

~~HG~~
~~HT~~ S. C. 41, 10 f. 6
a/a

R A D I O A K T I V E A B F A E L L E A U S D E R
K E R N E N E R G I E G E W I N N U N G

Bericht des Eidg. Amtes für Energiewirtschaft,
als Antwort auf die
Anfrage von Herrn Bundesrat Ritschard vom 3.4.1975

Sachbearbeiter: B. Hausherr

Bern, den 20. Juni 1975
H/ee 252

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung und Zusammenfassung	3
1. Die Entstehung radioaktiver Abfälle	7
1.1. Urangewinnung, Anreicherung	7
1.2. Betrieb des Kernkraftwerkes	7
1.3. Wiederaufbereitung	9
2. Die Lagerung radioaktiver Abfälle	9
2.1.1. Wie lange sollen hoch-radioaktive Abfälle gelagert werden?	9
2.1.2. Ein Konzept für die langfristige Lagerung hoch-radioaktiver Abfälle	11
2.2. Die Lagerung schwach-radioaktiver Abfälle	13
3. Die Situation in der Schweiz	15
4. Risiken, welche im Zusammenhang mit der Lagerung radioaktiver Abfälle auftreten können	17
4.1. Beim Transport	17
4.2. Bei der Lagerung	17
4.3. Was heisst akzeptables Risiko?	18
5. Kosten	19
6. Künftige Aufgaben	19
Literatur	21

Einleitung und Zusammenfassung

Es ist gewiss verständlich, wenn der eilige Leser nach kurzem Durchblättern des Berichtes, abgeschreckt von Fakten und Zahlen, sich der Zusammenfassung zuwendet, in der Hoffnung hier schneller auf die Beantwortung allfälliger Fragen zu stossen. Gerade die quantitativen Aspekte, welche in einer Zusammenfassung nur ungenügend zum Ausdruck gelangen können, sind jedoch unseres Erachtens wichtig für eine Beurteilung des Problems. Diese Beurteilung soll bewusst dem Leser überlassen werden, indem Kommentar nur sparsam verwendet wurde und im Bericht wenn möglich an Stelle von Urteilen, welche bereits einen wertenden Charakter aufweisen, wie "geringe Mengen" oder "beachtliche Ausmasse", Zahlen verwendet wurden. Der Leser sei schliesslich auch aufgefordert, sich mit einigen Fragen grundsätzlicher Art, welche im Bericht angetönt wurden und welche einer rationalen Behandlung kaum zugänglich sind, selber auseinanderzusetzen.

Radioaktive Abfälle entstehen auf verschiedenen Stufen des Brennstoffkreislaufes, der die Prozesse von der Schürfung des Urans bis zur Wiederaufbereitung des abgebrannten Brennstoffes umfasst. Bei der Kernspaltung im Reaktor bilden sich in den Brennstäben einerseits die hochaktiven Spaltprodukte, (Bruchstücke der Urankerne) andererseits die in der Natur nicht vorkommenden radioaktiven Elemente, welche schwerer sind als Uran und deshalb Transurane genannt werden. Ein bekanntes Transuran ist Plutonium. Ein Bruchteil der genannten Stoffe gelangt aus den Brennstäben in den Kühlkreislauf und muss durch besondere Reinigungsmethoden laufend daraus entfernt werden. Die dabei entstehenden, als schwach-aktiv bezeichneten Abfälle, werden in Stahlfässer abgefüllt und auf den Werkarealen gelagert, bis sie einer Endlagerung zugeführt werden können. Alljährlich wird ein Teil der abgebrannten Brennelemente aus dem Reaktor entfernt und bis zum Transport in die Wiederaufbereitungsanlage im Kraftwerk gelagert, wobei besondere Vorsichts- und Abschirmmassnahmen getroffen werden müssen.

