

But what happened so far! One should not imagine Central Europe at the beginning of the Cretaceous age as it appears today. The North Atlantic only started to open. Europe, Greenland and North America were still connected. Northern Germany was covered by a cavernous, brackish shallow sea, which soon deepened and inundated the area of Gorleben for around 40 million years. Also in the south of Germany existed a sea, the Alps had not developed yet into mountains. One must assume that the salt dome approached closely the surface and was slightly dissolved from the water. Back then it received its plaster from the indissoluble residues.

During the mid-Cretaceous age heavy mountain-building started, which unfolded first parts of the Alps. Even in North Germany tectonic movements were noticeable. The Harz was excavated by approximately 3,000 m, the Rhenish Slate Mountains rose and south of Hannover the mountainous country was unfolded. By the end of the Cretaceous age also the flat country developed, the sea withdrew itself back to the north and the area around *Gorleben* became dry.

This happened only for a geologically short period. During the following 60 million years lasting tertiary age the area of Gorleben sank at least two times for many millions years in the sea and became afterwards mainland again. The salt dome was again covered by around 200 m of heavy sediments.

The tertiary era was not a calm period within geology. The low mountain range and the Alps further ascended and poured their sediment flux into the foreland. In the Rhine Valley, the Leintal and in the Rhenish bay great ditches fell in and filled themselves with sediments up to 4,000 m of thickness. Due to the tropical and warm climate extensive brown coal deposits emerged everywhere in Germany during the mid-tertiary era.

The subsequent, approximately ½ million years lasting Quaternary age was only an epilogue. At least the area of Gorleben was covered three times with ice from the ice age; glaciers withdrew and left boulders, gravel and sand of 80m heights above Gorleben. Hence the upper edge of the salt dome lies covered with sediments of the Tertiary and quaternary age at a depth of approximately 300m.

The salt dome survived all these geological events; today we would call them catastrophes, which partially must have been connected to strong earthquake activity, without particularly changing its shape. Apart from the dissolution of the upper part during the Cretaceous period and a slight extension during the Tertiary era, it remains today almost in the same shape as it ascended 100 million years ago. In order to correctly assess the time, it is worth to remember that historically human is only known for some 10,000 years and the human species is perhaps 1 million years old. Does it not sound presumptuous, if humans question the stability of this salt mountain, which is 100 times older than its own species and survived during this long time sea floods, earthquakes, mountain building, volcanism and ice ages?

In addition it should be kept in mind that heat generated by highly active wastes already subsides considerably after several decades and that the toxicity of wastes after around 1,000 years will have declined approximately to the toxicity of uranium ore – uranium ore, which is being searched, mined and processed in numerous parts of the world. The times for a necessary inclusion are relatively short when comparing them to the described geological times.

To sum it up we can say from a geological point of view, that a salt dome can seal radioactive wastes, if they are appropriately stored, for the necessary period of several thousand years, or even some hundred thousand years. We hope to convince concerned citizens over time that he should not think of deep storage with a feeling of concern and discomfort but rather with relief because earth history provided us with a great gift of salt domes, which allow us to exploit nuclear energy and to still, maintain our environment free from radioactive wastes.

Revised version of the survey lecture given at the reactor conference of the German Atomic Forum and the German Nuclear Society from 4th April to 7th April 1978 in Hannover.

Author Prof. Dr. H. Venzlaff
Executive Director of the Federal Institute for Geo-Sciences and Raw Materials
Stilleweg 2
3000 Hannover 51, Germany

Tieflagerung radioaktiver Abfälle aus geologischer Sicht

Helmut Venzlaff

Für die Tieflagerung radioaktiver Abfälle haben die Geologen dem Salz den Vorzug vor anderen Gesteinskomplexen wie Ton oder Granit gegeben. Mächtige Ablagerungen von reinem Steinsalz sind besonders gut geeignet, radioaktive Abfälle sicher von der Biosphäre abzuschließen, weil sie aufgrund ihrer Plastizität frei von offenen Klüften sind, in denen Flüssigkeiten oder Gase zirkulieren können und weil ihre Wärmeleitfähigkeit höher ist als die anderer Gesteine. Die geologische Stabilität der Salzstöcke kann man aus ihrer erdgeschichtlichen Entwicklung sehen. So ist der Salzstock *Gorleben* vor etwa 100 Mio. Jahren gebildet worden. Er ist älter als der Atlantik, die Alpen oder der Aufstieg der Mittelgebirge. Er hat dieser langen Zeit Meeresüberflutungen, Gebirgsbildungen, Erdbeben, Vulkanismus und Eiszeiten überstanden, ohne seine Form wesentlich zu ändern. Es sind keine geologischen Gründe zu sehen, warum er nicht weitere Millionen Jahre stabil sein sollte.

