

BERICHTE DER SNG ZUR KERNENERGIE RAPPORTS DE LA SHSN SUR L'ENERGIE NUCLEAIRE

P 30089.

2

Beiheft zum Bulletin 1978/3 der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft
und der Schweizerischen Geisteswissenschaftlichen Gesellschaft
Supplément au Bulletin 1978/3 de la Société Helvétique des Sciences Naturelles
de la Société Suisse des Sciences Humaines

Bereits erschienen:

Strahlengefährdung durch Kernkraftwerke

(Erster Bericht) von Richard Braun, Hedi Fritz-Niggli, Werner Schmid, Pierre A. Tschumi, Gerhard Wagner, Rudolf Weber

Die thermischen Auswirkungen von Kernkraftwerken

(Zweiter Bericht) von Theo Ginsburg, Dieter Imboden, André Junod, Bruno Messerli, Matthias Winiger

Emission radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken im Normalbetrieb

(Dritter Bericht) von Josef Halter, Otto Huber, Heinz Hugo Loosli, Hans Oeschger, Guelfo Poretti, Jean Rossel, Albert Sittkus, Werner Stumm

Die Lagerung radioaktiver Abfälle

(Vierter Bericht) von Lukas Hauber, Rudolf Häusermann, Theodor Hügi, Werner Hunzinger, Heinrich Jäckli, Claude Lunke, Claude Vuilleumier

In Bearbeitung:

Technische und physikalische Grundlagen der Kernenergieerzeugung

Zur Frage der Standortwahl von Kernkraftwerken

Sicherheit der nuklearen Energieerzeugung

Der Brennstoffzyklus für Leichtwasserreaktoren

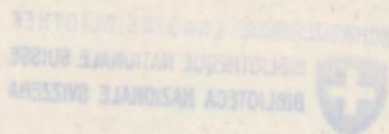
Alternative Energien

(Zu beziehen beim Generalsekretariat der SNG, Laupenstr. 10, 3001 Bern)

BERICHTE DER SNG ZUR KERNENERGIE RAPPORTS DE LA SHSN SUR L'ENERGIE NUCLEAIRE

u 2

P 30084



196 1630



Herausgegeben von der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft
(Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften)

Publié par la Société Helvétique des Sciences Naturelles
(Académie Suisse des Sciences)

Strahlengefährdung durch Kernkraftwerke

(Erster Bericht) von Richard Braun, Hedi Frits-Neggli, Werner Schenker,
Pierre A. Tschumi, Gerhard Wagner, Kurtell Weber

Die thermischen Auswirkungen von Kernkraftwerken

(Zweiter Bericht) von Theo Ginsburg, Dieter Imboden, André Junod,
Bruno Messerli, Matthias Wüger

Emission radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken im Normalbetrieb

(Dritter Bericht) von Josef Halter, Otto Huber, Heins Hugo Lüsli, He.
Gschiger, Guelfo Poretli, Jean Rosel, Albert Sirkus, Werner Stüssli

Die Lagerung radioaktiver Abfälle

(Vierter Bericht) von Lukas Hauber, Rudolf Häusermann, Theodor H. Ha.
Werner Hunzinger, Heinrich Jäckli, Claude Lanks, Claude Voilleumier

In Bearbeitung:

Technische und physikalische Grundlagen der Kernenergieerzeugung

Zur Frage der



SCHWEIZERISCHE LANDESBIBLIOTHEK
BIBLIOTHÈQUE NATIONALE SUISSE
BIBLIOTECA NAZIONALE SVIZZERA

Sicherheit der Kernenergieerzeugung

Der Brennstoffzyklus für Leichtwasserreaktoren

Alternative Energien

Copyright © 1979 by Schweizerische Naturforschende Gesellschaft, Berne
Printed in Switzerland

Seit die Kontroverse um Nutzen und Schaden von Kernkraftwerken bekannt ist, geschieht es, dass Wissenschaftler in der Öffentlichkeit widerstreitende Ansichten vertreten, wobei sie zugleich ihre wissenschaftliche Verantwortung auszuüben wollen, Konfliktlosigkeit, Anerkennung der eigenen Befähigung, die dem Problemkreis Atomkraftenergie – neben anderen – zugeordnet ist, zu bewahren. Diese Bestrebungen sind, neben der eigenen wissenschaftlichen Verantwortung, ein Anliegen der Schweizerischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft an der Universität Zürich. Er ging von der Überzeugung aus, dass es möglich ist, auf wissenschaftlicher Ebene Gegner und Befürworter von Kernkraftwerken auch Neutralen in strittigen Punkten zu einem Konsens zu bringen. Diese Bestrebungen sind, neben der eigenen wissenschaftlichen Verantwortung, ein Anliegen der Schweizerischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft an der Universität Zürich. Er ging von der Überzeugung aus, dass es möglich ist, auf wissenschaftlicher Ebene Gegner und Befürworter von Kernkraftwerken auch Neutralen in strittigen Punkten zu einem Konsens zu bringen.

Zum Geleit 5

Einführung 7

3. Bericht

Emission radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken im Normalbetrieb 9

4. Bericht

Die Lagerung radioaktiver Abfälle 39

Die Arbeiten, die ohne Verzug an die Hand genommen wurden, sind noch nicht abgeschlossen. Indessen liegen seit einiger Zeit Resultate vor, die nicht länger unveröffentlicht bleiben sollen. Der derzeitige Berner Ausschuss der SNG beschloss deshalb, die vorhandenen Berichte in Beilagen zum «Bulletin» der SNG und ihrer Schwesterorganisation, der Schweizerischen Geisteswissenschaftlichen Gesellschaft, laufend zu veröffentlichen. Er dankt der SGO für ihr bereitwilliges Einverständnis.

Die Verantwortung für die einzelnen Berichte tragen ausschliesslich die sie verantwortenden Wissenschaftler. Die Berichte gelten nicht als offizielle Stellungnahme der SNG; sie tritt bloss als Herausgeberin auf.

Den Wissenschaftlern, die sich an den verschiedenen Arbeitsgruppen beteiligten und sich weiterhin zur Verfügung stellen, gebührt für ihren Einsatz und ihre Verständlichkeitsbereitschaft aufrichtiger Dank. Die Schweizerische Naturwissenschaftliche Gesellschaft überreicht ihre Berichte der Öffentlichkeit in der Hoffnung, sie möchten Beachtung finden und zur Vernachlässigung der Auseinandersetzung um die Kernkraftwerke in unserem Lande beitragen.

Prof. E. Niggli
Zentralspräsident der SNG

Zum Geleit

Seit die Kontroverse um Nutzen und Schaden von Kernkraftwerken entbrannt ist, geschieht es, dass Wissenschaftler in der Öffentlichkeit widersprüchliche Ansichten vertreten, wobei sie zugleich ihre wissenschaftliche Autorität ins Spiel bringen. Damit wird das Bestreben um Sachlichkeit, das alle Wissenschaft auszeichnen sollte, kompromittiert. Angesichts der grossen Bedeutung, die dem Problemkreis Atomkernenergie — neben anderen grossen Problemen — heute beizumessen ist, nahm der ehemalige Genfer Ausschuss der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft an dieser Lage Anstoss. Er ging von der Überzeugung aus, dass es möglich sei, auf wissenschaftlicher Ebene Gegner und Befürworter von Kernkraftwerken, wie auch Neutrale, in strittigen Punkten zu einem Konsens zusammenzuführen. Im Frühsommer 1975 fasste der Ausschuss daher den Entschluss, Arbeitsgruppen aus Fachleuten verschiedener Einstellung zu bilden mit dem Auftrag, zu bestimmten mit den Kernkraftwerken verbundenen Fragen wissenschaftliche Antworten zu suchen, denen alle Beteiligten zuzustimmen vermögen. Dass diese Bestrebungen in einzelnen Punkten zu dem Ergebnis führen könnten, es gebe vom rein wissenschaftlichen Gesichtspunkt aus zur Zeit keine gesicherte Antwort, wurde ausdrücklich in Kauf genommen.

Die Arbeiten, die ohne Verzug an die Hand genommen wurden, sind noch nicht abgeschlossen. Indessen liegen seit einiger Zeit Resultate vor, die nicht länger unveröffentlicht bleiben sollen. Der derzeitige Berner Ausschuss der SNG beschloss deshalb, die vorhandenen Berichte in Beiheften zum «Bulletin» der SNG und ihrer Schwesterorganisation, der Schweizerischen Geisteswissenschaftlichen Gesellschaft, laufend zu veröffentlichen. Er dankt der SGG für ihr bereitwilliges Einverständnis.

Die Verantwortung für die einzelnen Berichte tragen ausschliesslich die sie unterzeichnenden Wissenschaftler. Die Berichte gelten nicht als offizielle Stellungnahme der SNG: sie tritt bloss als Herausgeberin auf.

Den Wissenschaftlern, die sich an den verschiedenen Arbeitsgruppen beteiligten und sich weiterhin zur Verfügung stellen, gebührt für ihren Einsatz und ihre Verständigungsbereitschaft aufrichtiger Dank. Die Schweizerische Naturforschende Gesellschaft übergibt ihre Berichte der Öffentlichkeit in der Hoffnung, sie möchten Beachtung finden und zur Versachlichung der Auseinandersetzung um die Kernkraftwerke in unserem Lande beitragen.

Prof. E. Niggli
Zentralpräsident der SNG

Einführung

Veranlassung

Angesichts der Kontroversen, welche über die friedliche Nutzung der Kernenergie entbrannt sind, ist die Öffentlichkeit ziemlich verunsichert. Zu den Stellungnahmen aus allen Richtungen gesellen sich die widersprüchlichsten Informationen; sogar die Meinungen der Wissenschaftler scheinen nicht übereinzustimmen.

Nun ist zu bemerken, dass die Uneinigkeit nicht die wissenschaftlichen Tatsachen, sondern deren Anwendung und die daraus geschlossenen Voraussagen betrifft. *Es handelt sich also eher um eine Meinungsdebatte als um eine wissenschaftliche Diskussion.*

Die Schweizerische Naturforschende Gesellschaft (S.N.G.) ist eine unabhängige Organisation, die für die Schweiz die Stellung einer Naturwissenschaftlichen Akademie einnimmt. *Sie hat sich zum Ziel gesetzt, der nicht spezialisierten Öffentlichkeit eine sichere und objektive Information zu vermitteln, unabhängig von jedem Interesseneinfluss und ohne jede philosophische, soziale oder politische Tendenz.*

Im vorliegenden Dokument nimmt die Gruppe «Kernenergie» der S.N.G. selber nicht Stellung. *Die stellt nur wissenschaftliche Tatsachen vor.* Selbstverständlich spielen zahlreiche nicht die exakten und Naturwissenschaften betreffende Gesichtspunkte in die Nukleardebatte hinein. *Es ist jedoch nicht Sache der S.N.G., die ökonomischen (Energiebedarf, Expansion, Rentabilität usw. betreffende) oder sozialpolitischen Aspekte zu behandeln.*

Arbeitsweise und Inhalt

Die Information wurde durch Arbeitsgruppen der S.N.G. zusammengestellt, welche den wissenschaftlichen Wert garantieren. Die Quellen dieser Information sind sowohl in den Texten wie in den Literaturverzeichnissen am Ende jedes Berichtes angeführt.

Diese befassen sich ausschliesslich mit wissenschaftlich festgestellten Tatsachen. Enthalten die konsultierten Unterlagen voneinander abweichende Informationen, so werden die Gründe der Unstimmigkeiten untersucht und nur die wirklich belegten Angaben berücksichtigt. Kann schliesslich ein Problem mit den heute verfügbaren Mitteln nicht gelöst werden, so wird die Information unter Hinweis auf ihre Unsicherheit

oder auf die in ihr enthaltenden Unzulänglichkeiten, und manchmal mit Empfehlungen für die noch notwendigen Forschungen, weitergegeben.

Obwohl die Arbeitsgruppen keine Meinung zu äussern haben, wurden sie so zusammengestellt, dass sowohl erklärte «Gegner» als auch «Befürworter» der Kernkraftwerke in ihnen vertreten sind. Die Resultate werden mit der Zustimmung *aller Mitglieder* der jeweiligen Gruppe, welche vorgängig diesem Verfahren zugestimmt haben, herausgegeben.

Die behandelten Fragen sind, im Rahmen des Möglichen, diejenigen, die sich der «Mann von der Strasse», der die Diskussionen verfolgt, stellt.

Aufbau

Die einzelnen Berichte entsprechen den verschiedenen Aspekten des Kernenergieproblems. Jedem Bericht ist eine Zusammenfassung vorangestellt. Das Wichtigste ist in Kursivschrift herausgehoben; Marginalien erleichtern das Auffinden.

Für eine rasche Orientierung wird man die Zusammenfassung benützen. Eine vollständigere Information findet sich im Text. Der Leser, der seine Kenntnisse erweitern und vertiefen möchte, kann die Quellenangaben im Literaturverzeichnis zu Rate ziehen.

Auf diese Weise hofft die Arbeitsgruppe «Kernenergie» der S.N.G. zur klaren und unparteilichen Information der Öffentlichkeit beizutragen.

Der Koordinator
der Arbeitsgruppe «Kernenergie»
Prof. G. de Haller

Genf, den 10. November 1978

Emission radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken im Normalbetrieb

1. Wieviel Radioaktivität wird von Kernkraftwerken bei Normal- betrieb an die Umwelt abgegeben?	17
2. Wie stark wird die abgegebene Radioaktivität in der Umgebung der Kernkraftwerke verdünnt? Wie gross ist die zusätzliche Jahresdosis in der Umgebung von Kernkraftwerken?	19
3. Vermachen einzelne langfristige Nachteile infolge Akkumulation über längere Zeiten schon heute eine Gefährdung?	20
4. Wie werden die radioaktiven Einwirkungen der Kernkraftwerke und die Wirkungen der Radioaktivität überwacht, und wie ist die Überwachung organisiert?	23
5. Bewirkt die bei Normalbetrieb von Kernkraftwerken abgegebene Radioaktivität gesundheitliche oder genetische Schäden für die in der Umgebung wohnende Bevölkerung?	26
6. Wie wird sich in Zukunft weltweit die Emission radioaktiver Stoffe durch Kernanlagen entwickeln, und wie stark wird dadurch die Strahlungsbelastung für die Menschen ansteigen?	28
Anhang: Begriffsbestimmungen	33
Literaturverzeichnis	37

Der Bericht wurde erarbeitet und gutgeheissen von

Dr. Josef Halter, Freiburg i. Ue.
Prof. Dr. Otto Huber, Freiburg i. Ue.
Dr. Heinz Hugo Loosli, Bern
Prof. Dr. Hans Oeschger, Bern
PD Dr. Guelfo Poretti, Bern
Prof. Dr. Jean Rossel, Neuenburg
Dr. Albert Sittkus, Freiburg i. Br.
Prof. Dr. Werner Stumm, Zürich

Inhalt

Zusammenfassung	13
Einleitung	15
1. Wieviel Radioaktivität wird von Kernkraftwerken bei Normalbetrieb an die Umwelt abgegeben?	17
2. Wie stark wird die abgegebene Radioaktivität in der Umgebung der Kernkraftwerke verdünnt? Wie gross ist die zusätzliche Jahresdosis in der Umgebung von Kernkraftwerken?	19
3. Verursachen einzelne langlebige Nuklide infolge Akkumulation über längere Zeiten schon heute eine Gefährdung?	20
4. Wie werden die radioaktiven Emissionen der Kernkraftwerke und die Wirkungen der Radioaktivität überwacht, und wie ist die Überwachung organisiert?	23
5. Bewirkt die bei Normalbetrieb von Kernkraftwerken abgegebene Radioaktivität gesundheitliche oder genetische Schäden für die in der Umgebung wohnende Bevölkerung?	26
6. Wie wird sich in Zukunft weltweit die Emission radioaktiver Stoffe durch Kernanlagen entwickeln, und wie stark wird dadurch die Strahlenbelastung für die Menschen ansteigen?	28
Anhang: Begriffsbestimmungen	33
Literaturverzeichnis	37

Zusammenfassung

Einleitung (Seite 15)

Der vorliegende Bericht stützt sich weitgehend auf die in den letzten Jahren durchgeführten und veröffentlichten *Messungen und Berechnungen der Eidg. Kommission zur Überwachung der Radioaktivität* (KUER) unter Mitarbeit der Abteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (ASK). Unsere Arbeitsgruppe stellte sich die Aufgabe, heutige Kenntnisse über die Abgaben von Radioaktivität durch die Kernanlagen und deren Auswirkungen *bei Normalbetrieb* zusammenzustellen.

Messungen und Berechnungen der KUER

Emissionen bei Normalbetrieb der Kernanlagen

Frage 1: Wieviel Radioaktivität wird von Kernkraftwerken bei Normalbetrieb an die Umgebung abgegeben? (Seite 17)

Die von den Schweizer Kernreaktoren mit der Abluft und mit dem Abwasser *abgegebenen Aktivitäten* werden regelmässig gemessen und in den KUER-Berichten veröffentlicht. Als Beispiel sind die Abgabeberechnungen der Schweizer Kernreaktoren im Jahr 1976 aufgeführt. Die effektiven Abgaben waren immer wesentlich kleiner als die nach den gültigen Betriebsbewilligungen erlaubten *Grenzwerte*.

abgegebene Aktivitäten

Grenzwerte

Frage 2: Wie stark wird die abgegebene Radioaktivität in der Umgebung der Kernkraftwerke verdünnt? Wie gross ist die zusätzliche Jahresdosis in der Umgebung von Kernkraftwerken? (Seite 19)

Die abgegebenen *radioaktiven Gase* werden nach dem Kaminaustritt verdünnt. Die *Konzentration in der Abluftfahne* ist von der Entfernung, von den herrschenden meteorologischen Verhältnissen, von der Topographie der Umgebung und von der Kaminhöhe abhängig. Daher werden im allgemeinen nur *mittlere zusätzliche Jahresdosen* berechnet. Diese Dosen nehmen mit der Entfernung rasch ab. Für die kritischen Orte des Reaktors Mühleberg ergaben die Berechnungen z. B. im Jahr 1976 zusätzliche Dosen von höchstens einigen mrem (millirem) pro Jahr, für Beznau weniger als 0,3 mrem pro Jahr.

Konzentration radioaktiver Gase in der Abluftfahne

mittlere zusätzliche Jahresdosen

Die *mit dem Abwasser abgegebenen Aktivitäten* werden ebenfalls verdünnt. Die dadurch bewirkte totale (hypothetische) zusätzliche Dosis durch Trinkwasser aus der Aare unterhalb Mühleberg oder Beznau ist für 1976 kleiner als 0,3 mrem pro Jahr.

Aktivitäten im Abwasser

Frage 3: Verursachen einzelne langlebige Nuklide infolge Akkumulation über längere Zeiten schon heute eine Gefährdung? (Seite 20)

Die Konzentration von *langlebigen Radionukliden*, die sich zum Teil weltweit vermischen, werden ebenfalls überwacht. Das Verhalten dieser

langlebige Radionuklide

H-3, Kr-85,
Sr-90, Cs-137,
C-14

Nuklide in unserer Umwelt kann abgeschätzt werden. Für H-3, Kr-85, Sr-90, Cs-137 und C-14 werden einige quantitative Angaben über die heutigen Konzentrationen gemacht. Die bisher vom Beitrag der Kernenergie herrührenden zusätzlichen Strahlenbelastungen dieser Nuklide werden als unbedeutend angesehen.

Frage 4: Wie werden die Emissionen der Kernkraftwerke und die möglichen Auswirkungen der Radioaktivität überwacht, und wie ist die Überwachung organisiert? (Seite 23)

Überwachung
durch ASK
und KUER

Die ASK und die KUER prüfen gemeinsam, ob die Vorschriften von den Kernanlagen eingehalten werden. Während für die Abgaben vor allem die ASK zuständig ist, werden die Konzentrationen in unserer Umwelt vorwiegend von der KUER überwacht. Die *wesentlichen Pfade*, über welche Radioaktivität auf die Menschen einwirken kann, werden einbezogen: Luft, Wasser, Boden und Nahrung.

wesentliche
Pfade

gesundheitliche
und genetische
Schäden

Frage 5: Bewirkt die bei Normalbetrieb von Kernkraftwerken abgegebene Radioaktivität gesundheitliche oder genetische Schäden für die in der Umgebung wohnende Bevölkerung? (Seite 26)

Schwankungen
der natürlichen
Strahlung

Die heutige Belastung von höchstens einigen mrem pro Jahr (eine Dosisleistung, die im *Schwankungsbereich der natürlichen Strahlung* liegt) in der Umgebung der Kernkraftwerke fällt für die dort lebende Bevölkerung nicht ins Gewicht.

Frage 6: Wie wird sich in der Zukunft weltweit die Emission radioaktiver Stoffe durch Kernanlagen entwickeln, und wie stark wird dadurch die Strahlenbelastung für die Menschen ansteigen? (Seite 28)

Prognosen der
Strahlen-
belastung

Die *Prognosen* für die bis ins Jahr 2000 installierte Reaktorleistung sind unsicher. Trotzdem können Abschätzungen der zu erwartenden Abgaberraten und Größenordnungen für *mittlere zusätzliche Strahlenbelastungen* angegeben werden. Dafür sind vor allem der Konzentrationsverlauf und das Verhalten der *langlebigen Nuklide* zu beachten (z. B. H-3, Kr-85, C-14 und J-129). Die Voraussagen zeigen, dass die zusätzliche mittlere Strahlenbelastung der Gesamtbevölkerung bis Ende dieses Jahrhunderts voraussichtlich tolerierbar sein wird. Der Anstieg der Aktivität von C-14 und Kr-85 in der Atmosphäre ist allerdings besonders zu überwachen. Falls weitere *Rückhalteverfahren* für die langlebigen Isotope bei den *Wiederaufbereitungsanlagen* von Kernbrennstoff zur Reduktion der Lokaldosen eingeführt würden, könnte auch die vorausgesagte mittlere Belastung der Weltbevölkerung verringert werden.

langlebige
Nuklide

C-14, Kr-85

Rückhalte-
verfahren in
Wiederaufberei-
tungsanlagen

Einleitung

Die Schweizerische Naturforschende Gesellschaft hat im Sinne einer objektiven Standortbestimmung diesen Bericht zum Thema der Emission radioaktiver Stoffe durch Kernkraftwerke in Auftrag gegeben. Er ist ein Teil einer umfassenden Zusammenstellung von Problemen, die im Zusammenhang mit dem Bau von Kernkraftwerken in der Schweiz zu berücksichtigen sind.

Die Aufgabe dieser Arbeitsgruppe wurde dadurch erleichtert, dass die KUER (Eidg. Kommission zur Überwachung der Radioaktivität) seit Jahren umfassende *Messungen der Radioaktivität* in Luft, Wasser und Biosphäre durchgeführt, die Strahlenbelastung der Schweizer Bevölkerung ermittelt und die Resultate ihrer Untersuchungen in den jährlichen Berichten zuhanden des Bundesrates ausführlich publiziert hat. Ebenfalls nützlich erwiesen sich die von einigen anderen schweizerischen Institutionen seit Jahren durchgeführten Studien über Probleme der Radioaktivität in unserer Umwelt.

KUER,
Messungen der
Radioaktivität

Der vorliegende Bericht befasst sich vor allem damit,

1. die von Schweizer Kernkraftwerken *bei Normalbetrieb* an die Umwelt *abgegebenen Mengen radioaktiver Stoffe* anzugeben,
2. das weitere Verhalten der von den Kernkraftwerken an die Umwelt abgegebenen wichtigsten Isotope zu charakterisieren, und
3. auf die in der Schweiz bestehenden Überwachungs- und Messprogramme hinzuweisen.

bei Normal-
betrieb
abgegebene
Mengen radio-
aktiver Stoffe

Um die Bedeutung der von den Emissionen herrührenden Strahlenbelastung der Bevölkerung zu beurteilen, befasst sich dieser Bericht auch mit der Frage, inwiefern daraus *gesundheitliche und genetische Schäden* für die in der Umgebung der Kernkraftwerke wohnende Bevölkerung resultieren.

gesundheitliche
und genetische
Schäden

Schliesslich wird auch noch die Frage angegangen, wie sich voraussichtlich in der *Zukunft* die Emissionen radioaktiver Stoffe durch Kernanlagen entwickeln werden, und was die weltweit verteilten Radioaktivitäten für den Menschen und die Umwelt bedeuten.

zukünftige
Strahlen-
belastung

Wir sind uns der Tatsache bewusst, dass die in diesem Bericht *angegebenen Werte gewisse Ungenauigkeiten* aufweisen. Diese können auf zweierlei Ursachen zurückgeführt werden. Einerseits treten bei der Bestimmung der Messwerte systembedingte Fehler auf, z. B. statistischer Art. Andererseits basieren die international festgelegten Grenzwerte für die Strahlenbelastung auf Vereinfachungen und Modellvorstellungen mit begrenzter Genauigkeit (z. B. Qualitätsfaktoren für die Äquivalentdosis). Obschon die Werte des Berichtes also nur innerhalb solcher Fehlergrenzen als

Ungenauigkeiten
der angegebenen
Werte

richtig angesehen werden können, messen wir den quantitativen Angaben eine grosse Bedeutung zu. Nur diese erlauben nämlich, die Gefährdung durch radioaktive Abgaben im Vergleich mit anderen Gefährdungen zu beurteilen.