In der Wiederaufbereitungsanlage werden abgebrannte Brennelemente aus Kernkraftwerken chemisch verarbeitet. Das unverbrauchte Uran und das erzeugte Plutonium wird zurückgewonnen und für eine spätere Verwendung gelagert. Ein Teil des Plutoniums bleibt mit den übrigen Transuranen und den Spaltprodukten in den Abfalllösungen zurück. Diese Abfälle werden auf dem Areal der Wiederaufbereitungsanlage in unterirdischen Tanks gelagert, wobei die Zerfallswärme der radioaktiven Flüssigkeiten abgeführt werden muss. Während der Lagerung klingt die Aktivität und damit die Toxizität (d.h. die schädliche Wirkung auf Lebewesen im Fall eines Kontaktes oder einer Aufnahme in den Organismus) ab. Durch sichere Aufbewahrung oder Lagerung radioaktiver Stoffe soll vermieden werden, dass diese in die Umwelt (insbesondere in den Wasserkreislauf Grundwasser-Fluss-Meer-Niederschläge) gelangen können, solange die Toxizität nicht unterhalb bestimmte Grenzen abgesunken ist. Falls z.B. eine Lagerungszeit von tausend Jahren erreicht werden kann, wird nach dieser Zeitspanne die Toxizität einiger Spaltprodukte, welche in hochaktiven Abfällen in grösseren Mengen vorhanden sind, um den Faktor 10 Milliarden abgenommen haben. Anders verhält es sich mit den Transuranen. Mit ihren Halbwertszeiten von einigen tausend bis zehntausend Jahren ist ein Abklingen der Toxizität innerhalb kulturgeschichtlicher Zeiträume nicht festzustellen, so dass nach einer Lagerungszeit von tausend Jahren die Toxizität des Gemisches aus Transuranen und Spaltprodukten bei weitem von den ersteren dominiert wird. Eine längere Lagerungszeit als die genannte bringt also keine Vorteile, es sei denn, man gehe von der etwas spekulativen Annahme aus, dass die Abfälle wirklich für alle Zeiten sicher an Ort bleiben werden. Es dürfte jedenfalls realistischer sein, anstatt von dieser Annahme auszugehen, zu fordern, dass gewisse heute allgemein akzeptierte Grenzen der Belastung der Umwelt durch radioaktive Stoffe zu keinem Zeitpunkt, auch in ferner Zukunft, überschritten werden dürfen.

Wie stellt man sich nun die langfristige Lagerung ("Endlagerung") hochaktiver Abfälle vor? Unter der Vielzahl theoretisch untersuchter Möglichkeiten scheint eine in verschiedenen Ländern studierte Methode praktische Bedeutung zu erlangen. Diese Methode umfasst die Verfestigung der flüssigen Abfälle zu Glasblöcken, die Lagerung dieser Blöcke während einigen Jahrzehnten (zur weiteren Abkühlung) in besonderen Lagergebäuden und schliesslich die Lagerung in künstlichen Kavernen, welche vorzugsweise in Steinsalzlagern errichtet werden sollen. Es lässt sich nämlich nachweisen, dass Steinsalzvorkommen die letzten hundert Millionen Jahre Erdgeschichte ohne grössere Veränderungen überstanden haben, und man kann daher mit grosser Bestimmtheit sagen, dass sie auch für die nächsten Jahrtausende eine sichere Lagerstätte bilden könnten.

Die Lagerung der schwach-aktiven Abfälle wirft zumindest bei den heute produzierten Mengen weniger Probleme auf, als die Lagerung der hoch-aktiven Abfälle. Schwach-aktive Abfälle können z.B. im Einklang mit der Londoner Konvention zur Verhütung der Meeresverschmutzung ins Meer versenkt werden. In einigen Ländern werden schwach-aktive Abfälle vergraben oder in Kavernen des geologischen Untergrundes, z.B. in Salzvorkommen gelagert, ähnlich wie das für die hoch-aktiven Abfälle vorgesehen ist.

Wie sieht es mit dem Abfallproblem in der Schweiz aus? Wie in andern Ländern, welche auf absehbare Zeit hinaus den Bau einer eigenen Wiederaufbereitungsanlage nicht in Betracht ziehen, besteht auch in der Schweiz eine gewisse Unsicherheit, ob man sich in Zukunft überhaupt mit der Lagerung hoch-aktiver Abfälle befassen muss, denn vorläufig lagern die hoch-aktiven Abfälle aus schweizerischen Kernkraftwerken in den Tanks der ausländischen Wiederaufbereitungsanlagen. Bevor sich Methoden zur Verfestigung und Lagerung dieser Abfälle durchgesetzt haben, ist kaum damit zu rechnen, dass die Schweiz die hoch-aktiven Abfälle zurücknehmen muss. Vorsichtshalber sollte man jedoch unbedingt

abklären, ob in der Schweiz die notwendigen geologischen Voraussetzungen für eine Lagerung hoch-aktiver Abfälle gegeben sind. Dies könnte möglicherweise parallel mit den Untersuchungen, welche die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) im Zusammenhang mit der Lagerung schwach-aktiver Abfälle durchführt, geschehen. Auch hier, bei den schwach-aktiven Abfällen, drängt sich ja eine Lösung auf. Bei zunehmender Menge dieser Abfälle wird früher oder später die Teilnahme an den organisierten Versenkungen erschwert sein. Die NAGRA strebt daher eine ähnliche Lösung an, wie sie in Deutschland gefunden wurde, wo grosse Mengen schwach-radioaktiver Abfälle in einem stillgelegten Salzbergwerk eingelagert werden. Die Hoffnung, dass eines Tages eine Lösung auf internationaler Ebene gefunden, d.h. dass z.B. eine zentrale Lagerstätte errichtet werde, an welcher sich die Schweiz beteiligen könnte, ist zwar verständlich, aber vielleicht doch zu unrealistisch.

