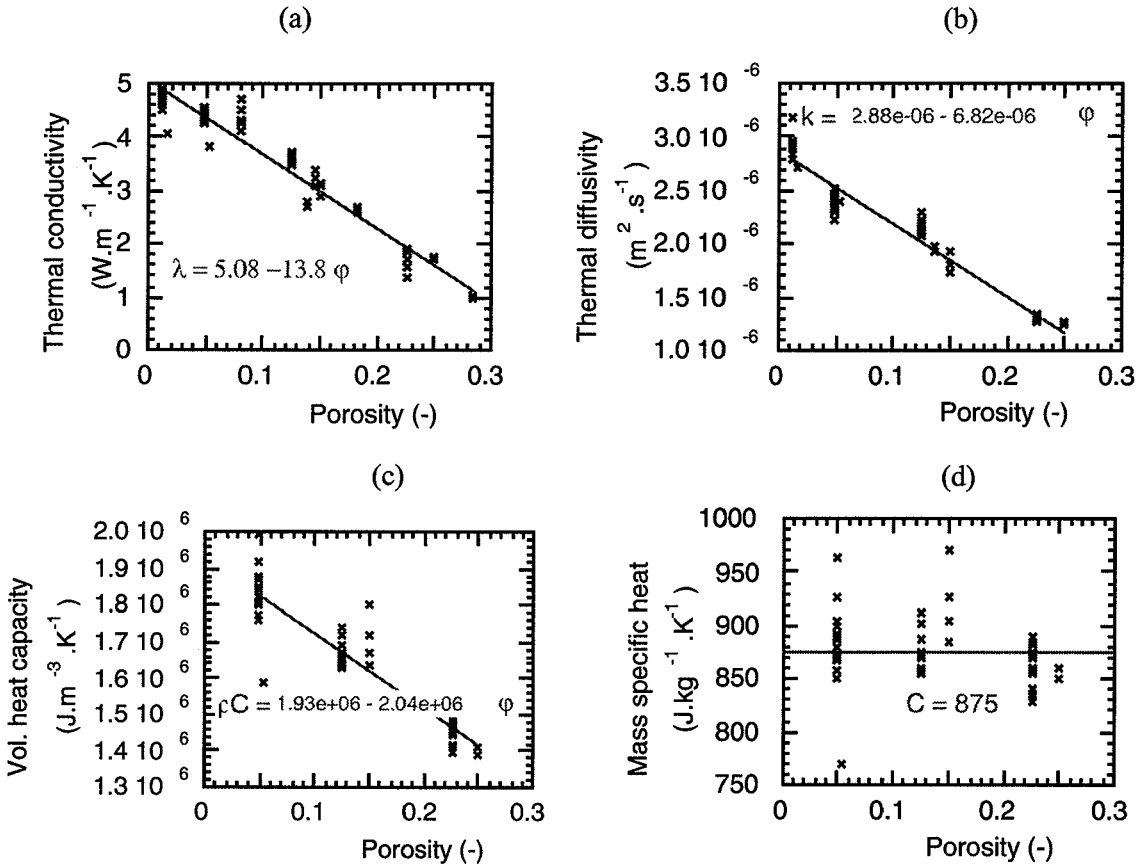


Abb. 1 Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und spezifische Wärme von Salzgrus als Funktion der Porosität

Literatur

/1/ *BECHTHOLD, W., ROTHFUCHS, T., POLEY, A., GHOREYCHI, M., HEUSERMANN, S., GENS, A., OLIVELLA, S., "Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project)", Final Report (1999), European Commission, EUR 19124 EN*

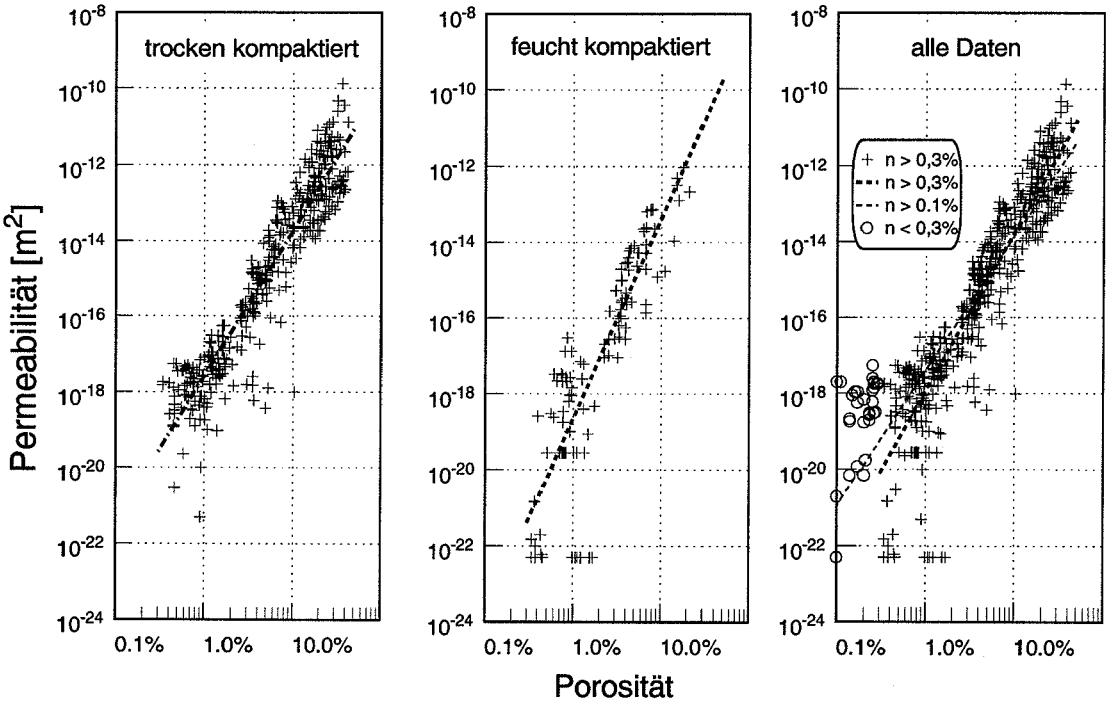
Zusammenhang von Permeabilität und Porosität von Salzgrus

Ingo Müller-Lyda, Eckhard Fein
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

In Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager im Salinar muß die Strömung von Gasen, Laugen und Schadstoffen durch die natürlichen und technischen Barrieren modelliert werden. Technische Barrieren sind Schacht- und Bohrlochverschlüsse, Dämme und Abschlußbauwerke, für die nach heutiger Planung kompaktierter Salzgrus das wesentliche Baumaterial ist. Dadurch ist die Permeabilität von Salzgrus, wie in dem Beitrag „Erforderliche Daten und Modelle für die Sicherheitsanalyse" gezeigt wird, einer der bestimmenden Parameter für die Strömungsvorgänge in bzw. aus einem Endlager.