Im Anhang sind wichtige Begriffe definiert; die Texte stammen zum grössten Teil aus der Strahlenschutzverordnung vom 30. Juni 1976.

Abgrenzung des Problemkreises

Unsere Arbeitsgruppe hat sich auf die Emissionen beim Normalbetrieb der nuklearen Installationen beschränkt. Unfälle und Sabotage bei der Energiegewinnung, beim Transport radioaktiven Materials, in Aufbereitungsanlagen und bei der Lagerung sowie die Emissionen und ihre Auswirkungen beim Uranbergbau sind in unseren Diskussionen nicht berücksichtigt.

Andere Arbeitsgruppen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft setzen sich mit folgenden Problemen auseinander, welche direkt mit unserem Arbeitsgebiet zusammenhängen:

- Auswirkungen möglicher Unfälle
siehe SNG-Bericht *Sicherheit der nuklearen Energieerzeugung*
- radioaktive Abfälle und deren Lagerung
siehe SNG-Bericht *Die Lagerung radioaktiver Abfälle*
- biologische Strahlengefährdung durch Kernkraftwerke
siehe SNG-Bericht *Strahlengefährdung durch Kernkraftwerke*, Beiheft zum Bulletin 1978/1 der SNG
- andere Emissionen, vor allem die Wärmeabgabe und deren Auswirkungen
siehe SNG-Bericht *Die thermischen Auswirkungen von Kernkraftwerken*, Beiheft zum Bulletin 1978/1 der SNG.

* * *

1. Wieviel Radioaktivität wird von Kernkraftwerken bei Normalbetrieb an die Umwelt abgegeben?

Aus den Kernkraftwerken gelangen radioaktive Stoffe *mit dem Abwasser und der Abluft* in die Umgebung. Die Abgaberaten hängen vom Reaktortyp, vom Zustand und von der Art der Brennelemente, von der Behandlung der Flüssigkeiten oder Gase vor ihrer Abgabe sowie von weiteren Faktoren ab.

Abgabe mit dem Abwasser und der Abluft

Bei den Siedewasserreaktoren (z. B. Mühleberg) erfolgt die Abgabe von Radionukliden (= radioaktive Atomarten) vorwiegend über die Abluft, bei Druckwasserreaktoren (z. B. Beznau I und II) über die Abluft und über das Abwasser. Die Jahresabgaben werden gemessen und seit 1974 in den KUER-Berichten veröffentlicht (LV 1)*). In Tabelle 1 sind als *Beispiel die Abgaben im Jahre 1976* aufgeführt.

Tabelle 1: (Tabelle 3 des Jahresberichtes der KUER 1976)
Abgaben aus Schweizer Kernreaktoren an die Umgebung, 1976 (ASK)

Beispiele von Abgaberaten und Vergleich mit erlaubten Grenzwerten

Kernanlagen ¹⁾	Art der Abgaben ²⁾	Abgaberaten Ci pro Jahr (= Curie p. J.)	Erlaubter Grenzwert nach gültiger Betriebsbewilligung ³⁾ (Ci pro Jahr)
Beznau I + II			
Abluft	Xe-133-Aeq.	$1,7 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^6$
	J-131	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^1$
Abwasser	H-3	$7,1 \cdot 10^2$	$8,5 \cdot 10^4$
	Sr-90-Aeq.	$1,7 \cdot 10^{-1}$	2,8
Mühleberg			
Abluft	Xe-133-Aeq.	$1,2 \cdot 10^5$	$9,5 \cdot 10^6$
	J-131	$7,5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^1$
Abwasser	H-3	7,4	$4,8 \cdot 10^4$
	Sr-90-Aeq.	$3,8 \cdot 10^{-1}$	1,5
E I R			
Abluft	Xe-133-Aeq.	$2,1 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^7$
	J-131	$6,8 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^2$
Abwasser	Sr-90-Aeq.	$5,2 \cdot 10^{-2}$	2,8

1) Leistungen: Beznau I : 1130 MWth (= Mega Watt thermische Leistung)
Beznau II : 1130 MWth
Mühleberg: 997 MWth

2) Die Zahl (z. B. 133) hinter dem Symbol eines Elements (z. B. Xe) bedeutet die Massenzahl des Isotops.

3) Für die Berechnung wurden folgende langzeitige Ausbreitungsfaktoren angenommen: Beznau I und II: $5 \cdot 10^{-6}$ s/m³, EIR Würenlingen: $5 \cdot 10^{-7}$ s/m³ (Erläuterungen zu den Ausbreitungsfaktoren: siehe Seite 19).

*) Der Hinweis auf Literatur geschieht wie folgt: LV bedeutet Literaturverzeichnis, nachfolgende Nummern verweisen auf die unter den entsprechenden Nummern im Literaturverzeichnis aufgeführten Werke.

Aequivalentdosis

Die abgegebene Aktivität besteht aus radioaktiven Nukliden, die sich bezüglich ihres chemischen Verhaltens (verschiedene Elemente und chemische Verbindungen) und physikalischen Verhaltens (Art und Energie der abgegebenen Strahlung, Halbwertszeit) wesentlich voneinander unterscheiden. Von jedem dieser Nuklide ist bekannt, welche *Aequivalentdosis* eine bestimmte Konzentration in der Luft (durch externe Bestrahlung und Inhalation) und im Wasser (durch Ingestion) im menschlichen Körper hervorruft. Die Aequivalentdosis ist eine Bewertungsgrundlage für das Strahlenrisiko. Zur Beurteilung des Einflusses eines Nuklidgemisches auf den menschlichen Körper werden die einzelnen Komponenten auf Xe-133 — bzw. Sr-90 — Aequivalent umgerechnet und addiert. Xe-Aequivalent (Sr-90-Aequivalent) bedeutet diejenige Aktivität an Xe-133 (Sr-90) in der Atemluft (im Trinkwasser), welche die gleiche Dosis hervorruft wie die angegebene Aktivität des betreffenden Nuklids. In Tabelle 1 sind die so vereinheitlichten gesamten Jahresabgaben mit Abluft und Abwasser und die nach der Betriebsbewilligung erlaubten Maximalabgaben zusammengestellt.

Während 1976 in der Abluft von Beznau und Mühleberg die Aktivität vorwiegend vom Xe-133 stammte, war sie beim EIR (Eidg. Institut für Reaktorforschung) vorwiegend dem Ar-41 vom Reaktor Diorit zuzuschreiben. Mit der Stilllegung der Anlage Diorit am 8. Juli 1977 gingen die gasförmigen Emissionen des EIR stark zurück. In Mühleberg wurden nach dem Brennstoffwechsel im Sommer 1976 ca. 100mal geringere gasförmige Abgaberaten gemessen, so dass im Jahre 1977 für Mühleberg und für Beznau die gleiche Grössenordnung bezüglich der Abgaben mit der Abluft gemessen wurden.

effektive
Abgaben kleiner
als Grenzwerte

Aus der Tabelle 1 und aus den entsprechenden Zusammenstellungen früherer KUER-Berichte ist ersichtlich, dass die *effektiven Abgaben* der schweizerischen Reaktoren immer wesentlich *kleiner waren als* die nach den gültigen Betriebsbewilligungen *erlaubten Grenzwerte*.

Abgaben durch
Wiederaufbe-
reitungsanlagen

Der grösste Teil der in den Brennelementen entstandenen radioaktiven Spaltprodukte bleibt in diesen eingeschlossen. Die Brennelemente werden nach ca. 3 Jahren Betriebsdauer in den Reaktoren ausgewechselt und nach einer Zwischenlagerung zur Wiederaufbereitung ins Ausland transportiert. Die bis zur Wiederaufbereitung noch nicht zerfallenen langlebigen Isotope werden teilweise mit Abluft und Abwasser *an die Umgebung der Wiederaufbereitungsanlagen* abgegeben (vgl. auch Fragen 2 und 6).

2. Wie stark wird die abgegebene Radioaktivität in der Umgebung der Kernkraftwerke verdünnt?

Wie gross ist die zusätzliche Jahresdosis in der Umgebung von Kernkraftwerken?

Abgaben an die Atmosphäre

Mit der Abluft werden hauptsächlich kurzlebige Edelgase und Jod-131 (in gasförmigem Zustand und bereits teilweise an Aerosolteilchen angelagert) abgegeben; andere an Aerosolteilchen angelagerte Aktivitäten sind von untergeordneter Bedeutung.

Die abgegebenen *radioaktiven Gase* werden nach dem Kaminaustritt verdünnt; die Konzentration in der Abluftfahne ist vor allem von der Entfernung, von den herrschenden meteorologischen Verhältnissen, von der Topographie der Umgebung und von der Kaminhöhe abhängig. An jedem Ort der Umgebung ändert sich die Konzentration der zusätzlichen Radioaktivität in der Luft (*Immission*) als Funktion der Zeit. Daher werden im allgemeinen nur mittlere zusätzliche Jahresdosen bestimmt, für welche Mittelwerte für die Verdünnung über ein ganzes Jahr benutzt werden. Als *kritischer Ort* wird diejenige Stelle der Umgebung bezeichnet, an der im Jahresmittel die grösste Immission auftritt. So bedeutet der in der Legende zu Tabelle 1 angegebene Ausbreitungsfaktor von $5 \cdot 10^{-6}$ s/m³ für Beznau die Annahme, dass am kritischen Ort im Jahresmittel eine Konzentration in der Luft von $5 \cdot 10^{-6}$ Ci/m³ gefunden würde, falls 1 Ci/s abgegeben würde.

radioaktive Gase
werden verdünnt

Konzentration
in der
Abluftfahne

Die Immissionen führen in der Umgebung von Kernkraftwerken zu *zusätzlichen Dosen*, die mit zunehmender Entfernung abnehmen. Für das Kernkraftwerk *Mühleberg* ergaben z. B. für das Jahr 1976 die Berechnungen am kritischen Ort, «Ufem Horn», eine zusätzliche Jahresdosis von 3 mrem (= 3 millirem) (LV 1). Das Gebiet mit mehr als 1 mrem pro Jahr beschränkte sich auf ca. 1 km². Direkte Messungen der zusätzlichen Dosis am kritischen Ort, die nahe der Nachweisgrenze liegt und für welche deshalb nur eine obere Grenze angegeben werden kann, bestätigen die Grössenordnung dieser Berechnungen (LV 1). Ferner haben Messungen der Xe-133-Konzentrationen in der Umgebung des Kernkraftwerkes Mühleberg bestätigt, dass die Grössenordnung der für die Dosis-Berechnungen verwendeten Ausbreitungsfaktoren richtig ist (LV 2). In der Umgebung des Kernkraftwerkes *Beznau* waren im Jahr 1976 nach den Berechnungen die Ortsdosen überall kleiner als 0,3 mrem pro Jahr. Dieser Wert liegt unter der Nachweisgrenze von einigen mrem pro Jahr; die Messungen ergaben keine vom Untergrund abweichende Dosis.

Zusätzliche
Jahresdosen
in der Umgebung

von Mühleberg

von Beznau

Das *gasförmige J-131* lagert sich in der Luft an *Aerosole* an und wird mit diesen auf den Erdboden abgesetzt. Die grössten *Dosen* erzeugt es auf dem

Zusätzliche
Dosis von
J-131 in der
Schilddrüse

Weg Luft—Gras—Milch in der Schilddrüse von kleinen Kindern. Die stärkste Jodfreisetzung aus Kernkraftwerken erfolgt beim Öffnen des Reaktordruckgefässes. Messungen der KUER nach dem Abstellen des Kernkraftwerkes Mühleberg für den Brennelementwechsel im Juli/August 1975 zeigten in der Milch vom kritischen Ort («Ufem Horn») J-131-Aktivitäten bis maximal 36 pCi/l Milch. Hätte ein Kleinkind in der Zeit vom 22. Juli bis 22. August dauernd Milch von «Ufem Horn» getrunken, so hätte es eine Dosis von rund 4 mrem in der Schilddrüse akkumuliert (LV 1). Im Jahr 1976 schwankte die J-131-Konzentration während der Stillstandsperiode zwischen 0,1 und 4 pCi/l Milch.

Abgaben an die Hydrosphäre

Aktivitäten im
Abwasser

Mit dem Abwasser wird ein Nuklidgemisch abgegeben, dessen einzelne Komponenten sich chemisch sehr verschiedenartig verhalten. Sr-90 hat eine lange Halbwertszeit von 28 Jahren und wird in den Knochen eingebaut, wo auch das besonders strahlenempfindliche blutbildende Knochenmark bestrahlt wird. Sr-90 ist deshalb unter den abgegebenen Nukliden eines der gefährlichsten. Damit man eine obere Grenze für die Strahlenbelastung durch das Abwasser angeben kann, wird die Aktivität eines nicht identifizierten Nuklidgemisches ganz dem Sr-90 zugeschrieben.

Zusätzliche
Dosis durch
Aarewasser

Analysen von Stichproben lassen darauf schliessen, dass der grösste Teil dieser Aktivität von weniger radiotoxischen Nukliden stammt. Die Dosis (hypothetisch) durch Konsum von Wasser ausschliesslich aus der Aare unterhalb Beznau und Mühleberg — unaufbereitetes Aarewasser wird allerdings nicht getrunken — ist z. B. für 1976 kleiner als 0,3 mrem pro Jahr (LV 1).

3. Verursachen einzelne langlebige Nuklide infolge Akkumulation über längere Zeiten schon heute eine Gefährdung?

Tritium (H-3; Halbwertszeit: 12,3 Jahre)

Tritium in der
Aare unterhalb
Beznau

Tritium als Isotop des Wasserstoffs unterscheidet sich von diesem chemisch nicht und verteilt sich deshalb weltweit in den Wasserstoffverbindungen, speziell auch im Wasser. Das gegenwärtig vorhandene H-3 ist teils durch natürliche Produktion durch die kosmische Strahlung, grösstenteils jedoch durch Atombombenexplosionen entstanden. Daneben ist zur Zeit die Abgabe aus Kernkraftwerken von untergeordneter Bedeutung. Aus dem Emissionswert (Tab. 1) lässt sich berechnen, dass die mittlere Erhöhung der Konzentration von H-3 im Aarewasser durch die Kernkraftwerke Beznau I und II rund 50 pCi/l beträgt. Die Konzentration an

Tritium in Proben von Aarewasser ober- und unterhalb Beznau — wie auch im Regenwasser — liegt zwischen 300 und 1000 pCi/l. Eine *signifikante Zunahme an Tritium* durch die Abwässer der Kernkraftwerke Beznau konnte *nicht nachgewiesen* werden.

Die Konzentration im Trinkwasser, die zu einer Dosis von 20 mrem/Jahr (vgl. Seite 26) führen würde, beträgt $1,2 \cdot 10^5$ pCi H-3/l.

Krypton (Kr-85; Halbwertszeit: 10,7 Jahre)

Kr-85, ein radioaktives Edelgasisotop, entsteht bei der Uranspaltung. Der grösste Teil des entstandenen Kr-85 bleibt im Brennstoff, und nur ein *kleiner Teil wird* beim Normalbetrieb *von den Kernreaktoren abgegeben*. Typische Abgabewerte von 1000 MWe Reaktoren liegen in der Grössenordnung von 1000 Ci pro Jahr (LV 1, 3, 4). Die daraus berechneten *Ortsdosen* sind auch für die am stärksten exponierte Bevölkerung kleiner als 1 mrem pro Jahr. Das in den Brennelementen zurückgebliebene Kr-85 wird nach einer Abkühlzeit der Brennelemente von den Aufbereitungsanlagen nach der Bearbeitung an die Atmosphäre abgegeben. Da die *Abgabewerte von Aufbereitungsanlagen* bis 10^7 Ci pro Jahr (für ca. 1500 t Brennstoff-Aufbereitung pro Jahr) steigen können (LV 3, 5), werden gegenwärtig zur Vermeidung erhöhter Lokaldosen Rückhalteverfahren für Kr-85 erprobt.

Ortsdosen
durch Kr-85

von
Kernreaktoren

von Wiederauf-
bereitungs-
anlagen

Als Isotop eines Edelgases akkumuliert sich alles Kr-85 in der Atmosphäre, aus der es ausschliesslich durch radioaktiven Zerfall wieder verschwinden kann. Innerhalb weniger Monate wird neu in die Atmosphäre gebrachtes Kr-85 gut in einer Hemisphäre durchmischt, wogegen die Vermischung mit der Luft der anderen Halbkugel einige Jahre dauert. Deshalb ist die heutige Kr-85-Konzentration in der Luft der Südhalbkugel um ca. 20% geringer als in derjenigen der Nordhalbkugel. Kr-85 ist also praktisch weltweit homogen vermischt. Kurzfristige Schwankungen treten allerdings in der Nähe von Kernanlagen an Orten auf, welche von der Abluftfahne erreicht werden. Die *heutige Kr-85-Konzentration* in der Luft beträgt ca. 17 pCi/m^3 (LV 6, 7), was einer *zusätzlichen Ganzkörper-Dosis* von ca. $5 \cdot 10^{-4}$ mrem pro Jahr entspricht (LV 3, 8, 9, 10). Diese ist gegenüber der natürlichen Strahlenbelastung *vernachlässigbar*.

weltweite
Kr-85-Konzen-
tration,
zusätzliche
Dosis

Da beim Zerfall von Kr-85 die Luft ionisiert wird, *trägt Kr-85 in geringem Masse zur elektrischen Leitfähigkeit der Luft bei*.

Abschätzungen (LV 11) zeigen, dass die heutige Kr-85-Konzentration eine zusätzliche Ionenproduktion ergibt, die auf Meereshöhe ca. 2 Promille der Erzeugungsrate von Ionen durch die kosmische Strahlung ausmacht. Dabei ist die Ionisation der Luft durch die Strahlung aus dem Erdboden (nur über dem Festland) und durch natürliche Radionuklide in der Luft (vor allem Radon) nicht eingerechnet. Ob diese Erhöhung um 2% einen Einfluss auf das Wetter oder auf das Klima haben kann oder nicht, ist nicht bekannt.

Beitrag zur
Luftionisation
durch Kr-85

Strontium (Sr-90; Halbwertszeit: 28 Jahre) und Caesium (Cs-137; Halbwertszeit: 30 Jahre)

Zusätzliche
Dosis durch
Sr-90 und
Cs-137 im
Aarewasser

Aus den Abgabewerten lässt sich die mittlere *Erhöhung der Konzentration dieser Isotope in der Aare* unterhalb Beznau zu 0,005 pCi/l bzw. 0,1 pCi/l errechnen. Diese Erhöhungen würden selbst bei direkter jahrelanger Benützung des Aarewassers als Trinkwasser zusammen zu einer *zusätzlichen Strahlenbelastung* von weniger als 0,1 mrem pro Jahr führen. Durch Ablagerung im Sediment und Aufnahme *durch Organismen* könnten *Anreicherungen* in diesen erfolgen. Zur Kontrolle werden von der KUER Aktivitäten in Plankton und Seston, Sediment, Wasserpflanzen und Fischen aus dem Klingnauer Stausee gemessen. Die gegenwärtigen Aktivitätswerte können mit solchen vor Inbetriebnahme der Kernkraftwerke Beznau verglichen werden (siehe Tabelle 2) (LV 12).

Betaaktivität
in Pflanzen und
Fischen

Tabelle 2: Betaaktivität in Proben aus dem Stausee Klingnau (pCi/g Trockensubstanz)

	Schwebestoffe	Sediment	Wasserpflanzen	Fischfleisch
1963	71 bis 238	99 bis 120	84 bis 152	2,5 bis 2,6
1966	15 bis 106	14 bis 16	73 bis 102	1,8 bis 2,4
1975/76	20 bis 33	24	23	3,0 bis 3,3
K-40 (1975)	18 bis 37	30	11	2,0 bis 3,0

Beitrag durch
natürliches K-40

Die höheren Aktivitäten der früheren Jahre sind den Ausfallprodukten aus den Atombombenserien der Jahre 1961/62 zuzuschreiben. So betrug z. B. im Jahr 1963 die mittlere Konzentration an Cs-137 im Regenwasser der verschiedenen Sammelstationen 30 bis 50 pCi/l. Gegenwärtig aber ist *praktisch die ganze Betaaktivität auf das natürliche K-40 zurückzuführen.*

Keine Erhöhung
von Sr-90 und
Cs-137 in
Boden-,
Getreide-
und Grasproben

Die KUER-Messungen von *Boden-, Getreide- und Grasproben* aus der Umgebung der Kernkraftwerke lassen auch *keine Erhöhung an Cs-137- und Sr-90-Aktivität* gegenüber anderen Stellen des Mittellandes erkennen.

Kohlenstoff (C-14; Halbwertszeit: 5700 Jahre)

Bisher sind nur für wenige Kernreaktoren Abgabewerte für C-14 gemessen worden (z. B. LV 2, 13—16). Diese sind wesentlich kleiner als diejenigen von radioaktiven Edelgasen. Deshalb trägt C-14 in der Abluft eines Kernreaktors nicht viel zur zusätzlichen Lokaldosis in der Umgebung eines Kernkraftwerkes bei. Das *radioaktive $^{14}\text{CO}_2$* vermischt sich weltweit mit dem inaktiven CO_2 und *gelangt in gleicher Konzentration in alle Pflanzen, Tiere und den Menschen.* Dabei ist zu beachten, dass die CO_2 -Moleküle nach einer mittleren Aufenthaltsdauer von ca. 7 Jahren in der Atmosphäre

^{14}C in Pflanzen,
Tieren,
Menschen

mit dem Ozean ausgetauscht werden. Dieser Prozess führt zu einer Verdünnung der C-14-Aktivität in der Atmosphäre. So hat man gefunden, dass nur ca. 2% des durch die kosmische Strahlung produzierten C-14 in der Atmosphäre sind; über 90% des natürlichen C-14-Inventars befinden sich in der Tiefsee.

Heute macht die *interne Belastung durch das C-14*, das von früheren atmosphärischen *Kernexplosionen* stammt, noch ca. 0,3 mrem pro Jahr Ganzkörper-Dosis aus (LV 2), während dieser Anteil im Jahre 1963 ungefähr gleich gross war wie derjenige des natürlichen C-14 (1 mrem pro Jahr). Abschätzungen ergeben, dass das C-14 der *Nuklearindustrie* heute weltweit einen Beitrag in der Grössenordnung von ca. 0,002 mrem pro Jahr (LV 8) ausmacht.

interne Dosis
durch C-14

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass auch der *Aktivitätsverlauf langlebiger Radioisotope überwacht wird*, und dass ihr Verhalten in der Umwelt abgeschätzt werden kann. Eine allmähliche Zunahme der Aktivität infolge Anreicherung in der Biosphäre könnte festgestellt werden, bevor sie ein gefährliches Ausmass erreichen würde.

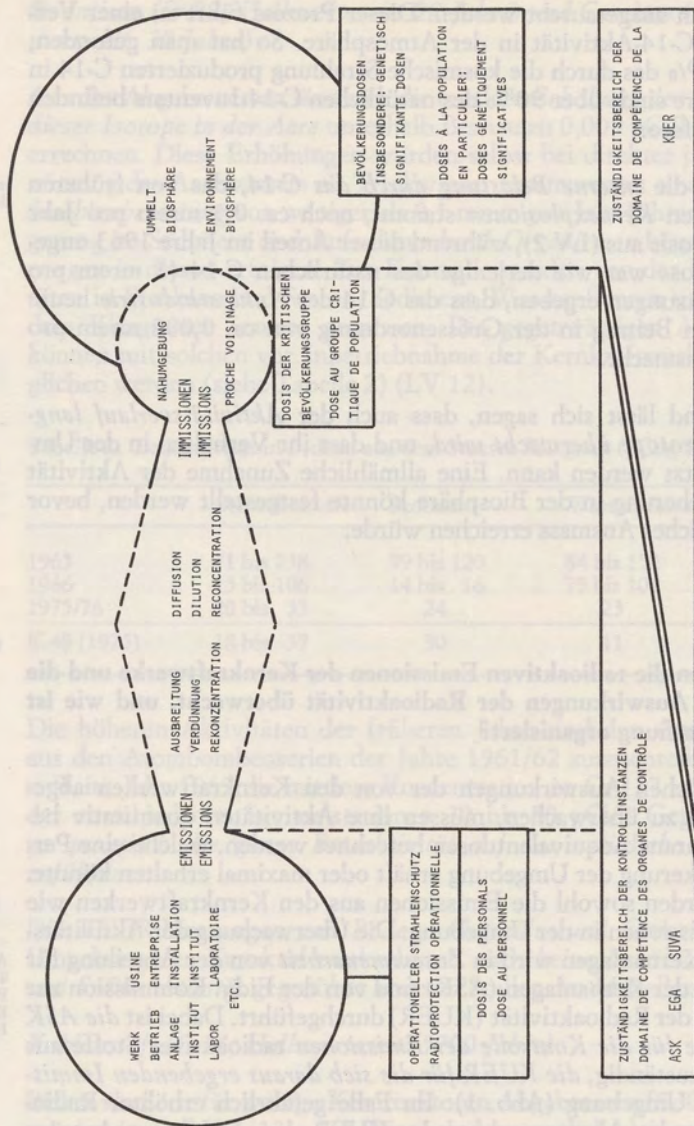
4. Wie werden die radioaktiven Emissionen der Kernkraftwerke und die möglichen Auswirkungen der Radioaktivität überwacht, und wie ist die Überwachung organisiert?

