Von der Entdeckung der Radioaktivität zur Nutzung der Kernenergie
Das Problem der radioaktiven Abfälle

Vorlesung /Seminar 24269 a+b - Sommersemester 2013 - Prof. Dr. Walter A. Franke
Geocampus Lankwitz Haus C, Gr. Seminarraum, Freitag 13:00 bis 17:00 Uhr
Beginn 19.4.2013, + alle folgenden Freitage vom 26.4 bis 14.6. 2013

Die Skripte soll Ihnen in der Lehrveranstaltung weitgehend die Anfertigung von Notizen ersparen, damit Sie sich auf den vorgetragenen Inhalt konzentrieren können. Die Skripte ist kein Lehrbuch; der Stoff ist oft extrem knapp notiert und deshalb ohne Erläuterung und Gelegenheit zu Rückfragen zuweilen nicht ohne weiteres verständlich. Die Skripte ersetzt nicht den Besuch der LV, sie kann Ihnen beim Versäumen einer Woche aber helfen den Anschluss zu finden.

Es sind nur wenige Abbildungen und Diagramme enthalten; dies hat folgende Gründe:

- Urheberrechtliche Bedenken
- Die Teilnehmer erhalten eine Broschüre „Kernenergie-Basiswissen“ des „Informationskreises Kernenergie“ mit zahlreichen Abbildungen.
- Weitere Abbildungen stehen für Kopien zur Verfügung

Sie sollten bei Verständnisschwierigkeiten sofort Rückfragen stellen, ein Teil der LV wird als Diskussionsseminar gestaltet. Sie sollten also gewärtig sein zu Ihrem Kenntnisstand befragt zu werden und dabei nach Möglichkeit zwischen Meinung und gesicherter Erkenntnis unterscheiden können. - Dieser Teil der LV kann Ihnen helfen Ihre Fähigkeit zu mündlichen Diskussionen im wissenschaftlichen Bereich zu testen und zu verbessern.

Von etwa 14:30 bis etwa 15:00 Uhr wird eine Kaffee, bzw. Tee-Pause eingeschaltet; die Getränke sind kostenlos. In der Pause besteht Gelegenheit zur Diskussion in kleinerer Runde.

Bitte tragen Sie Ihren Namen in die jeweilige Anwesenheitsliste ein, bei der ersten Lehrveranstaltung bitte auch Hauptfach und Semester, sowie e-mail Anschrift. - Ein Schein wird ausgegeben bei hinreichender Beteiligung und Präsenz. Ein Schein mit credit point Benotung kann lt. den Bestimmungen nur ausgegeben werden entweder nach Teilnahme an einem Prüfungsgespräch nach Vereinbarung oder nach erfolgreicher schriftlicher Hausarbeit

Zusammenfassung

Bei der Kernspaltung nimmt ein U 235-Kern ein Neutron auf und gerät dadurch in einen instabilen Zustand. Etwa 80% der instabilen U 235-Kerne zerfällt in zwei Spaltkerne und zwei bis 3 Neutronen. Der Zerfall ist statistisch, es treten Elemente mit den Ordnungszahlen 34 bis 67 als Spaltkerne auf. In der Summe wird dabei etwa ein Tausendstel der Masse in Energie umgewandelt. Etwa 4,7 % dieser Energie ist prinzipiell nicht nutzbar, da sie als Neutrinostrahlung frei wird. 7% der Energie wird so stark verzögert durch radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte freigesetzt, dass sie im Reaktor nicht genutzt werden kann.

Fast alle Spaltprodukte sind radioaktiv, viele Spaltelemente treten in mehreren Isotopen auf. Die Halbwertszeiten verteilen sich im wesentlichen von Sekunden bis zu etwa 30 Jahren. Einige wenige Spaltelemente haben aber auch Halbwertszeiten von 10^5 bis 10^7 Jahren. Durch den Neutroneneinfang von U 238 und den entsprechenden Folgeprodukten entstehen zusätzlich im Reaktor zehn Isotope von vier Transuranelementen. Einige dieser Isotope sind ebenfalls spaltbar. Ausserdem werden auch Elemente der Brennstabhalterung durch Neutroneneinfang in radioaktive Isotopen umgewandelt und als weiteres Produkt tritt Tritium auf.

„Abgebrannte“ Brennelemente enthalten mehr als 40 Elemente. Ca. 7 % der Zerfallsenergie wird erst nach der Entnahme aus dem Reaktor freigesetzt, der Abfall ist darum stark wärmeentwickelnd. Sofort nach Bendigung der Kettenreaktion haben die Brennstäbe eine Radioaktivität die etwa zehnmal höher ist als die der gleichen Gewichtsmenge von Radium 226.

Es gibt keinen internationalen Konsens zu den Fragen:

- Wie lange müssen die radioktiven Abfälle von biologischen Kreisläufen ferngehalen werden?

- Wie und wo sollen und dürfen solche Abfälle gelagert werden?

- Kann das Gefahrenpotential solcher Abfälle weitgehend verringert werden durch chemische Trennung der Bestandteile und Überführung in eine Glasmatrix oder in ein Kristallgitter?

Da bereits alle bisher erwogenen Massnahmen der Abfallbehandlung einen Zeitrahmen von mindestens drei Generationen erfordern, erhebt sich die Frage ob die finanziellen Rücklagen der Kernkraftindustrie ausreichend sind und ob die Verwaltung dieser Rücklagen nicht, wie in den USA und der Schweiz schon geschehen, dem Staat oder in Europa der EU übertragen werden sollten!

Vorbemerkungen zur Geschichte bis 1930

1789 fand Klaproth, Professor an der 1770 gegründeten Preußischen Bergakademie zu Berlin, in der Pechblende von Joachimsthal ein neues Element. Er nannte es Uran nach dem acht Jahre vorher von Herschel entdeckten äussersten Planeten unseres Sonnensystems, der den Namen Uranus erhalten hatte. Dabei unterlief Klaproth ein angesichts des damaligen Kenntnisstands der Chemie verständlicher Irrtum, er hielt das schwarze, schwere Pulver, das er bei der Reduktion des gelben Uran(VI)oxids erhielt, für das Uranmetall. Das Metall wurde erst 52 Jahre später hergestellt. Uran ist ein silberfarbenes Metall, das bei 1130°C schmilzt und die Dichte 19,05 hat. Uranverbindungen wurden bis zur Entdeckung der Kernspaltung 1938 kaum technisch genutzt (Zur Färbung von keramischen Glasuren und von Gläsern).

1895 entdeckte Röntgen die nach ihm benannte Röntgenstahlung (engl. X-rays). Bei einem Experimentalvortrag von Poincare´über diese neue Strahlung im Januar 1896 in der Akademie der Wissenschaften in Paris beobachtete Bequerel, dass das Glas der Röhre an der Stelle an der die Rö.-Strahlen austraten, eine Fluoreszenz zeigte. Da Bequerel seit vielen Jahren über Fluoreszenz gearbeitet hatte, glaubte er, dass die Fluoreszenz für die Strahlung ursächlich wäre. Tatsächlich fand er, daß von fluoreszierenden Uranverbindungen eine Strahlung ausging, die alle Eigenschaften der Rö.-Strahlung aufwies. Seine ursprüngliche Annahme, die Fluoreszenz erzeuge diese Strahlen, korrigierte er bereits nach zwei Wochen: Alle Uranverbindungen, auch nicht fluoreszierende Stoffe, sandten diese Strahlungsart aus. - Er erkannte, dass ein Teil der Strahlung im Magnetfeld abgelenkt wurde und die Luft durch die Strahlung ionisiert wurde. Die nähere Untersuchung der Strahlung übertrug er einer jungen Doktorandin, Marya Curie, geb. Sklodowska. Ihr Mann Pierre Curie war Physikprofessor an der Sorbonne und beteiligte sich bald an diesen Arbeiten.

Mit einer von ihrem Schwager Jaques Curie konstruierten Anordnung konnte sie die Ionisierungsintensität von radioaktiven Präparaten quantitativ messen. 1898 wies Frau Curie nach, dass auch Thorium radioaktiv ist. Frau Curie fand auch, daß Lösungen aus denen Uran, bzw. Thorium chemisch völlig entfernt wurden, noch Strahlung aussandten. Es mußte sich um neue, bislang unbekannte Elemente handeln; noch im gleichen Jahr 1898 wurde das Polonium und das Radium entdeckt. - Um wägbare Mengen von Radium für eine Atomgewichtsbestimmung zu erhalten, arbeitete Frau Curie 60 t Pecherzrückstände aus Joachimsthal auf und erhielt daraus 22 mg Radium.

Sie trennte das Ra vom Ba durch fraktionierte Kristallisation der Chloride, später zeigte sich, dass beim Arbeiten mit Bromiden etwa 60% Zeitersparnis möglich gewesen wäre!

1903 erhielten Bequerel, sowie Marya und Pierre Curie den Nobelpreis für Physik. - In seiner Festrede wies Pierre Curie erstmals auf die Gefahren hin, die mit der neuen Strahlung verbunden sein könnten. Die Bezeichnung "Radioaktivität" wurde durch das Ehepaar Curie eingeführt. (Pierre Curie starb 1906 bei einem Verkehrsunfall, seine Frau übernahm seine Prof.-Stelle an der Sorbonne) - 1911 wurde Marya Curie auch der Nobelpreis für Chemie verliehen. (M.Curie starb 1934 an Leukämie)

Neue Elemente

Bis 1896 "fehlten" im Periodischen System der Elemente zwischen Wismut und Uran sieben Elemente, nur das Thorium war bekannt.
1896 Polonium (Curie) und Radium (Curie und Schmidt)
1898 Actinium (Debierne)
1899 Radon (Owens)
1918 Protactinium (Hahn+Meitner)
1937 Technetium (Perrier + Segre in Palermo)
Die noch fehlenden Elemente Astatin und Francium wurden erst 1938 bis 1940 aufgrund einer Voraussage von Minder entdeckt, bzw. hergestellt (Seaborg)
1945 Promethium in Oak Ridge

Analyse der Strahlung

1903 P. Curie/Bequerel/ Rutherford α, β und Gamma-Strahlung
1903 P. Curie et.al Wärmeentwicklung von Radiumsalzen
1903 Radon produziert Helium(Ramsay)
1903 Geigerzähler (Hans Geiger+Rutherford)
1903 Szintillationszähler (Crookes, Regener)
ab 1900 Nebelkammer nach Wilson
1905 Einstein $e = m c^2$
1912 - 1916 Wellenlängenbestimmung der Gammastrahlen durch v.Laue, Knipping, W. Bragg, Rutherford.
1911 Zerfallsgesetze (Soddy+Fayans) **Rutherfordsches Atommodell (aus Ablenkung von α-Teilchen)**
1913 Isotope Elemente (Soddy- partiell Erklärung von Ergebnissen Hahn/Meitners)
1913 Bohrsches Atommodell
1913 Moseley Zusammenhang zwischen Rö.-Spektren und Ordnungszahl
1914 Moseley + van den Broek: Kern=Protonen + Neutralteilchen
1919 erste künstliche Elementumwandlung durch α-Teilchen (Rutherford)
1921 Kernisomerie (Hahn + Meitner)
1922 **Aston (Nobelpreis) Massenspektrograph**
Masse von 2000 Isotopen bestimmt.
1930-34 **Neutronen** (Bothe, Becker, Joliot-Curie,CHADWICK)
1932 Linearbeschleuniger(Cockroft+Walton) - **Zyclotron (Lawrence)**

1932 Deuterium (Urey)
1934 Aufbau des Atomkerns (Heisenberg - Gamov)
1934 Anderson entdeckt das Positron in der Höhenstrahlung
1934 ß+- Zerfall (Joliot-Curie)
1935 Nobelpreis für Joliot-Curie (künstl. Radioakt. Elemente)
1938 Kernreaktionen durch Anlagerung langsamer Neutronen (Fermi,Nobelpreis) Erzeugung von Transuranen
1938 Hahn, Straßmann, - Meitner,Frisch - Kernspaltung
1938 Bethe-Weizsäcker-Zyklus (Erklärung der Kernfusion in der Sonne)

Kenntnisstand Mitte der 30er Jahre

Atome bestehen aus einem positiv geladenem Atomkern (Durchmesser ca. 10^{-16} cm) **und der Elektronenhülle** (Durchmesser ca. 10^{-8} cm). **Der Kern besteht aus positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen. Das einzelne Proton hat die relative Masse 1,00728, das einzelne Neutron die rel. Masse 1,00860.**
(Als Einheit der Atommasse gilt heute 1/12 der Masse des Kohlenstoffisotops 12, früher bezog man sich auf die Masse des Wasserstoffs, bzw. von Sauerstoff 16)
Ein Elektron hat die Masse 0,000549. Ein neutrales Atom enthält soviele Protonen im Kern wie Elektronen in der Hülle, die auf bestimmten Bahnen angeordnet sind. Die Elektronenhülle ist maßgebend für das chemische Verhalten.

Die Zahl der Protonen im Kern bezeichnet man als Kernladungszahl Z.
Die Summe der Protonen und Neutronen bezeichnet man als Massenzahl.

Atome mit gleicher Kernladungszahl, aber verschiedener Massenzahl bezeichnet man als Isotope.

Massendefekt:
Die Masse eines Atomkerns ist ein wenig kleiner als die Summe seiner elementaren Bestandteile.
Bei der Bildung eines Atomkerns aus seinen elementaren Bestandteilen wird eine dem Massendefekt entsprechende Energiemenge frei.

Dies ist die Bindungsenergie des Kerns.

Die Bindungsenergie ist ein Maß für die Festigkeit des Kerns. Umgerechnet wird nach der Einstein´schen Formel $E = m c^2$. Ein Nukleon entspricht etwa 930 MeV.

Trägt man die Bindungsenergie je Nukleon gegen die Massenzahl auf, so erhält man eine Kurve mit einem Minimum bei etwa der Masse 60. (Entspricht dem Element Eisen)
Wenn sich aus zwei leichten Atomkernen also ein schwererer Atomkern bildet, so müßte diese <u>Fusion</u> die Differenz der Bindungsenergien freisetzen. Solch einen Prozeß hatten Weizsäcker und Bethe 1938 als Energie liefernden Prozeß in der Sonne postuliert.

- Eine Spaltung (**<u>fission</u>**) eines sehr schweren Atomkerns, bei dem zwei leichtere Elemente als Reaktionsprodukt auftreten, sollte ebenfalls Energie freisetzen. Bis 1938 glaubte aber niemand, daß dies mit relativ einfachen Mitteln zu erreichen sei.
(<u>Ausnahmen</u>: Ida Noddack 1936 - L. Szillard: Kettenreaktion!)

<u>Radioaktiver Zerfall</u>

Alle Atome mit einer Kernladungszahl höher als 83 sind radioaktiv.
(Radioaktiv sind auch je ein Kalium-, Rubidium-, u. Kohlenstoff-Isotop u.a.)

<u>α-Zerfall</u>:
Es wird ein α-Teilchen emmittiert, meistens auch ein Gammaquant.
α-Teilchen sind doppelt positiv geladene Heliumatome (2 Protonen+2 Neutronen)**.**
Der Tochter-Kern hat eine Kernladungszahl, die gegenüber dem Mutterkern um zwei erniedrigt ist, seine Masse ist um vier erniedrigt.
Das α-Teilchen hat eine für das Nuklid charakteristische Energie, das gleiche gilt für das Gammaquant. Aus der α-Reichweite (Energie) kann die Halbwertszeit abgeleitet werden. **Je höher die Energie, umso kürzer die Halbwertszeit**. (Geiger+Nutall 1911)

Sargent 1933: Ähnliche Verhältnisse bei ß-Zerfall:
Kurze Halbwertszeiten = Energiereiche Strahlung !!

<u>β - Zerfall</u>:
Der Mutterkern emmitiert ein Elektron und meist auch ein Gammaquant.
Der Tochterkern hat die gleiche Massenzahl wie der Mutterkern, aber eine um eins erhöhte Kernladungszahl.

Praktisch ist ein Neutron in ein Proton umgewandelt worden. Das Gammaquant hat eine für das Nuklid charakteristische Energie, dagegen zeigen die emittierten Elektronen eine wiederum für das Nuklid charakteristische Energieverteilung. (Neutrino-Hypothese)

β^+ Zerfall:
Der Mutterkern emmitiert ein Positron. (Masse wie Elektron, aber positiv geladen, praktisch wird ein Proton in ein Neutron umgewandelt) **Die Kernladungszahl des Tochterkerns ist gegenüber dem Mutterkern um eins erniedrigt, die Massenzahl bleibt unverändert.**

K-Einfang:
Ein Elektron der innersten Elektronenbahn, der K-Schale, wird vom Kern aufgenommen. Dadurch wird ein Proton in ein Neutron verwandelt. Die Masse bleibt unverändert, die Kernladung erniedrigt sich um eins, also genau wie beim β^+ -Zerfall! - Die K-Schale wird durch Sprünge von äußeren Schalen aufgefüllt, dies führt zu einem charakteristischen Gamma-Spektrum. Da solche Stoffe reine Gammastrahler sind und meist die Strahlungsenergie relativ gering ist, werden sie bevorzugt in der Medizin benutzt.

Das Zerfallsgesetz
Die Menge dN der in der Zeit dt zerfallenden Atome ist gleich der Zahl der ursprünglich vorhandenen Atome N_0 mal einem für das Nuklid charakteristischen Koeffizienten λ.

$$dN/dt = N_0 \lambda \qquad N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\ln N_t/N_0 = -\lambda t$$

Die Halbwertszeit ist die Zeit, in der gerade die Hälfte der vorhandenen Atome zerfallen ist.

$$t_{1/2} = \ln 2/\lambda = 0{,}693/\lambda$$

Nach x Halbwertszeiten ist noch $1/2^x$ der ursprünglichen Menge vorhanden.

Faustformel: Nach 7 Halbwertszeiten sind noch etwa 1%, nach 10 Halbwerts-zeiten 0,1%, nach 20 Halbwertszeiten der 10^{-6} te Teil vorhanden.

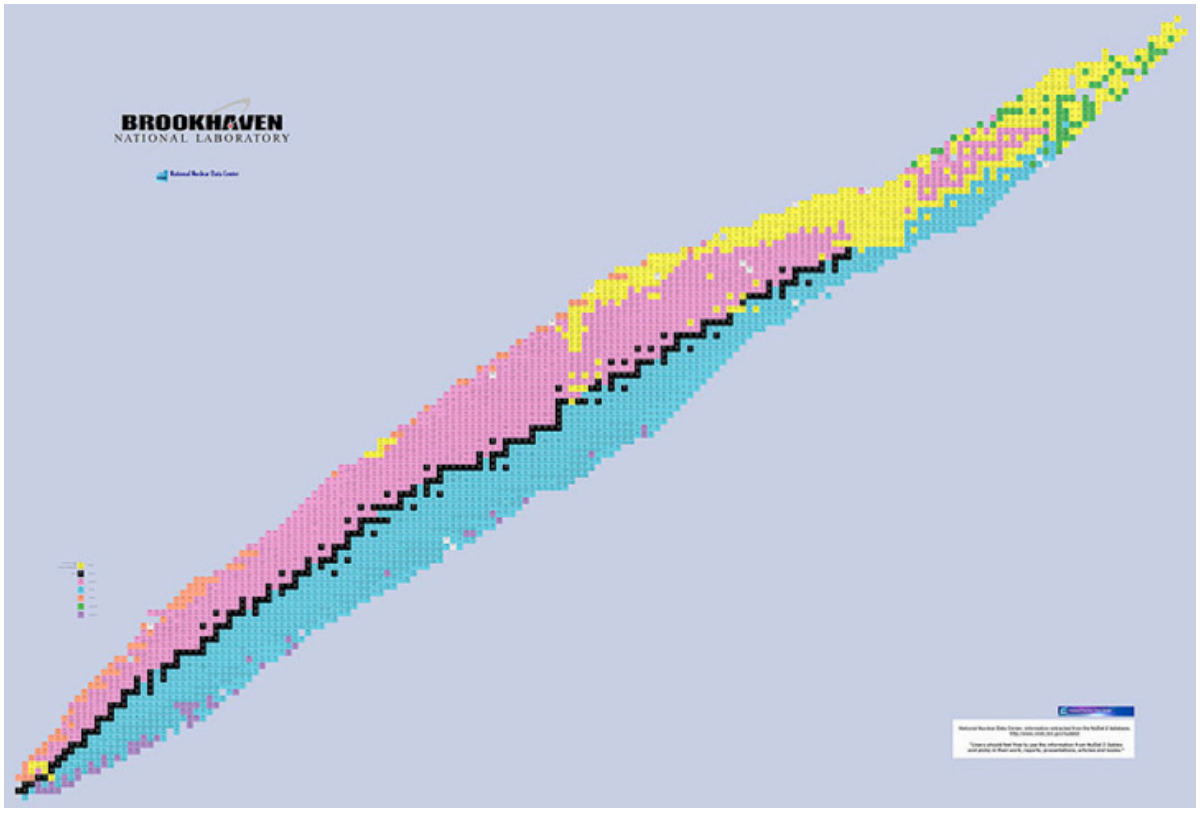
Ein Nuklid wird gekennzeichnet durch das entsprechende chemische Elementsymbol, links davon wird die Massenzahl hochgestellt angegeben, die Kernladungszahl wird links tiefgestellt angegeben. - Da dies etwas umständlich ist und andererseits die Angabe der Kernladungszahl zusätzlich zum Elementsymbol, jedenfalls für Fachleute, überflüssig ist, wird meist nur der Elementname mit nachgestellter Massenzahl benutzt:
z.B. Uran 238 statt $^{238}_{92}U$

Der radioaktive Zerfall wird in einem rechtwinkligen Diagram übersichtlich dargestellt, aufgetragen wird die Kernladungszahl gegen die Neutronenzahl oder die Massenzahl. - Leider sind in den Lehrbüchern die Darstellungen nicht einheitlich, teils werden die Elemente durch Punkte, teils durch Kästchen markiert. Unterschiedlich wird auch die Kernladungszahl mal auf der Ordinate, mal auf der Abzisse aufgetragen! Theoretisch bis zu 8 verschiedene Darstellungsarten, am verbreitesten ist die sogenannte **Nuklidkarte.**

Nuklidkarte:
Auf der Ordinate wird die Protonenzahl (Kernladungszahl), auf der Abzisse die Neutronenzahl aufgetragen. - Schwarze Kästchen = stabile Nuklide / gelb=α-Zerfal l/ blau = ß$^-$ Zerfall / rot = ß$^+$ Zerfall / grün = Spontanspaltung

Alle Elemente mit einer Kernladungszahl oberhalb 83 (Bi, Wismut) zerfallen radioaktiv durch mehrere α- und mehrere β -Zerfälle bis ein stabiles Blei- oder Bi-Isotop erreicht wird. Da sich beim α-Zerfall die Masse um 4 ändert, beim ß-Zerfall aber überhaupt nicht, gibt es 4 verschiedene natürliche Zerfallsreihen.

Th232	(alle Massenzahlen = 4n)	(mit n = ungerade Zahl)
Np237	(alle Massenzahlen = 4n +1)	(entsteht im Reaktor)
U238	(alle Massenzahlen = 4n + 2)	
U235	(alle Massenzahlen = 4n + 3)	



Einige kurzlebige Zwischenglieder dieser Zerfallsreihen zerfallen teils durch α-teils durch ß-Zerfall (Sogenannter dualer Zerfall). Schließlich wird aber in jedem Fall, wenn auch auf verschiedenen Wegen, das gleiche stabile Endglied erreicht.

Künstliche Radioaktivität

Durch Beschießung von Atomkernen mit Teilchen, insbesondere mit α-Teilchen oder Neutronen, können neue Nuklide entstehen. Die neuen Nuklide können stabil oder radioaktiv sein, dies hängt ab von ihrer Stellung im Nuklidschema.

---

freie Neutronen sind radioaktiv, Zerfall mit einer Halbwertszeit von 11 min zu H .(Wasserstoff)

Neutronen entstehen durch Kernspaltung oder künstl Kernprozesse:
$^{9}_{4}Be\ (\alpha,n)\ ^{12}C$

Unterscheidung nach Geschwindigkeit, bzw. Energie:
Thermische N. (v = ca. 2000m/sec ; ca. 0,03 eV)
langsame N. 0 - 1000 eV
mittelschnelle N. 1 - 500 keV
schnelle N. 500keV - 10 MeV

Zählung von Neutronen: Zählrohr enthält Bortrifluorid BF_3 , durch die Reaktionen

$^{10}_{5}B\ (n,\alpha)\ ^{7}_{3}Li$ (7%) und

$^{10}_{5}B\ (n,\chi)\ ^{11}_{5}B$ (93%) wird eine Ionisierung erreicht.

Möglichkeiten der Wechselwirkung von Neutronen mit Materie:
(Die Wahrscheinlichkeit des Effekts wird angegeben durch den Streu-, bzw. Einfangquerschnitt, der von der Energie des Neutrons abhängt.)

1.) Elastische **Streuung**, führt zu Energieverlust, ist am effektivsten bei kleinen Atommassen!

2.) **Einfang** und folgende Kernreaktion z.B. $^{1}H\ (n,\chi)\ ^{2}D$
bzw. Bor (siehe oben.)

Große Einfangquerschnitte haben insbesondere Bor, Cadmium, Gadolinium

Wichtig im Reaktor :
135 J (6,7h, β) ⇒ 135Xe (9,2h, β) ⇒ 135 Cs Xenon 135 hat für thermische Neutronen einen Einfangquerschnitt von 3,5 Millionen barn nach :
135 Xe (n, χ) →136 Xe
Im Reaktorbetrieb ist die 135Xe-Konzentration sehr klein, da es durch genügend vorhandene Neutronen sofort in 136Xe umgewandelt wird. Wird der Reaktor abgeschaltet, so baut sich eine höhere Konzentration an 135 Xe auf, die ein Wiederanfahren verhindert, man muß warten bis es nach einigen Tagen zerfallen ist! (Etwa 5 - 7 Tage) Die vorstehend geschilderten Vorgänge führen dazu, dass in RBMK-Reaktoren bei niedrigen Leistungen plötzliche Energieexkursionen auftreten können und darum solche Betriebsbedingungen vermieden werden müssen!

Brutvorgang: Elementumwandlung durch Neutronenaufnahme z.B.
238 U (n,) 239 U (23,5min,β) ⇒ 239 Np (2,3h,β) ⇒ 239 Pu
92 92 93 94

3.) **Spaltung**
Spaltbar sind **235 U ; 239 Pu und 233 U** (resultiert aus 232 Th durch
92 94 92 90
Neutroneneinfang und zwei β-Umwandlungen mit 23min,bzw. 27d), sowie 240Pu, 241Pu, 242Am und 251Cf. - Erst Ende des 20. Jahrhunderts wurde bekannt, dass Neptunium 237 spaltbar ist.

30er Jahre - Die Entdeckung des Neutrons und die Folgen

Frederic Joliot-Curie u. seine Frau Irene, (Schwiegersohn und Tochter von Marya Curie) variieren 1932 Experimente von Bothe, bei denen Neutronen entstehen. Bei der richtigen Erklärung kommt ihnen Chadwick zuvor! - 1933 weist Anderson in der Höhenstrahlung das Positron nach, dem sie ebenfalls auf der Spur sind! - Erst ihre Experimente zur Erzeugung künstl. radioaktiver Elemente durch Anlagerung langsamer Neutronen werden 1935 mit dem Nobelpreis belohnt.

Ab 1934 bestrahlt Enrico Fermi, ein Schüler Bothes, in Rom Uran mit langsamen Neutronen und findet zahlreiche neue radioaktive Stoffe, offenbar Transurane. Er erhält den Nobelpreis 1938 und kehrt nicht in das faschistische Italien zurück, sondern geht nach Amerika an die Columbia-Universität.

