**SITZUNGSBERICHTE**
**DER LEIBNIZ-SOZIETÄT**
**Band 17 • Jahrgang 1997**

**Reinhardt Becker Verlag Velten**

**ISSN 0947-5850 ISBN 3-89597-327-0**

## *Inhalt*

*Radioaktivität. Von Becquerel bis Tschernobyl, Teil II*

*Karl Friedrich Alexander*

Die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl. Bilanz nach zehn Jahren >>>

*E. Becker, J. Hutter, H. Klonk. Ch Krause, F. Philippczyk, M Reiner*

Die Kernenergie in Deutschland >>>

*Dietrich Schwarz*

Warum Kernenergie? Nichtklimatische Risiken >>>

*Albert Bayer*

Der anlagenexterne Notfallschutz - ein Werkzeug zur Verminderung des nuklearen Risikos >>>

*Georg Arens, Peter Brennecke, Dietrich Ehrlich*

Entwicklung und Fortschritte bei der Risikobewertung von Endlagern für radioaktive Abfälle >>>

Karl F. Alexander

# Die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl - Bilanz nach zehn Jahren*

In der Nacht vom 25. zum 26. April 1986 ereignete sich in der Nähe der ukrainischen Kleinstadt Tschernobyl der folgenschwerste Unfall in einem Kernkraftwerk seit dem Beginn der friedlichen Nutzung der Atomkernenergie zur Elektrizitätserzeugung. Ein solcher Unfall war bis dahin in Untersuchungen zur Sicherheit von Kernreaktoren nur als "hypothetischer" Unfall jenseits aller real für möglich gehaltenen Unfallabläufe (GAU: Größter Anzunehmender Unfall) eingeordnet worden, obwohl er bei der Standortwahl für Kernkraftwerke durchaus eine Rolle spielte.

Der zehnte Jahrestag dieses Ereignisses war Anlaß für die internationale Scientific Community, eine umfassende Bilanz zu ziehen über Ursachen und Folgen der Katastrophe, über Maßnahmen zur Begrenzung und Minderung ihrer Auswirkungen und über Schlußfolgerungen für die weitere Entwicklung der Kernenergetik. Dazu fand im April 1996 eine gemeinsame Konferenz der Europäischen Kommission, der Weltgesundheitsorganisation (WHO) und der Internationalen Atomenergie - Agentur (IAEA) in Wien statt [1]. In Vorbereitung darauf wurde im März in München ein Seminar des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) und der deutschen Strahlenschutzkommission (SSK) durchgeführt [2], und die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) publizierte im Februar eine detaillierte Dokumentation und Analyse [3]. Bereits 1995 wurde von der Ukrainischen Akademie der Wissenschaften ein umfangreicher Sammelband zu diesem Thema vorgelegt [4]. Auf der Basis dieses Materials will ich versuchen, eine kurze Zusammenfassung zu geben.

---

* erweiterter Text eines Vortrags vor der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 18.April 1996

Tabelle 1

| Nuklid | $T_{1/2}$ | Strahlung Art, [MeV] | Freisetzung [Bq] | % vom Inventar |
|---|---|---|---|---|
| *Edelgase:* | | | | |
| Kr-85 | 10,7 a | β: 0,67; kein γ | $3{,}3\times10^{16}$ | ≈100 |
| *Flüchtige* | | | | |
| J-131 | 8,04 d | β: 0,61; γ: 0,36 | $6{,}5\times10^{17}$ | 50 |
| Cs-137 | 30 a | β: 0,51; γ: 0,66 | $8{,}6\times10^{16}$ | 33 |
| *Schwerflüchtige* | | | | |
| Ce-144 | 284 d | β: 0,32; γ: 0,13 | $9{,}0\times10^{16}$ | 2,8 |
| Sr-90 | 29,1 a | β: 0,54; kein γ | $8{,}0\times10^{15}$ | 4,0 |
| *Transurane* | | | | |
| Pu-239 | 24.065 a | α: 5,15; γ: 0,013 | $3{,}4\times10^{13}$ | 3,5 |
| Pu-240 | 6.537 a | α: 5,16; γ: 0,045 | $5{,}3\times10^{13}$ | 3,5 |

*Die Freisetzung radiologisch bedeutsamer Radionuklide aus dem zerstörten Reaktor (Nach F.W. Krüger et al., Der Ablauf des Reaktorunfalls Tschernobyl 4 und die weiträumige Verfrachtung des freigesetzten Materials: Neuere Erkenntnisse und ihre Bewertung. [2])*

## 1. Die physikalisch-technischen Ursachen und der Ablauf des Unfalls

Die hauptsächliche physikalische Ursache des Unfalls verbirgt sich bereits im Grundprinzip des RBMK-Reaktortyps, der, beginnend mit dem ersten Versuchskraftwerk in Obninsk (1954), zum Arbeitspferd der ersten Etappe der kommerziellen Kernenergienutzung in der Sowjetunion (und nur dort) wurde. Dieser "Reaktor großer Leistung vom Kanaltyp" stellt offensichtlich eine Weiterentwicklung der für das militärische Programm errichteten Reaktoren zur Produktion von Plutonium dar. Es ist ein Graphitmoderierter und mit Wasser gekühlter thermischer Kernreaktor. Die Brennstoffstäbe aus leicht angereichertem Uran befinden sich in Druckrohren, die den aus Graphitblöcken aufgebauten zylindrischen Reaktorkern (Durchmesser ca. 12 m, Höhe ca. 7 m) vertikal durchziehen und von unter hohem Druck stehendem Kühlwasser durchflossen werden. Im Vergleich zu den wesentlich kompakteren Druckwasserreaktoren (deren Vor-

fahren die Antriebsreaktoren der Atom-U-Boote sind) hat die Konstruktion der RBMK-Reaktoren mit ihrem aus neutronenphysikalischen Gründen wesentlich größeren Volumen den Vorteil, daß sie kein äußeres, dem Arbeitsdampfdruck standhaltendes Druckgefäß benötigen und mit einer geringeren Leistungsdichte im Arbeitsvolumen auskommen. Ein grundsätzliches Sicherheitsproblem besteht jedoch in der Kombination von Graphit als Moderator und Wasser als Kühlmittel, da in diesem Fall die Absorbereigenschaft des Wassers für thermische Neutronen einen wesentlichen Einfluß auf das Regelungsverhalten des Reaktors hat.

Die Steuerung und Regelung eines Kernreaktors besteht bekanntlich in der Einstellung des für die geforderte Wärmeleistung benötigten Neutronenflusses mit Hilfe beweglicher Neutronenabsorber (Regel-, Steuer- oder Abschaltstäbe). Mit Hilfe dieser Elemente wird die Reaktivität $\rho = (k-1)/k$ manipuliert, welche die zeitliche Änderung der Neutronendichte n(t) im aktiven Volumen charakterisiert. k ist hierbei der effektive Multiplikationsfaktor, um den sich in der Kettenreaktion die Spaltneutronendichte von Generation zu Generation vermehrt. Im stationären Zustand gilt also $k = 1$, $\rho = 0$, für $k > 1$, $\rho > 0$ steigt die Neutronendichte und damit proportional die Leistung, für $k < 1$, $\rho < 0$ sinkt sie mit der Zeit. Vereinfacht kann dies Verhalten mit der Formel

$$n(t) = n_0 \exp(t/T)$$

dargestellt werden, wobei die Reaktorperiode T mit der mittleren Lebensdauer einer Neutronengeneration zusammenhängt. In der Nähe des Gleichgewichts wird diese Zeit wesentlich dadurch bestimmt, daß ein kleiner Bruchteil $\beta \approx 0{,}007$ der die Kettenreaktion aufrechterhaltenden Spaltneutronen erst über den Umweg des Zerfalls einiger kurzlebiger Spaltproduktkerne mit einer mittleren Lebensdauer $t_v \approx 12$ sec emittiert wird. Für die Reaktorperiode gilt solange $\rho < \beta$ ist

$$T \cong \frac{(\beta - \rho) t_v}{\rho}$$

und dementsprechend erfolgt der exponentielle Anstieg oder Abfall langsam und ist gut regelbar. Übersteigt aber $\rho$ den Wert $\beta$, so wird der Anstieg der Kettenreaktion hauptsächlich von den prompt emittierten Spaltneutronen getragen, deren Laufzeit bis zur Absorption $t_0$ kleiner als eine Millisekunde ist. Damit verkürzt sich die Reaktorperiode drastisch auf $T \cong t_0 / \rho$, der Reaktor wird praktisch unregelbar und kann ohne zu-

sätzliche leistungsbegrenzende Effekte in einer exponentiell verlaufenden Leistungsexkursion zerstört werden. Die Erreichung eines solchen prompt-kritischen Zustands muß daher unter allen Umständen durch automatisch - naturgesetzlich wirkende Effekte ausgeschlossen werden.

Die Reaktivität $\rho$ hängt - außer von der Stellung der Steuer- und Regelstäbe - noch von mehren Materialparametern ab wie Dichte und Temperatur von Brennstoff, Moderator und Kühlmittel, zeitlich variable Vergiftung durch stark Neutronen absorbierende Spaltprodukte (Xenonvergiftung) u.a., die sich ihrerseits mit der erzeugten Kernenergieleistung verändern. Ein stabiler Leistungsbetrieb des Reaktors ist nur dann möglich, wenn jede spontane Leistungserhöhung eine Rückführung der Reaktivität auf den Gleichgewichtswert bewirkt. In allen zugelassenen Betriebszuständen muß der Leistungskoeffizient der Reaktivität negativ sein.

Dies gilt selbstverständlich auch für die RBMK-Reaktoren im normalen Leistungsbetrieb. Die Besonderheit dieses Typs besteht jedoch darin, daß eine Verminderung der Kühlmittelmenge z.B. durch Dampfblasen oder Auslaufen stets die Reaktivität erhöht. Im Normalbetrieb, der ein teilweises Sieden des Kühlwassers zuläßt, wird dieser positive "Voideffekt" überkompensiert durch andere, negativ auf die Reaktivität wirkende Effekte. Dies gilt jedoch nicht für alle möglichen Betriebszustände, u.a. bei sehr niedriger Reaktorleistung oder bei Ausfall der Kühlmittelpumpen.

Druckwasser- und Siedewasserreaktoren, bei denen das Wasser auch die Moderatorfunktion wahrnimmt, zeichnen sich demgegenüber durch einen stark negativen Voideffekt aus, der bei jedem Kühlmittelverlust die Kettenreaktion sicher abschaltet. In der Folge kann dann allerdings der sehr gefährliche Kernschmelzunfall eintreten, der jedoch durch eine rechtzeitige Notkühlung des Reaktorkerns vermieden werden kann (Harrisburg!).

Es ist eine Ironie der Geschichte, daß die Tschernobyl-Katastrophe durch ein Experiment ausgelöst wurde, das die sichere Beherrschung eines drohenden Kühlmittelverlust-Störfalls bei Ausfall der normalen Stromversorgung nachweisen sollte. Dieser eigentlich bereits für den Probebetrieb des 4. Reaktorblocks des Kernkraftwerk Tschernobyl geforderte Sicherheitsnachweis sollte anläßlich einer planmäßigen Abschaltung der Anlage zur Revision nach einer längeren Betriebsperiode nachgeholt werden. Ziel des Versuchs war, zu prüfen, wie lange die Hauptumwälzpumpen nach einer Schnellabschaltung der Turbine noch von dem aus-

laufenden Generator mit Strom versorgt werden können. Im Selbstverständnis der Ausführenden handelte es sich um ein rein elektrotechnisches Experiment, da zur Gewährleistung der Reaktorkühlung der zweite Satz von Hauptumwälzpumpen unabhängig davon in Betrieb bleiben sollte. Die Chronologie der zum Unfall führenden Ereignisse war die folgende [3]:

- Bereits in den frühen Morgenstunden des 25. April war der Reaktor auf 50 % der Nennleistung abgefahren worden. In Vorbereitung auf den Test wurde das Notkühlsystem abgeschaltet. Auf Anforderung der Verteilerstation in Kiew mußte dann aber weiter Leistung ins Netz eingespeist und der Testbeginn in die folgende Nacht verschoben werden.

- Um 23:10 Uhr konnte das Abfahren auf den für den Versuch vorgesehenen thermischen Leistungsbereich von 700 - 1000 MW fortgesetzt werden. Dieser Bereich wurde jedoch aus nicht bekannten Gründen unterschritten.

- Um 0:28 Uhr des 26. April kam es bei einer thermischen Leistung von 500 MW zu Schwierigkeiten bei der Umschaltung der Reaktorleistungsregelung und die Reaktorleistung fiel praktisch auf Null. Durch die Stellung der Steuerstäbe war die vorzuhaltende betriebliche Reaktivitätsreserve mit einem Äquivalent von 28 statt mindestens 30 Stäben deutlich niedriger als zulässig. Der Reaktor hätte abgeschaltet und der Versuch verschoben werden müssen. Statt dessen wurde die Leistung durch weiteres Ausfahren von Steuerstäben so weit wie möglich erhöht und bei 200 MW stabilisiert.

- Um 0:43 Uhr wurde - entgegen dem Testprogramm - das Signal "Ausfall der Turbine", das zur automatischen Notabschaltung des Reaktors bei Einleitung des Versuchs geführt hätte, unwirksam gemacht, um den Versuch eventuell wiederholen zu können.

- Unmittelbar vor Einleitung des Versuchs befand sich die Anlage in einem äußerst instabilen Zustand, da ein ungünstiger Beladungszustand, ein zu niedriges Leistungsniveau mit ungünstiger Leistungsdichteverteilung, ein zu hoher Kühlmitteldurchsatz im Kern, ein verminderter Speisewasserdurchsatz mit Erhöhung der Kühlmitteltemperatur am Kerneintritt und ein instationäres Verhalten der

räumlichen Xenonvergiftung vorlagen. Zu diesem Zeitpunkt betrug die betriebliche Reaktivitätsreserve nur noch 7 - 8 Steuerstäbe.

- Um 1:23:04 Uhr wird durch Schnellabschaltung der Turbine der Versuch eingeleitet. Wie vorgesehen laufen vier Hauptkühlmittelpumpen aus. Die damit verbundene Verringerung des Durchsatzes und Erhöhung der Temperatur des Kühlwassers führt durch den Voideffekt einer vermehrten Dampfblasenbildung zu einem Leistungsanstieg, den das automatische Regelstabsystem nicht beherrschen kann.

- In dieser Situation wird um 1:23:40 Uhr der Havarieknopf gedrückt. Die Abschaltstäbe und alle Steuerstäbe fahren in den Reaktorkern ein. Dadurch wird jedoch das Gegenteil der beabsichtigten Wirkung erzielt: Die Reaktivität des Reaktors wächst innerhalb von Sekunden in den prompt-kritischen Bereich. Nach 3 Sekunden erscheint das Signal "Reaktorperiode < 20 sec" und die Leistung übersteigt 530 MW, nach 9 Sekunden erscheint das Störfallsignal "Druckanstieg im Reaktorbehälter".

- Eine Sekunde später wird der Reaktor durch eine gewaltige Dampfexplosion zerstört. Teile des glühenden Brennstoffs werden herausgeschleudert und lösen an den umliegenden Gebäuden Brände aus, die gegen 5 Uhr morgens gelöscht sind, aber das volle Ausmaß der Katastrophe wird erst nach Tagen wirklich deutlich.

Alle Effekte, die zur Auslösung der Katastrophe beitrugen, vor allem natürlich der für den RBMK besonders gefährliche Voideffekt des Kühlwassers, waren den sowjetischen Kernenergiespezialisten bekannt, sogar die erstaunliche Tatsache, daß beim Einfahren von ganz ausgefahrenen Steuerstäben vorübergehend ein positiver Reaktivitätseffekt auftreten kann, der durch unterhalb des Absorberteils der Stäbe angebrachte Wasserverdränger verursacht wird. Die einzuhaltenden Grenzen für einen sicheren Betrieb des Reaktors in Bezug auf die minimal zulässige Reaktivitätsreserve und die minimal zulässige Reaktorleistung berücksichtigten dies, waren jedoch nur durch Betriebsvorschriften geregelt und nicht eingebunden in das automatische Schutzsystem. Offensichtlich war auch das Betriebspersonal unzureichend informiert über den Sinn solcher Betriebsvorschriften.

Nach der GRS-Studie [3] waren die Hauptursachen des Unfalls

- gravierende Mängel der reaktorphysikalischen Auslegung und der Auslegung der Abschalteinrichtungen,
- ein politisches und organisatorisches System, welches nicht in der Lage war, diese Mängel abzustellen, obwohl sie lange vor dem Unfall bekannt waren,
- ein sicherheitstechnisch unzureichend durchdachtes und geprüftes Versuchsprogramm,
- eine Betriebsführung und Bedienungseinrichtungen, die das Personal bei der Wahrnehmung seiner Verantwortung für die Sicherheit überforderten.

Inzwischen sind die größten Sicherheitsmängel dieser Art unter starker Beteiligung internationaler Organisationen und Experten durch Nachrüstungen an den RBMK-Reaktoren behoben worden.

## 2. Die Auswirkungen

Der Reaktor hatte gerade eine vollständige Betriebsperiode absolviert und ein hohes Radioaktivitätsinventar in den verbrauchten Brennstoffelementen angesammelt. Durch die Explosion wurden die gesamte Reaktorstruktur zerstört, etwa 3,5 % des hoch radioaktiven Brennstoffs direkt ausgestoßen und in der unmittelbaren Umgebung verteilt. Ein größerer Teil der Radioaktivität wurde aber erst in der Folgezeit durch den Graphitbrand und das teilweise Schmelzen des Kerbrennstoffs freigesetzt, durch den Kamineffekt hoch in die Atmosphäre getragen und dort von Wind und Wetter großflächig verteilt. Erst im Verlauf von 10 Tagen gelang es durch die heroischen Anstrengungen der "Liquidatoren", die Reaktorreste zu löschen, mit aus der Luft abgeworfenen Materialien abzudecken und die massive Aktivitätsfreisetzung zu beenden. Die bis zum 6. Mai 1986 freigesetzte Menge radioaktiver Stoffe (ohne Berücksichtigung von Edelgasen und Tritium) wird zu $2 \times 10^{18}$ Bequerel abgeschätzt. Zum Vergleich: Bei dem vor Tschernobyl bisher einzigen Reaktorunfall mit erheblicher Belastung der Umwelt durch Radioaktivität, dem Brand des Grahitpiles No. 1 in Windscale (Oktober 1957), wurde etwa 1 Tausendstel dieser Menge freigesetzt [5].

Die Daten der für die radiologischen Auswirkungen der Tschernobyl-Katastrophe auf Mensch und Umwelt besonders wichtigen Radionuklide sind in Tabelle 1 zusammengefaßt. Für die großflächige Kontamination von Landstrichen haben vor allem die leicht flüchtigen radioaktiven Isotope des Jod und des Cäsiums Bedeutung, die mit dem Regen aus den herumziehenden Abgasschwaden in Form eines bizarren Flickenteppichs niedergeschlagen wurden. Während das Jod-131 wegen seiner kurzen Halbwertszeit von 8 Tagen nur in den ersten Wochen gefährlich war, hat das Cs-137 mit seiner Halbwertszeit von 30 Jahren weite Gebiete in der Umgebung des Kraftwerks und auch große, nicht zusammenhängende Gebiete in weiterer Entfernung so verseucht, daß umfangreiche Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor radioaktiver Strahlung getroffen werden mußten. So wurden bereits am Abend des 27. April 1986 die Stadt Pripjat und bis zum 5. Mai eine Zone mit dem Radius von 30 km um das Kraftwerk einschließlich der Stadt Tschernobyl vollständig evakuiert. Weitere Umsiedlungen aus entfernteren Gebieten folgten, so daß die Zahl der umgesiedelten Personen fast 400.000 erreichte. Ein Teil dieser Menschen aus weniger belasteten Ortschaften konnte aber später wieder zurückkehren ([3], S. 86).

Entsprechend ihrer unterschiedlichen radioaktiven Belastung wurden 1986 die betroffenen Gebiete der Ukraine, Rußlands und Belorußlands in drei Kategorien eingeteilt (Tabelle 2). In den Gebieten der strikten Kontrolle, die sofort evakuiert wurden, überstieg die anfängliche Strahlenexposition der Bevölkerung durch Cs-137 die natürliche Strahlendosis um mehr als das Doppelte. Die beiden anderen Zonen unterliegen besonderen Kontrollen, erfordern aber in der Regel keine ständige Umsiedlung.

Parallel zu den Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung wurde mit einem ungeheuren Aufwand an Material und Menschenkraft daran gearbeitet, die Quelle der radioaktiven Verseuchung, den zerstörten Reaktorblock, durch einen riesigen "Sarkophag" von der Umwelt zu isolieren und die unmittelbare Umgebung des Kraftwerks zu dekontaminieren, damit dort die Einsatzkräfte ("Liquidatoren") und das Personal der unbeschädigt gebliebenen und weiter arbeitenden Kraftwerksblöcke sich aufhalten konnten. Die damit einhergehende berufsbedingte Strahlenbelastung der Beschäftigten mußte durch dosimetrische Kontrolle und notfalls auch durch Personalrotation in Grenzen gehalten werden, um gesundheitliche Schäden soweit wie möglich zu vermeiden.