Um die möglichen Auswirkungen der von den Kernkraftwerken abgegebenen Stoffe zu überwachen, müssen ihre Aktivitäten quantitativ bestimmt und daraus Äquivalentdosen berechnet werden, welche eine Person der Bevölkerung der Umgebung erhält oder maximal erhalten könnte. Gemessen werden sowohl die Emissionen aus den Kernkraftwerken wie auch die Immissionen in der Umgebung. Die Überwachung der Aktivitätsabgaben von Kernanlagen wird in *Zusammenarbeit* von der Abteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (ASK) und von der Eidg. Kommission zur Überwachung der Radioaktivität (KUER) durchgeführt. Dabei ist die ASK in erster Linie *für die Kontrolle der Emissionen* radioaktiver Stoffe aus den Anlagen zuständig, die KUER *für die sich daraus ergebenden Immissionen* in der Umgebung (Abb. 1). Im Falle gefährlich erhöhter Radioaktivität stellt der Alarmausschuss der KUER dem Bundesrat Anträge über Massnahmen zum Schutz der Bevölkerung (LV 1).

ASK
überwacht
Emissionen;
KUER
Immissionen

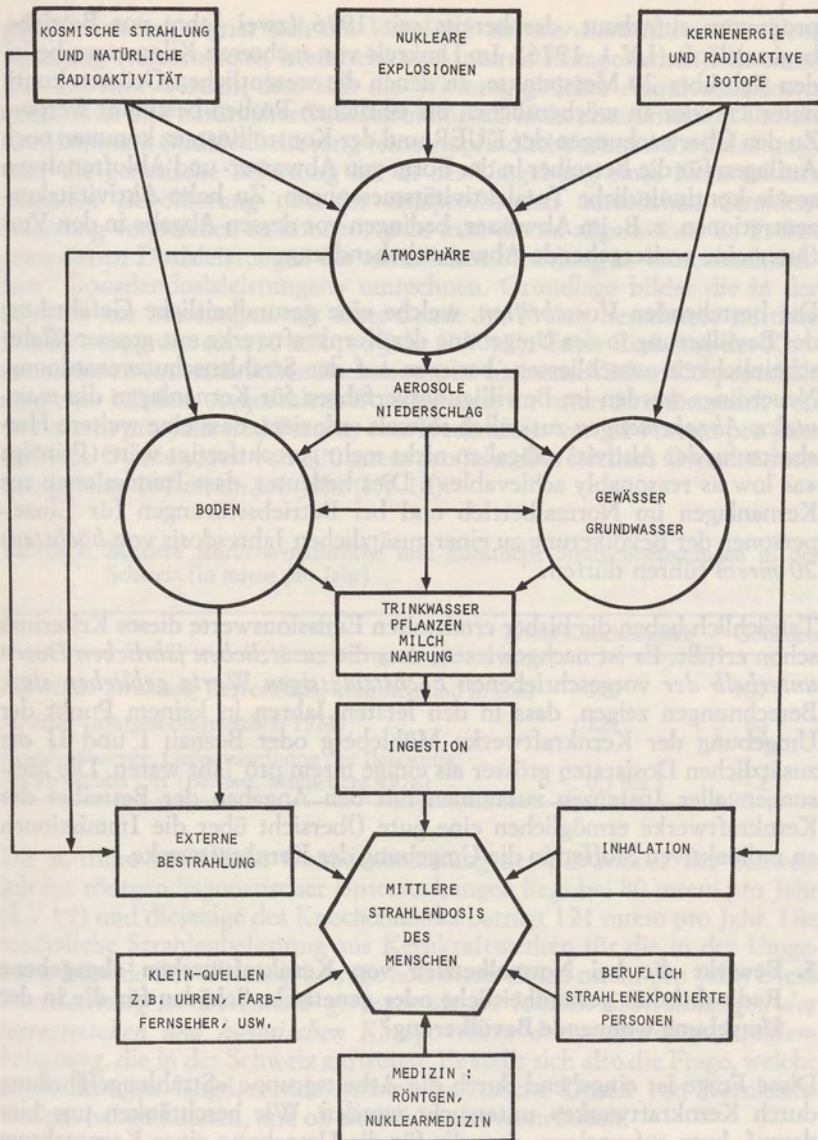
Zur Erfassung der Immissionen sind *alle wesentlichen Pfade*, auf welchen die Aktivität den Menschen erreichen kann (Wasser, Luft, Boden, Nahrungskette), zu berücksichtigen (Abb. 2). Für das Kernkraftwerk Gösgen-Däniken beispielsweise hat die KUER ein Umgebungs-Überwachungs-

wesentliche
Pfade
berücksichtigt



Zuständigkeiten
für die Über-
wachung der
Radioaktivität

Abb. 1: Überwachung der Radioaktivität und Kontrolle des Strahlenschutzes in der Schweiz: synoptische Darstellung der Zuständigkeiten. ASK: Abt. für die Sicherheit der Kernanlagen; EGA: Eidg. Gesundheitsamt; SUVA: Schweiz. Unfallversicherungsanstalt; KUER: Eidg. Kommission zur Überwachung der Radioaktivität. (= Fig. 5 des Jahresberichtes der KUER (1975))



Ursachen und
Pfade der
Strahlen-
belastung

Abb. 2: Strahlenbelastung des Menschen: Ursachen und Belastungspfade.
(= Fig. 1 des Jahresberichtes der KUER (1974))

programm aufgebaut, das bereits seit 1976 (zwei Jahre vor Betriebsbeginn) läuft (LV 1, 1976). Im Umkreis von mehreren Kilometern befinden sich über 20 Messpunkte, an denen die wesentlichen Grössen kontinuierlich oder an wöchentlichen bis jährlichen Proben bestimmt werden. Zu den Überwachungen der KUER und der Kontrollinstanz kommen noch Auflagen für die Betreiber in der Form von Abwasser- und Abluftanalysen sowie kontinuierliche Totalaktivitätsmessungen. Zu hohe Aktivitätskonzentrationen, z. B. im Abwasser, bedingen vor dessen Abgabe in den Vorfluter eine weitergehende Abwasserbehandlung.

Vorschriften
für maximale
Abgabemengen

Die bestehenden *Vorschriften*, welche eine gesundheitliche Gefährdung der Bevölkerung in der Umgebung der Kernkraftwerke mit grosser Wahrscheinlichkeit ausschliessen, basieren auf der Strahlenschutzverordnung. Neuerdings werden im Bewilligungsverfahren für Kernanlagen die *maximalen Abgabemengen* zusätzlich so weit reduziert, dass eine weitere Herabsetzung der Aktivitätsabgaben nicht mehr gerechtfertigt wäre (Prinzip: «as low as reasonably achievable»). Dies bedeutet, dass Immissionen aus Kernanlagen im Normalbetrieb und bei Betriebsstörungen für Einzelpersonen der Bevölkerung zu einer zusätzlichen Jahresdosis von *höchstens 20 mrem* führen dürfen.

Beschränkung
auf höchstens
20 mrem
pro Jahr

Tatsächlich haben die bisher ermittelten Emissionswerte dieses Kriterium schon erfüllt. Es ist nachgewiesen, dass die *zusätzlichen jährlichen Dosen unterhalb der vorgeschriebenen höchstzulässigen Werte geblieben sind*. Berechnungen zeigen, dass in den letzten Jahren in keinem Punkt der Umgebung der Kernkraftwerke Mühleberg oder Beznau I und II die zusätzlichen Dosisraten grösser als einige mrem pro Jahr waren. Die Messungen aller Instanzen zusammen mit den Angaben der Betreiber der Kernkraftwerke ermöglichen eine gute Übersicht über die Immissionen an radioaktiven Stoffen in die Umgebung der Kernkraftwerke.

5. Bewirkt die bei Normalbetrieb von Kernkraftwerken abgegebene Radioaktivität gesundheitliche oder genetische Schäden für die in der Umgebung wohnende Bevölkerung?

Diese Frage ist eingehend durch die Arbeitsgruppe «Strahlengefährdung durch Kernkraftwerke» untersucht worden. Wir beschränken uns hier darauf, kurz aufzuzeigen, dass die für die Umgebung eines Kernreaktors abgeschätzten zusätzlichen Dosisleistungen von höchstens einigen mrem pro Jahr *kaum somatische oder genetische Strahlenschäden* verursachen können.

Zur Beurteilung der somatischen bzw. genetischen Wirkung auf den Menschen von Strahlen derjenigen Radioisotope, die von Kernreaktoren frei-

gesetzt werden, eignet sich ein *Vergleich mit der natürlichen Strahlenbelastung* (terrestrische, kosmische und interne Komponenten). Es muss hier erwähnt werden, dass sich die Wirkung gleicher Aequivalentdosen künstlicher und natürlicher Strahlen biologisch nicht unterscheiden. Um die Knochenmark-Strahlenbelastung (eine empfindliche somatische Belastung) oder die genetische Belastung der in der Umgebung eines Kernreaktors lebenden Bevölkerung mit der entsprechenden natürlichen Strahlenbelastung vergleichen zu können, muss man die im allgemeinen im Freien gemessenen Dosisleistungen der natürlichen Strahlung in «Knochenmark- bzw. Gonadendosisleistungen» umrechnen. Grundlage bildet die in der Schweiz aus Messungen mit einer Sonde im Freien berechnete mittlere Dosisleistung von ca. 110 mR pro Jahr (LV 17). Unter Einbezug der Konzentrationen von natürlichen Radioisotopen im menschlichen Körper erhält man eine mittlere Aequivalent-Dosisleistung im roten Knochenmark von 143 mrem pro Jahr und Person, eine Hodendosis von 114 mrem pro Jahr und eine Ovariendosis von 100 mrem pro Jahr. Die mittlere Gonadendosis beträgt also 107 mrem pro Jahr (LV 18).

Vergleich der künstlichen mit der natürlichen Strahlenbelastung

Tabelle 3: Mittlere jährliche natürliche und künstliche Strahlenbelastungen in der Schweiz (in mrem pro Jahr)

	Rotes Knochenmark	Gonaden
Natürliche Strahlung (terrestrisch, kosmisch und intern)	143	107
Medizin (röntgen-diagnostisch 1971)	121	80
Kernkraftwerke, Grössenordnung der Belastung am kritischen Ort (Beznau, Mühleberg 1976)	< 0,3 bis 3	≤ 2

Zusammenstellung von natürlichen und künstlichen Strahlenbelastungen

Die mittlere zusätzliche Gonadenbelastung der Einwohner der Schweiz infolge röntgendiagnostischer Untersuchungen liegt bei 80 mrem pro Jahr (LV 19) und diejenige des Knochenmarks beträgt 121 mrem pro Jahr. Die zusätzliche Strahlenbelastung aus Kernkraftwerken für die in der Umgebung lebende Bevölkerung beträgt höchstens einige mrem pro Jahr. Diese Dosisleistung ist wesentlich geringer als die lokalen Schwankungen der terrestrischen und kosmischen Komponenten der natürlichen Strahlenbelastung, die in der Schweiz auftreten. Es stellt sich also die Frage, welche Auswirkungen langdauernde geringe zusätzliche Dosen von Kernkraftwerken haben können, und ob sie sich nachweisen lassen.

Schwankungen der natürlichen Strahlung

Die Beantwortung dieser Frage ist schwierig, da die natürlichen Schwankungen, z. B. der Häufigkeit von Krebsfällen, grösser sind als die Schwankungen, die man von kleinen Änderungen der Strahlenbelastung erwarten kann. Die bei Fragen des Strahlenschutzes üblicherweise verwendete Bezeichnung «zulässiges Risiko» kann so verstanden werden, dass ein Risiko wohl vorhanden ist, aber (wegen der natürlichen Schwankungen) durch

Definition des zulässigen Risikos

wissenschaftliche Untersuchungen nicht nachgewiesen werden kann (LV 20).

Schäden bei erhöhten natürlichen Dosen

Die Mehrzahl der bis jetzt ausgeführten Studien haben keine eindeutig strahlenbedingten somatischen oder genetischen *Störungen bei* Bevölkerungen nachweisen lassen, welche *höheren natürlichen Dosisleistungen* ausgesetzt sind (über 500 mrem pro Jahr für zwei Gebiete der Erde: Kerala in Indien und Guarapari in Brasilien). Einzelne andere Arbeiten sind umstritten und bedingen weitere Untersuchungen (LV 21). Eine Studie in den USA zeigte keinen Unterschied der Mortalitätsrate infolge von Tumoren in der Bevölkerung von Gebieten mit verschiedenen natürlichen Strahlenbelastungen (vgl. LV 18). Weitere Angaben über Auswirkungen der natürlichen Strahlung findet man z. B. in BEIR-Report (LV 22) und in einer Arbeit von UNSCEAR (LV 23), über mögliche Auswirkungen geringer Dosen und deren Nachwirkungen z. B. in LV 33.

Laut Artikel 44 der schweizerischen «Verordnung über den Strahlenschutz» vom 30. Juni 1976, basierend auf Empfehlungen der «International Commission on Radiological Protection», darf die von Einzelpersonen der Bevölkerung zusätzlich zu den natürlichen und den medizinischen Strahlenbelastungen akkumulierte Ganzkörper-Dosis (d. h. an jedem Ort des Körpers) 500 mrem pro Jahr nicht überschreiten. In der Schweiz dürfen nach der auf Seite 26 erwähnten neuen Vorschrift höchstens 20 mrem pro Jahr durch ein Kernkraftwerk in seiner Umgebung verursacht werden.

Auswirkungen der effektiven zusätzlichen Strahlenbelastung

Die obigen Vergleiche zeigen, dass die in der Strahlenschutzverordnung für Einzelpersonen einer Bevölkerung erwähnten 500 mrem pro Jahr eine Limite darstellen, innerhalb welcher eine Beziehung zwischen Strahlendosis und gesundheitsschädlicher Wirkung genetischer oder somatischer Art kaum zu beweisen ist. Dies gilt erst recht für die Limite von 20 mrem pro Jahr in der Umgebung der Kernkraftwerke, so dass man den Schluss ziehen kann, dass die *effektive zusätzliche Strahlenbelastung für die in der Umgebung von Kernkraftwerken lebende Bevölkerung nicht ins Gewicht fällt*.

6. Wie wird sich in der Zukunft weltweit die Emission radioaktiver Stoffe durch Kernanlagen entwickeln, und wie stark wird dadurch die Strahlenbelastung für die Menschen ansteigen?

Prognosen des Energieverbrauchs

Die Prognose der zukünftigen weltweiten zusätzlichen Strahlenbelastung stützt sich auf Prognosen der total installierten Reaktorleistung. Für das Jahr 2000 wird diese mit 2200 GWe vorausgesagt (LV 24). Weinberg (LV 25) schätzt für die weitere Zukunft einen ultimativen stationären Verbrauch von 30 000 GWe. Diese Angaben sind mit recht *grossen Unsicherheiten* behaftet und hängen von der Energiepolitik der Zukunft ab.

Zur Behandlung der Frage nach der zusätzlichen weltweiten Strahlenbelastung müssen vor allem langlebige Isotope beachtet werden, weil diese sich in unserer Umwelt während längerer Zeiten anreichern können. Einige dieser Isotope werden weltweit verteilt, und es stellt sich die Frage, wie stark die zusätzliche Strahlenbelastung für grosse Bevölkerungsgruppen ansteigen wird.

In der Literatur (z. B. LV 8, 23, 24) findet man *Schätzungen über weltweite jährliche und kumulative Abgaben* (1975—2000) von langlebigen Radionukliden durch Kernkraftwerke und nukleare Wiederaufbereitungsanlagen. Als Beispiel sind in Tabelle 4 geschätzte Werte für die wichtigsten Radionuklide aufgeführt. Neben den in Tabelle 4 aufgeführten H-3, C-14, Kr-85 und I-129 können möglicherweise weitere langlebige Nuklide, z. B. Aktinide, wichtig werden (LV 9).

Tabelle 4: Globale Abgaberaten der wichtigsten Radionuklide aus Kernkraftwerken und nuklearen Wiederaufbereitungsanlagen (LV 9).

Prognosen der Abgaberaten von langlebigen Radionukliden

Radionuklide	spez. Abgaberate, Ci pro Jahr u. GWe	Totale Abgaberate 1975 *	(Ci pro Jahr) 2000 **
H-3	$2 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^7$
C-14	10 — 40	600 — 2400	$3 \cdot 10^4$ — $1,2 \cdot 10^5$
Kr-85	$3 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^7$	10^9
I-129	1	60	3000

* für 60 GWe im Jahr 1975

** für 3000 GWe im Jahr 2000 (Schätzung IAEA)

Aus den vorausgesagten Abgaberaten und dem weltweiten Verhalten der erwähnten 4 Nuklide können die zu erwartenden *zusätzlichen mittleren Dosen für die Weltbevölkerung* abgeschätzt werden. Die Grössenordnungen für Dosisleistungen sind in der Tabelle 5 zusammengestellt (verschiedene Referenzen, z. B. LV 3, 8, 9, 16, 26, 27, 28, 29).

Tabelle 5: Grössenordnung von vorausgesagten zusätzlichen mittleren Belastungen der Weltbevölkerung durch Abgaben der Kernindustrie im Jahre 2000 (mrem pro Jahr).

Prognosen der mittleren Strahlenbelastung im Jahr 2000

	Kr-85	H-3	C-14	I-129
Gonadendosis	0,01—0,1	0,001—0,01	0,02—0,2	vernachlässigbar
Kritisches Organ	1,8—18 (Haut)	0,001—0,01 (Ganzkörper)	0,16—1,6 (Fett)	0,003 (Schilddrüse)

Diese Voraussagen, denen meist ungünstige Annahmen zugrunde gelegt werden, scheinen bis Ende dieses Jahrhunderts zu *tragbaren Erhöhungen* der Dosis für die Bevölkerung zu führen. Weitere *Rückhalteverfahren* für diese Isotope, vor allem *bei Wiederaufbereitungsanlagen*, könnten die erwartete zusätzliche *Belastung noch reduzieren*. Es wird nötig sein, den Konzentrationsverlauf vor allem von C-14 und Kr-85 in der Atmosphäre dauernd zu überwachen.

Zu den einzelnen Isotopen folgen nun noch einige Detailausführungen:

Zur Belastung durch Kr-85

Bis ins Jahr 2000 scheint die Strahlenbelastung durch Kr-85 weltweit kein wesentliches Problem zu sein. Es ist technisch möglich, in Wiederaufbereitungsanlagen Kr-85 abzutrennen und zurückzubehalten. Diese Massnahme ist zur Verringerung möglicher Lokaldosen eher notwendig als zur Verringerung der zusätzlichen Belastung der Weltbevölkerung. Nach den früheren Prognosen über die Verwendung von Kernenergie und die umgehende Wiederaufbereitung der verbrauchten Brennelemente hätte der Kr-85-Pegel seit einigen Jahren erheblich ansteigen und bis zum Jahre 2000 Werte im Bereich einiger 1000 pCi/m³ erreichen müssen. Daraus hätte eine *Strahlenbelastung von ca. 0,1 mrem pro Jahr* Ganzkörperdosis der Weltbevölkerung resultiert (LV 3). In der Nähe von Aufbereitungsanlagen wären aber unnötig hohe Dosen aufgetreten. Daher *ist aus Gründen der Lokaldosen zu fordern, dass spätestens im nächsten Jahrzehnt Kr-85 von der Biosphäre ferngehalten werden soll*. Dann ist ein Anstieg der atmosphärischen Aktivität bis ca. 300 pCi/m³ zu erwarten.

Tatsächlich sind die zwischen 1970 und 1976 gemessenen Kr-85-Konzentrationen in der Atmosphäre kleiner als die vorausgesagten Werte. Von Heller (LV 7) ist abgeschätzt worden, dass zwischen 1960 und heute die Abgaberaten von Kr-85 auf die Hälfte gesunken sind. Irgendwann einmal kann aber eine Aufbereitung der Brennelemente wieder einsetzen und einen merklichen Wiederanstieg der Kr-85-Konzentration bewirken. Für diesen Fall muss überlegt werden, ob ausser der direkten Strahlenbelastung über andere Umweltfaktoren eine indirekte Belastung des biologischen Geschehens erfolgen kann (LV 11).

Zur Belastung durch C-14

Diesem langlebigen Isotop muss in Zukunft vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt werden, weil es sich in der Atmosphäre zum Teil anreichern wird und in dieser Konzentration in alle organischen Substanzen eingebaut wird. Wichtig ist dabei das ¹⁴C : ¹²C-Verhältnis in der Atmosphäre.

Prognosen über zukünftige C-14-Konzentrationen beinhalten als zusätzliche Unsicherheit auch die Ungewissheit, wie stark das globale ¹⁴CO₂

durch das bei der Verbrennung von Oel und Kohle entstehende inaktive $^{12}\text{CO}_2$ *verdünnt* wird.

So zeigen Abschätzungen (LV 8, 16), dass bis zum Jahre 2000 eine zusätzlich globale Dosisbelastung zu erwarten ist, die ca. 3% der Belastung durch das natürliche C-14 ausmacht. Andere Arbeiten (LV 26, 27, 30) weisen auf die relativ grosse Bedeutung des C-14 als Ursache zusätzlicher Globaldosis hin und geben für das Jahr 2000 zusätzliche Dosen von bis zu 25% der durch natürliches ^{14}C bewirkten Dosis und bis zu 1 mrem pro Jahr in der Mitte des nächsten Jahrhunderts an. Daraus ergibt sich *die Notwendigkeit, den Verlauf der C-14-Aktivität in der Atmosphäre weiter genau zu verfolgen* und die Rückbehaltung von $^{14}\text{CO}_2$ vor allem bei Wiederaufbereitungsanlagen in Zukunft in Betracht zu ziehen.

Prognosen der
Strahlen-
belastung
durch C-14

Zur Belastung durch H-3

Obschon Tritium hauptsächlich in Form von tritiiertem Wasser (HTO) abgegeben wird und sich deshalb in der Hydrosphäre stark verdünnt, ist dieses langlebige Isotop zu beachten, weil sich die Aktivität zum Teil in einem Reservoir anreichern kann. So ergeben Schätzungen, dass für die nördliche Hemisphäre die bis ca. 1985 durch die Kernanlagen insgesamt erzeugte Menge Tritium ungefähr gleich gross sein wird wie das natürliche Inventar (LV 8, 31). Es kann weiter abgeschätzt werden, dass bis zum Jahre 2000 weltweit eine *zusätzliche Gonadendosis von ca. $1-2 \cdot 10^{-3}$ mrem* pro Jahr erwartet werden muss, falls Tritium vor allem in den Wiederaufbereitungsanlagen nicht zurückgehalten werden sollte (z. B. LV 8, 28). Dieser Wert wäre dann wahrscheinlich gleich gross oder grösser als die Restbelastung durch das Tritium der atmosphärischen Kernwaffentests der 60er Jahre. Dieser Wert wäre auch ca. 10mal geringer als die weltweite Belastung durch Tritium um das Jahr 1965, aber ca. 5mal grösser als die Belastung durch das natürliche Tritium.

Prognosen der
Strahlen-
belastung
durch H-3

Regional könnten z. B. in Flüssen, die Tritium von verschiedenen Anlagen abführen, höhere Konzentrationen auftreten. Für den Rhein ist abgeschätzt worden (LV 32), dass eine Bevölkerung, die nur Rheinwasser konsumiert, im Jahr 2000 eine zusätzliche Dosis in der Grössenordnung von 0,1 mrem pro Jahr aufnehmen könnte. Der Rhein würde dann allerdings immer noch weniger H-3 abführen, als er es als Folge der Kernwaffentests tat.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass *für Tritium* die weltweite und regionale Belastung *in den nächsten Jahrzehnten* wahrscheinlich auch ohne Rückhalteverfahren *tolerierbar* bleibt, dass aber die *Rückbehaltung* in Wiederaufbereitungsanlagen zur Verringerung der Lokaldosen in Zukunft *in Betracht zu ziehen ist*.

Zur Belastung durch I-129

I-129 ist wegen seiner extrem langen Halbwertszeit von $1,7 \cdot 10^7$ Jahren zu beachten. Dieses Isotop wird in der Schilddrüse eingebaut, und deshalb ist die somatische Belastung dieses Organs wichtig. Unter normalen Bedingungen wird I-129 ausschliesslich von Wiederaufbereitungsanlagen freigesetzt, und zwar vor allem mit den flüssigen Abgaben. Eine Extrapolation ins Jahr 2000 gibt für die *zusätzliche Schilddrüsendosis* aus dem weltweit in den zirkulierenden Gewässern verteilten I-129 einen Wert von höchstens $3 \cdot 10^{-3}$ mrad pro Jahr (LV 8, 28). Global gesehen stellt also I-129 vorerst eine *geringere Gefährdung* dar als Kr-85 oder C-14.

Prognose der
Strahlen-
belastung
durch I-129

Begriffsbestimmungen *)

Aequivalentdosis: Produkt aus absorbiertem Dosis in «rad» und Qualitätsfaktor. Die Einheit der Aequivalentdosis ist «rem».

Aequivalentdosisleistung: Aequivalentdosis pro Zeiteinheit. Die Einheit der Aequivalentdosisleistung ist ein «rem» pro Stunde.

Aktivität: Menge eines radioaktiven Stoffes oder Nuklides. Die Aktivität wird gemessen durch die Anzahl der pro Zeiteinheit zerfallenden Atomkerne. Ihre Einheit ist ein «Curie».

Aktivität, spezifische: Aktivität pro Masseneinheit Gesamtsubstanz. Die spezifische Aktivität wird ausgedrückt in «Curie» pro Gramm (Ci/g).