Einleitung

In der Diskussion über die Kernenergie hat sich das Interesse des Bürgers immer stärker auf den Fragenkomplex

„Entsorgung“ konzentriert. Und innerhalb der Entsorgung ist es die Endlagerung radioaktiver Abfälle, die das größte Unbehagen hervorruft. Verursacht wird dieses Unbehagen

offensichtlich durch den Gedanken an die langen Zerfallszeiten, die bei einzelnen Elementen viele tausend Jahre betragen. Zahlreiche Bürger nehmen den Reaktorbetrieb und die Wiederaufarbeitung als schwierige, aber technisch beherrschbare Schritte hin. Doch auch sie beschleicht ein rational nicht faßbares Unbehagen bei dem Gedanken, daß eine Tief Lagerung radioaktiver Abfälle für Zeiten geplant wird, die weit in die ungewisse Zukunft reichen und verglichen mit denen das eigene Leben kurz ist.

Das ist verständlich, denn der Mensch kann seine Zeitvorstellungen nur aus seinem persönlichen Erleben nehmen. Wirklich begreifbare Zeiträume umfassen Monate, Jahre, das eigene Leben. Begrifflich noch überschaubar ist von Großeltern bis zu Enkelkindern ein Zeitraum von etwa 100 Jahren. Längere Zeiträume, z.B. 1.000 Jahre, kennt man zwar aus dem Geschichtsunterricht, aber sie bleiben theoretisch, bleiben Ziffern, die keine Beziehung zum eigenen Erleben haben. Noch längere Zeiträume, etwa 100.000 oder gar 1 Million Jahre entziehen sich schlicht jeder Vorstellungskraft.

Und weil das so ist, ist ein Geologe, der behauptet, an dieser Stelle können die radioaktiven Abfälle ruhig für 100.000 Jahre liegen, a priori unglaubwürdig, weil seine Zeitvorstellungen, gemessen am eigenen Erleben, nicht akzeptiert werden können. Und doch ist gerade dies, nämlich die sichere Tief Lagerung von Abfällen für 100.000 oder mehr Jahre die Aufgabe, die dem Geologen im Entsorgungsprojekt gestellt wird und die er, meiner Meinung nach, auch lösen kann, denn geologische Ereignisse haben ein anderes Schrittmaß als die vom Menschen erfahrenen Zeiträume. Auf diesen Punkt wird weiter unten noch näher eingegangen werden.

Grundbegriffe und Forderungen

Zuerst sollen einige Grundbegriffe geklärt werden. Welche Anforderungen werden für eine langfristige Tief Lagerung radioaktiver Abfälle an einen geologischen Körper gestellt? Vor allem soll er nicht vom Grundwasser durchströmt werden, damit die Abfälle nicht durch Lösung in den Biozyklus gelangen. Die Porosität soll also möglichst gering sein, Klüfte sollen ihn nicht durchziehen. Das Gesteinsmaterial soll sich gegen ionisierende Strahlen und höhere Temperaturen physikalisch und chemisch möglichst neutral verhalten. Die Wärmeleitfähigkeit soll hoch sein.

Der geologische Körper soll in der Vertikalen wie in der Horizontalen keine Unterschiede in der Gesteinsausbildung aufweisen, um Isotropie im Festigkeitsverhalten zu gewährleisten. Für ein ausreichendes Deponievolumen soll die vertikale Erstreckung mehr als hundert, die laterale Erstreckung mehr als tausend Meter betragen. Die Tiefenlage des für die Deponie vorgesehenen Gesteinskörpers soll eine völlige Abschirmung gegen die Biosphäre gewährleisten, bergmännische Aufschlüsse aber technisch noch zulassen.

Grundsätzlich geeignet erscheinen nach diesem Anforderungskatalog vor allem drei geologische Komplexe: mächtige Tonschichten, granitische Intrusivkörper und mächtige Salzablagerungen. Jede der drei Einheiten hat ihre Vor- und Nachteile, die sorgfältig gegeneinander abgewogen werden müssen.

Der Nachteil des Tons ist vor allem sein Verhalten bei Erwärmung, wie sie der hochaktive Abfall erzeugt. Erwärmung führt zur Austrocknung und Schrumpfung von Tonen und damit zu Rißbildungen. Sie vergrößert daher die Gefahr eines Grundwasserkontaktes mit den Abfällen.