Tabelle 2

| Kontaminationszonen | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|
| Belastung durch Cs-137 | 185 - 555 kBq/m² | 555 - 1.480 kBq/m² | über 1.480 kBq/m² |
| Strahlendosis | bis zu 2 mSv/a | bis zu 5 mSv/a | über 5 mSv/a |
| Maßnahmen | keine Evakuierung, regelmäßige Kontrolle der Strahlensituation | zeitweise Evakuierung, Rücksiedlung möglich, ständige Kontrolle, Verzehrverbot angebauter Nahrungsmittel | sofortige Evakuierung, dauernde Umsiedlung, Zutrittsverbot und strikte Kontrolle |
| Betroffene Flächen | 14.097 km² | 7.150 km² | 3.250 km² |
| Einwohner | 544.300 | 234.000 | 33.800 |

*Umweltbelastung durch Radioaktivität: Mit Cs-137 kontaminierte Gebiete in der Ukraine, Rußland und Belorußland. (Nach Angaben in [4] und [3])*

### 3. Gesundheitliche Folgen für die betroffenen Menschen

Seit langem weiß man, daß hohe Dosen ionisierender Strahlung Menschen und andere Lebewesen schädigen oder sogar töten können. Als Maßstab für die physikalische Wirksamkeit ionisierender Strahlung gilt die in dem absorbierenden Stoff durch die Strahlung deponierte Energie: 1 Gray (Gy) entspricht einem Joule pro kg. Die unterschiedliche biologische Wirksamkeit verschiedener Strahlungsarten für den menschlichen Körper kann durch entsprechende Faktoren berücksichtigt werden, woraus aus dem Gray die Maßeinheit Sievert (Sv) für die biologische Strahlungsdosis wird, die dem gesamten Strahlenschutz zugrundeliegt. Die natürliche Strahlenbelastung, der die Menschen immer ausgesetzt sind, beträgt mindestens zwei mSv/a, kann diesen Betrag je nach Wohnort auch um das mehrfache überschreiten. Tausendmal größere Dosen rufen akute Strah-

lenkrankheit hervor, die oberhalb von fünf Sv tödlich verlaufen kann. Langzeitschäden, insbesondere eine erhöhte Krebsinzidenz, sind schon bei wesentlich geringeren Dosen möglich.

Mit der Entwicklung der Kerntechnik entstand eine ausgefeilte dosimetrische Meßtechnik und ein international abgestimmtes Regelwerk für maximal zulässige Strahlenexpositionen durch kerntechnische Anlagen, einerseits für die berufsbedingt damit umgehenden Personen und andererseits für die allgemeine Bevölkerung. Bei der Anwendung dieser Regeln hat sich das ALARA-Prinzip (As Low As Reasonably Attainable) durchgesetzt, so daß im Normalbetrieb die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte zumeist weit unterschritten und nur in wenigen Einzelfällen erreicht oder überschritten werden. Die Umwelt-Strahlungsbelastung durch den normalen Betrieb der Kerntechnik liegt auf Grund dieser Schutzmaßnahmen weit unter 1 % des durch die natürliche Radioaktivität und die kosmische Strahlung verursachten Pegels.

Der Tschernobyl-Unfall war aber eine Katastrophe größten Ausmaßes, bei der sämtliche Schutzbarrieren durchbrochen wurden. Es sind kaum Bedingungen denkbar, unter denen ein noch größerer Teil des radioaktiven Inventars eines Reaktors, das am Ende einer Betriebsperiode seine maximale Größe erreicht hatte, in die Umgebung gelangen könnte. Insofern kann Tschernobyl durchaus als Maßstab für den "Größten hypothetischen Unfall" gelten, dessen Risiken und die zu ziehenden Lehren an der Wirklichkeit überprüfbar geworden sind.

Die Auswirkungen waren tatsächlich schrecklich. 135.000 Bewohner der engeren Umgebung mußten in den ersten Tagen nach dem Unfall evakuiert werden, weitere hunderttausende wurden in den folgenden Monaten und Jahren aus entfernteren höher belasteten Gebieten umgesiedelt. Etwa 10.000 Quadratkilometer Land sind engere Kontrollzonen, in denen die zusätzliche Strahlenexposition der Einwohner mehr als die natürliche Intensität beträgt (mehr als 2 mSV pro Jahr).

Die sozialökonomischen, sozialpsychologischen und damit auch gesundheitlichen Auswirkungen der Massenumsiedlung einer bodenständigen Bevölkerung unter der verschärfenden Bedingung der beginnenden Agonie der Sowjetmacht mußten allein schon gewaltig sein. Diese sind, aber wie sich zeigte hauptsächlich auf indirekte Weise, der radioaktiven Verseuchung großer Gebiete anzulasten, denn der Grund für die Umsiedlungen war ja, die Menschen vor einer möglicherweise gefährlich hohen Strahlenexposition zu schützen.

**5. Die Strahlungsopfer, Wirklichkeit und Mythos**

Durch intensive Arbeit einer Vielzahl internationaler Expertenteams der WHO und anderer Organisationen wurden die unmittelbar durch Strahlungseinwirkung auf den menschlichen Organismus verursachten Todesfälle und Gesundheitsschäden erfaßt und Prognosen über mögliche Spätschäden gegeben [1], [2], [6]:

Als der Unfall geschah, wurden die 444 Beschäftigten am Reaktorstandort hohen Strahlendosen ausgesetzt. Zwei von ihnen starben sofort. Etwa 300 wurden in Krankenhäuser eingewiesen, und bei 134 wurde eine akute Strahlenkrankheit diagnostiziert. Davon starben 28 innerhalb der ersten drei Monate. Von den Beschäftigten, die sich von der akuten Strahlenkrankheit erholten, litten etwa 30 % an verschiedenen gesundheitlichen Störungen.

Eine besondere Gruppe stellen die ca. 200.000 Menschen dar, die als "Liquidatoren" unter Strahlungseinwirkung zeitweilig an den Arbeiten zur Eindämmung der Folgen des Unfalls, z.B. beim Bau des Sarkophags, beteiligt waren. Nach den erfaßten radiologischen Daten erhielten diese Personen in der Regel Ganzkörperdosen von 50 - 250 mSv, wobei die Belastung der Einsatzkräfte in den ersten Tagen vermutlich größer war. Bei den Liquidatoren gibt es bisher keine Erkenntnisse über einen Anstieg typischer Folgewirkungen durch die Strahlenexposition wie Leukämie, Schilddrüsenkrebs oder andere Tumore, jedoch erhöhte sich die Anfälligkeit gegenüber anderen Krankheiten ohne direkten Bezug zur Strahlungsexposition.

Offensichtliche Spätfolgen der Strahlenwirkung auf die Bevölkerung sind bisher nur im verstärkten Auftreten von Schilddrüsenkrebs bei Personen beobachtet worden, die zur Zeit des Unfalls Kinder waren. Während der ersten Wochen nach dem Unfall war radioaktives Jod mit einer Halbwertszeit von acht Tagen, das sich bei Inkorporation sehr stark in der Schilddrüse anreichert, das gefährlichste Radionuklid. Es wird berichtet, daß mehr als fünf Millionen Menschen Jodtabletten als Schutzmaßnahme erhielten (um die Aufnahme von radioaktivem Jod zu blockieren), aber eine große Zahl von Kindern erhielt diese Tabletten nicht.

Mehr als 50.000 Kinder, die nach 1971 und vor 1987 geboren wurden und in kontaminierten Gebieten lebten, wurden untersucht und mit Kindern in nicht kontaminierten Gebieten verglichen, weil schwere Schilddrüsenerkrankungen befürchtet wurden. Dabei wurden zwischen 1986 und

1994 insgesamt 565 Fälle von Schilddrüsenkrebs diagnostiziert. Dies entspricht, je nach dem Grad der Kontamination der betroffenen Gebiete, einer Zunahme der Inzidenzrate auf das Acht- bis 100-fache des normalen Wertes (ein Fall auf eine Million Kinder). Glücklicherweise ist dieser Krebs relativ gut heilbar.

Die Aussagen zu weiteren möglichen Spätschäden sind:

Es gab keinen signifikanten Anstieg der Inzidenz von Leukämie und anderen Blutkrankheiten. In Anbetracht der kurzen Zeitspanne für die Studie war dies zu erwarten. Da jedoch der Höhepunkt der Inzidenz von Blutkrankheiten nach mehr als 10 Jahren nach dem Unfall auftreten kann, sind für diese Krankheiten Langzeitstudien erforderlich.

Es gibt Anzeichen für die Annahme, daß Störungen der geistigen Entwicklung und Störungen in der Verhaltensweise und den emotionalen Reaktionen einer kleinen Gruppe von Kindern aufgetreten sind, die in utero strahlenexponiert wurden. Inwieweit Strahlung zu diesen psychologischen Störungen beigetragen hat, kann nicht bestimmt werden, da die individuellen dosimetrischen Daten fehlen.

Bei der im Anschluß an die Katastrophe intensivierten medizinischen Betreuung aller betroffenen Personengruppen wurde eine statistisch erhöhte Anfälligkeit für Krankheiten festgestellt, die keinen Zusammenhang mit der Strahlungsbelastung erkennen lassen. Dazu heißt es in [6]:

"Die psychosozialen Wirkungen, von denen angenommen wird, daß sie mit einer direkten Strahlenexposition nicht in Beziehung stehen, ergaben sich aus dem Mangel an Information sofort nach dem Unfall, Streß und Trauma der Zwangsumsiedlung in weniger kontaminierte Gebiete, dem Bruch sozialer Bindungen in der Gemeinschaft, und der Angst, daß die Strahlenexposition gesundheitliche Spätschäden verursachen könnte.

Der unmittelbare psychologische Eindruck glich dem von Naturkatastrophen wie Erdbeben, Bränden oder Überschwemmungen. ... Nationale Gesundheitsregister verzeichneten eine signifikante Erhöhung bei vielen Krankheiten, die nicht mit Strahlung im Zusammenhang stehen. ... Da es derzeit nicht genügend Beweise dafür gibt, daß diese Krankheiten strahleninduziert sind, ist es möglich, daß solche Probleme aus dem beträchtlichen psychologischen Streß durch den Unfall resultieren."

1991 - 1993 wurde von Wissenschaftlerteams aus Deutschland ein Meßprogramm zur Bestimmung der Strahlenexposition der Bevölkerung in

den hochkontaminierten Gebieten um Tschernobyl durchgeführt, wobei mehr als 300.000 Personen erfaßt wurden. Die Meßergebnisse haben gezeigt, daß etwa 98 % dieser Personen eine unbedenkliche Strahlenexposition aufweisen. Ein erhöhtes Gesundheitsrisiko ist für diese Menschen auszuschließen. In 2 % aller Fälle wurden Aktivitäten nachgewiesen, die eine jährliche Strahlenbelastung im Bereich der beruflich strahlenexponierten Personen erwarten lassen, ohne jedoch die dafür geltenden Grenzwerte zu erreichen (Bericht von R. Hille in [2], S. 87).

Die hier aufgezählten überprüften Fakten bestätigen die Kenntnisse, die man auch vor dem Unfall über die gesundheitlichen Folgen von Strahlungseinwirkung hatte, sie stimmen allerdings wenig mit dem in der Öffentlichkeit weit verbreiteten Bild von den in die Hunderttausende gehenden "Strahlenopfern" überein. Sie widerlegen vielmehr die oft hysterische Züge tragende Angst auch vor der geringsten Berührung mit Strahlung und allem, was mit "Atom" zu tun hat.

So geisterte im April 1995 eine Meldung durch die internationale Presse, in der von 125.000 Todesfällen infolge des Reaktorunfalls in Tschernobyl berichtet wurde. Diese vom Gesundheitsministerium der Ukraine genannte Zahl meinte aber die Gesamtzahl aller Todesfälle zwischen 1988 und 1994 in der betroffenen Bevölkerung von etwa 2,5 Millionen und liegt im Bereich der gesamten normalen Todesrate. Die tatsächlich direkt und indirekt durch den Unfall verursachten Todesfälle sind auch ohne solche wahnwitzigen Übertreibungen schlimm genug.

In der BRD gab es 1986 eine Vielzahl hysterischer Reaktionen auf den radioaktiven Fallout aus Tschernobyl, der selbst im am stärksten betroffenen Süddeutschland nicht einmal 10% zur natürlichen Strahlenexposition der Bevölkerung beitrug. Eine Auswahl davon wurde von Müller-Ullrich in seinem Buch über "Medienmärchen" unter der Überschrift "Tschernobyl - Der Medien-GAU" beschrieben [7].

Ein besonders abstruses Beispiel war das Problem der "Strahlenmolke": Wegen der Kontamination der bayrischen Weiden mit Cs-137 war die Milch entsprechend radioaktiv belastet und wurde deshalb zu Käse verarbeitet, wobei sich die Aktivität in dem dabei anfallenden Molkepulver zu etwa 5000 Bq/kg anreicherte. Was sollte damit geschehen? Die Strahlenschutzkommission hatte keine Bedenken, dieses Produkt wie üblich als Futtermittel in der Rinder- und Schweinezucht einzusetzen. Auch gegen eine Verwendung als Bodendünger bestanden unter Strahlenschutzgesichtspunkten keine Bedenken. Weite Teile der ideologisch

aufgeheizten deutschen Öffentlichkeit waren jedoch nicht bereit, die Überlegungen der SSK zur Kenntnis zu nehmen.

So wurden 5000 Tonnen dieser "gefährlichen" Fracht wochenlang, gehetzt von den Medien, in Güterwagen durchs Land gefahren, bis sie beschlagnahmt und unter dem Schutz der Bundeswehr eingelagert wurden. Schließlich baute man zur Beruhigung der Öffentlichkeit im stillgelegten Kernkraftwerk Lingen eine spezielle Anlage zur "Entseuchung" des Pulvers. Bis 1990 war diese Aufgabe geschafft und das von der Radioaktivität befreite Produkt konnte für 600.000 DM als Tierfutter verkauft werden. Gekostet aber hatte die Aktion die Steuerzahler 100 Millionen DM (E. Oberhausen, D. Gumprecht, Empfehlungen der Strahlenschutzkommision, [2], S.153).

Zur Einschätzung der vermeintlichen Gefahr, die von der Strahlenmolke ausging, genügt der Vergleich mit Kalidünger. Das natürliche Element Kalium, dessen Gewichtsanteil in der Erdkruste 2,4 % beträgt, hat seit seiner Entstehung vor der Bildung des Sonnensystems das radioaktive Isotop K-40 mit einer Halbwertszeit von 1,3 Milliarden Jahren. Kalidünger ($K_2O$), den man in jedem Gartenmarkt kaufen kann, erhält dadurch eine spezifische Aktivität von 25.000 Bq/kg, die also dem fünffachen der Aktivität der Strahlenmolke entspricht. Ein erwachsener Mensch enthält ca. 140 g Kalium in seinem Körper, also etwa ebensoviel an K-40-Aktivität wie ein Kilogramm Strahlenmolke an Cs-137-Aktivität. Hinzu kommt, daß die chemischen und radiobiologischen Eigenschaften von K-40 und Cs-137 ähnlich, die von ihnen pro Bequerel auf den Menschen ausgeübten Wirkungen also vergleichbar sind.

Eine ausgezeichnete Darstellung der radiologischen Konsequenzen von Tschernobyl und ihre verzerrte Wahrnehmung durch die Öffentlichkeit hat A.J. Gonzáles in seinem Vortrag "The Radiological Consequences of Chernobyl: A Saga Towards the Truth?" ([2], S.23) gegeben. Ich möchte hier seinen Epilog im Original zitieren:

"As the end of the saga on the Chernobyl consequences seems to be approaching, some reflections are in order. A major responsibility of contemporary radiation protection science is to show the Chernobyl consequences in the proper light. The facts statet should be represented as true rather than fiction. This will not be an easy task. The media's fable of Chernobyl has already raised his head. It has been fuelled by local political interest, scandalmongers and sensation hunters. A catastrophe as Chernobyl had to have far-reaching consequences: the fact that it may

have had relatively modest health consequences was simply undesired news, particularly in the atmosphere of *glasnost* and *perestroika*. Scientists nonetheless have the obligation to write the facts as they are and these should be readable at least twice rather than grasped all at once. They must stick to the stable truth and avoid the temptation of considering the truth as a fluid. If the scientist persits, the truth about Chernobyl will finally emerge."

## 6. Die Zukunft der Kernenergie

Zweifellos markiert Tschernobyl eine Zäsur in der weltweiten Entwicklung der Kernenergetik. Deren Perspektive kann nur dann Bestand haben, wenn in Zukunft Unfälle vergleichbarer Dimension mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden können. Die Katastrophe wurde durch eine sehr unglückliche Kombination physikalisch-technischer Unzulänglichkeiten der Reaktorkonstruktion, einer inkompetenten Betriebsführung und der vollkomenen Vernachlässigung sicherheitstechnischer Aspekte bei der Planung und Durchführung eines riskanten Experiments verursacht. Daraus sind kurz-, mittel- und langfristig die Lehren zu ziehen.

Bei den noch arbeitenden RBMK-Reaktoren im Bereich der früheren Sowjetunion wurde kurzfristig durch Veränderungen der Steuer- und Regeltechnik und eine Erhöhung der Brennstoffanreicherung die Beherrschung des Voideffekts wesentlich verbessert, die Gefahr einer promptkritischen Leistungsexkursion damit wirksam reduziert. Mittelfristig sollen auch die noch intakten beiden anderen Blöcke des KKW Tschernobyl stillgelegt werden. Langfristig werden sicher keine weiteren Reaktoren dieses Typs gebaut werden.

International haben die meisten KKW mit Wasser moderierte und gekühlte Reaktoren (Druck- und Siedewasserreaktoren). Hier hat der Voideffekt negatives Vorzeichen und verhindert damit in jedem Betriebszustand eine spontane Leistungsexkursion. Das größte Sicherheitsrisiko stellt bei dieser Variante der Störfall Kühlmittelverlust dar, da dieser zum Schmelzen der Brennstoffelemente führen kann. Bei den gegenwärtigen Konstruktionen sind Szenarien nicht völlig auszuschließen, die zu einer Durchbrechung des äußeren Reaktorcontainments und damit zur Freisetzung von Radioaktivität in die Umwelt führen könnten. Bei dem einzigen bisherigen Unfall dieser Art (Harrisburg 1978) konnte allerdings diese

Konsequenz verhindert werden. Mit einer Vielzahl probabilistischer Sicherheitsanalysen der konkreten Auslegungsvarianten wurde die Eintrittswahrscheinlichkeit eines auslegungsüberschreitenden Kernschmelzunfalls abgeschätzt. Beim gegenwärtigen Stand der Technik entspricht diese hypothetische Eintrittswahrscheinlichkeit einem solchen Ereignis auf 100.000 Reaktorbetriebsjahre. Bei Weiterentwicklung der gegenwärtigen Technologie mit dem Ziel, auch den Kernschmelzunfall innerhalb des äußeren Containments sicher zu lokalisieren (Konzept Europäischer Druckwasserreaktor) wäre das Risiko der Katastrophe dann sicher kleiner als 1 Fall auf einige Millionen Reaktorbetriebsjahre. Es gibt übrigens auch Reaktorkonzepte, wie z.B. den bereits erprobten gasgekühlten Hochtemperaturreaktor, bei denen auch beim vollständigen Ausfall aller Sicherheitseinrichtungen ein Kernschmelzunfall prinzipiell nicht möglich ist. Leider wurde in der BRD diese perspektivreiche Entwicklung abgebrochen.

Die weitere Erhöhung der technischen Sicherheit von Kernkraftwerken weit über den Stand vor Harrisburg und Tschernobyl hinaus ist also keine ferne Utopie. Unabdingbare Voraussetzung aber ist und bleibt außerdem eine hohe Sicherheitskultur im Management sowie fachliche Kompetenz und Verläßlichkeit derjenigen Menschen, denen der Umgang mit dieser sensiblen Technik anvertraut ist.

Es gibt viele Untersuchungen über die mit verschiedenen Energietechnologien verbundenen Risiken für die unmittelbar Beschäftigten und die Bevölkerung im allgemeinen, in denen z.B. die Wahrscheinlichkeit von Todesfällen durch Unfälle und Katastrophen, typische berufsbedingte Erkrankungen und schädliche Auswirkungen auf die Umwelt, bezogen auf eine bestimmte Elektroenergieproduktion pro Jahr, abgeschätzt wird. Bei allen Unsicherheiten solcher Abschätzungen ergeben sich regelmäßig für die Kernenergie kleinere Risiken im Vergleich etwa zu Kohle- oder Wasserkraftwerken. Nimmt man noch die Risiken einer möglicherweise drastischen Klimaänderung durch den Treibhauseffekt für das gesamte Leben auf dem Planeten Erde hinzu, dann kann beim Risikovergleich mit Kernenergie nicht unbeachtet bleiben, daß sie zum Treibhauseffekt keinen Beitrag leistet. Ihre Kombination mit Wasserkraftwerken und verstärkter Nutzung anderer Verfahren der Stromerzeugung aus regenerativen Quellen eröffnet mit den heute bereits etablierten Technologien die Möglichkeit, den Elektroenergiebedarf ohne Emission von $CO_2$ und anderen Treibhausgasen zu decken [8]. Frankreich, Schweden und die Schweiz sind diesem Ziel schon sehr nahe gekommen.