1. Die Entstehung radioaktiver Abfälle

Um ein quantitatives Bild von der Entstehung radioaktiver Abfälle erhalten zu können, ist es unumgänglich, die typischen Daten des Brennstoffzyklus' zu betrachten, welche den Betrieb eines Kernkraftwerkes charakterisieren. Wir wählen als Beispiel eine Zeitspanne des Betriebes von 1 Jahr (7000 Stunden) und als Kernkraftwerk einen Leichtwasserreaktor von 1 GW elektrischer Leistung.

1.1. Urangewinnung, Anreicherung

Bei einem üblichen Urangehalt eines abbauwürdigen Uranerzvorkommens werden pro Jahr und Reaktor rund 120'000 t Uranerz zu 200 t Natururan verarbeitet. Die hier entstehenden Abfälle ("mill tailings"), welche neben verschiedenen Mineralien auch radioaktive Zerfallsprodukte des Urans enthalten, werden in der Nähe der Uranmühlen aufgeschüttet. Da die spezifische Aktivität dieser Abfälle höchstens gleich gross ist wie diejenige des Erzes, aus dem sie stammen, kann diese Ablagerung ohne Gefährdung der Umwelt erfolgen. Nach der Ueberführung des gewonnenen Natururans in den gasförmigen Zustand in einer Konversionsanlage wird in der Anreicherungsanlage der Gehalt des Uranisotops 235 erhöht. Es stehen nun rund 35 t angereichertes Uran zur Verfügung, welches zu Stäben, den Brennelementen verarbeitet wird, um nun im Reaktor eingesetzt werden zu können.

1.2. Betrieb des Kernkraftwerkes

Im Reaktor entstehen bei der Spaltung des Uranisotopes 235 einerseits die radioaktiven Spaltprodukte, welche ein Gemisch vieler radioaktiver Isotope darstellen, z.B. Iod, Cesium, Krypton, andererseits entstehen aus dem Uran 238 in der Natur nicht vorhandene Elemente, die Transurane (z.B. Plutonium, Americium). Von den 700-800 Brennstäben im Reaktorkern werden jährlich etwa

200 bestrahlte ("abgebrannte") durch frische ersetzt. Zum Zeitpunkt des Auswechselns, einige Tage nach Abschalten des Reaktors, weisen diese Elemente eine hohe Aktivität (Megacuries pro Brennstab) auf und produzieren eine hohe Zerfallswärme (10 kW pro Brennstab), was sie für einen Transport zur Wiederaufbereitungsanlage ungeeignet macht. Die abgebrannten Brennelemente werden deshalb vorerst in einem Wasserbecken in 10 Metern Tiefe gelagert. Das Wasser dient als Strahlenabschirmung, durch Umwälzung des Wassers wird zudem für eine ausreichende Kühlung gesorgt. Nach etwa einjähriger Lagerung ist die Aktivität eines Brennstabes auf etwa 0,2 Megacurie gesunken, und die Brennstäbe werden nun in Spezialbehältern zur Wiederaufbereitungsanlage transportiert.

Ein geringer Teil (5000 Curies pro Jahr abgesehen von Edelgasen) der in den Brennelementen produzierten Spaltprodukte und Transurane gelangt durch unvermeidliche Leckagen in den Primärkühlkreislauf, wo die Isotope in verschiedener chemischer Form und verschiedenem Aggregatzustand vorliegen. Bei der automatischen Reinigung des Primärkühlkreissystems, sowie bei der Dekontamination bestimmter Anlageteile bei Wartungsarbeiten entstehen radioaktive Abfälle geringer spezifischer Aktivität in Form von Filtern, Ionentauscherharzen, Putzlappen, Waschlösungen, usw. Die jährlich produzierte Menge solcher Abfälle in einem Kernkraftwerk von 1 GW elektrischer Leistung füllt im Mittel etwa 500 Fässer zu 200 Litern Inhalt, hängt jedoch stark von den erwähnten Leckagen ab. Durch Verbrennung fester radioaktiver Abfälle zu radioaktiver Asche kann eine Volumreduktion der festen Bestandteile um das 30-fache vorgenommen werden. Zum Abfall der in den Kernkraftwerke entsteht, müssen ferner auch einige metallische Anlageteile, wie z.B. das Reaktorgefäß, gezählt werden, welche bei einer späteren Stilllegung des Werkes eine hohe induzierte Aktivität aufweisen. Die Technik der Beseitigung dieser Abfälle wird zur Zeit noch studiert.