Granitische Intrusivkörper sind oberflächennah von einem dichten Klufnetz durchzogen. In größerer Tiefe sind die Klüfte in homogenen Bereichen nicht mehr vorhanden. Aber auch hier kann die Erwärmung Probleme bringen. Es besteht die Gefahr, daß sich die Klüfte durch Thermospannungen in die Tiefe fortsetzen und damit die Möglichkeit schaffen, daß Grundwasser mit den Abfällen in Kontakt kommt. Ton und Granit haben überdies eine geringere Wärmeleitfähigkeit als Salz. Eine Deponie in diesen Gesteinen würde daher ein größeres Volumen benötigen.

Das Salz schließlich ist von allen Gesteinen am leichtesten in Wasser löslich. Außerdem sind Salzablagerungen, wie man sie in Deutschland findet, nicht homogen, sondern enthalten Zwischenlagen von Anhydrit, Ton und Kalisalz, die andere physikalische und mechanische Eigenschaften haben als Steinsalz und daher besonders beachtet werden müssen.

Die Geologen haben dennoch dem Salz den Vorzug vor Ton und Granit gegeben, und zwar wegen der besonderen Art der Akkumulation des Salzes in Salzstöcken. Um das zu erklären, muß ich etwas weiter ausholen.

Erdgeschichtliches

Vor rund 240 Mio. Jahren, im Zeitabschnitt, den wir Geologen Zechstein nennen, wurde der ganze Raum von Norddeutschland, Dänemark und der Nordsee von einem flachen Meer eingenommen. In diesem Nebenmeer kam es bei sinkendem Boden durch wiederholte Überflutung und Austrocknung zur Ablagerung einer Salzformation von etwa 1.000 m Mächtigkeit. Neben Steinsalz wurden in vier aufeinander folgenden Zyklen auch Lagen von Anhydrit, Ton und Kalisalz gebildet.

In den folgenden Perioden der Erdgeschichte nahm die Senkungstendenz des Untergrundes zu, die Salzausscheidung hörte auf und die Salzformation wurde von anderen Ablagerungen überdeckt, von Sanden, Tonen und Kalken, die insgesamt eine Mächtigkeit zwischen 2.000 und 4.000 m erreichten. Nun ist Salz spezifisch etwas leichter als die darüber abgelagerten Sedimente, außerdem von hoher Plastizität, die durch die Versenkung in Bereiche größerer Erdwärme noch verstärkt wurde. Weil die Überlagerung der Salzformation unregelmäßig ausgebildet war, entstanden Druckgradienten, die das Salz veranlaßten, nicht als flache Schicht liegenzubleiben, sondern zu sogenannten Salzkissen zusammenzuzufießen. Die geologischen Vorgänge an der Erdoberfläche, wie Abtragung und Sedimentation, reagierten sofort auf die Fließvorgänge. Über den Salzabwanderungszonen wurde verstärkt sedimentiert, damit der Druckgradient noch vergrößert und so die Fließbewegung des Salzes beschleunigt. Schließlich durchschlug das Salz die überlagernden Schichten und aus dem Salzkissen bildete sich ein Salzstock.

Wenn hier von „Fließen“ oder „beschleunigtem Fließen“ gesprochen wird, so muß betont werden, daß es sich um außerordentlich langsame Kriechbewegungen handelt, die nur im Zusammenhang mit geologischen Zeitbegriffen gesehen werden dürfen. Es läßt sich nachweisen, daß Salzstöcke bei ihrem Durchbruch durch die überlagernden Schichten mit Geschwindigkeiten aufstiegen, die in der Größenordnung von 10 cm in tausend Jahren lagen. Das heißt, ein Salzstock brauchte zu seinem Aufstieg einen Zeitraum von 10 bis 20 Mio. Jahren. Die lange Zeit der Aufwärtsbewegung wird verständlicher, wenn man an die Riesenmengen von Salz denkt, die in einem Salzstock zusammengefließen sind. Ein Salzstock von der Größe von Gorleben enthält z. B. bis zur Tiefe von 2.000 m schon ein Volumen von 70 bis 80 Kubikkilometer Salz.