## Literatur

1. Ten Years After Chernobyl: What Do We Really Know? Based on the proceedings of the IAEA/WHO/EC International Conference, Vienna, April 1996 (Broschüre der Division of Public Information der IAEA)

2. A. Bayer, A. Kaul, Chr. Reiners (Hsg), Zehn Jahre nach Tschernobyl, eine Bilanz, Seminar des Bundesamtes für Strahlenschutz und der Strahlenschutzkommission, München, 6.-7. März 1996, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1996

3. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (Hsg.),Tschernobyl - Zehn Jahre danach. Der Unfall und die Sicherheit der RBMK-Anlagen, Köln, Februar 1996

4. W.G. Berjachtar (Hsg.), Die Tschernobyl-Katastrophe, Naukowa Dumka, Kiew 1995 (russ.)

5. Nuclear Wastelands. A Global Guide to Nuclear Weapons Production and its Health and Environmental Effects. The MIT Press, Cambridge u. London 1995, p. 418

6. Health Consequences of the Chernobyl Accident. Results of the IPHECA Projects and related national programmes. Summary report. 1995

7. B. Müller-Ullrich, Medienmärchen - Gesinnungstäter im Journalismus, Karl Blessing Verlag, München 1996

8. K.F. Alexander, Stand und Perspektiven einer ökologisch und ökonomisch nachhaltigen Weltenergiewirtschaft, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät Band 5 (1995) H.5, S.29

D. E. Becker, J. Hutter, H. Klonk, Ch. Krause, F. Philippczyk, M. Reiner

# Die Kernenergie in Deutschland

## Einführung

Die Geschichte der Stromproduktion durch Kernkraftwerke begann in der Bundesrepublik Deutschland 1961 mit dem Bau des Versuchs-Atom-Kraftwerks in Kahl (VAK) am Main. Durch die Ölkrise 1972 wurde der Ausbau der Kernenergie auch in Deutschland stark vorangetrieben. Zwischenzeitlich produzierten insgesamt 30 Reaktoren in den alten Ländern und 5 Reaktoren in der ehemaligen DDR elektrische Energie. Das letzte Kernkraftwerk, das in Deutschland gebaut wurde und an das Netz ging, war die Konvoi-Anlage Neckarwestheim 2 (GKN 2) im Jahre 1989. Der Anteil an der Stromproduktion mit derzeit 19 Reaktoren liegt bei etwa 34 %. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden mittlerweile schon einige der ersten deutschen Kernkraftwerke abgeschaltet und befinden sich derzeit in der Phase der Stillegung. Alle Kernkraftwerke auf dem Gebiet der ehemaligen DDR sind aus wirtschaftlichen oder sicherheitstechnischen Gründen abgeschaltet und in der Stillegung.

Im Rahmen der Energie-Konsens-Gespräche wird in Deutschland darüber beraten, welchen Stellenwert die Stromproduktion durch Kernenergie zukünftig einnehmen bzw. ob der Ausstieg vollzogen werden soll. Bei diesen Diskussionen spielt eine wichtige Rolle die Bewertung des Risikos, sei es durch einen Unfall mit Freisetzung radioaktiver Stoffe von im Betrieb befindlichen Kernkraftwerken oder auch bei der Endlagerung der abgebrannten Kernbrennstoffe.

Spätere Generationen können dann darüber resümieren, welche der heutigen Argumente

- Marktanteile durch preiswerte Energie
- Sicherheitsgewinn durch Abschalten der Kernkraftwerke
- Saubere Umwelt ohne $CO_2$-Ausstoß
- Restrisiko bei der Endlagerung

zur richtigen Entscheidung in Verbindung mit Kernenergieausstieg oder -ausbau hätten führen müssen.

Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse und Überlegungen der letzten Jahre in den Bereichen Verbesserung der Sicherheit, Strategien bei der Uran-Nutzung, Stillegungsaspekte und Entsorgungsprobleme behandelt.

## Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland

In der Bundesrepublik Deutschland sind gegenwärtig:

19 Kernkraftwerksblöcke mit insgesamt 22194 MWe brutto in Betrieb, davon 6 Kernkraftwerksblöcke mit Siedewasserreaktor (SWR) und 13 Kernkraftwerksblöcke mit Druckwasserreaktor (DWR),

1 Kernkraftwerksblock (DWR) mit 1302 MWe brutto infolge Gerichtsbeschluß auf unbestimmte Zeit abgeschaltet,

15 Kernkraftwerksblöcke mit insgesamt 3900 MWe (brutto) endgültig abgeschaltet, d.h. die Stillegung ist begonnen, beantragt oder geplant,

Die Standorte der Kernkraftwerke zeigt die Abbildung 1. Die Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke mit Datum der Erstkritikalität sowie Höhe der elektrischen Leistung. 1996 betrug die Elektroenergieerzeugung aus den Kernkraftwerken 161702 GWh (1995: 154144 GWh). Das ist eine Steigerung im Vergleich zu 1995 von ca. 4,9 %. Dies ist im wesentlichen auf die Wiederaufnahme des Leistungsbetriebes der Anlagen Krümmel (KKK) und Brunsbüttel (KKB) sowie der Anlage Biblis A (KWB-A) nach längerem Stillstand zurückzuführen .

Der Anteil der Kernkraftwerke an der Gesamt-Brutto-Stromerzeugung der öffentlichen Elektrizitätsversorgung betrug 1996 ca. 34 %, also vergleichbar zum Wert von 1995.

1996 betrug der Anteil der Kernenergie am Primärenergieverbrauch ca. 12,1 % basierend auf einer ersten Schätzung zum Jahresende 1996. Die 1996 in der Bundesrepublik betriebenen Kernkraftwerksblöcke wiesen wie im Vorjahr eine hohe Verfügbarkeit und Ausnutzung auf:

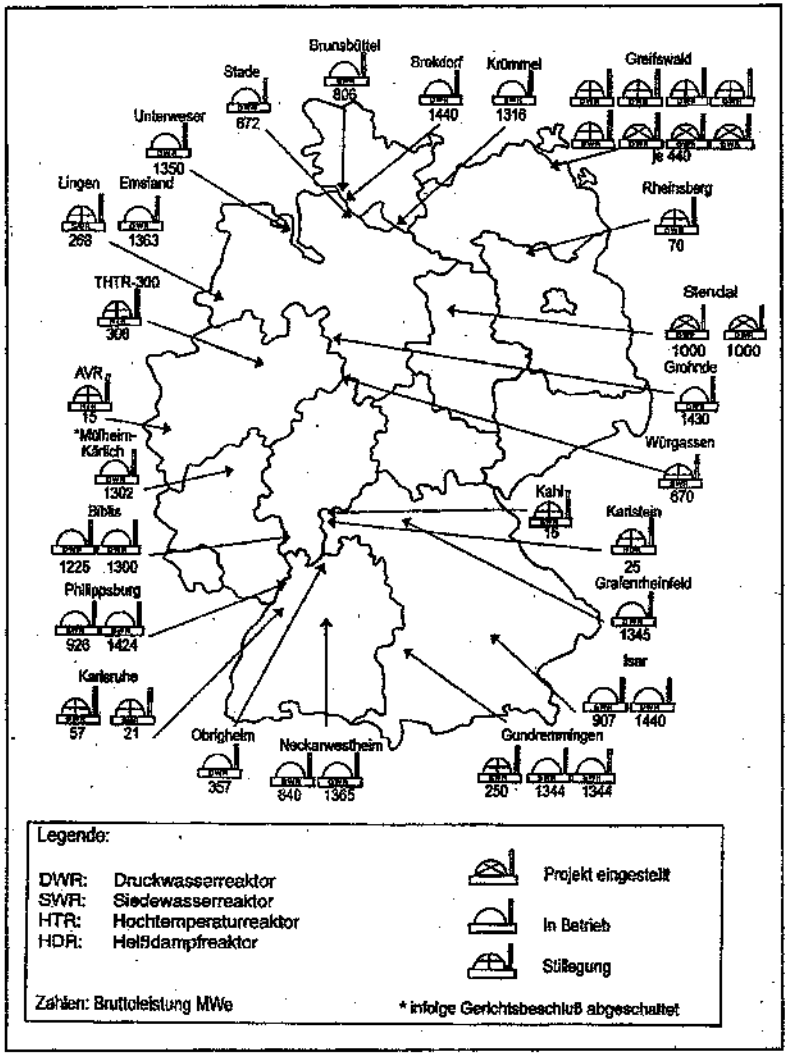


*Abb. 1: Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland*
*Stand 16.05.1997*

Tabelle 1: Durchschnittliche Verfügbarkeiten der Kernkraftwerke in 1996, nach Baulinien zusammengefaßt:

| Reaktor-Typ | Baulinie | Zeitverfügbarkeit % | Arbeitsverfügbarkeit % | Arbeitsausnutzung % |
|---|---|---|---|---|
| DWR | Konvoi KKI 2, KKE, GKN 2 | 93,4 | 93,2 | 91,6 |
| | Vorkonvoi KWB B, KKU, KKG, KWG, KKP 2, KBR | 83,0 | 83,4 | 81,1 |
| | ältere Anlagen KWO, KKS, KWB A[1)], GKN 1 | 90,0 | 87,1 | 82,3 |
| SWR | Baureihe 72 KRB B, KRB C | 91,4 | 90,1 | 83,6 |
| | Baureihe 69 KKI 1, KKP 1, KKB, KKK | 88,5 | 85,9 | 79,1 |

[1)] Stillstand der Anlage KWB A vom 21.04.1995 bis 08.08.1996

*Quelle: VGB*

Bei den Kernkraftwerken Unterweser (KKU), Philippsburg 1 (KKP 1), Philippsburg 2 (KKP 2) und Isar 2 (KKI 2) wurden 1996 Leistungserhöhungen vorgenommen. Für Brokdorf (KBR) ist eine Leistungserhöhung beantragt.

Die Abgaben radioaktiver Stoffe aus den Kernkraftwerken mit Fortluft und Abwasser lagen auch 1996 weit unter den genehmigten Grenzwerten.

Durch den Betrieb der Kernkraftwerke wurde in 1996 die Abgabe von ca. 150 Mill. t Kohlendioxid vermieden. Das entspricht ca. 15 % der Gesamtemissionen der Bundesrepublik Deutschland.

Tabelle 2: Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland in Betrieb

| Kernkraftwerk | Standort | Elektrische Bruttoleistung in Mwe | Erst-kritikalität |
|---|---|---|---|
| Kernkraftwerk Isar 1 (KKI 1) | Essenbach bei Landshut, Bayern | 907 | 20.11.1977 |
| Kernkraftwerk Isar 2 (KKI 2) | Essenbach bei Landshut, Bayern | 1440 | 15.01.1988 |
| Kernkraftwerk Unterweser (KKU) | Esenshamm bei Bremerhaven, Niedersachsen | 1350 | 16.09.1978 |
| Kernkraftwerk Philippsburg Block 1 (KKP 1) | Philippsburg bei Speyer, Baden Württemberg | 926 | 09.03.1979 |
| Kernkraftwerk Philippsburg Block 2 (KKP 2) | Philippsburg bei Speyer, Baden Württemberg | 1424 | 13.12.1984 |
| Kernkraftwerk Grafenrheinfeld (KKG) | Grafenrheinfeld bei Schweinfurt, Bayern | 1345 | 09.12.1981 |
| Kernkraftwerk Krümmel (KKK) | Krümmel bei Geesthacht, Schleswig-Holstein | 1316 | 14.09.1983 |
| Kernkraftwerk Gundremmingen, Block B (KRB-B) | Gundremmingen bei Günzburg, Bayern | 1344 | 09.03.1984 |
| Kernkraftwerk Gundremmingen, Block C (KRB-C) | Gundremmingen bei Günzburg, Bayern | 1344 | 26.10.1984 |
| Kernkraftwerk Grohnde (KWG) | Grohnde bei Hameln, Niedersachsen | 1430 | 01.09.1984 |
| Kernkraftwerk Brokdorf (KBR) | Brokdorf bei Glückstadt, Schleswig-Holstein | 1440 | 08.10.1986 |

*Fortsetzung von Tabelle 2*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Kernkraftwerk Emsland (KKE) | Darme bei Lingen, Niedersachsen | 1363 | 14.04.1988 |
| Kernkraftwerk Obrigheim (KWO) | Obrigheim bei Heilbronn, Baden-Württemberg | 357 | 22.09.1968 |
| Kernkraftwerk Stade (KKS) | Stade, Niedersachsen | 672 | 08.01.1972 |
| Kernkraftwerk Biblis Block A (KWB-A) | Biblis bei Worms, Hessen | 1225 | 16.07.1974 |
| Kernkraftwerk Biblis Block B (KWB-B) | Biblis bei Worms, Hessen | 1300 | 25.03.1976 |
| Kernkraftwerk Neckarwestheim Block 1 (GKN 1) | Neckarwestheim bei Lauffen, Neckar, Baden-Württemberg | 840 | 26.05.1976 |
| Kernkraftwerk Neckarwestheim Block 2 (GKN 2) | Neckarwestheim bei Lauffen, Neckar, Baden-Württemberg | 1365 | 29.12.1988 |
| Kernkraftwerk Brunsbüttel (KKB) | Brunsbüttel, Schleswig-Holstein | 806 | 23.06.1976 |

**Anlagen des Brennstoffkreislaufs und der Entsorgung**

Eine Übersichtskarte über die Anlagen des Brennstoffkreislaufs einschließlich der Entsorgungsanlagen in der Bundesrepublik Deutschland zeigt die Abbildung 2.

Uranerzbergbau und -aufbereitung

Uranerzbergbau wurde vor allem in den Bundesländern Sachsen und Thüringen in den Gebieten um Aue, Königstein, Ronneburg und Schneeberg

betrieben. Die Erzaufbereitung erfolgte hauptsächlich in Crossen und Seelingstädt. Förderung und Aufbereitung wurden durch die SDAG Wismut betrieben, eine ehemals sowjetisch-deutsche Aktiengesellschaft, die 1991 ihre Tätigkeit einstellte. Zur Zeit werden die ehemals Uran produzierenden Betriebe stillgelegt und verwahrt. Somit wird in Deutschland keine Urangewinnung mehr durchgeführt.

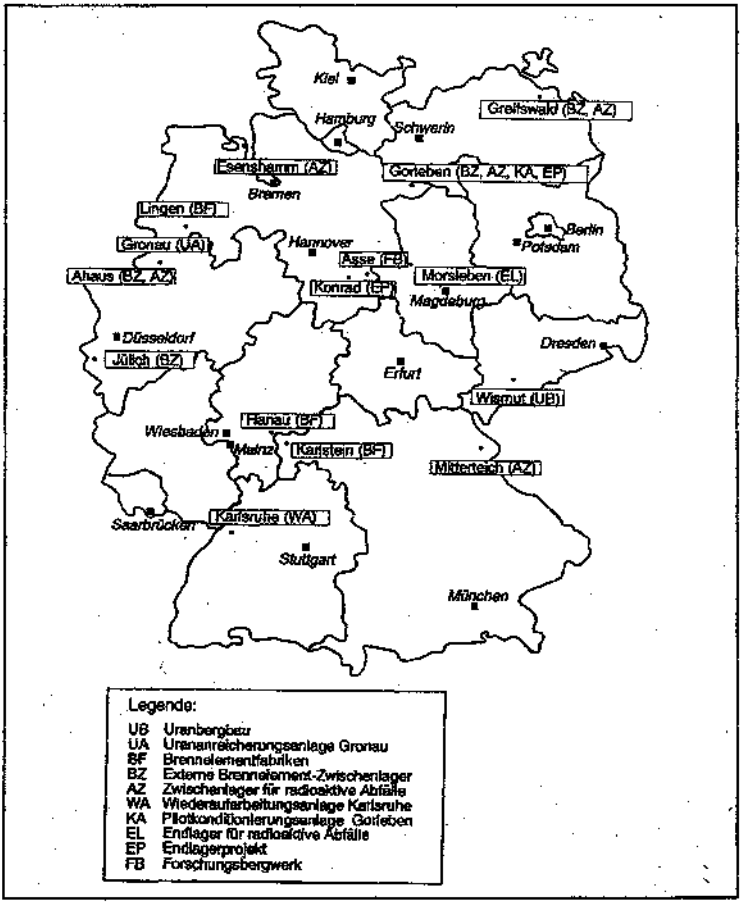


*Abb. 2: Anlagen des Brennstofkreislaufs und der Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland*
*Stand 16.05.1997*

Urananreicherungsanlagen

In der Urananreicherungsanlage Gronau wird natürliches Uran bis zu einer maximalen Konzentration des spaltbaren Isotops U-235 von 5 Gew.-% in Zentrifugenkaskaden angereichert.

Brennelementfabriken

In der Bundesrepublik Deutschland ist eine Brennelementfabrik - Firma ANF in Lingen - in Betrieb. Die Anlage dient der Herstellung von Uran-Brennelementen mit einem maximalen Anteil von 5 Gew.-% U-235 zum überwiegenden Einsatz in Leichtwasserreaktoren.

Mehrere Brennelementfabriken sind zur Zeit außer Betrieb und werden stillgelegt. Seit der Einstellung des Betriebes der Siemens-MOX-Anlage im Jahre 1991 wird in Deutschland kein MOX-Brennstoff* mehr hergestellt. MOX-Brennelemente werden für deutsche Betreiber im Ausland - hauptsächlich in Belgien und Frankreich - gefertigt.

Zwischenlagerung von abgebrannten Brennelementen

Die in den alten Bundesländern der Bundesrepublik Deutschland zur Zeit in Betrieb befindlichen Leichtwasserreaktoren haben eine genehmigte Lagerkapazität in ihren jeweiligen Brennelement-Lagerbecken von insgesamt ca. 6.500 t Schwermetall. Da in den Lagerbecken jeweils die Aufnahmekapazität einer Kern-Ladung freigehalten werden muß, verringert sich die vorgenannte Summe um ca. 2.100 t auf 4.400 t Zwischenlagerkapaziät. Zusätzlich ist eine Lagerkapazität von 460 t beantragt. Die mittlere jährliche Entlademenge beträgt ca. 500 t.

Auf dem Betriebsgelände des Kernkraftwerkes Greifswald besteht ein Naßlager für abgebrannten Brennstoff (ZAB) aus den Kernkraftwerken Greifswald und Rheinsberg mit einer genehmigten Lagerkapazität von 4.680 Brennelementen bzw. ca. 560 t Schwermetall. Diese Brennstoffkassetten sollen zukünftig in einem am Standort in Bau befindlichen Zwischenlager trocken in CASTOR-Behältern aufbewahrt werden.

Außerhalb von Kernkraftwerksstandorten werden in der Bundesrepublik Deutschland 3 Trockenlager für abgebrannte Brennelemente aus Kern-

* Mischoxid-Brennstoff, der Plutonium aus der Wiederaufarbeitung enthält

kraftwerken betrieben, an den Standorten Ahaus, Gorleben und Jülich. Die abgebrannten Brennelemente werden in Transport- und Lagerbehältern vom Typ CASTOR aufbewahrt. Es liegen Genehmigungen nach § 6 AtG für eine Kapazität von 1.500 t Schwermetall in Ahaus, 3.800 t Schwermetall in Gorleben und 300.000 AVR-Brennelementen in Jülich vor. Eine Kapazitätserhöhung für Ahaus ist beantragt.

Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen

Die Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung aus dem KKW-Betrieb erfolgt in den alten Bundesländern derzeit auf dem Gelände der Kernkraftwerke, in dem externen Zwischenlager für radioaktive Abfälle in Gorleben (Faßlager), der Sammelstelle der bayerischen EVU Mitterteich und dem Abfallager Esenshamm.

Die Errichtung eines Zwischenlagers Nord (ZLN) auf dem Gelände des KKW Greifswald zur Lagerung von Betriebs- und Stillegungsabfällen der KKW Greifswald und Rheinsberg mit Zwischenlagerung der abgebauten Großkomponenten und Zerlegung und Konditionierung der Stillegungsabfälle ist geplant. Die Kapazität soll 200.000 $m^3$ in Form von Gebindevolumina betragen.

Wiederaufarbeitung

Die bestrahlten Brennelemente aus deutschen Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren werden derzeit in der Europäischen Gemeinschaft wiederaufgearbeitet. So bestehen seit den 70er Jahren Wiederaufarbeitungsverträge mit COGEMA (Frankreich) und BNFL (Großbritannien).

Für die abgebrannten Brennelemente aus den Kernkraftwerken der Bundesländer Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern bestanden Rücklieferverpflichtungen zur Wiederaufarbeitung in der UdSSR, die allerdings nach der Auflösung der UdSSR nicht mehr in Anspruch genommen werden konnten.

Pilot-Konditionierungsanlage Gorleben (PKA)

Um die großtechnische Machbarkeit und die atomrechtliche Genehmigungsfähigkeit der gesicherten Endlagerung abgebrannter Brennelemente nachzuweisen, wird am Standort Gorleben (Niedersachsen) eine Pilot-Konditionierungsanlage (PKA) für abgebrannte Brennelemente und radioaktive Abfälle errichtet. Die Anlage soll eine Kapazität von 35 t Schwermetall pro Jahr haben.