Die Permeabilität (k) von kompaktiertem Salzgrus wird durch die mikroskopische Verteilung und die Vernetzung der Porenräume bestimmt. Dadurch ist k eine komplexe Funktion mit vielen Einflußgrößen, von denen die Porosität die wichtigste ist. Der größte Teil der Variabilität gemessener Permeabilitäten von kompaktiertem Salzgrus läßt sich mit der mittleren Porosität (n) beschreiben. Der porositätsunabhängige Teil der Variabilität kann prinzipiell durch Einbeziehung weiterer Parameter, wie die Korngröße, die Feuchte oder die Kompaktionsgeschwindigkeit, weiter verringert werden. Weil diese Größen aber nicht von vornherein für das gesamte Endlager bekannt oder festgelegt sind, wird diese Restvariabilität in probabilistischen Sicherheitsanalysen durch eine Berücksichtigung der statistischen Unsicherheiten der Koeffizienten in der Permeabilitäts-Porositätsrelation einbezogen.

Für diese Relation wird ein Ansatz der Form: $\bar{k} = A_0 \cdot n^{m_0}$ gewählt und die Bestwerte für die beiden Koeffizienten A_0 und m_0 durch lineare Regression der log(k)-Werte nach den log (n)-Werten ermittelt. Die im unteren Diagramm rechts dargestellte Basis der verwertbaren Daten für die statistischen Berechnungen umfaßte ingesamt 484 Einzelmessungen aus den aufgeführten Publikationen und aus dem BAMBUS-Projekt. Diese decken den Porositätsbereich zwischen 0,3% und 42% ab. Die Untersuchung ergibt, daß feucht (mittleres Diagramm) und trocken kompaktierter Salzgrus (linkes Diagramm) signifikant unterschiedliche Porositätsexponenten m_0



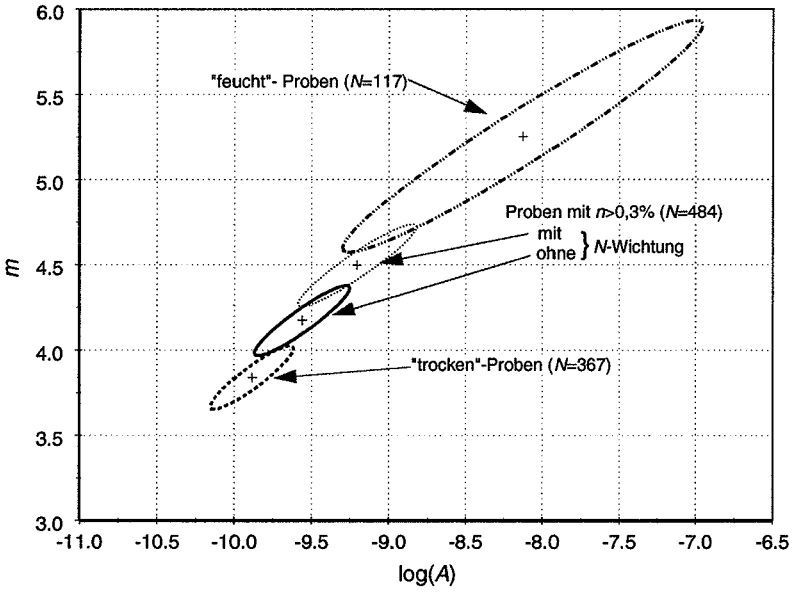
besitzen. Die Ergebnisse der Regressionsrechnungen sind in der Tabelle zusammengefaßt. Wegen des unterschiedlichen Umfangs N der Stichproben (117 gegenüber 367) wurde alternativ eine Regression für alle Daten mit $1/N$-gewichteten Residuen durchgeführt. Diese ergibt einen Porositätsexponenten, der etwa gleich dem Mittelwert der Exponenten für feucht und trocken kompaktierten Salzgrus ist.

Datensatz	N	n_{min}	$\log(A)_0$	A_0	m_0	$\Delta\log(A)$	Δm	$\rho_{\log(A),m}$	$\rho_{A,m}$
trocken	367	0,3%	-9,885	$1{,}303\cdot10^{-10}$	3,841	0,217	0,151	0,9159	0,9011
feucht	117	0,3%	-8,127	$7{,}464\cdot10^{-9}$	5,253	0,952	0,553	0,9645	0,6887
Alle, ungewichtet	484	0,3%	-9,561	$2{,}748\cdot10^{-10}$	4,175	0,251	0,166	0,9266	0,9063
Alle, $1/N$-gewichtet		0,3%	-9.205	$6{,}237\cdot10^{-10}$	4.497	0,310	0,196	0,8813	0,8522

Damit ergeben sich die Permeabilitäts-Porositätsrelationen für beliebigen ($\bar{k}$), trocken (k_{tr}) und feucht kompaktierten (k_{fe}) Salzgrus mit Porositäten $n > 0{,}3\%$:

$$k_{tr} = 1{,}303\cdot10^{-10}\cdot n^{3{,}841}\,, \qquad k_{fe} = 7{,}464\cdot10^{-9}\cdot n^{5{,}253}\,, \qquad \bar{k} = 6{,}237\cdot10^{-10}\cdot n^{4{,}497}\,[\mathrm{m}^2]\,.$$

Die in der Tabelle für $\log(A_0)$ und m_0 angegebenen Standardabweichungen Δ bestimmen die Ausdehnung, und die Korrelationskoeffizienten ρ die Orientierung der gemeinsamen elliptischen Konfidenzbereiche für die Formelkoeffizienten m_0 und $\log(A_0)$. Diese sind für die einzelnen Datensätze in der zweiten Abbildung für das Vertrauensniveau von 95% dargestellt. Die Berechnung der statistischen Parameter erfolgte unter der Annahme, daß m und $\log(A)$ normalverteilt sind.



Aus der Normalverteilung von $\log(A)$ folgt, daß A selbst lognormal verteilt ist. Die bivariaten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen von A und m für die Ziehung der Koeffizienten für die Permeabilitäts-Porositätsrelation in den einzelnen Spielen einer probabilistischen Langzeitsicherheitsanalyse werden angegeben.

Literatur

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

Fröhlich, H.; Förster, S.; Hohenthanner, C.R.: Bestimmung des Diffusions- und Permeabilitätsverhaltens von Wasserstoff in Steinsalz und kompaktiertem Salzgrus. Battelle Eschborn (1995)

Stührenberg, D.; Zhang, C.: Untersuchungen zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus als Versatzmaterial für Endlagerbergwerke im Salz. Abschlußbericht zum Vorhaben 02 E 8552 8. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover (1995)

Durchlässigkeitsverhalten von Steinsalzversatz gegenüber Laugen unter Berücksichtigung von Lösungsvorgängen

Hanskurt Fröhlich
Battelle Ingenieurtechnik GmbH, Eschborn
Oliver Conen
Technische Universität Darmstadt

1 Einleitung und Zielsetzung

In Endlagern für nukleare und chemotoxische Abfälle im Salinar kann der Zutritt von Laugen nicht prinzipiell ausgeschlossen werden. Die Transportvorgänge innerhalb des Endlagers werden wesentlich von der Durchlässigkeit der Versatzmaterialien und der Verschlüsse bestimmt. Die bestimmende Größe, sowohl für den Laugenzufluß in die Einlagerungsbereiche als auch für das Auspressen kontaminierter Lauge aus dem Endlager, ist dabei die Permeabilität.