Dieser Aufstieg der Salzstöcke erfolgte nicht im ganzen norddeutschen Becken zur gleichen Zeit, sondern wurde durch die Dicke der Salzablagerung, die Mächtigkeit der überlagernden Schichten und durch tektonische Ereignisse bestimmt. Die Bildung von Salzstöcken begann schon im oberen Buntsandstein, also bereits einige Millionen Jahre nach der Ablagerung des Salzes. Sie setzte sich dann durch die ganze mittlere Erdgeschicht bis in die Tertiärzeit fort, umfaßte also einen Zeitraum von mehr als 200 Mio. Jahren. Es gibt daher Salzstöcke sehr verschiedenen Alters. Einige sind schon vor rund 200 Mio. Jahren aufgestiegen und haben sich seitdem kaum noch bewegt.

Es gibt auch Salzstöcke mittleren Alters, die den Schwerkraftgleichgewicht mit ihren Deckschichten bereits vor 100 Mio. Jahren gefunden haben, und es gibt ganz junge, die heute noch im Aufstieg begriffen sind. Es gibt aber auch heute noch Salzkissen, die vielleicht nie zu Salzstöcken werden.

Es mag erstaunlich klingen, daß Salz, ein so extrem wasserlösliches Gestein, derartig lange Zeiten überdauern konnte, ohne aufgelöst zu werden. Das erklärt sich dadurch, daß in größeren Tiefen praktisch keine Grundwasserbewegung stattfindet. Der Salzstock ist dort im allgemeinen von Mantelanhydrit und tonigen Gesteinen umgeben und eine Auflösung findet nicht statt. Dringt der Salzstock jedoch in den Bereich des zirkulierenden Grundwassers ein oder erreicht er sogar die Tagesoberfläche, findet eine Auflösung des obersten Teiles statt. Die schwer löslichen Komponenten wie Anhydrit und Ton bleiben zurück und bilden den sogenannten Gipshut des Salzstocks. Dieser Gipshut ist mit Wasser gefüllt, dessen Salzgehalt nach unten immer mehr zunimmt. Im untersten Bereich ist es gesättigte Salzsole, die den Salzstock vor weiterer Auflösung schützt, solange sie nicht abfließen kann.

Der Geologe kann aus der Mächtigkeit der Ablagerungen in der Nachbarschaft des Salzstocks, der sogenannten Randsenke, und aus Dicke und Alter der Schichten über seinem Dach Zeit und Dauer des Aufstiegs erkennen und daraus sozusagen den Lebenslauf des Salzstocks rekonstruieren. Wenn man an die Länge des Zeitraumes denkt, an die über 200 Mio. Jahre, aus denen Erkenntnisse über Salzbewegungen vorliegen, ist es nicht vermessen zu behaupten, daß man geologisch gut begründete Voraussagen über mögliche Bewegungen eines Salzstocks in dem vergleichbar kleinen Abschnitt der nächsten Million Jahre machen kann, so unfaßbar dieser Zeitraum auch für menschliche Maßstäbe sein mag.

Auf einer abgedeckten Karte von Norddeutschland erkennt man über 200 Salzstöcke. Diese Ansammlung setzt sich auch unter der Nordsee fort und zieht noch weit in das Gebiet der DDR hinüber. Solche Salzstock-Provinzen sind nichts Ungewöhnliches und treten an mehreren Stellen der Erde auf, weil die gleichen Bedingungen, die in Norddeutschland zur Ablagerung der Salzformation geführt haben, zu verschiedenen geologischen Zeiten auch an anderen Stellen der Erde geherrscht haben. Als Beispiele seien die Salzstockgruppen aus Südpersien, Südrußland, Texas und Gabun genannt.

Räumlich gesehen sind Salzstöcke entweder schmale Schläuche, dicke Stöcke oder langgestreckte Wälle. Die Höhe des Stocks kann 3 oder mehr Kilometer betragen. Die Durchmesser schwanken zwischen einem und 10 km bei rundlichen Stöcken. Die langgestreckten Wälle in Schleswig-Holstein können eine Ausdehnung bis zu 100 km erreichen.

Das Wissen über den Innenbau von Salzstöcken stammt von den ausgedehnten Aufschlüssen der Kalibergwerke. Ein Schnitt durch einen Salzstock zeigt einen

ausgeprägten Fließfaltenbau, wie er nach der Geschichte des Salzaufstiegs auch erwartet werden muß. Man erkennt, wie die einzelnen Ablagerungen ein Zusammenfließen und Aufsteigen nachzeichnen. Die festeren Gesteine wie Anhydrit und Tonstein haben sich dabei in große Falten gelegt, die mobileren Partien wie Steinsalz und besonders Kalisalz erinnern fast an Bewegungen einer zähen Flüssigkeit und zeigen Verdickungen und Ausquetschungen. Im allgemeinen ist dieser Faltenbau in den schmalen, dünnen Salzstöcken besonders verwickelt, in den großen Salzstöcken dagegen ruhiger und einfacher ausgebildet.

