



# **Das Mehrbarrierensystem bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Salzstock**

**im Auftrag von  
Greenpeace e.V.**

## **Autoren:**

**Detlef Appel  
PanGeo – Geowissenschaftliches Büro  
Ibykusweg 23  
30629 Hannover**

**Jürgen Kreuzsch  
Gruppe Ökologie e.V.  
Kleine Düwelstrasse 21  
30171 Hannover**

**V.i.S.d.P. Thomas Breuer, Greenpeace e.V., Große Elbstraße 39, 22767 Hamburg**

## **INHALT**

<b>0. Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>1. Das Mehrbarrierensystem bei der Endlagerung</b>	<b>4</b>
<b>2. Die Bedeutung des Deckgebirges für die Langzeitsicherheit eines Endlagers bei Salzstöcken</b>	<b>11</b>
2.1 Entstehung und Aufbau von Salzstöcken	11
2.2 Besonderheiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Steinsalz in einem Salzstock	13
2.3 Relative sicherheitsbezogene Bedeutung der geologischen und technischen / geotechnischen Barrieren	17
2.4 Bedeutung des Deckgebirges	17
<b>3. Bedeutung der Barriere Deckgebirge im Zeitverlauf</b>	<b>21</b>
3.1 Wann sind gravierende Veränderungen an der Barriere Deckgebirge möglich?	22
3.2 Die kritische Zeitspanne bei der Endlagerung in einem Salzstock	24
3.3 Ergebnis: Die Umformung des Deckgebirges und die kritische Zeitspanne	26
<b>4. Beurteilung der Situation beim Deckgebirge Gorleben</b>	<b>27</b>
4.1 Deckgebirgsbefunde	27
4.2 Befunde zum Salzgesteinskörper	30
4.3 Notwendigkeit der Alternativenprüfung	32
<b>5. Perspektive Gorleben</b>	<b>33</b>
5.1 Mehrbarrierensystem – Salzstöcke – Gorleben	33
5.2 Gründe für die Weitererkundung von Gorleben?	35
5.3 Die Konsequenz	37
<b>6. Quellen</b>	<b>38</b>



## **0. Einleitung**

Im November 2005 wurde die Gruppe Ökologie e.V. von Greenpeace e.V. beauftragt, eine Studie über das Mehrbarrierensystem bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle zu erstellen. Die Studie hat vorrangig auf die deutschen Verhältnisse einzugehen, hierbei insbesondere auf die Endlagerung in Salzstöcken. Deshalb liegt der Schwerpunkt auf dem geologischen Mehrbarrierensystem bei Salzstöcken. Speziell ist auf die Bedeutung der Barriere Deckgebirge einzugehen.

Die gewonnenen Aussagen werden sodann auf den Endlagerstandort Gorleben übertragen, und es wird eine Bewertung vorgenommen. Abschließend werden die zur Zeit verstärkt wahrnehmbaren Forderungen nach einer Wiederaufnahme der Erkundung am Standort Gorleben kritisch betrachtet, und es werden eigene Schlußfolgerungen zur weiteren Vorgehensweise gezogen.

## **1. Das Mehrbarrierensystem bei der Endlagerung**

### **Ziel der Endlagerung**

Das Ziel der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen besteht darin, die Abfälle dort langfristig sicher zu isolieren. Es soll also verhindert werden, dass radioaktive Stoffe – auf welchem Weg auch immer – in die Biosphäre und damit in die Lebenswelt der Menschen gelangen.

### **Begriff Mehrbarrierensystem**

Der Begriff „Mehrbarrierensystem“ beschreibt verschiedene Barrieren, die den radioaktiven Stoffen auf ihrer Ausbreitung in Richtung Biosphäre „im Wege sind“. Anders ausgedrückt: Die Barrieren verhindern oder behindern die Ausbreitung von Radionukliden. Es gibt mehrere Barrieren, deren Zusammenwirken die Isolation der Abfälle sicherstellen soll und die entsprechend ihrer Art einen spezifischen Beitrag zur Isolation der Abfälle im Endlager leisten.

Der Begriff stammt aus Sicherheitsbetrachtungen von großen technischen Anlagen mit einem hohen Gefährdungspotenzial. Er kann aber nicht exakt in dem dort gebrauchten Sinne übernommen werden, weil die Barrieren bei der Endlagerung nicht wie bei technischen Systemen

entweder „wirken“ oder „nicht wirken“, sondern sehr häufig nur begrenzt wirksam sind („teilweise wirksam“).

Der AKEND<sup>1</sup> (2002) hat übrigens den Begriff des „einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ geprägt. Dies ist der maßgebliche Teil der „Hauptbarriere“, d.h. der natürlichen Barriere, die entscheidend zur langfristigen Sicherheit beitragen muss.

## Die Barrieren

Die einzelnen Barrieren eines Mehrbarrierensystems eines Endlagers kann man grob in zwei Gruppen untergliedern: Zum einen die geologischen (natürlichen) Barrieren, zum anderen die technischen und geotechnischen (künstlichen) Barrieren. Der Beitrag jeder der beiden Gruppen bzw. der jeweiligen Einzelbarrieren zur Sicherheit hängt wesentlich davon ab, in welchem Gestein endgelagert werden soll (s.u.).

Die **geologischen Barrieren** werden von denjenigen geologischen Formationen bzw. Gesteinskörpern gebildet, die eine Schadstoffausbreitung be- oder verhindern (AKEND 2002). Zu den dafür verantwortlichen Eigenschaften gehört an erster Stelle geringe Wasserdurchlässigkeit, denn Wasser stellt das wichtigste Transportmedium für Radionuklide dar. Deshalb sind vorrangig Ton/Tonstein, Salz und kristalline Gesteine bei der Endlagerung von Interesse, denn diese Gesteinstypen weisen im allgemeinen nur geringe Wassergehalte und geringe Durchlässigkeiten gegenüber Wasser auf. Bei der Endlagerung sollen die radioaktive Abfälle also in diesen Gesteinen endgelagert werden oder aber von diesen Gesteinen umgeben sein.

**Technische Barrieren** sind vor allem die Behälter, in die der Abfall eingebracht wird. Unter **geotechnischen Barrieren** versteht man beispielweise die Verschlüsse von Schächten, Strecken und Bohrlöchern im Endlagerbergwerk durch Schachtverschlüsse, Dammbauwerke und Pfropfen. Sie bestehen üblicherweise aus natürlichen Materialien, etwa quellfähigem Ton (Bentonit). Zu den geotechnischen Barrieren kann man in weiteren Sinne auch solche Barrieren zählen, die durch die Beimengung bestimmter Stoffe zur Erzeugung eines bestimmten chemischen Milieus im Endlager beitragen und so die Ausbreitung von Radionukliden behindern oder sogar verhindern (z.B. durch Ausfällung oder Sorption).

---

<sup>1</sup>Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagestandorte, 1999 von Bundesumweltminister Trittin ins Leben gerufen, um eine alternatives Endlagersuchverfahren zu entwickeln.

## **Vor- und Nachteile der verschiedenen Barrieren**

Die geologischen und die künstlichen Barrieren besitzen jeweils spezifische Vor- und Nachteile. Ein großer Vorteil der geologischen Barrieren ist ihre große Ausdehnung. Ihre Mächtigkeit kann weit über hundert Meter betragen. Im Idealfall kann daher ein sehr mächtiges Gesteinspaket mit durchgängig günstigen Eigenschaften für die Endlagerung genutzt werden. Ein weiterer Vorteil der geologischen Barrieren ist ihre Langzeitstabilität, die allein durch die Existenz des Gesteinsmaterials der Barriere über geologische Zeiträume belegt ist und deshalb zumindest für die Bedingungen der Vergangenheit Gültigkeit besitzen.

Der Hauptnachteil der geologischen Barrieren ist, dass man sich nicht immer sicher sein kann, dass die erwünschten Eigenschaften tatsächlich auch an jeder Stelle der Barriere ausgebildet sind. Andererseits kann man mit Bohrungen und ähnlichem nicht die gesamte Barriere so untersuchen, dass sie einem Schweizer Käse entspricht – man hätte dann unter Umständen die Gewissheit über die guten Eigenschaften in der gesamten Barriere, könnte aber mit der Barriere nichts mehr anfangen, weil sie zu durchlöchert ist. Es kann also ein Zielkonflikt entstehen. Hinzu kommt, dass natürliche Barrieren in der Regel den mit der Endlagerung geschaffenen mechanischen und thermischen Bedingungen in der Vergangenheit nicht oder nicht in gleicher Weise ausgesetzt waren, so dass ihre Reaktion auf endlagerungsbedingte Veränderungen nicht sicher vorhergesagt werden kann.

Bei den künstlichen Barrieren liegt die Problematik eher umgekehrt: Einen Behälter oder einen Dammverschluss kann man technisch in durchgängig etwa gleich guter Qualität herstellen. Unklar ist jedoch, wie sich das jeweilige Material – insbesondere unter dem Einfluss des Abfalls - langfristig verhalten wird (Langzeitstabilität). Man kann zwar in Versuchen überprüfen, wie das Material sich im Zeitverlauf verhalten wird, doch sind wegen der begrenzten Versuchsdauer Zweifel an der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den zu betrachtenden Zeithorizont (zehn- oder hunderttausende von Jahren) angebracht. Zudem ist die Dicke der künstlichen Barrieren meist nur gering (Dezimeter bis Meter), so dass sich kleine Fehler bei der Herstellung schwerwiegend auswirken können.

## **Aufbau von Mehrbarrierensystemen**

Ganz generell baut sich ein Mehrbarrierensystem bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle wie folgt auf:

- Technische Barriere:

Abfallbehälter: Er enthält die radioaktiven Abfälle. Vorrangig dient er der Handhabung der radioaktiven Stoffe. Zugleich hat er die Aufgabe, die Stoffe zu isolieren. Je nach Endlagerkonzept hat er eine mehr oder weniger große Bedeutung für die langfristige Isolation der radioaktiven Stoffe.

- Geotechnische Barrieren:

Hierbei handelt es sich im wesentlichen um Versatzmaterialien, Dämme und ähnliche Bauwerke sowie Schachtverschlüsse. Sie dienen dazu, bei der Endlagerung geschaffene bzw. entstandene Hohlräume zu verschließen und die Eingriffe durch den Bau des Endlagerbergwerks in die Funktionstüchtigkeit der natürlichen Barriere auszugleichen. Besondere Bedeutung kommt den Schachtverschlüssen zu: Da die offenen Schächte eine direkte Verbindung zwischen Einlagerungsbereich und Biosphäre herstellen, müssen sie so dicht verschlossen werden, dass die Schutzfunktion der geologischen Barriere(n) gegen den Zutritt von Wasser an die Abfälle bzw. den Austrag belasteten Wassers in die Biosphäre wieder hergestellt wird. Ähnliche Funktion haben Dämme, mit denen man bestimmte Feldesteile nach Abschluss der Verfüllung versiegelt oder Versatzmaterialien, mit denen die (Rest-)Hohlräume unter Tage verfüllt werden. Insbesondere die Schachtverschlüsse müssen langfristig wirken. Die geotechnischen Barrieren bilden also keine zusätzlichen Barrieren, sondern eine Art Reparaturmaßnahme zur Wiederherstellung der ursprünglichen Barrierenfunktion der geologischen Barriere(n).

- Geologische (natürliche) Barrieren:

Die wichtigste Barriere ist die geologische Barriere. Sie besteht aus der geologischen Formation, in die eingelagert wird (Wirtsgestein) und gegebenenfalls weiteren geologischen Formationen oberhalb oder unterhalb des Wirtsgesteinskörpers. Der für die Isolation erforderliche Bereich des Wirtsgesteinskörpers, der auf Grund seiner barrierewirksamen Materialeigenschaften und seiner Ausdehnung zusammen mit den technischen und geotechnischen Barrieren die Endlagersicherheit für größenordnungsmäßig eine Million Jahre gewährleisten soll, wird als einschlusswirksamer Gebirgsbereich bezeichnet (AKEND 2002). Die geologischen Formationen oberhalb des Wirtsgesteinskörpers (bzw. um den Wirtsgesteinskörper) bilden ihrerseits geologische Barrieren und tragen in Abhängigkeit von ihren Eigenschaften und ihrem Lagebezug zu anderen Barrieren zusätzlich zur Isolation der Abfälle bei. Vor allem aber schützen sie den Wirtsgesteinskörper und den einschlusswirksamen Gebirgsbereich vor Veränderungen durch äußere Einwirkungen (z.B. durch klimatische Änderungen).

Über diese genannten Elemente hinaus lassen sich noch weitere (Detail-)Barrieren benennen, die vor allem im Rahmen sicherheitsanalytischer Modellierungen betrachtet werden müssen. Bei unserer Betrachtung des Mehrbarrierensystems sind sie aber ohne weitere Bedeutung.