Ziel der hier vorgestellten Arbeiten war es, Stofftransportparameter für die Berechnung von Ausbreitungsvorgängen in den verfüllten Bereichen eines salinaren Endlagers bereitzustellen. Unter Simulation realitätsnaher Bedingungen wurde der Einfluß von zeitabhängigem Überlagerungsdruck (Gebirgsdruck), Feuchte und die Wechselwirkung von Salz/Lauge auf das Durchlässigkeitsverhalten untersucht und quantifiziert.

2 Versuchsdurchführung und Meßergebnisse

Die Permeabilität ist ein petrophysikalischer Kennwert, der ausschließlich von der Geometrie der Porenräume abhängt. Dies bedeutet, daß die Permeabilität unabhängig vom Fluid ist, solange die petrochemischen Eigenschaften des durchströmten Gutes nicht verändert werden.

In dem hier vorgestellten Vorhaben wurde das Permeabilitätsverhalten von Steinsalz gegenüber Flüssigkeiten detailliert untersucht, wobei insbesondere die Permeabilitätsänderung in Abhängigkeit vom Überlagerungsdruck, dem Fluiddruck und der Wechselwirkung des Meßfluids mit dem Salz ermittelt wurde. Als Meßmedien wurden feuchter Stickstoff, gesättigte Salzlösungen und Isooktan als Inertflüssigkeit verwendet. Isooktan wurde als Inertflüssigkeit ausgewählt, da es weder chemisch mit Salz reagiert, noch dieses anlöst.

Bei gleichen Überlagerungsdrücken führt die Verwendung von feuchtem Stickstoff (85 % r. F.) als Meßfluid, im Vergleich zu den Messungen mit trockenem Meßgas, zu einem sehr viel schnelleren Permeabilitäts- und Porositätsabfall. Die Ergebnisse der Messungen mit feuchtem Meßgas zeigen, daß bei einer hohen Feuchtebeladung des Meßgases die Permeabilität stark abnimmt, und daß diese Permeabilitätsabnahme nur zu einem sehr geringen Teil reversibel ist. Wie die Porositätsbestimmungen vor und nach den Permeabilitätsmessungen zeigten, ist der Haupteffekt auf eine Abnahme der Porosität infolge von Umlöseprozessen zurückzuführen. Der zweite, aber reversible Effekt ist durch das Entstehen von Sackporen infolge Kapillarkondensation zu erklären. Durch Ausheizen im Vakuumschrank konnte die Feuchtigkeit aus der Probe entfernt werden, und ein Teil dieser Sackporen wurde wieder zu Durchgangsporen, die dann wieder für den Transportprozeß verfügbar waren, was zum Permeabilitätsanstieg führte.

Wurde Isooktan als Meßfluid verwendet, ergaben sich Porositäts- und Permeabilitätsverläufe, die mit denen vergleichbar waren, die mit trockenem Gas ermittelt wurden. Aus diesen Ergebnissen kann geschlossen werden, daß allein die Verwendung einer Flüssigkeit als Strömungsmedium noch nicht zu einem veränderten Kriech- und damit Permeabilitätsverhalten des Salzes führt. Ein evtl. besseres Gleiten der Salzkörner an den Korngrenzflächen infolge der in den Poren befindlichen Flüssigkeit bewirkt noch keinen beschleunigten Porositäts- und damit Permeabilitätsabfall.

Die Untersuchungen mit Lauge als Meßfluid wurden sowohl mit gesättigter Lösung aus dem durchströmten Salz als auch mit Q-Lauge durchgeführt. Hier zeigte sich im Unterschied zu den Untersuchungen mit Inertflüssigkeit ein völlig anderes Bild. Der Permeabilitätsabfall über der Zeit ist sehr viel steiler und die Permeabilitäts-Porositätsbeziehung weicht von der mit Gas ermittelten teilweise stark ab, siehe Abbildung 1.

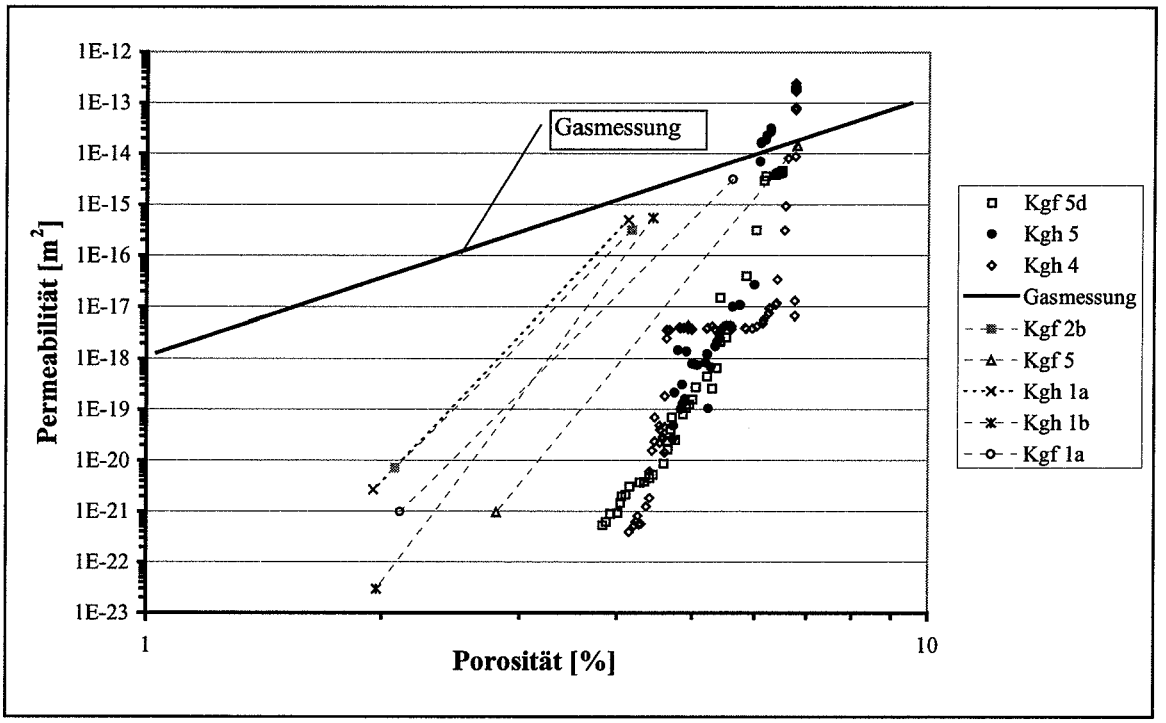


Abb. 1 Permeabilität in Abhängigkeit von der Porosität für Proben aus Bernburger Salz (Kg), Vergleich Gasmessung und Laugenmessung

Wie aus der Abbildung zu ersehen ist, ist die Permeabilitäts-Porositätsbeziehung davon abhängig, welche Anfangsporositäten die Proben aufweisen. Hier unterscheiden sich die mit Lauge gewonnenen Ergebnisse auch wesentlich von den Gasmessungen, bei denen eine Permeabilitäts-Porositätsbeziehung abgeleitet werden konnte, die in weiten Bereichen von den Anfangszuständen unabhängig ist.