Endlager für radioaktive Abfälle / geplante Endlager (Projekte)

Zur Entsorgung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle mit einer überwiegend kurzen Halbwertszeit wurde in der ehemaligen DDR ein Salzbergwerk, die Schachtanlage "Bartensleben" am Rande der Gemeinde Morsleben, als zentrales Endlager ausgebaut. Nach einer Versuchsphase (ab 1971) nahm das Endlager 1981 den Betrieb auf und erhielt 1986 eine Dauerbetriebsgenehmigung. Im Rahmen des bisherigen Betriebes sind etwa 14.000 $m^3$ radioaktiver Abfälle und ca. 6.500 Stück Strahlenquellen mit einer Gesamtaktivität von ca. 480 TBq (vornehmlich Beta/Gamma-Strahler) in einer Tiefe von ca. 500 m endgelagert worden. Insgesamt sollen im Betriebszeitraum bis zum 30.06.2000 gemäß Dauerbetriebsgenehmigung ca. 40.000 $m^3$ schwach- und mittelradioaktive Abfälle zur Endlagerung im ERAM angeliefert werden.

Im Salzstock Gorleben ist die Einrichtung eines Endlagers für alle Arten radioaktiver Abfälle (einschließlich hochaktiver Abfälle) geplant. Zur Zeit wird die Eignung des Salzstockes als Endlager durch die Errichtung eines Erkundungsbergwerkes geprüft. Die untertägigen Untersuchungen, mit deren Hilfe ein Bild vom Innenbau des Salzstockes gewonnen werden soll, werden nach derzeitiger Terminplanung nicht vor dem Jahr 2003 beendet sein. Einen positiven Planfeststellungsbeschluß vorausgesetzt, könnte die Inbetriebnahme als Endlager etwa im Jahre 2012 erfolgen.

Die ehemalige Eisenerzgrube Konrad in Salzgitter ist für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, das sind etwa 95 Vol% der insgesamt anfallenden radioaktiven Abfälle, vorgesehen. Von 1977 bis 1982 wurde die grundsätzliche Eignung der Grube in einer eingehenden Untersuchung festgestellt. Der Antrag auf Einleitung eines Planfeststellungsverfahrens nach § 9 AtG bei der Niedersächsischen Landesregierung zur Umrüstung und Nutzung als Endlager wurde 1982

gestellt. Mit einem Planfeststellungsbeschluß wird 1997 gerechnet. Eine Inbetriebnahme des Endlagers wäre dann im Jahr 2001 möglich.

**Kernkraftwerke 1996 weltweit**

Ende 1996 waren 443 Kernkraftwerksblöcke weltweit in Betrieb. Sie erzeugten ca. 2388 TWh elektrische Leistung. Es dominieren die Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren (Druck- oder Siedewassereaktoren) mit einem Anteil von ca. 80 % (siehe Tabelle 3). Im Vergleich mit der Bundesrepublik Deutschland, in der seit 1989 kein Leistungsreaktor mehr in Betrieb genommen, in Bau oder geplant war, sind derzeit (Stand: 01.02.1997) weltweit 36 Anlagen in Bau oder in Auftrag gegeben, überwiegend in den Ländern China, Frankreich, Indien, Japan, Süd-Korea und Rußland.

Dabei handelt es sich nicht nur um Leichtwasserreaktoren, sondern auch um Reaktoren der Typen CANDU (Druckröhrenreaktor kanadischer Bauart u.a. im Bau oder bestellt in China, Indien, Rumänien, Südkorea) sowie WWER (russischer DWR-Typ u.a in Bau oder bestellt in Bulgarien, Ukraine). Reaktoren vom Typ Schneller Brüter (3 Anlagen) und weitere Reaktortypen (u.a. RBMK-Reaktoren russischer Bauart oder AGR-Reaktoren) spielen eine kommerziell untergeordnete Rolle.

In 1996 wurden 8 neue Reaktoren in Betrieb oder Probebetrieb genommen, davon einer in Frankreich, zwei in Japan, einer in Rumänien, zwei in Süd-Korea, einer in der Ukraine sowie eine Anlage in den Vereinigten Staaten von Amerika. Dabei handelte es sich ausschließlich um DWR-, SWR- oder CANDU-Anlagen.

Zwei Anlagen wurden 1996 außer Betrieb genommen (Connecticut Yankee in den USA und Tschernobyl 1 in der Ukraine).

Die Tabelle 3 zeigt eine Statistik, in der die Kernkraftwerksblöcke nach Reaktortypen aufgeschlüsselt sind; Tabelle 4 zeigt Kernkraftwerksanlagen in den Nachbarländern der Bundesrepublik Deutschland.

Tabelle 3: Kernkraftwerksblöcke in der Welt nach Reaktortypen aufgeschlüsselt, Stand: 01.02.1997.

| Reaktortyp [1] | In Betrieb | | In Bau | | Gesamt | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Anzahl | MWe | Anzahl | MWe | Anzahl | MWe |
| DWR (mit WWER) | 249 | 231815 | 39 | 37921 | 288 | 269736 |
| SWR | 95 | 83271 | 2 | 2075 | 97 | 85346 |
| CANDU | 34 | 20518 | 7 | 3040 | 41 | 23558 |
| LWGR (RBMK und GLWR) | 18 | 15048 | 1 | 1000 | 19 | 16048 |
| SNR | 4 | 2242 | 3 | 1880 | 7 | 4122 |
| AGR, Sonstige | 31 (37) | 14518 | 1 | 745 | 32 (38) | 15263 |
| Summe | 431 (437) | 367412 | 53 | 46661 | 484 (490) | 414073 |
| LWR (DWR+SWR) | 344 | 315068 | 41 | 39996 | 385 | 355082 |

*Quelle: atw 03/97*

[1]) *Abkürzungen:*
*AGR: Fortgeschrittener gasgekühlter Reaktor (Advanced Gas-cooled Reactor)*
*CANDU: Schwerwasser-($D_2O$)-Natururan-Druckröhrenreaktor kanadischer Bauart*
*DWR: Druckwasserreaktor*
*GGR: Gas-Graphit-Reaktor*
*GLWR: Vorläufer des LWGR*
*LWGR: Mit Graphit moderierter und mit Leichtwasser gekühlter Reaktor (RBMK)*
*SNR: Schneller Natriumbrüter*
*SWR: Siedewasserreaktor*
*WWER: Russischer DWR-Typ*

Die Tabelle 4 zeigt den Stand der Kernreaktoren in den an die Bundesrepublik angrenzenden Ländern.

Tabelle 4: Kernkraftwerke 1996 in Betrieb in den Nachbarländern der Bundesrepublik Deutschland.

| Land | Anzahl | Typen | Elektrische Leistung brutto in MWe |
|---|---|---|---|
| Niederlande | 1 | DWR | 480 |
| Belgien | 7 | nur DWR | 5807 |
| Luxemburg | keine | - | - |
| Frankreich | 56 | nur DWR | 61130 |
| Schweiz | 5 | DWR, SWR | 3229 |
| Österreich | keine | - | - |
| Tschechische Republik | 4 | nur DWR | 1782 |
| Polen | keine | - | - |
| Dänemark | keine | - | - |
| | | | |
| Zum Vergleich USA | 108 | DWR, SWR | 105356 |
| Zum Vergleich Rußland | 29 | WWER, LWGR,GLWR,SNR | 21242 |

Im Herbst 1996 wurde der Vertrag über die Nukleare Sicherheitskonvention von allen maßgebenden Ländern unterzeichnet. Die Mitgliedsstaaten verpflichten sich damit, im dreijährigen Turnus einen Bericht zum sicherheitsrelevanten Stand ihrer Kernkraftwerke zu erstellen und den Vertragspartnern vorzulegen. Dies ist als ein weltweites Instrumentarium anzusehen, den Sicherheitsstand der Kerntechnik international anzupassen und zu verbessern.

**Nachrüstungen im Bereich des anlageninternen Notfallschutzes**

Im Atomgesetz ist für die Auslegung der Kernkraftwerke die erforderliche Vorsorge gegen Schäden nach dem Stand von Wissenschaft und Technik gefordert. Dies wird durch die zuständige Genehmigungsbehörde in Zusammenarbeit mit zugezogenen Gutachtern vor Erteilung der Betriebsge-

nehmigung sorgfältig geprüft. Die Anforderungen an die Auslegung deutscher Kernkraftwerke wurden mit der Änderung des Atomgesetzes im Jahre 1994 so geändert, daß bei einem Unfall keine gravierenden Auswirkungen auf die unmittelbare Umgebung auftreten dürfen. Dies bedeutet, daß eine Evakuierung der Bevölkerung nicht erforderlich sein darf.

Die Auswertungen von weltweit aufgetretenen Störfällen und Vorkommnissen sowie Betriebserfahrungen führte darüber hinaus zu Empfehlungen von nachträglichen Änderungen zur Erhöhung der Kerntechnischen Sicherheit. Im Spannungsfeld zwischen Bestandsschutz der Genehmigung und dem fortschreitenden Erkenntnisstand von Wissenschaft und Technik ist es Aufgabe der zuständigen Aufsichtsbehörden, auf weitere sicherheitstechnische Verbesserungen in den im Betrieb befindlichen Anlagen hinzuwirken.

Durch den Bundesumweltminister wurden deshalb die nachfolgenden Maßnahmen im Bereich des anlageninternen Notfallschutzes im Jahr 1988 empfohlen und mittlerweile auch weitgehend in den Kernkraftwerken der Bundesrepublik Deutschland umgesetzt:

- Erarbeitung von Notfallhandbüchern für Maßnahmen des kraftwerksinternen Notfallschutzes
- Sicherung der externen Energieversorgung nach Ausfall innerhalb von zwei Stunden
- Sekundär- und primärseitige Druckentlastung der Kühlkreisläufe beim Druckwasserreaktor zur Vermeidung von Kernschäden
- Diversitäre Druckentlastungsmöglichkeiten beim Siedewasserreaktor zur Verhinderung von Schäden am Kern und Reaktordruckbehälter
- Verhinderung von explosiven Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen durch z.B. Inertisierung oder gezielter Verbrennung des bei Kernschädigung auftretenden Wasserstoffes
- Gefilterte Druckentlastungsmöglichkeit des Reaktorsicherheitsbehälters bei einem Störfall mit Druckaufbau
- Ausstattung der Warte und Notwarte für Daueraufenthalt bei einem Unfall innerhalb oder außerhalb der Anlage
- Probenahmesysteme für Wasserstoff und radioaktive Stoffe bei Auslegungsstörfällen und auslegungsüberschreitenden Ereignissen

Die Umsetzung obiger Empfehlungen bedeutet, daß über das bestehende Sicherheitsniveau der Anlagen hinaus im auslegungsüberschreitenden Bereich eventuelle Unfälle noch unwahrscheinlicher werden bzw. eventuelle Auswirkungen auf Mensch und Umwelt noch begrenzter sein werden. Die durchgeführten Nachrüstungen erfolgten auf Eigeninitiative der Betreiber der Kernkraftwerke. Die in diesem Rahmen vorgenommenen Änderungen an sicherheitstechnisch bedeutsamen Anlagenteilen sind aber wegen der Prüfung möglicher eventueller Rückwirkungen auf den genehmigten Betriebszustand genehmigungspflichtig.

Die Auswertung weltweit aufgetretener Ereignisse hat aber auch gezeigt, daß bei vielen Stör- und Unfällen nicht nur technisches Versagen die Ursache war, sondern auch eine menschliche Komponente mit im Spiel war. Deshalb wurden im Bereich der Wechselwirkung Mensch-Maschine erhebliche Verbesserungen vorgenommen. Dies beinhaltet Aspekte wie intensivere Ausbildung, Verbesserung ergonomische Gesichtspunkte, klarere Arbeitsabläufe usw. Diese Aspekte werden unter dem Schlagwort „Human Factor" in der Literatur behandelt.

**Die Störfallmeldestelle des Bundesamtes für Strahlenschutz**

Seit dem 1. Januar 1993 werden die in die Zuständigkeit des BfS fallenden Aufgaben im Zusammenhang mit der Erfassung von meldepflichtigen Ereignissen in kerntechnischen Einrichtungen durch die Störfallmeldestelle des Amtes wahrgenommen. Die Störfallmeldestelle hat die Aufgabe, alle Ereignisse, die in kerntechnischen Einrichtungen (insbesondere in Kernkraftwerken) auftreten, zu erfassen, zu dokumentieren und für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit auszuwerten. Die Meldung dieser Ereignisse erfolgt nach den in der Atomrechtlichen Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung festgelegten Kriterien. Das BfS unterstützt damit einerseits das Bundesumweltministerium in dessen Aufgabe, die Öffentlichkeit über solche Ereignisse zu unterrichten und trägt andererseits durch systematische Auswertung und Weiterverbreitung der Erfahrungen aus meldepflichtigen Ereignissen im In- und Ausland dazu bei, daß Störungen im Betriebsablauf in kerntechnischen Einrichtungen bereits im Vorfeld vermieden werden können.

Kernkraftwerke und andere kerntechnische Anlagen sind komplexe, aus vielen Einzelkomponenten zusammengesetzte technische Systeme. Fehlfunktionen oder Versagen einzelner Komponenten sind bei solchen Anla-

gen nicht gänzlich auszuschließen. Die Aufdeckung ihrer Ursachen (die technischer oder menschlicher Natur sein können) und damit auch die Beseitigung bisher nicht entdeckter Schwachstellen ist Aufgabe der systematischen und tiefergehenden Störungsauswertung. Auf diesem Gebiet unterstützen verschiedene Sachverständigengremien und Fachinstitutionen, darunter auch das Bundesamt für Strahlenschutz, das Bundesumweltministerium bei dessen Zweckmäßigkeitsaufsicht über die atomrechtlichen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden. Insbesondere für die Berichterstattung und systematische Auswertung werden die meldepflichtigen Ereignisse in Datenbanken erfaßt, deren Betrieb und Pflege der Störfallmeldestelle des Bundesamtes für Strahlenschutz obliegt.

Weiterhin wird die Überprüfung der Störungen und Störfälle nach den von der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) in Wien herausgegebenen Kriterien für die Einstufung von Ereignissen in Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren durchgeführt, um eine objektive, international vergleichbare und für Zwecke der Öffentlichkeitsarbeit aussagekräftige Information zu gewährleisten. Diese internationale Bewertungsskala (INES) umfaßt sieben Stufen (siehe Abbildung 3). Die Bedeutung der einzelnen Stufen wird jeweils durch eine Zahl und eine Kurzbezeichnung gekennzeichnet. Meldepflichtige Ereignisse ohne sicherheitstechnische Bedeutung im Sinne der internationalen Skala werden als „unterhalb der Skala" bzw. „Stufe 0" bezeichnet. Dadurch ergibt sich insgesamt eine achtstufige Skala. Die Bewertungsskala untergliedert sich in zwei größere Bereiche. Die unteren Stufen 0 bis 3 umfassen Störungen und Störfälle, die oberen Stufen 4 bis 7 umfassen Unfälle.

Die Skala dient insbesondere zur Information der Öffentlichkeit und soll dazu beitragen, daß die Auswirkungen von Ereignissen in kerntechnischen Einrichtungen von der Bevölkerung eingeschätzt werden können.

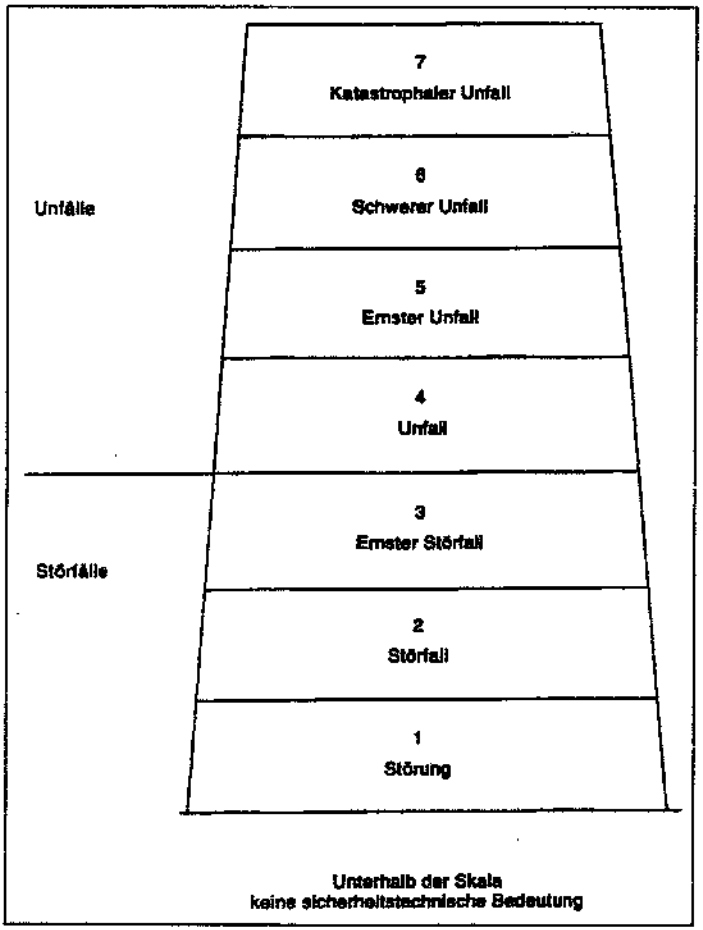


*Abb. 3: Internationale Bewertungsskala für bedeutsame Ereignisse in kerntechnischen Einrichtungen*

In der Bundesrepublik Deutschland sind im Jahre 1996 137 meldepflichtige Ereignisse aufgetreten, von denen 131 der INES-Stufe 0 (keine sicherheitstechnische Bedeutung) und 6 der INES-Stufe 1 (Störung) zugeordnet wurden. Abgaben radioaktiver Stoffe oberhalb genehmigter Grenzwerte traten 1996 nicht auf. Eine Gefährdung von Personen und der Umgebung war in keinem Fall gegeben.

Bei der Planung und Konstruktion von Anlagen in der Kerntechnik werden detaillierte Überlegungen in die Vermeidung und Bekämpfung von Störungen und Störfällen angestellt und daraus resultierend geeignete Maßnahmen realisiert. Die kerntechnischen Anlagen der Bundesrepublik Deutschland zählen weltweit zu den sichersten Industrieanlagen überhaupt, sowohl für das dort arbeitende Personal als auch für die Menschen in deren Umgebung. Redundanz (Mehrfachauslegung), Diversität, räumliche Trennung der Sicherheitseinrichtungen sowie gestaffelte Sicherheitsbarrieren sind selbstverständliche Prinzipien in der Kerntechnik. Die im nuklearen Bereich eingeführte Sicherheitsphilosophie wurde inzwischen in anderen Industriezweigen, in denen mit Gefahren zu rechnen ist, weitgehend übernommen.

Der Schutz des Menschen und der Biosphäre hat bei der friedlichen Anwendung der Kernenergie Priorität und die Störfallmeldestelle des Bundesamtes für Strahlenschutz trägt mit ihrer Tätigkeit zur Gewährleistung und Weiterentwicklung des hohen Niveaus der kerntechnischen Sicherheit bei.

**Unfälle in kerntechnische Anlagen**

Von den bisher in kerntechnischen Anlagen aufgetretenen Unfällen - d. h. nach der INES-Skala Stufe 4 und größer - werden nachfolgend drei Unfälle beispielhaft näher beschrieben:

Reaktorunfall in Windscale (Sellafield)

Der Windscale Pile 1 Reaktor in Großbritannien diente der Gewinnung von Plutonium für militärische Zwecke. Der inzwischen stillgelegte, graphitmoderierte Reaktor wurde 1950 fertiggestellt. Am 08.10.1957 geriet ein Teil des Graphits des Reaktorkerns in Brand, wodurch es zu einer erheblichen Freisetzung von Jod in die Umgebung kam. In einem Gebiet von ca. 500 $km^2$ mußte die Milch aufgekauft und vernichtet werden; ein Verzehrverbot für Milchprodukte für die Dauer von 60 Tagen wurde ausgesprochen. Bei anderen Nahrungsmitteln gab es keine Überschreitungen von Grenzwerten.

Nach heutigen Maßstäben und bei Anwendung der INES-Skala wäre der Unfall in die Stufe 5 einzuordnen.

Unfall im Kernkraftwerk Three Mile Island (Harrisburg)

Am 28.03.1979 ereignete sich im Block 2 des amerikanischen Kernkraftwerkes Three Mile Island (TMI) ein schwerer Störfall, bei dem es infolge eines offenen Abblaseventils am Druckhalter zu einem Kühlmittelverlust aus dem Reaktorkühlkreislauf und in dessen Folge zur Überhitzung der Brennstäbe und Bildung einer Schmelzzone im Reaktorkern kam. Die Ursache war eine Kombination von Auslegungsmängeln, technischem Versagen und menschlichen Fehlern.

Durch das offene Ventil fiel im Sicherheitsbehältersumpf Kühlmittel an, welches in das Hilfsanlagengebäude gepumpt wurde. Dort kam es dann zur Überspeisung der Behälter mit dem kontaminierten Sumpfwasser und damit zur Aktivitätsfreisetzung (Edelgase) über das Lüftungssystem in die Umgebung.