Otto Hahn arbeitet 1904-1906 bei Ramsay in London und Rutherford in Montreal auf dem Gebiet der Radioaktivität. In Berlin beginnt er eine akademische Karriere an der Friedrich-Wilhelm-Universität und arbeitet mit

Lise Meitner zusammen. Seit 1911 forschen beide am Kaiser-Wilhelm-Institut für Physikalische Chemie in Dahlem. Hier arbeiten Hahn/Meitner u. Strassmann seit 1935 ebenfalls über die Neutronenanlagerung an Uran. - Lise Meitner verliert 1933 ihre Lehrberechtigung an der Uni weil sie Jüdin ist, kann aber bis zum sogenannten "Anschluß" Österreichs im März 1938 mit Hahn und seinem Assistenten Strassmann weiterarbeiten, da sie die österreichische Staatsbürgerschaft besitzt. 1938 wird ihr auf Anweisung der SS die Ausreise verweigert, Hahn organisiert am 17.7.38 ihre Flucht über Holland nach Schweden, wo sie durch Vermittlung von Niels Bohr eine Arbeitsmöglichkeit bei Siegbahn erhält. - Hahn findet, dass ein radioaktives Erdalkalimetall (er hält es zuerst für Radium) das aus dem Uran entstanden ist, nicht durch Fraktionierung vom zugesetzten Barium getrennt werden kann. Er teilt dies am 19.12.38 Meitner in Stockholm mit, sie kommt in der Diskussion mit ihrem Neffen R.O. Frisch (Kopenhagen) zu dem Schluß, daß der beschossene Urankern zerplatzt sein muß und ein radioaktives Ba-Isotop eines der Spaltprodukte ist! Die entsprechende Publikation von Hahn/Strassmann erscheint am 6-1-39 in den "Naturwissenschaften".

Joliot-Curie nimmt an, daß bei der Kernspaltung mehr Neutronen entstehen als verbraucht werden, dies wird von mehreren teams, darunter Meitner/Frisch nachgewiesen. Damit sind mindestens theoretisch Atombombe und Kernreaktor möglich geworden! Angesichts des drohenden Krieges zwischen Nazi-Deutschland und Polen + Frankreich + England nicht nur für Hahn eine Horrorvorstellung; im Februar 39 äußert Hahn im Gespräch mit Weizsäcker
" Wenn meine Entdeckung dazu führen sollte, daß Hitler eine Atombombe bekommt, begehe ich Selbstmord."

In Amerika bewegt Leo Szillard, ein Schüler Heisenbergs, den berühmtesten Wissenschaftler des Jahrhunderts, Albert Einstein zur Absendung eines Briefs an den Präsidenten F.D. Roosevelt in dem er auf die Möglichkeit der Entwicklung einer Atombombe hingewiesen wird. (Am 2-8-1939). Tatsächlich wird das "Manhattanprojekt" aber erst am 6.12.1941 beschlossen.

In Frankreich sorgt Joliot-Curie dafür, daß alle Vorräte an Uran und schwerem Wasser rechtzeitig und erfolgreich vor den Deutschen versteckt werden. Nach Kriegsende entwickelt er unabhängig von den USA bis 1948 einen französischen Kernreaktor. Da er sich während des Krieges in der Resistance den Kommunisten angeschlossen hatte, wird er 1950 aus allen Ämtern entlassen.

In Deutschland wird erst 1942 über die "Nutzung" der Kernenergie entschieden. Da Heisenberg für eine Atombombenentwicklung einen Aufwand von einigen Milliarden Mark und mindestens 3 bis 4 Jahre veranschlagt, wird nur die Entwicklung eines energieliefernden Reaktors in Auftrag gegeben. Da kein hinreichend reiner Graphit als Moderator zur Verfügung steht, wird mit an D_2O angereichertem Wasser als Moderator gearbeitet. Die Schwerwasserversorgung erfogt durch Norsk Hydro in Norwegen und fällt

durch Luftangriffe, Sabotage durch norwegische Widerstandskämpfer und eine britische Kommandoaktion mehrmals aus. Der Reaktor muss 2x wegen der Luftangriffe abgebaut und verlagert werden; er wird bis Kriegsende nicht kritisch. Versuche zur Isotopentrennung von UF_6 in Zentrifugen starten 1943; sie müssen wegen der laufenden Luftangriffe und wegen Schwierigkeiten bei der Materialbeschaffung nach wenigen Monaten aufgegeben werden.

Bis Mitte 1942 war es Hahn gelungen seine laufenden Ergebnisse zu veröffentlichen. 1943 wird er Mitglied der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften, der Nobelpreis 1944 für Chemie wird für ihn reserviert, die Entscheidung wird ihm vertraulich mitgeteilt, aber erst nach Kriegsende publiziert. (Deutschen Staatsbürgern war es in NS-Deutschland verboten einen Nobelpreis zu akzeptieren!)

Das **Manhattanprojekt** wurde am 6.12.1941 beschlossen als der Krieg der USA mit Japan unausweichlich schien. Einen Tag später erfolgte der japanische Angriff auf Pearl Harbour, am 11.12.41 erklärten Deutschland u. Italien den USA den Krieg. -.(300.000 Beschäftigte, davon 70.000 Wissenschaftler, Kosten etwa 10 Milliarden Schweizer Franken..Leitung J.O.Oppenheimer, der in Göttingen promoviert hatte) - Beteiligt u.a. Chadwick, Fermi, James Franck, Hans Bethe, Leo Szillard, Edward Teller, R.O.Frisch, Klaus Fuchs) Logistik und militärische Leitung General Leslie Groves -
- Am 2.12.42 wurde ein von Fermi in Chikago gebauter Reaktor erstmals kritisch.. Um eine zu schnell ansteigende Kettenreaktion zu stoppen, wurden Neutronen absorbierende Stäbe oberhalb des Reaktors an Seilen aufgehängt, bei Gefahr sollten die Seile mit einer Axt gekappt werden.. In Erinnerung daran nennt man noch heute die Schnellabschaltung eines Reaktors **SCRAM**
„Signal: cut rope axe man" . .

Hanford : Reaktoren zur Pu239-Erzeugung / Clinton Engineering Works: Anlagen zur Uran-Isotopen-Trennung. (Trennung U235 von U238: Anreicherung durch Thermodiffusion nach Clusius, anschliessend massenspektrometrische Isolation) Ab März 1943 Bombenlabor in Los Alamos..

Anfang 1945 standen jeweils genügende Mengen an hochreinem Pu 239, bzw. U 235 für den Bau mehrerer Bomben zur Verfügung.- Trinity Test: Erste Versuchsexplosion am 16.7.45 bei Alamogordo in der Wüste von Neu-Mexiko. Drei Wochen später, am 6. und 9. August fielen die Bomben auf Hiroshima und Nagasaki. - Am 10.8.46 kapitulierte Japan nach der Zusicherung die Institution des Tenno nicht in Frage zu stellen.

Wettrüsten von USA und Sowjetunion

Im August **1949 erster Atombombentest der Sowjetunion**.
1.11.**52 erster Wasserstoffbomben-Test der USA** über dem Elugelab-Atoll
1955 erster H-Bombentest Sowjetunion (A.Sacharow)

1963 Abkommen über den Stopp oberirdischer Atomtests (J.F.Kennedy/Crustschow) bis dahin über **250 Tests in der Atmosphäre.**
1968 Kernwaffensperrvertrag + Nur unterird. Tests
bis heute insgesamt **2056 Atomtestexplosionen! (40-50 Megacurie)**
Energieliefernde Kernreaktoren waren insbesondere interessant für die US Navy, ab 1954 Þ Atom-U-Boote
1989 hatte die Sowjetunion ca. 153 Atom-U-Boote.
Sieben Atom-U-Boote sind gesunken! (2 amerikanische/5 russische)

1989: Insgesamt ca. 50.000 Nuclearsprengköpfe weltweit!!

Gleichgewicht zwischen den Grossmächten durch das Prinzip MAD
Mutual assured destruction , von einem russischen General interpretiert mit dem Spruch „*Wer zuerst schiesst, stirbt als Zweiter!"*

Verschärfung des Wettlaufs durch sog. „Neutronenbombe" die wesentlich Menschen tötet, aber anorg. Material schont. (Kleine H-Bombe bei der ein wesentlicher Teil der Energie als Neutronenstrahlung auftritt, gezündet in 1 bis 2 km Höhe)
Die Abschreckungstrategie wurde in Frage gestellt durch die **strategic defense initiatve SDI** unter US-Präsident Ronald Reagan, führte aber Mitte der 80er Jahre zu Abrüstungs, bzw. Rüstungsbegrenzungs-Verhandlungen USA/USSR.

Dwight D.Eisenhower (US-Präsident 1953-1961) Erste Kritik am Militärisch-Industriellen Komplex aus Rüstungsindustrie + Generalstab, der ständig mehr Geld forderte - Eisenhower forderte daher verstärkte friedliche Nutzung der Kernenergie

Erstes ziviles KKW in USA 1951/ Sowjetunion 1954 / D: Versuchsreaktor 1958 / 1961-65 erstes KKW Grundremmingen - Anfangs Widerstand der Energieversorgungs-Unternehmen. - KKWs waren nur durch massive Subventionierung u. politischen Druck durchsetzbar! (SPD/FDP-Koalition unter Helmut Schmidt unter dem Eindruck der ersten „Ölkrise" 1973/74))
(Hochtemperaturreaktor : THTR Hamm-Uentrop 1981 auf Vorschlag eines Heisenberg-Schülers)

Maßeinheiten für Radioaktivität und ihre Wirkungen

Curie = 3,7 x 10^{10} Zerfälle pro sec entspricht 1 g Radium 226

Becquerel = 1 Zerfall pro sec

Für eine gegebene Menge eines Isotops läßt sich der Wert über Halbwertszeit bzw. Zerfallskonstate und Atomgewicht errechnen.-

Damit ist noch nichts ausgesagt über die physikalische, bzw. biologische Wirkung, da kein Unterschied gemacht wird ob beim Zerfall α, ß oder Gamma-Strahlung auftritt und welche Energie die Strahlung hat!!
Wirkungen werden über ihre Ionisierungsleistung bestimmt!

1 Röntgen (R) ist diejenige Dosis einer Gammastrahlung die durch Ionisierung bei Absorption in 1 g Luft 84 erg, bzw. in 1 g Wasser 94 erg erzeugt.

radio absorbed dose = rad / 1 rd = ist die Dosis einer beliebigen Strahlung, durch die in 1 kg des bestrahlten Stoffes die Energie 0,01 Wsec absorbiert wird.

Später Einführung von neuer Einheit **Gray (Gy) = 100 rad**.

Trotz gleicher Ionisierungsleistungen haben verschiedene Strahlungsarten unterschiedliche biologische Wirksamkeit, besonders α-Teilchen und Neutronen haben eine bis zu 20fach stärkere Wirkung!

Durch Multiplikation von rad mit entsprechenden Faktoren entsteht = rem (roentgen equivalent man)

1 rem ist die Dosis einer Strahlung, welche die gleiche biologische Wirkung hervorruft wie 1 rad harter Gammastrahlung.

Später Einführung einer neuen Einheit: **Sievert (Sv) = 100 rem**

Um im Wirrwarr zurechtzufinden zwei Faustregeln :

1 Curie erzeugt in 1 m Abstand innerhalb 1 Stunde die Dosis von 1 Röntgen.

Für Gammastrahlen bei Einwirkung auf biologisches Gewebe gilt 1 Röntgen entspricht etwa 1 rad, bzw. 1 rem, bzw. 0,01 Sv.

α-Teilchen sind außerhalb des Körpers wegen ihrer kurzen Reichweite in Luft relativ ungefährlich, bei Inkorporation sind sie wegen der bis zu 20fach höheren Wirksamkeit extrem gefährlich. - Biologische Halbwertszeit, bzw. effektive Halbwertszeit bei Inkorporation: Im ersten Fall wird die Ausscheidung aus dem Organismus, im zweiten Fall wird zusätzlich die Abnahme durch Zerfall berücksichtigt.(Faustregel: Je kürzer die Halbwertszeit eines Isotops, umso höher die Energie der Strahlung.)

Biologische Materie hat aufgrund des Gehaltes an C 14 und K 40 eine Aktivität von bis zu 100 Bequerel pro Kilo.

Reichweiten in Luft radioaktiver Strahlungen, bzw. Teilchen sind abhängig von ihrer Energie.

- α-Strahlen im Bereich cm
- ß-Strahlen im Bereich Dezimeter bis einige Meter
- Gammastrahlen im Bereich einige Meter bis hunderte von Metern.
- Neutronen haben in Luft höhere Reichweiten als Gammastrahlen.!

Bei großen Reichweiten (Neutronen, Gammastrahlung) ist zu berücksichtigen, daß die Intensität mit dem Quadrat des Abstands von der Strahlenquelle sinkt.

Abschirmung

bei α-Strahlen genügt schon dickes Papier, bei ß-Strahlen einige mm Plexiglas, bzw. Glas oder Metall.

Bei der Wechselwirkung von Gammastrahlen mit Materie konkurrieren Photoeffekt, Comptonstreuung und Paarbildung miteinander.(siehe Seite 23-24 der Broschüre „Radioaktivität und Strahlenschutz“) $I = I_0 e^{-\mu x}$

x = Schichtdicke / μ = Schwächungskoeffizient (ist abhängig von Materialart u. der Energie der Strahlung) - Je höher die Kernladungszahl Z, und damit die Zahl der Elektronen des Materials, umso besser die Abschirmung. Häufig verwendete billige Materialien: Blei und Bariumsulfat. Am effektivsten wäre Uran! - Neutronen passieren dagegen schwere Atome relativ wenig behindert, zuverlässige Abschirmung durch H-haltige Substanzen wie Wasser, Polypropylen, Titanhydrid, bzw. durch Borkarbid, Cadmium oder Gadolinium-Verbindungen.

Die Gesundheitsgefahren durch Radioaktivität sind bis etwa Mitte des 20. Jahrhunderts stark unterschätzt worden, dies gilt sowohl für den zivilen als den militärischen Bereich!!

In den 20er Jahren gab es kurzzeitig Reklame für eine schwach Radiumhaltige Schokolade, noch 1940 gab es einige Monate eine Zahnpaste (Thoramed) mit der Werbung:„ Das Thoriumoxid in dieser Zahnpaste massiert durch Strahlung ihr Zahnfleisch“ - Mitte der 40er Jahre sandten schwangere Amerikanische Frauen Rö-Aufnahmen ihres Bauches an ihre Männer an der Front. - In den 50er Jahren standen in grossen Schuhgeschäften Rö-Geräte mit denen die Lage der Zehenknochen im neuen Schuh kontrolliert werden konnte!

Bei den oberirdischen Testexplosionen 1946 bis 1962 wurden zahlreiche Personen (Militär + Zivilisten) in allen Ländern extremen Strahlenbelastungen ausgesetzt!

……

Uran und Thorium in Gesteinen

Häufigkeit in der Erdkruste: Uran 2 - 3 ppm , Thorium ca. 10 ppm
(Uran so häufig wie Zinn, häufiger als Hg,Ag,Au,Sb,Bi+Pt zusammen!)

Vorkommen in den Mineralen:Zirkon $ZrSiO_4$ und Monazit $CePO_4$ (Th,bzw U als isomorpher Ersatz von Zr, bzw. Ce), wichtige U-Minerale: Uraninit UO_2 , Brannerit UTi_2O_6, Coffinit $USiO_4$

Die drei zuletzt genannten Minerale oxydieren an der Erdoberfläche. Das 6wertige Uran liegt dann als hantelförmiges UO_2-Ion vor; es passt in keinen bekannten Gittertyp, es bilden sich typische Uranylminerale (über 100 bekannt). Bei Gegenwart von Phosphat-Ionen bilden sich schwerlösliche Uranglimmer. (Das sind keine Silikate, sondern Phosphate!)

Die stark strahlenden Zerfallsprodukte der Zerfallsreihen des U238, des U235 und des Th 232 bleiben im Kristallgitter "gefangen". (Darauf beruht u.a. die Altersbestimmung nach der Uran-Blei-Methode!) Eine Freisetzung der Tochternuklide, insbesondere des Radon 222 aus der U238-Reihe mit der Halbwertszeit 3,8 d erfolgt nur an der Oberfläche des Minerals und bei Verwitterung. **(Auch nach dem Zerfall des Radons in der Atmospäre sind die radioaktiven Folgeprodukte als Ultra-Nanoteilchen lungengängig. Erst durch Tau, Regen und Nebel werden sie aus der Luft entfernt.)**

Beim Uran-Bergbau wird das Kristallgitter bei der chem. Aufbereitung zerstört und die Tochternuklide bleiben im Abfall zurück. Die Folge ist eine gegenüber dem unverletzten Erzkörper verstärkte Radon-Freisetzung. (Die Radon-Isotope 220 aus der Th 232-Reihe, bzw. Rn 219 aus der U 235-Reihe sind wegen ihrer kurzen Halbwertszeiten von 55 sec, bzw. 4 sec weniger gefährlich, da sie weniger Zeit haben aus dem Festkorper oder der Flüssigkeit in die Atmosphäre zu entweichen.)
Radon 222 verursacht etwa 1/3 der derzeitigen mittleren Strahlenbelastung der Bevölkerung ! - Wie hoch die Radonbelastung ohne Urangewinnung und Bearbeitung wäre ist nicht bekannt. (Rn 222 wird auch bei der Verbrennung von Kohle freigesetzt!)
Große Uran produzierende Minen: Olympic Dam in Australien / Rössing in Namibia und die französisch kontrollierte Grube Arlit im Niger

Die Erfahrung, dass radioaktive Elemente samt ihren Zerfallsprodukten in Kristallgittern über geologische Zeiten (mehrere Mio a) hinweg sicher eingeschlossen werden können, führte zu Vorschlägen dies als **"Matrixbarriere"** bei der Lagerung hochaktiver Abfälle zu nutzen (Ringwood)

Reines Uran ist wie alle Schwermetalle bei Inkorporation in löslicher Form giftig, diese chemisch bedingte Giftwirkung wird höher als bei Quecksilber eingeschätzt. (Problem: Nutzung von abgereichertem Uran in Trägheitsgeschossen - Golfkrieg 1991 und 2003)

Kernspaltung (fission)

Spaltbare Isotope haben die Eigenschaft nach Einfang eines "thermischen" Neutrons in zwei Kerne zu zerfallen. (Die Einfangwahrscheinlichkeit ist für thermische Neutronen etwa 1000 mal höher als für schnelle Neutronen.) Die Tochterkerne sind radioaktiv, in der kurzfristigen Stoffbilanz der Zerfallskette treten im Mittel bei U 235 2,5 Neutronen, bei Pu 239 sogar etwa 3 Neutronen und eine Massendifferenz von etwa 0,22 u auf. (1 u = Masse eines Nukleons) – Ca. 20% der U-235 Kerne stabilisieren sich nach Neutronenaufnahme zu U-236.- Die Energie tritt zu etwa 90% als Wärme und 10% als ß- und Gamma-Strahlung auf. (Die Wärmeproduktion von 1 kg spaltbarem Material ist etwa so groß wie der Heizwert von 2500 t Kohlenstoff.)
Die Tochterkerne verteilen sich über die Ordnungszahlen 34(Se) bis 68(Er).
Die Häufigkeitsverteilung entspricht einer Kurve mit zwei Maxima.
(Hauptbestandteile: Seltene Erden, Zirkonium, Molybdän, Cäsium, Barium, Strontium, Krypton, Ruthenium, Palladium und Technetium.- siehe Abb. S. 19)

Spaltbare Isotope sind U 235 (Zu 0,7% in Natururan enthalten) und Pu 239, das durch Neutroneneinfang aus Uran 238 im Kernreaktor gebildet wird.

Da mehr Neutronen pro Zerfall freiwerden, als pro Zerfall benötigt werden, kann eine Kettenreaktion eintreten:
Ungebremste Kettenreaktion = **Atombombe** (Ablauf in Bruchteilen einer Sekunde, Neutronendichte nimmt Lawinenartig zu.)
In jedem System in dem eine Kettenreaktion stattfinden soll, muß berücksichtigt werden, daß Spaltneutronen im Prinzip durch vier Vorgänge aus dem System verschwinden können::

1. Einfang durch Uran 238, bzw. U 235 ohne Spaltung
2. Einfang durch Verunreinigungen im System
3. Austritt aus dem System
4. Einfang durch U 235 oder Pu 239 unter Spaltung

Eine Kettenreaktion ist nur möglich, wenn 4. eine höhere Wahrscheinlichkeit hat, als die drei anderen zusammengenommen.

Eine Masse, die bei kugelförmiger Anordnung dieser Bedingung genügt, wird als kritische Masse bezeichnet) (Bomben :Etwa 15 kg reines U 235 = Kugel mit 12 cm Durchmesser bzw. etwa 6 kg Pu 239= Kugel mit 8 cm Durchmesser)

Nicht die gesamte Mase an spaltbarem Material wird umgesetzt, im fall out deswegen immr noch Plutonium!
Technische und militärische Unterschiede von Uran- und Pu-Bomben.

Kontrollierte Kettenreaktion = **Kernreaktor** (Neutronendichte bleibt gleich)
Die Steuerung der Kettenreaktion im Reaktor ist möglich durch drei Faktoren:

1. Verlangsamung durch verzögerte Neutronen. Etwa 0,7 % aller Neutronen werden erst durch Zerfallsreaktionen der Tochterkerne mehrere Sekunden später frei.

2. Steuerung durch Neutronenabsorption. (Bor, Cadmium in Form von Steuerstäben)

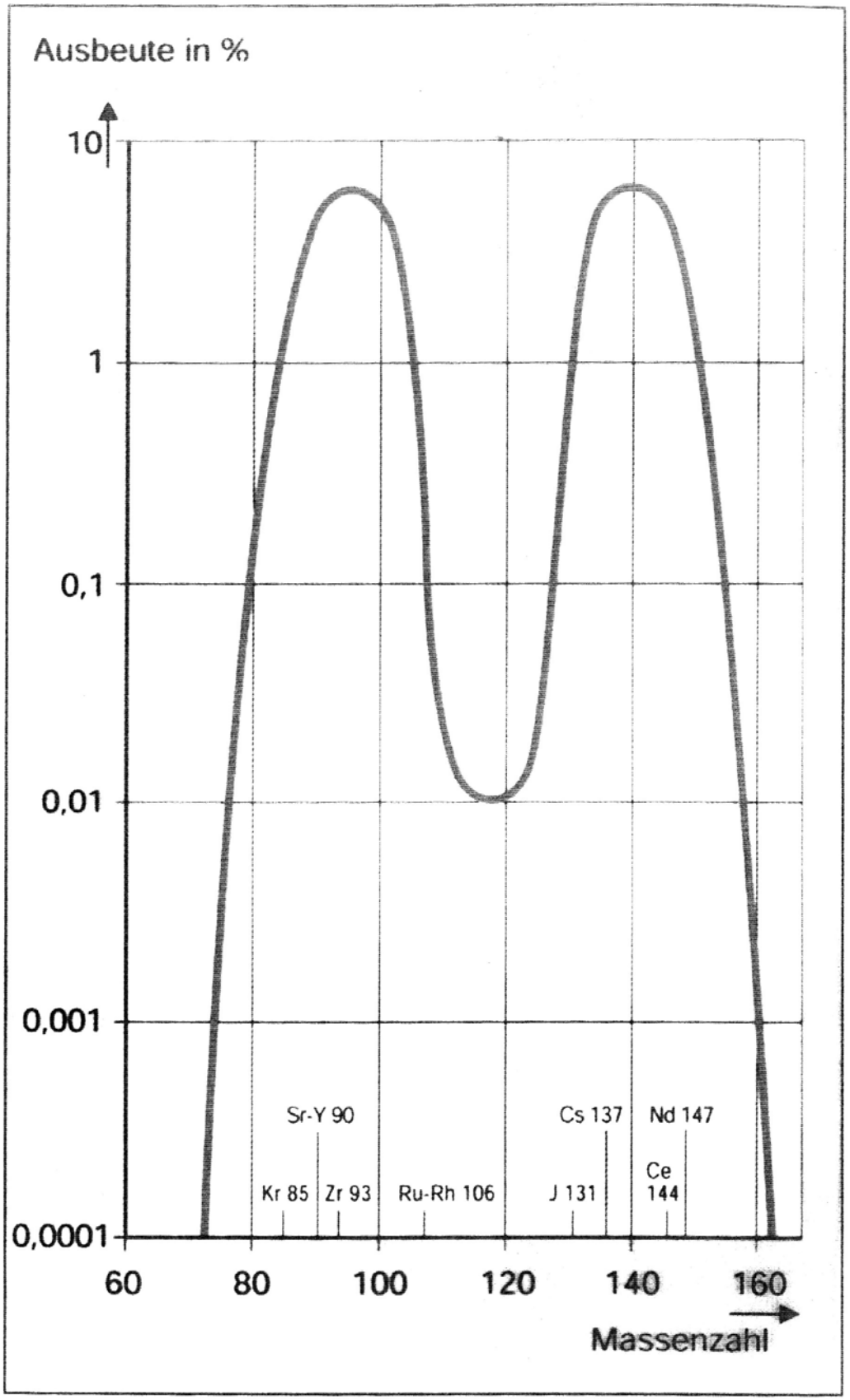
3. Selbstregulierung durch Temperatureinfluß (Mit steigender Temperatur nimmt der Vermehrungsfaktor ab. Der Vermehrungsfaktor ist das Verhältnis der Neutronendichte in zwei aufeinanderfolgenden "Generationen".)

Da vorzugsweise langsame, "thermische" Neutronen zur Spaltung führen, werden im Reaktor die schnellen Neutronen durch "Moderatoren" gebremst. Mögliche Moderatorelemente sind: H, D und C, bzw. Be.
Natururan kann nur mit C oder D als Moderator benutzt werden! Wasser als Moderator wird möglich, wenn der Gehalt an U 235 durch Anreicherung auf 1,5 bis 3% gesteigert wird.

Anreicherung (Meist auf 3% U235):

- Durch Gasdiffusion: Ca. 1200 Diffusionsschritte nötig, 10.000 KWh pro 1 kg dabei werden ca. 5% der später gewinnbaren Energie verbraucht, das kostet ca. 700 US-Dollar pro kg.
- Gaszentrifuge: Nur 10 Trennschritte- 0,25% rel. Energieverbrauch - 50 US-Dollar/kg. - Allgemein gebräuchlich, ist wahrscheinlich technisch am einfachsten zu beherrschen.
- Laseranregung + chem. Reaktion: bzw. Ionisation und anschließende magnetische Trennung (Soweit bekannt bislang nicht genutzt)
- Trenndüsen-Verfahren, Kosten wahrscheinlich ähnlich Zentrifuge

Durch Einfang von Neutronen durch U 238 werden Pu 239 (u.andere Pu-Isotope) gebildet, dadurch kann der "Abbrand" gesteigert werden.
Trotzdem sind nur etwa 70 - 80 % des spaltbaren Materials nutzbar, da einige Spaltprodukte einen so hohen Neutroneneinfangquerschnitt haben, dass die Kettenreaktion zum Stillstand kommt.



Häufigkeitsverteilung der bei der Spaltung von Uran-235 entstehenden Spaltprodukte

Ein grosser Anteil der Wärmeproduktion tritt erst verzögert beim radioaktiven Zerfall der Tochterkerne auf, deshalb muss ein Reaktor, auch nach Unterbrechung der Kettenreaktion durch volles Einfahren der Steuerstäbe, noch weiter gekühlt werden, sonst heizt er sich auf (Die spezische Wärme von UO_2 ist sehr klein!) -
Eine gute Wärmeableitung ist nur möglich durch durch Konvektion in Flüssigkeiten oder Gasen

Die Zirkaloy-Legierung der Brennstabhülle ragiert ab ca. 800°C mit Wasser zu Zirkoniumoxid und Wasserstoff. Es besteht dann die Gefahr einer Knallgasexplosion und radioaktive Gase (Kr + Xe+Jod) + Cs treten aus. Bei weiterer Aufheizung schmilzt das spaltbare Material bei ca. 2400°C. Dabei werden erhebliche Anteile der Spaltprodukte gasförmig oder als Schwebstoffe freigesetzt.