Bestrahlung: Exposition von Personen gegenüber ionisierenden Strahlen:
a) äussere Bestrahlung: die Strahlenquelle befindet sich ausserhalb des Körpers,

b) innere Bestrahlung: die Strahlenquelle befindet sich im Körper in Form von inkorporierten radioaktiven Nukliden.

Betriebsstörung: vom Normalbetrieb abweichende Zustände, die ein oder mehrere Male während der Betriebsdauer einer Anlage auftreten können (Eintrittswahrscheinlichkeit $> 10^{-2}$ pro Reaktorjahr). Infolge geeigneter Vorkehrungen führen sie weder zu Schäden an Einrichtungen, die für die Sicherheit von Bedeutung sind, noch zu Brennstoffschäden, und verursachen auch keine nennenswerten Dosen in der Umgebung.

Curie (Ci): Einheit der Aktivität. Ein «Curie» ist diejenige Menge eines radioaktiven Stoffes oder radioaktiven Nuklids, in der die Zahl der zerfallenden Atomkerne pro Sekunde $3,7 \cdot 10^{10}$ beträgt.

Millicurie (mCi) = 10^{-3} Ci

Mikrocurie (μCi) = 10^{-6} Ci

Nanocurie (nCi) = 10^{-9} Ci

Picocurie (pCi) = 10^{-12} Ci

Dosis, absorbierte: die in einem beliebigen Stoff absorbierte Menge ionisierender Strahlung. Sie wird gemessen durch die Energie, welche am interessierenden Ort dem Stoff übertragen wird. Ihre Einheit ist ein «rad». (Wird auch als Energiedosis bezeichnet.)

Dosis, akkumulierte: Summe aller Aequivalentdosen, die eine Person in einem gegebenen Zeitabschnitt zufolge äusserer und innerer Bestrahlung empfängt unter Ausschluss der Dosen, die vom natürlichen Strahlenpegel sowie von medizinischen Untersuchungen und Behandlungen herrühren. Ohne besondere Bemerkung wird der Begriff «akkumulierte Dosis» immer auf Ganzkörperbestrahlungen bezogen.

*) Zum grössten Teil aus dem Anhang I der Verordnung über den Strahlenschutz vom 30. 6. 1976.

Dosis, höchstzulässige: akkumulierte Dosis, mit der nach dem heutigen Stand der Wissenschaft ein so geringes Risiko körperlicher oder genetischer Schäden verbunden ist, dass es vernachlässigt werden darf. Die Dosen, die vom natürlichen Strahlenpegel sowie von medizinischen Untersuchungen und Behandlungen herrühren, sind in der höchstzulässigen Dosis nicht inbegriffen.

Dosisleistung: Dosis pro Zeiteinheit.

Elektronvolt (eV): Einheit der Energie von ionisierenden Strahlen. 1 Elektronvolt entspricht der Energieänderung eines Elektrons beim freien Durchlaufen einer Spannung von 1 Volt.

Kiloelektronvolt (keV) = 10^3 eV

Megaelektronvolt (MeV) = 10^6 eV

Emission: Abgabe von Materie oder Aussendung von Strahlung.

Expositionsdosis: Menge einer Röntgen- oder Gammastrahlung bis 3 Megaelektronvolt. Sie wird durch die Ionisation der Luft gemessen. Ihre Einheit ist 1 «Röntgen». (Wird im Deutschen als «Ionendosis», im Angelsächsischen als «exposure» bezeichnet.)

Expositionsdosisleistung: Expositionsdosis pro Zeiteinheit.

Ganzkörperbestrahlung: a) äussere oder innere Bestrahlung, welche den ganzen Körper oder mindestens die Keimdrüsen (Gonaden) oder das rote Knochenmark trifft; b) innere Bestrahlung, die mehr als eines der kritischen Organe trifft.

Gesamtdosis, akkumulierte: akkumulierte Dosis, die eine Person seit ihrer Geburt empfangen hat.

Gonadendosis: Dosis, welche die Gonaden (Ovarien, Hoden) trifft.

Halbwertszeit: charakteristisches Zeitintervall eines radioaktiven Nuklides, in dem dessen Aktivität auf die Hälfte abfällt.

Immission: in eine Umgebung eingedrungene Materie oder Strahlung.

Inkorporation: Aufnahme radioaktiver Stoffe in den menschlichen Organismus.

Ionen: elektrisch geladene Atome oder Moleküle.

Isotope: Atome eines Elements, die sich in der Anzahl Neutronen unterscheiden.

Knochenmarkdosis: mittlere Dosis, welche das Knochenmark bei einer Ganzkörperbestrahlung aufnimmt.

Kontamination: Zustand einer unerwünschten oberflächlichen oder beliebig verteilten übertragbaren oder fixierten Verunreinigung einer Materie oder einer Umgebung durch radioaktive Stoffe.

Bei Personen ist zu unterscheiden zwischen äusserer und innerer Kontamination.

Normalbetrieb: Alle Zustände des Betriebes eines Kernkraftwerkes innerhalb spezifizierter Betriebsgrenzen und Vorschriften, insbesondere bei Leistung (Voll- oder Teillast), während des An- oder Abfahrens, des Stillstandes, der Prüfung und Inspektion, des Unterhaltes oder des Brennstoffwechsels.

Nuklid: durch die Ordnungszahl, die Massenzahl und den Energiezustand ihres Kerns bestimmte Atomart.

Organe, kritische: Organe, die bei einer äusseren oder inneren Bestrahlung besonders gefährdet sind, sei es infolge ihrer besonderen Strahlenempfindlichkeit oder infolge einer selektiven Anreicherung bestimmter radioaktiver Stoffe in den betreffenden Organen. Die kritischen Organe für die einzelnen Nuklide sind in der Tabelle des Anhangs 7 der Verordnung über den Strahlenschutz aufgeführt.

Ortsdosis: die durch Strahlenmessgeräte, ortsfeste Dosimeter oder Berechnungen an einem bestimmten Ort in einem Strahlenfeld ermittelte Dosis, welche eine Person während einer gegebenen Zeit erhalten könnte, wenn sie sich am betreffenden Ort befände. Die Ortsdosis wird durch die «Äquivalentdosis» ausgedrückt. Für Röntgen- und Gammastrahlung unterhalb 3 MeV ist sie zahlenmässig gleich der Expositionsdosis.

Ortsdosisleistung: Ortsdosis pro Zeiteinheit.

Personen, beruflich strahlenexponierte: Personen, die bei der Ausübung ihres Berufes oder bei ihrer Ausbildung eine akkumulierte Dosis von mehr als 0,5 rem pro Jahr erhalten können. Dies gilt insbesondere für:

- a) Personen, die regelmässig in einer kontrollierten Zone arbeiten;
- b) Personen, die mit offenen radioaktiven Strahlenquellen arbeiten, welche der Bewilligungspflicht nach Artikel 3 Absatz 1 Buchstabe c unterliegen;
- c) Personen, die regelmässig Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlen oder Bestrahlungseinheiten bedienen.

Personen, Einzelpersonen der Bevölkerung: einzelne Personen der Bevölkerung unter Ausschluss der beruflich strahlenexponierten Personen.

Qualitätsfaktor (Q): Bewertungsfaktor für das auf der unterschiedlichen biologischen Wirkung beruhende Risiko gleicher absorbierten Dosen verschiedener Strahlenarten für die Ermittlung der Äquivalentdosis. Qualitätsfaktoren für einzelne Strahlenarten sind im Anhang 2 der Verordnung über den Strahlenschutz festgelegt.

rad: Einheit der absorbierten Dosis. Ein «rad» ist die Energieabsorption von 10^{-2} Joule pro Kilogramm Substanz = $(10^{-2} \text{ J/kg} = 100 \text{ erg/g})$.
1 Millirad (mrad) = 10^{-3} rad. (Wird gelegentlich auch «rd» abgekürzt.)

Radioaktive Stoffe: siehe «Stoffe, radioaktive».

Radioaktivität: Eigenschaft eines Nuklides unter spontanem Zerfall und Emission von ionisierenden Strahlen in ein anderes überzugehen.

Radiotoxizität: auf der ionisierenden Strahlung der Halbwertszeit und dem Stoffwechselverhalten eines inkorporierten radioaktiven Stoffes beruhende Giftigkeit.

rem: Einheit der Äquivalentdosis. 1 Millirem (mrem) = 10^{-3} rem.

Röntgen (R): Einheit der Expositions-dosis für Röntgen- und Gammastrahlen bis 3 Megaelektronvolt. 1 Röntgen ist diejenige Expositions-dosis, welche durch die in der Luft verursachte Korpuskularemission pro Kilogramm Luft so viele Ionen erzeugt, dass deren Ladung $2,58 \cdot 10^{-4}$ Coulomb jedes Vorzeichens beträgt. Ein R = $2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg Luft; (∞ 1 elektrostatische Ladungseinheit pro 0,001293 g Luft); 1 Milliröntgen (mR) = 10^{-3} R.

Sachverständiger: Person, die über eine genügende Ausbildung und Sachkenntnis verfügt, um die ihr übertragenen Aufgaben des Strahlenschutzes erfüllen zu können.

Stoffe, radioaktive: Stoffe oder Stoffgemische beliebiger chemischer Zusammensetzung und physikalischer Form, die radioaktive Nuklide enthalten, deren Aktivität die in dieser Verordnung festgesetzten Freigrenzen übersteigt.

Strahlen, ionisierende: a) Photonenstrahlen wie Röntgen- und Gammastrahlen; b) Korpuskularstrahlen wie Betastrahlen, Elektronen, Mesonen, Protonen, Neutronen, Alphastrahlen, schwere Teilchen usw., die Ionen erzeugen können.

Strahlenpegel, natürlicher: Summe aller ionisierenden Strahlen natürlichen Ursprungs an einem gegebenen Ort: kosmische Strahlung und Strahlung der in der Natur vorhandenen radioaktiven Stoffe innerhalb und ausserhalb des menschlichen Körpers in ihrer natürlichen Verteilung.

Strahlenquellen: Apparate oder radioaktive Stoffe, welche ionisierende Strahlen aussenden können.

Strahlenquellen, geschlossene radioaktive: Strahlenquellen, die radioaktive Stoffe enthalten, und deren Bauart unter üblicher Beanspruchung ein Aus-treten radioaktiver Stoffe vollständig verhindert und so die Möglichkeit einer Kontamination ausschliesst.

Strahlenquellen, offene radioaktive: Strahlenquellen, die radioaktive Stoffe enthalten und die eine Kontamination verursachen können.

Literaturverzeichnis

- (1) Huber, O.: 18./19./20. Bericht der Eidg. Kommission zur Überwachung der Radioaktivität für das Jahr 1974/1975/1976 zuhanden des Bundesrates (Physikalisches Institut der Universität Fribourg, Pérolles, 1700 Fribourg).
- (2) Schriber, G.: Messung von Verdünnungsfaktoren beim Kernkraftwerk Mühleberg, KKW Mühleberg und Universität Bern, Dezember 1977.
- (3) Hilbert, F.: Erzeugung und Freisetzung von radioaktiven Krypton- und Xenon-isotopen durch Kernreaktoren und Wiederaufbereitungsanlagen und die voraussichtliche radiologische Belastung bis zum Jahr 2000, KFK-Bericht 2035, 1974.
- (4) Vogt, K. J.: Dispersion of airborne Radioactivity released from Nuclear Installations; population exposure in local and regional environment, in «Physical Behaviour of radioactive contaminations in the atmosphere», IAEA 1974, 3.
- (5) Schwarz, G., Bonka, H., Brüssermann, K.: Possible Future Effects on the Population of the Federal Republic of Germany of Gaseous Radioactive Effluents from Nuclear Facilities, in Proc Symp Stockholm 2—5 June IAEA, 1975, 193.
- (6) Sittkus, A. und Stockburger, H.: Krypton-85 als Indikator des Kernbrennstoffverbrauchs, die Naturwissenschaften 63, 1976, 266.
- (7) Heller, D., Roedel, W., Münnich, K. O. und Stich, W.: Decreasing release of Kr-85 into the atmosphere, die Naturwissenschaften 64, 1977, 383.
- (8) Kelly, G. N., Jones, J. A., Bryant, P. M. and Morley, F.: The predicted radiation exposure of the population of the European Community resulting from discharges of Kr-85, H-3, C-14 and J-29 from the nuclear power industry to the year 2000, 1975 (Doc. V/2676/75).
- (9) Morgan, J. J. et al.: Source Functions: Fossil Fuel Combustion Products, Radionuclides, Trace Metals, and Heat Group Report, in: «Global Chemical Cycles and Their Alterations by Man», W. Stumm, ed., Abakon, Berlin 1977, 291.
- (10) UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation): Sources and Effects of Ionizing Radiation, 1977 Report, Suppl. No 40 (A/32/40), Unido, Vienna.
- (11) Sittkus, A.: Krypton-85 in der Atmosphäre, in «Promet», im Druck.
- (12) Unpublizierte Berichte der EAWAG an die KUER.
- (13) Kunz, C. O., Mahoney, W. E. and Müller, T. W.: C-14 gaseous effluents from PWR, in «Population exposures», Proc. of the 8th Mid-Year Topical Symposium of the Health Physics Society, Knoxville, October 1974, 229.
- (14) Kunz, C. O., Mahoney, W. E. and Müller, T. W.: Carbon-14 gaseous effluents from BWR, American Nucl. Soc. Meeting, New Orleans, June 1975.
- (15) Rublevskij, V. P., Zykove, A. S. and Turkin, A. D.: Nuclear power stations as sources of C-14 emissions, Proc. of 3rd Internat. Congress of IRPA, Washington D. C. September 1973, 1974, 296.
- (16) Hayes, D. W. and Mac Murdo, K. W.: Carbon-14 Production by the Nuclear Industry, Health Physics 32, 1977, 215.
- (17) Halm, E., Herbst, W., Mastrocola, A.: Messungen des natürlichen Strahlenpegels in der Schweiz. Bull. Eidg. Gesundheitsamt 22. 12. 1962, Beilage B.
- (18) Poretti, G.: Natürlich bedingte Strahlenbelastung der Schweizer Bevölkerung, Schweiz. Medizinische Wochenschrift 108 Nr. 7, 1978, 235.
- (19) Poretti, G., Ionesco-Farca, F. und Lanz, W.: Die Strahlenbelastung der Schweizer Bevölkerung infolge röntgendiagnostischer Untersuchungen, Schweiz. Medizinische Wochenschrift 106 Nr. 48, 1976, 1682. Vollständiger Bericht: SVA Bern, Postfach 2613, 3001 Bern.
- (20) Holcomb, R. W.: Radiation Risk: A Scientific Problem ?, Science 167, 1970, 853.
- (21) Zum Beispiel: Kochupillai, N., Verma, I. C., Grewal, M. S., Ramalingaswami, V.: Down's syndrome and related abnormalities in an area of high background radiation in coastal Kerala, Nature 262 (1976) 60 und Entgegnungen in Nature 267 (1977) 728. Ein Literaturverzeichnis über dieses Problem ist erhältlich bei PD Dr. G. G. Poretti, Radiuminstitut, Inselspital, 3010 Bern.

- (22) National Academy of Sciences, USA: The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiation, Report of the Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, November 1972.
- (23) United Nations 1976, Nuclear Power Production, U. N. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), New York.
- (24) Haury, G. and Schikarsky, W.: Radioactive Inputs into the Environment; Comparison of Natural and Man-Made Inventories, in: «Global Chemical Cycles and Their Alterations by Man», W. Stumm, ed., Abakon, Berlin 1977, 165.
- (25) Weinberg, A. M. and Rotty, R. M.: Alternative Long-Range Energy Strategies, in: «Global Chemical Cycles and Their Alterations by Man», W. Stumm, ed., Abakon, Berlin 1977, 225.
- (26) Magno, P. J., Nelson, C. B. and Ellett, W. H.: A Consideration of the Significance of Carbon-14 Discharges from the Nuclear Power Industry, 13th AEC Air Cleaning Conference, 1974.
- (27) Burkart, W.: C-14: Radiologische Umweltbelastung durch Kernkraftwerke, EIR-Bericht Nr. 309, 1977.
- (28) OECD Nucl. Energy Agency: Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste arising from Nuclear Power Programs, Sept. 1977, 75.
- (29) Bonka, H., Bieselt, R., Brenk, D., Brüssermann, K., Darvas, J., Laser, M., Schnez, H., Schwarz, G., Vogt, K. J. und Winske, P.: Zukünftige radioaktive Umweltbelastung in der Bundesrepublik Deutschland durch Radionuklide aus kerntechnischen Anlagen im Normalbetrieb, KFA-Bericht Jül-1220, 1975.
- (30) Martin, A. and Simon, H. Ap: Population exposure and the Interpretation of its Significance, in: «Population Dose Evaluation and Standards for Man and his Environment», IAEA, Vienna, 1974, 15.
- (31) Peterson, H. T., Martin, J. E., Weaver, C. L. and Harwart, E. D.: Environmental Tritium Contamination from increasing utilization of Nuclear Energy Sources, in: Environmental Contamination by Radioactive Materials, IAEA 1969, 350.
- (32) Weiss, W. und Roether, W.: Der Tritiumabfluss des Rheins 1961—1973, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 19, 1975, 1.
- (33) Morgan, K. Z.: Cancer and low level ionizing radiation, Bull. Atomic Sc 34, 1978, 30; und Frigerio N. A., et al.: The Argonne Radiological Impact Program — ARIP. Part I — ANL/ES, 1973, 26.

Die Lagerung radioaktiver Abfälle

1. Einleitung	43
2. Herkunft und Art der Abfälle	46
2.1 Herkunft	46
2.2 Zustand und Eigenschaften	49
2.3 Anfallende Mengen radioaktiver Abfälle	51
3. Behandlung und Konditionierung der Abfälle	52
3.1 Ziele und Aufgaben	52
3.2 Methoden	53
4. Lagerung	57
4.1 Grundsätzliches	57
4.2 Schwach- und mittelaktive Abfälle	58
4.3 Hochaktive Abfälle	58
4.4 Anforderungen an ein Endlager in Gesteinen	59
5. Der heutige Stand der Lagerungstechnik und der Forschung	61
5.1 Bestehende Anlagen	61
5.2 Projektierte Anlagen	63
5.3 Forschung und Entwicklung	63
6. Sicherheitsanalyse	68
6.1 Grundsätzliches	68
6.2 Sicherheit der Operationen vor der Beisitzung	68
6.3 Sicherheit der Endlagerstätte	68
7. Offene Fragen — kritische Erwägungen	70
7.1 Forschungsprogramme	70
7.2 Langfristige geologische Prognosen	72
7.3 Evaluation der verschiedenen Varianten für hochradioaktive Abfälle	74

Der Bericht wurde erarbeitet und gutgeheissen von

Dr. Lukas Hauber, Geologe, Basel
 Dipl. Ing. Rudolf Häusermann, Zürich
 Prof. Dr. Theodor Hügi, Geologe, Bern
 Dr. Werner Hunzinger, Physiker, Bern
 Prof. Dr. Heinrich Jäckli, Geologe, Zürich
 Dr. Claude Lunke, Physiker, Neuenburg
 Dr. Claude Vuilleumier, Chemiker, Bern

Inhalt

Zusammenfassung	43
1. Einleitung	45
2. Herkunft und Art der Abfälle	46
2.1 Herkunft	46
2.2 Zustand und Eigenschaften	49
2.3 Anfallende Mengen radioaktiver Abfälle	51
3. Behandlung und Konditionierung der Abfälle	52
3.1 Ziele und Aufgaben	52
3.2 Methoden	53
4. Lagerung	57
4.1 Grundsätzliches	57
4.2 Schwach- und mittelaktive Abfälle	58
4.3 Hochaktive Abfälle	58
4.4 Anforderungen an ein Endlager in Gesteinen	59
5. Heutiger Stand der Lagerungstechnik und der Forschung	61
5.1 Bestehende Anlagen	61
5.2 Projektierte Anlagen	63
5.3 Forschung und Entwicklung	63
6. Sicherheitsanalyse	68
6.1 Grundsätzliches	68
6.2 Sicherheit der Operationen vor der Beseitigung	68
6.3 Sicherheit der Endlagerstätte	68
7. Offene Fragen — kritische Erwägungen	70
7.1 Forschungsprogramme	70
7.2 Langfristige geologische Prognosen	72
7.3 Evaluation der verschiedenen Varianten für hochradioaktive Abfälle	74
7.4 Beschränkte weitere Verwendung der betroffenen Gebiete	75
Anhang I: Tabelle berechneter Aktivitäten der wichtigsten Spalt- produkte und Transurane eines wiederaufbereiteten Leichtwasserreaktor-Brennstoffes	76
Anhang II: Glossar	78
Literaturverzeichnis	80

Zusammenfassung

Radioaktive Abfälle entstehen in Kernkraftwerken, Wiederaufbereitungsanlagen, Industrie, Forschung, Medizin und Spitälern. Der Abfall kann anfallen in festem, flüssigem oder gasförmigem Zustand. Es handelt sich um α -, β - und γ -Strahler oder Gemische dieser Strahler. Sein Aktivitätsinventar reicht von schwach- über mittel- bis hochaktiv.

Entstehung
radioaktiver
Abfälle

Die anfallenden Mengen radioaktiven Abfalles sind überschaubar: Man rechnet damit, dass die Kernkraftwerke (die grössten Abfallproduzenten) pro Jahr und GWe 100—200 m³ schwach- und mittelaktiven und 2—3 m³ verglasten, hochaktiven Abfall produzieren.

Anfallende
Mengen

Das Ziel der Behandlung und Konditionierung der radioaktiven Abfälle besteht darin, die Mobilität der Radionuklide stark zu verringern und die *Eigenschaften des Endlagerproduktes* im Hinblick auf die Langzeitlagerung zu *optimieren*. Für die Konditionierung von schwach- und mittelaktivem Abfall hat sich eine Verfestigung in Beton, Bitumen oder Kunststoff bis heute bewährt. Die Technologie der *Einbettung* von hochaktiven Spaltproduktlösungen in Glas ist die bis heute fortgeschrittenste Lösung. Eine industrielle Verglasungsanlage steht heute in Frankreich in Betrieb. Weitere Materialien, wie Keramik, Metalle, synthetische Gesteine, werden für die Konditionierung hochaktiver Spaltproduktlösungen auf ihre Eignung als Matrizen untersucht.

Ziel der Behandlung: Optimierung der Eigenschaften des Endlagerproduktes

Einbettung
in Glas

Für die Endlagerung aller Arten von radioaktiven Abfällen stehen Möglichkeiten wie Tiefsee und geologische Formationen offen. Neben der Tiefseeversenkung, die in Europa für die Entsorgung schwach- und mittelaktiver Abfälle angewendet wird, betrachtet man weltweit die *Endlagerung in geologischen Formationen als aussichtsreichste Methode*. Dabei muss den petrographischen Eigenschaften der Gesteine und dem Wasserkreislauf grosse Beachtung geschenkt werden, ebenso verlangen die geologischen sowie einige nicht geologische Parameter Berücksichtigung.

Endlagerung in
geologischen
Formationen
aussichtsreichste
Methode

Neben umfangreichen Anlagen für die Zwischenlagerung von schwach-, mittel- und hochaktiven Abfällen auf dem Gelände von Kernkraftwerken und Aufbereitungsanlagen wurden in der westlichen Hemisphäre bis heute lediglich *in den USA und in der BRD* eigentliche unterirdische Endlager in geologischen Formationen für *Versuchseinlagerungen* eingerichtet. Daneben wird weltweit nach geeigneten Gesteinen gesucht, welche als Wirtgesteine für die Endlagerung in Frage kämen. Ausgedehnte Laboruntersuchungen sollen die Eignung solcher Gesteine für diesen Zweck klären.

Versuchseinlagerungen in der BRD und in den USA

Zur Beurteilung der Sicherheit einer einmal gewählten Endlagerstätte ist die *Integrität der Isolation im Störfall* massgebend. Die Störfallanalyse

Integrität der Isolation im Störfall massgebend

erlaubt es, den Einfluss verschiedener Ereignisse auf die Isolationsbarrieren und die Konsequenzen der Störfälle auf die Bevölkerung in der Umgebung der Lagerstätte vorauszusagen. Die *Störfallanalysen*, obschon auf eine Reihe von Daten, die nur für eine bestimmte Lokalisation gültig sind, nicht eingehend, lassen folgende allgemeingültige Schlussfolgerungen zu:

- Der einzige Weg der Aktivitätsfreisetzung aus einem Endlager ist derjenige über einen Wassereintritt und anschliessendes Entweichen aus dem Lager.
- Geschwindigkeit des Grundwassers, Sorptionseigenschaften des Gesteines und Weglänge, sowie die Löslichkeit und andere chemische Eigenschaften der radioaktiven Stoffe sind diejenigen Parameter, welche den Aktivitätseintritt in die Biosphäre entscheidend beeinflussen.

Die bei der Endlagerung von aktiven Abfällen auftretenden wissenschaftlichen und technischen *Probleme sind komplexer Natur*. Ihre *Lösung verlangt lange und teure Untersuchungen*, wobei folgende Problemkreise speziell berücksichtigt werden müssen:

- Immobilisierung der Isotope;
- Auswaschung und Rückhaltevermögen der Matrix;
- Stabilität der Matrix;
- Sorptionseigenschaft der Gesteine.

Ein weiterer Problemkreis umfasst die *Langzeitgeologie* und -stabilität der das Endlager umgebenden geologischen Formation, da hochaktive Abfälle während Jahrtausenden von der Biosphäre isoliert werden müssen.