Die Meßwerte sollen außerhalb des Kraftwerkszaunes max. 20 bis 25 mrem/h (0,2-0,25 mSv/h) erreicht haben, im 16 km entfernten Harrisburg 0,3 mrem/h. Der Anteil von radioaktiven Jod in Milchproben in der Umgebung lag um das $10^3$-fache unter dem Wert, bei dem Maßnahmen hätten ergriffen werden müssen. Die höchste Strahlenbelastung, die eine Person in der Umgebung erlitten haben könnte, wurde auf 50 mrem (0,5 mSv) geschätzt.

Dieses Ereignis würde bei Anwendung der INES-Skala in die Stufe 5 eingeordnet werden.

Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl

Am 26. 04.1986 nachts um 1.24 Uhr kam es im Block 4 des ukrainischen Kernkraftwerkes Tschernobyl zur explosionsartigen Zerstörung des Reaktors. Die Ursachen, eine Kombination aus menschlichem Versagen und einer unzureichenden sicherheitstechnischen Auslegung sind relativ gut bekannt. Dieser in der Geschichte der friedlichen Nutzung der Kernenergie bisher schwerste Reaktorunfall hatte weitreichende Auswirkungen.

Ca. 3,5 bis 4 % des Kernbrennstoffinventars wurden durch den Unfall freigesetzt, wobei ca. 0,4 % direkt auf dem Anlagengelände und ca. 1,5 % in einer 20-km-Zone um das Kernkraftwerk verteilt wurden. Radioaktive Edelgase wurden zu 100 %, Jod zu 80 ... 100 % (davon 80 % gasförmig),

Cäsium bis zu max. 60 % freigesetzt. Etwa 95 % der gesamten Freisetzung erfolgte in den ersten Tagen nach dem Unfalleintritt, der Rest in den darauffolgenden Wochen. Durch Abdeckung des zunächst offenen Reaktors mit 5000 t verschiedener Materialien und durch Abkühlung des in der Reaktorgrube verbliebenen Brennstoffes durch Einblasen von Stickstoff gelang es, die Freisetzung bis zum 06.05.86 auf etwa $10^4$ GBq pro Tag und bis Ende Mai 1986 auf ca. 740 GBq pro Tag zu reduzieren.

Von dem Personal, das in den ersten Tagen an den Brandbekämpfungsarbeiten und anderen Arbeiten beteiligt war, mußten etwa 300 Personen mit akuter Strahlenkrankheit - die Strahlenexpositionen dieser Personen lagen zwischen 2 und 16 Sv - und teils schweren Brandverletzungen behandelt werden; 31 davon sind gestorben, 28 davon an akuter Strahlenkrankheit.

Die Bewohner in der näheren Umgebung des Kernkraftwerkes (Kleinstadt Pripyat mit 49000 Einwohnern) wurden am 27.04.86 evakuiert, die übrigen Bewohner der 30-km-Zone um den Reaktor am 04./05.05.86 .

Die radiologische Situation im europäischen Ausland (außer UdSSR) war dadurch gekennzeichnet, daß eine akute Strahlengefährdung der Bevölkerung zu keiner Zeit bestand. Die durchgeführten Dosisabschätzungen ergaben insgesamt eine geringe durch den Reaktorunfall in Tschernobyl bedingte Strahlenexposition. Deshalb waren die Vorsorgemaßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland darauf gerichtet, die Strahlenexposition so niedrig wie vernüftigerweise erreichbar zu halten (Verbrauchsbeschränkungen für Milch/ Gemüse, Grünfutterverbrauchsbeschränkungen, Importbeschränkungen für Nahrungsmittel aus Osteuropa). 1992 wurde die mittlere durch Tschernobyl verursachte Strahlenexposition der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland fast ausschließlich durch die Bodenstrahlung des deponierten Radiocäsium bestimmt (Halbwertzeit von Cäsium-137: 30 Jahre). Daraus ergibt sich eine mittlere effektive Dosis der Bevölkerung durch Bodenstrahlung von weniger als 0,02 mSv. Diese liegt somit unter 1 % der mittleren natürlichen Strahlenexposition. Aufgrund von örtlich und zeitlich begrenzten Regenfällen während des Durchzugs der radioaktiven Wolke wurden Gebiete südlich der Donau, des Bayerischen Waldes und Ostdeutschlands stärker belastet, hier lag die durch Tschernobyl bedingte Strahlenexposition etwa bei 10 % der natürlichen Strahlenexposition.

Nach der INES-Skala ist der Unfall in Tschernobyl der Stufe 7 zuzuordnen.

Außer der Katastrophe in Tschernobyl hatte nur noch der Unfall in Windscale für die Umgebung größere radiologische Auswirkungen. Bei dem Unfall in Harrisburg wurden die vom zerstörten Kern freigesetzten radioaktiven Stoffe weitestgehend durch die vorhandenen Sicherheitsbarrieren im Reaktorgebäude zurückgehalten. Unter Sicherheitsgesichtspunkten unterscheiden sich die grundlegend anders aufgebauten Reaktortypen in Windscale und Tschernobyl erheblich von deutschen Kernkraftwerken. Den Unfallhergang und die Umweltbelastungen wie in Tschernobyl schließt das Sicherheitskonzept der deutschen Kernkraftwerke aus.

**Stillegung**

Neben den aus Sicherheitsgründen stillgelegten Anlagen sowjetischen Typs in den neuen Bundesländern, sind auch Leistungsreaktoren der alten Bundesrepublik Deutschland wie das Versuchsatomkraftwerk Kahl (VAK), das Kernkraftwerk Gundremmingen Block A (KRB-A), das Kernkraftwerk Lingen (KWL), der Hochtemperaturreaktor Hamm-Uentrop (THTR) sowie das Kernkraftwerk Würgassen (KWW) in den Phasen der Stillegung.

Mit dem vollständigen Abbau des Kernkraftwerkes Niederaichbach (KKN) und der Rekultivierung des Standortgeländes im August 1995 wurde zum ersten Mal in Europa die vollständige Beseitigung eines Kernkraftwerkes erfolgreich demonstriert.

Auch Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufes, wie die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) und die Anlagen zur Uran- und Plutoniumverarbeitung in Hanau sind in der Stillegung.

Die Stillegung kerntechnischer Anlagen wird wie deren Betrieb behördlich genehmigt und überwacht. Fragen der Sicherheit spielen auch dabei die herausragende Rolle und betreffen zu allererst den Strahlenschutz des Personals und der Umgebung. Allerdings ist bei den Reaktoren nach dem Entfernen der Brennelemente aus den Anlagen das radioaktive Inventar um mindestens den Faktor 1000 kleiner als im Betrieb. Stör- und Unfälle mit katastrophalen Auswirkungen in der Umgebung sind somit auch wegen des Fehlens erhöhter Drücke und Temperaturen nicht mehr möglich.

Für die stillgelegte Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) besteht die Aufgabe, den angefallenen hochradioaktiven Flüssigabfall zu entsor-

gen. Hierfür ist die Errichtung einer Verglasungsanlage am Standort vorgesehen.

Unter Stillegung versteht man im technischen Sprachgebrauch alle Maßnahmen nach der endgültigen Einstellung des Betriebes. Dabei kann es sich um den sofortigen und vollständigen Abbau der Anlage, um den Abbau von Teilen oder um den sogenannten Sicheren Einschluß handeln. Beim Sicheren Einschluß wird die Anlage „aufgeräumt", alle radioaktiven Stoffe werden dauerhaft eingeschlossen und fixiert, und die Gebäude werden gegen den Zutritt Unbefugter gesichert. Der Sichere Einschluß ist für eine längere aber begrenzte Zeit sinnvoll, um die Radioaktivität abklingen zu lassen. In der Regel werden dabei für Kernreaktoren ca. 30 Jahre angesetzt, bevor der Abbau beginnt. In Deutschland befindet sich derzeit das Kernkraftwerk Lingen (KWL) seit 1985 für 25 Jahre im Sicheren Einschluß, im Jahre 2007 muß der Betreiber einen Antrag für die weiteren Stillegungsschritte stellen.

Für den Abbau der Komponenten, Anlagenteile und der Gebäude gibt es eine ganze Reihe von bewährten Techniken. Einige dieser Zerlegetechniken müssen dabei auch fernbedient mit Greifwerkzeugen und Manipulatoren, zum Teil auch unter Wasser durchgeführt werden, um das Personal sicher vor der Strahlung zu schützen. Diese fernbedienten Techniken wurden beim Abbau des Kernkraftwerkes Niederaichbach (KKN) erfolgreich demonstriert und angewendet.

Weitere Techniken zur Zerlegung von Großkomponenten und zur Dekontamination von Anlagenteilen sind bei Abbau des Kernkraftwerkes Gundremmingen A (KRB-A) erfolgreich entwickelt und mit großer internationaler Beachtung angewendet worden.

Eine wesentliche Frage bei der Stillegung ist die Behandlung und der Verbleib der Abfälle und Reststoffe. Der Kontrollbereich eines großen Druckwasserreaktors vom Typ Biblis enthält eine Gesamtmasse von 155.000 t. Davon sind allerdings 90 % Beton, der wiederum nur zu einem kleinen Teil radioaktiv ist. Cirka 15.000 t Stahl fallen an, davon können 75 % als Schrott in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden. Lediglich insgesamt ca. 3200 t radioaktiver Abfall wird in ein Endlager zu verbringen sein.

Die Tatsache, daß die überwiegende Masse des beim Abbau eines Kernkraftwerkes anfallenden Schutts und Schrotts nicht radioaktiv ist, führt zu der Verpflichtung, diese Stoffe schadlos zu verwerten. Vorgeschriebene

Grenzwerte stellen sicher, daß keine unzulässige Strahlenexposition der Bevölkerung aus der Verwertung solcher Materialien resultiert. International und auch in Deutschland hat sich als allgemein anerkanntes Ziel herausgestellt, daß die Dosis, die für die Bevölkerung aus den einzelnen „Verwertungswegen" resultierten könnte (Schrott, Bauschutt oder Wiederverwertung von Teilen), jeweils auf etwa 10 µSv pro Jahr begrenzt werden sollte. Zum Vergleich beträgt die natürliche Strahlenbelastung in Deutschland im Mittel ca. 2000 µSv pro Jahr.

**Brennstoffkreislauf**

Die wirtschaftlich zu gewinnenden Uranvorräte betragen weltweit etwa 3 Millionen Tonnen; der weltweite Bedarf zum Betrieb von Kernreaktoren beträgt etwa 60.000 t Uran. Natururan enthält das in Leichtwasserreaktoren spaltbare Uranisotop 235 nur zu etwa 0,7 %, der Rest, also über 99 %, besteht fast ausschließlich aus dem Uranisotop 238. Der im Natururan vorliegende Gehalt an U-235 reicht zur Aufrechterhaltung der Kernspaltung im Reaktor nicht aus; infolgedessen muß das Isotop U-235 auf einen Gehalt von etwa 3 bis 5 % angereichert werden. In Form von Uranhexafluorid kann in Zentrifugen oder Diffusionsanlagen das Uran auf den gewünschten Gehalt an U-235 gebracht werden, das Uran wird „angereichert". Beim modernen Zentrifugenverfahren wird das Uran durch die auf die verschiedenen Isotopenmassen verschieden wirkenden Fliehkräfte angereichert, während beim energieaufwendigen Diffusionsverfahren die verschiedenen Diffusionsgeschwindigkeiten der verschieden schweren Isotope genutzt werden. Das angereicherte Uranhexafluorid wird wieder in Uranoxid umgewandelt. In einem Sinterungsprozeß werden aus dem Uranoxid zylindrische Brennstoffpellets hergestellt, die eine Länge von etwa 10 mm und einen Durchmesser von etwa 8 mm haben. Diese Brennstoffpellets werden in Hüllrohre von etwa 4 m Länge eingefüllt, die aus Zircaloy bestehen. Zircaloy ist eine Legierung, die hauptsächlich aus Zirkonium besteht. Dieser Werkstoff wird deshalb gewählt, weil Zirkonium eine besonders geringe Neutronenabsorption aufweist. Für Siedewasserreaktoren werden 64-100, für Druckwasserreaktoren 200 - 300 befüllte Hüllrohre zu einem Brennelement assembliert, d.h. in eine Haltekonstruktion montiert und im Leichtwasserreaktor eingesetzt. In einem Siedewasserreaktor sind etwa 800, in Druckwasserreaktoren etwa 200 Brennelemente im Einsatz.

Der Preis von Uran schwankt als Folge von Nachfrage und Angebot; er betrug z. B. im Jahr 1994 20.80 $ pro kg und im Jahr 1995 30.94 $/kg Uran. Konversionsleistung und Anreicherungsarbeit werden ebenfalls auf dem Markt gehandelt, im Jahr 1996 kostete die Konversion von 1 kg Uran etwa 5,60 $, während die für die Anreicherung notwendige Trennarbeit 92 $ pro kg Trennarbeit kostete. Man kann grob abschätzen, daß für ein kg Uran mit einer Anreicherung von 5 % U-235 Kosten in Höhe von etwa 1200-1400 $ anfallen. Die dann noch aufzubringenden reinen Herstellungskosten für Brennelemente betragen etwa 630 DM pro kg Brennstoff; Natururanbedarf und Anreicherung machen etwa ¾ der Gesamtkosten für ein Brennelement aus.

Der Abbrand ist ein Maß für die während des Einsatzes im Kernreaktor erzeugte thermische Energie, die aus dem Kernbrennstoff durch Kernspaltung gewonnen wird. Erhöhung des Abbrandes, d.h. Verbrennung einer größeren Menge Brennstoff durch Erhöhung der Einsatzzeit eines Brennelementes im Reaktor, führt zu einer besseren Nutzung des eingesetzten Urans und zu einer geringeren anfallenden Menge an abgebranntem Kernbrennstoff. Dadurch werden bezogen auf die durch das Brennelement erzeugte Energie, die Leistungen für Brennelementherstellung, Wiederaufarbeitung und Endlagerung in geringerem Umfang in Aspruch genommen. Dies bewirkt eine Kostenoptimierung bei der Stromerzeugung. Verstärkt wird dieser Trend dadurch, daß der Anteil der Entsorgungskosten, also der Anteil der Kosten für die Wiederaufarbeitung und Abfallagerung an den Gesamtkosten des Brennstoffkreislaufs von der Anreicherung des Urans über die Brennelementfertigung bis zur Wiederaufarbeitung und Endlagerung allein zwischen 1976 und 1986 von 18 % auf 43 % gestiegen ist.

Ihre Grenze findet die in Leichtwasserreaktoren erzielbare Erhöhung des Abbrandes durch die wasserseitige Korrosion der Hüllrohre, durch den Innendruckaufbau infolge der Erzeugung und Freisetzung von Spaltgas und infolge der Dimensionsänderungen von Hüllrohren, Brennstoff und Strukturteilen durch die Bestrahlung. Durch verbessertes Brennelementedesign, zum Beispiel die Erhöhung der Zahl der Brennstäbe pro Brennelement und durch den Einsatz verbesserter Hüllrohre und Brennelementstrukturmaterialien werden derzeit maximale mittlere Druckwasser- und Siedewasserreaktor-Entladeabbrände von 42 000 MWd/tU bzw. 40 000 MWd/tU erreicht, wobei die maximalen Abbrände einzelner Brennelemente bei 54 000 MWd/tU liegen.

Bei den meisten Kernkraftwerken ist schrittweise und im Rahmen der Betriebsgenehmigungen ein weiterer Anstieg der Entladeabbrände geplant.

In Deutschland werden pro Jahr etwa 500 t abgebrannte Brennelemente aus den Reaktoren entladen. Nach der etwa dreijährigen Einsatzzeit im Reaktor sind in dem bestrahlten Brennstoff noch beträchtliche Mengen an zur weiteren Energieerzeugung verwendbarem Spaltstoff vorhanden. Der Anteil an nicht mehr nutzbaren Spaltprodukten - also des eigentlichen Abfalls - beträgt weniger als 4 %. Die Hauptmenge von etwa 96 % weiter nutzbaren Brennstoffs besteht zu 95 % aus Uran und zu 1 % aus Plutonium, das durch Neutroneneinfang aus dem Uran entsteht.

Nach dem Atomgesetz ist der Betreiber von Kernkraftwerken verpflichtet, die beim Betrieb anfallenden bestrahlten Brennelemente schadlos zu verwerten oder als radioaktiven Abfall geordnet zu beseitigen. Schadlose Beseitigung bedeutet Wiederaufarbeitung und erneuten Einsatz der gewonnenen Spaltstoffe in Kernkraftwerken zur Energiegewinnung. Um die Spaltstoffe weiter verwenden zu können, ist es notwendig, Plutonium, Uran und Spaltprodukte voneinander zu trennen. Dies wird bei der Wiederaufarbeitung durchgeführt. Die nicht weiter verwendbaren Spaltprodukte werden in einem Schmelzofen in eine Glasmatrix eingebettet, diese in Edelstahlkokillen abgefüllt und nach einigen Jahrzehnten Zwischenlagerung der Endlagerung zugeführt. Die deutschen Kernkraftwerksbetreiber haben langfristige Verträge mit ausländischen Anbietern von Wiederaufarbeitungsleistungen, also der französischen Cogema und der britischen BNFL abgeschlossen.

Der erneute Einsatz des bei der Wiederaufarbeitung gewonnenen Urans erfolgt derzeit noch nicht in großtechnischem Maßstab, während Plutonium in großem Umfang in Form von sogenannten Mischoxid-Brennelementen in Kernkraftwerken zur Energieerzeugung verwendet wird. Mischoxid Brennelemente sind vom Aufbau her identisch mit Uran-Brennelementen und unterscheiden sich nur in der Art des Brennstoffs: statt angereichertem Uran wird eine Mischung aus Natururan und Plutonium verwendet, wobei durch das Plutonium die Anreicherung des Urans ersetzt wird. Die Rezyklierung des Plutoniums führt bei Leichtwasserreaktoren zu Einsparungen bei Natururan und Trennarbeit und zu einem langsameren Anwachsen der entstehenden Plutoniummengen.

Nach dem Atomgesetz ist auch die sogenannte Direkte Endlagerung der abgebrannten Brennelemente möglich, d. h. die verbrauchten Brennele-

mente werden nach Zerlegen und/oder Zerschneiden ohne weitere Behandlung in speziellen Endlagerbehältern in einem geologischen Endlager endgelagert. Die dazu erforderliche Konditionierungstechnik soll in der im Bau befindlichen Pilotkonditionierungsanlage am Standort Gorleben erprobt werden. Es steht im Ermessen der Kernkraftwerksbetreiber, sich zwischen den Entsorgungswegen Wiederaufarbeitung und direkte Endlagerung zu entscheiden.

**Zusammenfassung**

In über dreißig Jahren Stromproduktion durch über zwanzig Leistungsreaktoren in Deutschland ist kein Mensch nachweislich durch Strahlung zu Schaden gekommen - weder durch Störfälle noch durch den bestimmungsgemäßen Betrieb. Trotzdem wird darüber nachgedacht, wie die Eintrittswahrscheinlichkeit schwerer Störfälle weiter gesenkt und mögliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt verringert und eingeschränkt werden können. Im Rahmen von Nachrüstungen wurden eine Reihe entsprechender Maßnahmen verwirklicht. Die neue Generation an Kernkraftwerken wird ohne Notfallschutzmaßnahmen in der Umgebung kerntechnischer Anlagen auskommen.

Für die Staaten Südostasiens und der ehemaligen Sowjetunion ist der Ausbau der Kernenergie zur Stromproduktion voll im Gange. Da Uran noch lange als Kernbrennstoff weltweit zur Verfügung stehen wird und Stillegung von kerntechnischen Anlagen sowie die Endlagerung von radioaktiven Stoffen keine ernsthaften technischen Probleme darstellen, ist es allein eine Entscheidung unserer Politik, ob die Stromproduktion aus Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland im nächsten Jahrhundert ihren Marktanteil auch bei uns behalten wird.

Dietrich Schwarz

# Warum Kernenergie? Nichtklimatische Risiken*

## Einleitung

Akzeptanz läßt sich ohne einen sichtbaren Nutzen, allein durch weitere Verringerung des Restrisikos nicht erreichen.

Ein **wirtschaftlicher** Nutzen für neue Kernkraftwerke ist aber bei den heutigen Preisen für fossile Brennstoffe und den politisch bedingten Verfügbarkeitsrisiken für Kernkraftwerke nicht kalkulierbar.

Der Titel „Warum Kernenergie?" impliziert, daß es trotzdem Gründe geben könnte, weswegen neue Kernkraftwerke errichtet werden sollen oder zumindest sollten. Gefragt ist also nach einem ethisch begründeten Nutzen.

Auf der Suche danach wird zu prüfen sein, was global gesehen die größeren Risiken in sich birgt: Ein Verzicht auf Kernenergie oder ein ökoklimatisch wirksamer, d.h. erheblicher Ausbau der Kernenergie.

Die Aufgabe wird systematisch in folgender Weise angegangen: Die nichtklimatischen und klimatischen Risiken einer Trendfortschreibung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe sind zu untersuchen, dann ist zu fragen, inwieweit die daraus entstehenden Probleme technisch-wirtschaftlich oder durch Verhaltensänderungen auch ohne Kernenergie gelöst werden könnten, und schließlich ist darzulegen, was Kernenergie zu leisten vermag und welche Risiken damit wiederum verbunden sind.