1.3. Wiederaufbereitung

In der Wiederaufbereitungsanlage wird das unverbrauchte Uran und das vom Reaktor erzeugte Plutonium von den Spaltprodukten chemisch getrennt. Diese Spaltprodukte liegen nach der Abtrennung als hoch-radioaktive Lösungen ($100'000$ Curies pro m^3) vor, welche in unterirdischen Tanks während mehreren Jahren gelagert und durch Kühlung auf einer Temperatur von weniger als 60 Grad Celsius gehalten werden, um Korrosionsprobleme zu vermeiden. Nach 5 - 10 Jahren Lagerzeit kann meistens auf eine forcierte Kühlung verzichtet werden. Aus den 200 in die Wiederaufbereitungsanlage gelieferten bestrahlten Brennelementen entstehen rund $20 m^3$ Abfalllösungen, 200 kg Plutonium und annähernd wieder 35 t Uran, das wieder der Anreicherung zugeführt werden kann. Die Abtrennung des Plutoniums von den Spaltprodukten erfolgt jedoch nicht vollständig. Ein Teil des Plutoniums (ca. 1 %) und der grösste Teil der andern Transurane bleibt in den Abfalllösungen. (Weiteres dazu s. auch Abschnitt 2.2.). Wiederaufbereitungsanlagen werden im allgemeinen für eine Jahreskapazität von 1000 t Uran und mit einer Tanklagerkapazität von $5000 m^3$ ausgelegt. Mit der Zwischen- und Endlagerung der hoch-radioaktiven Abfälle, die im Abschnitt 2.1. besprochen werden soll, ist der Brennstoffzyklus abgeschlossen.

2. Die Lagerung radioaktiver Abfälle

2.1. Die Lagerung der hoch-radioaktiven Abfälle

2.1.1. Wie lange sollen hoch-radioaktive Abfälle gelagert werden?

Mathematisch gesehen klingt die Aktivität radioaktiver Stoffe erst nach unendlich langer Zeit auf den Wert null ab. Von welchen Kriterien für die Festlegung einer minimalen Lagerzeit

hat man also auszugehen? Wie bei der Lösung anderer zivilisationsbedingter Probleme richtet sich der Aufwand nach den Risiken, welche die Betroffenen bereit sind, auf sich zu nehmen. Da sich einerseits nach dem Stand des heutigen Wissens das Risiko einer allfälligen Freisetzung radioaktiver Abfälle in die Biosphäre ausschliesslich in einer erhöhten Strahlenbelastung der Lebewesen äussert, andererseits durch Empfehlungen von Fachgremien und durch die Gesetzgebung Richtlinien über solche zusätzlichen Belastungen bestehen, kann recht zuverlässig abgeschätzt werden, wie lange die Abfälle mit Sicherheit von der Biosphäre ferngehalten werden müssen. Bei der Festlegung einer solchen Zeitspanne muss man sich an der radiotoxischen Wirkung der verschiedenen Stoffe, ihrer relativen Häufigkeit und an deren Halbwertszeit orientieren. Ein Beispiel möge dies erläutern: nach 1000 Jahren Lagerzeit ist das Transuran Americium 241 mit 430 Jahren Halbwertszeit das Abfallprodukt, welches bezüglich Toxizität und Menge dominiert¹⁾ (nicht etwa das Plutonium 239, wie oft angenommen wird). Nach zehntausend Jahren dominiert Americium 243 (Halbwertszeit 8000 Jahre). Um ein Bild von der absoluten Toxizität der Abfälle nach 1000 Jahren zu erhalten, nehmen wir nun an, unsere Standardmenge würde nach dieser Zeit in der Wassermenge des Zürichsees gleichmässig verteilt (das heisst nicht, dass sie in den Zürichsee geworfen werden soll, denn gerade die gleichmässige Verdünnung kann damit nicht erreicht werden). Dieses Wasser könnte dann gemäss den Bestimmungen der Eidgenössischen Strahlenschutzverordnung des Jahres 1963 als Trinkwasser verwendet werden. Könnten wir statt dessen diese Abfälle während einer Million Jahren lagern, so wäre die notwendige Verdünnung nur 10 Mal geringer! Für ein Gemisch aus Spaltprodukten und Transuranen bringt eine Lagerung von mehr als tausend Jahren also kaum Vorteile. Je nach der an einem bestimmten Ort eingelagerten Menge von Abfällen, der bei einer allfälligen späteren Freisetzung zu erwartenden Verdünnung und den tolerierten Strahlendosen, müssen die Abfälle während einer

Zeitspanne von einem halben Jahrtausend bis zu einigen Jahrtausenden sicher eingeschlossen bleiben.

2.1.2. Ein Konzept für die langfristige Lagerung hoch-radioaktiver Abfälle

Es ist beim gegebenen Umfang dieses Berichtes nicht möglich, auf all die ideenreichen Vorschläge, welche zum Thema der Lagerung radioaktiver Abfälle in den letzten Jahren gemacht worden sind, einzugehen. Dies geschieht jedoch in einem Bericht, der im Auftrag der amerikanischen Atombehörde vom Battelle Pacific Northwest Laboratorium angefertigt wurde²⁾. Darin werden 20 solcher Vorschläge auf ihre Realisierungsmöglichkeiten hin untersucht. Zum Teil als Folgerung aus dem erwähnten Bericht, hauptsächlich aber in Anbetracht der Entwicklung auf diesem Gebiet in verschiedenen Industriestaaten ist man geneigt, dem folgenden Konzept für die langfristige Lagerung hoch-radioaktiver Abfälle die grösste Chance einer späteren Realisierung einzuräumen. Das Konzept besteht aus drei Stufen³⁾:

Stufe 1: Verfestigung der flüssigen Abfälle

Stufe 2: kontrollierte Zwischenlagerung

Stufe 3: Endlagerung in geologisch stabilen Formationen

Zu Stufe 1: Die Lagerung eines festen Materials, welches wasserunlöslich und korrosionsfest ist, bietet wesentlich weniger Probleme als die Lagerung von Säuren. Man wandelt daher die hoch-radioaktiven Flüssigkeiten in festes Material um, z.B. in Glas, das die erwähnten Eigenschaften besitzt. Wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Glases dürfen die fabrizierten Blöcke bestimmte Abmessungen (etwa 0,3 m Durchmesser mal 3 m Länge) nicht überschreiten. Zudem müssen diese festen Abfälle nun wieder künstlich gekühlt werden.

Aus unserer Standardmenge hoch-radioaktiver Abfälle ergeben sich etwa 15 Glaszylinder der erwähnten Abmessungen. Industrielle Anlagen für die Verglasung sind geplant in Windscale (England) resp. im Bau in Marcoule (Frankreich).

Zu Stufe 2: Möglicherweise sollen die Glasblöcke für mehrere Jahrzehnte in kontrollierte Zwischenlager geführt werden, da die direkte Einlagerung in geologische Formationen gewisse Probleme aufwirft.

In den Vereinigten Staaten ist die Planung solcher Zwischenlager bereits sehr fortgeschritten. Die ersten Gebäude ("interim retrievable surface storage facilities") hätten ursprünglich bis im Jahre 1984 fertiggestellt werden sollen. Aus Angst jedoch, dass nach den beträchtlichen finanziellen Aufwendungen für dieses Projekt keine Mittel mehr für eine endgültige Lagerung freigemacht werden könnten, hat kürzlich die amerikanische Umweltschutzbehörde Einsprache gegen dieses Projekt erhoben. Die ERDA (Energy Research and Development Agency) wird nun eine Gesamtplanung in Angriff nehmen⁴⁾.

Zu Stufe 3: Wenn es auch zumindest prinzipiell denkbar wäre, hoch-radioaktive Abfälle über mehrere Jahrhunderte kontrolliert zu lagern, so glaubt man doch wegen der schweren Erfassbarkeit der damit auftretenden Probleme, welche nicht technischer Natur sind, von einer solchen Lösung absehen zu müssen. Man sucht deshalb nach Lagerstätten, in welchen die hoch-radioaktiven Abfälle nach der Einlagerung und einer den Anforderungen genügenden Versiegelung der Lagerstätte unbeaufsichtigt gelagert werden können. Man ist heute der Ansicht, dass sich künstliche Kavernen in geologisch stabilen Formationen als solche Lagerstätten eignen würden. Als geologisch stabil werden z.B. Salz- und Anhydrit-Vorkommen angesehen, beweist doch rein die Tatsache ihrer heutiger Existenz, dass in deren Umgebung seit etwa hundert Millionen Jahre keine grösseren geologischen Veränderungen, wie sie etwa grosse Wassereinbrüche darstellen würden, vorgekommen sind.

Vorabklärungen für die Endlagerung hoch-radioaktiver Abfälle in Salzvorkommen wurden oder werden in verschiedenen Industrieländern unternommen, am gründlichsten u.W. in den Vereinigten

Staaten und in der Bundesrepublik Deutschland. In Amerika wurden in den sechziger Jahren in der Salzmine von Lyons (Kansas) die Wärmeentwicklung und Strahlung hoch-radioaktiver Abfälle simuliert und die Wirkung auf das Salzgestein beobachtet. Wegen der Möglichkeit von Wassereintrüben durch andere Bergwerksaktivitäten wurde dann die Mine als Lagerstätte jedoch nicht in Betracht gezogen⁵⁾.

In der Bundesrepublik Deutschland werden z.Z. im stillgelegten Salzbergwerk Asse bei Braunschweig, welches jetzt der Lagerung grosser Mengen schwach- und mittel-radioaktiver Abfälle dient, ähnliche Voruntersuchungen zur Lagerung hoch-radioaktiver Abfälle durchgeführt. Die Resultate stehen noch aus.

Im weiteren stellt sich noch die Frage nach dem Platzbedarf für die Endlagerung der hoch-radioaktiven Abfälle. Wie schon erwähnt, beträgt das Volumen der verfestigten Abfälle, welche aus dem Betrieb eines Kernkraftwerkes während einem Jahr stammen, nur rund 10 m^3 . Da für die Einbettung der Glasblöcke in das Salzgestein aber bestimmte Mindestabstände eingehalten werden müssen, ist erheblich mehr Lagerraum erforderlich. Nach amerikanischen Quellen⁷⁾ rechnet man mit einem Volumenverhältnis von Lagergut zu Lagerraum von 1: 50. Der kumulierte Platzbedarf für die hoch-radioaktiven Abfälle aus 10 Kernkraftwerken bis zum Jahr 2000 beträgt also rund $100'000 \text{ m}^3$, was einer Tunnellänge von etwa 15 km entspricht.