(**core melt** = Größter anzunehmender Unfall = **GAU**) Dies trat beim Tschernobyl-Reaktor 1986 während eines Tests ein.

Beim Totalausfall aller Kühlmittelpumpen eines wassergekühlten Reaktors durch Sabotage oder Unfall tritt innerhalb von Stunden ein GAU ein.(Gilt für <u>alle</u> derzeit existierenden flüssigkeitsgekühlten Reaktoren!) Die Notkühlaggregate sind deshalb mindestens dreifach redundant ausgelegt.

Die "abgebrannten" Brennstäbe eines Reaktors haben bei der Entnahme eine Aktivität von etwa 10^6 Curie/t, d.h. sie sind fast so radioaktiv wie reines Radium!
Sie werden daher im Kernkraftwerk für eine gewisse Zeit (2 bis 50 a) in Abklingbecken unter Wasser aufbewahrt. - Außer den Spaltprodukten, dem Uran 238, dem nicht umgesetztem Spaltisotop U 235 und dem durch Neutroneneinfang aus U 238 gebildetem Plutonium 239 enthalten die Brennstäbe noch andere Pu-Isotope, Np 237, Am und geringe Mengen anderer Transurane; diese sind meist α-Strahler. (Gesamtmenge der Transurane etwa 1% der Masse)

Radioaktive Isotope können nicht vernichtet werden. (Unwichtige Ausnahme: Transmutation) - Man muß den natürlichen Zerfall abwarten:

Nach 7 Halbwertszeiten ist noch 1/100 der ursprünglichen Menge vorhanden,
nach 10 Halbwertszeiten noch der 1/1000 Teil
nach 20 Halbwertszeiten der 10^{-6} Teil.

Halbwertszeiten einiger Nuclide in abgebrannten Brennstäben

Nuclid	T 1/2	
Sr 90	**28,5 a**	
Cs 137	**30,17 a**	
J 129	**1,57 x10^7 a**	
J 131	**8,2 d**	
Pu 239	**24110 a**	
Pu 240	**6563 a**	
Pu 242	**3,7 x 10^5 a**	
Np 237	**2,1x 10^6 a**	
Am 243	**7370 a**	
Curium 242	**163 d**	
Curium 243	**29 a**	
Curium 244	**18,1 a**	
Tc 99	**2,1 x10^5 a**	
Zr 93	**1,5 x10^6 a**	
Tritium (H3)	**12,3 a**	**(Gas!)**
Kr 85	**10,8 a**	**(Gas!)**
Xe 133	**5,3 d**	**(Gas!)**

Jod und Cäsium sind bei Temperaturen über 1000°C flüchtig

Man müßte eigentlich die abgebrannten Brennstäbe mindestens 100 a zwischenlagern und dann den radioaktiven Abfall so lagern, daß er für mindestens 0,5 Millionen Jahre sicher vom biologischen Kreislauf getrennt bleibt! (Kein Kontakt mit Grund- oder Oberflächenwasser)

Es gibt hierfür zwar zahlreiche Vorschläge, bislang wurde aber keine Tonne Material dieser Art derart bearbeitet und gelagert, weltweit sind **alle** Abfälle der Kernenergienutzung derzeit provisorisch zwischengelagert. (Dabei ist die Bezeichnung provisorisch in einigen Fällen, insbesondere bei Anlagen in der ehemaligen Sowjetunion, eine freundliche Umschreibung für eine verantwortungslose Schlamperei!)

Aus den oben gemachten Ausführungen geht klar hervor, dass die Kosten der Endlagerung der radioaktiven Abfälle praktisch von kommenden Generationen aufgebracht werden müssen.
Die Energieversorgungsunternehmungen in Deutschland sind verpflichtet für diese Ausgaben Rücklagen zu bilden (Etwa knapp 0,005 € pro KWh). Bis 1998 summierten sich diese Rücklagen bei den EVU`s in Deutschland auf etwa 55 Milliarden DM. - Für 2003 wurde ein Wert von 31,4 Milliarden € angegeben. (Wert für 2012 geschätzt ca. 50 Milliarden €)

In Deutschland können die Unternehmen die Rücklagen am Kapitalmarkt frei anlegen, dagegen müssen in den USA und neuerdings auch in der Schweiz entsprechende Rücklagen in einen Staatlich kontrollierten Fond eingezahlt werden! - Es gibt Bestrebungen in der EU einen kontrollierten EU-Fond dafür einzurichten. (Erbitterter Widerstand aller Kernenergiebetreiber!)

Partitioning & Transmutation (P&T)

Als Transmutation wird die Elementumwandlung durch Kernreaktionen, z.B.die Aufnahme eines thermischen Neutrons bezeichnet. Primär ensteht ein um eine Massenzahl schwereres Isotop des gleichen Elements, das aber einer anderen Zerfallsreihe angehört falls die Kernladungszahl höher als 83 ist. Es ist ebenfalls radioaktiv.-

Im Reaktor entstehen so aus U238 Þ U239 und daraus durch zwei ß-Zerfälle Pu239.

So wurde etwa vorgeschlagen, dass man durch eine Transmutation Np237 in Pu 238 umwandeln kann, das mit einer Halbwertszeit von 87 a in Uran 234 zerfällt.(Zerfall zu 99% nach 600 a.)

Durch Zufuhr von schnellen Neutronen von außen kann man aber auch unterkritische Mengen von Transuranen zum Kernzerfall bringen.

Das ist im Prinzip richtig, aber:

Dazu müssten diese Elemente erst relativ rein isoliert werden und dann einer geeigneten sehr intensiven Neutronenstrahlung ausgesetzt werden; auch dann wäre die Spaltung nicht quantitativ und müsste nach chemischer Trennung von den Spaltprodukten mehrfach wiederholt werden.! Es müssten spezielle Teilchenbeschleuniger gebaut werden, spezielle Trennverfahren sind bereits bekannt.

Selbst dann wäre ein Zeitraum von 210 Jahren nötig bis die Radioaktivität der Spaltprodukte wesentlich abgeklungen wäre. - Die Kosten sind bislang kaumr schätztbar, da F&E noch lange nicht abgeschlossen sind. Sie wären aber durch die bisher angesammelten Rücklagen sicher nicht gedeckt.

Aktuelle Informationen unter www.spektrum.de/artikel/1178937

In den letzten 25 Jahren sind weltweit jährlich etwa 7000 t verbrauchte Brennelemente angefallen.. Das entspricht jährlich einer Produktion von 65 t Plutonium, 4 t Americium, 4 t Neptunium und 600 kg Curium.

"Natur-Reaktor" Oklo

Oklo , Gabun, Westafrika Uranlagerstätte - Uraninit-Imprägnation in Sandstein Vor ca. 2 Milliarden a lag der U 235-Gehalt wegen der unterschiedlichen Halbwertszeiten der U-Isotope damals noch bei ca. 3% ! Mit Wasser als Moderator im porösen Gestein liefen Kettenreaktionen ab, bis der U 235 - Gehalt auf etwa 0,5% gefallen war. Dauer wird auf 200.000a geschätzt. - **Ist als Nachweis einer Unschädlichkeit völlig ungeeignet: Es gab vor 2 Milliarden Jahren wahrscheinlich noch kaum Sauerstoff in der Atmosphäre und die Biosphäre bestand ausschließlich aus Einzellern im Meer!**

Reaktortypen
Zu unterscheiden nach:
- Anreicherungsgrad des Urans, bzw. Pu-Gehalt
- Moderator (Wasser, schweres Wasser, Graphit, bzw. Beryllium)
- Kühlmedium (Flüssig: Wasser,schweres Wasser, Natrium oder Gas: He oder CO_2)
- Brennstoffanordnung (Fest, Lösung, Suspension)

Bei Leistungsreaktoren wird immer Dampf erzeugt, der eine Turbine antreibt, die bis zu höchstens 40% der Wärmeenergie des Dampfs in Elektrizität wandelt. - 60% der Wärme wird per Kühlturm an die Atmosphäre oder das Flusswasser abgegeben.(Eine partielle Nutzung der Abwärme gab es nur in der Sowjetunion!)

Alle flüssigkeitsgekühlten zivilen Reaktoren haben einen dichten, druckfesten Stahlmantel und einen dicken Betonmantel (containment). (Ausnahme RBMK-Reaktoren der ehemaligen USSR!)

Die Wahrscheinlichkeit einer Kernschmelze wurde Ende der 70er Jahre im sog. Rasmussen-Report auf einmal in 17.000 Betriebsjahren angegeben, neuere Berechnungen für die derzeit betriebenen Druck- und Siedewasser-Reaktoren liegen zwischen 0,1 bis 1 Mio. Jahre.

Eine Kernschmelze kann nicht eintreten bei **Hochtemperaturreaktoren** geringer Leistung (100 - 300 MW_{el}) mit He-Kühlung. Prinzipiell kann durch eine SiC-Beschichtung der Graphit-Brennstoff-Mischung auch bei Lufteinbruch ein Abbrennen des Graphits verhindert werden.
(Deutschland: 15MV-Forschungsreaktor in Jülich (1967 - 1988) / THTR-Hamm-Uentrop 300 MWel 1983 - 1988 - Aufgegeben wegen Mangel an Interesse der Deutschen Atomindustrie) Weiterer Vorteil: „Abgebranntes“ Material ist extrem korrosionsfest, es lässt sich nur in speziellen Anlagen unter extremen Kosten auflösen und wieder aufarbeiten.

Je ein Reaktor in Japan und China im Bau. - In Rußland ein Hochtemperaturreaktor mit Na-Kühlung + Waffenplutonium als Brennstoff.. -
……
.Am 13. Januar 1977 musste durch witterungsbedingte Kurzschlüsse im Stromnetz der Block A des **KKW Grundremmingen** heruntergefahren werden. Es kam durch Regelungsfehler zu einer Schnellabschaltung und einer kurzzeitigen Überhitzung, Sicherungsscheiben barsten und einige hundert Kubikmeter radioaktiv mit Tritium kontaminiertes Wasser flossen ins Containment. Es trat keine Radioaktivität unkontrolliert aus dem Reaktor aus. Der 1966 in Betrieb gegangene Reaktor.wurde stillgelegt, 1983 begann der Rückbau,.der bis heute andauert.

Reaktorunglücke mit erheblicher freigesetzter Radioaktivität

1957 ereignete sich ein Graphitbrand im britischen Kernkraftwerk **Windscale,** einem gasgekühltem, mit Graphit moderierten Reaktor. Es wurde eine radioaktive Wolke freigesetzt, die weite Teile der Umgebung verstrahlte. Die freigesetzte Jodmenge wird auf 20.000 Curie geschätzt, große Teile davon regneten über Weideflächen ab. Die dort gewonnene Milch musste darum für 6 Wochen weggeschüttet werden.

Weitaus geringere Mengen an Radioaktivität wurden freigesetzt bei Unfällen in sechs amerikanischen **Versuchreaktoren** (Idaho, Waltz Mill, Hanford, Arco-Idaho, Oak Ridge, Crystal River/Florida) und im Chalk River Experimental Reactor in Kanada..

Zwei Kernkraftwerke (Druckwasserreaktor) auf **Three Mile Island**, einer Insel im Susquehanna River bei **Harrisburg,** Pennsylvania/USA. - Unfall im Block 2 am 27.3.1979 – Aus Versehen wurde ein Ventil der Hauptspeisepumpe des Sekundärkreislaufs an die Wasserversorgung statt an die Druckluftleitung angeschlossen. Wahrscheinlich aus ökonomischen Gründen waren die Kupplungen für Druckluft und Wasser identisch! Das Ventil schloss daraufhin, als Folge schalteten sich die Hauptspeisepumpen ab und der Dampferzeuger fiel aus. Programmgemäß wurde der Reaktor schnell abgeschaltet. Die Nachzerfallswärme lag bei 100 Megawatt.
Automatisch sprangen die Pumpen der Notkühlung an, allerdings hatte man zwei Tage zuvor die entsprechenden Ventile bei einem Test geschlossen und vergessen sie danach wieder zu öffnen! – Wegen mangelnder Kühlung stieg im Reaktorkessel innerhalb von Sekunden die Temperatur und der Druck extrem an; ein Überdruckventil öffnete sich automatisch und entließ Wasserdampf des Primärkreislaufs in einen dafür vorgesehenen Tank. Das Überdruckventil sollte nach dem Druckabfall eigentlich wieder schliessen, es blockierte aber und blieb offen.. Da hierfür keine Anzeige im Kontrollraum vorgesehen war, blieb das der Bedienungsmannschaft unbekannt. Es floss weiter Wasserdampf aus dem Reaktor in den Druckbehälter, auch dort öffnete sich eine Drucksicherung und das Wasser floss ins Containment.
Nach 8 Minuten bemerkten die Operateure die geschlossenen Ventile der Notkühlung, weitere Maßnahmen versagten zeitweise da es keine Füllstandsanzeige für den Reaktorkessel gab. – etwa 2 Stunden nach Beginn des Unfalls fiel das obere Drittel der Brennstäbe trocken. Bei stark erhöhten Temperaturen reagierte das Zr der Brennstoffhüllen zu Zirkoniumoxid und Wasserstoff und eine Kernschmelze.setzte ein. Austretende Radioaktivität blieb auf das Innere des Containments beschränkt, das auch durch eine Knallgasexplosion nicht beschädigt wurde.
Schließlich gelang es durch Wasserzufuhr zum Reaktordruckgefaß.die Kühlung auch im oberen Drittel der Brennstäbe wieder aufzunehmen, allerdings musste zur Druckentlastung radioaktives Gas aus dem Kraftwerk

abgelassen werden (Edelgase + 17 Ci Jod) - Zeitweise waren etwa 140.000 Menschen für wenige Wochen evakuiert, der Radius der Evakuierung wurde nach einigen Tagen von 5 Meilen auf 20 Meilen ausgedehnt. – Bisherige Kosten für Dekontaminierung und Rückbau über eine Milliarde US-Dollar.

Tschernobyl

RBMK-Reaktor (high-power channel reactor): Graphitblock von 12 m Durchmesser und 7 m Höhe, vertikal von 1700 wassergefüllten Druckröhren (65 bar, 280°C) durchzogen. In den Druckröhren die Brennelement-Stäbe. - 211 Kontroll-Stäbe, die Verschiebungsgeschwindigkeit der Kontroll-Stäbe war 40 cm/sec, d.h. ein voll ausgefahrener Kontrollstab braucht ca. 18 sec. zum voll einfahren.!! Die ganze Anordnung in einem mit Stickstoff-gefülltem Stahlblechmantel, oben abgedeckt mit einer dicken Stahlplatte (2000 t). Kein Containment, kein scram vorgesehen!!
Insgesamt gab es 16 solcher Reaktoren. Diese Reaktoren in Russland sind als 4er- oder 2er-Blöcke ausgelegt. (Chernobyl-Ignalina-Smolensk-Kursk-Leningrad)

Vorteile: Brennstäbe können während des Betriebs gewechselt werden, deshalb Betrieb ohne Unterbrechung möglich und günstig für Brütung von Pu 239 - Reaktor war leicht mit konventioneller Technik zu fertigen. - Geringere Anreicherung an U235 nötig.

Nachteile: Wasser siedet bei zu hoher Leistung schon in Druckröhren auf, diese Dampfblasen führen zur Erhöhung des Neutronenflußes. (Positiver Void-Koeffizient) - **Kein Scram vorgesehen**!

Aufgrund der Konstruktion der Kontrollstäbe kam es beim Einfahren der oberen Kontrollstäbe zu einer Erhöhung des Neutronenflusses, wenn diese vorher voll ausgefahren waren! Dies war den Konstrukteuren bekannt, eine entsprechende Warnung an das Bedienungspersonal ist aber auf dem Weg durch die Bürokratie liegen geblieben.

Am 26.April 1986 gegen 1:23 Uhr betätigte während eines Tests, bei voll ausgefahrenen oberen Regelstäben, die Bedienungsmannschaft des Blocks 4 den emergency button, da sich die derzeitig niedrige Leistung plötzlich steigerte. (Normalleistung 3200 MW) Drei Sekunden nach dem Drücken lag die Leistung nach der Anzeige des Kontrollsystems bei 520 MW, nach fünf Sekunden explodierte der Reaktorblock (Knallgasexplosion!), die Untersuchungskommision schätzte die Leistung in diesem Moment auf 200 bis 300 mal höher als die Normalleistung!

Die offizielle sowjetische Untersuchungskommision gab dem Bedienungspersonal die Alleinschuld, die Internationale Atomernergiekommision in Wien hat dies akzeptiert. - Die gegenteiligen Feststellungen von V.M.Chernousenko, Wissenschaftlicher Direktor in der Ukrainischen Akademie der Wiss., einer der Leiter der Aufräumungsarbeiten,

niedergelegt in seinem Buch "Chernobyl-Insight from the inside" Springer-Verlag 1991 wurden weder von der Regierung Russlands noch der Atomenergiekommision je kommentiert! - Eine realistische Einschätzung und Schilderung der Ursachen erfolgte erst 2006 in einem Bericht der Strahlenschutzkommission des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Heft 50 (2006).

Die Explosion zerstörte das Reaktorgebäude; Teile des Graphitblocks und der Reaktorstäbe wurden auf das Dach des Nebengebäudes und in die Umgebung geschleudert und der restliche Graphit geriet in Brand. Der Brand auf dem Dach des Nachbargebäudes wurde durch die Feuerwehr gelöscht, der brennende Graphit wurde durch Abwurf von Sand, Dolomit und Blei von Hubschraubern aus bekämpft und erlosch schließlich nach 11 Tagen. - **Da wahrscheinlich der gesamte Graphit verbrannte und die Nachwärme der Zerfallsprodukte eine weitere Temperaturerhöhung bewirkte, muss angenommen werden, dass praktisch alle Brennelemente geschmolzen sind. -** Eine Zone von 30 km rund um den Reaktor wurde völlig evakuiert (116.000 Personen).- In unmittelbarer Nähe des Unglücksortes wurden Dosen von 30 bis über 200 Röntgen pro h gemessen. Der Einsatz von Robotern scheiterte, alle elektrisch oder elektronisch betriebenen Teile fielen nach kurzer Zeit aus (Ionisierung).- Aufräumungsarbeiten durch Kurzeinsatz von Armee-Angehörigen (4 min bis 2 Tage) (Dach: pro Mann 1,5 - 3,5 min, Bewegung von 10-50 kg Graphit, bzw. Hüllrohre!! - Kalkulation im Mittel 20 rem pro Person)

Um das Fundament zu sichern, wurde ein Tunnel gegraben (Mit Hacke, Schaufeln und Schubkarre!) Anschließend wurden alle kontaminierten Teile in der Umgebung vergraben und ein "Sarkophag" konstruiert, mit Betonwänden an der Seite und einem Dach aus Stahlrohren, bedeckt von Blechen. Beteiligt etwa 400 bis 700 Tausend Personen, meist Freiwillige. ("Liquidatoren") Die Angaben schwanken, da teils nur die direkt am Reaktor beschäftigten Personen gezählt werden, teils die in der 30 km-Zone eingesetzten Personen mitgezählt werden. Es standen nicht genügend Dosimeter zur Verfügung, um alle eingesetzten Personen zu überwachen, teilweise versagten die Dosimeter, da sie nicht für derartig hohe Dosen ausgelegt waren!

Da das Dach nicht wasserdicht ist, wird z.Zt. ein neuer „Sarkophag“ geplant. Internationale Beteiligung und Finanzierung!! Schätzung der Kosten: 1,1 Milliarden US-Dollar bei ca. 100 a Lebensdauer!

Die freigesetzte Menge Radioaktivität kann nur abgeschätzt werden, die publizierten Daten schwankten zwischen 4% und 40% des Gesamtinventars, also um eine Grössenordnung! (Gesamtinventar ca. 6 GCi)
Weite Teile Weißrußlands, der Ukraine und Rußlands wurden vorwiegend durch radioaktives Cs belastet, die Angaben für die Flächen die mit 1 Ci und mehr pro Quadratkilometer belastet sind, schwanken zwischen 32.500 km^2 (Deutsche industriefinanzierte Studie 1998) und über 200.000 km^2 (Botschafter der Ukraine in den USA in Spektrum der Wiss. 1997) Die

Internationale Atomenergiekommision gab 38.900 km^2 an die mit mehr als 5 Ci belastet sind!

Die Zahl der innerhalb kürzerer Zeit an Strahleneinwirkung verstorbenen Personen schwankt je nach Quelle zwischen 28 und 39 Personen, darunter viele Feuerwehrleute und alle Tiefbauarbeiter, sowie viele Hubschrauberpiloten. Da die evakuierten Personen u. "Liquidatoren" praktisch sich auf fast die gesamte Sowjetunion verteilten, sind wirklich verlässliche Angaben nicht erfaßbar.
Eine industriefreundliche Studie spricht von 1245 Fällen von Schilddrüsenkrebs bei Kindern und 200 Strahlen-Kranken, eine ukrainische Angabe von 30.000 strahlenbedingten Erkrankten unter 400.000 "Liquidatoren", davon 5000 Fällen von Erwerbsunfähigkeit. -

---

Das Kernkraftwerk **Fukushima Daiichi** liegt ca. 250 km nordöstlich von Tokio an der Pazifikküste. Es besteht aus 6 älteren Siedewasserreaktoren bei denen die Abklingbecken außerhalb des Containments angeordnet sind. Die Blöcke 1 bis 3 waren am **11.3. 2011** in Betrieb, ihre Abklingbecken waren nur teilweise gefüllt. Reaktor 4 war noch ohne neue Brennstäbe, aber das Abklingbecken war voll gefüllt mit Brennstäben aus den Blöcken 4 bis 6. Die Blöcke 5 und 6 .waren gerade mit neuen Brennstäben bestückt, aber noch nicht in Betrieb gegangen.
Am 11.3. 2011 um 14:46 Japan Zeit erschütterte ein Erdbeben von 9,0 auf der Richterskala Japan für 2 Minuten, dies war das stärkste je registrierte Erdbeben in Japan. Das Epizentrum des Bebens lag etwa 130 km östlich in etwa 20 bis 30 km Tiefe im Pazifik. Im KKW Fukushima wurden durch das Beben automatisch die Reaktoren 1 bis 3 abgeschaltet, da in der ganzen Region das Stromnetz ausfiel, sprangen die Dieselaggregate der Notfallpumpen an..
Allerdings traf um 15:40 der Tsunami auf die Küste. Es gab eine Schutzmauer von etwa 6 m Höhe, aber hier hatte die höchste Welle 13 m Höhe! Das unterste Stockwerk der Anlage wurde völlig überspült. Die Dieseltanks der Notfallstromversorgung standen im Freien und wurden weggeschwemmt. Eine Versorgung über Batterien war nur für etwa eine Stunde vorgesehen, danach fiel die Kühlung völlig aus. Die Hitzeentwicklung betrug zu diesem Zeitpunkt noch 10% der Nominalleistung, nach 5 Tagen noch 0,5% !! - Versuche eine externe Stromversorgung über Kabel und fahrbare Aggregate aufzubauen scheiterten, es waren kaum Aggregate verfügbar und vorhandene Kabel waren zu kurz. Um den Druckanstieg im Reaktor zu begrenzen wurde am Morgen des 12. März durch Ventilöffnung radioaktiver Dampf abgelassen, die Evakuierungszone wurde von 3 auf 10 km vergrößert. 45000 Menschen wurden evakuiert. Offenbar setzten in den Blöcken 1 bis 3 Kernschmelzen ein. Am 12. März zerstörte ein Knallgasexplosion Dach und obere Stockwerke von Reaktor 1. .Am 14. und 15. März folgten entsprechende Explosionen in Block 3 und 2, später auch in Block 4. Dort war das Abklingbecken mangels Kühlung fast leer gekocht und mindestens ein Teil der Brennstäbe lag trocken.

Es folgten verzweifelte Anstrengungen die Reaktoren 1 bis 3 und das Abklingbecken 4 extern zu kühlen. Da kein Frischwasser verfügbar war, wurde zeitweise mit Seewasser gekühlt. Schließlich wurde eine 30 km Zone evakuiert, durch Lecks in Leitungen oder Sicherheitsbehältern trat Radioaktivität aus. (Cs 137 + Jod 133). Etwa 10.000 t verseuchtes Wasser wurden ins Meer abgelassen, bzw. verklappt, die Fischerei vor der Küste ist verboten.

Durch die Kernschmelze in den Blöcken 1 – 3 und im Abklingbecken 4 müssen diese Anlagen auf Dauer geschützt und sicher ummantelt werden, ein Rückbau ist erst nach frühestens 200 Jahren möglich, bis etwa dahin müssen die Brennstäbe gekühlt werden – Die ausgetretene Menge an Radioaktivität ist erwa 10mal kleiner als die in Tschernobyl.freigesetzte Menge. Die intensive Belastung erstreckt sich als ca. 35 km langer Streifen in nördlicher Richtung. Betroffen von der partiellen Kernschmelze ist aber die etwa dreifache Menge an Brennstäben im Vergleich zu Tschernobyl..

Die vier Knallgasexplosionen ereigneten sich vor laufenden Kameras und wurden per Fernsehen in alle Welt übertragen. Die Bilder und die erbärmliche Informationspolitik der Betreiberfirma Tokyo Electric Power Company (TEPCO) führten zu einem Wandel der Akzeptanz der Kernenergie in Japan..

In Deutschland hatte die CDU-FDP-Regierung nur kurz zuvor eine Laufzeitverlängerung für deutsche KKWs durchgesetzt. Unter dem Eindruck des Fukushima-Desasters (auf die Wähler) verfügle die Bundeskanzlerin einen Betriebsstop für 8 KKws und einen Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahre 2023.

Radioaktive Abfälle

Es gibt prinzipiell zwei Wege mit "abgebrannten" Brennelementen (spent fuel) nach einer Zwischenlagerung unter ca. 10 m Wasser im **Abklingbecken** des KKW umzugehen:

1. Direkte Zwischenlagerung

Die Brennelemente werden direkt oder nach mechanischer Zerkleinerung in möglichst korrosionsfeste Behälter gefüllt und so gelagert. (In Overheads und Diagrammen als Brennelemente ohne Wiederaufarbeitung = **BROW** gekennzeichnet.)

2. Wiederaufarbeitung

Die Brennelemente werden zerkleinert, in Salpetersäure gelöst, aus der Lösung wird das Uran und das Plutonium durch Extraktion weitgehend entfernt. – Die Restlösung enthält neben den Spaltprodukten geringe Reste von Uran und Plutonium und alle übrigen Transurane (Np, Am, Cm), sie wird in ein Borosilikatglas eingeschmolzen.

:.(80% Glasmatrix + 20% rad waste) (In Overheads als high active waste = **HAW** gekennzeichnet)

Das in Stahlkokillen mit ca. 150 Liter Inhalt abgegossene Glas ist schwarz, da die als Spaltprodukte vorhandenen Metalle der Platingruppe, teils als Telluride, feinverteilt im Glas vorliegen. Es ist von Rissen durchzogen, da auf Temperung bei der Abkühlung verzichtet wurde..

Das Hüllmaterial der Brennstäbe besteht aus einer Zirkoniumlegierung und wird nicht aufgelöst, ist aber ebenfalls radioaktiv. Es bildet zusammen mit den Edelstahlteilen der Halterung verpreßt einen gesonderten, mittelaktiven Abfall. Enthält Co 60 mit ca. 6 a Halbwertszeit.
(In Overheads als **HSM** bezeichnet)

Radioaktive Edelgase und Jod werden bei der Auflösung gasförmig frei, das Jod wird mit Ag-Filtern absorbiert,
Kr 85 und das Tritium wird an die Atmosphäre, bzw. ins Abwasser abgegeben.!!
Insgesamt steigt das Volumen der Abfälle etwa um den Faktor 15 .

Die gesamte Arbeit muß per Fernbedienung hinter dicken Abschirmwänden vorgenommen werden, die Anlage ist so stark kontaminiert, daß sie kaum in absehbarer Zeit abgebaut werden kann.