Zusammenfassend zeigen diese Ergebnisse, daß aus Messungen die mit Inertflüssigkeiten durchgeführt wurden, nicht auf das Permeabilitäts-Porositätsverhalten gegenüber Laugen geschlossen werden kann. Messungen, die mit Inertflüssigkeit durchgeführt wurden, liefern keine Aussagen, die für ein Endlager in Steinsalz bei einem Laugenzutritt repräsentativ sind. Die mit Inertflüssigkeit gewonnen Daten entsprechen denen von Gasmessungen. Wird dagegen Salzlauge als Meßfluid verwendet, ändert sich infolge von Umlöse- und Stofftransportprozessen die Permeabilitäts- Porositätsabhängigkeit in der Weise, daß bei gleicher Porosität die Permeabilität deutlich geringer ist. Diese Unterschiede zwischen den Permeabilitätsmessungen mit Gas und Lauge sind besonders gravierend, wenn das durchströmte Salz nur einen geringen Anhydritanteil aufweist, und wenn als Meßfluid eine gesättigte Lösung aus dem durchströmten Salz verwendet wird.

Bei der Verwendung von Q-Lauge finden zusätzlich chemische Reaktionen statt, die zu sehr uneinheitlichen Permeabilitäts-Porositätsbeziehung führen und die Kompaktion des Versatzmaterials verlangsamen.

Experimentelle Bestimmung der Zweiphasenfluß-Parameter von verdichtetem Salzgrus

Günter Pusch, Viktor Reitenbach, Yldiray Cinar
TU Clausthal

Als Versatzmaterial für die Abdichtung von unterirdischen Deponieräumen für radioaktive Abfälle kann neben anderen Materialien Salzgrus verwendet werden. Der in der Lagerungszone entstehende Wasserstoff kann durch das kompaktierte, geringpermeable und unter Umständen laugengesättigte Versatzmaterial entweichen. Um die Simulation der Wasserstoffausbreitung und möglicher Laugenzutritte im salinaren Versatzmaterial zu ermöglichen, müssen Kapillardruck- und relative Permeabilitätsfunktionen dieses Materials bestimmt werden. Mit diesem Ziel sind experimentelle Untersuchungen an einem Modellmaterial - NaCl-Salzgrus - am Institut für Erdöl- und Erdgastechnik (ITE) durchgeführt worden.

Zur Vorbereitung der gesteinsphysikalischen Untersuchungen wurden zylindrische Prüfkörper aus reinem bis auf 0,3 Gew.-% befeuchteten NaCl-Grus mit einer mittleren Korngröße von 0,3 mm nach einem am ITE entwickelten Preßverfahren hergestellt. Als Zielparameter der Prüfkörper wurden die absolute Permeabilität von $1\text{-}5*10^{-15}$ m² und die effektive Porosität von 2-5% angenommen, die einen fortgeschrittenen Verdichtungsgrad des Versatzmaterials vertreten. Als optimale Preßbedingungen wurde der Preßdruck von 90 MPa und die Preßdauer von 60 min experimentell bestimmt. Unter diesen Bedingungen können die Zielbereiche reproduzierbar getroffen werden. Die Homogenität der Prüfkörper wurde mit Hilfe der Röntgen-Tomographie an insgesamt 20 Proben nachgewiesen.

Die Kapillardruckfunktion des verdichteten NaCl-Gruses wurde unter Anwendung der Quecksilberinjektionsmethode und der kapillaren Entsättigungsmethode an Einzelkörper sowie an Kompositkernen gemessen. Die Kapillardruckmessungen nach der kapillaren Entsättigungsmethode zeigten den Einfluß von duktilen Formveränderungen der untersuchten Proben bereits unter einer erhöhten Radialbelastung von 3 MPa. Das kapillare Gleichgewicht konnte dabei wegen des Materialkriechens nicht erreicht werden. Infolge dessen repräsentieren die unter diesen Bedingungen gemessenen Kapillardruckfunktionen einen Ungleichgewichtszustand des Materials und können für die Simulation von Gleichgewichtsfließprozessen nicht verwendet werden. Die Kapillardruckmessungen unter Radialbelastung von 1,5 MPa, die aus meßtechnischen Gründen angewendet werden mußte, wiesen hingegen keinen meßbaren Einfluß des Kriechverhaltens des Salzgruses auf und zeigten die beste Übereinstimmung mit den Quecksilbermessungen. Auf Basis dieser Kapillardruckmessungen wurde die Leverettfunktion des Modellversatzes bestimmt, die für die Korrelation der relativen Permeabilitätsfunktionen verwendet werden konnte.

Die nach dem Burdine-Modell ermittelte Materialkonstante des verdichteten Salzgruses liegt mit dem Wert von λ=1.605 deutlich unterhalb des für homogene Sedimentgesteine typischen Bereichs von λ>2. Der niedrige Wert der Materialkonstante weist auf eine äußerst homogene Struktur des Kapillarnetzwerkes des kompaktierten Salzgruses hin. Ein Plateau in einem weiten Sättigungsbereich der Kapillardruckkurve und ein steiler Kapillardruckanstieg nahe der Restlaugensättigung lassen sich durch zwei miteinander verbundenen Netzwerken mit verschiedenen Weiten der Fließwege erklären. Diese Struktureigenschaften wurden in einem Strukturmodell zusammengefaßt, das zur Charakterisierung der gesteinsphysikalischen Eigenschaften des Modellversatzes verwendet wurde.