2.2. Die Lagerung schwach-radioaktiver Abfälle

Für radioaktive Abfälle mit einer spezifischen Aktivität bis etwa 10 Curies/m^3 ergeben sich einige zusätzliche Möglichkeiten der Lagerung (oder genauer Beseitigung) welche für hoch-radioaktive Abfälle nicht in Frage kommen.

Beispielsweise werden in verschiedenen Ländern, welche Reaktorforschungszentren in dünn besiedelten Gebieten betreiben (wie Amerika oder Kanada), die schwach-radioaktiven Abfälle einfach

an Ort und Stelle vergraben, falls es die Eigenschaften des Bodens zulassen. Man geht dabei von der Annahme einer langsamen Freigabe der Radioaktivität an die umliegenden Gewässer und damit einer entsprechenden Verdünnung aus⁸⁾.

So ist es zum Beispiel, gemäss der Londoner Konvention (Convention of the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and other Matter, London 1972) auch zulässig, schwach-radioaktive Abfälle ins Meer zu versenken. Die NEA, die Nuclear Energy Agency, eine Behörde der OECD, organisierte in den Jahren 1967, 1969, 1971-75 kontrollierte Versenkungsaktionen, an der mehrere Industrieländer, darunter die Schweiz, teilnahmen. Es werden pro Versenkung in der Grössenordnung 1000 Fässer, oder 10'000 Curies Spaltprodukte und 500 Curies Transurane versenkt.

Bei einer ständigen und weltweiten Zunahme der Produktion radioaktiver Abfälle wird man sich zweifellos Gedanken über die Belastbarkeitsgrenzen der Biosphäre durch Transurane machen müssen, weil ein Abbau dieser Stoffe zumindest innerhalb überblickbarer Zeiträume nicht erfolgt.

Paradoxerweise dürfte, langfristig gesehen, eine solche Grenze durch die Akkumulierung schwach-radioaktiver Abfälle erreicht werden. Während man sich nämlich bereits heute bewusst ist, dass in Zukunft eine verbesserte Abtrennung der Transurane aus den hoch-radioaktiven Abfällen notwendig sein wird⁹⁾, ist von solchen Absichten im Zusammenhang mit schwach-radioaktiven Abfällen bisher noch nichts bekannt geworden. Eine Abtrennung der Transurane scheint deshalb vernünftig, weil man hofft, diese später durch fortgeschrittene Methoden endgültig vernichten zu können.

3. Die Situation in der Schweiz

In der Schweiz stehen keine eigenen Wiederaufbereitungsanlagen für Kernbrennstoffe im Betrieb und es sind auch keine geplant, woraus sich keine unmittelbare Notwendigkeit für eine Lagerung hoch-radioaktiver Abfälle ergibt. Es ist jedoch nicht auszuschliessen, dass in Zukunft die ausländischen Aufbereitungsanlagen Aufträge nur noch unter der Bedingung ausführen, dass die Abfälle vom Auftraggeber zurückgenommen werden. Eine Abklärung der Frage, ob die in der Schweiz anzutreffenden geologischen Verhältnisse sich überhaupt zur Endlagerung hoch-radioaktiver Abfälle eignen würden, muss daher von der NAGRA (s. unten) so bald als möglich durchgeführt werden. Für die schwach- bis mittel-radioaktiven Abfälle sind auf den Arealen der Kernkraftwerke eigene Zwischenlager vorhanden. Diese werden, wie die Kernkraftwerke selbst, von den eidgenössischen Sicherheitsbehörden begutachtet und überwacht.

Das Kernkraftwerk Mühleberg, das eine elektrische Leistung von 300 MW aufweist, produziert zur Zeit jährlich schwach-radioaktive Abfälle, welche dem Inhalt von rund 200 Fässern zu 200 Liter Inhalt entsprechen. Das Zwischenlager wies bei Inbetriebnahme des Kraftwerkes 1972 eine Lagerkapazität für 5 - 7 Jahre auf. Ein grosser Teil der Abfälle soll nach der Fertigstellung der Veraschungsanlage im EIR Würenlingen dort verascht und somit die Zwischenlagerkapazität wesentlich erhöht werden. Entsprechend produzieren die Kernkraftwerke Beznau I und II (Inbetriebnahme 1969, resp. 1971), welche eine gesamte elektrische Leistung von 700 MW aufweisen, rund das Doppelte an radioaktiven Abfällen.