### **Schwerpunkt natürliche oder künstliche Barrieren?**

Die Frage, welchen Anteil natürliche oder künstliche Barrieren jeweils am gesamten Isolationsvermögen des Endlagers besitzen, ist entscheidend davon abhängig, in welchem Wirtsgestein endgelagert wird. Je nach Wirtsgestein, das für die Endlagerung zur Verfügung steht, haben sich in verschiedenen Ländern unterschiedliche Endlagerstrategien entwickelt. Allgemein stellen sich die Verhältnisse folgendermaßen dar: Wenn man in einem Gestein endlagern will, das naturgemäß über ein gewisses Wasserleitvermögen verfügt, dann wird der Schwerpunkt auf die künstlichen Barrieren gesetzt. Wenn aber in einem sehr dichten Gestein mit keinem oder nur äußerst geringem Wasserleitvermögen endgelagert wird, dann liegt der Schwerpunkt auf der geologischen Barriere.

Beispielsweise ist vorgesehen, in Schweden und Finnland Granit als Endlagergestein zu nutzen. Es ist allerdings bekannt, dass Granit (oder allgemein die kristallinen Gesteine) eine gewisse Wasserleitfähigkeit besitzen. Deshalb wird dort der Schwerpunkt auf die Barriere „Abfallbehälter“ gelegt. Man will Kupferbehälter nutzen, von denen man annimmt, dass sie über sehr lange Zeit dicht bleiben. Falls doch mal ein Behälter undicht wird, dann sollen die Radionuklide durch ein spezielles tonartiges Gestein (Bentonit), das die Behälter umschließt, wirksam zurückgehalten werden. Die natürliche Barriere „Granit“ besitzt zwar auch eine gewisse Isolationswirkung gegen die Ausbreitung von Radionukliden, ihre wesentliche Funktion ist jedoch der Schutz des technischen Barrierensystems und der Erhalt günstiger geo- und hydrochemischer Bedingungen im Endlager gegen Beeinträchtigungen von außen.

In anderen Ländern setzt man den Schwerpunkt auf die geologische Barriere. In der Schweiz und Frankreich beispielsweise setzt man auf Ton- bzw. Tonmergelstein, in Deutschland bisher auf Salz. Tonstein und Salz sind sehr wenig wasserdurchlässig. Deshalb wird diesen Gesteinen der entscheidende Anteil am Isolationsvermögen des Endlagers zugesprochen. Entsprechend besitzen die geologischen Barrieren Vorrang vor den technischen Barrieren. Ungeachtet dessen wird (und muss) dennoch Wert auf die technischen und geotechnischen Barrieren gelegt. Insbesondere bei Tonstein tragen sie auch einen nicht vernachlässigbaren Anteil zum Gesamtisolationsvermögen des Endlagers bei.

Allerdings ist zwischen Ton- und Salzgestein noch ein Unterschied zu beachten: Tongestein enthält naturgemäß deutliche Wasseranteile. Diese sollten sich allerdings an einem für ein End-

lager ausgewählten Standort nur durch Diffusion, d.h. extrem langsam, bewegen. Salzgestein enthält demgegenüber praktisch kein freies Wasser. Man muss also nicht mit Problemen rechnen - außer, wenn Wasser in das Endlager eindringt. In diesem Falle kann es durch Salzauflösung zu einem katastrophalen Ereignisablauf mit Ausbreitung von Radionukliden kommen.

Egal, welcher Barriere nun der Vorrang gegeben wird, müssen in jedem Fall die Zugänge zum Endlager (Schächte, Zugangsstollen) mit geotechnischen Barrieren nach Ende der Einlagerung langfristig dicht verschlossen werden.

### **Das Mehrbarrierenkonzept bei der in Deutschland geplanten Endlagerung in Salz**

In Bundesrepublik Deutschland sind vor 1989 wesentliche strategische Entscheidungen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle schon frühzeitig getroffen worden. Erste Überlegungen dazu wurden schon in den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts angestellt. Hierzu gehören die Festlegung auf die Endlagerung der letztlich zu entsorgenden Abfälle in tiefen geologischen Formationen sowie die Entscheidung für Steinsalz als Wirtsgestein für das Endlager, und zwar in einem Salzstock. Mit diesen Festlegungen waren zwei weitreichende zusätzliche Einengungen verbunden: Von den Salz-Formationen in Deutschland kommen auf Grund ihrer formationsspezifischen Ausprägung nur die aus der Zechstein-Zeit für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Frage, und Salzstöcke gibt es nur im norddeutschen Tiefland.

Das vorgesehene Endlager sollte ursprünglich alle Arten radioaktiver Abfälle aufnehmen. Diese Festlegung ist mit der Einbeziehung der Schachanlage Konrad in Niedersachsen in die Entsorgungsstrategie als Endlager für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle aufgegeben worden. Heute sollen im Salz vorrangig die stark wärmeentwickelnden abgebrannten Brennelemente und hochaktiven Abfälle endgelagert werden. Dennoch müssen auch die gering wärmeentwickelnden Abfälle, die nicht nach Konrad dürfen, in das Endlager im Salz.

Auch in der DDR wurde auf Salz gesetzt. Für das Endlager Morsleben in Sachsen-Anhalt wurden Anfang der siebziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts verschiedene Stufen der Genehmigung ausgesprochen, und ab 1978 wurde es probeweise und später im Dauerbetrieb betrieben. 1998 wurde die Einlagerung von schwachradioaktivem Material gerichtlich gestoppt.

Das Mehrbarrierenkonzept bei Endlagerung in einem Salzstock besteht grundsätzlich aus denselben Barrierengruppen wie bei Endlagerung in anderen Wirtsgesteinen bzw. in flach lagerndem Steinsalz. Die räumliche Anordnung der natürlichen Barrieren des Systems zeigt der

schematische geologische Querschnitt durch einen Salzstock in Abb. 1 (Seite 13). Hinsichtlich der sicherheitsbezogenen Bedeutung der Barrieren unterscheidet sich ein Endlager in einem Salzstock dagegen deutlich von dem in anderen Wirtsgesteinen und teilweise auch von Steinsalz in flacher Lagerung. Dabei gilt generell bei Endlagerung im Salz, dass den geologischen Barrieren die Hauptlast bei der Isolation der Abfallstoffe zukommt. Hinzu treten die geotechnischen Barrieren (Versatz, Dämme, Schachtverschlüsse), die vor allem den Eingriff in die natürlichen Barrieren durch Anlage des Bergwerks kompensieren müssen. Die technischen Barrieren (Abfallbehälter) sind bei der Endlagerung in Steinsalz mit Blick auf die Langzeitsicherheit von nachgeordneter Bedeutung.

Die Auseinandersetzung um das Barrierensystem bei Salz betrifft die geologischen Barrieren, die bei einem Salzstock aus zwei Elementen bestehen: Der Salzstock/das Salzgestein selbst und das den Salzstock überdeckende Neben- und Deckgebirge (weiterhin nur Deckgebirge genannt). Beide Elemente übernehmen jeweils spezifische Aufgaben, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird. Zunächst sind jedoch der Idealfall des vollständigen Einschusses sowie mögliche, dem vollständigen Einschluß entgegenstehende Entwicklungen, kurz zu skizzieren.

Im Idealfall bleibt ein Endlager im Salz trocken. Nach Einlagerung der Abfälle werden verbleibende Hohlräume versetzt (z.B. mit Salzgrus), die einzelnen Feldesteile durch Dämme abgeriegelt und die Schächte verschlossen. Im Verlauf von Jahrzehnten bis Jahrhunderten werden die verbliebenen Resthohlräume durch Konvergenz langsam verschlossen, so dass das Porenvolumen des Versatzmaterials und seine Durchlässigkeit durch Kompaktion bis in die Nähe der Werte unversehrten Salzgesteins reduziert worden sind. Es dringt kein Wasser- bzw. Lösungszutritt ins Endlager ein, und es besteht auch keine Wegsamkeit für Wasser oder Lösungen, die Biosphäre zu erreichen. Dieses Endlager hat also irgendwann den angestrebten Zustand des „vollständigen Einschusses“ erreicht.

Dem Idealfall des vollständigen Einschusses stehen verschiedene denkbare Vorgänge gegenüber, die Risiken mit sich bringen. Dazu gehören beispielsweise mit Steinsalz vergesellschaftete Gesteinstypen (v.a. Anhydrit, Salzton, Kalisalze), die andere gebirgsmechanische Eigenschaften als reines Steinsalz aufweisen. Unter dem Einfluss der aufgefahrenen Hohlräume, unter Wärmeentwicklung mit nachfolgender Abkühlung oder unter dem Druck entstehender Gase können so Spannungen auftreten, die zur Durchlässigkeit oder Mobilisierung von Lösungen bzw. Wasser führen können. Weiterhin kann langfristig selektive Subrosion (Ablaugung) von oben in den Salzstock eingreifen und die Barriere schwächen. Diese kritischen Aspekte dürfen bei der Endlagerung in einem Salzstock nicht vernachlässigt werden.

Diese kurze Darstellung zeigt, dass bei angestrebter normaler Funktion des Endlagersystems (**vollständiger Einschluss**) keine Radionuklide ins Deckgebirge oder gar in die Biosphäre freigesetzt werden. Primär wirkender Barriereteil ist also der Salzgesteinskörper. Gelingt es aber nicht, System beeinträchtigende Vorgänge oder kritische Freisetzungsszenarien sicher und nachweislich auszuschließen, erhält das Deckgebirge eine erhebliche Bedeutung für das Isolationsvermögen und die Sicherheitsbewertung des Salzstocks. Die Gründe dafür werden im Einzelnen in Kapitel 2. dargelegt.

## 2. Die Bedeutung des Deckgebirges für die Langzeitsicherheit eines Endlagers bei Salzstöcken

### 2.1 Entstehung und Aufbau von Salzstöcken

Salzstöcke entstehen durch das laterale Zusammenströmen von ursprünglich flach lagerndem Steinsalz in den Bereich des späteren Salzstocks und den Aufstieg des zusammengeströmten Steinsalzes durch die ursprünglich überlagernden jüngeren Gesteinsserien in Richtung Erdoberfläche ("Halokinese"). Ursache der Salzstockentstehung, die Zeiträume von Zehnermillionen Jahren umfasst, sind das unter dem Überlagerungsdruck durch jüngere Gesteinsserien plastische Verhalten von Steinsalz und seine im Vergleich zu den ursprünglich überlagernden anderen Gesteinstypen geringere Dichte. Durch das Zusammenströmen entstehen in der Regel linear gestreckte Akkumulationszonen von Steinsalz, die vom Ursprungsniveau des Steinsalzes in (heute) einigen Tausend Metern Tiefe bis in Nähe der Erdoberfläche reichen, im Allgemeinen wenige Kilometer breit sind und Zehnerkilometer oder mehr lang sein können. Diese **Salzgesteinskörper** (s. Abb. 1, Seite 13) enthalten neben Steinsalz auch Gesteinskörper aus mit Steinsalz entstehungsbedingt eng vergesellschafteten weiteren Gesteinstypen (im Wesentlichen Kalisalz, Anhydrit, Salzton).

Für die Entstehung der Salzstöcke und ähnlicher Salzstrukturen in Deutschland hatte das Steinsalz der Staßfurt-Folge des Zechsteins überragende Bedeutung; denn es war im heutigen Verbreitungsbereich der Salzstöcke (insbesondere dem norddeutschen Tiefland) üblicherweise die mobilste und damit die halokinetisch aktivste Steinsalzeinheit der gesamten Zechstein-Salinfolge. Es bildet den Kern vieler Salzstöcke und ist das für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, insbesondere wärmeentwickelnder Abfälle, gesuchte Wirtsgestein. Die anderen mit Salz

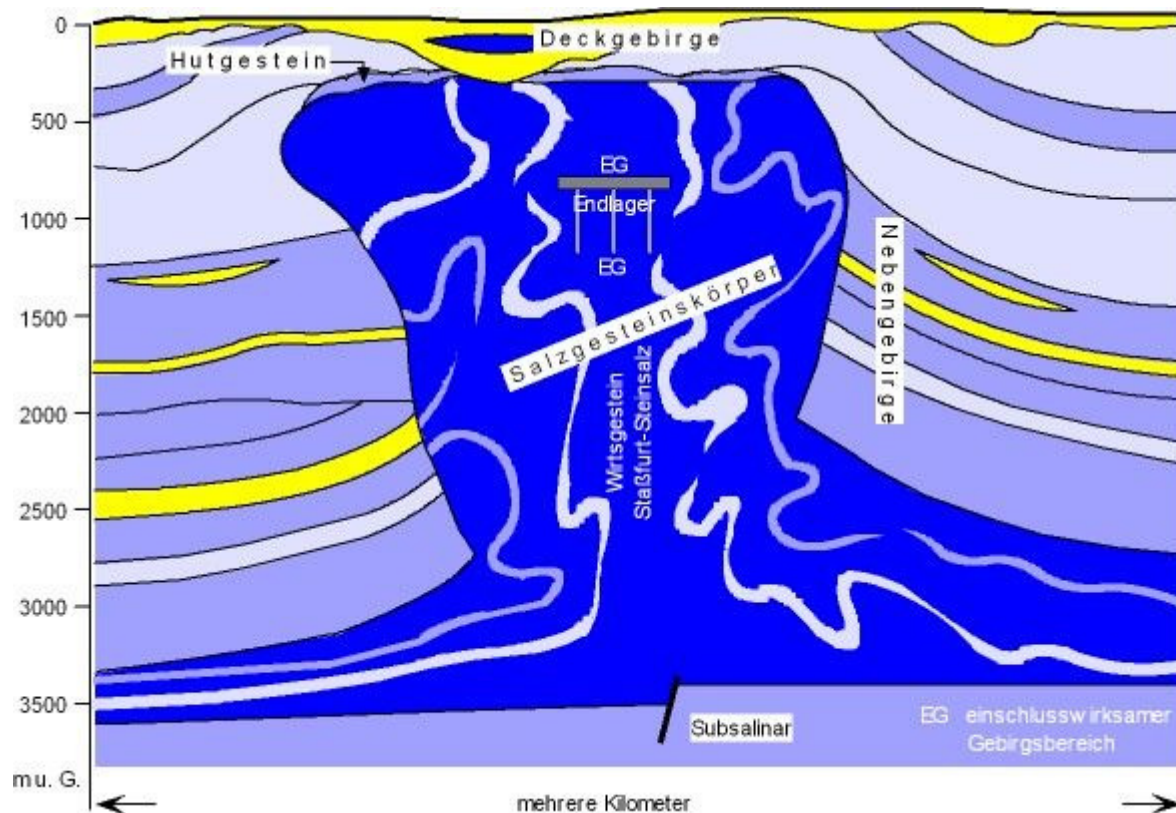
vergesellschafteten Gesteinstypen müssen dagegen auf Grund ihrer sicherheitsbezogenen ungünstigen Eigenschaften möglichst gemieden werden.