## Nichtklimatische Risiken

Dieser Vortrag setzt sich mit der ersten Teilaufgabe auseinander, den nichtklimatischen Risiken. Dafür wird ein „Trend-Pfad" mit einem „Soll-Pfad" verglichen.

---

* Vortrag, gehalten in der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 20. Juni 1996

Vorab ist klarzustellen, was diese Pfade zum Inhalt haben sollen:

- Energieverbrauch oder -ersparnis
- $CO_2$-Emmission oder -vermeidung
- Ölverbrauch oder -verbrauchsminderung?

Meist werden die drei Begriffe in einen Topf geworden, sehr zu Unrecht. Die Warnung des Konfuzius, daß mangelnde begriffliche Klarheit üble Folgen zeitigt, gilt auch hier. Wie groß die Unterschiede sein können, zeigt ein Vergleich zwischen Schweden (ohne Holzverbrauch) und Deutschland, wie er in Bild 1 dargestellt ist.

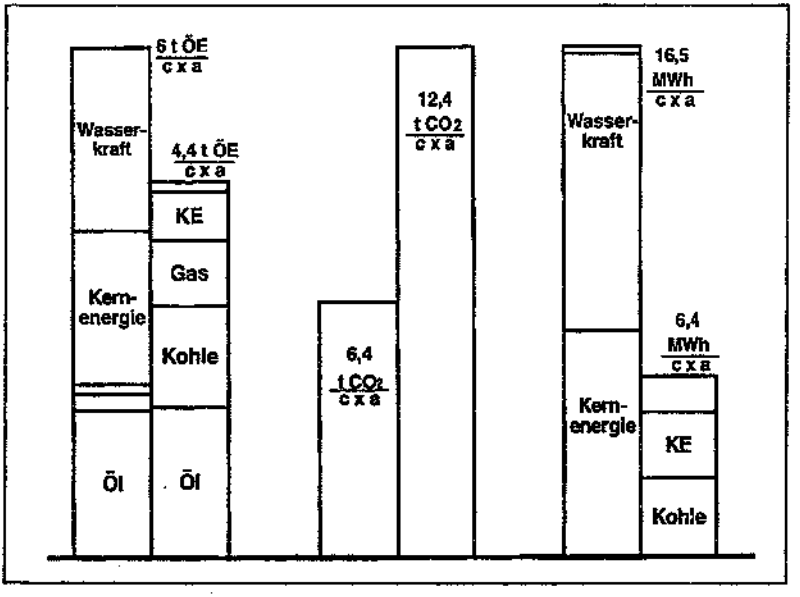


*Bild 1: Primärenergieverbrauch, $CO_2$-Freisetzung und Netto-Stromverbrauch pro Kopf in Schweden und in den alten Bundesländern (1990)*

Demnach hat Schweden gegenüber Deutschland pro Kopf

- ein Drittel mehr Energie verbraucht
- kaum mehr als die Hälfte $CO_2$ freigesetzt [wenn es irgendwo Vorreiter gibt, dann sind das nicht wir, sondern die Schweden, gemeinsam mit den Franzosen und Schweizern]
- aber trotzdem fast genau so viel Öl verbraucht; 1992 hat Schweden pro Kopf sogar deutlich mehr Öl verbraucht als wir.

Welche Bedeutung haben nun diese drei Punkte, wenn es darum geht, die Risiken für die Menschheit zu minimieren?

Die fast schon wie ein Glaubensbekenntnis gehandhabte Energieeinsparung ist die Forderung mit dem geringsten Gewicht. Sie kann sogar kontraproduktiv sein, dann nämlich, wenn sie sehr viel Kapital benötigt und andere, wichtigere Ziele deshalb darunter leiden. Der Gesichtspunkt der *Ressourcenschonung* für kommende Generationen ist bei den folgenden Forderungen hinreichend aufgehoben. Die Ressource Uran bedarf der Schonung nicht, weil hier immer der Ausweg des Brüters besteht, der - entgegen einer anscheinend unausrottbar falschen Vorstellung - nicht besonders unsicher ist, sondern im Gegenteil besonders sicher gebaut werden kann.

Eine drastische Senkung der $CO_2$-Emission ist vor allem von den Industrieländern zu fordern. Wenn aus Gründen der internationalen Verteilungsgerechtigkeit alle Länder bis 2050 auf 1 t $CO_2$ pro Kopf und Jahr herunterkommen sollen (wie von Klimatologen gefordert), bedeutet das für uns eine Senkung der Pro-Kopf-Emission auf ein Elftel.

Wie das Beispiel Schweden zeigt, sind $CO_2$-Vermeidung und Ölverbrauchs-Senkung nicht dasselbe. Letztere muß gesondert gefordert werden, weil ökologisch gefährdete Länder auf billiges Erdöl angewiesen sind, um ihre Wirtschaft aufzubauen, Wohlstand zu schaffen, die Grenzen der ökologischen Tragfähigkeit anzuheben und so dem ökologischen Zusammenbruch zu entgehen. Die Senkung des Ölverbrauchs ist ferner von Bedeutung zur Minderung von (Öl)Kriegsgefahren und - nicht zuletzt - zur Schonung der knappsten aller Energieressourcen für kommende Generationen.

Schonung der Ölvorräte ist besonders bedeutsam für arme Länder: Wenn nämlich das Öl wirklich einmal knapp werden sollte, werden technisch-wirtschaftlich leistungsfähige Nationen vergleichsweise leicht einen Ausweg finden, z.B. mit Methanol aus Kohle oder mit Wärmepumpen zum Heizen. Die armen Länder werden aber erst recht in Schwierigkeiten kommen; die unten diskutierten ökologischen und armutspezifischen Probleme würden sich unerhört verschärfen.

Für die Darstellung der Alternativen „Trend" und „Soll" wird als Meßgröße die $CO_2$-Emission verwendet. Es wird jedoch unterstellt, daß $CO_2$-Vermeidung und Minderung des Ölverbrauchs parallel verlaufen. Das ist nicht selbstverständlich und bedarf spezifischer, darauf zielender Anstren-

gungen. Nicht unterstellt wird, daß im gleichen Maße Energie gespart wird. Das wird zwar oft mit der $CO_2$-Vermeidung und der Minderung des Ölverbrauchs einhergehen, muß es aber nicht. Die Nachrangigkeit des Energiesparens bedeutet nicht, daß es nicht ein in sich wertvolles, anzustrebendes Ziel darstellte. Energieverschwendung ist keinesfalls zu befürworten, wohl aber ein zeitweiliger Energie-Mehrverbrauch - wie gleich zu erläutern sein wird.

Die in Bild 2 dargestellten Pfade sollten also nicht nur die $CO_2$-Emission, sondern auch den Ölverbrauch charakterisieren.

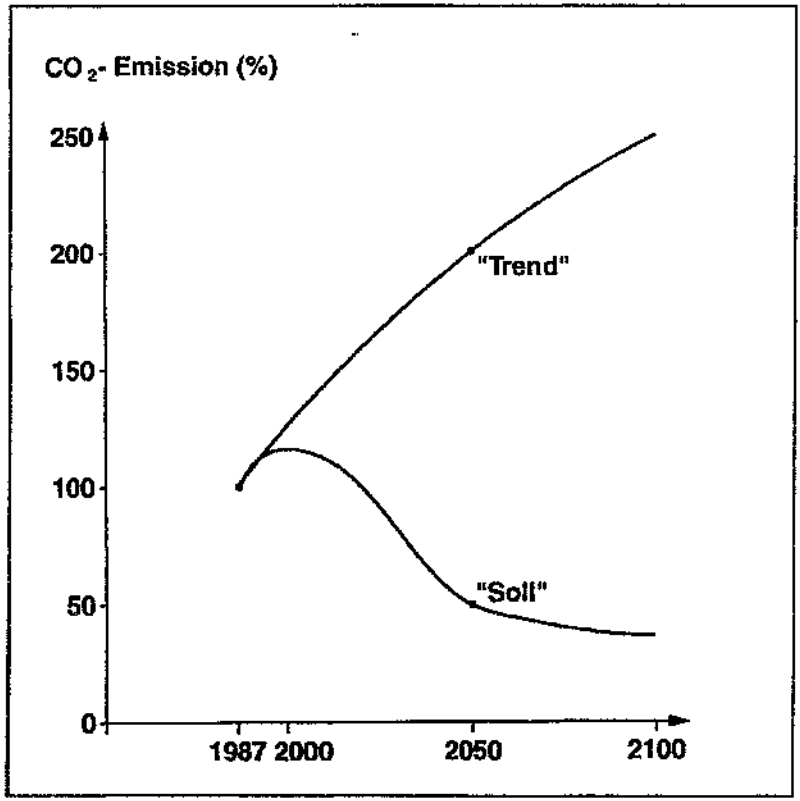


*Bild 2: Alternative $CO_2$-Emissionspfade*
*Bezug: 1987 = 100 %*

Der Zeitraum von 100 Jahren wurde gewählt, weil strukturelle Änderungen etwa zwei Generationen benötigen und die Folgen unterschiedlicher

Wege lange nachwirken. Die Erschließung einer Kohlengrube, Errichtung und Betrieb darauf basierender Kraftwerke und die Nachwirkungen des emittierten $CO_2$ umfassen sogar einen Zeitraum, der deutlich über 100 Jahre hinausreicht. Andererseits kann man nicht annehmen, daß die Menschheit stur an einem zunehmend als schädlich erkannten Weg festhält. Änderungen werden zwar langsam erfolgen, aber sie werden erfolgen. Insofern ist eine Betrachtung über einen noch längeren Zeitraum nicht sinnvoll.

Für den Trend-Pfad sei unterstellt: Überproportionales Wachstum in den Entwicklungsländern, das sich, absolut gesehen, beschleunigt, dann aber wieder verlangsamt; nach 2050 weiter verlangsamte Annäherung der Lebensverhältnisse in Nord und Süd; alles überlagert durch eine stetige Senkung des spezifischen Energieverbrauchs, die im „Norden" auch zu einer absoluten Verbrauchssenkung führt. Damit weitere Abflachung des Verbrauchsanstiegs gegen Ende des nächsten Jahrhunderts. Insgesamt ist der skizzierte Trend-Pfad moderat. Mit anderen gut begründeten Annahmen kann man auch zu höheren Werten kommen (so z.B. Heinz Vossebecker oder, zumindest bis zum Jahr 2020, die 1995 veröffentlichten Prognosen der Internationalen Energie-Agentur). Tendenziell ähnliche Verläufe werden auch vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), dem Weltenergierat und anderen Prognostikern angegeben.

Für den Soll-Pfad sei unterstellt, daß die von den Klimatologen geforderte Senkung der $CO_2$-Emission gelingt, und zwar mit Hilfe weitestgehender Nutzung von Nuklearstrom (Vorbild Schweden), ergänzt durch nuklearen Prozeßdampf, nukleare Fernwärme, nukleares Reformieren von Erdgas zur Wasserstofferzeugung (damit Erzreduktion, Ammoniakerzeugung etc.) sowie nuklear gestützter Methanolerzeugung aus Kohle (wichtig für die bereits genannte Sonderrolle der Ölverdrängung); für alle Fälle nuklearer Wärmenutzung ist der Hochtemperaturreaktor zweckmäßig.

Die Preise für fossile Brennstoffe werden niedriger sein als beim Trend-Pfad. Trotzdem wird unterstellt, daß in den Industrieländern [einschließlich der aufrückenden Schwellenländer] genau so viel gespart wird und genau so viele regenerative Energien genutzt werden wie beim Trend-Pfad, dies dank staatlicher Rahmensetzungen mit dem Ziel eines „Energiefriedens". Erste dahingehende Ansätze sind in der innerdeutschen Diskussion erkennbar (1), (2).

Die niedrigen Energiepreise werden es vor allem armen Ländern erleichtern, ihre Wirtschaft zu entwickeln und zu einem gewissen Wohlstand zu gelangen. Das bedeutet, daß

- die Bevölkerung weniger stark wächst als beim Trend-Pfad; Wohlstand ist diesbezüglich wirkungsvoller als armutbedingtes Sterben
- der Energieverbrauch mittelfristig (d.h. in diesem Fall: auf das Jahrhundert bezogen) deutlich höher sein wird als beim Trend-Pfad
- der Energieverbrauch langfristig, wegen der geringeren Menschenzahl jedoch niedriger sein wird.

Ein zunächst höherer Energieverbrauch ist also entschieden zu befürworten, sofern er - was möglich ist - mit einer Senkung der $CO_2$-Emission und des Ölverbrauchs verknüpft wird. Das ist kein Plädoyer für Energieverschwendung; das Bemühen um Senkung der spezifischen Energieverbräuche sollte nachdrücklich fortgesetzt werden.

Der Soll-Pfad kann ohne nennenswerte technisch-wirtschaftliche Schwierigkeiten vollzogen werden, wenn die Staatengemeinschaft, beginnend mit den Industrieländern, es will. Hier ist primär zu fragen, was wir wollen sollen, ob der Soll-Pfad seinen Namen verdient. Ein Teil der Antwort ergibt sich aus den nichtklimatischen Risiken des Trend-Pfades (im Vergleich zum Soll-Pfad). Die Risiken umfassen:

- den ökologischen Zusammenbruch ganzer Länder aufgrund verschlechterter energiewirtschaftlicher Randbedingungen
- das stille Sterben aufgrund größerer Armut
- höhere Wahrscheinlichkeit für Kriege um Öl und Wasser
- die klassischen Risiken der Gewinnung und Nutzung fossiler Brennstoffe (berufliche und nichtberufliche Beeinträchtigung von Leben und Gesundheit durch Unfälle und Schadstoffe; Wirkungen auf die übrige belebte und unbelebte Welt).

**Ökologischer Zusammenbruch ganzer Länder aufgrund verschlechterter energiewirtschaftlicher Randbedingungen**

Dieses ist das mit Abstand größte Risiko, das zugleich besonders schwierig zu erfassen ist. Es macht aber wenig Sinn, kleinere Risiken möglichst genau zu analysieren und viel größere nur aufgrund analytischer Schwierigkeiten überhaupt nicht zu betrachten. Deshalb sei hier eine qualitative und wenigstens größenordnungsmäßig quantitative Aussage versucht.

Zunächst müssen wir wissen, daß es zwei grundverschiedene Arten von Wachstum gibt.

- Bevölkerungswachstum über die Grenzen der natürlichen Tragfähigkeit hinaus mit nachfolgendem ökologischen Zusammenbruch (Bild 3).
- Wachstum der Grenzen zusammen mit dem Bevölkerungswachstum gemäß einer logistischen Kurve (Bild 4).

Beides sind natürliche Vorgänge, die es nicht nur bei menschlichen Populationen gibt; z.B. „Sägezahnkurve" bei Feldmäusen, Mäusebussarden (und einpoligen Kurzschlüssen auf Freileitungen).

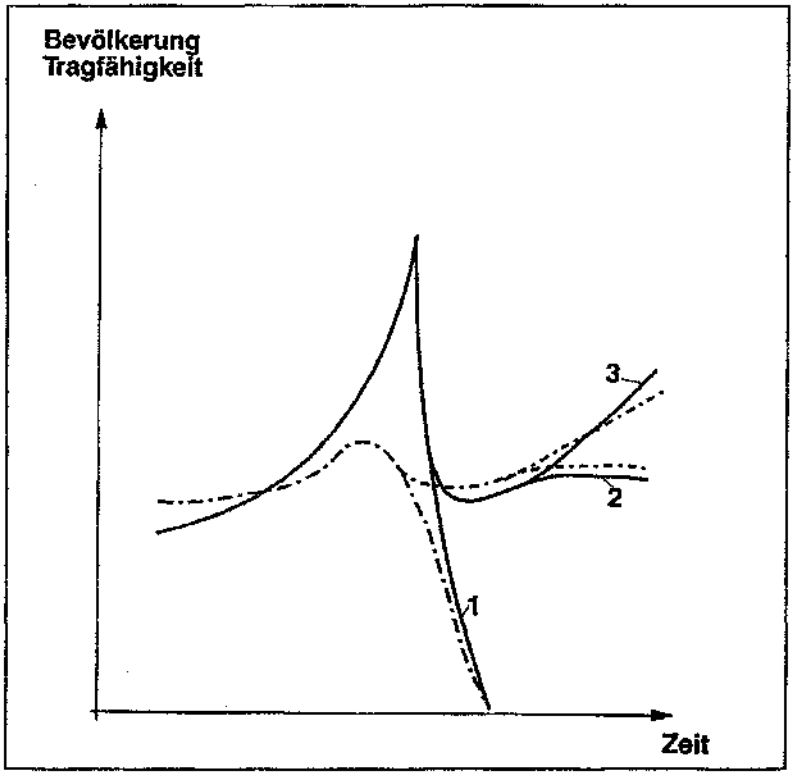


*Bild 3: Wachstum zum Zusammenbruch*
*— Bevölkerungsentwicklung*
*— · — ökologische Tragfähigkeit*

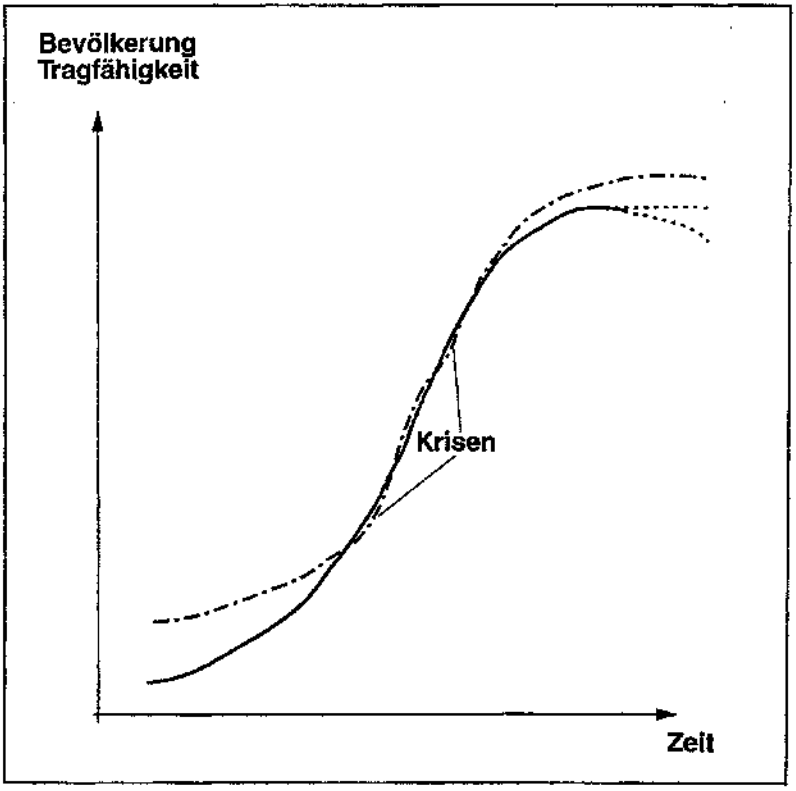


*Bild 4: Wachstum zur Stabilität*
*— Bevölkerungsentwicklung*
*— · — ökologische Tragfähigkeit*

Historische Zusammenbrüche gab es im Zweistromland und in Nordafrika (Versalzung, Verwüstung, Bild 3, Kurve 1), in Irland (Kartoffelfäule, Kurve 2) und in Europa (Pest im Mittelalter, Kurve 3); heute sind ähnliche Entwicklungen in großen Teilen Afrikas und in anderen armen Ländern des „Südens" zu beobachten und teilweise schon eingetreten (Sahel, Bürgerkriegsländer).

Der Ablauf ist häufig wie folgt: Arme Leute schicken ihre Kinder (Töchter) zum Holz- und Wasserholen, zur Sklavenarbeit und Prostitution statt zur Schule; die ungebildeten Kinder können, erwachsen geworden, das nur fortsetzen; je mehr Kinder, desto besser geht das. Die Natur wird dabei zunehmend überlastet. Bei zunehmender Not findet man heraus, daß

„die anderen", die ethnisch, religiös oder sonstwie anderen, schuld sind und meint sich nicht anders helfen zu können, als eben jene auszurotten; Krieg, Hunger und Seuchen und große Flüchtlingsströme führen schließlich zum regionalen Zusammenbruch der Bevölkerung und zum zusätzlichen ökologischen und ethnischen Streß in den Nachbarländern.

Solche Teufelskreise sind durchaus nicht zwangsläufig, wie die Entwicklung der Industrieländer gezeigt hat und die Entwicklung etlicher ost- und südasiatischer sowie lateinamerikanischer Länder dabei ist zu zeigen.