Anlagen in La Hague/Frankreich, Sellafield/England, USA, Russland, China, Japan, Nordkorea, Pakistan, Indien und wahrscheinlich Israel.
In Deutschland verzichtete Ende der 80er Jahre die Atomindustrie auf den Bau dergeplanten Anlage in Wackersdorf, vorwiegend aus ökonomischen Gründen.

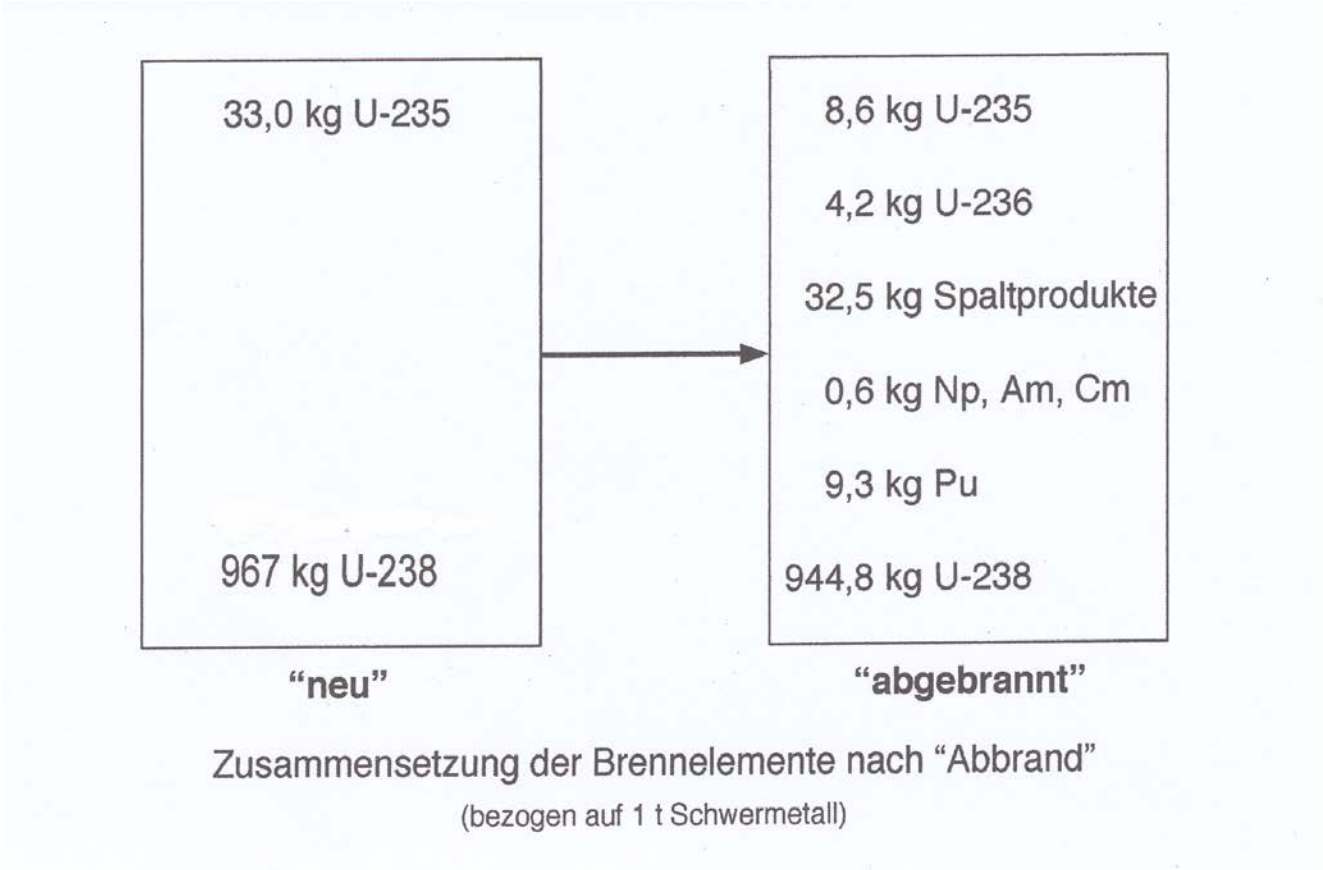
.
Das gewonnene Plutonium kann zwar theoretisch wieder zu Brennstäben für Reaktoren verarbeitet werden, dies ist aber unwirtschaftlich, entsprechende MOX-Brennelemente kosten etwa zweimal so viel wie aus Natururan gefertigte!!
Das bei der Aufarbeitung gewonnene Uran enthält noch ca. 0,8% U 235 und 0,4% U 236, eine Wiederverwendung in Leichtwasserreaktoren ist wegen der Neutronenabsorption durch U 236 aber nicht möglich.!

Das gewonnene Plutonium könnte zur Bombenproduktion verwendet werden, deshalb versuchte US-Präsident Carter in den 70er Jahren die Wiederaufarbeitung in Staaten ohne Atomwaffen zu verhindern. (Problem der Proliferation) Diese Bemühungen wurden von Präsident Reagan aufgegeben.

Sowohl BROW als HAW haben noch 10 a nach Entnahme aus dem Reaktor eine Aktivität von etwa 5 x 10^5 Ci/t, die Zerfallsenergie macht sich als Wärmeproduktion bemerkbar. (Ca. 10 Kilowatt pro Tonne) Dies muß bei der Lagerung berücksichtigt werden.

Die ungenügende Beachtung dieses Umstands führte am 28. September 1957 zu einer **Katastrophe bei Kyshtym** (Südural, in der Nähe von Tscheljabinsk). Dort waren die Lösungen aus der Wiederaufarbeitung (Nach Extraktion von U und Pu) in mit Edelstahl verkleideten Betonbehältern gelagert worden, wegen ungenügender Kontrolle versagte die Kühlung der verschlossenen Behälter, es kam zu einer "Explosion" (Im Prinzip zu vergleichen mit einem überhitzten Schnellkochtopf, bzw. einem Geysir).Nach anderen Quellen ist die Explosion zurückzuführen auf eine Explosion von Ammoniumnitrat. Danach fielen die Anlagen durch Überhitzung trocken und das bei der Neutralisation entstandene Ammoniumnitrat explodierte. - Dabei wurden ca. 2 MCi vorwiegend Cs137 und Sr 90 versprüht. - Bereits vorher waren im Eifer des Rüstungswettlaufs 1949 - 1952 mehrere MCi einfach in offenen Becken gelagert worden!
Als der russische Biochemiker Z. Medwedjew nach seiner Ausbürgerung 1976 in England darüber berichtete, wurde dies vom Vorsitzenden der Britischen Atomenergiebehörde als Quatsch bezeichnet.- Ein offizielles Eingeständnis durch das Außenministerium der Sowjetunion erfolgte erst Anfang 1990. Erst in den 90er Jahren wurde bekannt, dass bereits 1958 der US-Geheimdienst davon wusste und die US-Atomenergiekommission darüber unterrichtet hatte!

Auch im Rahmen des amerikanischen Waffenprogramms waren Lösungen in Tanks gelagert worden. Hier kam es vereinzelt zu Korrosionslecks, da die Tanks aber in Gebieten mit sehr tiefen Grundwasserspiegel standen, wurde das Grundwasser nicht kontaminiert.



Zusammensetzung der Brennelemente nach "Abbrand"

(bezogen auf 1 t Schwermetall)

Die Zusammensetzung der Brennstäbe und der Spaltprodukte hängt ab vom „Abbrand" und der Zeit seit Ende des Reaktorbetriebs! (Fast alle Spaltprodukte und alle durch Neutroneneinfang entstandenen Actinidenelemente sind radioaktiv, haben aber sehr unterschiedliche Halbwertszeiten)

Zusammensetzung der Aufarbeitungsreste (HAW), bezogen auf eine Tonne Schwermetall 7 Jahre nach Entnahme aus dem Reaktor

Element	Masse in Gramm
Uran	**1900**
Neptunium 237	**524**
Americium	**510**
Plutonium	**37**
Curium	**23**
Y,La,Ce,Nd und andere SEE	**12000**
Palladium,Rhodium,Ruthenium	**4200**
Zirkonium	**4000**
Molybdän	**3700**
Cäsium 137	**2560**
Barium	**1880**
Strontium 90	**880**
Technetium 99	**900**
Andere Elemente (Rb,Cd,Se, Ag,Sn,Sb) ca.	**640**

Die Zusammensetzung ändert sich im Laufe der weiteren Aufbewahrung durch ß-Zerfall (Siehe Tabelle auf folgender Seite) und langfristig durch den α-Zerfall der Transurane.

In den USA und in Russland werden für Spezialzwecke einige Elemente aus den Aufarbeitungsresten isoliert z.B.:

Sr 90 für Thermobatterien / Cs 137 als Gamma-Srahlungsquelle,
Curium als Wärmequelle (Raumfahrt) / Americium für Rauchmelder

Bei allen Angaben zur Radioaktivität, Wärmeproduktion, bzw. Radiotoxizität von verbrauchten Brennelementen achten Sie auf die Angabe „Pro Tonne Schwermetall“ oder „Pro Tonne spent fuel“ Die eine Angabe bezieht sich auf 1 t Uran, die andere auf 1 t UO_2. Für exakte Angaben müssten auch noch urprüngliche Anreicherung und Abbrand angegeben werden. (1 t Uran = 1,12 t Uranoxid)

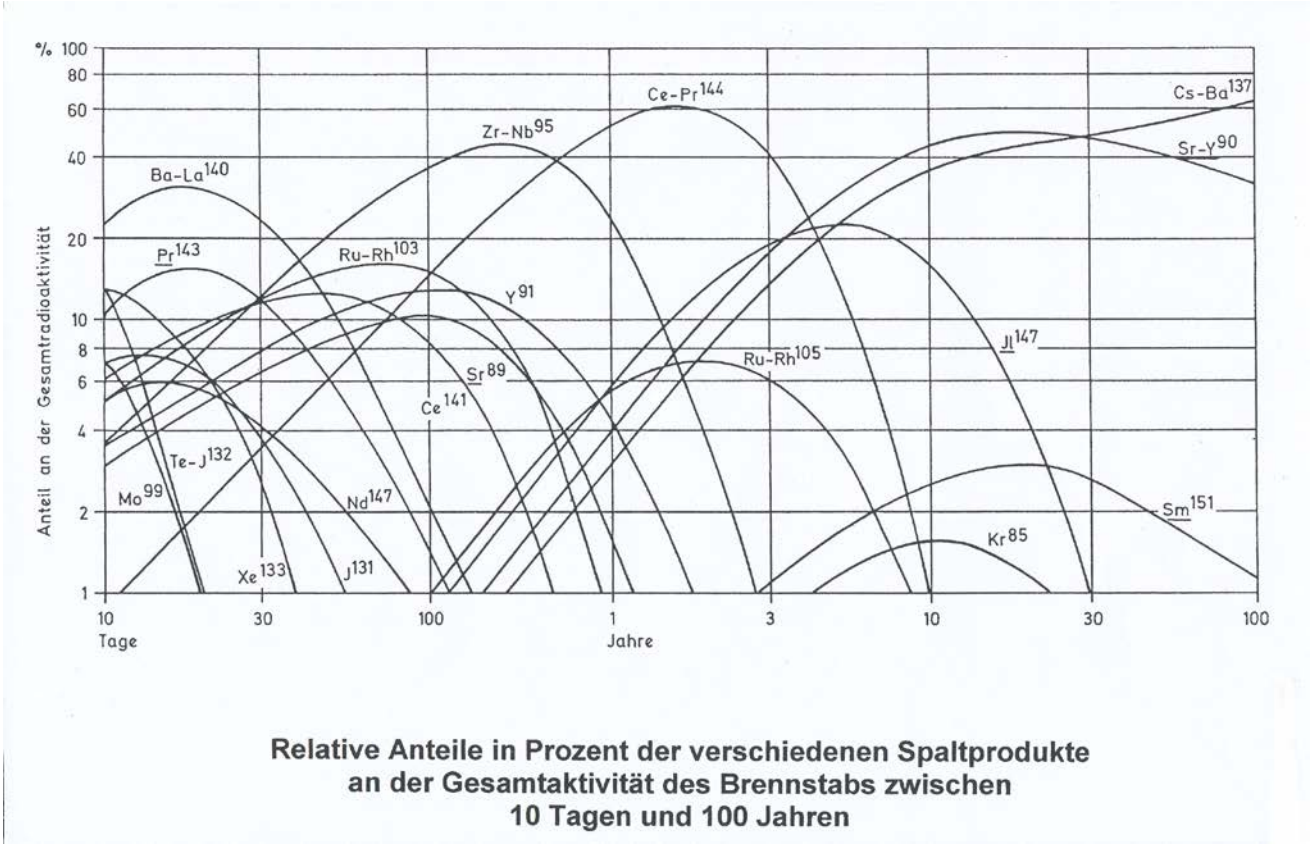
Halbwertszeiten, Spaltausbeuten, Strahlungsarten und stabile Tochternuklide der wichtigsten langlebigen Spaltprodukte aus Uran-235

Nuklid→stabile Tochter	Halbwertszeit	Spaltausbeute in %	Beta	Gamma
Kr 85 → Rb	10a	1,5	+	+
Sr 89 → Y	53d	4,8	+	-
Sr 90 → Zr	28a	5,9	+	-
Y 91 → Zr	61d	5,9	+	+
Zr 95 → Mo	65d	6,4	+	+
Nb 95 → Mo	35d	6,4	+	+
Ru 103 → Rh	40d	2,85	+	+
Ru 106 → Pd	1,0a	0,38	+	-
Te 129 → J 129*	33,5d	0,34	+	+
I 131 → Xe	8,2d	2,9	+	+
Xe 133 → Cs	5,3d	6,5	+	+
Cs 137 → Ba	29a	5,9	+	+
Ba 140 → Ce	12,3d	6,3	+	+
Ce 141 → Pr	33,1d	6	+	+
Ce 144 → Nd	282d	6,1	+	+
Pr 143 → Nd	13,7d	6,2	+	-
Nd 147 → Sm	11,3d	2,6	+	+
Pm 147 → Sm	3,7a	2,6	+	-
Sm 151 → Eu	80a	0,5	+	-

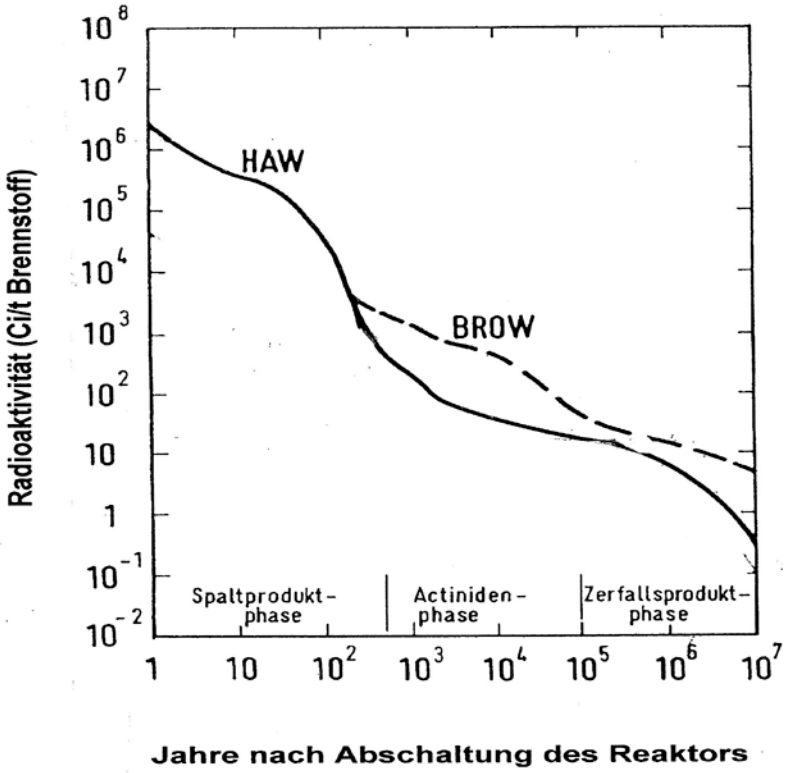
Etwa 80% der Spaltelemente haben Halbwertszeiten zwischen Stunden und 80 Jahren. Alle Elemente der oben abgebildeten Tabelle sind ß-Strahler. Die Tochternuklide sind stabile Isotope, nur die Tochternuklide J 129 und Samarium 147 sind radioaktiv. Wegen der sehr langen Halbwertszeiten von 10^7 und 10^{14} Jahren sind sie aber von geringerer Bedeutung für die Toxizität.

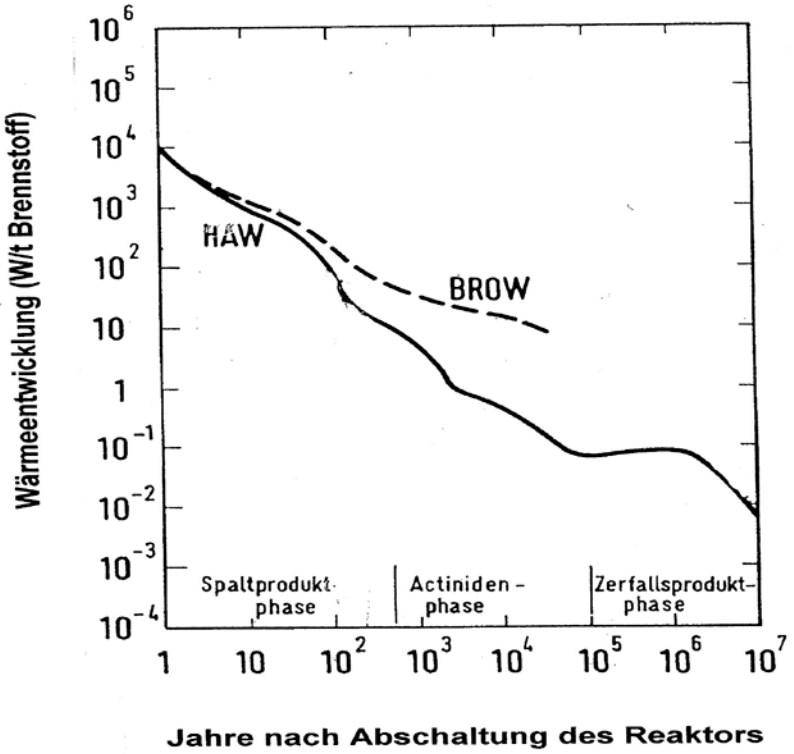
Die Anteile der Spaltelemente an der Gesamtaktivität in den ersten 10 Jahren nach Abschaltung des Reaktors zeigt die folgende Graphik.

Bitte beachten Sie die doppellogarithmische Darstellung



Relative Anteile in Prozent der verschiedenen Spaltprodukte an der Gesamtaktivität des Brennstabs zwischen 10 Tagen und 100 Jahren


Radioaktivität (Ci/t Brennstoff)
HAW
BROW
Spaltprodukt-phase
Actiniden-phase
Zerfallsprodukt-phase
Jahre nach Abschaltung des Reaktors


Wärmeentwicklung (W/t Brennstoff)
HAW
BROW
Spaltprodukt-phase
Actiniden-phase
Zerfallsprodukt-phase
Jahre nach Abschaltung des Reaktors

Aktivität und Wärmeentwicklung der Abfälle (BROW bzw. HAW) als Funktion der Zeit zeigen die beiden vorstehenden Diagramme.
Achtung: Beachten Sie die doppelt-logarithnische Darstellung!

Spaltproduktphase ca. 600 a
Actinidenphase ca. 600 bis 100.000 a
Zerfallsproduktphase über 10^5 a (Aktivität wesentlich durch Tochterelemente des Urans)

Zentrale Frage bei der Abfall-Lagerung: "Wie lange muß der Abfall vom biologischen Kreislauf ferngehalten werden?"

Um eine Tonne Brennelement zu erzeugen werden ca. 7 Tonnen Natururan gebraucht. - Es läge nahe zu verlangen, den Abfall so lange vom Biokreislauf zu separieren, bis die Aktivität auf den Wert von 7 t Natururan gesunken ist.
7 t Uran im radioaktiven Gleichgewicht mit seinen Zerfallsprodukten hat eine Aktivität von ca. 2 Ci.
Die Ergebnisse eines entsprechenden Vergleichs zeigten, daß HAW etwa nach 5 Mio Jahren diesen Wert erreichen würde, BROW nach etwa 20 Mio Jahren.

Diese nicht gerade beruhigend klingende Überlegung ist darum nie der politischen Öffentlichkeit präsentiert worden. In internen Diskussionen wurde es relativ zutreffend damit begründet, dass es nicht auf die Aktivität sondern auf die Radiotoxizität ankommt.)

In den **60er und 70er Jahren** lautete die Argumentation etwa so:

Die Spaltprodukte werden per Wiederaufarbeitung abgetrennt. Ihre Hauptaktivität entfällt auf Cs137 und Sr90 mit Halbwertszeiten von ca. 30 a. Nach 20 Halbwertszeiten, also 600 Jahren ist praktisch alles zerfallen, einige Spaltprodukte mit längeren Halbwertszeiten wie etwa Zr und Seltene Erden sind praktisch wasserunlöslich.
Das abgetrennte Plutonium und das Uran werden zu neuen Brennelementen verarbeitet.

Die Tatsache, daß im HAW bezogen auf 1 t Brennelemente immerhin noch ca. 1,1 kg Transurane und 0,9 kg Technetium 99 mit einer Halbwertszeit von 2,1 x 10^5 a .vorliegen, wurde in der breiteren Öffentlichkeit und gegenüber politischen Entscheidungsträgern nicht diskutiert Entsprechend wurde für die Lagerung in unterirdischen Deponien nur eine Sicherheit für etwa **1000 Jahre** gefordert.

Als die positive Stimmung gegenüber der Nuklearenergie in den 70er Jahren nachliess, besonders als US-Präsident Carter anregte aus Gründen der Non-Proliferation in Staaten ohne Atomwaffen auf die Wiederaufarbeitung zu verzichten, wurde eine andere Abschätzung präsentiert:

Die Internationale Strahlenschutzkommision (International commission on radioactive protection - **ICRP**) hat seit Kriegsende 1945 bis heute relativ unbeeinflußt vom Kalten Krieg gearbeitet. Sie legt Maßeinheiten für die Gefährlichkeit einzelner Radionuklide fest. Diese Maßeinheit ist der **annual limit of intake** (ALI), es ist die sehr geringe Menge des Nuklids die nach Meinung der Kommission ein Mensch im Verlauf eines Jahres noch inkorporieren kann, ohne erkennbaren gesundheitlichen Schaden zu erleiden. Für eine gegebene Menge eines Nuklids kann man eine Radiotoxizität definieren, indem man diese Menge (Den ihr entsprechenden Wert in Bequerel oder Sievert) durch den ALI-Wert des Nuklids teilt. Der Wert ist dimensionslos und gibt sozusagen die Zahl der Menschen an, an die man die Nuklidmenge in einem Jahr feinverteilt relativ gefahrlos verfüttern könnte! - Für ein Nuklidgemisch wären die Werte der Radiotoxizität einzeln für jedes Nuklid zu ermitteln, die entsprechenden Werte wären zu addieren und ergeben die gesamte Radiotoxizität.

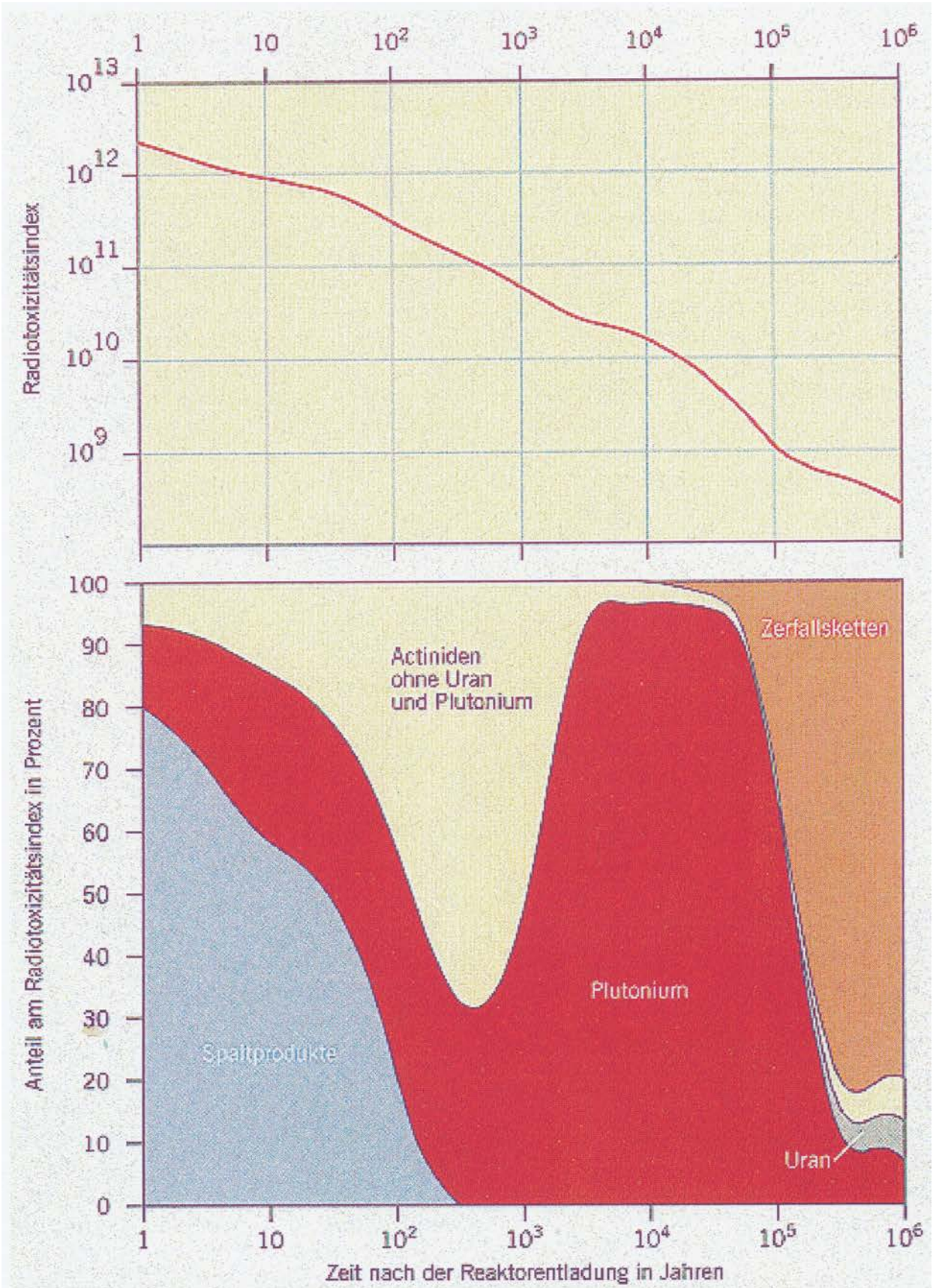
Entsprechende Berechnungen wurden Ende der 70er Jahre für HAW und BROW, sowie Natururan gemacht und verglichen. Zur Freude der Nuklearindustrie zeigte sich, daß HAW nach ca. 400 Jahren, BROW nach etwa 2000 Jahren den Radiotoxizitätsindex von Natururan erreichten.

Anfang der 80er Jahre legte die ICRP 30 jedoch etwas andere Werte aufgrund neuerer Erkenntnisse fest: U 238 und Ra 226 wurden in ihrer Giftigkeit dabei etwas geringer eingeschätzt, dagegen wurde die Giftigkeit aller Transurane, auch die des Np 237, etwas höher angesetzt.

Auf dieser Grundlage würde HAW erst nach ca. 500.000 a , BROW erst nach mehr als mehr als 1 Million a die gleiche Radiotoxizität aufweisen wie das Natururan, aus dem sie ursprünglich produziert wurden. - In neueren Publikationen werden darum derartige Vergleiche nicht mehr angestellt, in der Regel wird nur die Veränderung der Radiotoxizität mit der Zeit dargestellt.