Voraussetzungen für Tief Lagerung

Für die Zwecke der Tief Lagerung radioaktiver Abfälle ist nun besonders wichtig, daß das primär 400 bis 500 m mächtige Steinsalz des zweiten Ablagerungszyklus, das sogenannte Staßfurt Salz, oft im Kern großer Salzstöcke zu doppelter Mächtigkeit zusammengefließen ist. Damit liegt jetzt ein Gesteinskörper vor, der nicht nur den chemisch-physikalischen Anforderungen für eine Tief Lagerung genügt, sondern der auch ein hinreichend großes Volumen aufweist, um eine Deponie aufzunehmen.

Allerdings kann man Salzstöcken nicht von außen ansehen, wie sie im Innern gebaut sind. Die äußere Form eines Stockes läßt sich mit geophysikalischen Methoden, wie z. B. der Seismik, hinreichend gut erfassen. Bisher gibt es aber keine geophysikalische Methode, die von der Erdoberfläche aus Aufschluß über den Innenbau von Salzstöcken verschafft. Das einzige Mittel sind hier Bohrungen, die aber vorsichtig geplant werden müssen, weil jede Bohrung das Salz in ihrer Umgebung auflockert und damit die Dichtigkeit verringert.

Bohrungen müssen aber abgeteuft werden, um herauszufinden, in welchem Teil des Salzstocks die größten Mächtigkeiten des reinen Steinsalzes auftreten. Aus Analogieschlüssen zu den durch Bergwerke bekannten Stöcken erwartet man die größte Mächtigkeit von Steinsalz im Zentrum. Die verwickelte Fließfaltenbewegung kann aber auch dazu geführt haben, daß sie mehr am Rande auftritt. Es ist auch nicht auszuschließen, daß der Faltenbau so intensiv war, daß es überhaupt nicht zu einer mächtigen Akkumulation von reinem Steinsalz gekommen ist oder, daß diese Partie in zu großer Tiefe ausgebildet ist. In diesem Fall wäre eine Tief Lagerung von schwach- und mittelaktiven Abfällen durchaus möglich, für hochaktive Abfälle sollte man jedoch besser einen anderen Salzstock aussuchen, weil besonders für hochaktive Abfälle ausgedehnte Partien reinen Steinsalzes am vorteilhaftesten sind.

Auf die Technik der Einlagerung will ich nur kurz eingehen. Die Tief Lagerung von schwach- und mittelaktiven Abfällen wird von der *Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH (GSF)* seit über 10 Jahren in dem ehemaligen Salzbergwerk *Asse* erprobt. Die Versuchseinlagerung vieler tausend Fässer, die Entwicklung und Erprobung von Methoden und Anlagen zur sicheren Einlagerung, die umfangreichen Kontroll- und Überwachungsprogramme und die begleitenden geologischen, hydrogeologischen, kerntechnischen und sicherheitstechnischen Forschungsprogramme weisen dieses Bergwerk als einen großtechnischen Langzeitversuch aus, der weltweit Anerkennung gefunden hat. Durch dieses Programm ist jetzt schon bewiesen, daß die gefahrlose Tief Lagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle großtechnisch möglich ist. Es sollte aber in den nächsten Jahren noch fortgesetzt werden, um die Methoden weiter zu optimieren und um Langzeiterfahrungen in der Überwachung und Kontrolle der Kammern des Bergwerkes zu erhalten.

Für wärmeproduzierende hochaktive Abfälle konnten entsprechende Versuche noch nicht durchgeführt werden. In Ermangelung echter hochaktiver Glaszylinder hat man sich mit Heizelementen beholfen. Aus diesen Versuchen ist das Konzept entwickelt worden, die Glaszylinder mit hochaktiven Abfällen durch Stahlhüllen zu verschließen und in Bohrlöchern zu versenken, die von Strecken in einem Bergwerk niedergebracht werden. Die Bohrlöcher sollen dann mit Salz oder anderem geeigneten Material verschlossen werden und die Einlagerungsstrecken wieder mit Salz verfüllt werden.

Schließlich soll nach Beendigung der Einlagerung aller radioaktiven Abfälle das gesamte Bergwerk verfüllt werden. Das heißt, alle Kammern, Strecken und die Schächte bis zur Tagesoberfläche werden mit Salz gefüllt und verschlossen. Damit wird der ursprüngliche Zustand des Salzstocks weitgehend wieder hergestellt.