Die für die Korrelation der relativen Permeabilitätsfunktionen zusätzlich notwendigen Referenzgrößen wie kritische Gassättigung und Restlaugensättigung wurden im Laufe der Kapillardruckmessungen bestimmt, und die diesen Sättigungszuständen entsprechende relative Permeabilität für Gas und Lauge wurde in einer Reihe von Fließversuchen gemessen. Die direkt

gemessene, sowie die aus der Kapillardruckkurve ermittelte kritische Drainage-Gassättigung liegt für die untersuchten Proben zwischen 15% und 18%. Der gemessene Durchbruchdruck für die Gasphase in laugengesättigten Probekörpern liegt zwischen 300 hPa und 540 hPa. Die durch die Wägung am Ende der kapillaren Entsättigung bestimmte Restlaugensättigung liegt bei den untersuchten Proben zwischen 20% und 23%. Mit diesen Endsättigungs- und Durchbruchdruckwerten ist der untersuchte verdichtete Salzgrus mit Sedimentgesteinen gleicher Permeabilitätsklasse vergleichbar. Die Streubreite dieser Werte ist auf die Unterschiede in der Porosität und Permeabilität der untersuchten Proben zurückzuführen.

Im Laufe der Fließversuche wurden die wesentlichen Unterschiede der hydraulischen Eigenschaften des Salzgruses und des Referenzsandsteins festgestellt. In mehreren Messungen der Referenzgaspermeabilität des Salzgruses bei der Restlaugensättigung erreichte die Gasfließrate nach der Einstellung des konstanten Druckgradienten in wenigen Sekunden einen Höhepunkt und ging in der Zeit von 1 bis 2 Stunden auf einen nicht meßbaren Wert zurück, wobei kein stationärer Gasfluß erreicht werden konnte. Dieser Effekt wird stärker bei der Erhöhung des Druckgradientes. Die wahrscheinliche Ursache dieses Effekts ist die Mobilisierung der flüssigen Phase, die zu einer Erhöhung der Laugensättigung an der Ausgangsseite des Kerns und folglich zu einer lokalen Reduzierung der effektiven Gaspermeabilität führt. Im Hinsicht darauf wurde als Referenzpermeabilität für die Gasphase bei der Restlaugensättigung die relative Gaspermeabilität bei der initialen Gasfließrate bestimmt, die einer gleichmäßigen Sättigungsverteilung entspricht.

Als Referenzwert für die Bestimmung der relativen Laugenpermeabilitätsfunktion wurde die spezifische Laugenpermeabilität bei der 100%-Laugensättigung gemessen, die 10-20% der absoluten Permeabilität beträgt. Auch während dieser Messungen wurde eine Erhöhung des Fließwiderstandes beobachtet. Der Einfluß dieses Effektes konnte bei der Berechnung der spezifischen Laugenpermeabilität nicht vollständig ausgeschlossen werden. Diese Werte können im Vergleich zur gemessenen spezifischen Wasserpermeabilität von ca. 40 % der absoluten Permeabilität eines Modellsandsteins gleicher Permeabilitätklasse als niedrig angesehen werden.

Zur Untersuchung des Einflusses der Untersättigung der Lauge auf die hydraulischen Eigenschaften des Salzgruses wurden Einphasenfließversuche mit 90%- und 50%-gesättigter Lauge durchgeführt. In der ersten Phase aller Versuche wurde eine geringfügige Senkung der spezifischen Laugenpermeabilität beobachtet. Dabei konnte eine Auslaugung der Laugenzuflußseite der Prüfkörper festgestellt werden, während die Beschaffenheit des restlichen Teils der Körper unverändert blieb. Nach einem bestimmten Auslaugungsgrad der Prüfkörper wurde eine kontinuierliche Erhöhung der spezifischen Laugenpermeabilität im Zusammenhang mit der Veränderung der Fließgeometrie beobachtet. Die Untersättigung der Lauge führt also zu einer lokalen Auslaugung des salinaren Versatzes, wobei sich die Lauge aufsättigt und weiterhin im Gleichgewicht mit dem Salz fließt. Nach diesen Erkenntnissen benötigen die Zweiphasenfluß-Parameter des Salzgruses keine Korrekturen im Hinsicht auf einen möglichen lokalen Zutritt der untersättigten Lauge.

Auf der Basis der gemessenen Kapillardruckfunktion und der Referenzwerte für Sättigung und Permeabilität wurde die relative Permeabilitätsfunktion für Gas und Lauge korreliert. Für die mathematische Modellierung der Drainageprozesse sind die relativen Permeabilitätsfunktionen nach der bekannten Corey-Brooks-Korrelationsmethode berechnet. Für den Fall des Imbibitionsprozesses wurden die relativen Permeabilitätsfunktionen nach der am ITE entwickelten Korrelationsmethode ermittelt.

Radionuklidrückhaltung in Salzgrus und Einfluß von Zuschlagstoffen

Bernhard Kienzler
Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (INE)

Zu den prinzipiellen Anforderungen an Versatzstoffe in Endlagerbergwerken im Steinsalz z.B. für Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) und für Gorleben fanden bereits verschiedene Workshops statt, z.B. in Albuquerque 1986 und in Braunschweig 1989. Der Versatz wurde als Teil des Multibarrierensystems angesehen und sollte vielfältige Funktionen erfüllen [1]. Im bisher letzten Workshop zu dieser Thematik in Carlsbad, USA (1998) wurden im Rahmen der deutschen Planungen geochemische Aspekte [2] und technische Konzepte für die Verfüllung von Endlagerbergwerken [3] diskutiert.

Neben der Langzeitstabilität spielt die geochemische Beeinflussung der Lösungschemie eine wesentliche Rolle. Diese ist Verwendung von Steinsalz mit relativ geringen Gehalten an natürlichen Beimischungen (wie z. B. Anhydrit, Polyhalit) kaum zu erwarten. Dadurch fehlt allerdings auch die Pufferkapazität des Systems. Durch die Anwesenheit von Ca- oder Mg-haltigen Mineralphasen kann eine Pufferkapazität erreicht und die CO_2-Konzentration in den Lösungen kontrolliert werden.

Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption und Ausfällung: Die Mobilität von Radionukliden hängt von ihren chemischen Eigenschaften, der Stabilität der gelösten Spezies in den relevanten Lösungen sowie von den Charakteristika der verschiedenen Oberflächen der Versatzstoffe und festen Bestandteile des Abfalls ab. Aus experimentellen Daten läßt sich häufig nicht unterscheiden, ob gemessenen Lösungskonzentrationen auf Sorptionsprozessen oder auf Löslichkeiten von festen Phasen beruhen. Aus den Abfallprodukten freigesetzte Radionuklide können an anderen Stellen als stabile oder metastabile Phasen (sekundäre Lagerstätten) wieder ausgefällt werden. Diese Sekundärphasen können remobilisiert werden, wenn sich im Verlauf der Zeit die geochemischen Bedingungen ändern. Als potentiell nachteilige Effekte des Verfüllmaterials können synergistische Prozesse induziert werden.