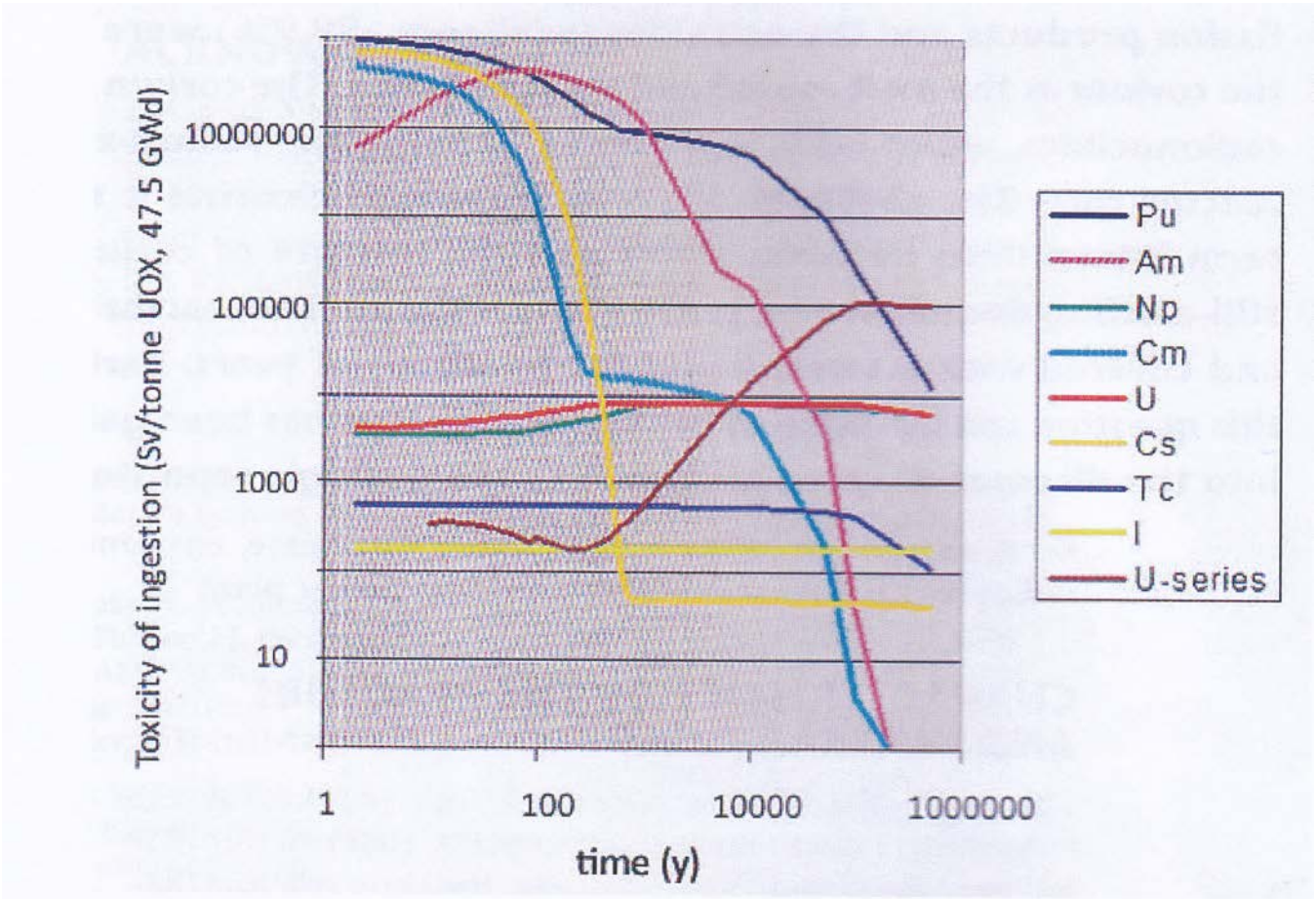
Eine konkrete Antwort ist nicht möglich, eine etwa korrekte Antwort sollte sein:
"So lange wie möglich, wenn möglich mindestens 0,5 Mio. Jahre"

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen Radiotoxizitätsangaben in Abhängigkeit von der Zeit Das erste Diagram zeigt auch die prozentalen Anreile von Spaltprodukten, Plutonium, anderen Transuranen und die sich langsam aufbauenden Tochterelemente des Urans (Radium, Polonium, Radon u.a. = Zerfallsketten).



Radiotoxizitätsindex für die Aufnahme von Radionukliden (Ingestion). Basis ist eine Tonne im Biblis-Reaktor abgebrannter Brennstoff mit einer Anfangsanreicherung an Uran-235 von vier Prozent und einem Abbrand von 50 Gigawatt-Tagen je Tonne Schwermetall. Änderung des Radiotoxizitätsindexes mit der Zeit (oben) und prozentualer Beitrag der verschiedenen Radionuklide (unten).

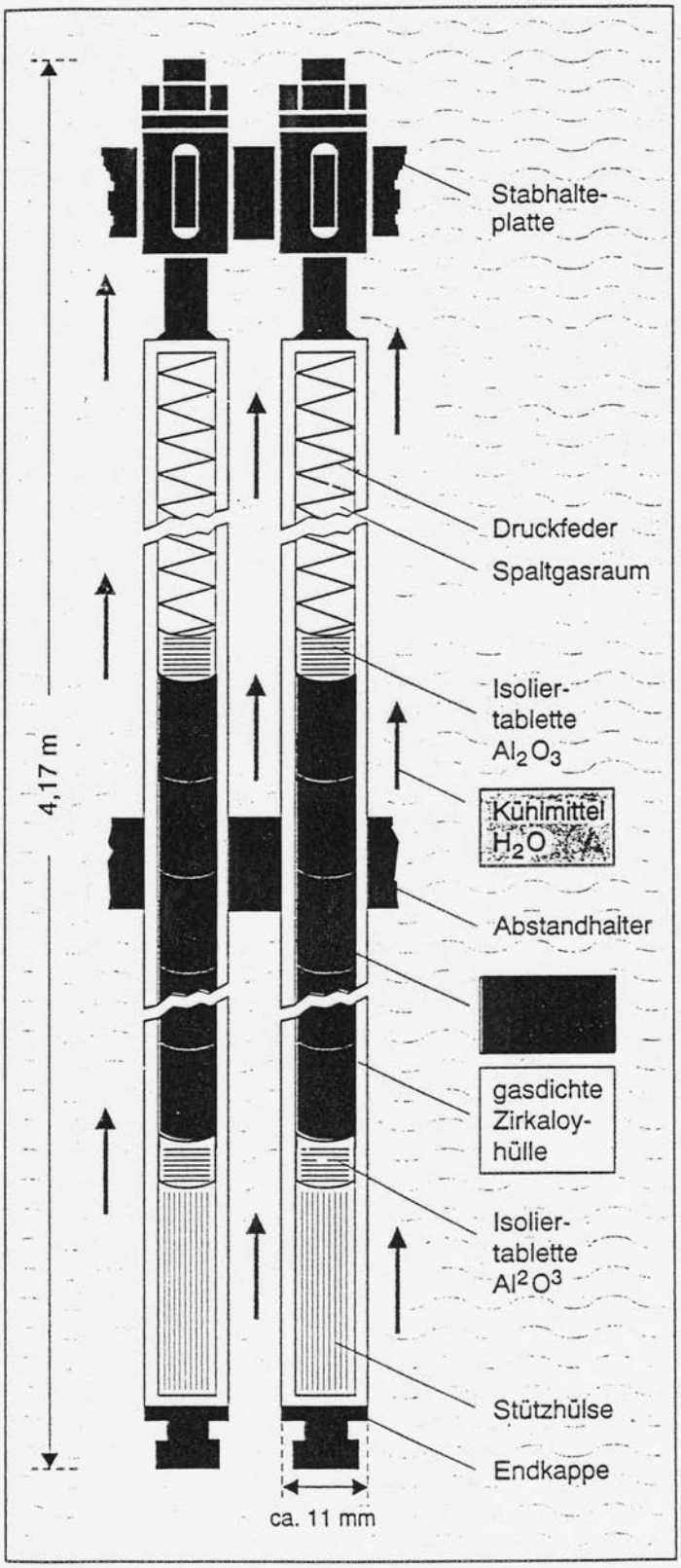
Das zweite Diagram zeigr die Toxizität in Sievert einiger besonders toxischer Spaltelemente,.der Transurane und des Urans (plus Tochterelemente) in Abhängigkeit von der Zeit. Gut zu erkennen ist der starke Abfall der Werte für Cs 137 und die kurzlebigen Cm-Isotope 243 +244. zwischen 100 und 200 Jahren Lagerzeit.
(Zum Verhleich mit dem ersten Diagram müssten die Sievert-Werte mit 1000 multipliziert werden..)



Radiotoxizität in Sievert pro Tonne spent fuel
Zeitlicher Verlauf für die wichtigsten Elemente

Geometrie der radioaktiven Abfälle

Im Betrieb des Reaktors muss die entwickelte Wärme möglichst schnell abgeführt werden. Das an U 235 angereicherte UO_2 liegt daher in Form von Brennstäben vor: Länge über 4 m, Durchmesser 11 mm – siehe folgende Abbildung



Schnitt durch Brennstäbe eines Kernreaktors. In den UO_2-Tabletten finden die Kernspaltungen statt. Zirkaloy: Legierung aus den Hauptbestandteilen Zirkon und Zinn

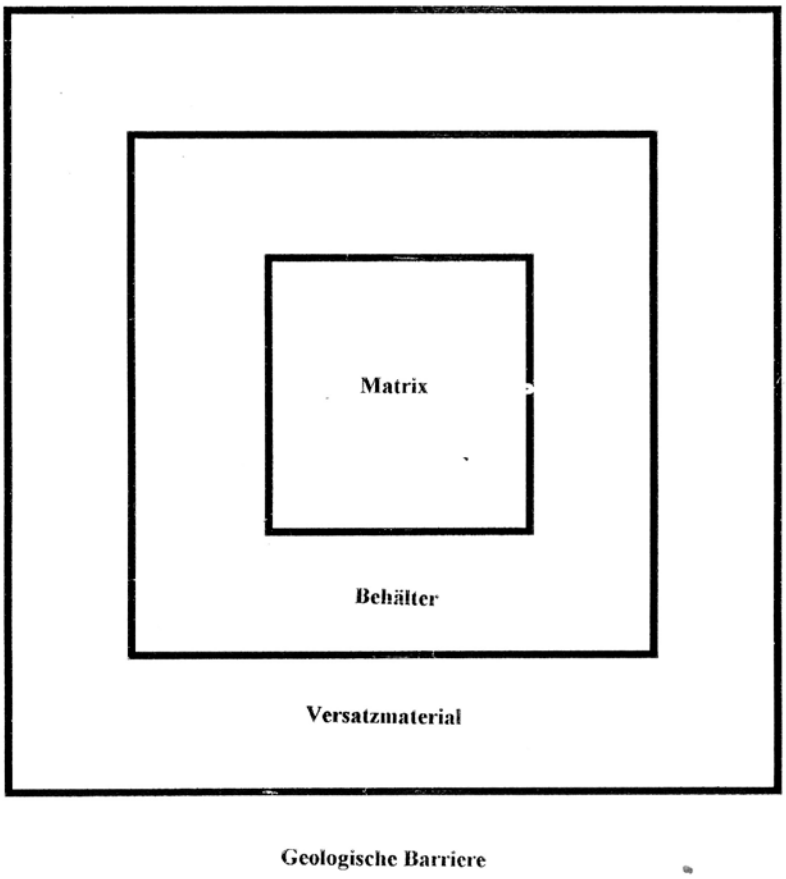
Die Hülle besteht aus einer Zr-Legierung (mit ca. 2% Sn oder Nb) mit einer Wandstärke von etwa 0,7 mm. Zirkalloy ist bei Temperaturen von 800 bis

1000°C extrem duktil und lässt sich daher gut zu Röhren verarbeiten. Es ist bis ca. 700°C beständig gegen Wasser. In jeder Röhre liegt ein Stapel von UO_2-Tabletten von etwa 3,2 m Höhe, das ist ein Volumen von ca. 240 Kubikzentimeter mit einem Gewicht von etwa 2,48 kg. –
Da ein Siede- bzw. Druckwasser-Reaktor eine Beladung von etwa 150 t UO_2 braucht, müssen etwa 60.000 Stäbe eingesetzt werden. Z. B. werden (9x8) 72 Stäbe zu einem rechteckigen Bündel zusammengefasst, 840 solcher Bündel hängen dann im Reaktordruckgefäß.
Das hohe Verhältnis Oberfläche pro Volumen ist optimal im Reaktorbetrieb,:(4 cm^2 pro cm^3) , aber extrem ungünstig für die Endlagerung.

Etwa 40 % des bis 2923 in Deutschland wahrscheinlich anfallenden spent fuel sind bereits in Wiederaufarbeitungsanlagen in La Hague, bzw. Sellafield zu HAW-Kokillen verarbeitet worden.. Eine HAW-Kokille aus Edelstahl hat einen Durchmesser von ca. 20 cm und eine Länge von ca. 1,5 m. Sie enthält ein Borosilikatglas (ca. 400 kg) mit 20% Spaltprodukten. In einer HAW-Kokille sind enthalten die Spaltprodukte und minoren Actiniden (Np, Am, Cu und geringe Reste von Pu) von etwa 2 Tonnen spent fuel.. Das Verhältnis Oberfläche zu Volumen ist etwa 20mal kleiner als beim spent fuel.

Theorie und Praxis der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

Unter Wissenschaftlern die sich mit dem Problem der Lagerung hochradioaktiver Abfälle beschäftigen herrscht eigentlich Einigkeit, dass eine Endlagerung nur akzeptabel ist durch ein Mehrbarrierensystem. Nur so kann eine sichere Abschottung von der Biosphäre für mindestens 500.000 Jahre erreicht werden. Siehe folgende Abbildung (Schematische Darstellung)



.

Matrixbarriere = Einschluss aller Elemente in ein möglichst korrosionsbeständiges Glas oder in ein oder mehrere korrosionsbeständige Kristallgitter.

Container = Druckfester und möglichst korrosionsbeständiger Metallbehälter.

Versatz (back fill) = Stoffe die Wasser binden (MgO) oder diffundierende radioaktive Ionen immobilisieren oder ihre Ausbreitung verzögern (Tone, Bentonit, Hydroxylapatit) , bzw. für ein neutralen pH-Wert sorgen und so die Korrosion des Containers verhindern oder verzögern.(MgO, Apatit) – So reagiert etwa MgO mit Wasser zu $Mg(OH)_2$, dabei tritt eine Vergrößerung des Feststoffvolumens auf mehr als das Doppelte ein (215%).

Geologische Barriere = Einlagerung in ein Gesteinsformation bei der ein Kontakt mit Grund- oder Oberflächenwasser in den nächste 0,5 Millionen Jahren mit einiger Sicherheit nicht zu erwarten ist.

Es herrscht auch Einigkeit darüber, dass von diesen Barrieren die Geologische Barriere die wichtigste ist. Praktisch hat dies aber in einigen Fällen dazu geführt, das man aus ökonomischen Gründen auf einige oder alle anderen Barrieren verzichtet hat. In Deutschland gilt das insbesondere für die geplante direkte Endlagerung von spent fuel..

Abgebrannte Brennelemente (spent fuel) sind bei Zutritt von Wasser geradezu das Gegenteil einer Matrixbarriere. Durch die enorme Radioaktivität bildet sich u. a. H_2O_2 (Wasserstoffsuperoxid.), das mit UO_2 zu $UO_2(OH)_2$ reagiert. – die massive Uranoxidtablette zerrieselt zu einem gelben Pulver mit extrem hoher Oberfläche. Bei Anwesenheit von Luft im Container kann sich aus dem Stickstoff sogar Salpetersäure bilden. – Überdies tritt ein Teil des Uranylhydroxids in kolloidaler Form auf. Solche Kolloide werden selbst durch sehr verdünnte $Ca(HCO_3)_2$-Lösungen gelöst, d.h. es löst sich sogar in Mineralwasser auf!

Bei der Suche nach geeigneten Metallen für den Container kommen aus Kostengründen nicht in Betracht extrem beständige, aber auch extrem teure Metalle wie etwa Tantal.und Edelmetalle - In einem Bericht des Batelle Memorial Instituts für das U.S. Department of Energy zu Waste Package Materials von Oktober 1981 findet sich aber auch der Satz:
„*Some alloys were eliminated from future considerations based on economics alone; e.g., zircaloy."*
Eben diese Legierung wird ja für die Brennelemente als Hüllrohr (cladding) verwendet, allerdings ist das Zirkonium vorher vom stets .vorhandenem Hafnium chemisch getrennt worden, da Hafnium einen hohen Einfangquerschnitt für Neutronen hat. Für die Endlagerung könnte man auf diesen teuren Schritt verzichten, der Neutroneneinfang durch Hf wäre hier sogar von Vorteil.
Die bisherigen Endlagerpläne in Deutschland sehen als Container dicke Stahlbehälter vor die keine Neigung zur Lochfraßkorrosion zeigen (pit corrosion) .
Durch die große Masse an Eisen soll zugleich ein reduzierendes Milieu gesichert werden. Theoretisch sollte daher das UO_2 nicht oxydieren solange noch Fe vorhanden ist, - Allerdings hat Eisen als Containermaterial einen Nachteil: Das thermodynamische Gleichgewicht der Reaktion $Fe + H_2O = FeO + H_2$ liegt bei Ausschluss von Sauerstoff bei pH-Werten kleiner als etwa 5 auf der rechten Seite der Gleichung. Bei Wasserzutritt zum Behälter muss also mindestens langfristig mit einer Wasserstoffentwicklung gerechnet werden.

Als Spaltproduktphase wird international allgemein 600 Jahre genannt. Nach dieser Zeit sind Cs 137 und Sr 90 zu 99,99% und Sm 141 zu 99,0 % zu nicht radioaktiven Elementen zerfallen. Die restlichen noch aktiven Spaltprodukte wie Zr 91 ($1{,}5 \times 10^6$a) , Tc 99 ($2{,}1 \times 10^5$ a) und J 129 ($1{,}6 \times 10^7$ a) haben sehr lange Halbwertszeiten, Zr ist zudem extrem unlöslich im neutralen Milieu.- Aus den Diagrammen auf den Seiten 36 bis 37 ist aber zu entnehmen, dass sowohl in Bezug auf Aktivität, als auch auf Wärmeentwicklung und Radiotoxizität die Spaltprodukte (wesentlich Cs 137 und Sr 90) **schon nach etwa 200 a** kaum noch eine Rolle spielen. Cs137 .und Sr 90 sind dann bereits zu 99,0% zerfallen.

Besondere Schwierigkeiten macht bei einer Tieflagerung die **Wärmeentwicklung**, sie nimmt in den ersten 500 a nach Entnahme aus dem

Reaktor um ca. drei Zehnerpotenzen ab. Auch einige mittelaktive Abfälle, wie etwa konditionierte Hüll- u. Strukturmaterialien (HSM), entwickeln Wärme und müssen für mindestens 10 Jahre zwischengelagert werden. Für HAW und BROW muss vor einer Tieflagerung **mindestens eine Zwischenlagerung von 30 a** vorgesehen werden!

Bei einer Tieflagerung in Salzstöcken würde dann mit einer **Erhitzung der Behälter auf ca. 180 - 200° C im verschlossenen Tieflager** zu rechnen sein! Bei einer Lagerung in anderen Gesteinen mit geringrer Wärmeleitfähigkeit als Salz könnten noch höhere Temperaturen erreicht werden. - Berechnet je Tonne Brennstoff produziert HAW noch nach 100 a Zwischenlagerung 100 Watt, BROW je nach Abbrand 200 Watt und mehr.

Wärmeentwicklung von HAW und BROW je t spent fuel in Watt

	10 a	35 a	100 a	200 a
HAW	**1000**	**900**	**100**	**40**
BROW	**1200**	**1000**	**200**	**120**

In Deutschland steht seit Mitte der 90er Jahre fest, dass der Hauptteil der Endlagerung als "Brennelemente ohne Wiederaufarbeitung" (BROW) erfolgen soll. (Die Erlaubnis zur Wiederaufarbeitung lief Anfang 2005 aus!) Als Lagerbehälter sind hierfür bislang der "Castor", bzw. "Pollux" vorgesehen.

Da aber in einzelnen KKWs die Abklingbecken relativ voll waren, hatte man daneben noch Verträge mit der Cogema in La Hague in Frankreich , bzw. der englischen Wiederaufarbeitungsanlage in Sellafield abgeschlossen. Die Abfälle in Form von HAW-Kokillen, Plutonium und Uran sind dort zwischengelagert, es besteht eine rechliche Verpflichtung sie zurückzunehmen, die inzwischen praktiziert wird! Bis 1998 wurden 4.500 t nach La Hague geliefert, pro Jahr wurden bis 2005 ca. 200 HAW-Kokillen für deutsche EVUs produziert. –Insgesamt sind ca. 6.900 t Brennstabtabletten in Wiederaufarbeitungsanlagen zu HAW verarbeitet worden. Die Zahl der HAW-Kokillen liegt bei etwa 3.860 Stück.

Es besteht also die Notwendigkeit in Deutschland Kapazitäten für die Zwischen- und Endlagerung von sowohl BROW als auch HAW zu schaffen. Außerdem ist für eine hinreichend sichere Zwischen- und Endlagerung von HMS,(Zirkalloy-Hüllrohre + Edelstahl, aktiviert durch Neutronenstrahlung) mittelaktiven Abfällen (10^3 bis 10^4 Ci/m^3) und niedrigaktiven Abfällen, (weniger als 10^3 Ci/m^3) teils aus medizinischen Anwendungen zu sorgen. Zwischenlager gibt es in Ahaus, Gorleben.und Lubmin (Greifswald)

In Deutschland unterscheidet man wesentlich zwei Kategorien von radioaktiven Abfällen
Wärmeentwickelnde Abfälle bei denen pro Gebinde mehr als ein Kilowatt entwickelt wird. und
Abfälle mit geringerer Wärmeentwicklung. Letztere sollen im Bergwerk Konrad gelagert werden

In Frankreich und England werden verbrauchte Brennstäbe zu HAW, eingeschmolzen in Borosikatglas, sowie Plutonium und Uran aufgearbeitet; ebenso in Belgien, Japan, Schweiz.- Russland verwendet ein Phosphat-Glas.

Auf direkte Endlagerung (BROW) setzen die Länder USA (Zivilprogramm), Finnland, Kanada, Schweden und Spanien.

Bisherige Planung für den Umgang mit verbrauchten Brennelementen in Deutschland

Erste Phase : Abklingbecken
Warten bis die extreme Radioaktivität (2 x 10^6 Ci/t) etwas abgeklungen ist. Mindestens 2 a, besser 10 bis 20 a !!

Zweite Phase: Oberirdische Zwischenlagerung (Castor)
Lagerung in luftgekühlten Behältern. (Lagerraum sollte vor Terroranschlägen und Flugzeugabsturz gesichert werden.) Zeitraum zusammen mit erster Phase mindestens **30 Jahre**.

Dritte Phase: Tieflagerung in geologischen Formationen
(Erschlossen im Bergbau oder in Bohrlöchern)

Folgerung: Zeitraum zwischen Abschaltung des letzten KKWs in Deutschland und Tieflagerung des letzten Brennelements beträgt mindestens 35 Jahre!

Der Begriff "Endlagerung" wird im Englischen nicht benutzt, der verharmlosende Ausdruck "Entsorgung" läßt sich nicht übersetzen ohne albern zu wirken!

Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000

(www.kernenergie.de/kernenergie/documentpool/Themen/Vereinbarung 14-06**.pdf.)**

Kernpunkte:
Förderungswürdigkeit entfällt, d.h. Bund+Länder zahlen nicht mehr 50% der Forschung auf dem Gebiet der Kerntechnik. Weitere Forschung ist frei, aber zu 100% durch EVU zu bezahlen.

Die EVU verzichten auf die Inbetriebnahme des KKW Mülheim-Kärlich und verzichten auf entsprechende Schadensersatzansprüche gegenüber Bund und Ländern.

Auf den Neubau von KKWs wird verzichtet.

Unter der Annahme einer Regellaufzeit von 32 Betriebsjahren wird pro Reaktor eine Elektrizitätsmenge von ca. 169 TWh/a zugrundegelegt. Aus den sich ergebenen Restlaufzeiten ergibt sich eine noch zugestandene zu produzierende Restmenge an 2516 Terra-Wattstunden.
Elektrizitätsmengen können von einem älteren KKW zu einem neueren KKW übertragen werden; der umgekehrte Fall ist nur mit Zustimmung der Bundesregierung möglich.

In Bezug auf die Lagerung der Abfälle wird erstmals die Möglichkeit einer **Rückholbaren Lagerung erwähnt!**

Vorschläge für Matrixbarrieren

Ende der 70er Jahre wurden **Matrixbarrieren**, also ein **Einschluß in Kristallgittern**, für Wiederaufarbeitungsabfälle vorgeschlagen. Dabei handelt es sich um synthetische Gesteine, die durch Zusatz von Aluminiumoxid, Siliziumoxid, bzw. Calciumoxid oder Bariumoxid + Titandioxid zu den Abfällen und abschliessendes Heißpressen oder Sintern bei Temperaturen zwischen 1150° bis 1350°C hergestellt werden. Diese Vorschläge wurden vor allem von dem australischen Petrologen Ringwood gemacht und an nicht aktiven Proben experimentell untersucht. Es zeigte sich, dass auch Uran, Cäsium und Ruthenium fester gebunden sind als im HAW-Glas. (Synroc, super calcine ceramic) - Versuche mit Technetium und Transuranen wurden nicht gemacht, da die Nuklearindustrie kein Interesse zeigte. Der Grund hierfür dürfte vor allem materieller Art gewesen sein; dieses Verfahren hätte die Kosten der Wiederaufarbeitung mindestens verdoppelt! – Immerhin ist auch die Verglasung von HAW ist eine Matrixbarriere.

Anfang der 80er Jahre wurde in Cargill/Kanada eine Lagerstätte untersucht, die neben etwa 0,1% U auch gewinnträchtige Anteile an Niob, Seltenen Erden und Phosphat aufwies. Das Erz war zwar in konzentrierten Säuren löslich, beim Verdünnen mit Wasser bildete sich aber sofort wieder ein unlöslicher Rückstand, der praktisch die gleiche Zusammensetzung hatte wie das primäre Erz. Es handelte sich um ein Erdalkalie-Seltenerd-Aluminium-Hydroxid-Phosphat (Crandallit-Gruppe).

Auf Anregung von Ballhorn (damals Metallgesellschaft/Frankfurt) untersuchten Schwab & Herold an der Uni Erlagen-Nürnberg diese Mischkristallgruppe. Sie stellten fest, daß im Kristallgitter praktisch alle mehrwertigen Kationen eingebaut werden und bei pH-Werten von 2 und höher fest gebunden bleiben.

Falls statt Phosphat-Ionen Arsenat-Ionen eingebaut werden, ist der Kristall selbst in konzentrierten Säuren unlöslich! - Anfang der 90er Jahre wurde dieses Verfahren radioaktive Stoffe (bzw. Schwermetalle überhaupt) so zu immobilisieren patentiert. (Ballhorn, Brunner & Schwab.) Allerdings lassen sich nach diesem Verfahren Cäsium und andere Alkalimetalle nicht immobilisieren.

In Belgien wurde ein Verfahren getestet bei dem die Rückstände der Aufarbeitung in ein $NaPO_3$-Glas eingeschmolzen.wurden. (Schmelzpunkt bei ca. 1000°C, also etwa 250°C niedriger als Borosilikatglas) Die Glaspellets wurden in Edelstahlröhren mit Blei vergossen. **PAMELA-Verfahren**. Da die Phosphate aller Schwermetalle im neutralen Milieu schwerlöslich sind, wäre das bei Wasserzutritt ein sehr guter Schutz vor Migration! Phosphatgläser werden auch in Russland eingesetzt.