Zeitspannen dieser Grössenordnung sind in der Konzeption technischer Anlagen bisher nicht vorgekommen und werfen deshalb die Frage auf nach der *Gültigkeit langfristiger Extrapolationen* aufgrund bisheriger Kenntnisse. Diese Überlegung führt dazu, konservative Hypothesen der Sicherheitsanalyse zugrundezulegen.

Bei der Projektierung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in grossen Tiefen sind verschiedene Varianten denkbar. Der Stand der Technik im Zeitpunkt der Wahl wird die zweckdienlichste Lösung bestimmen.

Endlich müssen nach der endgültigen Verschlussung des Lagers die diesbezüglichen Unterlagen lange genug archiviert werden, damit *unbeabsichtigte Beschädigungen durch menschliche Eingriffe vermieden werden*.

1. Einleitung

Radioaktive Abfälle entstehen, seit sich Wissenschaft, Medizin, Industrie und Kriegstechnologie radioaktive Stoffe und Kernspaltung dienstbar gemacht haben. Abgesehen vom militärischen Bereich fallen sie in grossem Umfang erst an, seit die Kernenergie zur Gewinnung von Elektrizität herangezogen wird, also *seit etwa 20 Jahren*. Die Abfälle stellen sich aber mit einer gewissen Verzögerung ein, weil manche Abfälle — insbesondere die hochaktiven aus der Wiederaufbereitung von Brennelementen — erst im Laufe des Betriebes anfallen. Dazu kommt, dass die Abfälle aus verschiedenen Gründen und z. T. über längere Zeit auf dem Betriebsgelände selbst gelagert werden. Während Technologie und Betrieb von Kernkraftwerken heute als eingeführt und durch Erfahrung gefestigt gelten dürfen, trifft dies deshalb für die Lagerung noch nicht zu.

Entstehung
radioaktiver
Abfälle
seit etwa
20 Jahren

Der vorliegende Bericht kann daher nicht eine in allen Teilen bekannte Technologie, ihre naturwissenschaftlichen Rahmenbedingungen und ihre Auswirkungen sowie die damit verknüpfte Problematik darlegen. Er möchte aber jene *Faktoren aufzeigen*, die aus naturwissenschaftlicher Sicht *bei der Lagerung* radioaktiver Abfälle eine Rolle spielen können. Bei deren Durchsicht wird deutlich, dass niemals eine Lagerung radioaktiver Abfälle möglich sein wird, bei der sämtliche Faktoren in einer idealen Situation und Kombination vorliegen. Jede Lösung muss deshalb mit Hilfe eines gründlichen Optimierungsprozesses herausgearbeitet werden. Eine solche Aufgabe ist nur lösbar, wenn möglichst viele Standorte, deren Gegebenheiten und Randbedingungen durch *gründliche Vorabklärungen* bekannt sind, in diesen Auswahlprozess einbezogen werden können. Je weniger Erfahrung vorliegt, um so gründlicher und umfassender ist diese Aufgabe anzugehen. Andererseits darf Erfahrung nie in der Routine erstarren. *In der Schweiz* steht die Evaluation geeigneter Standorte für die Endlagerung radioaktiver Abfälle noch am Anfang. Es wird deshalb noch grosser Anstrengungen bedürfen, um Klarheit über Möglichkeiten der Endlagerung in der Schweiz zu erhalten; dazu gehören auch die Ausführung von Sondierbohrungen und der Einsatz anderer geeigneter Methoden sowie deren sorgfältige Auswertung.

Ziel des vorliegenden Berichtes:
Faktoren aufzeigen, die eine Rolle spielen können

Gründliche Vorabklärungen nötig in der Schweiz

Auf die Problematik der Abfälle aus dem militärischen Sektor wird hier nicht eingegangen, da sie sich für die Schweiz nicht stellt. Ebenso wird auf die Behandlung der Abfälle, welche bei der Urangewinnung und Erzaufbereitung (Tailings, Phosphaterze) entstehen, verzichtet, da solche Anlagen in der Schweiz nicht vorhanden sind.

Im vorliegenden Bericht wird unter dem Begriff «Lagerung radioaktiver Abfälle» verstanden:

1. Orte in der Lithosphäre, wohin radioaktive Abfälle entweder temporär (Zwischenlager) oder zum Zwecke der Endlagerung (Beseitigung) verbracht worden sind.

2. Die mit dem Einbringen radioaktiver Abfälle an solche Orte in Zusammenhang stehenden Tätigkeiten.

Endlager oder Zwischenlager mit Rückholbarkeit denkbar

Definitionsgemäss sind die Abfälle in einem *Endlager* nicht mehr rückholbar. Es sind aber ohne weiteres Lager innerhalb der Lithosphäre *denkbar*, bei denen die *Rückholbarkeit* gewährleistet ist. In diesen Fällen wird aber nicht von einem Endlager gesprochen, auch wenn eine Rückgewinnung des Abfalles nicht von vornherein feststeht oder eingeplant ist. Vor- und Nachteile einer Endlagerung oder einer Lagerung mit Rückholbarkeit sind für jeden einzelnen Fall zu prüfen und abzuwägen.

Neben naturwissenschaftlichem Bereich auch andere Bereiche wichtig, jedoch ausserhalb der behandelten Fragestellung

Im *vorliegenden Bericht* werden die *naturwissenschaftlichen und technologischen Probleme* der Lagerung radioaktiver Abfälle behandelt. Dass es daneben aber auch *andere Bereiche* gibt, die mit in die Betrachtungen über die Lagerung einbezogen werden müssen, ist uns bewusst; wir denken hierbei insbesondere an die menschlichen Imponderabilien wie kriegerische Einwirkungen, Terrorakte oder auch einfach Ungenügen und Versagen. Dies sind jedoch Aspekte, welche *ausserhalb unserer Fragestellung* liegen.

Heutiger Stand der Problematik

Schliesslich möchten wir betonen, dass der Zweck dieses Berichtes nicht darin besteht, eine bestimmte Lösung des Problems vorzuschlagen oder zu Gunsten eines bestimmten Projektes einzutreten. Unsere Arbeit hat darin bestanden, den *heutigen Stand der Problematik* bei der Lagerung der Abfälle zu zeigen. Dabei stellen wir fest, dass es nicht tunlich ist zu behaupten, das Problem sei unlösbar, dass aber nichtsdestoweniger wichtige interdisziplinäre Forschungen nötig sind, bevor eine überzeugende Lösung, welche genügend Sicherheit bietet, vorgeschlagen werden kann.

Bei diesem Bericht handelt es sich um die Gemeinschaftsarbeit der ganzen Arbeitsgruppe. Er ist in gemeinsamer Lesung erarbeitet und in Einmütigkeit verabschiedet worden. Auf ein ausführliches Literaturverzeichnis ist bewusst verzichtet worden; ein solches hätte den vorgegebenen Rahmen gesprengt. Das Literaturverzeichnis möchte dem interessierten Leser lediglich den Zugang zu weiteren das Thema betreffenden Arbeiten, z. T. mit ausführlichen Literaturangaben, ermöglichen.

2. Herkunft und Art der Abfälle

2.1 Herkunft

Kernkraftwerke

Spaltprodukte

Kernspaltungsreaktoren liefern als die erste Kategorie radioaktiver Abfälle die eigentlichen *Spaltprodukte*. Diese umfassen radioaktive Nuklide mit

Massenzahlen zwischen 72 (Zink) und 158 (Samarium) sowie Tritium (H-3). Daneben entstehen durch sukzessive Neutroneneinfangsprozesse im Uran-238 die Aktiniden.

Radioaktive *Aktivierungsprodukte* entstehen daneben in den Bau- und Konstruktionsmaterialien des Kernkraftwerkes durch Neutronenbestrahlung, welche die betroffenen Reaktorteile gleich wie kontaminierte Anlageteile beim Ersatz zu radioaktivem Abfall werden lassen. Zu den Aktivierungsprodukten ist ferner Kohlenstoff-14 hinzuzuzählen, welches denselben Weg in die Atmosphäre nimmt wie die flüchtigen Spaltprodukte.

Aktivierungs-
produkte

Bei Reparaturen, Reinigungs- und Unterhaltsarbeiten fallen ausserdem feste radioaktive Abfälle an, die aus kontaminierten Schutz- und Reinigungsmaterialien bestehen. Aus der Wasserreinigungsanlage stammt eine weitere Kategorie fester radioaktiver Abfälle in Form von Schlämmen und Eindampfkonzentraten, und aus der Abluftreinigung fallen kontaminierte Filter als Abfall an.

Stillgelegte Kernkraftwerke

Die vorstehend genannten Abfälle aus aktivierten Reaktorteilen und kontaminierten Anlageteilen können bei Stilllegung oder Austausch von Komponenten eines Kernkraftwerkes in beträchtlichen Mengen anfallen.

Wiederaufarbeitungsanlagen

In Brennstoffwiederaufarbeitungsanlagen wird der verbrauchte Brennstoff chemisch so aufbereitet, dass das nicht gespaltene Uran zurückgewonnen und das entstandene Plutonium gewonnen wird. *Die nicht weiter verwendbaren Spaltprodukte und Aktinide* werden abgetrennt. Diese stellen zusammen den Abfall im eigentlichen Sinne dar, macht er doch *mehr als 99% der gesamten mit der Kernenergiegewinnung verbundenen Erzeugung radioaktiver Stoffe* aus (siehe Tabelle im Anhang).

Nicht weiter
verwendbare
Spaltprodukte
und Aktinide

Nach den heute üblichen Trennverfahren liegen die nicht restlos zurückgewonnenen Uran- und Plutoniummengen zusammen mit den übrigen Aktiniden und den nicht flüchtigen Spaltprodukten vermischt zunächst als *stark salpetersaure Lösung* vor. Grundsätzlich ist eine Abtrennung der Aktiniden von den Spaltprodukten zwecks separater Behandlung möglich, jedoch nicht mit den heute üblichen Aufarbeitungsverfahren.

Die *flüchtigen Elemente* unter den Spaltprodukten entweichen beim Auflösen des bestrahlten Brennstoffes in die Gasphase und werden entweder in die Atmosphäre abgeblasen oder zurückgehalten. Zu den flüchtigen

Flüchtige
Elemente

radioaktiven Spaltprodukten ist hier auch ein Bruchteil des Tritiums zu zählen. Die *Hauptmenge* des vorhandenen *Tritiums* allerdings findet sich *im Abwasser* der Wiederaufbereitungsanlage.

Das Hüllenmaterial der aufbereiteten Brennelemente stellt eine besondere Kategorie aktiven Abfalles dar.

Aus den verschiedenen Kreisläufen einer Wiederaufbereitungsanlage lassen sich die folgenden *Kategorien flüssiger radioaktiver Abfälle* unterscheiden:

- a) wässrige Lösungen hoher Aktivität («hot wastes»), zur Hauptsache bestehend aus langlebigen Spaltprodukten;
- b) wässrige Lösungen geringer Aktivität («warm wastes»), hauptsächlich bestehend aus langlebigen Spaltprodukten;
- c) wässrige Lösungen hoher Aktivität aus den Plutonium-Reinigungskreisläufen, enthaltend vornehmlich Plutonium und andere Aktinide;
- d) wässrige Lösungen geringer Aktivität aus den Plutonium-Reinigungskreisläufen, enthaltend vornehmlich Plutonium und andere α -Strahler;
- e) kontaminierte organische Flüssigkeiten, vor allem Butylphosphate und Kerosen.

Reinigungskreisläufe einer Wiederaufbereitungsanlage liefern auch *feste Abfälle* in Form von Filtern, Ionentauschern, Silicagelen etc., beladen mit Spaltprodukten oder Aktiniden.

Bei Reparaturen, Reinigungs- und Unterhaltsarbeiten fallen ausserdem feste radioaktive Abfälle, bestehend aus Schutz- und Reinigungsmaterialien, sowie nicht dekontaminierbare Anlageteile (Ventile, Pumpen, Rohre etc.) an. Ein Teil dieser Abfälle kann eine besondere Kategorie bilden, nämlich wenn sie mit Plutonium und anderen α -Strahlern kontaminiert sind.

Industrie und Forschung

Die Verwendung von *Leuchtfarben* und Tritiumgasleuchtkörpern (Beta-lights) auf Uhren und anderen Messinstrumenten liefert radioaktiven Abfall. Die industrielle Herstellung von *Ionisationsrauchmeldern* führt zu radioaktiven festen Abfallstücken oder Quellenfolien.

Die Forschung an Hochschulen und in der Industrie lässt radioaktive Abfälle der mannigfaltigsten Arten entstehen.

Medizin

Radium zur *Strahlentherapie* wird sukzessive durch künstlich radioaktive Stoffe ersetzt und somit zu radioaktivem Abfall. Andere geschlossene radioaktive Quellen, die zur Strahlentherapie verwendet wurden und ersetzt worden sind, gehören ebenfalls zum radioaktiven Abfall aus dem medizinischen Anwendungsbereich radioaktiver Stoffe. Die in der Nuklearmedizin zur Diagnostik und Therapie üblichen offenen radioaktiven Strahlenquellen sind ausnahmslos von kurzer Halbwertszeit (< 60 Tage).

Strahlentherapie

Produkte des täglichen Bedarfs

Radioaktive Stoffe finden sich in *Konsumgütern* wie Uhren, Messinstrumenten, Ionisationsrauchmeldern usw.

in Konsumgütern

Wenn das Produkt defekt wird oder ausgedient hat, wird es teilweise zu radioaktivem Abfall.

2.2 Zustand und Eigenschaften

Feste Abfälle

Radioaktive Abfälle, die bei ihrer Entstehung bereits die feste Form besitzen, sind in Abschnitt 2.1 als solche bezeichnet. Dazu zählen auch Ionentauscherharze und Schlämme, auch wenn sie nicht vollkommen wasserfrei sind.

Flüssige Abfälle

Man kann, wie das oben geschehen ist, organische und wässrige Lösungen unterscheiden. Die Strahlenschutzverordnung schreibt vor, dass, wo es mit zumutbarem Aufwand möglich ist, am Ort der Entstehung *flüssige Abfälle in feste Form überzuführen sind*.

Flüssige Abfälle sind in feste Form überzuführen

Gasförmige Abfälle

Die Strahlenschutzverordnung verlangt, dass *gasförmige radioaktive Abfälle*, wie Edelgase, Verbindungen des Jodes und des C-14 am Ort ihrer Entstehung *niedergeschlagen werden*, wenn dies mit zumutbarem Aufwand möglich ist.

Gasförmige radioaktive Abfälle sind niederschlagen

Strahlung, Radiotoxizität

Radioaktive
Stoffe wirken
auf Distanz oder
durch
Inkorporation

Was die Gefährdung durch radioaktive Abfälle betrifft, so unterscheidet sie sich nicht von derjenigen durch radioaktive Stoffe schlechthin. *Radioaktive Stoffe wirken entweder auf Distanz* durch die Durchdringungsfähigkeit emittierter Strahlung (externe Strahlenbelastung) *oder nach Inkorporation* und mehr oder weniger langem Verweilen im Körper oder in einzelnen Organen (interne Strahlenbelastung).

Externe Bestrahlung reduziert man durch Abschirmung oder Distanz, *interne Bestrahlung durch Reduktion oder Vermeidung der Inkorporation* über Atemluft, Trinkwasser und Nahrung.

Toxizitäten
aufgrund physi-
kalischer und
biologischer
Eigenschaften
vergleichbar

Die *Toxizitäten* einzelner Radionuklide lassen sich *aufgrund ihrer physikalischen* (Halbwertszeit, Strahlenart, Zerfallsenergie) *und biologischen Eigenschaften* (Resorbierbarkeit, Speicherung in Organen, Ausscheidung usw.) miteinander *vergleichen*. Nimmt man z. B. die auf das Speicherorgan des menschlichen Körpers übertragene Zerfallsenergie je Aktivitätseinheit des inkorporierten Radionuklides als Vergleichsbasis, so resultieren neun Toxizitätsklassen. Anhang 3 der Strahlenschutzverordnung ordnet die Toxizität der meisten bekannten Radionuklide nach diesem Prinzip ein.

Zerfall und Halbwertszeit

Halbwertszeiten
von Wochen
oder Monaten

Die Halbwertszeit der Radionuklide im radioaktiven Abfall ist von ausschlaggebender Bedeutung für deren Gefährdungspotential. *Halbwertszeiten in der Größenordnung von Wochen oder Monaten erlauben es, den Abfall unter Kontrolle abklingen zu lassen und dann als inaktiv zu beseitigen*. Das Spaltproduktgemisch enthält nach einigen Jahren zur Hauptsache nur noch die beiden Nuklide Sr-90 und Cs-137 (siehe Anhang I). Bei Deponie von radioaktiven Abfällen ausserhalb der Biosphäre geht die Rückkehr von Radionukliden in den Gefährdungsbereich des Menschen unter Umständen dermassen langsam vor sich, dass auch langlebige Radionuklide in der Zwischenzeit weitgehend zerfallen sein können.

Wärmeproduktion

Umwandlung der
Zerfallsenergie

Die *Umwandlung der Zerfallsenergie* radioaktiver Stoffe führt bei hohen Aktivitätskonzentrationen zu merkbarer Wärmeproduktion. Die folgenden Abfallkategorien bedürfen im allgemeinen zusätzlicher Massnahmen zur Wärmeabfuhr:

- bestrahlte Brennstoffelemente;
- konzentrierte Spaltproduktlösungen;
- verfestigter hochaktiver Abfall.

Umwandlung, Transmutation

Kernumwandlungen als Mittel, den Zustand und die Eigenschaften radioaktiver Abfälle zu ändern, lassen sich auf abgetrennte Aktiniden anwenden, die bei den heutigen Wiederaufbereitungsverfahren noch in den Spaltprodukten enthalten sind. *Durch Spaltung der spaltbaren Kerne* unter den Aktiniden *entstehen Spaltprodukte*, die *kürzere Halbwertszeiten* haben als ihre Ausgangsmaterialien. Andere theoretisch sich anbietende Umwandlungsprozesse für Spaltprodukte scheitern daran, dass sie gesamthaft mehr Abfälle produzieren, als sie vernichten.

Durch Spaltung
spaltbare Kerne
kürzere
Halbwertszeiten

2.3 Anfallende Mengen radioaktiver Abfälle

In Kernkraftwerken jährlich anfallende Mengen

Kernkraftwerke

	Siedewasserreaktor BWR	Druckwasserreaktor PWR
<i>Flüchtige Nuklide, in die Atmosphäre (*):</i>		
Edelgase	90 000 Ci/GWe · a	9 000 Ci/GWe · a
Jod-131	8,8 Ci/GWe · a	0,05 Ci/GWe · a
C-14	20 Ci/GWe · a	10 Ci/GWe · a
<i>Nichtflüchtige Nuklide, in Gewässer (*):</i>		
Spalt- und Aktivierungsprodukte	2 Ci/GWe · a	0,5 Ci/GWe · a
Tritium	50 Ci/GWe · a	120 Ci/GWe · a
<i>Feste Abfälle vor der Konditionierung (**):</i>		
schwachaktive, hauptsächlich Ionentauscherharze	100 m³	40 m³
mittelaktive, hauptsächlich Ionentauscherharze und Konzentrate	110 m³	50 m³

1 Gigawatt = 1 Milliarde Watt (GWe) entspricht ca. der elektrischen Leistung eines Kernkraftwerkes von der Grösse Gösgen oder Mühleberg und die Beznau I und II zusammen.

*) mehrjährige Erfahrungswerte aus Deutschland
**) extrapolierte Erfahrungswerte aus der Schweiz

In der Wiederaufarbeitung anfallende Abfallmengen

Wiederauf-
bereitung

a) Flüchtige Nuklide

Die anfallenden flüchtigen Abfälle in Brennstoffwiederaufbereitungsanlagen ergeben sich aus den Werten der Tabelle im Anhang I und aus der Anlagekapazität, welche bis zu 1500 Tonnen Uran pro Jahr erreichen kann.

In projektierten Wiederaufbereitungsanlagen werden die Jod-Isotope aus den Auflöserabgasen ausgewaschen und die Edelgase ausgefroren.

b) Nichtflüchtige Nuklide in flüssiger Form

Der hochaktive Abfall macht pro 1000 Tonnen aufgearbeitetes Uran¹⁾ mit einem Abbrand von 33 000 Wd/t U 600 m³ konzentrierte wässrige Lösung aus. Er besteht aus Spaltprodukten und Transuranen, mit abnehmenden Aktivitäten und abnehmender Wärmeproduktion, wie es die folgende Tabelle zeigt.

	1	10	100	1000 Jahre
Spaltprodukte	2,2 MCi	0,32 MCi	34 kCi	21 Ci/t U
Transurane	9,3 kCi	2,4 kCi	0,33 kCi	85 Ci/t U
Wärmeproduktion	10 kW	1,1 kW	0,11 kW	2,3 W/t U

Den Werten der Tabelle liegen Abtrennfaktoren von 99,5% für Uran und Plutonium sowie von 0 für die übrigen Transurane zugrunde.

c) Feste Abfälle

Bei der Verfestigung der hochaktiven flüssigen Abfälle entstehen pro Jahr und 1 GWe 2 bis 3 m³ verglaster Abfall.

Aus Forschung, Medizin und Industrie anfallende Abfälle

Das Eidg. Gesundheitsamt sammelt und beseitigt die in Forschung, Medizin und Industrie anfallenden festen radioaktiven Abfälle und lässt sie durch das EIR beseitigen. Im Durchschnitt der letzten Jahre waren es rund 20 m³ pro Jahr (vor der Konditionierung) der Kategorie schwach- und mittelaktiv.

3. Behandlung und Konditionierung der Abfälle

3.1 Ziele und Aufgaben

Das oberste Ziel der Abfallbehandlung ist der *Schutz der Bevölkerung vor Strahlenschäden* durch den Abfall. Dieses Schutzziel wird erreicht durch

¹⁾ 1 GWe Kernkraftwerk liefert 35 t abgebrannten Brennstoff. Dies entspricht einer elektrischen Produktion von 7 Milliarden Kilowattstunden (KWh).

ein Lagerkonzept, dem ein Mehrfach-Barrierenmodell zugrundeliegt, mit dem Zweck, die Radioisotope von der Biosphäre durch Isolation und Immobilisation fernzuhalten.

Die *Abfallaufbereitung* (Konditionierung) hat hauptsächlich den Zweck, die erste Barriere der Entsorgung sicherzustellen, das heisst, die Mobilität der Radionuklide stark zu verringern und die physikalischen und chemischen *Eigenschaften des Endlagerproduktes* im Hinblick auf die Langzeitlagerung zu *optimieren*.

Abfallaufbereitung optimiert die Eigenschaften des Endlagerproduktes

Die Eigenschaften *des Konditionierungsproduktes* sollen unter anderem den nachfolgenden *Anforderungen* genügen:

Anforderungen an das Konditionierungsprodukt

- äusserst geringe Löslichkeit in Wasser;
- Temperaturbeständigkeit, soweit dies die Wärmeproduktion des Abfalles erfordert;
- Beständigkeit gegen die durch den konditionierten Abfall erzeugten Strahlen;
- gute Wärmeleitfähigkeit, soweit dies die Wärmeproduktion des Abfalles erfordert;
- Strukturbeständigkeit;
- mechanische Festigkeit;
- chemische Verträglichkeit mit der Lagerumgebung.

Durch die Konditionierung werden weitere Anforderungen im Hinblick auf Abschirmung, Volumenverminderung, Transportfähigkeit usw. erfüllt.

3.2 Methoden

Unter Konditionierung des Abfalles jeglicher Art versteht man eine *Überführung des Abfalles in eine feste Matrix*. Es muss entsprechend dem Langzeitrisiko zwischen Konditionierung von schwach- und mittelaktivem Abfall einerseits und Konditionierung von hochaktivem Abfall andererseits unterschieden werden.

Überführung des Abfalles in eine feste Matrix

Schwach- und mittelaktiver Abfall

Da der Toxizitätsindex von schwach- und mittelaktivem Abfall nach spätestens 500 Jahren unter denjenigen des Aaregranites abfällt, müssen *an das Verfestigungsmaterial nicht allzu hohe Anforderungen* gestellt werden. Verschiedene Verfestigungsmaterialien sind heute im Einsatz, z. B. Zement, Bitumen und Kunststoffe. Diese Materialien finden heute in Kernkraftwerken und Forschungszentren in industriellem Massstab Anwendung und haben sich dort bewährt.

Anforderungen an das Verfestigungsmaterial nicht allzu hoch

Für die brennbaren schwachaktiven Abfälle steht im EIR Würenlingen eine zentrale Prototypanlage für die Veraschung zur Verfügung. Durch die Veraschung lässt sich das Volumen um einen Faktor bis etwa 20 reduzieren. Die anfallende Asche kann leicht durch Einbetten in ein inertes Bindemittel in eine endlagerfähige Form übergeführt werden. Im Ausland liegen die Verhältnisse ähnlich.