Während des Salzaufstiegs ist das Staßfurt-Steinsalz in die ursprünglich überlagernden Gesteineinheiten eingedrungen. Diese Schichten werden je nach Lage zur Aufstiegszone des Salzes mehr oder weniger intensiv aufgerichtet und angehoben und in einzelne Schollen zerlegt. Sie bilden je nach Lage zum Salzgesteinskörper das Nebengebirge oder Teile des Deckgebirges (s. Abb. 1, Seite 13).

Gelangt das aufsteigende Steinsalz (einschließlich der mit aufgeschleppten Gesteinskörper aus anderen Gesteinstypen) in die Nähe der Erdoberfläche bzw. in Kontakt mit strömendem Grundwasser, kommt es zur Salzauflösung (Subrosion). Das gelöste Steinsalz und gelöste Anteile anderer Gesteine, insbesondere Kalisalze, werden mit dem Grundwasser fortgeführt. Bei vielen Salzstöcken findet noch heute - an der Salzbelastung des abströmenden Grundwassers erkennbar - Subrosion statt. Am Lösungsort bildet sich aus den zurück bleibenden weniger bzw. nicht wasserlöslichen Komponenten des Steinsalzes bzw. Gesteinen über dem Salzgesteinskörper das **Hutgestein**. Es besteht in der Regel überwiegend aus Gips (daher "Gipshut").

Durch das Zusammenspiel von Salzaufstieg und Subrosion sowie regionalen oder sogar überregionalen Erosions- und Sedimentationsprozessen während und nach der Salzstockbildung entsteht über dem Hutgesteinskörper bzw. Gipshut ein oft sehr komplex aufgebautes **Deckgebirge**. Es besteht aus unterschiedlichen Sedimentgesteinsserien, deren Zusammensetzung und Aufbau die generelle geologische Entwicklung der Region und/oder den Wechsel von Aufstieg des Salzstocks und Subrosion des aufgestiegenen Salzes widerspiegeln. Werden Subrosion und Ablagerung neuer Gesteineinheiten über dem entstehenden Salzstock nicht (mehr) durch Salzaufstieg und Erosion ausgeglichen, gelangt die Oberfläche des Salzgesteinskörpers und mit ihr der entstehende Gipshut und die Unterfläche des Deckgebirges in Tiefen, in denen wegen der verringerten Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers auch die Subrosion nachlässt.

Ist an einem Salzstock Subrosion der dominierende geologische Prozess, so entsteht nicht nur Hutgestein neu, vielmehr bildet sich über der Subrosionszone eine morphologische Senke, in der neue Sedimente entstehen können. Sie können ihrerseits das Ausmaß der Grundwasserbewegung und damit der daraus resultierenden Subrosion verringern. Ungestört durch andere geologische Prozesse oder Ereignisse oder Eingriffe des Menschen ist Subrosion also ein Prozess, der durch Tieferlegung des Subrosionsniveaus und subrosionsinduzierte Sedimentation allmählich zur Reduzierung der Subrosionsintensität führt bzw. führen kann.



**Abb. 1: Prinzipdarstellung eines Endlagers in einem Salzstock**

## **2.2 Besonderheiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Steinsalz in einem Salzstock**

Wenngleich das Mehrbarriersystem eines Endlagers in einem Salzstock grundsätzlich aus denselben Barrierengruppen besteht wie bei Endlagerung in anderen Wirtsgesteintypen bzw. in Steinsalzvorkommen in flacher Lagerung, bestehen im Einzelnen doch deutliche Unterschiede. Diese betreffen sowohl die Ausführung und Funktion der technischen und geotechnischen Barrieren als auch die Bedeutung der beteiligten geologischen Barrieren für die Langzeitsicherheit eines Endlagers. Anders als etwa bei der Endlagerung in Granit, stellt bei der Endlagerung in Steinsalz das Salz selbst die gegenüber technischen und geotechnischen Barrieren langfristig wichtigere Barriere dar (unter Berücksichtigung eines schützenden Deckgebirgess. aber 2.3 u. 2.4). Wie bei allen Wirtsgesteintypen müssen auch bei Steinsalz die technischen, insbesondere die geotechnischen Barrieren an die Eigenheiten des Wirtsgesteins angepasst werden, damit es nicht zu unerwünschten oder gar die Sicherheit beeinträchtigenden Wechselwirkungen zwischen geotechnischen Barrieren und Wirtsgestein kommt.

Die Unterschiede zu Steinsalz in flacher Lagerung betreffen wegen der übereinstimmenden Materialeigenschaften ausschließlich konfigurative Aspekte, also die Form und Ausdehnung des Wirtsgesteinsgesteinskörpers (bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) sowie seinen räumlichen Lagebezug zu mit ihm vergesellschafteten Gesteinskörpern aus Gesteinstypen mit möglicherweise ungünstigeren Eigenschaften. Wesentliche zusätzliche Unterschiede auch zu Endlagerung in anderen Wirtsgesteinstypen als Steinsalz ergeben sich aus den spezifischen sicherheitsbezogenen Eigenschaften der Wirtsgesteinstypen. Hierzu gehören im Wesentlichen die charakteristischen barrierewirksamen Eigenschaften der verschiedenen Wirtsgesteinstypen.

### **Positive Eigenschaften von Salzstöcken**

Gegenüber anderen Gesteinstypen ist das Wirtsgestein Steinsalz vor allem durch folgende für die Barrierewirkung des einschlußwirksamen Gebirgsbereichs positive **Materialeigenschaften** gekennzeichnet:

- Steinsalz ist weitgehend wasserfrei.
- Es ist praktisch undurchlässig gegenüber Flüssigkeiten und Gasen.<sup>2)</sup>
- Es verhält sich unter Gebirgsdruck plastisch, wodurch etwa durch natürliche oder technische Prozesse oder Ereignisse entstehende Hohlräume im Gestein, Trennfugen, Klüfte oder Risse, wieder geschlossen werden. Dieser Vorgang wird als Konvergenz bezeichnet.

Als positive **konfigurative Eigenschaften** von Steinsalz in Salzstöcken (auch im Vergleich zu Steinsalz in flacher Lagerung) kommt die teilweise große, insbesondere vertikale Ausdehnung im Kern von Salzstöcken hinzu. Die im Vergleich zur ursprünglichen Mächtigkeit des Salzes erhebliche vertikale Mächtigkeitszunahme ist durch das Zusammenströmen und den Aufstieg des Staßfurt-Steinsalzes während der Salzstockbildung entstanden. Horizontal kann die Ausdehnung des gesuchten Steinsalzkörpers innerhalb eines Salzstocks dagegen erheblich variieren.

### **Negative Eigenschaften von Salzstöcken**

Eine negative **Materialeigenschaft** von Steinsalz mit ungünstiger Bedeutung für die Langzeitsicherheit ist seine starke Wasserlöslichkeit. Sie stellt einen Risikofaktor für die für die Endlage-

---

<sup>2)</sup> Diese für die Isolation von Abfallinhaltsstoffen sehr günstige Eigenschaft ist allerdings mit einem Nachteil verbunden: Wenn aus den eingeschlossenen Abfällen Gase freigesetzt werden, kann es im dicht verschlossenen Endlager zum Aufbau hoher Gasdrücke kommen. Derzeit ist nicht vollständig auszuschließen, dass dadurch die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beeinträchtigt werden kann. Sollte diese Einschätzung durch laufende Untersuchungen nicht widerlegt werden können, müssen Gegenmaßnahmen gegen die Entstehung hoher Gasdrücke, z. B. durch Bereitstellung von Gasspeicher-Hohlräumen, ergriffen werden.

rung in einem Salzstock dar. Unter humiden Klimabedingungen, also auch in Deutschland, ist Steinsalz daher an der Erdoberfläche nicht existenzfähig. Es wird vielmehr noch unter Bedeckung durch überlagernde Gesteine durch versickerndes Niederschlagswasser bzw. oberflächennahes Grundwasser (Subrosion) aufgelöst und mit dem Grundwasserstrom weggeführt (s. 2.4). Die anderen für die Endlagerung in Erwägung gezogenen Wirtsgesteinstypen (insbesondere Ton/Tonstein, Granit) sind demgegenüber praktisch wasserunlöslich.

**Konfigurativ ungünstig** ist die entstehungsbedingte Vergesellschaftung von Steinsalz mit Gesteinstypen (vor allem Kalisalzen, Anhydrit, Salzton) mit für die Endlagerung potenziell ungünstigen Eigenschaften zu beurteilen. Kalisalze sind durch teilweise deutlich höhere Löslichkeit als Steinsalz gekennzeichnet, wodurch es zu besonderen Lösungsphänomenen kommen kann ('vorausseilende' Subrosion, s. 4.2). Die Gesteinstypen Anhydrit und Salzton reagieren im Gegensatz zu Steinsalz auf mechanische Beanspruchung elastisch. In ihnen können daher bei der mit der Salzstockbildung verbundenen intensiven Durchbewegung der Gesteine offene Trennfugen entstehen, die sich - anders als bei Steinsalz - wegen elastischen Gesteinsverhaltens nicht zwangsläufig wieder (vollständig) schließen. Entsprechendes gilt für durch bergmännische Tätigkeit verursachte Risse im Gestein. Selbst geschlossene Trennfugen / Risse können im Zusammenhang mit der Endlagerung oder auf Grund anderer, etwa abfallinduzierter mechanischer Einflüsse 'wiederbelebt' werden und Wasserwegsamkeiten für den Zutritt von Laugen an den Endlagerbereich bzw. umgekehrt für den Transport radionuklidbelasteter Lauge aus dem Endlager in die den Salzgesteinskörper überlagernden Schichten bilden.

Zwar ist auch Steinsalz in flacher Lagerung mit den genannten Gesteinstypen vergesellschaftet, bei Salzstöcken sind jedoch zum einen die Lagebeziehungen zwischen den verschiedenen Gesteinskörpern auf Grund der Salzstockentstehung unregelmäßig und nur schwierig vollständig exakt zu erfassen und zu bewerten. Zum anderen sind diese Gesteinskörper durch den Salzaufstieg bevorzugt vertikal ausgerichtet worden. Sofern sie während der Entstehung des Salzstocks nicht in einzelne isolierte Schollen zerlegt worden sind, können sie daher hydraulische Verbindungen zwischen grundwasserführenden Gesteinseinheiten über dem Salzgesteinskörper und dem Einlagerungsbereich herstellen.

Das gilt umso mehr, als bei Salzstöcken der Abstand zwischen der Oberfläche des Salzgesteinskörpers und der Erdoberfläche bzw. dem im Vergleich zu tiefem Grundwasser in der Regel rasch strömenden oberflächennahen Grundwasser oft gering ist. In solchen Fällen ist einerseits der Kontakt von Grundwasser mit potenziell wasserleitenden Gesteinskörpern im Salzgesteinskörper möglich bzw. ohne gezielte Untersuchung nicht auszuschließen. Damit ist zugleich das Eindringen von Wasser in den Salzgesteinskörper und sogar den Einlagerungsbereich möglich. Andererseits sind die konfigurativen Voraussetzungen erfüllt, damit radionuklid-

belastete Lauge aus dem Einlagerungsbereich über wasserleitenden Gesteinskörper bis in den Gipshut bzw. das Deckgebirge gelangen und möglicherweise durch das Deckgebirge in die Biosphäre transportiert werden kann. Von den in den Salzstöcken Deutschlands regelmäßig vorhandenen Gesteinskörpern gilt auf Grund leidvoller Erfahrungen im Salzbergbau insbesondere der so genannte Hauptanhydrit als in diesem Sinne kritischer Gesteinskörper.