Immobilisierung im Versatz (backfill)

Anfang der 90er Jahre zeigten Ballhorn & Franke, daß Hydroxylapatit sowohl bei Normaltemperatur als auch bei erhöhten Temperaturen Schwermetalle, Uran, Seltene Erden und Strontium in wasserunlösliche, kristallisierte Verbindungen überführt (Phosphate). Dies führte zu dem Vorschlag in Endlagern Hydroxylapatit als Zusatz zum Versatzmaterial einzubringen; dadurch sollten beim Zutritt von Wasser zu tiefgelagerten Brennelementen ohne Wiederaufarbeitung (BROW) eventuell gelöste Radionuklide wieder ausgefällt werden.
Ein entsprechendes Scenario wurde an der FU Berlin (Abt. Radiochemie, Arbeitsgruppe Prof. Marx) experimentell untersucht. (BMFT-Projekt) Es zeigte sich, dass Uran,Np und teilweise Pu in konzentrierten Salzlösungen auch bei Temperaturen bis zu 200°C immobilisiert werden. In die gebildeten Uranyl-Phosphat-Schichtminerale, die sogenannten Uranglimmer, wird auch Cäsium eingebaut.
Die französische Nuklearindustrie ließ sich inzwischen ein Verfahren zur Aktivierung von Naturapatit für diesen Zweck patentieren.

Eine Immobilisierung von Radionukliden im Störfall in Versatzmaterialien war schon in den 70er Jahren von den Sands Laboratories/ Albuquerque in New Mexico, USA vorgeschlagen worden, bislang sind aber in den USA nur Sorptionen durch Schichtsilikate wie etwa Bentonit untersucht, bzw. in Erwägung gezogen worden.

Laugungsbeständigkeit von. BROW und HAW

Bei **BROW (spent fuel)** liegt als Matrix ein polykristallines UO_2 (Uraninit) mit Korngrößen von 10 - 20 μm vor. Die Spaltprodukte und Actiniden machen etwa 4,2 - 5.0 % der Masse aus, sie sind angereichert auf den Korngrenzen, insbesondere im Randbereich der Brennstofftabletten. (Randeffekt 3 - 5 mm)

Bei Wasserzutritt werden Cs, Jod und Spaltgase (Krypton, Tritium) in erheblichem Umfang mobilisiert.

Die übrige UO_2-Matrix ist bei reduzierendem Milieu beständig. - Leider kann von einem reduzierenden Milieu aber keine Rede sein, die **α-Strahlung bedingt eine intensive Radiolyse des Wassers, dabei wird sowohl Sauerstoff + Wasserstoff, als auch Wasserstoffsuperoxid gebildet. Diese Gasentwicklung ist extrem störend bei einer Tieflagerung.** Nur die Radiolyse bestimmt die Auflösungs-geschwindigkeit, es besteht keine Temperaturabhängigkeit.
Die Radiolyse + Wasser verwandelt das UO_2 in $UO_2(OH)_2$, also einen gelben Schlamm der bei Anwesenheit von viel Wasser zur Bildung kolloidaler Lösungen neigt..Viele Spaltprodukte sind auch unter diesen Umständen extrem schwerlöslich, leider aber nicht Cs und das Neptunium.
Np bildet in fünfwertigem Zustand NpO_2^+-Ionen, dieses einwertige Ion bildet mit fast allen Anionen leichtlösliche Komplexe!

Bei Zutritt von trockenem Sauerstoff zum spent fuel tritt ab 200°C langsam, bei 400°C sehr schnell eine Oxidation des UO_2 zu U_3O_8 ein; dabei zerrieseln die gepreßten Tabletten und viele Spaltprodukte liegen dann als feinverteilte Oxide vor und könnten durch Lösungen leicht mobilisiert werden. (Sogenannte **Voloxidation**)

HAW-Gläser (Borosilikatgläser) haben bis etwa 60°C eine gute Laugungsbeständigkeit..Pro Jahr wird im Kontakt zu Wasser etwa eine Schicht von 1-3 µm Dicke hydrolysiert. Es ist damit zu rechnen, daß dabei fast das gesamte Cäsium und Neptunium dieser hydrolysierten Menge in Lösung übergeführt werden, der Hauptteil der anderen Radionuklide bildet neue schwerlösliche Verbindungen. - Bei 100°C erfolgt die Zersetzung wesentlich schneller.(Ca. 10µm/a); bei Temperaturen von 120 -180°C nimmt die Laugungsgeschwindigkeit allerdings rapide zu Die Radiolyse durch α-Strahlen ist geringer.als bei BROW.(HAW enthält nur wenig Plutonium, ausserdem ist das Verhältnis Oberfläche zu Masse sehr viel kleiner.)

Wo soll der radioaktive Abfall endgültig gelagert werden?

Bis in die 80er Jahre wurde eine Deponie in Tiefsee-Sedimenten, bzw. im antarktischen Eisschild in Erwägung gezogen. Diese Überlegungen sind inzwischen durch internationale Verträge obsolet geworden. Die Lagerung in Tiefseesedimenten wird trotzdem von US-Wissenschaftlern weiter propagiert!

In den 60er Jahren schlug ein Mitglied der Sowjetischen Akademie der Wiss. vor, hochaktiven Abfall per Rakete in die Sonne zu schießen. Dies wäre zwar eine echte "Entsorgung", leider aber im Fall eines Fehlstarts extrem gefährlich und zudem recht teuer.- (Zur Zeit liegen die "Transportkosten" in der Größenordnung von 25 Mio US-Dollar pro Tonne Fracht!)- Bei einer Weiterentwicklung der Raumfahrttechnologie könnte möglicherweise dieser

"Entsorgungspfad" aber in etwa 100 bis 200 Jahren für die Beseitigung der bis dahin anfallenden Mengen vonTransuran-Elementen in Betracht kommen.

Eine internationale Einigung über die Deponie radioaktiver Abfälle ist derzeit und sicher auch für die nächsten Jahrzehnte nicht in Sicht. Die Gründe hierfür sind nicht technisch bedingt, sondern ausschliesslich politisch! - Deshalb ist auch die Nutzung einer geomorphologischen Barriere nie in Erwägung gezogen worden. (Geomorphologische Barriere : Lagerung oder Tieflagerung in hochariden Inlandsdepressionen)

Es muß davon ausgegangen werden, dass jedes Kernenergie nutzende Land seine Abfälle auf dem eigenen Territorium tieflagert (Nach einer Zwischenlagerung mit kontrollierter Kühlung.zwischen 30 und 200 Jahren.) Entsprechend den jeweilig vorhandenen geologischen Formationen sind deshalb die Möglichkeiten beschränkt.

In Betracht gezogen wurden bislang international folgende Gesteinstypen: Granit, Schiefer, Tone, Tuffe, Quarz-arme, bzw. Quarz-freie Plutonite (Diorit, Gabbro, Syenit), Basalt, Anhydrit und Steinsalz. (Diskussion der Vor- und Nachteile in der Lehrveranstaltung)

Es herrscht ausserdem im internationalen Rahmen keine Einigkeit, ob die Abfälle in Bohrungen oder Bergwerken endgültig tiefgelagert werden sollen, oder ob eine
"**Rückholbare Lagerung**" (**Monitored Retrievable Storage**)
in Erwägung gezogen werden soll. Dabei wird argumentiert, daß beim weiteren Fortschritt von Forschung und Technik eventuell nach mehreren Generationen neue, bislang nicht absehbare, technische Möglichkeiten zur Verfügung stehen könnten. (USA)
- **In Deutschland werden zur Zeit solche Überlegungen derzeit nicht mal diskutiert, da dann eine Lagerung in Salzstöcken ausgeschlossen wäre**.

In Deutschland muß davon ausgegangen werden, daß bis 2023 etwa folgende Abfallmengen für eine Tieflagerung vorhanden sind::

Etwa 280.000 Kubikmeter ohne Wärmeentwicklung
(HSM nach Zwischenlagerung, Neutronenaktivierter Stahl aus KKW-Rückbau, Niedrigaktiver Abfall + Abfälle aus der Medizin)- Lagerung in Grube Konrad.

Etwa 24.500 Kubikmeter mit Wärmeentwicklung. - (Wesentlich HAW-Kokillen + BROW)
Kernenergienutzer und fast alle Parteien sind offenbar wild entschlossen so schnell wie möglich, trotz svhwerwiegender Einwände, für diese Abfälle eine Tieflagerung in Bergwerken durchzusetzen. Allerdings ist die Motivation hierfür durchaus unterschiedlich.

Castor und Pollux

Seit 1977 wurden in Deutschland von der GNS (Gesellschaft für Nuklearservice, einer 100% Tochter der EVUs, inzwischen umbenannt in GNB Gesellschaft für Nuklear-Behälter) eine Reihe von Transportbehältern entwickelt. Entsprechend der engl. Bezeichnung "Cask for storage" werden sie Castor genannt.
Es gibt nicht einen Castor, sondern insgesamt etwa acht Typen, angepaßt an den jeweiligen Verwendungszweck. Die meisten Typen sind etwa knapp 6 m lang, haben Wandstärken von 40 bis 50 cm und Durchmesser zwischen 2,5 und 1,9 m. Sie bestehen aus Stahlguß und haben zwei übereinander liegende aufgeschraubte Verschlußdeckel mit Metall + Elastomer-Dichtungen. Durch ein aufgepreßtes Gaspolster zwischen beiden Verschlüssen läßt sich die Dichtigkeit kontrollieren.- Die Behälter haben außen Kühlrippen. Das Gewicht der befüllten Behälter liegt zwischen etwa 60 und 120 Tonnen.

Eine Tonne BROW emmitiert etwa 10^9 Neutronen pro Sekunde, die durch den Stahl kaum gebremst werden, es muß daher durch zusätzliche Maßnahmen der Neutronenfluß absorbiert werden! (Die Neutronen entstehen durch Spontanspaltung von Transuranen und durch α,n - Reaktionen)
Bei Castorbehältern werden daher in einem aufwendigen Verfahren im Mantel Bohrungen über die volle Länge eingebracht, in diese Bohrungen werden Polypropylenstäbe zur Neutronenabsorption eingesetzt. - Der dichte Verschluß und die gewählte Form der Neutronenabschirmung sind extrem teuer und aufwendig. Der Preis für Castor-Behälter wird je nach Typ auf 0,2 bis zu 0,6 Millionen € geschätzt.

Trotz des hohen Preises werden Castorbehälter aus deutscher Produktion auch in anderen Ländern genutzt, zum Beispiel in Russland.

Der experimentelle Nachweis der Sicherheit bei Brand, Sturz usw. wurde seinerzeit nur bei den ersten Castor-Versionen erbracht, inzwischen wurde aber das Herstellungsverfahren wesentlich verändert, auch die Abmessungen wurden teils verändert. Dies ist aber eine rein juristische Frage, es kann davon ausgegangen werden, dass alle Castorbehälter völlig hinreichende Brand und Sturz-Sicherheit aufweisen.

Diese Behälter werden unter Wasser im Abklingbecken der KKWs beladen und nach Verdampfung des Wassers durch die Wärme produzierenden Brennstäbe verschlossen. Es schließt sich eine Aussenreinigung an, da im Wasser des Abklingbeckens geringe Mengen von Kobalt 60 als Feinpartikel und Cs 137 als gelöstes Ion vorliegen. Nach den Bestimmungen der Internationalen Atomenergie Kommission darf die Aktivität der Behälteroberfläche 4 Bq./ Quadratzentimer im Mittel nicht überschreiten.

1998 gab es einen Skandal in diesem Zusammenhang. Jahrelang waren bei Transporten von deutschen KKWs entsprechende Transportbehälter französischer und englischer Firmen (Keine Castor-Behälter!) wegen ihrer rauhen Oberfläche mit erheblich höherer Kontamination auf die Reise nach La Hague, bzw. Sellafield geschickt worden. Die KKWs hatten dies gegenüber den Behörden nicht gemeldet. Die Kontaminationen stellten zwar keine Gefahr für das Transport- und Begleitpersonal dar, der Skandal lag vielmehr darin, daß die KKW-Betreiber jahrelang Verstöße gegen gesetzliche und international verbindliche Regeln systematisch vor den Behörden und der Öffentlichkeit verheimlicht hatten!

HAW liegt in Glaskokillen mit 150 cm Länge vor, Gewicht ca. 400 kg.
Je etwa 20 bis 28 Kokillen werden in einem Castor-behälter
im Zwischenlager Gorleben oder Ahaus gelagert ..

BROW : Je etwa 4 bis 5, bzw. bis 21 Brennelemente mit je
72 Zirkalloy - Stäben in einem Castor-Behälter Gewicht 67 bis zu 120 t

Zwischenlagerung in Deutschland (Stand 2008)
Zwischenlager für HAW und BROW bestehen in Deutschland in Gorleben und in Ahaus in Nordrheinwestfalen; in Greifswald (Lubmin) ein Zwischenlager in dem Abfälle aus den abgeschalteten sechs KKWs der DDR gelagert waren, in Jülich Behälter mit 0,3 Mio THTR-Kugeln.
Gesamtkapazität ungefähr 900 Castor-Behälter

Für die spätere Tieflagerung ist dann eine Umladung in einen ähnlichen dickwandigen Stahlbehälter (Pollux) vorgesehen - Der Pollux wiegt 65 t, hat 1,5 m Durchmesser bei 6 m Länge. (Der Name "Pollux" wurde in Analogie zu "Castor" gewählt, Castor und Pollux sind ein Zwillingspaar in der griechischen Mythologie.)

Ende der 70er Jahre entschied man sich in Schweden keine neuen KKWs zu bauen und für eine spätere, rückholbare Tieflagerung der abgebrannten Brennelemente im Granit. Als Endlagerbehälter konzipierte man damals einen extrem dickwandigen Behälter aus Kupfer, die Brennelemente im Inneren sollten mit Blei vergossen werden.(Ähnliches Konzept in Finnland.)

Eine direkte Übertragung dieses Konzepts auf die vorgesehene Tieflagerung im Steinsalz in Deutschland kam nicht in Betracht; Kupfer korrodiert in Salzsole extrem schnell, ist aber gegen wässrige Lösungen in Granitplutonen ziemlich beständig, sofern Radiolyse des Wassers ausgeschlossen bleibt. Nach längeren Untersuchungen fand man eine Stahllegierung die keine Lochfraß-Korrosion zeigte. Auf dieser Basis wurde das "Castor + Pollux"-Projekt entwickelt.

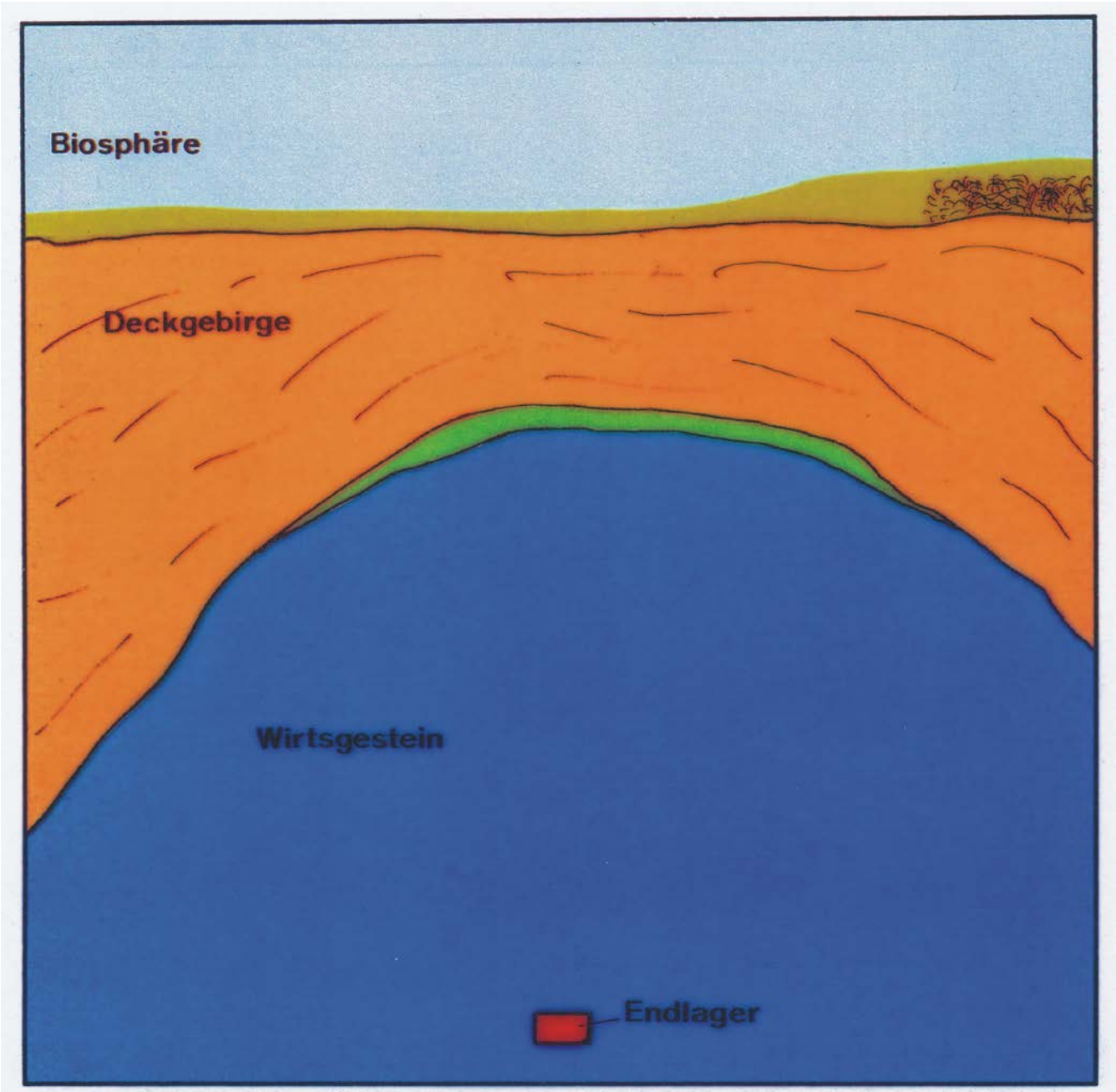
Der dicke Stahlmantel hat mehrere Funktionen:
- Mechanischer Schutz gegen Beschädigungen durch Unfälle
- Strahlenschutz während des Transports für das Bedienungs- und Bewachungspersonal
- Strahlenschutz zur Verhinderung der Radiolyse und damit rascher Oxydation im Bergwerk bei Wasserzutritt zum Pollux
- Die große Eisenmenge soll für ein reduzierendes Milieu im Behälter sorgen. (Pollux)

Die Entscheidungen über Behälter (Container) für die Zwischen- und Endlagerung wurden Ende der 70er Jahre entsprechend dem damaligen Stand der Technik und Forschung getroffen. Damals waren zwar völlig korrosionsfeste Materialien bekannt, wie etwa Korund, Spinell und andere keramische Materialien; alle sind aber spröde und würden unter einseitigem Druck brechen. (Lediglich in Schweden wurde die Verwendung von Korund zeitweilig erwogen.) - Man entschied sich daher für metallische Behälter, ging aber realistischerweise davon aus, daß diese Behälter bestenfalls die Spaltproduktphase überstehen würden. - Korrosionsbeständige Metalle wie Niob, Zirkalloy oder Zirkonium-Niob-Legierungen sind übrigens nie diskutiert worden. (Wahrscheinlich zu teuer!)

Aufgrund des raschen Fortschritts von Fertigungstechnik und materialwissenschaftlicher Forschung in den letzten 25 Jahren ist eine Verbesserung der Behälter für die Tieflagerung möglich geworden:
Es gibt inzwischen Techniken der Plasmabeschichtung auch für sehr große Werkstücke durch die dünne und fest haftende, korrosionsfeste Schichten von Karbiden oder Nitriden aufgebracht werden können. (Titankarbid, Chromnitrid u.a.) - Ob seitens der Nuklearindustrie solche Möglichkeiten bereits untersucht werden, ist nicht bekannt, es ist aber eher unwahrscheinlich, da dadurch höhere Kosten und Planänderungen verursacht würden.

Es gab auch Überlegungen BROW in einen dünnwandigeren, dicht verschweissten Behälter direkt im Kernkraftwerk einzufüllen. Der Stahlmantel ist zwar zu dünn für einen ausreichenden Strahlenschutz, für den Transport müsste der Behälter in eine strahlensichere Abschirmung eingeschoben werden. Diese wäre aber immer wieder verwendbar, eine Kontamination ist nicht zu befürchten: Der Einschlußbehälter ist dicht. - Zusätzlich könnten neutronenabsorbierende Stoffe im Einschlussbehälter eine Neutronenemmision unterbinden. (Borcarbid, Titanhydrid). Im Bergwerk würde dann der Einschlussbehälter in den Polluxbehälter eingesetzt. Auch hier könnte dann die bislang vorgesehene Neutronenabschirmung entfallen.

Dieses Konzept wäre langfristig entschieden billiger und außerdem sicherer, da im Zwischenlager kein Hantieren mit unabgeschirmten Brennelementen mehr erforderlich wäre! Dieses Anfang bis Mitte der 90er Jahre erwogene Konzept wurde etwa 1996/97 aufgegeben. (Das Projekt scheiterte nach internen Informationen an der Tatsache, dass innerhalb des Sicherheitsbehälters keine Schweissarbeiten erlaubt sind)



Prinzipskizze der natürlichen Barrieren bei der Endlagerung im tiefen geologischen Untergrund

Allgemeine Probleme der Tieflagerung

Erste sichere Erkenntnisse zum Wassergehalt von tieferen Formationen der Erdkruste brachten die kontinentalen Tiefbohrungen der Sowjetunion in den 80er Jahren auf der Kola-Halbinsel (10.000 m) und in Deutschland (8.000 m) in den 90er Jahren in Windischeschenbach. Zur Überraschung zeigte sich, dass in allen erbohrten Gesteinen (Plutonite, Vulkanite und Metamorphite) deutliche Mengen an Wasser auftraten.

Bereits Ende der 70er Jahre hatte der australische Petrologe Ringwood vorgeschlagen die endgültige Deponierung von rad waste in tiefen Bohrlöchern in Quarz armen Plutoniten zu planen und Granite möglichst zu vermeiden. Der Grund hierfür ist die so genannte „Granittektonik“. Granite haben innere Spannungen die bei mechanischer Belastung bzw. Entlastung zu sehr feinen Rissen (fissures) führen. Dies ist auf die sehr stark unterschiedliche thermische Ausdehnung von Tief- und Hoch-Quarz zurück zu führen.. Der Umwandlungspunkt von 572°C liegt weit unterhalb der Erstarrungstemperatur von Granit. (Kristallisation im Bereich zwischen 900°C und ca. 700°C in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Schmelze.)

Die auftretenden Risse, bzw. bei starker Belastung Spalten liegen in drei senkrecht aufeinander liegenden Ebenen und werden regelmäßig genutzt beim Abbau im Steinbruch. Oberflächen nahe Granite sind darum zuweilen Wasserleiter.(Aber extreme Unterschiede bei verschiedenen Graniten!) –

Da bislang jedes Land plant seine Abfälle auf dem eigenem Territorium zu deponieren, müssen viele Länder gleichwohl eine Lagerung in Granit planen; andere geeignete Gesteinsformationen sind schlicht nicht vorhanden. (Kanada, Schweden, Finnland, Japan)
Jedenfalls muss bei einer Tieflagerung in Silikatgesteinen zumindest mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100% gerechnet werden. Darum sind regelmäßig korrosionsfeste Container und eine die Diffusion hemmende Umhüllung mit Bentonit geplant.

In einzelnen Fällen wurde eine Tieflagerung in Anhydrit $CaSO_4$ untersucht (Schweiz). Alle Lagerstätten erwiesen sich als ungeeignet; erstens waren alle verfügbaren Schichten zu wenig mächtig, zweitens wäre schon das Auffahren von Strecken oder Bohrlöchern problematisch. Anhydrit reagiert bei Berührung mit salzfreiem Wasser unter starker Volumenvergrößerung zu Gips.

Auch Ton ist als Lagergestein problematisch. Tone sind Dreischichtsilikate mit einem Kationendefizit in der mittleren Schicht (Al, bzw. Mg); dieses Defizit wird durch ein- bzw. zweiwertige Ionen.+ H_2O als außen liegende Schicht ausgeglichen. Bereits dünne Tonschichten hemmen einen laminaren Durchfluss von Wasser. Allerdings können mehrwertige Kationen eine starke Volumenänderung verursachen und der Einfluss von stark Wärme entwickelnden Containern ist vorerst mindestens unklar

Das Auffahren von Bergwerken bzw. die Anlage von Bohrlöchern auch mit großen Durchmessern ist technisch kein grösseres Problem. Dies gilt auch für den dichten Verschluss von Bohrlöchern. - **Dagegen ist die möglichst trockene und hohlraumfreie Verfüllung eines Bergwerks und die wasser- und gasdichte Versiegelung des Bergwerks nach dem Abschluß der Tieflagerung ein völlig neues Problem. Kein Bergwerk wurde bislang so rückgebaut!**

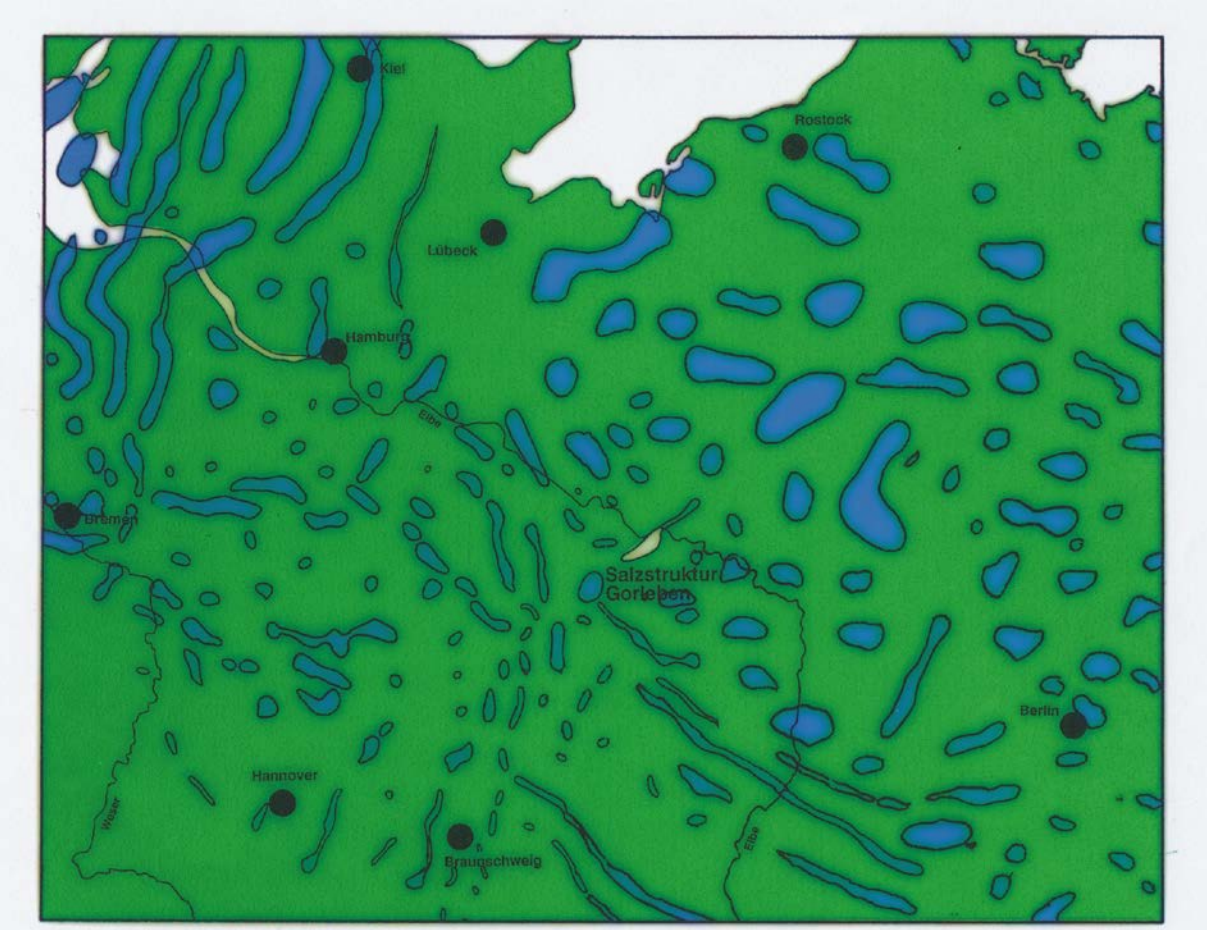
Im normalen Bergbau wird zwar oft nach dem Abbau ein Versatz eingebracht, um Bergschäden durch das "Setzen" des Hangenden gering zu halten. Dieser Versatz hat aber stets ein Porenvolumen in der Größenordnung von 30 bis 40%. Aus Gründen der Arbeitssicherheit wird der Versatz angefeuchtet. (Mehrere % Wasser!) –

Die Füllung von Hohlräumen mit Beton ist im Salz mit Problemen verbunden, normaler Beton zersetzt sich im Kontakt mit Magnesiumchlorid-haltigen Lösungen.- Spezieller Salzbeton (Sorelzement) kann beim Abbinden etwas Wasser freisetzen. **Im Salz wandern Flüssigkeitseinschlüsse im Temperaturgradienten in Richtung höherer Temperatur, also in Richtung zum Endlagerbehälter.** Im Prinzip lassen sich Wasser und Sauerstoff durch Zusätze zum Versatz binden; so setzen sich etwa Magnesiumoxid und feinverteiltes Kupfer mit Sauerstoff und Mg-Salzlösungen zu einem festen Magnesiumhydroxid-chlorid-Gel (Sorelzement) und Atakamit (Kupferhydroxid-Chlorid $Cu_2(OH)_3Cl$) um. Auch MgO allein könnte als Mittel zur Bindung von Wasser eingesetzt werden. -
Bei einer Tieflagerung in Salzbergwerken ist als günstig immerhin zu bewerten, dass sich NaCl unter hohen Drucken plastisch verhält. Es ist zu erwarten, dass sich langfristig Hohlräume dadurch weitgehend (ca. zu 99%) schließen.