Tab. 1 Sorptionskoeffizienten für Actiniden an Salz - Salzlösung-Systemen

	Morslebensalz		Gorlebensalz	
	R_s in Lösung I	R_s in Lösung III	R_s in Lösung I	R_s in Lösung III
	$cm^3 \cdot g^{-1}$	$cm^3 \cdot g^{-1}$	$cm^3 \cdot g^{-1}$	$cm^3 \cdot g^{-1}$
Th(IV)	135	85	83	11,8
U(VI)	0	0	n. a.	n. a.
Np(V)	0,2	70	0,58	0
Pu	20	300	0,4	154

Tab. 2 Sorption für ^{14}C, ^{63}Ni, ^{131}I, ^{134}Cs an Salz – Salzlösung-Systemen [7]

	Na-3 Salz		NaCl(p.A.) + 1% Kaolinit	
	R_f	W / %	R_f	W / %
^{14}C	1,06	34	1,12	97
^{63}Ni	1,1	35	47,6	34
^{131}I	1,07	31	1,00	54
^{134}Cs	1,01	73	1,13	77

Obwohl der Sorption von Radionukliden an Steinsalz kaum Bedeutung beigemessen wurde, gibt es doch zahlreiche Arbeiten zu dieser Thematik. Actiniden: Im INE wurde an Steinsalz aus ERAM, welches die Minerale Halit und Anhydrit enthielt, die Sorption von Th, U, Np und Pu ermittelt [4]. Sorptionsdaten für Gorlebensalz liegen ebenfalls vor [5]. Als Ergebnis kann festgestellt werden, daß Pu und Th deutlich sorbiert werden, Np nur im Falle der NaCl-Lösung und Uran überhaupt nicht. Hierbei spielen die pH-Bedingungen eine entscheidende Rolle.

Spalt- und Aktivierungsprodukte: Es existieren nur wenige Publikationen zur Sorption

Tab. 3 Gemessene Verteilungskoeffizienten für Spaltprodukte an NaCl und Ca-Bentonit in Salzlösungen (INE)

	gemessene K_d Werte / $cm^3 \cdot g^{-1}$			
	Bodenkörper **NaCl**		Bodenkörper **Ca-Bentonit**	
	Lösung		Lösung	
Isotop	**NaCl**	**Q-Lauge**	**NaCl**	**Q-Lauge**
^{85}Sr	0,15	0,17	0,3	1,7
^{99}Tc	0,1	0,2	0,2	0,15
^{137}Cs	0,2	0,2	10,6	4,7

an Steinsalz. In [6] und [7] werden Rf-Werte und Wiedererhalte für Steinsalzgesättigte NaCl-Lösungssysteme angegeben. Diese Ergebnisse beziehen sich auf Säulenversuche. Lediglich im Falle, daß dem NaCl eine gewisse Menge Ton beigemischt ist, findet eine merkliche Retardation des Durchbruchs von Ni(II) statt. Für einige Spaltprodukte wurden bereits 1982 im INE Sorptionsuntersuchungen an Steinsalz und Ca-Bentonit durchgeführt [8]. Bei diesen Experimenten lag der pH-Wert der Lösungen bei 6,0, die Konzentrationen von Sr, Tc, Cs bei $2{,}2 \cdot 10^{-8}$, $3{,}0 \cdot 10^{-5}$ und $2{,}2 \cdot 10^{-6}$ $mol \cdot dm^{-3}$. Die Versuche wurden bei 40°C durchgeführt, das Feststoff/Lösungsverhältnis war bei diesen Experimenten 0.4 $g \cdot cm^{-3}$. Verteilungskoeffizienten für Plutonium und Americium konnten nicht bestimmt werden.

Versuche an Na3γ aus Gorleben-Salz wurden bei der FU Berlin durchgeführt [7]. Es wurden für J und Se keine oder nur sehr geringe Verteilungskoeffizienten bestimmt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, daß durch geeignete Zusätze, die Rückhaltung von Radionukliden in Salzgrus-Systemen verbessert werden kann. Hierfür bieten sich Stoffe an, die einerseits die pH- und Redoxbedingungen beeinflussen (Zement), Radionuklide in sekundären Phasen binden (Apatit) oder selbst eine hohe Sorptionskapazität aufweisen. Besonders sei hier auf Tone und Braunkohlefilteraschen hingewiesen.

Das Anforderungsprofil an Versatzstoffe ist unterschiedlich, je nach dem, ob diese Stoffe in den Zugangsstrecken bzw. in den Lagerstrecken für hochradioaktive Abfälle oder im LAW/MAW Bereich eingesetzt werden sollen. Des weiteren ergeben sich auf Grund der mechanischen Anforderungen an das Versatzmaterial Vorgaben, welche im Rahmen diese geochemischen Betrachtungen nicht abgedeckt werden können.

Literatur

1 *Claiborne, H. C. "The efficiency of backfilling and other engineered barriers in a radioactive waste repository in salt." ORNL/TM-8372, 1982.*

2 *Grambow, B.; Kienzler, B.; Bauer, A.; Vejmelka, P.; Rudolph, G.; "Backfill and sealing materials as geochemical barriers for radionuclide containment in German salt formations." International Backfill Workshop, Carlsbad, USA. May 1998*

3 *Brewitz, W.; Rothfuchs, T. "Backfilling and sealing of radioactive waste repositories in rock salt formations" International Backfill Workshop, Carlsbad, USA. May 1998.*

4 *Institut für Nukleare Entsorgungstechnik, "Nuklidmigration im Deckgebirge des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) Teil 1: Sorption im Grubengebäude". BfS Auftrag Nr.: PSP-Nr: 9M 212 230-61, 1998.*

5 *Meier, H. "Nuklidmigration im Deckgebirge des geplanten Endlagers Gorleben". Staatl. Forschungsinstitut für Geochemie, Bamberg, Außenstelle des Bayerischen Geologischen Landesamtes, BfS-Abschlußbericht (1993).*

6 *Klotz, D.; Lang, H.; "Sorptionsuntersuchungen ausgewählter Radionuklide im System Salz/Salzlauge". in T. Kühle; F. Zude; W. Hild (Ed.) Vorträge zum Workshop "Chemische Effekte im Grubengebäude" GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH Braunschweig, GSF-Bericht 2/92, 1992.*

7 *Esser, V.; Flambard, A.R.; Keiling, Ch.; Marx, G.; "Untersuchung des Sorptionsverhaltens ausgewählter Radionuklide an natürlichen und technischen Barrieren." Statusseminar 1986 "Sicherheitsanalysen zur Endlagerung", BMFT, Braunschweig 1987.*

8 *Kahl, L.; Rudolph, G.; Vejmelka, P.; "Entwicklung von Puffermaterialien für MAW-Lagerkammern; Verteilungsversuche mit ausgewählten Radionukliden." Primärbericht 05.12.03P13A, Nov. 1982.*

Prinzipmodelle zur Beschreibung des Fluidtransports

Klaus-Peter Kröhn
Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Im Rahmen des DEBORA-Projekts wurden Modellrechnungen zum Zweiphasenfluß in HAW-Einlagerungsbohrlöchern mit dem Ziel durchgeführt, die Sensitivität der betrachteten Prozesse vor dem Hintergrund hoher Kontraste in den Materialparametern an den Übergängen zwischen den verschiedenen Bauwerkssegmenten zu untersuchen. Zudem sollte die Dynamik der Zweiphasenströmung untersucht werden, um zu einem verbesserten Verständnis der prinzipiellen Wirkungsmechanismen und zu einer Beurteilung der Signifikanz der Zweiphasenströmung zu gelangen.