Hier (Bild 4) werden die Grenzen der ökologischen Tragfähigkeit angehoben, oft beginnend mit einem ertragreicheren Nahrungsmittel (Kartoffel im Deutschland des 18. Jahrhunderts, grüne Revolution der jüngeren Vergangenheit). Es folgt eine industrielle Phase mit zwischenzeitlichen Krisen, begleitet von erheblichen Migrationswellen (im 19. Jahrhundert wanderten allein aus Deutschland 5 Millionen Menschen aus). Am Ende schließt sich eine Phase der überwiegenden Dienstleistungen an, letztlich bedingt durch das im Jahre 1798 (Malthus) noch unvorstellbare Wachstum der Produktionskraft in traditionellen Berufen. Ermöglicht wird das durch ein erheblich gestiegenes Bildungsniveau, was wiederum durch Schulbesuch statt wirtschaftlich nützlicher Kinderarbeit und durch spätere Heirat zur Senkung der Geburtenrate beiträgt. Alterssicherung, medizinische Versorgung, Emanzipation der Frau und wohlstandsbedingte Entfaltungsmöglichkeiten kommen hinzu, so daß heute eine Stabilisierung auf hohem Niveau zu beobachten ist; die eigene Bevölkerung schrumpft sogar, was jedoch durch Zuzug von außen ausgeglichen wird.

Weitere Voraussetzungen für eine Entwicklung gemäß Bild 4 sind Friede, Rechtssicherheit, eine einigermaßen effiziente Verwaltung, Marktwirtschaft und - nicht zuletzt - genügende Mengen bezahlbarer Energie. Nach 1800 war das im wesentlichen die Kohle, die das bei weitem nicht mehr zureichende, regenerative Holz ablöste. Deutschland verbraucht heute, grob gerechnet, 100 mal so viel Energie wie im Mittelalter, etwa 10 mal so viel pro Kopf bei etwa 10 mal so viel Menschen. Trotz oder genauer wegen dieser enormen Zunahme ist es uns weitgehend gelungen, ein neues ökologischen Gleichgewicht auf hohem Niveau zu erreichen.

Die Frage, die sich im Zusammenhang dieses Vortrags stellt, ist nun:

Welchen Weg werden die Länder gehen, die das Quasi-Gleichgewicht neuer Art noch nicht erreicht haben? Welche Bedeutung hätte es für sie, wenn die Menschheit dem Trend-Pfad oder dem Soll-Pfad folgt?

Augenscheinlich gibt es eine Gruppe von Ländern, die unabhängig vom Energiepreisniveau den Weg nach oben schaffen werden; bei anderen ist mit hoher Wahrscheinlichkeit zu befürchten, daß auch reichlich vorhandene, billige Energie sie nicht vor dem ökologischen Zusammenbruch bewahren wird. Wenn das aber so ist, muß es eine Gruppe von Ländern geben, für die der Energiepreis gerade jenes Zünglein an der Waage ist, welches den Weg nach oben oder unten weist.

Die quantitative Bedeutung dieser Aussage sei wie folgt abgeschätzt: Die armen Länder werden noch lange auf fossile Energie angewiesen bleiben. Deren Preis könnte beim Trend-Pfad im Jahre 2050 etwa doppelt so hoch liegen wie beim Soll-Pfad, im Jahre 2100 etwa 2 ½ mal so hoch. Das entspricht in etwa der Faustformel der Geologen bei derart auseinanderlaufenden Verbrauchskurven und gilt, da es den Förderkosten entspricht, für energieimportierende wie energieexportierende Länder. Auch wenn der Primärenergiebedarf nur einige Prozent des Bruttosozialprodukts (BSP) in Anspruch nimmt, bedeutet das sehr viel. Man möge nur zurückdenken, wie sehr die wirtschaftlich-technisch starke Bundesrepublik Deutschland erschüttert wurde, als die Öl- und Gasrechnung das BSP 1973 mit etwa 1 %, 1979 mit etwa 2 % zusätzlich belastete. Entwicklungsländer waren damals noch härter betroffen, mußten sich mehr als sonst verschulden und leiden heute noch unter den Folgen der Hochölpreis-Phase.

Die Zusammenhänge sind, beispielsweise für Länder wie Nepal, Tansania oder Costa Rica, meines Wissens (noch) nicht genauer untersucht worden. Es sei vorgeschlagen, dieses nachzuholen, um die Konsequenzen eines Trend-Pfades im Vergleich zum Soll-Pfad besser abschätzen zu können.

Bis dahin sei versucht, sich dem Problem wie folgt zu nähern: Die Länder seien eingeteilt in drei Gruppen:

- ärmere Länder mit einem kräftigen, reichere Länder mit einem geringen Wachstum des BSP pro Kopf und Jahr
- ärmere Länder mit einem geringen Wachstum
- ärmere Länder mit einem Schrumpfen des spezifischen BSP,

alles gerechnet über einen mehrjährigen Zeitraum.

Diese Gruppen sind zweifellos nicht statisch. Einige Länder haben gerade Umwälzungen hinter sich, sind dabei sich zu stabilisieren und haben gute Aussicht sich zu erholen. Bei anderen besteht die Gefahr, daß sie den umgekehrten Weg gehen.

Eines wird man sagen können: Eine erhebliche Verteuerung der fossilen Energie wird es der untersten Gruppe erschweren, den nach unten gerichteten Trend umzukehren und einem ökologischen Zusammenbruch zu entgehen; eine erhebliche Verteuerung der fossilen Energie wird ferner den Weg einiger Länder der mittleren Gruppe von knapp nach oben nach knapp nach unten umkehren.

Betrachtet man das Pro-Kopf-Wachstum im Weltbankbericht 1994 (angegeben für die Zeit von 1980 - 1992), so sind Länder mit rund 1,7 Mrd Menschen der unteren und mittleren Gruppe zuzuordnen (einschließlich der Länder ohne Zahlenangaben mit Ausnahme Tschechiens). Davon könnte möglicherweise die Hälfte in der oben beschriebenen Weise betroffen sein, bis zum Jahre 2050 das Doppelte dieser Hälfte, also wieder 1,7 Mrd Menschen. Bis zum Jahre 2100 könnte sich die Zahl, bedingt durch die Irrungen und Wirrungen der menschlichen Geschichte, nochmals erhöhen, um Länder vom oberen und unteren Rand dieses Spektrums.

Was bedeutet das?: Daß ein nennenswerter Teil dieser Menschen, größenordnungsmäßig eine Milliarde, seine Heimat verlieren wird und davon wieder ein nennenswerter Teil durch Krieg, Hunger und Seuchen umkommen wird. Historischen Ereignisse dieser Art ist oft die halbe Bevölkerung, in Extremfällen - durch Seuchen - fast die ganze Bevölkerung zum Opfer gefallen. Heute kann man durch internationale Hilfsmaßnahmen den Todeszoll geringer halten, obwohl auch heute noch, wie im Falle Ruanda, Erschütterungen vorkommen, die über 10 % der Bevölkerung das Leben kosten.

Statt in spektakulären Großereignissen kann der ökologische Zusammenbruch auch in weniger dramatischen Etappen erfolgen, mit einer Folge von Mißernten, endemischem Hunger, Auftreten von Seuchen etc. bis hin zu kleinen Naturkatastrophen wie jener Überschwemmung in Haiti, der im November 1994 über 2000 Menschen zum Opfer fielen. (Haiti ist mangels alternativer Energien heute praktisch baumlos; andere Länder sind dabei, Haiti auf diesem Weg zu folgen.) Aus Nepal, Kolumbien u.a. Ländern werden immer wieder Erdrutsche mit zahlreichen Opfern gemeldet.

Die Summe solcher Ereignisse wird, wie gesagt, Fälle einschließen, die auch bei einem stetigen, reichen Angebot an billiger, fossiler Energie auftreten würden. Die Gesamtzahl der Betroffenen wird also höher sein als die oben genannten, die nur den vermuteten Teil jener umfassen, die mit dem Soll-Pfad anstelle des Trend-Pfades gerettet werden könnten.

Um Mißverständnissen vorzubeugen, sei angemerkt: Nichts davon ist zwingend. Wenn man jedoch erkennen muß, daß die Reichen dem gegenwärtigen milliardenfachen Elend und einem jährlichen zigmillionenfachen Sterben in diesem Elend zusehen, daß gerade die Idealisten[1] unter ihnen die Probleme verschärfen, weil ihre Idealforderungen Ressourcen fehlleiten, daß andererseits die Führer armer Länder nicht fähig oder nicht willens sind, ihre Völker aus der Not herauszuführen, so muß man sagen, daß vieles davon zumindest wahrscheinlich ist.

Auch das sei klargestellt: Energie ist nur ein Faktor unter vielen. Wenn man aber mit einer Vielzahl von endogenen und exogenen Problemen gerade eben so fertig wird, kann der Energiepreis das Gewicht sein, das der ins Negative weisenden Waagschale das Übergewicht gibt.

Schließlich sei noch einmal an die Eingangsbemerkung erinnert: Es ist wichtiger, etwas Wichtiges ungenau zu erfassen, als etwas Unwichtiges genau.

**Das stille Sterben der Armen**

Im Schatten möglicher ökologischer Zusammenbrüche steht das stille Sterben der Armen. Selbst in wohlhabenden Ländern haben die Ärmeren eine geringere Lebenserwartung. Im Vergleich reicher und armer Länder trifft das noch mehr zu.

Auch hier gilt: Nichts davon ist zwingend. Es gibt arme Länder mit hohem Bildungsstand und guter Basisfürsorge, -aufklärung und -hygiene, wo trotz der Armut die mittlere Lebenserwartung hoch ist (z.B. Kerala) und umgekehrt (z.B. Gabun). Aber auch hier zeigt der Augenschein, daß im Mittel über alle Unvollkommenheiten Armut zu frühem Sterben führt.

Aus den oben angegebenen Unterschieden in den Preisen für fossile Energien (Faktor 2 bis 2050, Faktor 2 ½ bis 2100) und unter der Annahme einer geringfügigen Abnahme des Anteils der Energiekosten am BSP beim Soll-Pfad sei eine globale Einkommenseinbuße um 2 % im Mittel über das ganze nächste Jahrhundert geschätzt. Das ist unrealistisch optimistisch, weil es die kumulierende Wirkung energiepreis-bedingt verringerter Investitionen vernachlässigt. Geht man trotzdem einmal von diesen 2 % aus, wird das im Mittel über die Menschheit vielleicht einen Lebensmonat ko-

[1] Hierzu gehören leider auch Entwicklungshilfeorganisationen

sten. Nimmt man weiter an, daß 18 Milliarden Menschen im Laufe des nächsten Jahrhunderts davon betroffen sein werden und pro Todesfall (relativ viele Kinder) 450 Lebensmonate verloren gehen, bedeutet das den vorzeitigen Tod von 40 Millionen Menschen. (Zwar wird die größere Zahl von Menschen gegen Ende des nächsten Jahrhunderts leben und dann von der relativ größten Preisdifferenz betroffen sein; aber vielleicht ist bis dahin die medizinische Grundversorgung besser.)

Angesichts der Tatsache, daß derzeit jedes Jahr (!) fast ebenso viele Menschen vorzeitig sterben, liegt die Zahl zumindest in der richtigen Größenordnung, und zwar - wegen der vernachlässigten Rückwirkung verminderter Investitionen - am unteren Ende des wahrscheinlichen Spektrums. Da der Effekt die ganze Menschheit teils mehr, teils weniger betrifft, überschneidet er sich nur teilweise mit den Opfern ökologischer Zusammenbrüche.

**Kriege um Öl und Wasser**

Vor dem jüngsten Golfkrieg ist seit 1973 in Wort und Schrift immer wieder gewarnt worden, ohne daß Politiker oder Private Konsequenzen daraus gezogen hätten. Ein Sinken des Ölverbrauchs war an der Statistik jedenfalls nicht abzulesen. Die Industrieländer reagierten auf die hohen Ölpreise, taten aber nichts darüber hinaus, um eine Kriegsgefahr zu verringern. Als es dann soweit war, protestierten Millionen dagegen, und als es vorbei war, wurde immer noch keine Konsequenz gezogen, auch nicht - statistisch erkennbar - von den Protestierenden. Dies läßt nicht gerade darauf hoffen, daß die Probleme des nächsten Jahrhunderts durch Einsicht und Verhältnisänderungen gelöst werden können.

Offensichtlich ist beim Trend-Pfad die Kriegsgefahr größer als beim Soll-Pfad. Beispielsweise sei angenommen, daß ersterer von zwei Kriegen begleitet sein wird, letzterer von keinem. Die direkten und indirekten Folgen dürften dann mehreren hunderttausend Menschen das Leben kosten, bei hartnäckigem Verlauf vielleicht auch einer Million. Ein Atombombeneinsatz, den die USA seit den 70er Jahren planen, wäre bei entsprechender Hochrüstung der Gegenseite nicht auszuschließen.

Solche Kriege werden viel Aufmerksamkeit erlangen; die Ernte des Todes wird jedoch deutlich geringer sein als beim stillen Sterben der Armen und noch geringer als bei den Opfern ökologischer Zusammenbrüche.

Mit dem Geld, das dort im Wortsinn verpulvert wird, kann Sinnvolleres erreicht werden. Der jüngste Golfkrieg kostete mehrere hundert Milliarden Dollar, die militärischen Aufwendungen zu Friedenszeiten kosten allein am Golf einige zehn Milliarden Dollar jährlich.

Betrachten wir nur die Einmalzahlung, die Deutschland für den Golfkrieg leistete: 18 Mrd DM (Chronik des 20. Jahrhunderts, Febr. '91) und unterstellen folgendes: Ablösung alter Kohlekraftwerke (per Gesetz) durch Kernkraftwerke; hierdurch keine oder nur geringe Mehrkosten gegenüber Importkohle oder Braunkohle; Einsatz der freiwerdenden Kohle zur Methanolerzeugung, vollständige Finanzierung der Anlagen aus einem 18 Mrd DM-Topf; Wettbewerbsfähigkeit des ohne Kapitalkosten erzeugten Methanols* (keine weiteren Subventionen). Dann könnten mit diesen 18 Mrd DM jährlich mehrere Millionen t Benzin - vielleicht 7 Millionen - ersetzt werden. Das ist zwar nur ein Bruchteil unseres gesamten Erdölverbrauchs, aber bereits ein großer Teil unserer Bezüge aus der Golf-Regien, die 1994 10 Mio t. betragen haben (davon ist noch ein Teil für den Eigenverbrauch der Raffinerien abzuziehen). M. a. W.: Statt einmal in die Kriegskasse zu zahlen, hätten wir mit dem selben Betrag die Lieferungen aus der Region nennenswert reduzieren und zudem Arbeitsplätze im Inland schaffen können.

Für die USA müßten vergleichbare Überlegungen in noch stärkerem Maße gelten, da sie neben einmaligen Kriegskosten eine dauernde militärische Präsenz bezahlen, die im Verlauf einiger Jahre (vielleicht 10) eine vergleichbare Größenordnung erreichen könnte wie die Kriegskosten.

Ein weiteres Risiko ist das der Kriege um Wasser. Diese drohen am Nil, am Jordan, am Euphrat, am Indus, am Ganges und andernorts. Eine alternative Wasserbeschaffung (Süßwasserferntransport, Meer- und Brackwasserentsalzung) sowie ein sparsamer Umgang mit Wasser (Abwasser-aufbereitung; Schlauchbewässerung und Verdunstungsschutz - beides auch der Versalzung vorbeugend) könnten die Lage entspannen. Da es hier um große Mengen geht, können die Probleme nur gelöst werden durch viel und preiswerte Energie sowie durch viel und preiswertes Kapital. Dessen

---

* Methanol ist nur einer von vielen Wegen, den Ölbedarf zu verringern. Es wird aber immer ein Bedarf an flüssigen Kohlenwasserstoffen bleiben, der weitgehend durch Methanol gedeckt werden kann. Bei der Erzeugung des Methanols kann die $CO_2$-Emission minimiert werden, wenn die Umwandlungsenergie aus Hochtemperaturreaktoren aufgebracht wird.

Bildung sollte nicht durch einen zu hohen Aufwand für unbedingt benötigte, aber vergleichsweise teure Energie behindert werden.

In Nordafrika und in Saudi-Arabien wird über die Nutzung der Kernenergie für diese Zwecke nachgedacht. Es wird jedoch eine Reihe von Anwendungsfällen geben, bei denen die Solarenergie wirtschaftlich wettbewerbsfähig ist; ein Hauptproblem, die Unterbrechung der Lieferung, wenn die Sonne nicht scheint, spielt bei der Erzeugung speicherbaren Süßwassers keine große Rolle. Allgemein sei bemerkt, daß $CO_2$-freie Energie nicht von vornherein mit Kernenergie gleichzusetzen ist und auch nicht ungeprüft, ohne Rücksicht auf die jeweiligen Gegebenheiten, gleichgesetzt werden soll.

Für beides, Energie- und Kapitalbeschaffung, weist der Trend-Pfad die größeren Risiken auf, macht Kriege um Wasser wahrscheinlicher. Da volkreiche Nationen betroffen sind, könnten sie auch verlustreicher werden als Kriege um Öl; auch die Folgewirkungen (Beeinträchtigung der Landwirtschaft) könnten größer sein.

Mangels diesbezüglicher Erfahrungen können, im Gegensatz zu Ölkriegen, nur Vermutungen ausgesprochen werden. Es sei angenommen, daß mit abnehmender Wahrscheinlichkeit (bis zum Faktor 10 gegenüber Ölkriegen) die Zahl der Opfer reziprok steigt.

Ökoklimatische Notstände und Kriege werden riesige Flüchtlingsströme auslösen, bis hin nach Europa - so wird vorausgesetzt. Der Augenschein zeigt aber, daß die Nachbarn notleidender Länder die Hauptlast zu tragen haben und dabei von der Völkergemeinschaft unterstützt werden. Dieter Lutz vom Institut für Friedensforschung und Sicherheitspolitik, Hamburg, sieht in seinem FAZ-Beitrag vom 28.3.1995 denn auch die größte Gefahr darin, daß sich die armen Länder mit billigen Waffen gegen die Benachteiligung durch die Reichen zu wehren beginnen. Billig im Sinne des Kosten-Nutzen-Verhältnisses sind neben chemischen und biologischen Waffen auch Atombomben. Lutz meint, „marodierende" Nuklearwaffen könnten fertig gekauft werden. Bekanntlich läßt sich waffengrädiges Material aber auch in sehr einfachen Natururan-Meilern herstellen. Wie dem auch sei, auf diese Weise könnte ein Verzicht auf die friedliche Nutzung der Kernenergie eine unfriedliche Nutzung nahelegen.

Sollte es dazu kommen, könnte die Zahl der Opfer wesentlich größer werden. Es sei aber auch hier angenommen, daß die Eintrittswahrscheinlichkeit umgekehrt proportional zur Zahl der Opfer abnimmt.

**Klassische Risiken**

Die klassischen Risiken der Gewinnung und Nutzung fossiler Brennstoffe (berufliche und nicht berufliche Beeinträchtigung von Leben und Gesundheit durch Unfälle und Schadstoffe sowie die Wirkungen auf die übrige belebte und unbelebte Welt) sind bereits von mehreren Autoren untersucht worden, zusammenfassend beispielsweise von Fritzsche (3).

Zur Abschätzung der Schäden muß man zunächst die Differenz von Trend-Pfad und Soll-Pfad integrieren. Sodann ist anzunehmen, daß gegenüber dem heutigen Stand der Technik eine Verbesserung eintritt, besonders dort, wo die heutigen Gegebenheiten nicht so gut sind, wie z.B. im chinesischen Kohlebergbau. Dem ist entgegenzuhalten, daß die Gewinnung fossiler Brennstoffe in Zukunft schwieriger werden wird und beim Trend-Pfad nicht so viel Kapital zur Verbesserung der Sicherheit gebildet werden kann (gewisse Überschneidung mit der Zunahme armutbedingten Sterbens). Die technischen Verbesserungen werden aber insgesamt überwiegen.

Dies vorausgeschickt sei die Größenordnung der Differenz in den Folgen zwischen den beiden Pfaden wie folgt abgeschätzt:

- Größenordnungsmäßig eine halbe Million Tote durch Unfälle und berufliche Krankheiten im Kohlebergbau; die entsprechenden Zahlen bei der Gewinnung und dem Transport von Öl, Gas und Uran liegen deutlich darunter, so daß sie in der Schätzunsicherheit für den Kohlebergbau untergehen.

- mehrere 10 Millionen Kranke in der allgemeinen Bevölkerung aufgrund von Luftschadstoffen, dies hauptsächlich in armen Ländern, mit einem nennenswerten Prozentsatz vorzeitig Sterbender; es sei vermerkt, daß hier wie auch sonst eine Ursache-Folge-Wirkung nur ungefähr anzugeben ist, die Zahlen also mit einer erheblichen Unsicherheit verbunden sind; nicht selten steigt selbst in stark umweltbelasteten Gegenden die Lebenserwartung, weil der Wohlstandseffekt den nachteiligen Effekt der Umgebungsbelastung überkompensiert (Vergleich Sachsen - Mecklenburg in der früheren DDR). Wenn man jedoch mit dem Soll-Pfad einen größeren Wohlstand mit weniger Umweltbelastung erreicht, muß eine solche Rechnung, wie hier geschehen, aufgemacht werden.

- Durch Schadstoffe bedingte Schäden an Tieren, Pflanzen, Bauwerken etc. werden in Industrieländern geringer sein als die monetären Unterschiede zwischen den beiden Pfaden. In ärmeren Ländern wird es lokal zu größeren Schäden kommen, die aber wesentlich kleiner sein werden als die ökologischen wie auch die hier nicht diskutierten klimatischen Risiken. Selbst wenn ihr Gewicht nicht ganz so groß ist: Sie werden doch dazu beitragen, alle übrigen Risiken zu vergrößern.