Gorleben (Salzdiapir)

Auswahl 1977 aufgrund überwiegend politischer Erwägungen (Dünnbesiedelte Region in einer Randlage der BRD, politisches Entgegenkommen der damaligen Landesregierung von Niedersachsen / Auf der von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe erstellten Vorschlagsliste mit 50 Vorschlägen kam Gorleben überhaipt nicht vor.). Erkundungsbohrungen begannen 1983, die Schachtabteufung erreichte 1994 den Salzstock, 1995 wurde eine Teufe von 850 m erreicht. Es ist geplant in dieser Tiefe 25 km Stollen aufzufahren. Die Entscheidung, ob der Salzstock wirklich geeignet ist, kann erst danach getroffen werden! Der frühest mögliche Beginn einer Tieflagerung wäre 2008 gewesen. Erkundungsstopp 2000 unter der Regierung Schröder auf Druck der Grünen und theoretischer Suche nach neuen Endlagermöglichkeiten in Deutschland! - Bisher 7 km Stollen aufgefahren!
Als weiteres Endlager für Abfälle mit geringer Wärmeentwicklung und kontaminierte Teile von abgewrackten Kernkraftwerken ist die ehemalige Eisenerzgrube **Konrad** vorgesehen. Die Wärmeentwicklung von Abfällen darf maximal eine Erhöhung der Gesteinstemperatur um 3° K bewirken.

Das Endlager der ehemaligen DDR in Morsleben wurde nur für die Einlagerung mittel- und niedrigaktiver Abfälle genutzt, die Betriebsgenehmigung lief 2000 aus (Laugenzuflüsse waren nicht zu stoppen!).



Salzstrukturen in Norddeutschland

<u>Salzdiapire</u> Meerwasser enthält 35 g gelöste Bestandteile pro kg.

Kationen: Na, Mg, K, Ca / Anionen : Cl, SO_4, HCO_3
Bei vollständiger Verdampfung entstehen:
72% NaCl, 0,8 % $CaCO_3$, 3,2 % $CaSO_4$ $2H_2O$, 2% KCl und 22% verschiedene Mg-Salze mit Kristallwasser
In Salinen fällt zuerst sehr wenig Kalk, bzw. Dolomit, dann eine Gipslage, dann die Hauptmenge des NaCl-
Salzdiapire findem sich in grosser Zahl in einem Gebiet von Südpolen bis zur deutschen Bucht der Nordsee. Da NaCl und KCl sechs Translationsebenen (110) besitzt, ist das im Zechstein (Ende des Perm ca. 230 Mio a) abgelagerte Salz wegen seiner geringeren Dichte in Form von Diapiren nach oben verlagert worden. Dabei sind die Randbereiche sehr stark verfaltet, bzw. verknäuelt worden. – Die Ablagerung durch Verdunstung im Zechstein war aufgrund der Mächtigkeit sicher ein vielfach wiederholter Vorgang. Dabei reagierten frisches Meerwasser, bzw. Salzlaugen mit bereits ausgefällten Mg-Salzen*****. – Man kennt über 50 verschiedene Salzminerale, wirklich wichtig und häufig sind etwa 8 Verbindungen:
Halit NaCl, KCl Sylvin , Carnallit K_3MgCl_6 6 H_2O, Kieserit $MgSO_4$ H_2O, Polyhalit K_2SO_4 $MgSO_4$ 2 $CaSO_4$ $2H_2O$
Kainit KCl $MgSO_4$ 2,75 H_2O Anhydrit $CaSO_4$, Gips $CaSO_4$ 2 H_2O

Restlaugen treten auf in Form von Flüssigkeitseinschlüssen (fluid inclusions) und in Randbereichen des Salzstocks auf Rissen und Klüften. In manchen Salzstöcken treten auch Kohlenwasserstoffe auf (Erdöl, Bitumen + Methan)

.

***** Carnallit+Kieserit + Halit + NaCl-Lösung
Kieseritischer Carnallit

Reagiert zu → Kieserit+Sylvin+ Halit + $MgCl_2$-Lösung
Kieseritisches Hartsalz

Fast alle Salzdiapire haben im oberen Teil eine Anhydritlage und im Kontakt mit Grundwasser Gips („Gipshut"). „Fossile" Ablaugungen im obersten Teil sind fast immer vorhanden..-Im gesamten Salzstock schichtige Lagerung.
Mineraldichten:
Inkompetente Minerale: Halit (2,165) / Sylvin(1,99) / Gips(2,3) *verformbar*
Kompetente Minerale: Amhydrit(2,9) / Kieserit(2,57) Carnallit(1,6) *starr,brüchig*
Sedimente haben meist 2,6-2,7 – Kalke 2,6-2,8

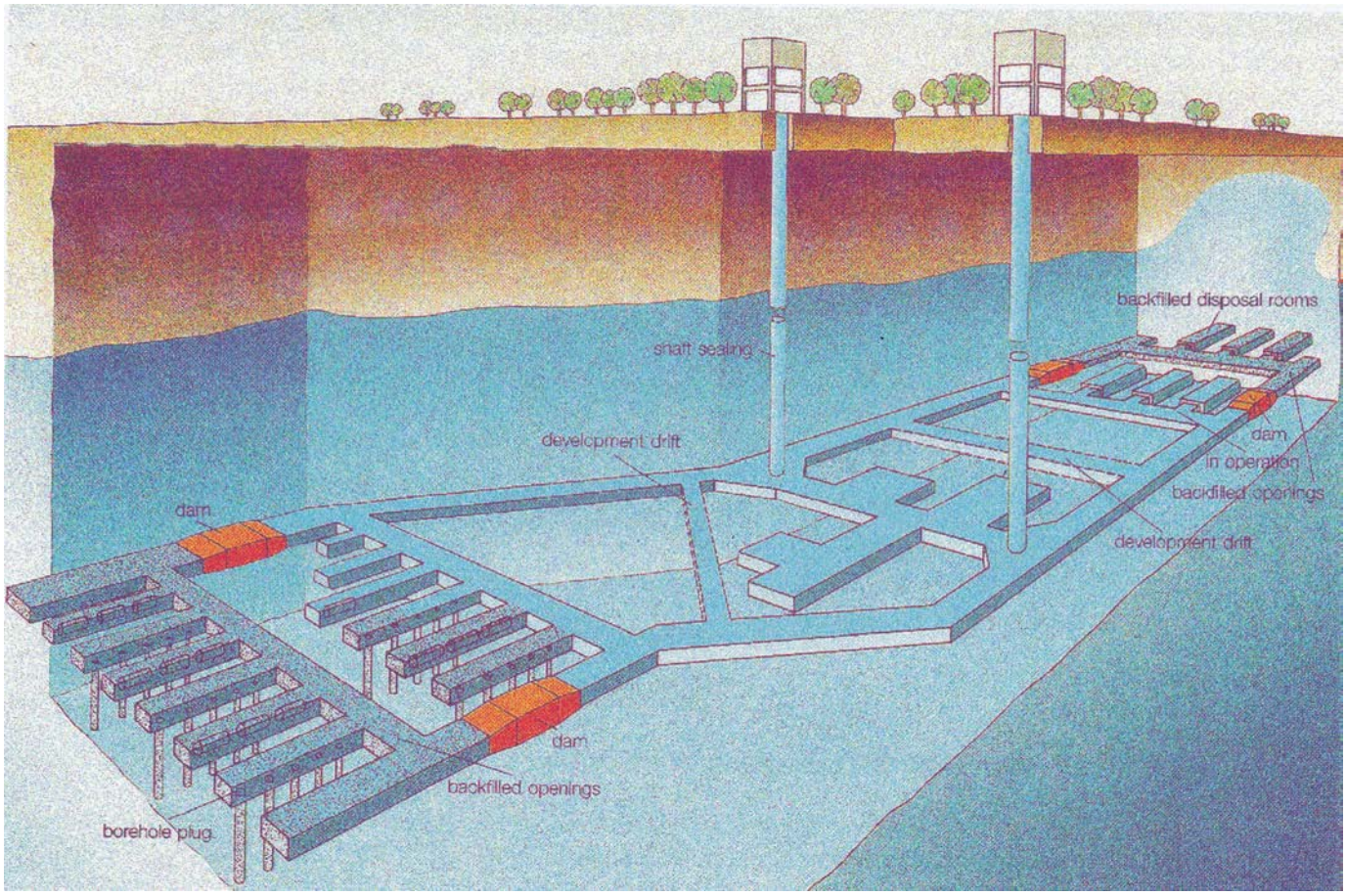
Beim ersten Gorleben-Symposion in Hannover 1979 sagte der Geologe Prof. Richter-Bernburg: *„In jedem Falle sind die Salze im Zustand einer quasi.viskosen Flüssigkeit aufgestiegen und als solche bruchlos verformt worden, wie etwa ein Rührteig. Die Entstehung von Spalten und Brüchen im Salz war und ist auch noch aus mechanischen Gründen also gar nicht möglich. Genaueste Kenntnisse der durch Bergbau gut erschlossenen vielen deutschen Salzstöcke beweisen das ad oculos."*
Leider war das eine Verallgemeinerung häufig zu beobachtender Phänomene, aber eine völlige Negierung von vielen anderen Beobachtungen. So sind etwa mit Gas und Öl gefüllte Klüfte in mind. drei Fällen , offene und mit Lösungen gefüllte Klüfte in zwei Fällen, und auch vielfach Imprägnationen von Salzgestein mit gesättigten Lösungen gefunden worden.- Bruchverformungen wurden auch ausserhalb Deutschlands mehrfach beschrieben. Schliesslich kam es bei mehreren Salzbergwerken zu unerwarteten Laugenzuflüssen die schlesslich technisch nicht mehr beherrschbar waren und zum „Absaufen" der Grube führten. (z.B. Asse I 1899 – 1906) - Beim Bergwerk Asse II wurde die drohende Gefahr erst 2009 zugegeben, die ersten Zuflüsse datieren aber aus den 80er Jahren... Nicht zu stoppende Laugenzuflüsse gibt es auch in Morsleben.

Für Gorleben ist vorgesehen HAW in Bohrlöchern abzulegen, dagegen Brennelemente ohne Wiederaufarbeitung (BROW) in Polluxbehältern in den aufgefahrenen Strecken zu lagern. Die Publikationen der 90er Jahre sahen für den Pollux eine Aussenhaut aus Inconel (Ni-Legierung) vor. Die Behälter müssen so konstruiert sein, dass sie einen allseitigen Druck von 250 bar aushalten. - Die Gesteinstemperatur beträgt in der vorgesehenen Tiefe zwischen 35 und 50°C. Durch die Wärmeentwicklung der Container erwartet man eine Aufheizung der Umgebung auf bis zu 150°C Dies würde beim vorgesehenen Konzept zu Hebungen bis zu 1 m im Salzstock und dem

Deckgebirge führen, dabei ist die Hebungsgeschwindigkeit mit bis zu 1 cm/a vielfach grösser als bei der für die geologische Vergangenheit kalkulierten Halokinese des Salzstocks.! -.. Die zu erwartende Aufheizung ist abhängig von der Zeitspanne zwischen Entnahme aus dem Reaktor und der Einlagerung im Bergwerk. In einer Publikation des Forschungszentrums Karlsruhe von 1998 wurde als Temperatur an der Behälteroberfläche im Salz 200°C angegeben! Nicht ausgeschlossen können bei diesen Hebungsraten Veränderungen im Deckgebirge, am Salzspiegel und Bruchverformungen in der Anhydritlage die wesentliche Veränderungen der Wegsamkeit für Lösungen bewirken könnten..

Die Gesamtmenge an Wasser in Steinsalz liegt in der Grössenordnung zwischen 3 und 0,001 %. (Wasser auf Korngrenzen, fluid inclusions, Kristallwasser von Mg-Mineralen). Kristallwasserhaltige Minerale haben einen inkongruenten Schmelzpunkt, d.h. sie zerfallen in eine gesättigte Lösung und einen Bodenkörper mit niederigeren, bzw. ohne Wassergehalt. Für Gemische mit NaCl liegt dieser Schmelzpunkt für.Kainit + Carnallit innerhalb des zu erwartenden Temperaturbereichs.(80° bis 100°C) Bei der direkten Endlagerung in verfüllten Strecken ist von Hohlräumen von mind. 30% auszugehen, eine absolut trockene Verfüllung ist nicht möglich. Es kann ein Gehalt von Wasser in den verfüllten Strecken von bis zu 1% angenommen werden. Ältere Planungen sahen zeitweise sogar eine Flutung der Restvolumina in den verfüllten Strecken mit $MgCl_2$-Lauge vor.-
Theoretische Erwägungen lassen **im Salzstock eine Wanderung des Wassers in Richtung zu höherer Temperatur** vermuten, dies wurde durch Versuche im Versuchsbergwerk Asse II bestätigt.
Für HAW-Behälter in dicht verschlossenen Bohrlöchern wurde in Modellstudien eine 1 mm dicke Wasserschicht an der Behälteroberfläche errechnet. Bei der Streckenlagerung von Polluxbehältern sind erheblich höhere Werte zu erwarten. (bis zu.0,1 Kubikmeter Lauge pro Pollux.-Behälter). Anfang der 70er Jahre wurde nur die Lagerung von HAW-Kokillen vorgesehen; bei einer Diskussion wurde von Vertretern der Industrie anlässlich eines Einwands etwa sinngemäss bemerkt: *„ Die Behälter würden die Spaltproduktphase überstehen (600 Jahre), dann hätten sie auch ihre Schuldigkeit getan.“*

Das gegenwärtig verfolgte Ziel in Deutschland sieht eine Endlagerung wärmentwickelnder Abfälle in einem Salzstock vor; die Planungen erwarten einen Abschluss der Arbeiten (Einlagerung + Rückbau der KKWs) in den nächsten 100 Jahren. Neuere Informationen lasen die Annahme zu, dass dabei auch für Brennelemente ohne Wiederaufarbeitung eine Lagerung in Bohrlöchern in Betracht gezogen wird!! -(Endlagerbüchsen aus Stahl mit ca. 2 cm Wanddicke)

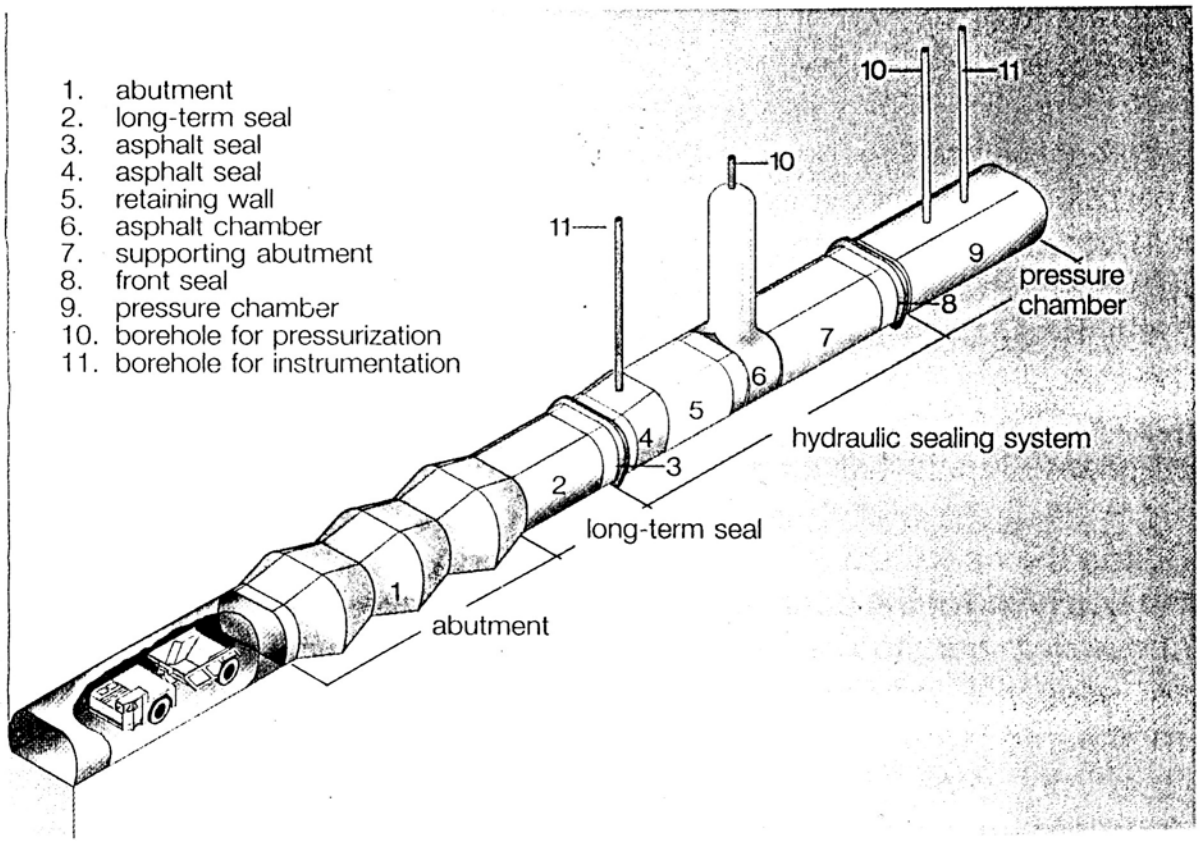


Oben und auf der nächsten Seite Abbildungen aus einer Broschüre zum Thema Endlagerung in Gorleben (Informationskreis Kernenergie)

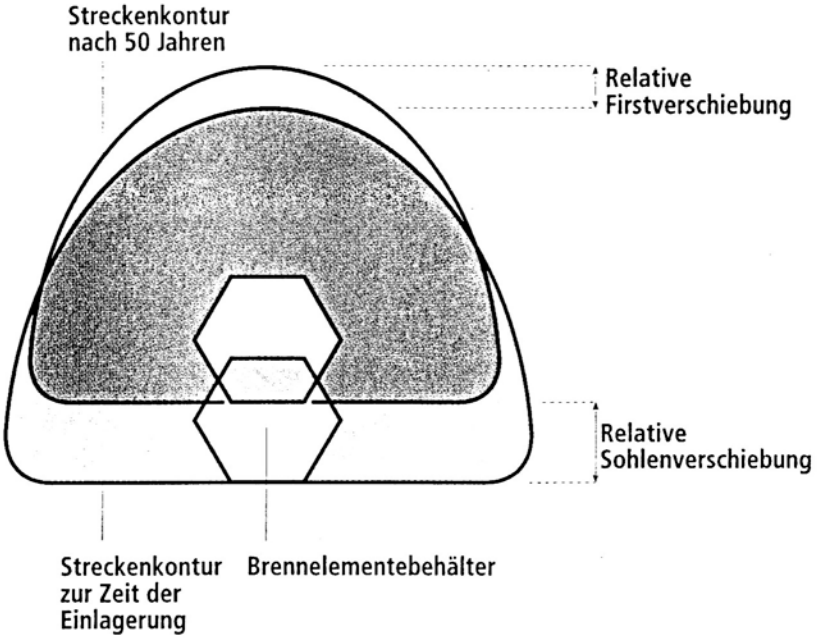
Erkennbar die Ablagerung in Bohrlöchern (oben links) bzw. der Pollux-Behälter auf Strecken (oben rechts)

Zur „dichten Versieglung“ der Strecken sind spezielle Dämme geplant (oben orange)- - Reine Theorie, noch nicht unter realistischen Bedingungen getestet..

Auf folgender Seite Details zur geplanten „Versiegelung“ und Berechnungen, bzw. Zeichnungen zum langsamen Zuquellen der Hohlräume.



Test dam construction



Deformation der verfüllten Strecken nach 50 Jahren

Wohin mit dem Plutonium?

Plutonium fällt an in USA und Rußland aus abgewrackten Sprengköpfen (START-Verträge), dabei handelt es sich um ziemlich reines Pu 239. (Pu-Sprengköpfe müssen etwa alle 4 Jahre aufgelöst und von Zerfallsprodukten gereinigt werden!!) - Eine größere Menge fällt bei der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen aus ziviler Nutzung an. Dieses Plutonium besteht aus einem Gemisch der Isotopen Pu 239, Pu 240 und wenig Pu 241. Auch dieses Gemisch ist im Prinzip für einen Bombenbau geeignet, allerdings sind solche Sprengsätze wegen der kurzen Halbwertszeit von Pu 241 von 14,4 a nicht sehr lange haltbar und militärisch deshalb kaum nutzbar.

Die Substanz ist hochtoxisch,es erscheint nicht ratsam dieses Material länger in reiner Oxid-Form zu lagern.

Es wird erwogen, einen Teil in Hochtemperaturreaktoren in Rußland und USA zur Energiegewinnung einzusetzen Die abgebrannten Brennelemente sind dann durch die Spaltprodukte "vergiftet" und liegen außerdem in einer Form vor, die in normalen Wiederaufarbeitungsanlagen nicht verarbeitet werden können. Da sie selbst in konzentrierten Säuren unlöslich sind, stellen sie eine ideale Matrixbarriere dar; eine Tieflagerung ist dadurch weniger problematisch als bei üblichem BROW oder HAW. - Allerdings wäre dies mit erheblichen Kosten verbunden! Außerdem ist es wahrscheinlich unmöglich alles Pu in einer absehbaren Zeit so umzusetzen.

MOX-Brennstäbe werden aus Natururan plus Plutoniumoxid gefertigt, es wird so die Anreicherung vermieden. Anwendung z.B. in Japan Im Prinzip ist auch eine Nutzung von abgereicherten Uran zur MOX-Fertigung möglich..

In den USA wurde erwogen einen Teil des Pu in sichere Matrixbarrieren einzuschließen. (Zirkon, Zirkonoxid) Dabei sollten Substanzen zugegeben werden, die als Neutronenfänger wirken (Hafnium bzw. Gadolinium), um eine Kritikalität zu vermeiden. - Schließlich gibt es noch die Möglichkeit gepreßte Pu-Oxid-Tabletten (Mit oder ohne Neutronenfänger) mit Siliziumkarbid zu bedampfen und zusammen mit BROW der Tieflagerung zuzuführen.

Praktisch werden spent fuel und HAW-Kokillen bis heute weltweit kontrolliert rückholbar gelagert – MONITORED RETRIEVABLE STORAGE.

Gründe hierfür:
- Hoffnung auf verbesserte Techniken in einigen Generationen(Container).
- Hoffnung auf realistische Techniken der Transmutatio, bzw. Kernspaltung von Transuranen (Pu) in unterkritischen Mengen durch von außen zugeführte Protonenstrahlen
- Hoffnung auf Gewinnung von Rohstoffen (stabilen Spaltprodukten) nach Abklingen der Radioaktivität nach etwa 200 Jahren.

Extrem teure Rohstoffe sind die Platinmetalle (platin metal group-PGM)
Die gegenwärtig geförderten PGM-Erze enthalten im Mittel 4ppm, davon nur etwa 20% leichte Platinmetalle!
Im spent fuel sind 3600 ppm leichte Platinmetalle enthalten (Ru + Rh + Pd).
Der Gehalt in HAW-Gläsern ist etwa 5mal höher. – Rhodium ist überhaupt des seltenste der PGM, es ist das korrosionsbeständigste der Gruppe und wird ebenso wie Palladium (und Platin) vorwiegend für Katalysatoren benutzt.
Ruthenium wird in steigendem Maße als Zentralatom organischer Komplexe genutzt die z.B. in der homogenen Katalyse verwendet werden können.
.
Der Gehalt an Seltenen Erden (REE) beträgt 12.000 ppm, davon allein etwa 600 ppm Gadolinium, einem besonders begehrten Element. Es hat den höchsten bekannten Einfangquerschnitt für Neutronen..

Eine entsprechende Möglichkeit mit BROW umzugehen ist bisher nicht öffentlich erwogen worden:

Dazu müsste BROW in Castorbehältern ca. 200 Jahre gelagert werden, die bereits jetzt benutzten Castorbehälter wären geeignet. Dann wäre

- die Wärmeentwicklung von 10^4 Watt pro Tonne auf 120 W/t gesunken,
- die Aktivität von 2 x 10^6 Ci/t auf 3 x 10^3 Ci/t gesunken
- die Spaltgase Kr85 und Tritium wären völlig zerfallen
- Sr90 und Cs137 wären zu etwa 99 % zerfallen
- die radioaktiven leichten Platinmetalle wären quantitativ in stabile Isotope des Ruthenium,Palladium und Rhodium zerfallen, die etwa 0,36% der Menge ausmachen würden.(3,6 kg Ru+Pd + Rh pro t)

Eine dann ausgeführte Aufarbeitung in einer Anlage, analog zu den gegenwärtig betriebenen Wiederaufarbeitungsanlagen, würde bei geringfügig variierter Prozessführung pro t spent fuel zu folgenden Produkten führen:

1. ca. 3,6 kg Ruthenium+Palladium + Rhodium

2. ca. 935 kg Uran

3.. 2 kg Uran vermischt mit ca. 10,3 kg Actiniden (Pu, Np, Am, Cm)

4. ca. 30 kg restliche Spaltprodukte

5. HSM (Zirkaloy-Hüllrohre + Edelstahl-Distanzstücke)

ß

1. Die leichten Platinmetalle haben gegenwärtig einen Marktwert von ca . 30.000 €.

2. Das Uran könnte ohne Probleme nach Überführung in Uraninit oder Brannerit tiefgelagert werden.

3. **Das Actiniden-Uran-Gemisch stellt das eigentliche Problem dar, ist aber in Volumen und Masse stark reduziert! Oxidvolumen ca. 2 Liter! (1,5% der ursprünglichen Masse, ca. 2,3% des Volumens)**
   Entsprechend konditioniert, d.h. mit neutronenabsorbierenden Borkarbid versetzt und in korrosionsbständige Behälter verpackt könnte es bei internationalem Konsens weltweit an einer zentralen Stelle gelagert werden.