Hochaktiver Abfall

Verfestigungsverfahren

Für die Verfestigung der in den Wiederaufbereitungsanlagen erzeugten hochaktiven Spaltproduktlösungen sind weltweit sechs *Verfestigungsverfahren* in technischem Massstab erprobt worden, mit denen bereits Tausende von m^3 verfestigter Endprodukte hergestellt wurden:

a) Kalzinierungsverfahren

Hier sind die in den USA entwickelten Topf-, Sprüh- und Wirbelbett-Kalzinierungsverfahren zu nennen. Kalzinate entstehen durch Verdampfen der radioaktiven Spaltproduktlösungen und Erhitzen der Rückstände auf Temperaturen zwischen 350°C und 900°C . In industriellem Massstab ist die in Idaho Falls entwickelte Wirbelbett-Kalzinierung seit 1963 erfolgreich angewendet worden. Etwa $10\,000\text{ m}^3$ hochaktive Flüssigabfälle sind bis heute zu etwa 1000 m^3 Feststoffen mit einem Durchsatz von ca. $9\text{ m}^3/\text{Tag}$ kalziniert worden. Kalzinate weisen allerdings für die Endlagerung nicht ausreichende Eigenschaften auf. Sie eignen sich jedoch sehr gut als Zwischenlagerungsprodukte und zur Herstellung von Endlagerprodukten.

b) Verglasung

Folgende Verfahren, die in technischem Massstab erprobt worden sind, sollen genannt werden: die Phosphatglasverfestigung (USA), das Fingal-(Harvest)-Verglasungsverfahren (Grossbritannien) und die Piver-Topf-Glasverfestigung (Frankreich). Bisher sind Borsilikat-, Phosphat- und Borphosphatgläser zur Verfestigung hochaktiver Abfälle verwendet worden. Die Glasmatrizen können ca. 20—30 Gewichtsprozent der in Oxidform vorliegenden Spaltprodukte (Kalzinate) aufnehmen.

In den meisten Ländern konzentrieren sich die Entwicklungsarbeiten auf die Fixierung der hochaktiven Abfälle in einer Borsilikatmatrix. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die meisten Radionuklide im Glas chemisch gebunden sind und somit eigentliche Bestandteile der Gläser bilden. Jedoch ist der Transmutation der Elemente durch radioaktiven Zerfall Rechnung zu tragen.

Stichwortartig zusammengefasst kann der *Verfestigungsprozess* zu Glas folgendermassen wiedergegeben werden: Verfestigungs-
prozess

- hochaktive Spaltproduktlösung;
- Denitrieren;
- Trocknen;
- Kalzinieren;
- Schmelzen des Kalzinates und der glasbildenden Zusätze;
- Eingiessen in Behälter;
- Verfestigen des Verglasungsproduktes.

Folgende *Eigenschaften der Gläser* wurden im Hinblick auf die Entsorgung speziell untersucht: Eigenschaften
der Gläser

Langzeitverhalten

Gläser werden heute zur Einbindung hochaktiver Abfälle in Betracht gezogen, da sie unter normalen Umständen eine sehr hohe Langzeitstabilität aufweisen, was Untersuchungen an künstlichen Gläsern des Altertums und an vulkanischen Gläsern gezeigt haben.

Thermische Stabilität

Durch Wärmezufuhr finden in den Gläsern mikrokristalline Umwandlungen statt, die zu den genannten Glaskeramiken führen. Umfangreiche thermodynamische Experimente haben gezeigt, dass das Glas in einem Temperaturbereich von ca. 400°C — 940°C kristallisiert. Durch künstliche Kühlung der hochaktiven Abfallkörper in der Phase der Zwischenlagerung kann jedoch eine ausreichende Sicherheitsmarge zu dieser Temperatur eingehalten werden, bis die Zerfallswärme genügend abgeklungen ist.

Strahlungsbeständigkeit

In den ersten Jahren der Lagerung ist nur die Zerfallswärme von Bedeutung. Danach wird die Beständigkeit der Gläser gegenüber dem Einfluss ihrer eigenen Strahlung in zunehmendem Mass zum *wichtigsten Faktor*. Von Beta-, Gamma- und Neutronenstrahlen ist bekannt, dass ihre Wirkung die Stabilität des Glases kaum beeinträchtigt. Hingegen ist die absorbierte Energie bei Alpha-Strahlen wegen der Teilchengrösse, der hohen Ionisierungsdichte und dem Energiebeitrag der Rückstosskerne grösser.

Strahlungs-
beständigkeit
wichtigster
Faktor

Versuche in Deutschland mit Alpha-Strahlern haben gezeigt, dass eine Alpha-Dosis von $1,6 \cdot 10^{11}$ rad, was einer hypothetischen Lagerzeit von etwa 3000 Jahren entspricht, noch keine Anzeichen für eine Veränderung der Gläser erkennen lässt.

Versuche mit
Alphastrahlern

Der Effekt der Energiespeicherung als Folge der Alpha-Strahlung wurde in den USA studiert. Dabei wurde errechnet, dass die im Zeitraum von 1 Mio. Jahren gespeicherte Energie 35—40 cal/g betragen dürfte. Als zulässiger Wert werden dagegen 200 cal/g genannt.

Alpha-Strahlung hat auch eine Heliumproduktion zur Folge. Die Druckzunahme in einem verschweissten Zylinder mit verglasten hochaktiven Abfällen wird jedoch 1 Atmosphäre nicht überschreiten.

Auslaugebeständigkeit

Weil Glasprodukte geringe Auslaugraten besitzen, stellt die Bindematrix bei der Isolation hochaktiver Abfälle die innerste Schutzbarriere dar. Anzustreben sind Glasprodukte mit möglichst geringer Auslaugrate. Unter den verschiedensten Bedingungen sind seit mehr als 10 Jahren *Labor- und Feldexperimente* durchgeführt worden, um das Auslaugeverhalten hochaktiver Gläser eingehend zu testen.

Labor- und
Feldexperimente

Werte

Ein *realistischer Wert* für die Auslaugraten beträgt bei Raumtemperatur 10^{-6} g/cm² und Tag. Dies bedeutet, dass aus einem hochaktiven Glaskörper, welcher über die Dauer von 1000 Jahren ständig mit seiner gesamten Oberfläche im Wasser liegt, weniger als 2% seiner anfänglichen Masse ausgelaugt wird. Unlängst haben jedoch Versuche gezeigt, dass dieser Wert für gewisse Materialien wesentlich kleiner ist (10^{-7} g/cm² und Tag).

Bemerkenswert ist ein kanadischer Langzeitversuch, bei dem seit 1960 mehrere Glasblöcke unter der Erdoberfläche dem Einfluss eines Grundwasserstromes ausgesetzt sind (LV 9). Mit Ausnahme der ersten zwei Jahre, in denen die höchstzulässige Konzentration für Trinkwasser in der unmittelbaren Umgebung der Glasblöcke überschritten wurde, konnte aus der periodisch gemessenen Radioaktivität von Sr-90 im Grundwasser für die Jahre 1968—1978 eine Auslaugrate von $5 \cdot 10^{-11}$ g/cm² und Tag errechnet werden. Aus diesem in situ-Experiment geht die hohe Auslaugebeständigkeit von Gläsern hervor.

Weitere Matrizen für die Konditionierung von hochaktivem Abfall, wie Keramik, Metalle u. a., werden heute labormässig untersucht. Die Vorarbeiten sind noch nicht so weit fortgeschritten, dass die Erstellung einer Pilotanlage ins Auge gefasst werden könnte.

4. Lagerung

4.1 Grundsätzliches

Oberstes Ziel jeder Lagerung von radioaktivem Abfall bleibt, diesen von der Biosphäre zu isolieren. Die Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle als Vorstufe ihrer endgültigen Lagerung erfolgt vorzugsweise in einem oberflächennahen Lager. Im Gegensatz zum Endlager muss der Abfall in einem Zwischenlager dauernd unter Kontrolle stehen. Das Zwischenlager dient zudem der Abkühlung hochaktiver Abfälle.

Ziel der Lagerung
Isolation

Zwischenlager
unter Kontrolle

Im Falle einer Endlagerung ist es weder vorgesehen noch möglich, den Abfall zu kontrollieren oder zurückzuholen. Bei der Endlagerung von radioaktivem, insbesondere hochaktivem Abfall in einer «geologischen Formation» müssen deren Eigenschaften vorher eingehend geprüft werden. Ein Ausführungsprojekt für ein Lager hat die Resultate dieser Prüfung gebührend zu berücksichtigen. Optimale Eigenschaften einer «geologischen Formation» und die Schaffung von Barrieren können vereint dazu dienen, den Abfall von der Biosphäre fernzuhalten.

Endlagerung

Eine erste Barriere stellt das Matrixmaterial dar, in das der Abfall eingeschlossen wird. Eine zweite Barriere wird geschaffen durch die Wahl des Wirtgesteins für das Lager. Dieser Gesteinskörper muss günstige geologisch-petrographische Eigenschaften aufweisen z. B. trocken und rissfrei sein sowie Aktivitätstransport nicht zulassen oder zumindest stark verzögern. Eine dritte Barriere stellen die günstigen Eigenschaften der Gesteinsmassen dar, die das Wirtgestein umhüllen.

Barrieren

Sofern diese Randbedingungen erfüllt bleiben, kann die Lagerung von radioaktivem Abfall in einer «geologischen Formation» sicher eine zweckmäßige und realistische Lösung darstellen. Zu beachten ist dabei allerdings, dass eine «geologische Formation» in den seltensten Fällen in mineralogischer und physikalischer Hinsicht als einheitlich gelten kann. Die mineralogische Zusammensetzung der eine «geologische Formation» aufbauenden Gesteine und deren weitere geologischen und physikalischen Eigenschaften sind im voraus eingehend zu untersuchen. Besondere Beachtung verdient das im Gestein vorhandene Wasser. Gemeint ist das in Hohlräumen, Klüften, Rissen oder Poren des Gesteines oder in Mineralien enthaltene Wasser. Die darin gelösten Stoffe werden je nach Gesteinsart recht unterschiedlich sein. Wässer mit bestimmten Ionen, wie von Sulfat oder Chlor, gelten als besonders aggressiv gegenüber metallischen oder unter Umständen auch anderen Materialien, wie keramischen Massen (LV 14). Hinzu kommt, dass je nach Tiefe, Temperatur und Druck die Lösungsbedingungen wechseln. Ein Gesteinskörper, in dem radioaktiver Abfall gelagert werden soll, muss somit ganz bestimmte geologische und petrographische Eigenschaften aufweisen (siehe dazu Abschnitt 4.4).

Geologische
Formation

Eigenschaften
im voraus zu
untersuchen

Wasser

4.2 Schwach- und mittelaktive Abfälle

In der Hydrosphäre

Tiefsee Die näheren Bedingungen für die Beseitigung von schwach- und mittelaktivem Abfall *in der Tiefsee*, an der auch die Schweiz beteiligt ist, sind durch die internationale Konvention von London 1975¹⁾ und ergänzende Richtlinien von IAEA und NEA/OECD geregelt.

Erdkruste Auch bei der Lagerung von niedrig- und mittelaktiven Abfällen *in der Erdkruste* muss eine unzulässige Gefährdung durch Kontamination des Grundwassers und der Biosphäre vermieden werden. Die erforderlichen Isolationszeiten betragen Jahrhunderte.

4.3 Hochaktive Abfälle

Zeitperiode: Jahrtausende Diese Art von Abfall muss über eine *Zeitperiode* gelagert werden, die *Jahrtausende* dauert. Die Dauer hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie beispielsweise vom Stand der Wiederaufarbeitungstechnologie.

Weltraum Verschiedentlich ist vorgeschlagen worden, den hochaktiven Abfall durch Beförderung *in den Weltraum* zu beseitigen. Die heutige Weltraumtechnologie erlaubt jedoch nicht, diese Methode sicher genug und kostengünstig zu realisieren.

Nach der Konvention von London 1975 dürfen hochaktive Abfälle nicht *in der Tiefsee* versenkt werden.

Polareis Es ist vorgeschlagen worden, radioaktiven Abfall im *Polareis* der Antarktis oder in den Eismassen Grönlands zu lagern. Die bisherigen Kenntnisse über Klima, geothermalen Wärmefluss und Meeresspiegel erlauben heute noch keine zuverlässigen Aussagen über die Eignung von Eismassen der Polargebiete zur Abfallagerung.

Erdkruste Die mögliche Lagerung in einer «geologischen Formation», d. h. in der Erdkruste, wird weltweit studiert (LV 3, 6, 19). Als Gesteine, die sich für die Lagerung im Prinzip eignen können, werden u. a. geprüft: Steinsalz, Anhydrit, Basalt, Granit, Karbonatgesteine, Tone, Mergel, metamorphe Gesteine wie Schiefer und Talk-Serpentinitgesteine. Studien sind bereits an Steinsalz durchgeführt worden (Asse in der BRD sowie in den USA). Im weiteren laufen Untersuchungen an Graniten und Tonen. Die Platzierung eines Abfallagers soll eine zukünftige Rohstoffgewinnung

¹⁾ Convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matters.

nicht zum vorneherein verunmöglichen, denn nach dem Jahr 2000 könnten nach heutigen Begriffen unrentable Rohstoffvorkommen abbauwürdig werden, wenn neue Technologien dies bei zunehmender Verknappung ermöglichen.

4.4 Anforderungen an ein Endlager in Gesteinen

Petrographische Eigenschaften des Wirtgesteins

Wichtigste Forderung an das Wirtgestein ist in der Regel seine *Wasserdichtigkeit*, damit die darin eingelagerten radioaktiven Abfälle nicht über zirkulierendes Grundwasser ihre Umgebung bzw. die Aussenwelt und damit die Biosphäre kontaminieren können. Da im Fels die Wasserzirkulation üblicherweise auf Gesteinsklüften erfolgt (sog. «Kluftzirkulation», im Gegensatz zur «Porenzirkulation» in einem sandigen Kies), darf ein Gestein, um als dicht zu gelten, keine wasserführenden Klüfte aufweisen.

Wasserdichtigkeit

Es ist erwünscht, dass Radionuklide aus wässriger Lösung durch Sorption möglichst weitgehend an das Gestein gebunden werden. Das bezieht sich nicht nur auf das eigentliche Wirtgestein, sondern ebenso sehr auch auf seine Umgebung, also die Schichten, die das Wirtgestein begleiten. Als Minerale mit besonders guten *Sorptionseigenschaften* gelten die Tonmineralien, die Glimmer und die Plagioklase. Die Sorptionseigenschaften des vorgesehenen Wirtgesteins und der umgebenden Gesteine müssen in jedem konkreten Fall untersucht werden.

Sorptionseigenschaften

Für schwach- bis mittelaktive Abfälle, die keine nennenswerte Wärme produzieren, sind die *thermischen Gesteinseigenschaften* nicht von Bedeutung.

Thermische Eigenschaften

Für hochaktive Abfälle, die Wärme produzieren, ist dagegen eine hohe Wärmeleitfähigkeit und eine gute Stabilität bei hohen Temperaturen erwünscht; da alle Gesteinseigenschaften in Funktion der Temperatur wechseln, ist bei der Beurteilung eines Wirtgesteins diese Temperaturabhängigkeit zu berücksichtigen. Als Gestein mit überdurchschnittlich hoher Wärmeleitfähigkeit gilt *Anhydrit*, gefolgt von *Steinsalz*.

Anhydrit, Steinsalz

Der *Einfluss der Strahlung* auf die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Gesteins beschränkt sich — im Gegensatz zum Einfluss der Erwärmung — auf die nächste Umgebung der hochaktiven Strahlenquelle in einem Bereich von wenigen Metern. Dieser Einfluss muss vorgängig einer Einlagerung von hochaktiven Abfällen für das vorgesehene Wirtgestein experimentell abgeklärt werden.

Einfluss der Strahlung

Für Stollen und Kavernen ist eine hohe *Standfestigkeit* des Stollengebirges erwünscht, und zwar nicht nur im Hinblick auf eine intakte Isolation

Standfestigkeit

gegenüber der Umgebung, sondern auch zur Verminderung der Unfallgefahr während des Ausbruchs und der Einlagerung. Wo diese Standfestigkeit fehlt, wären Betonverkleidungen notwendig, welche selbstverständlich den Stollen- und Kavernenbau erschwerten und zeitlich verlangsamen. *Steinsalz* reagiert unter erhöhtem Druck plastisch, so dass in diesem Gestein unverkleidete Kavernen wie auch Bohrlöcher nicht tiefer als 1500—2000 m vorgesehen werden können.

Geologische Gesichtspunkte des Einlagerungsortes

petrographische
Einheitlichkeit

Es ist erwünscht, dass der geologische Körper, in dem ein Endlager errichtet wird, *petrographisch* möglichst *einheitlich* zusammengesetzt und so gross ist, dass das gesamte Endlager, bestehe dieses nun aus Lagerkavernen oder aus Bohrlöchern, unter Beachtung einer genügenden Distanz zur Oberfläche und zu den seitlichen Begrenzungen, darin Platz findet.

Grundwasser,
Quellen

Alle *Grundwasservorkommen und Quellen* sind vor jeglicher Kontamination zu schützen; ihre Schutzzonen sind zu respektieren. Vor jeder Endlagerung ist die natürliche Radioaktivität von Quellen und Grundwasser der weiteren Umgebung zu messen und während der Einlagerung der Abfälle periodisch zu kontrollieren.

Seismizität

Regionen relativ schwacher *Seismizität* sind zu bevorzugen gegenüber solchen relativ starker Seismizität. Epizentren von Erdbeben sind zu meiden. Erfahrungsgemäss nehmen aber Erdbebenschäden an Untertagebauten ausserhalb der eigentlichen Bebenzentren mit der Tiefe unter Terrain ab. Tieflager sind deshalb weniger gefährdet als Lager an der Oberfläche. Dank der Tatsache, dass die Seismizität in grossen Gebieten für Untertagebauten keine ernsthafte Gefährdung darstellt, darf angenommen werden, dass Tieflager in der Schweiz wegen der Seismizität nicht in Frage gestellt sind.

langsame
Krusten-
verstellungen

Seit einigen Jahren werden die *langsamen Krustenverstellungen* in der Schweiz durch die Eidg. Landestopographie mittels eines Präzisionsnivelements kontrolliert. Sie betragen grössenordnungsmässig 0—1,8 mm/Jahr. Eine Gefährdung der Endlager durch langsame Krustenverstellungen ist nicht zu erkennen.

Bergstürze etc.

Es ist selbstverständlich, dass Lager nicht durch *Bergstürze*, Rutschungen, Sackungen, Fluss- und Bacherosion, Wildbachüberflutungen, Überschwemmungen nach Staudammbrüchen und durch Gletschererosion gefährdet werden dürfen. Durch die Wirkung der Gletschererosion einer zukünftigen neuen Vergletscherung im Ausmass etwa der grössten Vergletscherung des Pleistozäns dürfen Endlager mit langlebigen hochaktiven Abfällen auf keinen Fall entblöst werden. Für die Dauer einer Eiszeit von rund

100 000 Jahren kann es sich dabei in den am stärksten gefährdeten Talachsen um einen Erosionsbetrag von rund 200—300 m handeln.

Nichtgeologische Parameter

Durch den Schweizerischen Bund für Naturschutz ist ein «Inventar der zu erhaltenden Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung» publiziert worden. Auch wenn dieses Inventar zur Zeit noch nicht in vollem Umfange Rechtskraft erlangt hat, ist doch darauf zu achten, dass in diesen Gebieten keine das Landschaftsbild beeinträchtigenden Bauten errichtet werden sollen.

Naturschutz

Auch die von Kantonen oder Gemeinden ausgeschiedenen *Naturschutzgebiete* sind zu achten, auch wenn sie im genannten nationalen Inventar nicht enthalten sind.

Die Strahlung der Abfälle wird in einer Felskaverne oder in einem Bohrloch auf so kurzer Distanz vollständig abgeschirmt, dass eine Gefährdung von *Siedelungen* durch ein Endlager im Fels nicht zu befürchten ist; aus dieser Sicht ist eine Beziehung zur Siedelungsdichte irrelevant.

Besiedelung

Es wäre erwünscht, dass für ein Endlager ein günstiger *Strassenanschluss* und wenn möglich auch ein *Geleiseanschluss* gewährleistet sind. Wo das heute nicht der Fall ist, müsste eine Zufahrt errichtet werden.

Strassen- und Geleiseanschluss

Wo bereits Konzessionen für den *Abbau* mineralischer *Rohstoffe* bestehen, z. B. Salzabbau in den Kantonen Aargau, Baselland und Waadt oder Gipsabbau an zahlreichen Gips- und Anhydritvorkommen, müssen bei der Projektierung eines Endlagers die bergrechtlichen Verhältnisse voll berücksichtigt werden.

Abbau von Rohstoffen

5. Heutiger Stand der Lagerungstechnik und der Forschung

5.1 Bestehende Anlagen

Neben umfangreichen Anlagen zur Lagerung von schwach- oder mittelaktiven Abfällen auf Kernkraftwerksgeländen selbst, die als Zwischenlager zu betrachten sind, wurden in der westlichen Hemisphäre bis heute lediglich in den USA und in der Bundesrepublik Deutschland eigentliche unterirdische Endlager eingerichtet. In Deutschland handelt es sich um das aufgelassene, 1967 für die Zwecke der Endlagerung umgerüstete

Salzbergwerk
Asse BRD:
schwach- und
mittelaktive
Abfälle

Salzbergwerk Asse bei Wolfenbüttel, südlich von Braunschweig. Hier werden in den Kammern eines Bergbaues in einem Salzstock in Tiefen zwischen 500—700 m *schwach- und mittelaktive Abfälle* eingelagert. Die Anlieferung erfolgt in 200-l-Fässern, wobei mittelaktive Abfälle in einem zusätzlichen Abschirmbehälter transportiert werden. Das Salzbergwerk Asse dient zudem auch als Forschungsstätte für das Verhalten von hochaktiven Abfällen; es ist aber nicht daran gedacht, sie in diesem Bergwerk endzulagern.

Lions Mine USA:
schwach- und
mittelaktive
Abfälle

In den USA wurde die in Kansas gelegene *Lions Mine* als Modell für die Lagerung von radioaktiven Abfällen herangezogen. Diese Mine liegt in geschichtetem Salz von etwa 100 m Mächtigkeit 300 m unter Tage. Sie diente ebenfalls der Lagerung *schwach- und mittelaktiver Abfälle* und war als Testgelände für die Lagerung hochaktiver Abfälle vorgesehen. Das ganze Vorhaben musste aber aufgegeben werden, weil sich zeigte, dass das Hutchinson Salz in Kansas von einer grossen Anzahl von Erdölbohrungen durchteuft und perforiert ist und dass selbst auf dem Areal der Lions Mine etliche Bohrungen nicht mehr mit Sicherheit abzudichten sind. Solungsbetriebe und Misserfolge mit hydraulischem Fracturing in der nahen Umgebung von Lions Mine haben schliesslich 1972 dazu geführt, dass das Projekt Lions Mine aufgegeben worden ist. Inzwischen konnte im SE von New Mexico eine neue Lokalität evaluiert werden, wo dieselbe Salzformation in 500—700 m Tiefe bei Mächtigkeiten bis zu 200 m vorhanden ist. Hier werden die Testarbeiten zur Lagerung von radioaktiven Abfällen in Salzformationen weitergeführt.

La Hague

In der Region von *La Hague* (Frankreich) werden schwach- bis mittelaktive Abfälle im oberflächennahen Bereich gelagert. Bisher haben diese Lager zu keinen Beanstandungen geführt.

Kanada

Seit 1964 werden in *Kanada* (Whiteshell Nuclear Research Establishment) in der Nähe von Winnipeg (Manitoba) radioaktive Abfälle im oberflächennahen Bereich unterhalb des Grundwasserspiegels gelagert. Es handelt sich dabei vorwiegend um schwach-, vereinzelt aber auch um mittel- und hochaktive Abfälle. Die bisherigen Erfahrungen mit dieser Lagerung in Grundmoränen haben zu keinen Beanstandungen geführt. Sollte es sich erweisen, dass zu einem späteren Zeitpunkt doch noch Eingriffe notwendig würden, so liessen sich diese rascher und gezielter als in grossen Tiefen durchführen. Fünf weitere ähnliche Anlagen sind inzwischen an anderen Stellen in Kanada eingerichtet worden.

Ferner muss hier der Vollständigkeit halber die Endlagerung von schwach- bis mittelaktiven Abfällen in der Tiefsee angeführt werden. Sie wird seit 1967 in grossem Ausmass praktiziert und hat bis anhin keine Probleme gezeigt. Unter der Kontrolle der NEA/OECD ist die Schweiz an dieser Lagerung beteiligt.

5.2 Projektierte Anlagen

Es erweist sich als ausserordentlich schwierig, zwischen eigentlichen projektierten Anlagen und Konzepten zu unterscheiden. In zahlreichen Ländern sind aber die *verschiedensten Konzepte* entwickelt worden.

Verschiedenste
Konzepte

In der Bundesrepublik Deutschland befindet sich das Projekt eines Entsorgungsparkes mit Wiederaufbereitungsanlagen für abgebrannte Brennstäbe und einem Endlager im Gesuchsstadium. Es handelt sich dabei um den Salzstock *Gorleben* in Niedersachsen, der für das Endlager vorgesehen ist. Er ist bisher weder durch Bergbau noch durch andere Aktivitäten berührt worden. Schweden hat mit dem Projekt KBS (Kernbrennstoffsicherheit) ausführungsbereife Projekte für Langzeit- und Endlagerung hochaktiver Abfälle und abgebrannter, nicht aufgearbeiteter Brennelemente ausgearbeitet.

Gorleben

5.3 Forschung und Entwicklung

Allgemein

Überall, wo Kernkraftwerke bestehen, geplant sind oder wo eine entsprechende Industrie vorhanden ist, wird Forschung in Bezug auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle betrieben. Sie erfolgt auf den verschiedensten Stufen, von Hochschulen über staatliche Forschungsanstalten bis hin zur Industrie. Neben nationalen Gremien gibt es aber auch staatliche Stellen, welche sich mit diesem Themenkreis befassen. Die Schweiz hat über ihre Mitarbeit in der NEA/OECD und der IAEA, Wien, Zugang zu diesen Organen.