Das Zustandekommen der beschriebenen Szenarien ist von den spezifischen Verhältnissen in den einzelnen Salzstöcken abhängig. Voraussetzung ist, dass ein potenziell wasserleitender Gesteinskörper einen durchgehenden Strang zwischen Grundwasser im Hutgestein bzw. Deckgebirge und Einlagerungsbereich bildet, dass dieser Gesteinskörper durchgängig wasserdurchlässig ist und dass ein die Grundwasser- bzw. Laugenbewegung erlaubendes hydraulisches Potenzial vorhanden ist (s. auch 4.2).

Aus den gesteinstypspezifischen Besonderheiten von Steinsalz und den konfigurativen Besonderheiten von Salzstöcken im Vergleich mit anderen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle ins Auge gefassten Gesteinstypen bzw. Gesteinskörpern (s. 2.2) ergeben sich Konsequenzen für die relative Bedeutung der verschiedenen Barrieregruppen eines Endlagers in einem Salzstock. Betroffen sind sowohl das Verhältnis der technischen und geotechnischen Barrieren zu den geologischen Barrieren als auch das Verhältnis der verschiedenen geologischen Barrieren untereinander (s. 2.3 u. 2.4).

## 2.3 Relative sicherheitsbezogene Bedeutung der geologischen und technischen / geotechnischen Barrieren

Auf Grund des geringen Wassergehalts und des plastischen Verhaltens von Steinsalz kommt den technischen Barrieren (Abfallform, Behälter) und den geotechnischen Barrieren (Versatzmaterial, Dammbauwerke, Verschlussstopfen von Bohrlöchern) mit Blick auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers gegenüber dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich aus Steinsalz und den weiteren geologischen Barrieren nur nachgeordnete Bedeutung zu. Sobald alle endlagerungsbedingten Hohlräume im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. in Versatzmaterial aus Salzgrus durch Konvergenz vollständig geschlossen sind, kann Wasser bzw. Lauge nicht mehr an die Abfälle gelangen oder umgekehrt Radionuklide aus den Abfällen abtransportiert werden. Die technischen Barrieren haben dann keine sicherheitstragende Funktion mehr.

Für die geotechnischen Barrieren Versatzmaterial und Dammbauwerke in Strecken gilt diese Aussage nur dann, wenn ihre langzeitige Funktionstüchtigkeit nachgewiesen werden kann. Von vornherein ausgeschlossen von dieser Aussage sind Schachtverschlüsse, mit denen die ursprüngliche Barrierewirkung der geologischen Barrieren mindestens näherungsweise wieder hergestellt werden muss. Diese Einschränkungen sind keine Besonderheit von Endlagern in Steinsalz, sondern gelten für alle ins Auge gefassten Wirtsgesteinstypen.

## 2.4 Bedeutung des Deckgebirges

Die spezifischen endlagerungsrelevanten Eigenschaften von Steinsalz **und** die konfigurativen Besonderheiten von Salzstöcken (s. 2.2) bestimmen die relative Bedeutung der verschiedenen geologischen Barrieren (bzw. Barrierengruppen) bei einem Endlager in einem Salzstock. Hauptursachen dafür sind (s. 2.2 u. Abb. 1)

- die starke Wasserlöslichkeit von Steinsalz,
- seine Vergesellschaftung mit potenziell wasserleitenden Gesteinstypen,
- der komplexe innere Bauplan des Salzgesteinskörpers mit insbesondere Anhydrit- und Salzion-Serien bei gleichzeitig generell vertikaler Ausrichtung der einzelnen Gesteinskörper,
- der relativ geringe Abstand des Salzgesteinskörpers zur Erdoberfläche und der daraus resultierende (mögliche) Kontakt mit oberflächennahem Grundwasser.

Die Tatsache, dass Steinsalz in humiden Klimazonen ohne den Schutz überlagernder Schichten ('Deckgebirge') nicht existenzfähig ist, belegt bereits die Abhängigkeit der Barrierefunktion des Salzgesteinskörpers und letztlich des darin enthaltenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von den Eigenschaften des Deckgebirges. Andererseits führt Subrosion langfristig zur Reduzierung des Subrosionsausmaßes (s. 2.1), weil die Salzgesteinsoberfläche dadurch in Tiefen mit geringerer Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers gelangt und in der über der Subrosionszone entstehenden Hohlform vor Subrosion schützende Schichten gebildet werden können.

Vor diesem Hintergrund genügt es nicht, bei der Auswahl und sicherheitsbezogenen Bewertung von Salzstöcken für die Endlagerung radioaktiver Abfälle allein den Salzgesteinskörper oder gar allein den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu betrachten. Wie in 2.2 dargestellt, ist die Existenz des Salzgesteinskörpers vom Ausmaß seines Kontaktes mit Grundwasser abhängig. Dieser (und das Ausmaß der resultierenden Subrosion) wird seinerseits maßgeblich durch den Aufbau des Deckgebirges<sup>3)</sup>, des Hutgesteinskörpers und teilweise des Nebengebirges gesteuert. Hinzu kommt, dass die Lokalisierung und sicherheitsmäßige Beurteilung möglicher Gesteinsvorkommen mit ungünstigen Eigenschaften innerhalb des Salzgesteinskörpers mit Unsicherheiten behaftet sein kann. Daher müssen die materiellen und konfigurativen Eigenschaften der den Salzgesteinskörper schützenden Gesteine sowie ihr Lagebezug zum Salzgesteinskörper in die Standortsuche und -beurteilung einbezogen werden. Die meisten der zu betrachtenden Aspekte können abschließend allerdings nur standortbezogen behandelt werden, da ihre Ausprägung sehr stark von lokalen Gegebenheiten bestimmt wird. Diese sind erst spät in einem Auswahlverfahren so gut bekannt, dass sie im Hinblick auf ihre sicherheitsbezogenen Konsequenzen beurteilt werden können.

Für das Deckgebirge genügt diese späte Berücksichtigung wegen seiner besonderen Bedeutung für die Endlagersicherheit nicht. Vielmehr muss bereits bei der Standortsuche gezielt nach einem Deckgebirge mit günstigen, also den Salzgesteinskörper schützenden Eigenschaften gesucht werden. Ein solches Vorgehen entspricht dem von der BGR (1995) bei der Identifizierung untersuchungswürdiger Salzstöcke verfolgten methodischen Ansatz.

## **Schutz des Salzgesteinskörpers**

---

<sup>3)</sup> Im Folgenden werden in den Begriff Deckgebirge auch das Nebengebirge und der Hutgesteinskörper einbezogen, weil wesentliche Aussagen zur Funktion des Deckgebirges zumindest auch Teile dieser Einheiten betreffen oder doch betreffen können.

Das Ausmaß der Salzauflösung an der Deckfläche des Salzgesteinskörpers (**Salzspiegel**) eines Salzstocks ist wesentlich vom Aufbau des Deckgebirges (einschließlich Hutgesteinskörper) und von der Tiefenlage des Salzspiegels abhängig. Es findet keine bzw. kaum Subrosion statt, wenn sich der Steinsalzkörper tief unter der Erdoberfläche befindet und/oder durch überlagernde Gesteinskörper mit geringer Wasserdurchlässigkeit gegen Auflösung geschützt wird. Andernfalls ist mit folgenden Auswirkungen zu rechnen:

Durch Subrosion werden der Abstand zwischen wasserführenden Gesteinen und Endlager verringert und die Konfiguration der Grenzfläche zwischen Salzgesteinskörper und Deckgebirge sowie der Aufbau des Gipshutes verändert.

Wo Grundwasser im Bereich des Salzspiegels in Kontakt mit Einschaltungen besonders stark wasserlöslicher Kalisalze kommt, kann es darüber hinaus zu weit in den Salzgesteinskörper hineinreichender selektiver Auflösung oder Umlösung kommen. Bei Kontakt mit Grundwasser führenden Schichten des Deckgebirges können Gesteinsstränge aus Anhydrit oder Salzton Wasser bzw. Lauge weit in den Salzgesteinskörper hineinleiten, wenn entsprechende hydraulische Bedingungen gegeben sind. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn das Endlager und alle zugehörigen künstlichen oder natürlichen Hohlräume (noch) nicht (wieder) vollständig geschlossen sind. Umgekehrt können solche Gesteinsstränge für den konvergenzinduzierten Radionuklidtransport aus dem Endlager zur Verfügung stehen.

Die auflösungshemmende Schutzfunktion des Deckgebirges durch das Vorhandensein ausgedehnter Gesteinskörper mit geringem Wasserleitvermögen ist aus diesen Gründen unerlässliche Voraussetzung dafür, dass der Steinsalzkörper eines Salzstocks überhaupt als einschlusswirksamer Gebirgsbereich in Frage kommt - es sei denn, es könnte für die genannten und denkbare andere Auswirkungen von Subrosion nachgewiesen werden, dass sie sicherheitsmäßig irrelevant sind. Beispielsweise wäre nachzuweisen, dass potenziell wasserleitende Anhydritstränge zwischen Endlagertiefe und Salzspiegel in isolierte, hydraulisch getrennte Einzelschollen zerlegt sind, so dass der Zutritt von Lauge an Abfälle zuverlässig ausgeschlossen werden kann (s. 4.2). Die Salzauflösung wird zwar auch gehemmt oder sogar verhindert, wenn im Bereich des Salzspiegels auf Grund geringer bis sehr geringer hydraulischer lokaler/regionaler Grundwasser-Gradienten kein oder nur sehr geringer Grundwasserdurchsatz durch das Deckgebirge stattfindet. Diese Voraussetzungen werden ihrerseits jedoch vor allem morphologisch und/oder klimatisch gesteuert. Sie unterliegen schwierig zu prognostizierenden Veränderungen und sind für sich allein kein Beleg für langfristig ausbleibende Subrosion. Die geforderte Schutzfunktion kann am zuverlässigsten durch geeigneten Aufbau des Deckgebirges gewährleistet und auch belegt werden.

## **Beitrag des Deckgebirges zur Radionuklid-Zurückhaltung**

Sofern der Zutritt von Lauge an die Abfälle nicht zuverlässig ausgeschlossen werden kann oder bei der Beschreibung des Endlager-Salzstocks bzw. bei der Prognose seiner künftigen Entwicklung sicherheitsrelevante Unsicherheiten bestehen bleiben, kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass der Salzgesteinskörper die ihm zugedachte Funktion als einschlusswirksamer Gebirgsbereich mit vollständigem Einschluss der Abfälle für den erforderlichen Zeitraum nicht oder nicht hinreichend erfüllen wird. Dann muss das Deckgebirge einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung etwaiger Auswirkungen der Radionuklidfreisetzung auf Mensch und Umwelt leisten, indem es den Transport von in das Deckgebirge gelangten Schadstoffen mit dem Grundwasser in die Biosphäre verhindert oder zumindest hinreichend verzögert. Entsprechendes gilt bei möglicher Beeinträchtigung der Barrierenfunktion des Salzgesteinskörpers bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch unerwartete mit der Endlagerung verbundene oder natürliche Ereignisse und Prozesse.

In solchen Fällen muss das Deckgebirge durch die barrierewirksamen Eigenschaften und die Anordnung der an seinem Aufbau beteiligten Gesteinskörper die Ausbreitung von in das Deckgebirge gelangten Radionukliden verhindern, zumindest wirksam behindern. Dazu muss es zu möglichst großen Teilen aus Gesteinen mit geringer Wasserdurchlässigkeit bestehen, die den Salzgesteins- bzw. den Hutgesteinskörper unmittelbar überlagern und weite Ausdehnung haben. Dadurch werden der grundwassergetragene Radionuklidtransport vom Salzgesteinskörper in die Biosphäre unterbunden oder doch stark verzögert und zugleich - im Sinne der oben beschriebenen Schutzfunktion - der Zutritt von Grundwasser an den Salzgesteinskörper begrenzt. Aus den Forderungen nach Schutz des Salzgesteinskörpers und Beitrag des Deckgebirges zur Radionuklidisolation ergeben sich also prinzipiell ähnliche Anforderungen an die Eigenschaften und die Anordnung der das Deckgebirge aufbauenden Gesteinskörper. Davon abweichende ungünstige Deckgebirgsverhältnisse von Salzstöcken können grundsätzlich nicht durch positive Merkmale des Salzgesteinskörpers kompensiert werden.

Zusammenfassend erweist sich das Deckgebirge damit als wesentliches Element des Multibarrierensystems eines Endlagers in einem Salzstock, dessen Schutzfunktion gegen Subrosion des Salzgesteinskörpers und dessen Beitrag zur Schadstoffzurückhaltung bei der Beurteilung der Langzeitsicherheit gezielt bewertet und nachgewiesen werden müssen. Zudem muss für den geforderten Isolationszeitraum nachgewiesen werden, dass die Schutzfunktion in ausreichendem Maße erhalten bleibt. In jedem Fall muss nachgewiesen werden, dass die beiden Funktionen des Deckgebirges mindestens für den 'kritischen Zeitraum' gewährleistet werden, in dem der vollständige Einschluss der Abfälle (s. 3.2) noch nicht erreicht worden ist.