4. Die restlichen Spaltprodukte müssten konditioniert und weitere 400 Jahre rückholbar gelagert werden, eventuell stellen sie dann ein interessantes „Erz" zur Gewinnung von Mo und Seltenen Erden dar.(Im Prinzip ist eine vollatomatisierte Anlage möglich, die per Ionenaustausch- und Eluierung die Seltenen Erden abtrennt und nach Elementen aufspaltet, nur das Samarium ist nach 200 a noch durch das Isotop Sm 151 mit der Halbwertszeit 80 a belastet, könnte also nicht verwendet werden.)

5. Die Hüllelemente können, wie bereits jetzt, als nicht wärmeproduzierender Abfalltiefgelagert werden. (ca. 2 x 10^{-2} Ci/t)

HAW-Gläser enthalten etwa 5 mal mehr Spaltprdukte als spent fuel – Eine Aufarbeitung mit dem Ziel der Trennung ist zwar auch möglich, wäre aber sehr viel komplizierter und teurer!

Rückbau von Kernkraftwerken

Ausgediente KKWs müssen auf Kosten der Betreiber abgerissen werden. Durch Neutronenaktivierung sind aber insbesondere in Stahlteilen (Reaktordruckgefäß) und in Edelstahlteilen (Rohre, Wärmetauscher, Dampferzeuger u.ä.) radioaktive Isotope entstanden. Die längste Halbwertszeit dieser Isotope hat Co 60 mit 5,3 a, Mn 54 hat 312 Tage, Zn 65 noch 244 Tage, die meisten anderen unter 100 Tagen Halbwertszeit! - Das Wasser im Primärkreislauf enthält Tritium mit 12,3 a !

Eine Möglichkeit besteht darin den eigentlichen Reaktor mit Beton zu verschließen und den Abbau erst nach etwa 60 Jahren vorzunehmen. Dadurch fallen aber erhebliche Kosten für Bewachung an und das Grundstück kann solange nicht genutzt werden.(Sicherer Einschluß)

Günstiger erscheint es die Kenntnisse des Reaktorpersonals zu nutzen und unter entsprechenden Vorsichtsmaßnahmen sofort mit dem Abbau zu beginnen. Dabei muß jede Staub- oder Gasentwicklung bei der Zerlegung aktivierter Teile vermieden werden. Soweit möglich werden darum Schneid- und Schweißarbeiten unter Wasser im Abklingbecken vorgenommen. Wo dies nicht möglich ist, kann das Teil in einem Eisblock eingeschlossen und dann zersägt werden. (Dampferzeuger) Oberflächlich kontaminierte Teile können

durch elektrolytisches Abtragen der Oberfläche gereinigt werden. Alles anfallende aktive Material ist in feste Form überzuführen, dicht und strahlensicher zu verpacken und der Tieflagerung zuzuführen. (Insgesamt etwa 3% des Volumens des KKWs, Þ MAW, bzw. LAW)

Beim Import von Schrott aus GUS-Ländern ist mehrmals stark aktiver Schrott in EU-Länder wie Spanien gelangt

Derzeit werden in Deutschland 11 Reaktoren so abgewrackt, für zwei Reaktoren wurde der „Sichere Einschluss“ gewählt; nur zwei Reaktoren, Niederaichbach und Großwelzheim sind vollkommen beseitigt (Waren in den 70er Jahren kaum in Betrieb) Für vier weitere ist die Stillegung beantragt (Brunsbüttel, Unterweser, Biblis A+B). Man rechnete 1999 mit mindestens 10 bis 15 Jahren Arbeitszeit pro Kraftwerk und Kosten von je etwa 1 Milliarde DM. (Unter Berücksichtigung der Inflationsrate kostet der Rückbau soviel wie der Bau !!) 2003 rechnete man mit 25-30 Jahren Zeit zwischen Abschaltung und Ende des Rückbaus.(Grundremmingen A befindet sich 2013 seit 30 Jahren im Rückbau) Kosten pro KKW von 500 Mio € .mach neueren Schätzungen.

Erheblich billiger und schneller ist der Rückbau bei Anlagen, die nur extrem kurz oder überhaupt nicht in Betrieb waren (Schneller Brüter in Kalkar, Mülheim-Kärlich), sowie bei Brennelementfabriken.

Wasser läßt sich durch Filter von Feinteilchen befreien, gelöste Ionen wie etwa Cäsium können mit Ionenaustauschern (z.B. Berliner Blau) entfernt werden. Nicht entfernen läßt sich Tritium (In Form von THO). Solche Wässer müssen für ca. 120 Jahre vom Biokreislauf ferngehalten werden. (Möglichkeit der Injektion in tiefliegende geologische Formationen oder Salzkavernen) – In Deutschland gibt es derzeit 24 stillgelegte KKWs (ohne Forschungsreaktoren!),

Internationaler Stand der Planung zum Umgang mit rad waste.

Nach Angaben der staatlichen russischen Firma Rosatom 2009 beträgt die Gesamtmenge der radioaktiven Abfälle in **Russland** 550 Mio. t.- Darin sind eingeschlossen abgereichertes Uran, Plutonium aus der Wiederaufbereitung und Abwrackung vom Kernwaffen, schwach, mittelaktiver und hochaktiver Abfall..Es ist beabsichtigt bis 2035 ein oder mehrere Endlager zu schaffen Die HAW-Phosphatgläser werden wahrscheinlich in tiefen Bohrlöchern in Trap-Basalten in Sibirien deponiert werden.Auch Planungen auf der Kolahalbinsel und in Krasnojarsk wurden diskutiert.

In den **USA** sind bis 1987 Deponien in flachen Salzschichten (C.300m Dicke In New Mexiko), Granit (Climax), Basalt und in Tuffen (Yukka Mountain) untersucht worden. Ab 1987 wird nur die Lagerung in Tuff verfolgt. Die HAW-Lösungen aus dem militärischen Bereich werden bis heute in Tanks aufbewahrt. Spent fuel (BROW) aus zivilen KKWs sollen in Zylindern aus einer Titanlegierung kontrolliert rückholbar in Tuff gelagert werden.

Eine kontrolliert rückholbare Lagerung planen auch Frankreich, Schweiz, Schweden, Finnland und Japan.
Schweden und Finnland planen über Rampen zugängliche Tunnel in Granit in 400 m (SF) , bzw. 500 m Tiefe (Schweden) für je 12.000 t spentfuel.nach einer Zwischenlagerung von mindestens 50 Jahren.- In einem Stahlzylinder werden 12 fuel assemblis (2 t spent fuel) eingefüllt und mit einem Kupfer-Container umgeben. Bentonit als Versatz soll Wasserzutritt verhindern.

Lagerung in Granit auch in **Kanada** geplant In ca 1000 m Tiefe von einer Bergwerksstrecke aus in Bohrlöchern und mit Bentonit als Versatzmaterial.. Kanada betreibt nur Reaktoren mit Natururan und nutzt Schwerwasser als Moderator(CANDU-Typ). Die Brennelemente sind kürzer(ca.1,5 m) und dicker, Energieausbeute, Radioaktivität und Wärmeentwicklung sind etwa um den Faktor 0,25 geringer! Die Planungen sehen deshalb keine Rückholbarkeit vor.
Die gegenwärtige Regierung plant eine Privatisierung der Nukleartechnik.

Kernenergie + Terrorismus

Nach einhelliger Meinung von Experten ist die Wahrscheinlichkeit, dass terroristische Organisationen funktionierende Atombomben bauen könnten, nahe Null einzuschätzen. Benötigt würde eine Wiederaufarbeitungsanlage + Reaktor oder grosse Mengen an Natururan + eine grössere Gaszentrifugenanlage, zusätzlich ein Stab an gut ausgebildeten Physikern u. Chemikern. Solche Resourcen über eine Zeitraum von mindestens mehreren Jahren kann nur ein Staat zur Verfügung stellen.

Dagegen könnte eine sog. „dirty bomb“ relativ leicht hergestellt werden. Dies ist ein konventioneller Sprengsatz der beigefügte hochradioaktive Stoffe bei der Explosion auf möglichst grosser Fläche verteilt und so nachhaltig kontaminiert. (In Betracht kommen Cs 137 und Co 60 aus medizinischer Anwendung oder illegal beschafftes Pu-Isotopengemisch aus der Wiederaufbereitung von zivilen KKWs.)

Die Sabotage durch Selbstmordattentäter eines laufenden, flüssigkeitsgekühlten KKW mit dem Ziel alle Kühlaggregate zu zerstören würde eine Kernschmelze hervorrufen, bei gleichzeitiger Zerstörung des Sicherheitsbehälters (Containment) würde eine Situation ähnlich wie in Tschernobyl entstehen! Diese Möglichkeit wurde schon als Roman und Fernsehfilm behandelt.

Nach Schätzungen der Hessischen Stiftung Friedens- und Konfliktforschung in Frankfurt/Main gibt es weltweit etwa 1700 t hochangereichertes waffenfähiges Uran und mindestens 450 t waffenfähiges Plutonium. Nähere Informationen siehe unter www.hsfk.de

Internationale Kosten

Einige Länder, insbesondere Russland, GUS-Staaten und die Ukraine sind nicht in der Lage, bzw. nicht bereit, dringend erforderliche Aufräumungs und Sicherungsmassnahmen im nukleartechnischen Bereich zu finanzieren. Um Umweltkatastrophen zu vermeiden, müssen dann Industriestaaten solche Massnahmen mitfinanzieren. Regelmässig ergeben sich dabei Schwierigkeiten wegen übertriebener Geheimhaltung. - Aktuelle Beispiele:
Neuer Sarkophag für Tschernobyl und bessere Lagerung von Abfällen dort. - Lagerung von alten U-Boot-Reaktoren in Murmansk u. Umgebung. - 28 Abfallhalden der Uranproduktion aus den Jahren 1945 bis 1968 in Kasachstan am Mailu-Su-Fluss sind durch Erdrutsche und Starkregen gefährdet und drohen das Fergana-Tal zu kontaminieren; betroffen wären bis zu 6 Millionen Anwohner!

Zusammenfassung

- Die 1995 beschlossene direkte Endlagerung von Brennelementen ohne Wiederaufarbeitung (BROW) in Deutschland bedeutet bei der gegenwärtigen Planung einen Verzicht auf die Matrixbarriere und eine nicht korrosionsfeste Behälterbarriere (Fe!).

-Vor der Tieflagerung müssten die Castor-Behälter geöffnet werden und die Brennlemente in die Endlagerbehälter (Pollux oder Endlagerbüchsen) umgelagert werden. - Das ist wegen der hohen Aktivität nur per Fernbedienung möglich! Die Anlage wird in der Planung zurückhaltend als Konditionierungsanlage bezeichnet. Eine partielle Freisetzung von Krypton 85 und Tritium ist nicht ausgeschlossen.

- Speziell die Streckenlagerung in Pollux-Behältern erscheint bedenklich.

- Die Endlagerung von HAW-Kokillen in Salz würde in Kauf nehmen, dass oberhalb des Einlagerungsortes wasserhaltige verfüllte Strecken liegen.

- Die zu erwartenden Hebungsraten könnten neue Wegsamkeiten zwischen Salzspiegel und Wasserzirkulation im Deckgebirge und Bruchverformungen im Hauptanhydrit bewirken.

- Das Konzept verzichtet in den Planungen bislang auf eine Immobilisierungsbarriere; die Behälterbarrieren entsprechen den Planungen der 70er und 80er Jahre.

- Eine <u>rückholbare Lagerung</u> in Salz wäre bei diesem Konzept ausgeschlossen!

<u>Auf die Endlagerung stark wärmeentwickelnder Abfälle sollte prinzipiell verzichtet werden.</u> Diese Erkenntnis setzt sich derzeit in den USA durch. Man sollte solche Abfälle für mindestens 100 Jahre rückholbar lagern. Dies wäre kein technisches Problem, es wäre sogar sehr viel billiger, hätte aber erhebliche psychologische Konsequenzen für die Akzeptanz der Kernenergienutzung und würde die Frage aufwerfen ob die Höhe und die Verwaltung der gegenwärtigen Rückstellungen für den Umgang mit den radioaktiven Abfällen hinreichend sind!

Die Lagerung von nicht wärmeentwickelnden, niedrig- und mittel-aktiven Abfällen im Schacht Konrad erscheint vertretbar. Einige dieser Abfälle enthalten α-Strahler; in solchen Fällen sollte eine Immobilisationsbarriere im Versatz (back fill) vorgesehen werden. Soweit bekannt ist dies in den bisherigen Planungen nicht enthalten!

Fazit

Der Betrieb eines Kernreaktors ist die technisch anspruchsvollste, komplizierteste und risikoreichste Methode zur Erzeugung von Dampf.

Die enormen Entwicklungskosten sind international ganz überwiegend aus Steuermitteln aufgebracht worden. (Im Anfang aus dem Rüstungsetat, später durch Förderung im Interesse einer begrenzten Energieautarkie.)

Durch die Kopplung der Strompreise an den Preis des Erdöls und die Steigerung der Ölpreise in den letzten Jahrzehnten ist der weitere Betrieb von bestehenden KKWs eine riesige Gewinne versprechende Aussicht für die Eigentümer. Geschätzter Gewinn pro KKW und Jahr ca. 300 Mio €

Es sollte für 100 bis 200 Jahre verzichtet werden auf die Tieflagerung (Deponie ohne Möglichkeit der Rückholung) von stark wärmeentwickelnden Abfällen. Dies gilt insbesondere für Brennelemente ohne Wiederaufarbeitung !

Die vorhandenen Zwischenlager Ahaus, Gorleben und Lubmin sind nicht hinreichend gegen Sabotage und Flugzeugabstürze gesichert und vermutlich mit nur 900 Stellplätzen für Castor-Behälter zu klein für die bis 2023 anfallenden Mengen.. Der Neubau eines einzigen Zwischenlagers in

Form eines Bunkers wäre sinnvoll. – (Vorschlag: Truppenübungsplatz Wahn – Bundeseigentum, ohne Siedlung an der Erdoberfläche. - schon 1977 an vorderer Stelle auf der Liste der Bundesanstalt f. Geowissenschaften.)

Ein geordneter Abschluß der Kernenergienutzung dauert in Deutschland mindestens etwa 100 Jahre. (Abschaltung, Rückbau, usw.) In den europäischen Nachbarstaaten sind weit längere Fristen zu erwarten. – Die Zuversicht erscheint naiv, dass privat kontrollierte, hinreichende Rücklagen von Unternehmen für eine Finanzierung über einen solch langen Zeiraum zur Verfügung stehen.

Als positiv ist zu vermerken, dass in Deutschland die bislang umfangreichsten Erfahrungen in Bezug auf den Rückbau von KKWs vorliegen.

Anteil der Kernenergie an der Stromerzeugung:

Deutschlang 1998 ca. 30% - 2008 23,5 % - 2011 . 17,7%
Weltweit 2008 etwa 13%
Deutschland 2011 Erneuerbare Energien 21%

Etwa 1/3 aller KKW weltweit stehen in der Europäischen Union, das entspricht etwa 34 % der weltweiten installierten Leistung.
(Andere Erzeugerländer : USA 28% / Japan 12% /Russland 6% / Ukraine 5% Südkorea 3,4% / Kanada 2,8% / Taiwan 1,3% / China 0,07 %)

"Abfälle" 1997: Plutonium weltweit ca. 1780 t , davon 65 t in Deutschland

Brennelemente ohne Wiederaufarbeitung 1997 weltweit ca. 186.000 t.

Quellen

H. Lindner " Grundriß der Atom -und Kernphysik " Fachbuchverlag Leipzig 1972

A.G. Herrmann " Radioaktive Abfälle " Springer Verlag 1983

D.G. Brookins " Geochemical Aspects of Radioactive Waste Disposal " Springer Verlag 1984

Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft Bd 131,Teil 2
" Geowissenschaftliche Aspekte der Endlagerung radioaktiver Abfälle "
Enke Verlag Stuttgart 1979

I.S. Roxburgh " Geology Of High-Level Nuclear Waste Disposal "
Verlag Chapman and Hall 1987

V. M. Chernousenko " Chernobyl - Insight from the inside"
Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York 1991

Deutsche Ausgabe:
W.M. Tscherousenko „Tschernobyl: Die Wahrheit“
Rowohlt, Reinbeck bei Hamburg 1992

J. Smith, N. A. Beresford „Chernobyl -Catastrophe and Consequences“
Springer Praxis 2005

W. Minder "Geschichte der Radioaktivität"
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1981

Karlsruher Nuklidkarte ISBN 3-92-1679-18-3
Marktdienste Haberbeck GmbH, Indistriestr. 17,
D-32791 Lage/Lippe

„Basiswissen zum Thema Kernenergie“ Martin Volkmer
„Radioaktivität und Strahlenschutz“ Martin Volkmer
beide Broschüren herausgegeben vom
Informationskreis KernEnergie, Robert-Koch-Platz 4
10115 Berlin November 2005 ISBN-Nr. 3-926956-44-5/3-926956-45-3
(Kann kostenlos angefordert werden dort oder über www.kernenergie.de)

Dirk Eidemüller „Das nukleare Zeitalter – Von der Kernspaltung bis zur Entsorgung“
Hirzel Verlag 2012

Informationen per Internet. World Nuclear Association
www.world-nuclear.org/info/mf21.html
international nuclear waste disposal.concepts
(Das ist eine Lobby-Organisation, aber technische Daten sind o.k.)

Anhang

Versorgung mit Uran – Nutzung von Plutonium

Uranpreis in USD pro lb Mitte 70er 25 USD - starke Schwankungen
Spielt aber kaum eine Rolle: Langfristige Verträge der Minengesellschaften
(1 t Natururan ca. 6000 USD → 1 t anger. U ca. 42.000 USD Rohstoffpreis→
+ 50.000 USD Anreicherungskosten→**Ca. 95.000 USD pro Tonne für Rohstoff + Anreicherung + Brennelementfertigung**

Abgereichertes Uran enthält noch 0,2 – 0,3 % U 235. Es wurde bislang kaum verwendet. (Uran hat als Metall eine Dichte von 19 g cm^3 , Nutzung als Ausgleichsgewicht bzw. militärisch in Geschossen.)
Durch Mischung mit Plutoniumoxid könnte **MOX**-Brennstoff erzeugt werden.
Bislang werden MOX-Brennstäbe aber aus genügend verfügbarem Natururan hergestellt. MOX-Brennstoff wird verwendel in Japan, Frankreich und wahrscheinlich Russland..

Das bei der Wiederaufarbeitung anfallende Uran enthält 0,4% U 236, das Neutronen absorbiert. Es ist darum für mit Wasser moderierte Reaktoren nicht verwendbar,
zusätzlich sind bis zu 0,9% U 235 enthalten.

Es könnte aber in **Schnellen Brütern** eingesetzt werden. Diese Reaktoren laufen bei höheren Temperaturen (Kühlung mit flüssigen Natrium).“Schnell“ bezieht sich auf die Geschwindigkeit der Neutronen (Kein Moderator). Bei entsprechender Befüllung wird mehr Pu erzeugt als die gespaltene Menge.an Pu.
Notwendig ist eine laufende chemische Aufarbeitung der Brennstoffe.
Anlagen bekannt in Japan +´Russland., projektiert in Indien.
Nachteile: Kühlung schwer zu beherrschen + in Bezug auf Bau und Betrieb erheblich teurer als Siedewasser- und Druckwasserreaktoren + erhöhter Anfall von Minoren Actiniden (Am, Cu, Np)

Die Sowjetunion hat die in die Ostblockstaaten gelieferten Brennstäbe stets zur Aufarbeitung und späteren Lagerung auf eigenem Territorium zurückgenommen. Russland hat angeboten Brennstäbe an andere Staaten im Leasingverfahren zu liefern: Der.Lieferpreis umfasst die Bereitschaft zur Rücknahme der abgebrannten Brennstäbe. Die Verweigerung dieses Angebots durch den Iran ist ein starkes Indiz für das Streben des Iran nach einer eigenen Bombe.

Häufige Argumente Pro Nuklearenergie

Bei der Erzeugung von Energie aus Kohle entstehen pro KWh 80 g Abfälle, bei nuklearer Energiegewinnung aber nur 0,12 g.
Das ist richtig, aber die Abfälle bei fossiler Energiegewinnung lassen sich teilweise nutzen (Schlacken), giftige Abfälle wie etwa Filterstäube relativ problemlos und kostengünstig tieflagern. mit Kosten von ca. 200 €/t)

Kernkraftwerke produzieren kein CO_2
Das ist richtig, soweit der laufende Betrieb betrachtet wird. Für je 10 KWh elektr. Leistung muß aber ca. 1 KWh Leistung für Kraftwerkbau, Bergbau, Transport, Aufbereitung, Abfallbeseitigung und Nachsorge aufgewandt werden. Ein großer Teil dieser Energiemenge (80-90%) wurde oder wird fossil erzeugt.
Kernenergie macht derzeit nur etwa 3 bis 4% der weltweit verbrauchten Primärenergiemenge aus.
In Deutschland wird weniger als 10 % des Primärenergiebedarfs durch Kernkraft erzeugt, dagegen werden 29% im Verkehr, 28% zur Raumheizung benötigt! Einsparungen in diesen Bereichen führen schneller und billiger zu verminderter Kohlendioxid-Emmision.

Beim normalen Betrieb eines Kernkraftwerks wird die Umgebung weniger mit Radioaktivität belastet, als beim Betrieb eines Kohlekraftwerks mit gleicher Leistung.
Kohle hat aufgrund eines sehr geringen Urangehalts eine Aktivität von 10 bis 100 Bq/kg. Der Flugstaub eines Kohlekraftwerks hat Aktivitäten zwischen 0,015 und 0,24 Bq/g. (Wesentlich Ra 226) - Wenn 1,5% des Flugstaubs sich in der Umgebung verteilen, dann ist die radioaktive Belastung zwischen 2 bis 10mal höher als rings um ein KKW. - Diese Berechnung wurde aber ohne Berücksichtigung einer Rauchgaswäsche zur Abscheidung von Schwefeldioxid vorgenommen. In solchen modernen Anlagen dürfte eher ein Faktor 1 anzusetzen sein. (Erdgas und Erdöl-Produkte sind praktisch frei von Uran).

In Südindien (Kerala) und Nordost-Brasilien werden auf bestimmten Böden Strahlendosen von bis zu 2000 Millirem/Jahr gemessen. Es wurden keine Schäden bei der einheimischen Bevölkerung gemessen.
Das ist richtig, aber: Es handelt sich um Uran und Thorium, das fest in Kristallen eingeschlossen ist (Monazitsande, bzw. Brannerit im anstehenden Gestein) Eine Inkorporation kann höchstens durch geringe austretende Radonmengen erfolgen. In den tropischen Gebieten werden Gebäude meist nur als Regen- und Wind-Schutz benutzt, offene Türen und Fenster, keine Anreicherung. - Die statistischen Erhebungen sind nicht sehr zuverlässig, in Kerala deuten sie immerhin auf verminderte Fruchtbarkeit hin.

Wärmeentwickelnde Abfallmenge bis 2023 in Deutschland

- 3.869 HAW-Kokillen mit 700 m^3

Brennelemente ohne Wiederaufarbeitung:

- 11.133 t Schwermetall mit 21.800 m^3 (12.636 t spent fuel)

THTR/AVR-Brennelemente aus Hamm-Uentrop + Jülich

- 457 THTR-Castorbehälter mit 1.900 m^3

- 65 Castor-B.MTR2 mit 160 m^3 (aus Forschungsreaktoren)

Summe ca. 25.000 m^3 , entspricht Würfel mit einer Kantenlänge von 30 m.

Wärmeentwickelnde Abfälle die nach 10 bis 60 Jahren Zwischenlagerung in der Grube Konrad deponiert werden können

- 600 MAW-Kokillen mit 110 m^3

- 4.104 HSM-Kokillen mit 740 m^3
(Brennstabhüllen +Edelstahl-Halterungen)

Abfälle aus Pilot- und Industrie-Konditionierungen

- 2.600 Mosaik-Behälter mit 3.400 m^3

Finanzielle Aspekte aus Sicht des Steuerzahlers

Die Summe der staatlichen Subventionen für die Kernenergienutzung seit den 60er Jahren wurde 1994 auf mehr als **40 Milliarden DM** geschätzt. Eine neuere Berechnung 2013 nennt insgesamt **210 Milliarden €.** Die starken Unterschiede erklären sich aus dem Umstand, dass teils nur direkt gewährte Summen, teils auch der Verzicht auf Zahlungen an den Staat oder Dritte gezählt wurden (Insbesondere Freistellung von Haftung im Schadensfall)

Zum Beispiel:Mitte der 90er Jahre förderte das BMFT entsprechende FuE-Projekte mit etwa **80 Millionen DM** pro Jahr. Mehr als 75% dieser Summe entfielen auf technische Projekte, also Entwicklungen für die eigentlich die Betreiber der Kernkraftwerke allein zuständig waren.

Diverse Angaben

Kernenergieanteil an der Stromversorgung im Sommer 2003:
Gesamt-EU 34% - Frankreich 78% /Belgien 58% / Schweden 46% /Schweiz 40%
Finnland 30% / Deutschland 29% / Spanien 26% / Grossbritanien 23%

Herbst 2003 Irak:
Zerstörte irakische Nuklearanlage Tuweitha, 18 km südöstlich von Bagdad. Bevölkerung aus umliegenden Dörfern hat nach Irakkrieg 2003 geplündert und vieles mitgenommen, insbesondere Fässer, Rohre, Kabel. Folge: Stark erhöhte Strahlenbelastung in vielen Fällen. Keine Kontrolle durch UN-Inspektoren wegen fehlender Erlaubnis der US-Militärbehörden!

Erster Kernwaffentest Nordkorea 2006:
Die Deutung der seismischen Registrierungen lassen auf eine Plutoniumbombe schliessen, die wegen unvollkommener Kompression nur teilweise zur Kettenreaktion führte!

Definitionen:

fission track
Alpha-teilchen verursachen in Festkörpern (meist ein Kunststoff) Störungen der Struktur. Durch Anlösen, bzw. Ätzung können diese Störungen sichtbar gemacht und ausgezählt werden. Wird benutzt um die Radon-Konzentration in der Luft zu bestimmen. - Kann zuweilen auch zur Altersbestimmung in der Archäologie benutzt werden

Energiedispersive Wellenlängen-Bestimmung:
energy **d**ispersive **a**nalysis of **X**-rays = **EDAX**
Gammastrahlen erzeugen in dotierten Halbleitern Ladungen (Elektronen + Elektronenlöcher). Die Zahl der Ladungen ist proportional zur Energie des Gammaquants. Benutzt wird meist ein mit Li dotierter Germaniumkristall.

Neutronenaktivierungsanalyse
Durch Bestrahlung mit Neutronen werden viele Elemente in kurzlebige radioaktive Elemente umgewandelt, die intensive Gammastrahlen emmitieren. Durch anschliessende EDAX können die Gehalte in der Probe ermittelt werden. Sehr billig und schnell da kein Aufschluss erforderlich ist! Es können insbesondere auch sehr geringe Gehalte und Spurenelemente bestimmt werden. -Wird routinemässig zur Bestimmung der Seltenen Erden in Gesteinen benutzt.- Kommezielle Anbieter in Kanada.

Indirekte Folgen von Tschernobyl nach 1987

Österreich. KKW Zwentendorf ging nicht in Betrieb

Italien 3 KKW stillgelegt / 5 in Bau gestoppt + Moratorium

Schweiz 10 j. Moratorium, aber 2007 Ausstieg abgelehnt

Spanien 5 Anlagen nicht weiter gebaut, 9 laufen bis jetzt

NL kein weiteres KKW gebaut

Belgien beschliesst 2002 einen langsamen Ausstieg

USA seit 1987 keine neuen KKW in Betrieb gegangen

Keine Auswirkung: F + Japan