Vorhaben im Ausland

Nachfolgend sei anhand der verfügbaren Literatur eine kurze Übersicht über die Ziele der wichtigsten derzeit laufenden Forschungsprojekte gegeben. Sie zeigt die Schwerpunkte der Forschung auf und macht gleichzeitig deutlich, welche Unterschiede nicht nur in Bezug auf die Lösungsmöglichkeiten, sondern auch in der *Evaluation der Gefahrenmomente* bestehen.

Evaluation
der Gefahren-
momente

Belgien

Belgien prüft die *Endlagerung in Tongesteinen*; diese sind in genügender Mächtigkeit und Verbreitung vorhanden. In Mol, ca. 45 km östlich von Antwerpen, soll eine Pilotanlage erstellt werden. Dort weisen die

Endlagerung in
Tongesteinen

Tone des Rupélien Mächtigkeiten von 80—110 m auf und liegen in Tiefen von 200—300 m. Das darunter folgende Karbon führt zwar Kohle, doch wird deren Abbau als nicht wirtschaftlich angesehen. Die Region von Mol weist eine geringe Seismizität auf.

Das Untersuchungsprogramm umfasst u. a. folgende Hauptpunkte: chemische und mineralogische Untersuchungen, felsmechanische und physikalische Eigenschaften des Gesteins sowie Prüfung der Sorptionseigenschaften der Tone für Cs-, Sr-, La- und Pu-Ionen. Schliesslich sollen die technischen Möglichkeiten zur Herstellung von Kavernen in Tongesteinen studiert werden.

Bundesrepublik Deutschland

Endlagerung
hochaktiver
Abfälle

Das Bergwerk Asse dient heute auch der Forschung über die *Endlagerung hochaktiver Abfälle*. Hierfür ist von einem neuen, zweiten Schacht aus, der bis zur Tiefe von 959 m reicht, eine Kaverne von 36 m Höhe und 24 m Durchmesser erstellt worden. Hier sollen das Verhalten des Salzes bei Strahlungseinwirkung, die felsmechanischen Deformationen u. a. m. in situ gemessen werden.

Im weiteren wird zur Zeit am Projekt eines Entsorgungsparks auf dem Salzstock von Gorleben an der Elbe gearbeitet, wobei ein voll integrierter Zyklus errichtet werden soll, d. h. die schwach- und mittelaktiven Abfälle werden in festem Zustand eingebracht oder als Schlamm direkt in eine Laugungskaverne gepumpt. Bezüglich des Konzeptes für hochaktive Abfälle müssen die Forschungsergebnisse aus der Asse abgewartet werden.

Schliesslich wird geprüft, ob sich das 1976 stillgelegte Erzbergwerk Konrad bei Salzgitter, das sich als sehr trocken erwiesen hat, für die Endlagerung eignen würde.

Frankreich

hochaktive
Abfälle ober-
flächlich lagern

Frankreich betrachtet die Lösungsmöglichkeiten der Endlagerung in Gesteinen nicht als vordringlich, da *vorgesehen* ist, selbst *hochaktive Abfälle* über mehrere Jahrzehnte hinaus *oberflächlich zu lagern* (La Hague). Immerhin werden Studien über Lagerungsmöglichkeiten im Untergrund durchgeführt, wobei an die Lagerung in Salz oder in Graniten gedacht wird. Geeignete Salzvorkommen finden sich in der Bresse und östlich von Valence; in der Gegend von La Hague (Cotentin) sind *Granite* untersucht worden, die sich zwar teilweise als sehr klüftig, wenn auch als wenig wasserdurchlässig erwiesen haben.

Granite

Grossbritannien

Die UKAEA (United Kingdom Atomic Energy Authority) führt zur Zeit Sondierbohrungen in Graniten in SW-Schottland und in Northumberland bis in Tiefen von rund 300 m durch. Weitere Untersuchungen sind in Cornwall begonnen worden. Neben *Graniten* werden aber auch *Salz* und *Tone* für ein Endlager in Betracht gezogen.

Granite
Salz
Tone

Holland

Die Suche nach Tonen in Holland ergab, dass alle bekannten Vorkommen ungenügende Mächtigkeiten aufweisen, so dass sich heute die Forschung auf *Salzvorkommen* ausrichtet. Dieses ist im E und N des Landes weitverbreitet und besitzt Mächtigkeiten bis zu 400 m; dazu kommen grössere Mächtigkeiten in Salzstöcken und -kissen. Zur Evaluation eines geeigneten Salzdomes ist ein umfangreicher Katalog von Anforderungen ausgearbeitet worden, nach welchem nun die Auswahl vorgenommen wird.

Salzvorkommen

Italien

In Italien werden zur Endlagerung plastische Gesteine gesucht, die eine gewisse Deformation mitmachen können, ohne ihre Wasserundurchlässigkeit zu verlieren, denn Italien ist ein starkes Erdbebengebiet. In Frage kommen Salz und Tone. Da Salz schon in der BRD und in den USA eingehend untersucht wird, hat sich Italien zum Ziel gesetzt, *Tone* zu testen: In Trisaia (Luciana), am Golf von Taranto, sind mächtige Tonvorkommen (1000 m) vorhanden, in denen In-situ-Messungen über das Verhalten der Tone bei Erwärmung vorgenommen werden. Das Untersuchungsprogramm steht erst am Anfang seiner Ausführung.

Tone

Kanada

Auch Kanada hat sich entschlossen, die Beseitigung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen zu prüfen. In einer ersten Phase möchte man Versuchskavernen schaffen, wobei an folgende Gesteine gedacht wird: *Salz*, *Granite* und *Syenite*. Beim Salz wird vor allem darauf hingewiesen, dass Klüfte ausgeheilt werden und dass Lager von hohem geologischem Alter in stabiler Position vorhanden seien. Auch kristalline Gesteine befinden sich in stabiler Lagerung im kanadischen Schild. Man rechnet damit, in etwa 900 m Tiefe in eine Zone zu kommen, wo trockene Kavernen erstellt werden können.

Salz
Granite
Syenite

Schweden

Kristallin-
gesteine

In Schweden erlaubt der präkambrische Schild die Lokalisierung stabiler, wenig durchlässiger *Kristallingesteine*. Gestützt auf die guten Erfahrungen, die mit Kavernen zur Untertagespeicherung von Erdöl in diesen Gesteinen gemacht worden sind, wird daran gedacht, hier auch radioaktive Abfälle zu lagern. Die Wasserdurchlässigkeiten sind sehr gering; so ist berechnet worden, dass mit einem Wasseranfall pro m² Fläche von lediglich 100 l in 1000 Jahren oder 0,1 l/Jahr gerechnet werden muss.

Spanien

In Spanien werden die schwachaktiven Abfälle aus Industrie und Medizin in einer alten Mine in der Sierra Morena gelagert; für schwach- und mittelaktive Abfälle wird man weiterhin diese Lokalität verwenden; für hochaktive Abfälle hingegen, mit deren erstem Anfall in den Jahren 1985–1990 gerechnet wird, muss ein neuer Lagerort gesucht werden. Hierfür kommen kristalline Gesteine (wie Sierra Morena), Tone, Gips und Anhydrit sowie Steinsalz in Frage. Diesbezügliche Untersuchungen sind im Anlaufen.

USA

Hydrogeolo-
gische Aspekte

Auf dem Testgelände in Nevada hat der United States Geological Survey (USGS) grosse Erfahrung über das Verhalten von radioaktivem Material im Erdinnern bei unterirdischen Nuklearexplosionen sammeln können. Zur Zeit werden beim USGS verschiedene Untersuchungen über *hydrogeologische Aspekte* gefördert, so u. a. über die Auswirkungen bestehender Lager in untiefen Schichten wie Glazialtone (New York), Tone und Sande von Küstenebenen (South Carolina), klüftige Schiefer und Sandsteine (Kentucky) und Tone und Schiefer (Illinois).

Schon 1955 hat die National Academy of Sciences, National Research Council, auf eine Anfrage der US Atomic Energy Commission empfohlen, Salz als Gestein zur Endlagerung radioaktiver Abfälle zu wählen. Seither sind viele solche Versuche gemacht worden, so auch in Lions Mine, Kansas.

Südosten von
New Mexiko
Pilotanlage

Nach den dort aufgetauchten Schwierigkeiten und Problemen ist nun *im Südosten von New Mexiko* ein neues Salzvorkommen zur Errichtung einer *Pilotanlage* evaluiert worden. Das Untersuchungsprogramm erstreckt sich nun auch auf das Liegende und Hangende des Salzlagers, auf die Salzmineralogie, um festzustellen, ob dehydratisierende Mineralien vorhanden sind (Wärmeeinfluss), sowie auf die Verformbarkeit des Salzes.

Da es um ein Langzeitproblem geht, wurde ein erdbebenfreies Gebiet gewählt, das auch in den nächsten paar 100 000 Jahren tektonisch stabil bleiben dürfte. Im weiteren wird geprüft, ob im und um das Salz in New Mexico noch weitere wirtschaftlich ausbeutbare Bodenschätze wie Kalisalze, Erdöl und Erdgas, Erze oder Kohle vorhanden sind. Es gilt, eventuellen Konfliktsituationen aus dem Wege zu gehen.

Alle stabilen Gebiete der USA mit flach gelagerten Gesteinen werden grundsätzlich auf die Möglichkeiten zur Lagerung radioaktiver Abfälle hin untersucht. Dabei haben sich folgende Ansatzpunkte ergeben: Steinsalz, Tongesteine, Karbonate, Kristallin und vulkanische Gesteine.

Schweiz

Die *Zwischenlagerung* schwach- bis mittelaktiver Abfälle stellt in der Schweiz kein wissenschaftliches oder technisches Problem dar. Die Kernkraftwerke verfügen in besonderen Zwischenlagern über Stapelplatz für abgebrannte Brennelemente von 8—10 Jahren Anfall. Es wird sich im Laufe der nächsten Jahre aufdrängen, einen weiteren Zwischenlagerplatz ausserhalb der Kernkraftwerke einzurichten, um über vermehrte Flexibilität zu verfügen.

Zwischen-
lagerung

In der Schweiz besteht ein von der Elektrizitätsindustrie und der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) erarbeitetes Konzept für die nukleare Entsorgung. Darin werden drei Abfallkategorien unterschieden, für die geeignete geologische Formationen zur *Endlagerung* gesucht werden.

Endlagerung

Kat. I umfasst aktivierten Schrott aus der Wartung oder Stilllegung von Kernkraftwerken (Sperrgut), Abbruchmaterialien (Metall und Beton), schwachaktive Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung sowie sehr schwach aktive Abfälle aus KKW-Betrieben (in 200-l-Fässern). Die notwendige *Isolationszeit* beträgt *einige Jahre bis mehrere Jahrzehnte*. Hierfür können oberflächennahe Kavernen in Fels erstellt werden.

Isolationszeit
einige Jahre
bis Jahrzehnte

Kat. II setzt sich aus schwach- bis mittelaktiven Abfällen aus KKW-Betrieben und aus der Nuklearforschung zusammen. Es handelt sich um Spaltprodukte wie Sr-90 und Cs-137, welche in 200-l-Fässern in Bitumen oder Zement eingebunden werden. Sie erfordern eine *Isolationsdauer* von *einigen hundert Jahren*. Deshalb wird an eine Lagerung in Felskavernen in Anhydrit, Ton oder anderen möglichst trockenen Felsgesteinen in 100—600 m Tiefe gedacht.

Isolationsdauer
einige hundert
Jahre

Kat. III besteht aus den hochaktiven Abfällen, die bei der Wiederaufbereitung bestrahlter Brennelemente anfallen. Sie werden verglast und in

Abschirmzeit
mehrere tausend
Jahre

Metallbehälter eingeschlossen. Die hier erforderliche *Abschirmzeit* erreicht *mehrere tausend Jahre*. Die Lagerung ist in Tiefbohrungen von 600—2500 m Tiefe vorgesehen, wobei an Einlagerung in Steinsalz, Anhydrit, ungeklüfteten Granit, Tongesteine u. a. gedacht wird. Die Stabilität des Endlagers sollte sich über mindestens 10 000 Jahre erstrecken.

6. Sicherheitsanalyse

6.1 Grundsätzliches

Zweck der
Sicherheits-
analyse

Zweck einer Sicherheitsanalyse ist es, ausgehend von Parametern, die unter konservativen Annahmen getroffen worden sind, die Folgen solcher Schadenereignisse abzuschätzen, die als noch im Bereich des Möglichen liegend angesehen werden. Das Kriterium des «im Bereich des Möglichen liegenden» hängt von der *Wahrscheinlichkeit* ab, mit der ein gegebenes Ereignis auftritt. Es gibt extrem seltene Ereignisse (Einschläge grosser Meteorite, folgenschwere tektonische Verschiebungen, wie das Auftreten von Vulkanen in bisher stabilen Gebieten), deren Folgen für die Menschen so schwer sind, dass die Anwesenheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle nur noch sekundäre Bedeutung hat. Für alle anderen Ereignistypen muss das Lagerkonzept selbst seine Integrität sicherstellen.

Wahrscheinlich-
keit

6.2 Sicherheit der Operationen vor der Beseitigung

Konditionierung, Transporte, Zwischenlagerung und Einbringung radioaktiver Abfälle an ihren endgültigen Lagerort sind den entsprechenden Standardoperationen der Nukleartechnik gleichzusetzen. Sie stellen deshalb keine besonderen Probleme in Bezug auf Sicherheitsanalyse und -massnahmen dar.

6.3 Sicherheit der Endlagerstätte

Ziel

Isolation

Ziel der Endlagerung radioaktiver Abfälle ist ihre *Isolation* von der Biosphäre und damit von Menschen über eine genügend lange Zeitperiode. Die erforderliche Isolationszeit ist durch die Halbwertszeiten und Toxizitäten der beseitigten radioaktiven Stoffe gegeben.

Für sehr langlebige Nuklide wird häufig auch die «Verdünnung» durch inaktives Gestein im Vergleich zur Konzentration natürlich radioaktiver Stoffe herangezogen.

Prinzip der Störfallanalyse

Zur Beurteilung der Sicherheit einer Endlagerstätte ist die *Integrität der Isolation im Störfall* massgebend. Als Störfall wird ein Ereignis oder eine Folge von Ereignissen angesehen, die die Isolationsbarrieren durchbrechen und den Transport der radioaktiven Stoffe an die Erdoberfläche ermöglichen. Eine häufig vorgeschlagene Methode ist die Fehlerbaum-Analyse. Sie erfordert die *Kenntnis der Eintretenswahrscheinlichkeiten* für jedes Ereignis, was bei den zu betrachtenden Zeiträumen *nicht einfach* ist, insbesondere wenn die Ereignisse nicht zufällig eintreten und ihre Wahrscheinlichkeit nicht zeitlich konstant ist.

Integrität der Isolation im Störfall

Kenntnis der Eintretenswahrscheinlichkeit

Mögliche Ereignisse, die zur Beeinträchtigung einer Isolationsbarriere führen können, sind

Mögliche Ereignisse

- natürliche rasche Ereignisse, auf die weder das Endlager noch der Mensch Einfluss haben: Meteoreinschlag, vulkanische Tätigkeit;
- natürliche geologische Prozesse, unabhängig von der Existenz des Endlagers: Erosion, Bodensenkungen, Verwerfungen;
- durch das Endlager hervorgerufene geologische Prozesse: Wärme- und Strahlenwirkungen auf das Gestein;
- direkte und indirekte menschliche Tätigkeiten: Krieg, Sabotage, Prospektionen auf mineralische Rohstoffe etc.

Die Voraussage des *quantitativen Einflusses* von jedem dieser Ereignisse auf die Isolationsbarrieren ermöglicht es, die Konsequenzen jedes Störfalles für die Bevölkerung in der Umgebung der Lagerstätte anzugeben.

Quantitativer Einfluss

Man unterscheidet grundsätzlich folgende *Typen von Barrieren*:

Typen von Barrieren

- chemische Form des Abfalles und seiner Gebinde;
 - geologische Einschliessung der Abfälle innerhalb der Gesteinsformation;
 - Verzögerung des Aktivitätstransportes durch das geologische Milieu.
- Als weiterer Mechanismus zur Verminderung der Folgen eines Isolationsverlustes ist die Verdünnung der Aktivität in der Biosphäre zu nennen.

Resultate von Störfallanalysen

Obwohl in eine Störfallanalyse eine Reihe von Daten eingehen, die nur für eine bestimmte Lokalisation gültig sind, kann man doch einige allgemeingültige Schlussfolgerungen aus den bisher veröffentlichten Arbeiten ziehen.

Überdies werden im konkreten Fall kaum alle notwendigen ortsspezifischen Daten verfügbar sein, so dass man auf Annahmen angewiesen ist, die auf der sicheren Seite liegend getroffen werden müssen. *Allgemeingültige Schlussfolgerungen* sind:

Allgemeingültige Schlussfolgerungen

- *Der einzige Weg der Freisetzung radioaktiver Stoffe aus einem Endlager ist derjenige über einen Wassereintritt und nachfolgendes Entweichen aus dem Lager.*
- Die aus dem Lager in die Biosphäre transportierte Aktivität führt über den Trinkwasserkonsum zur Strahlenbelastung von Menschen; andere Belastungspfade, wie z. B. derjenige über den Lebensmittelkonsum, sind von untergeordneter Bedeutung.
- Fließgeschwindigkeit des Grundwassers, Sorptionskonstanten des Gesteins und Weglänge sind diejenigen Parameter, die den Aktivitätseintritt in die Biosphäre am stärksten beeinflussen.
Bei Nukliden, die nur schwer sorbiert werden, kommt als massgebender Parameter die Auslaugrate der verpackten Abfälle hinzu.
- Freigesetzte Radionuklide aus einem Endlager erhöhen die Radionuklidkonzentrationen im Trinkwasser über eine grosse Zeitspanne (> 100 Jahre). Dadurch wird der Mensch einer dauernden Erhöhung der Strahlenbelastung ausgesetzt. Zur Beurteilung der *Akzeptierbarkeit solcher Dauerbelastungen* als Störfallfolgen bei einem Endlager radioaktiver Abfälle stehen direkt vergleichbare gesetzliche Richtwerte für Radionuklidkonzentrationen bei Dauerkonsum im Trinkwasser zur Verfügung.
- Neben dem Aktivitätseintritt in die Biosphäre ist für den Aktivitätskonsum aus Trinkwasser dessen Verdünnung durch inaktive andere Trinkwässer massgebend.
- Aus radioaktivem Abfall sind es die vier Radionuklide Tc-99, J-129, Ra-226 und Np-237, welche die höchsten Strahlenbelastungen ergeben, gefolgt von den Spaltprodukten Se-79, Zr-93, Sn-126 und Cs-135 und den Folgeprodukten in den Aktinidenketten wie Pb-210, Po-210, Ra-225, Th-229 und U-233 (LV 8).

7. Offene Fragen — kritische Erwägungen

In der Praxis sind für hochradioaktive Abfälle die zu lösenden wissenschaftlichen und technischen Probleme komplex und erfordern ausgiebige, lange und kostspielige Untersuchungen. Bisher hat noch kein westlicher Staat versucht, sich dieser Art von Abfällen ohne eine Möglichkeit der Rückholbarkeit zu entledigen.

7.1 Forschungsprogramme

Intensive Forschungen sind auf folgenden Gebieten noch erforderlich:

a) Konditionierung der Abfälle

Die Form, in welcher die Abfälle gelagert werden, hat Auswirkungen auf die geologischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften des Lagers.

Die Matrizze, welche die radioaktiven Produkte enthält, bildet eine erste Schranke, die sich ihrer Streuung entgegenstellt. Die Undurchlässigkeit dieser Schranke bietet, wenn sie auf lange Sicht sichergestellt werden kann, eine zusätzliche Sicherheitsgarantie.

Wesentliche, noch zu klärende Punkte sind die folgenden:

— *Immobilisationsverfahren für Abfälle*

Immobilisations-
verfahren

Die verschiedenen Möglichkeiten müssen untersucht werden.

(Verglasung, Bildung von Keramiken usw.). Gasförmige Produkte wie C-14 und I-129 bilden Sonderfälle.

— *Rückhaltevermögen und Auslaugebeständigkeit der Matrizze*

Rückhalte-
vermögen
Auslauge-
beständigkeit

Diese müssen für alle ihr einverleibten radioaktiven Elemente und für die verschiedenen Bedingungen, die während der notwendigen Isolationszeit auftreten könnten, bekannt sein. Die Temperatur ist ein besonders wichtiger Parameter.

— *Stabilität der Matrizze*

Stabilität

Man muss sich vergewissern, dass diese Matrizze nicht unter der kombinierten Wirkung von Hitze, Radioaktivität, chemischer Eigenschaften der eingelagerten Abfälle und deren Derivate, und des Druckes (mechanischer oder von den eingeschlossenen Gasen stammender Druck) beschädigt wird, und dass sich ihre Rückhalteigenschaften nicht verändern (Aufschmelzung des Gesteins, unerwünschte Kristallisation, Pulverisierung). Durch die *Vielfalt der Parameter* wird dieses Problem sehr komplex.

Vielfalt der
Parameter

b) *Die Sorptionseigenschaften* der geologischen Formationen

Sorptions-
eigenschaften

Gewisse Elemente haben verschiedene chemische Eigenschaften und können mehr oder weniger löslich und mehr oder weniger beweglich sein, je nach den Molekülen, die gebildet werden können. Um die Rückhalte-eigenschaft einer geologischen Formation abschätzen zu können, muss man also die Mechanismen der Auflösung und der Übertragung genügend kennen, und zwar für alle Elemente, deren Halbwertszeit so lang ist, dass sie allenfalls an die Oberfläche gelangen können.

c) *Vollständige geologische Untersuchung* der vorgesehenen Orte und ihrer Umgebung

Geologische
Untersuchung

In zahlreichen Ländern sind Untersuchungen im Gange, aber die Resultate sind oft noch fragmentarisch und müssen vervollständigt werden, ehe genügend sichere Voraussagen möglich sind.

Insbesondere ist es sehr wichtig, dass die gegenwärtigen *hydrogeologischen Verhältnisse* und ihre voraussichtliche Entwicklung in allen Einzelheiten bekannt sind, um auf realistische Weise durch mathematische Modelle die unterirdischen Abflüsse in der Region der Lagerung simulieren zu können.

Hydrogeologi-
sche Verhältnisse

d) *Definitive Verschliessung* des Lagers

Wenn ein Lager gefüllt ist, ist es nötig, den oder die Zugangsschächte zu verschliessen. Die Dichtigkeit der Verschlüsse muss während einer genügend langen Periode garantiert sein, um Wasserinfiltrationen zu verhindern. Dieses Problem ist noch nicht gelöst und eignet sich schwer für experimentelle Prüfungen.

7.2 *Langfristige geologische Prognosen*

Erforderliche
Absonderungs-
dauer

Für Aktinide
mehrere hundert-
tausend Jahre

Für durchschnitt-
liche Aktivität
einige zehn-
tausend Jahre

Die für hochradioaktive Abfälle *erforderliche Absonderungsdauer* hängt vor allem von der Konzentration der langlebigen Produkte ab (I-129, Aktinide). Mit den jetzigen Wiederaufbereitungsmethoden der ausgebrannten Brennelemente sind ansehnliche Mengen von Aktiniden in den Abfällen enthalten. Diese sollten also von der Umgebung während mehrerer Hunderttausende von Jahren abgeschirmt sein, bis dass die Aktivität der stabilisierten Massen (verglaste Zylinder) auf das Niveau derjenigen gewisser uranreicher Gesteine sinkt.

Zieht man, wie es oft geschieht, die *mittlere Aktivität des Lagers in seiner Gesamtheit*, und nicht diejenige der Zylinder allein, in Betracht, so wird die nötige Lagerungsperiode wesentlich verkürzt; um das Aktivitätsniveau von Granit zu erreichen auf einige zehntausend Jahre. Dieser Art von Durchschnittsrechnung ist aber zu misstrauen, denn die anwesenden Abfälle und die die Zugangsschächte verschliessenden Materialien bilden Inhomogenitäten und «Schwächezonen» in der geologischen Formation.

In der Tat ist die Aktivität eines Lagers im Laufe der Zeiten nicht schon für sich allein ein genügendes Kriterium für die Bestimmung der Lagerungsdauer; die Eigenschaften der darin eingeschlossenen Radioelemente sind zu beachten. Eine jüngst vorgenommene Analyse dieses Problems, die den Rückhalteeigenschaften der benachbarten geologischen Strata Rechnung trägt, schlägt vor, dass eine Lagerung in der Grössenordnung von 10 000 Jahren für den Schutz der Biosphäre angemessen sein könnte. Die aus diesem Modell gezogenen Schlüsse müssen noch bestätigt werden.

Eine gründlichere Trennung der Aktinide von den radioaktiven Lösungen vor dem Verfestigungsprozess und ihre eventuelle Transmutation durch Spaltung in Kernreaktoren würde es theoretisch ermöglichen, die Dauer der Lagerung wesentlich zu verkürzen. Es ist jedoch nicht sicher, dass die Vorteile dieser Methode ihre Nachteile überwiegen würden. Eine Trennung der Aktinide mit einer Wirksamkeit von 99,9% ist denkbar, kann aber nicht durch blosse Entwicklung und Verfeinerung der bisherigen Techniken erreicht werden. Sie würde grosse technologische Entwicklungen erfordern, um industriell in wirtschaftlich annehmbarem Rahmen anwendbar zu sein.