### 3. Bedeutung der Barriere Deckgebirge im Zeitverlauf

Die Bedeutung und die Notwendigkeit der Barriere Deckgebirge für einen Salzstock wird in Kap. 2 ausführlich dargestellt. Ein Endlager in einem Salzstock besitzt dann ein gutes oder **'günstiges' Deckgebirge**, wenn es folgende positive Eigenschaften aufweist (BGR 1995):

- Vollständige Überdeckung des Caprock mit tonigen Unterkreidesedimenten oder
- Vollständige Überdeckung des Caprock mit Oberkreidesedimenten oder
- Vollständige oder weitestgehende Überdeckung mit alttertiären Tonen, insbesondere durch den mitteloligozänen Rupelton,
- Intakte, ungestörte Dachregion mit Decksedimenten.

Weiterhin sind folgende Kriterien als positiv zu sehen, wenn die entsprechenden Eigenschaften **nicht** bei dem optimalen Deckgebirge auftreten (BGR 1995):

- Überdeckung mit sandigem Alttertiär ohne Rupelton oder
- Überdeckung des Caprock nur mit oberoligozänen, neogenen oder quartären Sedimenten (Süßwasserführung, Kontakt mit den genutzten Grundwasserstockwerken und zur Biosphäre möglich),
- quartäre Rinnen, die sich tief in die Dachsedimente einschneiden,
- Scheitelgräben oder Scheitelstörungen, vor allem, wenn die Störungen in den Caprock einschneiden,
- Anzeichen von rezenter Subrosion im Firstbereich der Struktur.

Ein durch entsprechende Merkmale gekennzeichnetes Deckgebirge würde also einerseits einen größtmöglichen Schutz gegen die Ausbreitung von Radionukliden darstellen, andererseits einen möglichst weitgehenden Schutz des Salzstocks gegen Ablaugung/lineare Subrosion gewährleisten (s. 4.1).

Verschiedentlich wird die Frage aufgeworfen, wie lange in die Zukunft denn ein solches günstiges Deckgebirge bestehen bliebe. Denn es sei geradezu sehr wahrscheinlich, dass über kurz oder lang das optimale Deckgebirge ganz oder teilweise abgeräumt, zerstört, umgelagert oder sonstwie verändert würde. Und dann wäre das optimale Deckgebirge durch ein anderes ersetzt, dessen Eigenschaften sehr wahrscheinlich schlechter seien in Hinblick auf den Schutz des Salzgesteinskörpers und den Schutz gegen die Ausbreitung von Radionukliden.

Diesen Einwand muss man ernst nehmen. Um ihn angemessen zu behandeln und zu zeigen, dass ein gutes Deckgebirge dennoch erforderlich ist, müssen zwei Aspekte betrachtet werden: Zum einen die Frage, wann sich das Deckgebirge (frühestens) verändern kann (s. 3.1); zum zweiten die Frage, was in der Zeitspanne bis zur gravierenden Veränderung des Deckgebirges im oder vom Endlager ausgehend geschehen kann (s. 3.2).

### **3.1 Wann sind gravierende Veränderungen an der Barriere Deckgebirge möglich?**

Betrachtet man das angenommene optimale Deckgebirge über einem beliebigen Salzstock in Norddeutschland (z.B. gut untersucht: Gorleben), so zeigt sich folgendes: Im Verlauf des Quartärs (Beginn vor ca. zwei Millionen Jahren) kam es mehrfach zu Klimaschwankungen, die während der kältesten Phasen unter anderem in Norddeutschland zu Bedeckungen durch Inlandeisgletscher führten. Dadurch wurden Prozesse initiiert, die zu erheblicher Erosion des Deckgebirges und anschließender Neusedimentation führten. Dies ist für das optimale Deckgebirge schädlich. Für den Fall, dass in Zukunft lediglich Sedimentation stattfindet, ist es für die Barrierewirkung des Deckgebirges irrelevant, weil sich dadurch seine bisherigen Eigenschaften nicht negativ ändern.

Im Raum Gorleben sind zwei Gletscherbedeckungen nachgewiesen. Während der Elster-Kaltzeit (Beginn vor ca. 400.000 – 350.000 Jahren) wurde das Gebiet von Gletschern überfahren, wobei diese während der maximalen Ausdehnung des Eisvorstoßes im Raum Gorleben rund 800 – 1.000 Meter mächtig waren. In die Abschmelzphase – aber noch bei Eisbedeckung – fällt die Entstehung der Erosionsrinnen oder übertiefen Täler, die von Schmelzwässern unter dem Gletschereis bis ca. 400 Meter unter Normalnull in die damalige Geländeoberfläche eingeschnitten wurden. Diese Erosionsrinnen sind in ganz Norddeutschland bekannt. Sie wurden vorrangig von Kies- und Sandablagerungen gefüllt, aber auch von schluffig bis tonigen Sedimenten. Die Sedimente der Elster-Eiszeit bezeugen eine tiefgreifende subglazial entstandene Rinne auf dem Salzstock (BGR 1990).

Die zweite Bedeckung des Raumes Gorleben fand während der Saale-Kaltzeit statt (Beginn vor 230.000 Jahren). Dabei fanden zwei Eisvorstöße statt (Drenthe-1- und Drenthe-2-Stage), die bei maximaler Eisausdehnung ebenfalls mindestens 800 – 1.000 Meter Eismächtigkeit aufwiesen. Die mit der Vergletscherung ablaufenden Prozesse und die daraus entstandenen Sedimente sind denen der Elster-Eiszeit ähnlich (BGR 1990).

Während der Weichsel-Kaltzeit (Hochglazialzeit vor ca. 20.000 – 15.000 Jahren) blieben die Gletscher ca. 60 Kilometer nördlich des Gorlebener Raumes stehen. Hier kam es nicht mehr zu grundsätzlichen Änderungen des Untergrundes, sondern lediglich noch zur Sedimentation der Niederterrassenablagerungen (BGR 1990).

Vor ca. 10.000 Jahren begann mit einer allmählichen Erwärmung das Holozän.

Im Ergebnis ist festzustellen: Während der vergangenen ca. 400.000 Jahre hat es drei Kaltzeiten gegeben, von denen die beiden älteren den Raum Gorleben mit Eisvorstößen erreicht haben. Damit zusammenhängend kam es zu einer erheblichen Umformung des Untergrundes durch subglaziale, z.T. unter erheblichem hydraulischem Druck stehende Schmelzwässer. Ein optimales Deckgebirge wäre dann aller Wahrscheinlichkeit nach verschwunden. Nimmt man für die (jüngste) Weichsel-Kaltzeit ebenfalls eine Eisüberdeckung über einem gewählten Salzstock Norddeutschlands an, dann ergibt sich eine letztmalige 'hocherosive' Situation ca. 20.000 – 15.000 Jahre vor heute.

Die Klimaschwankungen, die zu mehrfachen Kaltzeiten führten, werden auch in Zukunft stattfinden. Dafür sprechen jedenfalls Klimamodelle. Sie besagen, dass die heutige Warmzeit (auch unter Berücksichtigung anthropogener Einflüsse) sich noch etwa 25.000 Jahre in die Zukunft fortsetzen wird. Danach findet eine erste Abkühlungsphase statt, und erst dann in 100.000 Jahre kommt es zu einem ersten glazialen Maximum (BGR 1999).

Insgesamt zeigen die heutigen Erkenntnisse und Überlegungen, dass eine neue Kaltzeit mit Gletscherüberdeckung in Norddeutschland – gemessen an den tatsächlichen Verhältnissen der Vergangenheit - frühestens in 15.000 – 20.000 Jahren stattfinden kann; nach Modellrechnungen ist damit erst in ca. 100.000 Jahren zu rechnen.

Man kann nach heutigem Ermessen also davon ausgehen, dass frühestens in 15.000 Jahren ein glaziales Ereignis oder ein glazialer Prozess stattfindet, der ein heute gegebenes günstiges Deckgebirge umgestalten kann. Die abseits einer Vereisung liegenden Klimaveränderungen (sei es trocken-warm, feucht-warm oder trocken-kalt) sind ohne tiefgreifende Bedeutung, da nicht erkennbar ist, wie sie in die optimalen Barriere Deckgebirge eingreifen können oder die Grundwasserbewegung im Untergrund wesentlich (negativ) verändern können. Änderungen im Bereich der obersten Zehner-Meter der Barriere Deckgebirge sind ohne Bedeutung.

### **3.2 Die kritische Zeitspanne bei der Endlagerung in einem Salzstock**

In Kap. 1. ist der Fall des 'vollständigen Einschlusses' der radioaktiven Abfälle im Salz beschrieben. Bis zum Erreichen dieses Idealfalles vergeht allerdings eine bestimmte Zeitspanne, die durch nicht zu verhindernde Störungen der Integrität des Salzstocks gekennzeichnet ist. Wird hingegen der vollständige Einschluss nicht erreicht, so wird das Ziel der Endlagerung verfehlt.

Im Folgenden werden die nach der Einlagerung der Abfälle auftretenden Störungen/ Unwägbarkeiten bzw. Prozessabläufe im Salzstock kurz beschrieben, und es wird jeweils eine (wahrscheinliche) Zeitspanne angegeben, während der sie wirken. Sämtliche Unwägbarkeiten hängen entweder mit den hergestellten Hohlräumen im Salz zusammen oder mit Störfaktoren, die von den radioaktiven Abfällen ausgehen. Es können drei große Gruppen unterschieden werden:

- Allgemeine gebirgsmechanische Vorgänge/ Spannungsumlagerungen, die durch die Existenz der Hohlräume und deren Konvergenz induziert werden. Hierbei können die unterschiedlichen gebirgsmechanischen Eigenschaften der Gesteine (z.B. Steinsalz, Anhydrit, Salzton, Kalisalze) besonders zum Tragen kommen. Solange Hohlräume des Bergwerks offen stehen bzw. trotz Versatz Resthohlraum zur Verfügung steht, ist der Zustand noch nicht stabil. Insbesondere ist denkbar, dass (begrenzte) Lösungszuflüsse stattfinden und an die Endlagerbehälter gelangen. Die geotechnischen Barrieren müssen also so ausgerichtet sein, dass sie die Freisetzung von Schadstoffen aus betroffenen Feldesteilen verhindern.  
**Zeitdauer:** Jahrzehnte bis (wenige?) Jahrhunderte.
- Thermomechanische Vorgänge, die durch die Ausdehnung des Salzstocks wegen seiner Aufheizung durch die stark wärmeentwickelnden Abfälle auftreten. Die Temperaturexpansion im Salzstock erfolgt dabei nach BGR (1990) entsprechend den Ergebnissen von Modellrechnungen nur langsam (10.000 Jahre). Bei der späteren Abkühlung des Salzstocks treten entsprechende Kontraktionsvorgänge auf. Die thermomechanischen Vorgänge überlagern die allgemeinen gebirgsmechanischen Vorgänge. Einerseits führt die Erwärmung des Salzes zu einer schnelleren Konvergenz der Hohlräume, andererseits werden aber großräumig deutlich stärkere Spannungsumlagerungen auftreten. Nach BGR (1990) können sich infolge der thermomechanischen Einwirkungen vertikale Risse vom Salzspiegel ausgehend ins Salzgestein ausbilden. Im homogenen Salzgestein bilden sich diese Risse nur begrenzt aus, aber das Salzgebirge verliert seine Barrierefunktion. Da der Salzstock aber nicht homogen aufgebaut ist (z.B. Anhydritschichten mit verformungsbehinderndem Tragverhalten), sind weitergehende Berechnungen und Nachweise erforderlich hinsichtlich der thermomechanischen Auswirkungen auf das Salzgebirge.

**Zeitdauer:** Tausend Jahre bis mehrere Tausend Jahre (vollständige Abkühlung auf 'Normaltemperatur', (z.B. DELISLE 1980))

- Durch die Bildung von Gas können negative Einflüsse auf die Barriere Salzstock und die geotechnischen Barrieren hervorgerufen werden. Insbesondere gasinduzierte Risse im Salzkörper werden diskutiert. Allerdings kann gegenwärtig die tatsächliche Bedeutung hoher Gasdrücke für die Barrierewirksamkeit von Steinsalz nicht abschließend beurteilt werden, weil die mit der Gasbildung verbundenen Druck aufbauenden und abbauenden Vorgänge derzeit nur unsicher quantifiziert werden können (RSK 2005). Je nach Annahmen zeigt sich, dass eine Beeinträchtigung der mechanischen Stabilität des Grubengebäudes oder der Versatzmaterialien nicht ausgeschlossen werden kann (BMU 2003). Die Hauptmenge des Gases stammt aus den schwach- und mittelaktiven Abfällen, die auch ohne äußere Einflüsse auf Grund ihres Wassergehaltes Gas entwickeln; die hochaktiven Abfälle und die abgebrannten Brennelemente weisen eine kritische korrosionsbedingte Gasbildung nur auf bei Lösungszutritten. Die Überlegung, Gasspeicherräume im Salz anzulegen, bedeutet eine klare Abweichung vom angestrebten optimalen Zustand der Barrierewirksamkeit von Steinsalz und gegebenenfalls von geotechnischen Barrieren.