Beim Bau der Werke Beznau wurde eine Lagerkapazität von 1 - 2 Jahres vorgesehen, weil damals eine zentrale Zwischenlagerlösung angestrebt wurde. Inzwischen haben sich diese Werke mehrere Male an den Versenkungsaktionen der OECD beteiligt. Auf

diese Weise konnten die Werke Beznau jährlich einige hundert Fässer mit schwach-radioaktiven Abfällen beseitigen. Ein Gesuch an die Behörden für den Bau eines Lagers mit einer Kapazität von mehreren Jahrzehnten ist kürzlich eingereicht worden.

Was nun den zukünftigen Ausbau der Kernenergie anbetrifft, so rechnet man, dass nach dem Bau der weiteren geplanten Kernkraftwerke (angenommene Gesamtleistung 5 GW) in einem Jahrzehnt jährlich rund 5'000 Fässer an schwach- bis mittel-radioaktiven Abfällen entstehen werden, wobei in diesen Zahlen die Abfälle aus Industrie und Forschung inbegriffen sind. Eine Lösung für die Endlagerung dieser Abfälle auf nationaler Ebene drängt sich daher auf.

Im Jahre 1972 wurde die NAGRA, die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, gegründet. Sechs grosse Elektrizitätsunternehmen, welche sich mit der Kernenergie befassen, und die Eidgenossenschaft haben sich darin zusammengeschlossen, um Lösungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle zu suchen. Die NAGRA ihrerseits ist dem Konsortium "Untertagespeicher" beigetreten, welches geologische Formationen auf ihre Eignung zum Bau von unterirdischen Kavernen für die Lagerung von Erdöl, von Erdgas oder von radioaktiven Abfällen hin prüft. Für die Lagerung schwach-radioaktiver Abfälle sollen sich Kavernen in Anhydritvorkommen eignen. In den Alpen und im Jura werden Probebohrungen ausgeführt, auftauchende Schwierigkeiten verschiedener Art haben jedoch bis zur Stunde gründliche Abklärungen verhindert. Das Hauptproblem bildet der Widerstand der betroffenen Gemeinden gegen die Errichtung von Abfalllagern.

4. Risiken, welche im Zusammenhang mit der Lagerung radioaktiver Abfälle auftreten können

4.1. Beim Transport

Die Zahl der Transporte von radioaktivem Material von den Kernkraftwerken zu den Wiederaufbereitungsanlagen, sowie von diesen zu den Lagerstätten, dürfte in den nächsten Jahrzehnten stark anwachsen, so werden z.B. 1985 (angenommene Kernkraftwerkleistung 5 GW) in der Schweiz rund 100 Transporte mit bestrahlten Brennelementen durchgeführt werden.

Obwohl die Transportbehälter ausserordentlich strengen Prüfverfahren unterworfen sind und damit hohen Anforderungen bezüglich Stabilität genügen, kann ein Bersten des Behälters bei einer unglücklichen Verkettung von Umständen nicht mit völliger Sicherheit ausgeschlossen werden. Eine rigorose Abschätzung der Risiken bei Transporten, wie sie für die Risiken beim Betrieb von Kernkraftwerken durch die Rasmussen-Gruppe durchgeführt wurde, besteht noch nicht.

4.2. Bei der Lagerung

Sehr gering dürfte die Wahrscheinlichkeit für den Ablauf einer Ereigniskette sein, durch welche das gesamte radioaktive Inventar eines Endlagers, z.B. in einer Salzformation, schlagartig freigesetzt würde. Immerhin könnten auch diesbezügliche Abklärungen sehr nützlich sein.

An Hand eines hypothetischen Beispiels wurde in einer amerikanischen Studie⁹⁾ eine Risikoabschätzung für den Fall einer allmählichen Freisetzung des Inventars eines grossen Endlagers ($10'000 \text{ m}^3$ hoch-radioaktive Abfälle) an die Hydrosphäre durchgeführt. Die Freigabe erfolgt 100 Jahre nach der letzten Einlagerung über einen Zeitraum von 300 Jahren. Die zusätzlich zu erwartende Strahlendosis wird für eine Bevölkerung von 180'000 Personen berechnet. Aus der Berechnung ergibt sich, dass diese

Dosis beträchtlich unter dem in der Strahlenschutzgesetzgebung akzeptierten Höchstwert liegt. Das Risiko kann somit als akzeptabel bezeichnet werden.

Dies gilt auch für das Risiko durch die Beseitigung schwach radioaktiver Abfälle, falls streng darauf geachtet wird, dass auch die daraus resultierende Strahlenbelastung nur einen Bruchteil der akzeptierten Höchstwerte ausmacht.