Es ist zu bemerken, dass die in den Abfällen vorhandenen Aktinide relativ vermehrt würden, falls Plutonium als Kernbrennstoff verwendet werden sollte.

Für die sehr langlebigen Elemente kann eine absolute Absonderung nicht sichergestellt werden. Es ist also die Rolle der beherbergenden Formation, die sich der Migration der Abfälle widersetzen, künstlichen Schranken zu verstärken und diese Migration zu verzögern, um so zu vermeiden, dass eine unannehmbare Menge Radioaktivität die Oberfläche erreicht. Die Integrität und geologische Stabilität des Ortes, sowie die Beständigkeit seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften müssen also während einer sehr langen Zeitspanne garantiert sein.

Für sehr langlebige Elemente absolute Absonderung nicht möglich

Da es nicht möglich ist, die natürlichen Phänomene langfristig vorauszusagen, und noch weniger die zukünftigen Stadien der Zivilisation, die ein Lager beeinflussen könnten, ist der einzig möglichen Ausweg, plausible Hypothesen aufzustellen und deren wahrscheinliche Folgen abzuleiten. Die Geologie studiert die Geschichte der Erdkruste, und die geologischen Prognosen sind eine Extrapolation in die Zukunft mit den ihr innewohnenden Ungewissheiten.

Von plausiblen Hypothesen zu Extrapolationen gelangen

So kann z. B. die tektonische Stabilität einer Region nicht mit absoluter Sicherheit festgestellt werden; die Geologen geben relative Wahrscheinlichkeiten an, die sich auf das statistische Studium der Erdbeben vergangener Zeiten stützen. Die langfristige Extrapolation dieser Angaben zeigt eine gewisse Unsicherheit: die Bewegungen und Gründe, die den Bruch tektonischer Platten hervorrufen, sind noch unvollkommen bekannt. Im Laufe unseres Jahrhunderts sind Theorien über diesen Gegenstand oft entkräftet und abgeändert worden.

Man muss jedoch hinzufügen, dass die Beobachtungen der Schächte und Galerien tiefergelegener Minen zu zeigen scheinen, dass die Wirkungen von Erdbeben weniger in der Tiefe als an der Oberfläche festzustellen sind; es bedürfte also eines Erdbebens von beträchtlicher Intensität, um die Integrität eines richtig konzipierten Lagers zu gefährden.

Wirkungen von Erdbeben

Die klimatischen Bedingungen der für eine nähere oder fernere Zukunft in Aussicht genommenen Region sind ebenfalls unvorhersehbar und können unter gewissen Umständen eine Rolle spielen, indem sie die hydrogeologischen Verhältnisse verändern, besonders die «hydraulischen Potentiale», welche die Bewegungen des Grundwassers bestimmen.

Klimatische Bedingungen

Angesichts solcher Imponderabilien ist man veranlasst, die künstlichen und natürlichen Schranken, welche die Abfälle isolieren, zu vermehren, (Redundanz). Man versucht sich mit Hilfe von mathematischen Modellen,

welche konservative Hypothesen zugrundelegen, auf überzeugende Weise zu versichern, dass die getroffenen Massnahmen zum Schutz der kommenden Generationen angemessen sind.

7.3 Evaluation der verschiedenen Varianten für hochradioaktive Abfälle

Für die Schweiz
Lagerung in
tiefen
geologischen
Formationen

Die plausibelste Lösung für die Schweiz ist die Lagerung in tiefen geologischen Formationen. Beim heutigen Stand der Kenntnisse ist es verfrüht, sich über die Vor- und Nachteile der verschiedenen Orte, die in Betracht kommen, zu äussern. Die Kriterien, die die Wahl eines Ortes bestimmen, sind zweierlei Art. Die ersten sind die fundamentalen Sicherheitsanforderungen, die a priori genau festgelegt sein müssen und keinen Kompromiss gestatten (physikalisch-chemische Eigenschaften des beherbergenden Gesteins, Dimension der Formation, Hydrologie der Gegend, usw.). Die zweiten sind Kriterien, die es gestatten, zwischen mehreren annehmbaren Lösungen zu wählen (Zugang zum Orte, Kosten, usw.).

Optionen

Man kann für jedes Konzept folgende Optionen berücksichtigen:

In einem
provisorischen
Lager verwahren

- a) Während mehr oder weniger langer Zeit die verfestigten und künstlich abgekühlten Abfälle in einem provisorischen Lager verwahren, bevor man sie endgültig einmauert (Frankreich sieht vor, sie auf diese Weise während 50 Jahren aufzubewahren).

- Vorteile:**
1. Die Behandlungsmethoden können sich ändern und die Möglichkeit bieten, diese Abfälle weniger schädlich und leichter lagerbar zu machen, insofern es ihre frühere Behandlung erlaubt.
 2. Die Abwärme und auch das Risiko eines Schmelzens der die Abfälle enthaltenden Matrice werden wesentlich geringer geworden sein.
 3. Eine Überwachung der Aktivität der Abfälle und ihrer Versorgung ist möglich.

- Nachteile:**
4. Eine Lagerung an oder nahe an der Oberfläche ist anfälliger als ein tiefgelegenes Lager.
 5. Ein provisorisches Lager ist zwangsweise verhältnismässig kompakt, was eine ständige Kühlung nötig macht.
 6. Die Verfestigung der Abfälle erschwert ihre spätere Behandlung.

Rückholbarkeit

- b) Die Möglichkeit offen lassen, die radioaktiven Abfälle während einer transitorischen Periode aus dem Lager herauszuholen (retrievability), bevor sie endgültig verschlossen werden.

- Vorteile:**
1. Wie a) 1. und a) 3.
 2. Man kann das Lager einer intensiven wissenschaftlichen Überwachung unterstellen, sich versichern, dass seine Eigenschaften befriedigend sind und wenn nötig eingreifen.

- Nachteile:**
3. Ein offenes Lager ist anfälliger als ein verschlossenes.
 4. Ein solches Lager ist schwieriger zu bewerkstelligen.
 5. Wie a) 6.

Die Varianten a) und b) schliessen sich nicht gegenseitig aus; man kann die Abfälle während einer mehr oder weniger langen Periode provisorisch lagern, um sie abzukühlen, und dann das endgültige Lager sofort verschliessen oder sich während einiger Zeit die Möglichkeit der Rückholbarkeit offen lassen.

Ein anderes Konzept, das in Zukunft gewisse Vorteile aufweisen könnte und eine Untersuchung verdient, ist die *Injektion von hochradioaktiven Lösungen in sehr tiefe Formationen*. Die Aufschmelzung des Gesteins und seine Rekristallisierung nach der Abkühlung würde eine kompakte Gesteinsmasse mit sehr schwacher Permeabilität bilden, welche radioaktive Produkte enthalten würde, die einem chemischen Gleichgewicht mit demjenigen ihrer Umgebung nahe wären (Rock Melting Concept).

Injektion hoch-
radioaktiver
Lösungen in
sehr tiefe
Formationen

- Vorteile:**
1. Es ist nicht nötig, die Abfälle an der Oberfläche zu lagern, um sie abzukühlen.
 2. Man braucht die Abfälle nicht zu verfestigen.
 3. Als Matrizie dient der Fels selbst, und es wird angenommen, dass die radioaktiven Produkte dem chemischen Gleichgewicht nahe sind.
 4. Die grosse Tiefe des Lagers vermehrt die Sicherheit.

- Nachteile:**
5. Dieses Konzept setzt den Transport hochradioaktiver Flüssigkeiten voraus.
 6. Rückholbarkeit ist ausgeschlossen.
 7. Die Überwachung des Verhaltens der Abfälle ist unmöglich.

7.4 Beschränkte weitere Verwendung der betroffenen Gebiete

Während des Baues des Lagers und seines aktiven Gebrauchs und vielleicht noch einige Zeit nach seiner endgültigen Verschliessung wird es nötig sein, den Zugang zu diesem Ort einzuschränken. Dessen Anlage muss so sein, dass es in einer späteren Zeit «vergessen» werden kann. Seine Unversehrtheit wird jedoch während einer Jahrtausende dauernden Zeitspanne erhalten bleiben müssen. Ein Archiv, die genauen Angaben über seine Lage und seinen Inhalt enthaltend, wird während einer angemessenen Zeit vorhanden sein müssen.

Anhang 1

Tabelle berechneter Aktivitäten wichtigster Spaltprodukte und Transurane eines wiederaufgearbeiteten LWR-Brennstoffes mit

33 000 MWd/t U Abbrand (thermisch)

30 MW/t spez. Leistung (thermisch)

$2,91 \cdot 10^{13}$ n/cm² S Neutronenflux

angegeben in Curie pro Tonne Uran im ursprünglichen Brennstoff

Spaltprodukte		Halbwertszeit	Aktivität (*) in Ci/t U nach	
Name	Symbol		150 Tagen	10 Jahren
Tritium	H-3	12 Jahre	$6.9 \cdot 10^2$	$4.0 \cdot 10^2$
Krypton	Kr-85	10 Jahre	$1.1 \cdot 10^4$	$6.1 \cdot 10^3$
Rubidium	Rb-86	19 Tage	1.0	$< 10^{-6}$
Strontium	Sr-89	51 Tage	$9.6 \cdot 10^4$	$< 10^{-6}$
	Sr-90	28 Jahre	$7.7 \cdot 10^4$	$6.0 \cdot 10^4$
Yttrium	Y-90	64 Stunden	$7.7 \cdot 10^4$	$6.0 \cdot 10^4$
	Y-91	58 Tage	1.6 10	$< 10^{-6}$
Zirkon	Zr-93	10^6 Jahre	1.9	1.9
	Zr-95	65 Tage	$2.8 \cdot 10^5$	$< 10^{-6}$
Niob	Nb-95m	90 Stunden	$5.9 \cdot 10^3$	$< 10^{-6}$
	Nb-95	35 Tage	$5.2 \cdot 10^5$	$1.9 \cdot 10^{-5}$
Technetium	Tc-99	$2.1 \cdot 10^5$ Jahre	$1.4 \cdot 10^1$	$1.4 \cdot 10^1$
Ruthenium	Ru-103	40 Tage	$8.9 \cdot 10^4$	$< 10^{-6}$
Rhodium	Rh-103m	57 Minuten	$8.9 \cdot 10^4$	$< 10^{-6}$
	Ru-106	1 Jahr	$4.1 \cdot 10^5$	$5.5 \cdot 10^2$
	Rh-106	30 Sekunden	$4.1 \cdot 10^5$	$5.5 \cdot 10^2$
Silber	Ag-110m	25 Tage	$2.6 \cdot 10^2$	$1.8 \cdot 10^{-2}$
	Ag-110	24 Sekunden	$3.4 \cdot 10^1$	$2.3 \cdot 10^{-3}$
Cadmium	Cd-115m	43 Tage	$4.4 \cdot 10^1$	$< 10^{-6}$
Zinn	Sn-119m	250 Tage	$1.1 \cdot 10^1$	$6.6 \cdot 10^{-4}$
	Sn-123m	130 Tage	$3.4 \cdot 10^2$	$1.4 \cdot 10^{-6}$
Antimon	Sb-124	60 Tage	$8.6 \cdot 10^1$	$< 10^{-6}$
	Sn-125	9.4 Tage	$2.0 \cdot 10^{-1}$	$< 10^{-6}$
	Sb-125	2 Jahre	$8.1 \cdot 10^3$	$6.9 \cdot 10^2$
Tellur	Te-125m	120 Tage	$3.3 \cdot 10^3$	$2.9 \cdot 10^2$
	Te-127m	110 Tage	$6.2 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^{-6}$
	Te-127	9.4 Stunden	$6.1 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^{-6}$
	Te-129m	34 Tage	$6.7 \cdot 10^3$	$< 10^{-6}$
	Te-129	72 Minuten	$4.3 \cdot 10^3$	$< 10^{-6}$
Jod	J-129	$1.7 \cdot 10^7$ Jahre	$2.8 \cdot 10^{-2}$	$2.8 \cdot 10^{-2}$
	J-131	8.1 Tage	2.2	$< 10^{-6}$
Xenon	Xe-131m	12 Tage	3.3	$< 10^{-6}$
Cäsium	Cs-134	2.1 Jahre	$2.1 \cdot 10^5$	$8.3 \cdot 10^3$
	Cs-136	13 Tage	$2.1 \cdot 10^1$	$< 10^{-6}$
	Cs-137	30 Jahre	$1.1 \cdot 10^5$	$8.5 \cdot 10^4$
Barium	Ba-137m	2.6 Minuten	1.1 10	$8.0 \cdot 10^4$
	Ba-140	13 Tage	$4.3 \cdot 10^2$	$< 10^{-6}$
Lanthan	La-140	1.7 Tage	$5.0 \cdot 10^2$	$< 10^{-6}$
Cer	Ce-141	33 Tage	$5.7 \cdot 10^4$	$< 10^{-6}$

(*) Die Aktivität bezieht sich auf eine Bestrahlungszeit von einem Jahr.

Spaltprodukte		Halbwertszeit	Aktivität (*) in Ci/t U nach	
Name	Symbol		150 Tagen	10 Jahren
Praseodym	Pr-143	14 Tage	$6.9 \cdot 10^2$	$< 10^{-6}$
	Ce-144	290 Tage	$7.7 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^2$
	Pr-144	17 Minuten	$7.7 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^2$
Neodym	Nd-147	11 Tage	$5.1 \cdot 10^1$	$< 10^{-6}$
Prometium	Pm-147	2.6 Jahre	$9.9 \cdot 10^4$	$7.9 \cdot 10^3$
	Pm-148m	42 Tage	$3.9 \cdot 10^2$	$< 10^{-6}$
	Pm-148	5.4 Tage	$3.2 \cdot 10^1$	$< 10^{-6}$
Samarium	Sm-151	93 Jahre	$1.2 \cdot 10^3$	$1.1 \cdot 10^3$
Europium	Eu-152	13 Jahre	$1.2 \cdot 10^1$	6.6
Gadolinium	Gd-153	240 Tage	$2.2 \cdot 10^1$	$9.9 \cdot 10^{-4}$
	Eu-154	16 Jahre	$6.8 \cdot 10^3$	$4.5 \cdot 10^3$
	Eu-155	1.7 Jahre	$6.4 \cdot 10^3$	$1.6 \cdot 10^2$
	Eu-156	15 Tage	$2.2 \cdot 10^2$	$< 10^{-6}$
Terbium	Tb-160	73 Tage	$3.0 \cdot 10^2$	$< 10^{-6}$
Total Spaltprodukte			$4.4 \cdot 10^6$	$3.2 \cdot 10^5$

Transurane		Halbwertszeit	Aktivität (*) in Ci pro MWd/kg U nach	
Name	Symbol		150 Tagen	10 Jahren
Neptunium	Np-239	2.4 Tage	$1.7 \cdot 10^1$	$1.7 \cdot 10^1$
Plutonium	Pu-238	86 Jahre	$3.6 \cdot 10^1$	$1.0 \cdot 10^2$
	U-234			
	Ra-226			
	Pb-210			
	Po-210			
	Pu-239	$2.4 \cdot 10^4$ Jahre	1.7	1.7
	Pu-240	$6.6 \cdot 10^3$ Jahre	2.4	4.5
	Pu-241	13 Jahre	$5.7 \cdot 10^2$	$3.4 \cdot 10^2$
	Pu-242	$3.8 \cdot 10^5$ Jahre	$6.8 \cdot 10^{-3}$	$6.8 \cdot 10^{-3}$
	Am-241	460 Jahre	$1.7 \cdot 10^2$	$1.8 \cdot 10^2$
Americium	Np-237			
	U-233			
	Th-229			
	Ra-225			
	Am-242m	150 Jahre	4.0	3.9
	Am-242	16 Stunden	4.0	3.9
Curium	Am-243	$8.0 \cdot 10^3$ Jahre	$1.7 \cdot 10^1$	$1.7 \cdot 10^1$
	Cm-242	160 Tage	$1.5 \cdot 10^4$	3.2
	Cm-243	35 Jahre	4.0	3.3
	Cm-244	18 Jahre	$2.5 \cdot 10^3$	$1.7 \cdot 10^3$
Total Transurane			$1.8 \cdot 10^4$	$2.4 \cdot 10^3$

(*) Die Aktivität bezieht sich auf eine Bestrahlungszeit von einem Jahr.

Anhang 2: Glossar

Aktinide: Elemente mit Ordnungszahlen 89 bis 103, analog den Lanthaniden (den Seltenen Erden).

Alpha-Strahler: Radioaktives Nuklid, das unter Emission von Alpha-Strahlen zerfällt.

Beta-Strahlen: Bei radioaktivem Zerfall aus dem Atomkern emittierte Elektronen.

Curie, abgekürzt Ci: Einheit für die Menge eines Radionuklides oder eines radioaktiven Stoffes.

Endlager: Lager radioaktiver Abfälle, die ohne Rückholbarkeit des Lagergutes ausgelegt sind.

ERDA: Energy Research and Development Administration Washington/DC, USA, heute DDE, Department of Energy.

Gamma-Strahlen: Radioaktiven Kernzerfall begleitende Energieemission in Form elektromagnetischer Wellen.

Halbwertszeit: Charakteristisches Zeitintervall eines radioaktiven Nuklides, in dem dessen Aktivität auf die Hälfte abfällt.

Hochaktiver Abfall: Die nach Abtrennung von Uran und Plutonium aus bestrahltem Kernbrennstoff übrigbleibenden radioaktiven Stoffe. Sie bestehen zur Hauptsache aus den Spaltprodukten und einigen Aktiniden (siehe Anhang 1). Sie liegen meist in Form von Glas vor, das in Stahlzylinder (0,3 m Durchmesser und 3 m Länge) eingegossen ist.

Hydraulisches Fracturing: Abheben eines Gesteinspaketes von seiner Unterlage mittels Einpressen einer Flüssigkeit aus einer Bohrung an einer vorbestimmten Stelle unter hohem Druck.

Kalzinierung, Kalzinate: Verfestigungsprozess der zu Oxiden führt, häufige Vorstufe zur Verglasung hochaktiver Abfälle.

Konditionierung: Überführung radioaktiver Abfälle in transportfähige und/oder lagerfähige Form. Beispiele von Konditionierungsprozessen: Verfestigung, Zementierung, Bituminierung.

Lithosphäre: Die Gesteinshülle der Erde.

Mittelaktiver Abfall: Nicht mehr verwendete radioaktive Stoffe, deren Dosisleistung an der Oberfläche der Verpackung 200 mrem/h übersteigt, die jedoch ihrer Herkunft wegen nicht zu den hochaktiven Abfällen zu zählen sind. Sie liegen meist in Stahlfässern von 200 Liter Inhalt vor und benötigen für den Transport — jedoch nicht für die Lagerung — eine zusätzliche Strahlenabschirmung.

Neutronenstrahlen: Bei Kernreaktionen auftretende Neutronenemission.

OCDE/AEN: Organisation de Cooperation et de Developpement economiques / Agence pour l'Energie Nucléaire.

OECD/NEA: Organization for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency.

Parameter: Veränderliche Grösse, durch die ein Prozess oder eine Funktion beeinflusst wird.

rad: Einheit für absorbierte Strahlendosis.

Radioaktive Nuklide: Nuklid: Durch die Ordnungszahl, die Massenzahl und den Energiezustand ihres Kerns bestimmte Atomart.

Radioaktivität: Eigenschaft eines Nuklides, unter spontanem Zerfall und Emission von ionisierenden Strahlen in ein anderes überzugehen.

Radiotoxizität: Auf der ionisierenden Strahlung, der Halbwertszeit und dem Stoffwechselverhalten eines inkorporierten radioaktiven Stoffes beruhende Giftigkeit.

rem: Einheit der Äquivalentdosis.

Schwachaktiver Abfall: Nicht mehr verwendete radioaktive Stoffe, deren spezifische Aktivität über 20pCi/g für Alpha-Strahler und 20 nCi/g für Beta-Strahler liegt (Art. 105 SSVÖ) und deren Dosisleistung an der Oberfläche der Verpackung 200 mrem/h ohne Zusatzabschirmung nicht übersteigt. Feste oder verfestigte schwachaktive Abfälle liegen meist in Stahlfässern von 200 Liter Inhalt vor.

Sorption: Physikalisch-chemische Wechselwirkung zwischen einem im Wasser gelösten Stoff und einem Festkörper. Die Sorption schliesst folgende Phänomene ein: Adsorption, Absorption, Desorption, Ionenaustausch, etc.

Spaltprodukte: Durch Kernspaltung entstehende Nuklide, stabile und radioaktive.

Toxizitätsindex: Masszahl für das Gefährdungspotential eines Lagers fester radioaktiver Abfälle. Der Toxizitätsindex ist definiert als das Verhältnis von Trinkwasservolumen zu Abfallvolumen, welches theoretisch notwendig wäre, um die Radionuklide auf die Richtwerte der Strahlenschutzverordnung für Trinkwasser zu verdünnen.

Transmutation: Kernumwandlung durch Kernreaktionen.

Transplutonide: Elemente mit Ordnungszahlen > 94 (höher als Pu).

Transurane: Elemente mit Ordnungszahlen > 92 (höher als Uran).

Tritium: Wasserstoffnuklid mit der Massenzahl 3 : H-3.

Zircaloy: Eine Zirkoniumlegierung, häufig als Hüllenmaterial von Kernbrennstoffen verwendet.

Zwischenlager: Kontrollierte Lager radioaktiver Abfälle, die darauf ausgelegt sind, dass das Lagergut später wieder entfernt werden kann.

Literaturverzeichnis

- (1) Baumgärtner, F., (Hrsg.), 1978: Chemie der Nuklearen Entsorgung Bd. 1 und 2, Thiemig Taschenbücher Nr. 65 und 66.
- (2) Braunstein, J. (1973): Underground Waste Management and Artificial Recharge. — Sec. Int. Symp. on Underground Waste Management, New Orleans, La., Sept. 26-30, 1973.
- (3) Bredehoeft, J. D., England, A. W., Stewart, D. B., Trask, N. J., Winograd, I. J. (1978): Geologic Disposal of High-Level Radioactive Wastes — Earth Science Perspectives. USGS Circular 779.
- (4) Cohen, B. L. (1977): High-Level Radioactive Waste from Light-Water Reactors, Rev. Mod. Physics 49, p. 1-20, January 1977.
- (5) Eidgenössisches Amt für Energiewirtschaft (1975): Radioaktive Abfälle aus der Kernenergiegewinnung, Bern 1975.
- (6) ERDA Publ. No. 76-43, Vol. 1-5. — Alternatives for Managing Wastes from Reactors and Post-Fission Operations in the LWR Fuel Cycle. Energy Research and Development Administration, Washington D. C. 1976.
- (7) Francioni, W.: Pilot-Verbrennungsanlage für feste, brennbare und schwach radioaktive Abfälle — EIR-Bericht Nr. 299.
- (8) Hill, M. D., Grimwood P. D. (1978): Preliminary Assessment of the Radiological Protection Aspects of Disposal of High-Level Waste in Geologic Formations. NRPB - R 69, January 1978.
- (9) IAEA (1976): Management of Radioactive Wastes from the Nuclear Fuel Cycle. Proceedings of a Symposium, Vienna 22-26 march 1976, jointly organized by the IAEA and NEA (OECD). 2 Vols.
- (10) IAEA (1977): Site Selection Factors for Repositories of Solid High-Level and Alpha-Bearing Wastes in Geological Formations. Technical Reports Series No. 177. Vienna 1977.
- (11) IAEA: Correlation of Waste Type and Underground Disposal Technique (To be published by IAEA 1979).
- (12) Jaekli, H. (1977): Die Einlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen. — Bull. SEV-VSE, 1.p.6-10.
- (13) Konzept für nukleare Entsorgung in der Schweiz (9.2.1978), herausgegeben durch: Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE), Gruppe der Kernkraftwerksbetreiber und -projektanten (GKBP), Konferenz der Überlandwerke (UeK), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA).
- (14) Marsily, G. de, Ledoux, E., Barbreau, A., Margat, J. (1977): Nuclear Waste Disposal. Can the Geologist Guarantee Isolation? Science, Vol. 197 No. 4303, 519-527.
- (15) Martinez, J. D. & Thoms, R. L. (1977): Salt Dome Utilization and Environmental Considerations. — Proceedings of a Symposium, Louisiana State University, Baton Rouge La., Nov. 22-24, 1976.
- (16) Müller, W. H. & Briegel, U. (1977): Experimentelle Untersuchungen an Anhydrit aus der Schweiz. — Eclogae geol. Helv., 70/3, p. 685-699.
- (17) NEA/EC: Risk Analysis and Geologic Modelling in Relation to the Disposal of Radioactive Wastes into Geological Formations. Proceeding of a NEA/EC workshop, Ispira, Mai 1977.
- (18) OECD, Nuclear Energy Agency (1975): Seminar on the Disposal of Radioactive Wastes into Geologic Formations. — Communications, Clausthal-Zellerfeld.
- (19) Polvani, C. (1977): Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes. NEA/OECD, Paris 1977.
- (20) Report to the APS by the study group on Nuclear Fuel Cycles and Waste Management. Reviews of Modern physics, vol 50, Number 1, Part II, Jan. 1978.
- (21) Verordnung über den Strahlenschutz vom 30. Juni 1976 (SSVO).