Das betrachtete Modellgebiet umfaßte eine 30 Meter lange Strecke und ein daran anschließendes 300 Meter tiefes Einlagerungsbohrloch, das auf den oberen 30 Metern mit einem Salzgrusstopfen versehen war. Auch der Ringspalt um die Abfallgebinde und die Strecke sollten mit Salzgrus versetzt sein. Innerhalb der drei Bauwerkssegmente wurde jeweils Homogenität des Materials vorausgesetzt, wobei das Salzgrus aufgrund der gesteinsmechanischen Effekte unterschiedlich stark kompaktiert sein sollte. Entgegen den realen Verhältnissen wurde die Zeitabhängigkeit der Materialparameter vernachlässigt.

Mit Hilfe geeigneter Anfangs- und Randbedingungen wurden drei Störfallszenarios in diesem Modell simuliert:

- Laugenzufluß aus einem instantan gefluteten, 500 m hohen Schacht über die Strecke in das Bohrloch
- Gasproduktion in einem bereits gefluteten Bohrloch durch Behälterkorrosion
- Zufluß aus einer Laugentasche in das Bohrlochtiefste

Besonderes Augenmerk wurde dabei auf den transienten Sättigungs- bzw. Entsättigungsvorgängen und der zeitabhängigen Gasdruckverteilung im Modell gelegt.

Das erste Szenario war von der Numerik her recht anspruchsvoll, da große Sprünge in den Primärvariablen Druck und Sättigung simuliert wurden, die zusätzlich über Materialgrenzen mit stark unterschiedlichen Stoffgesetzen erhalten bleiben mußten. Im Modell dringt die Lauge mit einem Druck von 5 MPa in die Strecke ein und bildet eine steile Sättigungsfront. Dabei komprimiert sie die im System befindliche Luft wie in einem Kolben, bis Strecke und Verschluß durchquert sind. Der Gasdruck hat sich zu diesem Zeitpunkt auf etwas über 5 MPa erhöht, was nun zu einem gegenläufigen Fluß von Lauge und Luft führt. Die Lauge strömt mit einer deutlich niedrigeren Sättigung - aber immer noch mit einer ausgeprägten Front - im Ringspalt nach unten und verdrängt dabei Luft aus dem Modellgebiet. Nachdem diese Front den Bohrlochboden erreicht hat, füllt sich der Ringspalt von unten her schließlich vollständig mit Lauge.

Für das zweite Szenario wurde eine Gasproduktionsrate auf der Grundlage von Korrosionsmessungen, die an Pollux-Behältermaterial in Lauge durchgeführt wurden, geschätzt und über die Behältersäule verteilt. Die Gasbildung sorgt im Modell für einen Druckaufbau im Ringspalt und eine wachsende Gassättigung, reicht aber zunächst nicht für einen nennenswerten Gasfluß aus. Obwohl die Permeabilität im Verschluß höher angesetzt wurde als im Ringspalt muß sich erst ein erheblicher Druckgradient und eine deutliche Gassättigung aufbauen, bevor das Gas in den Verschluß eindringen kann. Bis zum Erreichen des stationären Zustands erhöht sich der Gasan-

teil im Porenraum des Ringspalts weiter auf 30%. Nach Beendigung der Gasbildung durch Korrosion füllt sich das Bohrloch erwartungsgemäß wieder mit Lauge.

Durch eine Druckrandbedingung am Boden des Einlagerungsbohrlochs wird im dritten Szenario die Verbindung mit einer Laugentasche simuliert, die etwa ein Volumen von ca. 200 m^3 aufweist. Die zugehörige Modellrechnung ergibt ein recht einfaches Verhalten dieses Systems. Wie im ersten Szenario bildet sich auch hier eine scharfe Sättigungsfront aus, die die Luft vor sich her schiebt. Die Fortschrittsgeschwindigkeit der Front nimmt dabei mit zunehmender Höhe der Wassersäule ab. Da die Strömung in diesem Fall nach oben gerichtet ist, wirken die Gravitationskräfte - anders als in Fall 1 - entgegen den Kapillarkräften. Die ausgleichende Wirkung des Kapillardrucks wird kompensiert, was die Steilheit der Sättigungsfront während der Simulation erhält und den Schwierigkeitsgrad der Modellrechnung erhöht.

Die drei Modelle zeigen klar, daß Zweiphasenflußeffekte einen erheblichen Einfluß auf die Dynamik der Laugenintrusion und der Gasausbreitung in einem Einlagerungsbohrloch haben. Die prinzipiellen Wirkungsmechanismen der Strömung in den betrachteten Modellen sind schlüssig interpretierbar. Gleichwohl wird eine ungewöhnlich hohe Sensitivität der Ergebnisse auf nahezu alle Modellparameter erkennbar. Belastbare Prognosen hinsichtlich der Zweiphasenströmung erfordern daher neben den hinlänglich bekannten hydraulischen Parametern Permeabilität und Porosität insbesondere auch eine profunde Kenntnis der sättigungsabhängigen Materialkennwerte von kompaktierendem Salzgrus, das heißt der relativen Permeabilität und des Kapillardrucks.

Zweiphasige Modellierung des Fluid- und Radionuklidtransportes in Salzgrus

Stephan Lorenz, Wolfgang Müller
Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec), Garching

Basis für die Modellierung von mehrphasigen Transportvorgängen in Salzgrus ist der für Mehrphasenströmungen erweiterte Darcy-Ansatz für Strömungen in porösen Medien. Die Strömungsprozesse sind ausreichend langsam, so daß thermodynamisches Gleichgewicht zu allen Zeiten angenommen werden kann. Weiterhin kann Diffusion von Lauge und Gas im Vergleich zur Strömung durch Druckgradienten vernachlässigt werden.

Bei der Modellierung der Mehrphasenströmung einschließlich Radionuklidtransport in Salzgrus, bzw. einem salinaren Endlager sind jedoch die folgenden Erweiterungen für eine physikalisch sinnvolle Modellierung erforderlich:

- Modellierung des Radionuklidtransportes als Tracer in der Gas- und Flüssigphase,
- Modellierung des Kompaktionsverhaltens des Salzgruses durch die Konvergenz des Steinsalzes,
- Berücksichtigung des Löslichkeitsverhaltens von Salz in Wasser.