**Zeitdauer:** Jahrzehnte bis mehrere Tausend Jahre.

Insgesamt zeigt die Abschätzung der verschiedenen ablaufenden Prozesse – bei aller Ungenauigkeit – eine kritische Zeitspanne, die bis zu mehreren tausend Jahren reichen kann. In dieser Zeitspanne muss davon ausgegangen werden, dass der sichere Einschluss noch nicht erreicht ist; Das Endlager (genauer: die Barriere Salzstock) befindet sich so lange in einer potenziell kritischen Phase. Man muss sich klarmachen, dass die hier nur grob genannten Vorgänge/Prozesse tatsächlich höchst komplexe Zusammenhänge bedingen, über deren Wirkungen im Einzelnen zum Teil noch Mutmaßungen bestehen.

### **3.3 Ergebnis: Die Umformung des Deckgebirges und die kritische Zeitspanne**

Wenn man die Aussagen von Kap. 3.1 und 3.2 zusammenführt, dann kommt man zu folgendem Ergebnis:

- Die Umformung ('Beseitigung, Ausräumung') des günstigen Deckgebirges kann im norddeutschen Raum frühestens in ca. 15.000 Jahre von heute geschehen. Es sind keine Kräfte

außer den klimatischen Veränderungen erkennbar (Kaltzeiten mit Eisüberdeckung), die eine solche Umformung schneller nach sich ziehen könnten.

- Eine Abschätzung der Länge der Vorgänge/Prozesse, die den potenziell kritischen Zustand des Endlagers direkt nach Einlagerung verursachen, führt zu einer Zeitspanne von mehreren Tausend Jahren. Wenn innerhalb dieser Zeitspanne keiner der angesprochenen Vorgänge zu kritischen Zuständen führt, kann man anschließend vom sicheren Einschluss ausgehen.
- Ein günstiges Deckgebirge ist also für eine begrenzte Zeit (mehrere Tausend Jahre) unbedingt notwendig. Während dieser Zeit besteht nicht die Gefahr, dass ein günstiges Deckgebirge umgestaltet wird. Für Zeiträume, die darüber hinausgehen, wird die Barriere Deckgebirge immer weniger wichtig, vorausgesetzt, der sichere Einschluss ist erreicht worden. Für den Fall, dass der sichere Einschluss nicht erreicht worden ist, steht immerhin die Zeitspanne, in der das günstige Deckgebirge mindestens seine Wirksamkeit entfaltet, zum Schutz der Biosphäre zur Verfügung. Hat man hingegen ein unzureichendes Deckgebirge, werden radioaktive Stoffe mehr oder weniger schnell in die Biosphäre eindringen.
- **Als Konsequenz ergibt sich die Forderung nach einem günstigen Deckgebirge.** Denn nur ein solches kann mögliche kritische Abläufe in der Barriere Salzstock in ihren Auswirkungen, vor allem die Radionuklidenausbreitung in die Biosphäre, wirkungsvoll vermindern. Ein günstiges Deckgebirge wirkt darüber hinaus gegen den Angriff auf die Barriere Salzstock (selektive Subrosion u.ä.). Wenn es nicht gelingen sollte, einen Salzstandort mit den erwünschten guten Deckgebirgseigenschaften zu finden (s. 4.1), dann muss man konsequenterweise auf die Endlagerung in einem Salzstock verzichten.

## 4. Beurteilung der Situation beim Deckgebirge Gorleben

### 4.1 Deckgebirgsbefunde

#### Anforderungen und Kriterien

Aus der in 2.4 und 3. dargestellten Bedeutung des Deckgebirges (bzw. funktional ähnlich zu beurteilender Anteile des Hutgesteinskörpers und des Nebengebirges) für die Langzeitsicherheit eines Endlagers in einem Salzstock ergibt sich die zwingende Notwendigkeit, die barrierewirksamen Eigenschaften und die Anordnung der das Deckgebirge aufbauenden Ge-

steinsserien bereits bei der Auswahl und vergleichenden Bewertung von Endlagerstandorten gezielt zu berücksichtigen. Dies unterscheidet Steinsalz, und insbesondere Steinsalz in Salzstöcken, von allen anderen ins Auge gefassten Wirtsgesteinstypen, bei denen die Barrierewirksamkeit der unter- und überlagernden Gesteinsserien in der Regel kein wesentlicher oder gar kein Aspekt der Standortauswahl sind.

Die materiellen Anforderungen an das Deckgebirge lassen sich aus den geforderten Deckgebirgsfunktionen, Schutz des Salzgesteinskörpers gegen Subrosion und deren Folgen sowie Verhinderung bzw. Behinderung des etwaigen Radionuklidtransportes, ableiten. Sie sind in Hinblick auf beide Funktionen ähnlich; denn sowohl das Ausmaß von Subrosion als auch des Radionuklidtransportes mit dem Grundwasser werden langfristig insbesondere durch das Vorhandensein von ausgedehnten Gesteinskörpern mit geringer Wasserdurchlässigkeit (und hohem Rückhaltevermögen gegenüber Radionukliden) sowie ihren Lagebezug untereinander sowie zu Gesteinskörpern mit ungünstigeren Eigenschaften bestimmt. Günstig ist danach ein Deckgebirge mit hohen Anteilen feinkörniger, insbesondere toniger Sedimente bzw. Sedimentgesteine (bzw. Gesteinskörpern mit aus anderen Gründen geringer Wasserdurchlässigkeit). Die entsprechenden Gesteinskörper sollten große Mächtigkeit und Ausdehnung haben und den Salzgesteinskörper (bzw. den Gipshut) möglichst direkt überlagern. In diese Richtung zielende Anforderungen sind bereits in den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts diskutiert und erhoben worden.

Bei der Formulierung von Kriterien und ihrer Anwendung bei der Identifizierung untersuchungswürdiger Salzstöcke für den Fall, dass sich Gorkleben als ungeeignet erweisen sollte, hat BGR (1995) ähnliche Anforderungen an das Deckgebirge zugrunde gelegt. Sie waren nicht (wie in 2.4) generisch aus den Eigenschaften und Funktionen von Salzgesteinskörper und Deckgebirge bzw. der Vorstellung eines 'idealtypisch guten' Deckgebirges abgeleitet worden, sondern aus den realen Gegebenheiten bei Salzstöcken im norddeutschen Tiefland.

Nach dem Vorhandensein ungünstiger oder dem Fehlen günstiger Standorteigenschaften hat BGR schrittweise zunächst "ungeeignete" bzw. nicht untersuchungswürdige Standorte mit eignungs-mindernden Merkmalen oder Untersuchungsdefiziten ausgeschlossen. Als eignungs-mindernd wurden geringes Volumen des Salzgesteinskörpers im für die Endlagerung vorgesehenen Tiefenbereich (Volumen-Kriterium), ungünstiger Aufbau des Deckgebirges (Barriere-Kriterium) und Konflikte bzw. Sicherheitseinbußen auf Grund anderweitiger Nutzung (Kriterium der Unverritztheit) angesehen. 14 untersuchungswürdige Salzstöcke (von noch 41) haben diese Arbeitsschritte überstanden.

Im Hinblick auf die Frage nach der Bedeutung des Deckgebirges innerhalb des Mehrbarrierensystems eines Endlagers sind die von BGR zur Beurteilung der Barrierefunktion des Deckgebirges formulierten Kriterien bedeutsam. Danach sind folgende Merkmale als günstig (+) bzw. ungünstig (-) dafür anzusehen (BGR 1995):

- + vollständige Überdeckung des Gipshutes mit tonigen Unterkreide-Sedimenten,
- + vollständige Überdeckung des Gipshutes durch Oberkreide,
- + vollständige oder weitestgehende Überdeckung des Gipshutes mit alttertiären Tonen,
- quartäre Rinnen, die sich tief in Dachsedimente einschneiden,
- Überdeckung mit sandigem Alttertiär ohne Rupelton,
- Überdeckung des Gipshutes nur mit oberoligozänen, neogenen oder quartären Sedimenten (Süßwasserführung, Kontakt mit genutzten Grundwasserstockwerken und damit zur Biosphäre)

Anschließend wurden Salzstöcke mit möglicherweise zu geringem Volumen reinen Steinsalzes bzw. Beteiligung unerwünschter Salzformationen (neben Zechstein) ausgeschlossen. Es blieben drei bzw. (mit gewissem Vorbehalt) vier untersuchungswürdige Standorte übrig. Bei keinem der 14 zunächst verbliebenen Salzstöcke fehlen alle genannten günstigen Merkmale, und keiner weist alle ungünstigen Merkmale auf. Alle weisen jedoch mindestens eines der günstigen Merkmale auf. Nur bei zwei Standorten sind quartäre Rinnen vorhanden, allerdings ohne dass die Überdeckung des Gipshutes mit tonigen Sedimenten zerstört wäre.

Im Hinblick auf die Frage nach dem bestmöglichen Endlager-Salzstock im Sinne des AKEND (2002) sind die Deckgebirgsverhältnisse beim Salzstock Gorleben bei Anwendung der von BGR (1995) entwickelten Kriterien wie folgt zu interpretieren:

- Vorbehaltlich der Bestätigung durch die Standortuntersuchung gibt es hinsichtlich der Ausbildung des Deckgebirges durchaus günstigere Salzstöcke als Gorleben. Oder anders ausgedrückt: Gemessen an den von BGR (1995) formulierten Anforderungen an das Deckgebirge schneidet der Salzstock Gorleben ungünstig ab.
- Da alle Salzstöcke im Laufe der jüngeren geologischen Vergangenheit - abgesehen von der standortspezifischen Salzaufstiegs- und Subrosionsentwicklung - annähernd übereinstimmenden, zumindest ähnlichen geologischen Prozessen ausgesetzt waren, ist die Existenz von Salzstöcken mit wenigstens teilweise "intaktem" Deckgebirge ein Hinweis darauf, dass künftig ablaufende ähnliche geologische Prozesse und Ereignisse die Barrierefunktion des günstigen Deckgebirges nicht zwangsläufig beeinträchtigen müssen. Auch aus diesem Grund ist es sinnvoll, sicherheitsbezogene Anforderungen an das Deckgebirge

zu stellen. Es ist keineswegs gerechtfertigt, die sicherheitsmäßige Bedeutung des Deckgebirges mit Verweis auf dessen Umgestaltung durch absehbare künftige geologische Prozesse und Ereignisse und den daraus resultierenden Verlust an Barrierewirkung in Kauf zu nehmen (s. dazu 3).

Gorleben war nicht in das BGR-Verfahren einbezogen. Unterstellt man ungeprüft, dass Gorleben das Volumen-Kriterium und das Kriterium der Unverritztheit des ersten Einengungsschritts erfüllt, und wendet die BGR-Kriterien zur Barrierenfunktion des Deckgebirges auf den Salzstock Gorleben an, so ergibt sich folgendes Bild:

Der Salzstock Gorleben weist mit der bekannten, nicht nur in die Deckgebirgsschichten und Gipshut, sondern sogar in den Salzgesteinskörper einschneidenden elstereiszeitlichen Gorlebener Rinne keines der genannten positiven Merkmale auf. Über weiten Teilen des Salzstocks fehlen zudem die geforderten Einheiten, ohne dass sie durchgängig durch entsprechende andere Einheiten ersetzt wären. Der Salzstock Gorleben hätte von der BGR also nicht als untersuchungswürdig eingestuft werden müssen, wenn er in das Auswahlverfahren einbezogen worden wäre.

### **Materielle Eigenschaften des Deckgebirges**

Bekanntlich ist die Eignung des Standortes Gorleben seit Veröffentlichung der ersten Erkundungsergebnisse umstritten. Ursache für diese Auseinandersetzungen ist der Zustand des Deckgebirges, der in erheblichem Maße durch die Existenz der elstereiszeitlichen 'Gorlebener Rinne' bestimmt wird. Ihre Füllung umfasst Lockersedimente sehr unterschiedlicher Zusammensetzung und entsprechend unterschiedlicher sicherheitsbezogener Eigenschaften, insbesondere Wasserdurchlässigkeit. Die Rinne reicht örtlich bis in den Salzstock hinein. Tonige Sedimente ('Lauenburger Ton') sind in ihr zwar weitflächig verbreitet, weisen aber Fehlstellen auf. Auch nach jüngsten Darstellungen der Grundwasserverhältnisse im Deckgebirge (BGR 2005) erlauben diese Fehlstellen den Zutritt von oberflächennahem Grundwasser an den Salzgesteinskörper und den Aufstieg von versalztem Grundwasser aus dem Salzspiegelbereich bis in Oberflächennähe. Dieser Transportweg wäre auch für den Transport von aus dem Salzgesteinskörper in das Deckgebirge gelangten Radionukliden offen. Hinsichtlich des erforderlichen Schutzes des Salzgesteinskörpers gegen Subrosion belegt der Nachweis aktiver Subrosion, dass das Gorlebener Deckgebirge die Auflösung von Salz und möglicherweise auch deren Sicherheitseinschränkende Folgen nicht verhindert.