4.3. Was heisst akzeptables Risiko?

Radioaktive Bestrahlung ruft im lebenden Organismus, je nach Dosis gewisse Wirkungen hervor. Der Zusammenhang zwischen Dosis und Wirkung ist noch nicht restlos geklärt, einig ist man sich jedoch, dass man vorsichtigerweise annehmen muss, dass die Wirkung mit der Dosis null beginnt. So gesehen bedeutet die natürliche radioaktive Strahlung ein Risiko. Man glaubt nämlich, dass etwa 5 % der Krebserkrankungen und 5 % der Mutationen von Keimzellen, welche ein Individuum während etwa 30 Jahren erwirbt, durch die natürliche radioaktive Strahlung hervorgerufen werden. Jede zusätzliche Strahlung erhöht nun das Risiko, ganz unabhängig von der Tatsache, dass die durch die natürliche radioaktive Strahlung erzeugten Dosen bereits Schwankungen unterworfen sind. Bei den akzeptierten Dosen ist die Risikoerhöhung gering, d.h. unterhalb der Nachweisgrenze statistischer Signifikanz.

Ein wesentliches Merkmal der durch radioaktive Strahlung hervorgerufenen Risiken besteht darin, dass sie zu einer Klasse von Risiken gehören, für welche eine Ursache - Wirkungs-Relation in konkreten Fällen nie nachvollziehbar sein wird, was verschiedene Probleme nicht zuletzt auch rechtlicher Natur aufwirft. Anschaulich heisst das, dass z.B. ein Individuum mit einem kongenitalen Defekt nie wird Schadenersatzforderungen stellen können, mit der Begründung, seine Vorfahren seien einer erhöhten Strahlenbelastung ausgesetzt gewesen. Im Lichte sol-

cher Ueberlegungen kann man sich fragen, ob akzeptable Risiken also für die einzelnen Individuen auch wirklich akzeptabel sind. Dies ist ganz offensichtlich kein wissenschaftliches Problem.

5. Kosten

Es sind bisher kaum Analysen über die zu erwartenden Gesamtkosten für die Lagerung und Beseitigung radioaktiver Abfälle bekannt geworden, dies wohl, weil angesichts der verschiedenen noch offenen Fragen irgendwelche Berechnungen nur spekulativen Charakter aufweisen könnten. Geht man aber umgekehrt vor und betrachtet die zur Verfügung stehenden Mitteln, so erkennt man, dass die Kostenfragen voraussichtlich nicht das primäre Problem bei der Abfallbeseitigung darstellen.

Nimmt man Aufwendungen von 0,1 Rappen pro Kilowattstunde aus Kernenergie für die Abfallbeseitigung an, so ergeben sich dafür z.B. in der Schweiz im Jahre 1985 (Kernkraftwerkleistung 5 GW) Mittel von 35 Mio. Franken, bei 0,5 Rappen pro Kilowattstunde, was immer noch tragbar erscheint, von 1,8 Milliarde Franken.

6. Künftige Aufgaben

Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, dass auf einigen Gebieten des ganzen Problemkreises eigentliche Forschungsarbeit geleistet werden muss, während auf anderen Gebieten noch Einzelfragen abzuklären sind.

In ihrem jüngsten Bericht gibt die "Working Group on Radioactive Waste Management" der kürzlich gegründeten Internationalen Energie Agentur einen Ueberblick über künftige Forschungspro-

gramme, an welchen die verschiedenen Länder der IEA teilnehmen können. Es sollen unter anderem

- Experimente ausgearbeitet werden, mit deren Hilfe die Stabilität potentieller Lagerstätten eruiert werden kann,
- eine grosse Zahl allgemeiner geologischer Studien und geologische Abklärungen in situ vorgenommen werden,
- die Behandlung von Abfällen, welche Transurane enthalten weiter untersucht werden,
- die Stilllegung von Kernkraftwerken und die Lagerung des damit verbundenen Abfalls untersucht werden.

Neben diesen technischen Fragen wird man sich künftig vermehrt Fragen politischer Art, welche den überregionalen und langfristigen Charakter des aufgeworfenen Problems behandeln, zuwenden müssen.

Literatur

- 1 J. Hamstra
Nuclear Safety, 16, (2), March-April 1975
- 2 High-Level Radioactive Waste Management Alternatives,
Battelle Pacific Northwest Laboratories, Richland,
Washington 99352
Mai 1974, ausgearbeitet für die USAEC unter Kontrakt
AT(45-1)-1830
- 3 W. Hunzinger
Vortrag gehalten am 17.2.1975 an der Universität Bern
in der Reihe "Probleme der Energieversorgung"
- 4 Nucleonics Week, April 10, 1975, p.3, April 17, 1975,
p.8
- 5 The Safety of Nuclear Power Reactors and Related Facili-
ties, USAEC, July 1973, erschienen als WASH - 1250
- 6 Zusammenfassung von 2) publiziert durch die USAEC als
WASH - 1297, p. 5
- 7 Management of Low- and Intermediate-Level Radioactive
Wastes IAEA 1970, p. 183 - 194
- 8 C. Zangger
Bulletin IAEA 16, (6), 1974, p. 17
- 9 Selbe Arbeit wie 6), p. 20