Ein Störfall, darunter versteht man vor allem einen Zutritt von Wasser zu den Abfällen, die Herauslösung von radioaktiven Substanzen und ihren Transport in die Biosphäre, ist durch die abschließende Verfüllung lediglich auf die Betriebsphase des Bergwerks und dabei auf die noch nicht verfüllten Strecken beschränkt. Nun weiß aber der besorgte Bürger, daß in der Bundesrepublik eine ganze Reihe von Salzbergwerken durch Wasserzutritt „ersoffen“ sind, wie der Bergmann sagt.

Dazu ist wichtig zu wissen, daß der größte Teil dieser ersoffenen Gruben aus der Pionierzeit des Kalibergbaus stammt, als man die Zusammenhänge noch nicht so gut kannte und zu dicht an den Salzspiegel, die obere Begrenzung des Salzstocks, gebaut hat und dabei Zuflußwege aus dem wassergefüllten Gipshut geöffnet hat. Andere Gruben sind ersoffen, weil der Kalibergbau mit einem von der Sache her gegebenen Risiko arbeiten muß. Ein Teil der Kaliflöze befindet sich unmittelbar neben dem Anhydrit, der in allen Salzstöcken auftritt. Steht nun der Anhydrit mit dem Salzspiegel in Verbindung, kann es passieren, daß durch die Abbauwirkung Klüfte im Anhydrit aufreißen, die den Weg für die Wässer aus dem Gipshut freimachen. Der Bergmann kennt diese Risiken und trachtet danach, sie zu vermeiden. Aber nicht immer ist es gelungen, die durch den Anhydrit einsickernden Wässer zu beherrschen.

Ein Bergwerk für die Tieflagerung radioaktiver Abfälle wird für seine Zwecke jedoch ganz anders geplant als ein Kalibergwerk. Es ist darauf ausgerichtet, große Partien reinen Steinsalzes aufzusuchen, weil dort die physikalisch-chemischen Bedingungen für eine Endlagerung am günstigsten sind. Es meidet also von vornherein die Nähe der potentiell wasserführenden Schichten. Außerdem schafft es keine großen Hohlräume, die zu Spannungsänderungen führen können, sondern besteht aus einem dünnen Streckennetz, das nach der Ablagerung der Abfälle sofort wieder verfüllt wird. Die Bedingungen, die zum Ersaufen von Kalibergwerken geführt haben, werden also in diesem für die Endlagerung maßgeschneiderten Bergwerk schon wegen der ganz anders gearteten Zielsetzung vermieden.

Denkbar wäre auch ein Wasserzutritt durch den Schacht, der oberflächennah in grundwasserführenden Sedimenten steht. Für die moderne Bergtechnik ist es kein Problem, im Normalbetrieb einen Wasserabschluß zu erhalten. Wenn jedoch der Schacht gewaltsam zerstört werden sollte, kann Wasser in das Bergwerk eindringen. Aber auch in diesem Fall kann ein Kontakt der Lauge mit den radioaktiven Glasblöcken vermieden werden, wenn dafür gesorgt wird, daß eine ausreichend dimensionierte Deckschicht zwischen den Glasblöcken und der Streckensohle

vorhanden ist. Konvektionsbewegungen der Lauge über größere Grubenteile können durch eine entsprechende Auslegung des Grubengebäudes vermieden werden. Ist es nicht möglich, die Wassereinbruchstelle abzudichten und das Bergwerk leerzupumpen, kann es durch Verfüllung mit Salz oder anderem Material ohne Gefährdung der Umwelt stillgelegt werden.

Ein weiterer Problemkreis, der bei der Tieflagerung beachtet werden muß, ist die Einwirkung der von den hochaktiven Abfällen erzeugten Wärme auf das Gestein. Diese Wärme ruft einerseits thermisch induzierte Spannungen hervor, deren Auswirkungen auf die Standfestigkeit der Grubenbaue und auf das felsmechanische Verhalten des Gesteins in der Umgebung des Einlagerungsfeldes beachtet werden müssen. Andererseits hat sie direkte Einwirkungen auf das Gestein. So wird z. B. das Mineral Carnallit, ein Kalium-Magnesium-Mineral, bei Temperaturen über 110 °C instabil und kann Kristallwasser freisetzen.