Der Radionuklidtransport erfolgt über Dispersion und Diffusion in der Gas- und Flüssigphase. Weiterhin muß die Adsorption an der Feststoffoberfläche modelliert werden. Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten sind bekannt, das Problem liegt in der Implementation in den jeweiligen Code.

Zum Kompaktionsverhalten existieren verschiedene physikalische Modellvorstellungen. Modelle in Form geomechanischer Parameter, Modelle auf Basis von "Engineering Judgement", Modellierung von Steinsalz als Fluid hoher Viskosität und schließlich Modelle in Form fluiddynamischer Parameter. Letztere sind zur Implementierung in 2-Phasen Codes besonders geeignet, da diese einfach zu implementieren sind und im Vergleich zu den anderen Modellen die geringste Rechenzeiterhöhung erfordern. Die Porositätsänderung des Salzgruses durch die Kompaktion bewirkt eine Änderung der Permeabilität, die ebenfalls entsprechend modelliert werden muß. Hierfür hat sich ein halbempirischer Ansatz in der Form $k = A \cdot \phi^n$ (A, n = const.) als geeignet erwiesen.

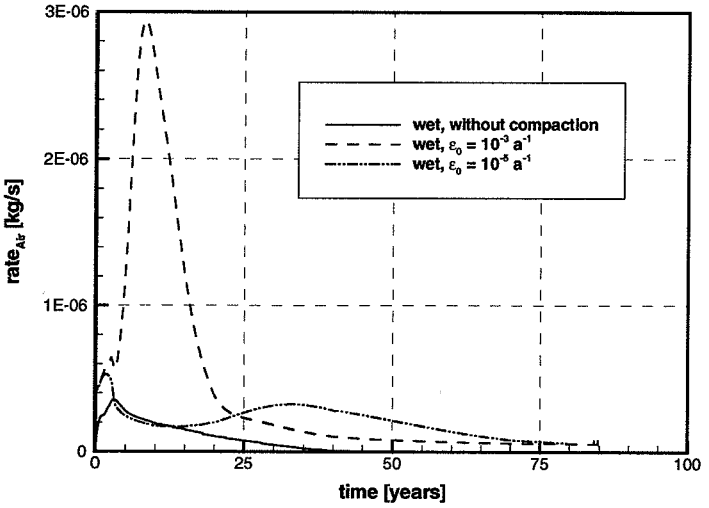
Das Löslichkeitsverhalten von Salz in Wasser erfordert eine Erweiterung der Modellierung um eine zusätzliche Komponente, dem in der Flüssigkeit gelösten NaCl. Sämtliche Stoffeigenschaften hängen somit auch vom Salzgehalt in der Flüssigkeit X_{NaCl} ab. Durch Temperatur- oder Druckgradienten kann es zu Ausfällen von Salz aus der oder zur Lösung des festen Steinsalzes in die flüssige Phase kommen mit der Folge von Porositätsänderungen. Ein wesentliches Problem bei der Modellierung der Salzlöslichkeit ist die Bereitstellung einer vollständigen und abgesicherten Datenbasis zur Beschreibung der Abhängigkeit der Stoffeigenschaften vom Salzgehalt. Weiterhin sind für eine vollständige Modellierung z.B. chemische Effekte, die u.U. das Strömungsverhalten beeinflussen, zu untersuchen.

Der Stand der Modellierung der jeweiligen Effekte bei ISTec stellt sich wie folgt dar:

Als Basiscode für die Modellierung von Zwei-Phasen-Strömungen wird TOUGH2 verwendet. Zur Modellierung des Radionuklidtransportes eines Mutter- und eines Tochternuklides ist ein equation of state (EOS) -Modul (EOS7R: Wasser-Lauge-Mutternuklid-Tochternuklid-Luft und Wärme) verfügbar. Dieses EOS-Modul beinhaltet alle erforderlichen Erweiterungen für eine physikalisch ausreichende Modellierung des Nuklidtransportes.

Das Kompaktionsverhalten von Salzgrus wurde in das oben genannte EOS-Modul nach einem Ansatz von [PSE 1985] einschließlich Temperaturabhängigkeit implementiert. Die Modifikationen sind abwärtskompatibel, d.h. bei Rechnungen ohne Konvergenz werden die entsprechenden Modifikationen im Code übersprungen. Die oben beschriebene Permeabilität-Porositätsbezieh-ung ist implementiert. Die Modifikationen sind ausführlich dokumentiert und getestet.

Zur Berücksichtigung der Salzlöslichkeit ist ebenfalls ein EOS-Modul (EWASG: Salz-Wasser-nicht kondensierbares Gas und Wärme) verfügbar. Es berücksichtigt alle physikalischen Abhängigkeiten der Stoffwerte von der Salzlöslichkeit sowie Porositäts- und Permeabilitätsänderungen, jedoch keine chemischen Effekte. Die Datenbasis ist bislang auf Temperaturen über 100°C beschränkt, experimentelle Werte für tiefere Temperaturen sind z.T. verfügbar.



Die Ausströmrate von Luft für das Szenario eines gefluteten Endlagers mit und ohne Konvergenz zeigt beispielhaft Bild 1. Konvergenz mit hohen Anfangsraten führen nach kurzen Zeiten zu hohen Ausströmraten. nach ca. 80 Jahren findet nahezu keine Ausströmung mehr statt. Zu diesem Zeitpunkt sind ca. 65 % der Anfangsmasse im Berechnungsgebiet (einschließlich der Feuchte im Steinsalz) ausgeströmt

Abb. 1 Luftausströmrate für Simulationen mit Konvergenz

Die bisherigen Rechnungen weisen folgende Ergebnisse auf:

- Die Auswahl der zugrunde liegenden Szenarien ist von grundsätzlicher Bedeutung für die Sicherheitsanalyse.
- Die Konvergenz ist ein dominierender Einflußfaktor für die relevanten Strömungsprozesse, dabei sind die Effekte der Porositätsänderung durch die Konvergenz und der Permeabilitätsänderung durch die Porositätsänderung gegenläufig. Bei hohen Anfangskonvergenzraten ist die Konvergenz nur kurzfristig (~ 100 a) von Bedeutung.
- Die Salzlöslichkeit ist bei wärmeentwickelnden Abfällen ein Effekt zweiter Ordnung, für nicht wärmeentwickelnde Abfälle ist der Einfluß vernachlässigbar.

Die Modellierungen und Modifikationen unterliegen jedoch noch einigen Vorbehalten: So stehen Rechnungen mit angepaßten Parametern noch aus. In der Modellierung sind bei der Konvergenz variable, porositäts- und permeabilitätsabhängige Kapillardruckkurven bislang nicht implementiert, bei der Salzlöslichkeit chemische Effekte nicht berücksichtigt und Hystereseeffekte vernachlässigt. Insbesondere die ersten beiden der oben genannten Punkte sind Gegenstand laufender Arbeiten und sollen bis zum Jahresende abgeschlossen sein.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungsinstitute
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 3-931995-02-X