Der Zustand des Deckgebirges hat die Aufnahme der untertägigen Erkundung des Salzstocks Gorleben bekanntlich nicht verhindert. Stattdessen gab es Bestrebungen der verantwortlichen

Institutionen, die sicherheitsmäßige Bedeutung des Deckgebirges als wichtige geologische Barrieregruppe, auch in Relation zum Salzgesteinskörper, zu mindern. So hat RÖTHEMEYER (1991) behauptet, dass die heutige Beschaffenheit des Deckgebirges wegen der damit verbundenen Verdünnung von Schadstoffen in Grundwasser zu einem besseren Schutz als das Vorhandensein der geforderten Tonüberdeckung führe. Abgesehen von der grundsätzlichen, auch rechtlichen Fragwürdigkeit des damit beschworenen Verdünnungsansatzes hat er allerdings nicht erläutert, wie der Nachweis geführt werden könnte, dass diese angeblich günstigen Voraussetzungen für den erforderlichen Zeitraum Bestand haben werden. Tatsächlich dürfte ein solcher Nachweis nicht gelingen, weil wesentliche Voraussetzungen für Verdünnung klimatischer Natur sind bzw. klimatisch gesteuert werden. Die Probleme mit entsprechenden Prognosen sind bekanntlich erheblich größer als bei Aussagen zu den Eigenschaften geologischer Einheiten.

## 4.2 Befunde zum Salzgesteinskörper

Neben dem Versuch, die Sicherheitsbedeutung des Deckgebirges durch Neuinterpretation ungünstiger Untersuchungsbefunde zu relativieren (s. 4.1), werden mangels grundsätzlich neuer Erkenntnisse zum Deckgebirge gegenwärtig - beabsichtigt oder unbeabsichtigt - auch Befunde zum Salzgesteinskörper benutzt, um die Bedeutung des Deckgebirges für die Langzeitsicherheit, insbesondere für den Schutz der Hauptbarriere Salzgesteinskörper / einschlusswirksamer Gebirgsbereich, zu mindern. Dafür folgende Beispiele:

Im Hinblick auf den Schutz des Salzgesteinskörpers und den möglichen Austrag von Radionukliden ins Deckgebirge ist das Phänomen 'selektiv vorseilender' Subrosion (gegenüber der eher flächenhaften Subrosion am Salzspiegel) leichtlöslicher Kalisalze bedeutsam; denn dadurch könnte der Abstand zwischen Endlager und Wasser führenden Gesteinskörpern (innerhalb des Salzgesteinskörpers) drastisch verringert werden. Im Bereich der Kalisalze der Staßfurt-Folge ist durch Bohrungen örtlich eine Zone tief (maximal belegt: 130 Meter) in den Salzgesteinskörper hineinreichende lokale Auflösung nachgewiesen worden. In BGR (2005) wird dazu ausgeführt, dass dadurch die Gefährdung eines potenziellen Endlagers nicht möglich sei, da diese Art der Subrosion "nur in überkippter Lagerung der Schichten im oberen Flankenbereich des Salzstocks erfolgen kann", während "bei normaler Lagerung (...) das Kaliflöz durch Salztone abgedeckt und gegen Ablaugung geschützt" sei und "die entsprechenden Bereiche (...) wegen des strukturellen Baus der Schichten weder durch Erkundungsstrecken noch durch das ggf. später aufzufahrende Endlager unterfahren" (würden). An dieser Einschätzung sind gewisse Zweifel angebracht: Es ist keineswegs einsichtig, warum bei steil stehenden Schichten

der Schutz der lösungsanfälligen Kalisalzzone grundsätzlich durch stratigraphisch jüngeren grauen Salzton gewährleistet sein soll. Außerdem ist offen, ob das Phänomen der voraussehlenden selektiven Subrosion in allen tatsächlich relevanten Zonen überhaupt erkannt, geschweige denn untersucht worden ist.

Das Gefährdungspotenzial eines unzureichenden Deckgebirges bzw. von Subrosion wird auch dadurch relativiert, dass für den als potenzieller Lösungsbringer angesehenen Hauptanhydrit (s. 2.2) "auf der Nord- und Südflanke des Salzstocks (...) durch Bohrungen, Druckaufbautests und EMR-Messungen<sup>4</sup> der Nachweis erbracht werden (konnte), dass eine Zerblockung und damit eine Isolierung der einzelnen Hauptanhydritschollen vorliegt. Für die nördliche und südliche Grenze des Hauptsalzes im Erkundungsbereich 1 konnte damit das Szenario „durchgehender Hauptanhydrit vom Salzspiegel bis zum Erkundungsbereich und somit potentieller Lösungsbringer“ ausgeschlossen werden" (BGR 2005). Hier drängt sich die Frage auf, ob diese Befunde ohne Weiteres auch auf die für die Errichtung eines Endlagers benötigten weiteren und im Vergleich zum Erkundungsbereich 1 erheblich größeren Salzstockbereiche übertragen werden dürfen. Das ist wegen des komplexen Innenbaus von Salzstöcken zweifellos nicht der Fall. Beim gegenwärtigen Kenntnisstand sind eignungsbezogene Aussagen zu noch nicht erkundeten Teilen des Salzstocks Gorleben vielmehr unzulässig. Das gilt auch für Befundinterpretationen zum Salzgesteinskörper, aus denen auf eine verringerte sicherheitsmäßige Bedeutung des Deckgebirges bzw. Heilung dessen ungünstiger Eigenschaften geschlossen werden könnte.

Vielmehr hat die erste Bewertung des Gorlebener Deckgebirges durch den Vorläufer des Bundesamtes für Strahlenschutz, die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), nach wie vor Bestand. Sie stellte nämlich fest (PTB 1983), "dass die über den zentralen Bereichen des Salzstocks Gorleben vorkommenden tonigen Sedimente keine solche Mächtigkeit und durchgehende Verbreitung haben, dass sie in der Lage wären potentiell kontaminierte Grundwässer auf Dauer von der Biosphäre zurückzuhalten." Es besteht auch heute kein Anlass, diese auf den Beitrag des Deckgebirges zur Radionuklid-Zurückhaltung zielende Aussage zu relativieren. Das gilt genau so im Hinblick auf die unzureichende Schutzfunktion des Deckgebirges gegenüber Subrosion und deren Folgen.

### **4.3 Notwendigkeit der Alternativenprüfung**

---

<sup>4</sup>EMR-Messung: Elektromagnetisches Reflexionsverfahren. Misst Störungen innerhalb massiver Körper durch reflexion elektromagnetischer Strahlung.

Nach den Ausführungen in 4.1 und 4.2 gibt es vom Salzstock Gorleben keine das Deckgebirge selbst oder den Salzgesteinskörper betreffenden Befunde, auf Grund derer die in 2.4 herausgestellte sicherheitsmäßige Bedeutung des Deckgebirges abgewertet werden dürfte. Das Deckgebirge des Salzstock Gorlebens kann seine wesentlichen Funktionen, Schutz des Salzgesteinskörpers und gegebenenfalls Beitrag zur Radionuklid-Zurückhaltung, nicht hinreichend erfüllen. Diese Defizite können durch den Salzgesteinskörper nicht ausgeglichen werden. Die dazu bislang vorliegenden Untersuchungsbefunde zum Erkundungsbereich erlauben entsprechende Aussagen ohnehin nicht.

Die Notwendigkeit zur Prüfung von Alternativen in einem systematischen Auswahlverfahren nach dem bestmöglichen Endlagerstandort entsprechend dem Vorschlag des AKEND (2002) besteht also nach wie vor. Dagegen sprechen auch nicht die in Kapitel 3 dargestellten möglichen klimainduzierten geologischen Veränderungen des Deckgebirges und ihre möglichen sicherheitsbezogenen Konsequenzen. Hinsichtlich Existenz von Salzstock-Alternativen zu Gorleben gilt nach den Untersuchungen von BGR (1995) vielmehr:

- Vorbehaltlich der Bestätigung durch die Standortuntersuchung gibt es offenkundig Salzstöcke, bei denen auf Grund ihres Deckgebirgsaufbaus vorausgesetzt werden darf, dass sie die Anforderungen hinsichtlich Verhinderung / Behinderung von Subrosion und ihrer ungünstigen Auswirkungen auf die Endlagersicherheit sowie hinsichtlich der Zurückhaltung von etwa aus dem Salzgesteinskörper freigesetzten Radionukliden zumindest weitgehend erfüllen (s. 2.4). Es ist also durchaus sinnvoll, nach dem hinsichtlich der Deckgebirgsfunktionen 'bestmöglichen' Salzstock zu suchen.
- Da alle betrachteten Salzstöcke im Laufe der jüngeren geologischen Vergangenheit - abgesehen von der standortspezifischen Salzaufstiegs- und Subrosionsentwicklung - annähernd übereinstimmenden, zumindest ähnlichen geologischen Prozessen ausgesetzt waren, ist die Existenz von Salzstöcken mit wenigstens teilweise 'intaktem' Deckgebirge (s. 2.4) ein Hinweis darauf, dass künftig ablaufende ähnliche geologische Prozesse und Ereignisse die Barrierefunktion eines günstigen Deckgebirges nicht zwangsläufig beeinträchtigen müssen. Auch aus diesem Grund ist es sinnvoll, sicherheitsbezogene Anforderungen an das Deckgebirge zu stellen (s. 4.1) und Salzstöcke aufzusuchen, die diese Anforderungen auch erfüllen.

## **5. Perspektive Gorleben:**

Vor dem Hintergrund der Ausführungen zum Mehrbarrierensystem, zum Verhältnis der verschiedenen Barrierentypen zueinander, insbesondere aber zur Notwendigkeit der Ausbildung eines geologischen Mehrbarrierensystems bei Endlager-Salzstöcken, lassen sich verschiedene Schlussfolgerungen ziehen:

## 5.1 Mehrbarrierensystem – Salzstöcke – Gorleben

- **Es gilt unbestritten: Mehrbarrierensystem soll gelten**

Es besteht Einigkeit darüber, dass bei einem Endlager in tiefen geologischen Formationen ein Mehrbarrierensystem ausgebildet sein muss. Dabei kommt jeder einzelnen Barriere ihre spezielle Aufgabe zu, und insgesamt liefern alle Barrieren zusammen die erforderliche Langzeitsicherheit. Die Ausgestaltung und Bedeutung der verschiedenen Barrieren hängt wesentlich vom Wirtsgestein (oder dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich) ab. Grundsätzlich gilt dabei in Deutschland: Den geologischen Barrieren kommt die Hauptbedeutung für die Langzeitsicherheit zu.

- **Ein wirksames Deckgebirge ist Voraussetzung für eine gutes Barrierensystem bei Salzstöcken**

Wegen der spezifischen Eigenschaften von Salzgesteinskörpern (Salzstöcken), insbesondere der starken Wasserlöslichkeit von Steinsalz, ist es nicht ausreichend, den Salzgesteinskörper (oder gar nur den einschlusswirksamen Gebirgsbereich) als geologische Barriere zu berücksichtigen (s. 2.4). Vielmehr muss zusätzlich das Deckgebirge günstige, den Salzgesteinskörper schützende Eigenschaften aufweisen. Diese Eigenschaften sind bekannt und können gezielt aufgesucht werden. Im Übrigen tragen sie gleichzeitig zur Radionuklid-Zurückhaltung für den Fall bei, dass der Salzgesteinskörper die erforderliche Isolationsleistung nicht erbringen kann. Ein Endlager in einem Salzstock ohne gutes Deckgebirge trägt ein erhöhtes Risiko in sich, Radionuklide freizusetzen. Dies gilt besonders für den kritischen Zeitraum bis etwa mehrere Tausend Jahre nach Einlagerungsende (s. 3).

- **Stellt das Deckgebirge des Salzstocks von Gorleben eine gute Barriere dar?**

Durch die Erkundungsergebnisse ist das Deckgebirge von Gorleben gut bekannt. Andererseits sind durch Arbeiten der BGR die Anforderungen an eine gute Barriere Deckgebirge gleichfalls eindeutig formuliert (s. 4.1). Wenn man die Anforderungen an ein günstiges

Deckgebirge und die Ergebnisse der Erkundung Gorleben zusammenführt, dann ergibt sich, dass das Deckgebirge Gorleben keine ausreichende Barriere darstellt. Oder anders ausgedrückt: Gemessen an den von der BGR formulierten Anforderungen an die Barriere Deckgebirge schneidet der Standort Gorleben ungünstig ab. Dies gilt sowohl absolut wegen der konkreten Eigenschaften der Barriere Deckgebirge in Gorleben als auch relativ, weil es in Deutschland Salzstöcke mit besserem Deckgebirge gibt.