Um diese Probleme in den Griff zu bekommen, sind Rechenprogramme entwickelt worden, die angeben können, welche Temperatur zu einer bestimmten Zeit in einer bestimmten Entfernung vom Einlagerungsfeld auftritt. Wenn durch Bohrungen die Ausdehnung der zur Verfügung stehenden Steinsalzmasse bekannt ist, muß mit diesen Rechenprogrammen die Lagergeometrie und die Konzentration der Spaltprodukte in den Glasblöcken so festgelegt werden, daß die Standfestigkeit der Grubenbaue erhalten bleibt und das nächste Carnallitflöz so weit entfernt ist, daß es nie in den Bereich kritischer Temperaturen kommt.

Ich möchte nicht falsch verstanden werden, es wird hier nicht behauptet, daß die Tieflagerung radioaktiver Abfälle ohne Schwierigkeiten ist und sozusagen mit der linken Hand durchgeführt werden kann. Wir glauben aber, die Probleme z. B. auf dem Gebiet des Wassereintruchs oder im Bereich der thermischen Aufheizung zu übersehen und Lösungsvorschläge machen zu können. Am einfachsten ist es für die schwach- und mittelaktiven Abfälle, bei denen es sich dank der Vorarbeiten in der Asse im wesentlichen um die Optimierung schon bestehender Techniken handelt. Bei den hochaktiven Abfällen ist es nur die Wärmeerzeugung, die die eigentlichen Probleme aufwirft. Die Wärme kann aber einerseits durch die Konzentration der Spaltprodukte in den Glaszylindern und andererseits durch oberirdische Vorkühlzeiten so geregelt werden, daß sie in vorgesehenen Grenzen bleibt. Da die Einlagerung von hochaktiven Abfällen erst für die neunziger Jahre geplant ist, bleibt genügend Zeit, durch projektbegleitende Forschung diese Fragen zu untersuchen und Grenzwerte festzulegen, die eine mechanische und chemische Integrität der Grubenbaue gewährleisten.

Salzstock Gorleben

Zum Schluß möchte ich noch auf ein Argument eingehen, das uns von besorgten Bürgern immer wieder vorgehalten wird. Nun gut, heißt es da, wir glauben ja, daß man radioaktive Abfälle sicher im Salz verschließen kann. Aber da gibt es doch Erdbeben, Vulkanausbrüche oder Eiszeiten, können die nicht den ganzen Salzstock zerstören? Ich möchte daher ganz kurz den Lebenslauf des heute im Mittelpunkt des Interesses stehenden Salzstocks *Gorleben* schildern, um zu zeigen, wie stabil Salzstöcke sind.

Das Salz von *Gorleben* entstand, wie gesagt, im Zechstein vor etwa 240 Mio. Jahren. Die Andeutung eines Salzkissens in der Gegend des heutigen Salzstocks läßt sich bereits für den Keuper, d. h. für eine Zeit vor rund 200 Mio. Jahren nachweisen. In dieses Salzkissen floß nun etwa 80 Mio. Jahre lang weiteres Salz ein, und zwar bis an die

Wende der Formationen Jura und Kreide. Dann, also etwa vor 120 Mio. Jahren, erfolgte der Durchbruch des Salzes durch die darüber lagernden Sedimente mit einer Geschwindigkeit von größenordnungsmäßig 10 cm in 1.000 Jahren. Dieser Aufstieg hat den Salzstock etwa 10 bis 20 Mio. Jahre beschäftigt und seitdem, also seit rund 100 Mio. Jahren, hat er seine Form nicht mehr wesentlich verändert.

Aber was ist inzwischen alles passiert! Man darf sich Mitteleuropa am Anfang der Kreidezeit nicht so vorstellen, wie es heute aussieht. Der Nordatlantik hatte gerade erst begonnen, sich zu öffnen. Europa, Grönland und Nordamerika hingen noch zusammen. Norddeutschland war von einem buchtenreichen brackischen Flachmeer bedeckt, das sich bald vertiefte und dann etwa 40 Mio. Jahre das Gebiet von Gorleben überflutet hielt. Auch im Süden Deutschlands war ein Meer, die Alpen gab es als Gebirge noch nicht. Man muß annehmen, daß der Salzstock in dieser Meeresperiode zeitweise dicht an die Oberfläche kam und vom Wasser etwas angelöst wurde. Damals hat er aus den unlöslichen Rückständen seinen Gipshut bekommen.

In der Mitte der Kreidezeit begannen dann heftige Gebirgsbildungen, die die ersten Teile der Alpen auffalteten. Auch in Norddeutschland machten sich tektonische Bewegungen bemerkbar, der Harz wurde um ca. 3000 m herausgehoben, das Rheinische Schiefergebirge stieg auf und südlich von Hannover wurde das Bergland aufgefaltet. Gegen Ende der Kreidezeit hob sich auch das flache Land, das Meer zog sich nach Norden zurück, und die Gegend um Gorleben wurde trocken.