- **Das Mehrbarrierensystem und der Standort Gorleben**

Am Standort Gorleben ist zweifellos ein Mehrbarrierensystem gegeben, wenn die bisherigen Planungen umgesetzt werden. Die Frage ist allerdings, welche Güte dieses Mehrbarrierensystem für die Langzeitsicherheit aufweist. Betrachtet man die technischen Barrieren, so spielen diese für die Langzeitsicherheit eine nachgeordnete Bedeutung. Die geotechnischen Barrieren dienen überwiegend der Behebung von Schwachstellen, die durch das Auffahren von Hohlräumen in Barrieregesteinen geschaffen wurden. Sie dienen nicht dazu, zusätzliche Barrieren in das Endlagersystem einzuführen. Es verbleiben die für die Langzeitsicherheit wesentlichen geologischen Barrieren, nämlich der Salzstock selber und das Deckgebirge. Von diesen beiden Barrieren ist die Barrierenfunktion des Salzstocks an die des Deckgebirges gekoppelt (Schutz des Salzkörpers durch das Deckgebirge). Wie oben bereits dargestellt, ist die Barriere Deckgebirge beim Standort Gorleben allerdings unzureichend. Über die Barriere Salzstock liegen noch keine abschließenden Bewertungen vor (es müssen noch etliche Erkundungsbereiche untersucht werden). Der Hinweis, selbst ein gutes Deckgebirge würde im Verlauf des Isolationszeitraums ausgeräumt bzw. umgestaltet werden, wird sicherlich durch die geologische Vergangenheit nahe gelegt. Es wird aber auch deutlich, dass gerade während der ersten besonders kritischen Jahrtausende nach Ende der Einlagerung ein gutes Deckgebirge zwingend erforderlich ist. Das ist in Gorleben nicht der Fall.

## 5.2 Gründe für die Weitererkundung von Gorleben?

Seit einiger Zeit mehren sich die Stimmen, die eine unverzügliche Weitererkundung des Salzstocks Gorleben fordern (z.B. NMU 2005, THOMASKE 2005, KÜHN & BRAMMERT 2005). Als Gründe dazu werden genannt:

- **Eignungshöflichkeit gegeben?**

Mit dem Begriff „Eignungshöflichkeit“ wird von interessierter Seite immer wieder versucht, die Weitererkundung von Gorleben zu begründen. Dabei gibt es bis heute keine einheitliche

und generell akzeptierte Definition des Begriffes 'Eignungshöflichkeit'. Vielmehr lässt sich aus den unterschiedlichsten Äußerungen zu dem Begriff feststellen, dass erhebliche Unklarheit über den Begriff besteht und auch unklar ist, woran denn 'Eignungshöflichkeit' überhaupt gemessen werden kann (z.B. BFS 1984, RÖTHEMEYER 1984, BGR 1995a). Der Begriff ist definitorisch und funktional unbestimmt und kann deshalb nicht als Begründung für die weitere Erkundung benutzt werden. Er hat nur eine einzige Funktion, nämlich für die weiteren Untersuchungen Pseudo-Begründungen zu liefern. So lange der Inhalt des Begriffes ungeklärt ist, kann jeder darunter verstehen, was er will.

- **Unvoreingenommene Untersuchungen ohne Vorfestlegung?**

Als weiterer Grund für die Erkundung gilt die Notwendigkeit unvoreingenommener Untersuchungen ohne Vorfestlegung (NMU 2005). Erst wenn die „ergebnisoffenen“ Untersuchungen zeigen, dass Gorleben nicht geeignet ist, wird man sich dem dann auftretenden Problem widmen. Die Frage der Unvoreingenommenheit und der fehlenden Vorfestlegung folgt genau dem bisherigen Gorleben-Verfahren. Bereits die Festlegung auf Gorleben war alles andere als unvoreingenommen, und Gleiches gilt auch für die gesamte Erkundung, speziell den Beginn des Schachtabteufens und der untertägigen Erkundung. Es kann also keine Rede sein von Unvoreingenommenheit. Gleiches gilt für die fehlende Vorfestlegung: Die Festlegung auf den Standort Gorleben wird weiter zementiert (allein durch die anfallenden Kosten) und der notwendige Vergleich mit anderen Standorten findet nicht statt. Die 'fehlende Vorfestlegung' besteht genau darin, ohne 'Wenn und Aber' an Gorleben festzuhalten.

- **Ethische Probleme – das Zeitargument?**

Nach dem Verursacherprinzip soll die Generation, die den Vorteil einer Technik hat, auch für die Beseitigung ihrer Folgen sorgen. Deshalb wird die möglichst schnelle Endlagerung verlangt, und dies bedeutet, dass Gorleben schnellstmöglich weiter erkundet werden soll (z.B. THOMASKE 2004). Diese Argumentation ist mehr als fraglich. Nach dem Verursacherprinzip müsste eigentlich schon seit längerer Zeit ein Endlager zur Verfügung stehen, denn die Atomenergie wird schon seit 40 Jahren großindustriell betrieben. Weiterhin werden nach dem Abschalten des letzten Reaktors die abgebrannten Brennelemente noch ca. 40 Jahre zwischengelagert, bevor sie in ein Endlager kommen. Des weiteren könnte nach Meinung des NMU (2006) selbst bei direkter Fortsetzung der Erkundungsarbeiten das Endlager Gorleben frühestens 2025 bis 2030 in Betrieb gehen. Dies zeigt, dass das Zeitargument vorgeschoben ist: Es wird in jedem Fall noch lange dauern, bis ein Endlager für hochaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente zur Verfügung stehen. Im übrigen müsste bei den Problemen, die mit der Endlagerung verbunden sind, Sorgfalt vor unbedingter Schnelligkeit gehen (man denke z.B. an die Probleme mit Asse und Morsleben, vor denen schon frühzeitig gewarnt wurde).

- **Auswahlverfahren erst bei Nichteignung von Gorleben**

Laut NMU (2005) werden die für die sichere Endlagerung entscheidenden Fragen erst im atomrechtlichen Planfeststellungsverfahren zu klären sein. Nur wenn Gorleben sich dann als ungeeignet erweisen sollte, ist ein neues Standortauswahlverfahren durchsetzbar und refinanzierbar. Diese Position beinhaltet gleich mehrere problematische Punkte. Die Klärung der entscheidenden Fragen erst im Planfeststellungsverfahren zielt lediglich auf den

Aspekt der Genehmigungsfähigkeit hin. Es geht dann nicht mehr um die grundsätzliche und vorrangig zu klärende Frage, ob ein anderer Standort relativ besser ist, sondern nur darum, ob Gorleben gerade mal ausreichend (genehmigungsfähig) ist.

Damit wird gleichzeitig das Auswahlverfahren angesprochen: Man setzt mit Gorleben alles auf eine Karte, und nur wenn das Verfahren offensichtlich scheitert, will man eine neues Auswahlverfahren initiieren. Dieser Gesichtspunkt lässt klar erkennen, dass man an einem neuen Auswahlverfahren kein Interesse hat, sondern vorrangig an Gorleben. Dies bedeutet auch, dass man auf die Anforderungen, wie sie der AkEnd formuliert hat (AKEND 2002) keinen besonderen Wert legt. Der Hinweis von NMU (2005) nach Refinanzierung und Durchsetzbarkeit eines Auswahlverfahrens nur bei gezwungener Aufgabe von Gorleben ist im übrigen ein politischer Offenbarungseid, da er das Primat der Politik aufgibt.

### **5.3 Die Konsequenz**

Auch in Zukunft muss auf ein wirksames Mehrbarrierensystem bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle Wert gelegt werden. Dies gilt gerade auch für Endlager in Salzstöcken. Dort hängt die Langzeitsicherheit sowohl von einer guten Salzbarriere als auch von einem günstigen Deckgebirge ab.

Beim Standort Gorleben ist das Deckgebirge nachweislich nicht so ausgebildet, dass es aus dem Salzstock austretende Radionuklide verhindern oder wesentlich behindern könnte, noch besitzt es Eigenschaften, einen subrosiven Angriff auf den Salzstock bzw. die Salzbarriere wirksam zu verhindern. Deshalb sollte der Salzstock als Endlagerstandort aufgegeben werden.

Erforderlich ist vielmehr ein Auswahlverfahren in Deutschland, bei dem nach dem relativ besten Standort gesucht wird. Abgesehen von den methodologischen Anforderungen (v.a. flächendeckende Suche, vergleichende Bewertung mit Identifizierung des relativ besten Standorts), die damit erstmals in Deutschland erfüllt würden, könnte auf diesem Wege tatsächlich ein Neuanfang auf dem Weg zu einem sicheren Endlager gemacht werden.

## 6. Quellen

AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd: Abschlussbericht

BFS – Bundesamt für Strahlenschutz (1994): Pressemitteilung Nr. 20/94 des BfS „Schlußfolgerungen unzulässig“ vom 29.06.1994, Salzgitter.

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2005): Erkundungsstandort Gorleben.- In BFS - Bundesamt für Strahlenschutz (2005): Endlagerung radioaktiver Abfälle als nationale Aufgabe.- S. 43-55.

BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1999): Szenarienanalyse, Szenarienbewertung und geologische Langzeitprognose für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM). Langzeitprognose der Auswirkungen klimagesteuerter geologischer Prozesse auf die Barrieren des Endlagers Morsleben. Abschlußbericht.- Archiv-Nr. 117 869, Januar 1999.

BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1995a): Projekt Gorleben – Stellungnahmen zu Gutachten, die im Auftrag des NMU zur Eignungshöflichkeit des Standortes Gorleben angefertigt wurden – Abschlußbericht zu Arbeitspaket 9G/31461000.- BGR-Archiv-Nr. 114 026, Koordination: JARITZ, W., Hannover.

BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Salzformationen.- Bericht, Archiv-Nr. Hannover 111 089, August 1995.

BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1990): Übertägige geowissenschaftliche Erkundung des Standortes Gorleben. Zusammenfassender Bericht. Stand 01.01.1990.- Archiv-Nr. 108 880.

BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2003): Untersuchungen zur Sicherheit von Endlagern für radioaktive Stoffe nach ihrem Verschluss.- Bericht BMU-2003-618, erstellt von der Gesellschaft für Anlagen- u. Reaktorsicherheit (GRS) mbH.

DELISLE, G. (1980): Berechnungen zur raumzeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes um ein Endlager für mittel- und hochaktive Abfälle in einer Salzformation.- Z. dt. geol. Ges., 131, S. 461 – 482, Hannover.

GRUNDFELDT, B., JONES, C., WIBORGH, M., ANDERSSON, J., KREUSCH, J. & APPEL, D. (2005): Sicherheitstechnische Einzelfragen - Bedeutung des Mehrbarrierenkonzepts für ein Endlager für radioaktive Abfälle beim Nachweis der Einhaltung von Schutzzielen.- Im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz.

KÜHN, K. & BRAMMERT, K.-J. (2005): Sicherheitstechnische Einzelfragen zur Endlagerung. Eine kritische Auseinandersetzung mit dem Vorgehen des BfS.- atw, 50. Jg, Heft 12, S. 741 – 743.

NMU – Niedersächsisches Umweltministerium (2006): Endlagerprojekt / Erkundungsbergwerk Gorleben.- <http://www.umwelt.niedersachsen.de> [Zugriff: 07.02.2006]

NMU – Niedersächsisches Umweltministerium (2005): Entsorgung und Endlagerung radioaktiver Abfälle.- <http://www.umwelt.niedersachsen.de> [Zugriff: 12.09.2005]

PTB - Physikalisch-Technische Bundesanstalt (1983): Zusammenfassender Zwischenbericht über bisherige Ergebnisse der Standortuntersuchung in Gorleben.

RÖTHEMEYER, H. (Hrsg. 1991): Endlagerung radioaktiver Abfälle. Wegweiser für eine verantwortungsbewusste Entsorgung in der Industriegesellschaft.- VCH.

RÖTHEMEYER, H: (1984): Antworten auf den Fragenkatalog v. 12.04.1984 – hier Antwort auf Fragen zu Themenkreis V (Gesamtbewertung Gorleben).- In: DEUTSCHER BUNDESTAG (1984): Stellungnahme der Sachverständigen zur öffentlichen Anhörung des Innenausschusses am 20. Juni 1984 zu dem Bericht der Bundesregierung zur Entsorgung der Kernkraftwerke und anderer kerntechnischer Einrichtungen.- Ausschußdrucksache 10/48, S. 35-102, Bonn.

RSK – Reaktor-Sicherheitskommission (2005): Gase im Endlager. RSK-Stellungnahme vom 27.01.2005 (379. Sitzung).- <http://www.rskonline.de/stellungnahmen/SN-gase-endlager.pdf>

THOMASKE, B. (2005): Erkenntnisse zur Endlagerung aus der Abarbeitung der Zweifelsfragen. Was folgt daraus für den Standort Gorleben?- atw, 50. Jg., Heft 12, S. 735 – 740.

THOMASKE, B. (2004): Wege zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschlands. Wird die Verantwortung auf zukünftige Generationen verschoben?.- VGB PowerTech, H.6, 2004, S. 87 – 97.