Doch nur für geologisch kurze Zeit. In der jetzt anschließenden 60 Mio. Jahre währenden Tertiärzeit versank das Gebiet von Gorleben noch mindestens zweimal für viele Millionen Jahre im Meer und wurde danach wieder Festland. Der Salzstock wurde dabei erneut von rund 200 m mächtigen Sedimenten zugedeckt.

Das Tertiär war auch keine ruhige Periode der Erdgeschichte. Die Mittelgebirge und die Alpen stiegen weiter auf und schütteten ihre Sedimentströme ins Vorland. Im Rheintal, im Leinetal und in der Rheinischen Bucht brachen große Gräben ein und füllten sich mit Sedimenten bis zu 4.000 m Mächtigkeit. Durch das tropisch warme Klima bildeten sich in der Mitte des Tertiärs überall in Deutschland ausgedehnte Braunkohlevorkommen. Vom Kattgatt bis nach Süddeutschland begann ein heftiger Vulkanismus, dessen Vulkane man heute noch z. B. am Vogelsberg, im Siebengebirge und in der Eifel sehen kann.

Die anschließende, etwa ½ Mio. Jahre währende Quarzzeit war nur noch ein Nachspiel. Immerhin wurde das Gebiet von Gorleben dreimal vom Eis der Eiszeiten überschoben, dreimal zogen sich die Gletscher wieder zurück

und ließen ihre Ablagerungen, Gerölle, Kiese und Sande, 80 m mächtig, über Gorleben liegen. Daher ist die Oberkante des Salzstocks heute nicht mehr oberflächennahe, sondern liegt bedeckt von tertiären und quartären Sedimenten in etwa 300 m Tiefe.

Alle diese geologischen Ereignisse, heute würde man sie Katastrophen nennen, die zum Teil mit heftiger Erdbeben-tätigkeit verbunden gewesen sein müssen, hat der Salzstock überstanden, ohne seine Form wesentlich zu verändern. Abgesehen von einer Auflösung des oberen Teils in der Kreidezeit und einer geringfügigen Ausdehnung im Tertiär, liegt er heute noch fast in der gleichen Form vor, in der er vor 100 Mio. Jahren aufgestiegen ist. Um dieses Zeitmaß richtig einzuschätzen, ist es gut, sich daran zu erinnern, daß man den geschichtlichen Menschen erst seit einigen 10.000 Jahren kennt, der Mensch als Art vielleicht 1 Mio. Jahre alt ist. Klingt es da nicht vermessend, wenn der Mensch die Stabilität dieses Salzgebirges anzweifelt, das 100 mal älter ist als seine eigene Art und in dieser langen Zeit Meeresüberflutungen, Erdbeben, Gebirgsbildungen, Vulkanismus und Eiszeiten überstanden hat?

Außerdem sollte man bedenken, daß die Wärmeenergie der hochaktiven Abfälle schon nach einigen Jahrzehnten erheblich abgeklungen ist und daß die Toxizität der Abfälle nach rund 1.000 Jahren auf etwa die von Uranerz zurückgegangen ist, Uranerz, das an zahlreichen Stellen der Erde gesucht, gefördert und verarbeitet wird. Die Zeiten für den notwendigen Einschluß sind also relativ kurz, wenn man sie mit den geschilderten geologischen Zeiten vergleicht.

Zusammenfassend läßt sich daher aus geologischer Sicht sagen, daß ein geeigneter Salzstock die radioaktiven Abfälle, wenn sie sachgemäß eingelagert sind, für die notwendige Zeitspanne von einigen tausend, ja auch einigen hunderttausend Jahren sicher verschließen kann. Wir hoffen, den besorgten Bürger mit der Zeit davon überzeugen zu können, daß er nicht mit Unbehagen, sondern mit einem Gefühl der Erleichterung an die Tieflagerung radioaktiver Abfälle denken kann, denn die Erdgeschichte hat uns in den Salzstöcken ein Geschenk gemacht, das uns erlaubt, die Kernenergie auszunutzen und dennoch unsere Umwelt frei von radioaktiven Abfällen zu halten.

Überarbeitete Fassung des Übersichts-vortrages, gehalten auf der Reaktortagung des Deutschen Atomforums und der Kerntechnischen Gesellschaft vom 4. bis 7. April 1978 in Hannover.

Author Prof. Dr. H. Venzlaff
Leitender Direktor in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Stilleweg 2
3000 Hannover 51, Germany