**Zusammenfassung**

Es sei versucht, das zuvor Gesagte in dem üblichen Risikodiagramm darzustellen, in dem die Eintrittswahrscheinlichkeit über der Größe der Risiken aufgetragen wird (Bild 5).

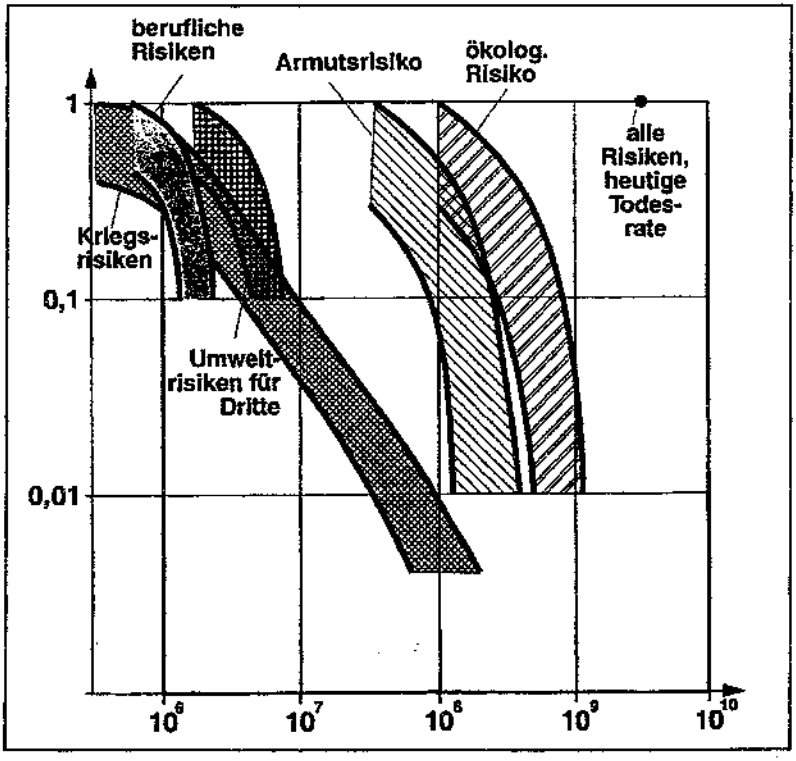


*Bild 5: Zusammenfassende Darstellung nichtklimatischer Risiken (betrachteter Zeitraum: 2000 - 2100)*

Dabei wurden die angegebenen Zahlen mit intuitiven, plausibel erscheinenden Unsicherheits-Bändern umgeben.

Dies, und nicht mehr, wird von meinen Ausführungen beansprucht: Plausibilität. Historische, in die heutige Zeit reichende Erfahrungen der Menschheit mit sich selbst und mit ihrer Umgebung stützen diesen Anspruch. Von diesem Standpunkt aus gesehen könnten einige Zahlen sogar eher optimistisch sein.

Letzteres drängt sich auf, wenn man die heutige Rate vorzeitigen Sterbens über hundert Jahre hinweg fortschreibt; man kommt dann zum Punkt oben rechts in Bild 5. Selbst dieser Punkt würde voraussetzen, daß das Sterben im Elend nicht proportional zum Bevölkerungswachstum zunimmt, sondern „nur" gleichbleibt, relativ gesehen also abnimmt. Für das heutige Sterben gibt es mehrere Ursachen, die Energieproblematik ist nur eine davon. Setzt man nun die Zahlen des Bildes 5 zueinander in Beziehung, hätte Energie eine kleinere Bedeutung, als sie sie wohl realiter hat. Wir müßten also beim Trend-Pfad relativ zum Soll-Pfad eher mit noch mehr Opfern rechnen.

Es kann nicht die Aufgabe eines Vortrags sein, alles das zu leisten, was die Gemeinschaft der Risikoforscher bisher nicht geleistet hat. Es wäre jedoch gut, wenn die hier aufgezeigten, wirklich großen Risiken näher untersucht würden - beispielsweise beginnend mit der oben angeregten Untersuchung der Folgen der Ölpreiskrise für Nepal, Tansania oder Costa Rica. Auch chaostheoretischen Ansätzen sollte nachgegangen werden. Sollte mir zu großer Pessimismus (statt Optimismus) nachgewiesen werden, würde mich das freuen. Der Philosoph Hans Jonas, dem ich diesbezüglich folge, empfiehlt jedoch, im Ungewissen zunächst den Pessimismus vorzuziehen. Nicht zuletzt sei darauf hingewiesen, daß bei der Kernenergie, um die es hier geht, konservativ, sprich pessimistisch vorgegangen wird. Insofern ist zumindest qualitativ eine Gleichbehandlung gegeben.

## Literatur

(1) Enquete-Kommission Schutz der Erdatmosphäre: „Mehr Zukunft für die Erde", Teil B/Kap. 10, Minderheitenvotum für Handlungsempfehlungen, Abschnitt 2.3.7 „Neue Allianzen", Economica-Verlag 1994

(2) Ulrich Hartmann, VEBA: Anmerkungen zur Energiepolitik, nach einem Vortrag am 2. November 1994 in: Hamburg, in Elektrizitätswirtschaft 1995, Heft 3

(3) A.F. Fritzsche, Gesundheitsrisiken von Energieversorgungssystemen, Verlag TÜV Rheinland, 1988

Albert Bayer

# Der anlagenexterne nukleare Notfallschutz - ein Werkzeug zur Verminderung des nuklearen Risikos

*"Gegen ungewöhnliche Zufälle gibt es keine Mittel.*
*Aber man muß Berechnungen anstellen,*
*was alles für Zufälle eintreten könnten,*
*und dann ihnen gegenüber um Abhilfe besorgt sein."*

Niccolò Machiavelli (1469-1527)
"Discorsi sopra la prima deca di Tito Livio"
(Gedanken über Politik und Staatsführung)

## 1. Gefahren und Gefahrenabwehr

Gefahr besteht dann, wenn Ereignisse eintreten können, die möglicherweise Schäden für den Menschen und seine Umwelt zur Folge haben.

Gefahren, die für den Menschen von Bedeutung sind, ergeben sich aus Vorgängen in der Natur (z.B. Erdbeben, Vulkanismus, Sturm etc.) oder haben zivilisationsbedingte Ursachen. Die Quellen zivilisisationsbedingter Gefahren wiederum sind in gesellschaftlich-politischen Umständen (z.B. Unruhen, Krieg etc.) und technischen Gegebenheiten zu suchen. Schließlich lassen sich die technischen Gefahren grob in zwei Kategorien einteilen: zum einen in Gefahren, die von den in den verschiedenen Industriezweigen ablaufenden Prozessen ausgehen, und zum anderen in Gefahren, die von den Verbrauchsgütern (einschließlich Rohstoffen und Abfallprodukten) selbst herrühren (siehe Abb. 1). Die eigentliche Gefahr kann dabei von der möglichen Freisetzung von Energie ausgehen, die in unterschiedlicher Form gespeichert ist (typische Kenngrößen sind Druck, Temperatur, Geschwindigkeit, elektrische Spannung usw.), oder von gewissen Stoffeigenschaften (Giftigkeit, Brennbarkeit, Explosionsfähigkeit etc.) sowie auch vom Zusammenwirken anomaler Zustände und Materialeigenschaften.

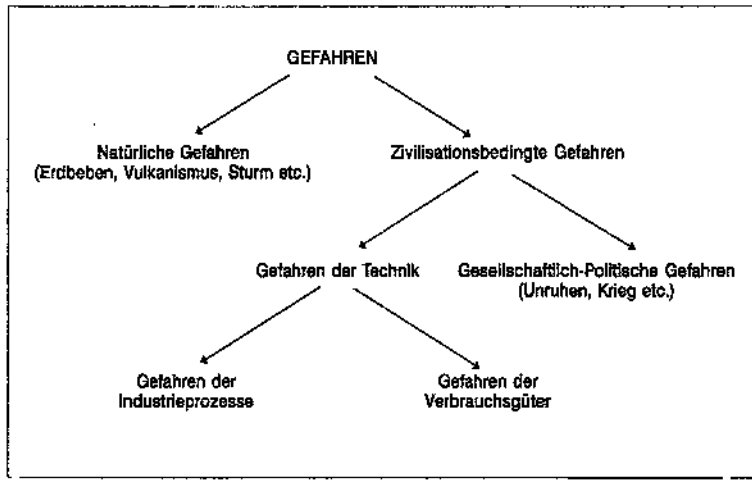


*Abb. 1: Gefahren*

Die Kerntechnik und die ihr zugehörigen Prozesse sind in den Anlagen des nuklearen Brennstoffkreislaufs konkretisiert. Das dabei produzierte Verbrauchsgut ist fast ausschließlich elektrische Energie. Die mit dem Verbrauchsgut "elektrische Energie" verbundene Gefahr ist unabhängig von der zur Erzeugung dieser Energie angewandten Technik (z.B. Wärme- und Wasser-Kraftwerke). Allerdings wird als charakteristisch für die Kernenergie diejenige Gefahr angesehen, die mit den in den Anlagen des nuklearen Brennstoffkreislaufs gehandhabten radioaktiven Materialien (Brennstoff, Abfallprodukte) verbunden ist.

Der Mensch ist im allgemeinen bestrebt, Gefahren abzuwehren oder zumindest die Möglichkeit ihres Auftretens und das Ausmaß der Schäden zu vermindern. Bei den Gefahren der Technik wird dieser Zielvorstellung mit Hilfe technischer und administrativer Maßnahmen entsprochen.

Technische Maßnahmen umfassen die Installierung und Inspektion technischer Sicherheitssysteme. Administrative Maßnahmen umfassen vorgeplante bzw. vorgedachte Anweisungen und Aktionen zum Schutz der Bevölkerung, wie z.B. Aufsuchen von schützenden Räumen oder Evakuierung gefährdeter Gebiete.

Eine Abwehr von Gefahren setzt voraus, daß diese erkannt werden. Gegen Gefahren, die jenseits der bisherigen menschlichen Erkenntnis liegen, ist

eine gezielte Abwehr nicht möglich. Sie bleiben unerkannte Gefahren; auf diese kann - bei ihrem Auftreten - nur mit ad-hoc Anweisungen und Aktionen reagiert werden.

## 2. Der nukleare Notfallschutz - Aufgaben

Das Werkzeug der Gefahrenabwehr ist der Notfallschutz. Ziel des Notfallschutzes ist es, in einem Ereignisfall - sei es ein technischer Unfall, eine Naturkatastrophe oder ein anderes Ereignis - durch zeit- und sachgerechtes Entscheiden und Handeln von fachlich kompetentem Personal sowie durch den Einsatz vorhandener Einrichtungen, vorgehaltener Geräte und Materialien, die möglichen Auswirkungen dieses Ereignisses so niedrig wie möglich zu halten. Der nukleare Notfallschutz hat speziell den Schutz vor den Gefahren, die mit den gehandhabten radioaktiven Materialien verbunden sind, zur Aufgabe. Dabei wird zwischen dem anlageninternen und dem anlagenexternen Notfallschutz unterschieden.

Der anlageninterne nukleare Notfallschutz stellt die Gesamtheit aller technischer und organisatorischer Maßnahmen dar, die in einer kerntechnischen Anlage ergriffen werden, um auslegungsgemäß nicht vorgesehene Anlagenzustände oder Ereignisabläufe möglichst frühzeitig zu erkennen, zu kontrollieren und in ihrer möglichen Auswirkung innerhalb und außerhalb der Anlage zu begrenzen.

Der anlagenexterne Notfallschutz ist das spezielle Instrument zum Schutz der Bevölkerung vor den Auswirkungen unfallbedingter Freisetzungen von Radionukliden aus technischen Anlagen mit nachfolgenden Kontaminationen und erhöhten Strahlenexpositionen. Die wichtigsten Elemente des anlagenexternen Notfallschutzes und ihre Struktur sind in Abb. 2 schematisch dargestellt.

## 3. Radiologische Grundlagen und Schutzziele

Ausgangspunkt der Überlegungen zum nuklearen Notfallschutz sind die radiologischen Grundlagen. Sie umfassen neben der Strahlenphysik (Natur der verschiedenen Strahlenarten sowie ihre möglichen physikalischen Wechselwirkungen mit der Materie und ihren Bausteinen), die biologischen Wirkungen der Strahlenexposition auf den Menschen sowie den quantitativen funktionalen Zusammenhang zwischen der Strahlenexposition und der biologischen Wirkung.

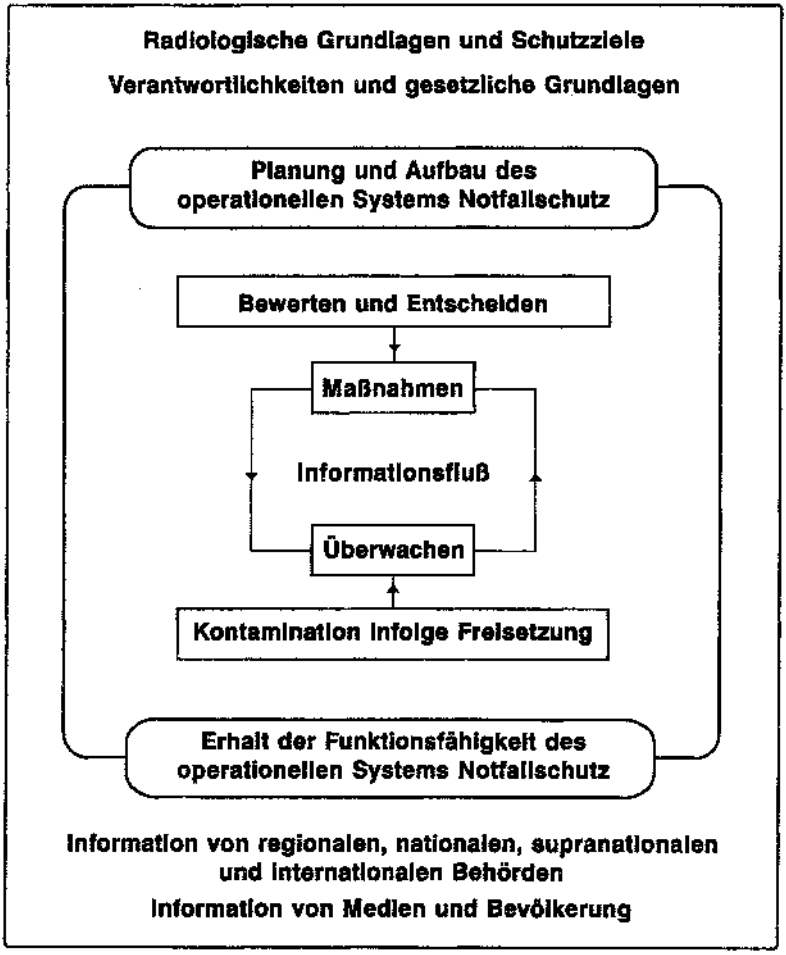


*Abb. 2: Der anlagenexterne Notfallschutz (schematisch)*

Biologische Wirkungen werden unterschieden in:

- genetische Schäden (Schäden am Erbgut),
- teratogene Schäden (Schäden an der Leibesfrucht),
- somatische Schäden (Schäden am geborenen Menschen).

An den funktionalen Zusammenhängen zwischen Strahlenexposition und biologischer Wirkung (Dosis-Wirkungs-Beziehung bei deterministischen bzw. nicht-stochastischen Effekten, Dosis-Risiko-Beziehung bei stochastischen Effekten) orientieren sich die Schutzziele: Vermeidung von möglichen schädlichen deterministischen Auswirkungen sowie weitgehende Minderung des Auftretens von stochastischen Wirkungen.

Als generelle Maßnahmen zur Erreichung dieser Schutzziele stehen zur Verfügung:

- Abschirmung zur Reduzierung der externen Strahlenexposition,
- Ortswechsel zur Verminderung der Expositionszeit bzw. der Dosisleistung,
- Schließen von Türen und Fenstern zur Verringerung der Inkorporation von Radionukliden über die Atmung
- Vermeidung oder Verminderung der Inkorporation von Radionukliden mit den Lebensmitteln zur Reduktion der internen Strahlenexposition,
- Dekontamination zur Reduzierung der externen Strahlenexposition.

Zur Erreichung der Schutzziele werden national und international Schutzkonzepte entwickelt. Diese beinhalten die Festlegung von "Grenzwerten" im Hinblick auf Kontamination und Strahlenexposition, die Prinzipien zur Einrichtung von Überwachungssystemen und die Nennung und Beschreibung von Einzelmaßnahmen einschließlich von Anleitungen darüber, wie diese Maßnahmen zur optimalen Erreichung des angestrebten Ziels einzusetzen sind.

## 4. Verantwortlichkeiten und gesetzliche Grundlagen

Die Bewältigung der Aufgabe "nuklearer Notfallschutz" liegt in der Verantwortung des Staates.

Gemäß dem föderalistischen Aufbau der Bundesrepublik Deutschland sind die Verantwortlichkeiten des Notfallschutzes auf die Länder und den Bund verteilt.

- Da die allgemeine Gefahrenabwehr - sie umfaßt Polizeirecht, allgemeines Ordnungsrecht, Katastrophenschutzrecht etc. - in die Kompetenz der Länder fällt, übernehmen die Länder mit ihren Behörden auch die Verantwortung für die Bewältigung jener Aufgaben, die man dem nuklearen Katastrophenschutz zuordnet. Die Durchführung dieser Aufgabe wird in den Katastrophenschutzgesetzen der Länder geregelt.

- Demgegenüber übernimmt der Bund mit seinen Behörden die Verantwortung für die Bewältigung jener Aufgaben, die der Strahlenschutzvorsorge zugeordnet sind. Die speziellen Aufgaben sind im Strahlenschutzvorsorgegesetz geregelt.

Dies ist - zusammen mit einigen weiteren Details, die im folgenden beschrieben werden - schematisch in Abb. 3 dargestellt.

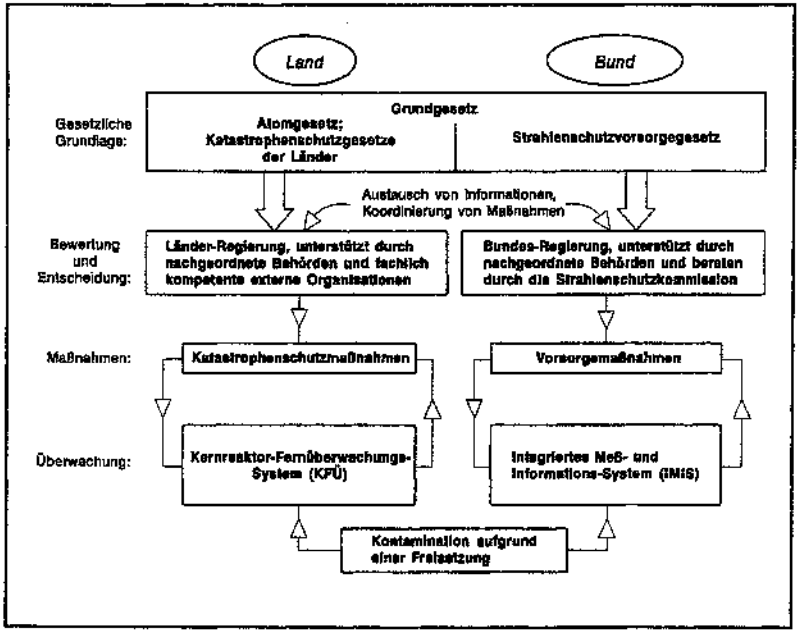


*Abb. 3: Operationelles Notfallschutzsystem der Länder und des Bundes*

Beide Aufgabenbereiche - nuklearer Katastrophenschutz und Strahlenschutzvorsorge - werden in Deutschland sprachlich unter dem Begriff "Nuklearer Notfallschutz" zusammengefaßt.

## 5. Das operationelle System Notfallschutz - Aufgaben und Struktur

Damit im Ereignisfall die Ziele der Schutzkonzepte schnell und wirksam erreicht werden, bedarf es innerhalb eines Verantwortungsbereichs des Aufbaus eines operationellen Systems.

Dieses operationelle System besteht aus den Elementen

- Überwachung (bzw. Ermittlung) der Kontamination und der Strahlenexposition sowie - soweit im Einzelfall möglich - auch Überwachung der Emissionen der potentiellen Quellen,
- Bewertung der Überwachungsergebnisse und Entscheidungen im Hinblick auf Maßnahmen und Empfehlungen,
- Durchführung der beschlossenen Maßnahmen und Befolgen von ausgesprochenen Empfehlungen.

Diese genannten Elemente können zusammen mit dem Ereignis selbst einschließlich des nachfolgenden Kontaminationsvorganges in etwa den Elementen eines Regelkreises (genauer: Denk- und Lernkreis) zugeordnet werden.

### 5.1 Kontaminationsvorgang nach unfallverursachter Freisetzung

Die Art und Weise der Freisetzung von Radionukliden hängt vom (anlageninternen) Unfallablauf ab.

Potentielle Quellen sind zivile und militärische Anlagen und Geräte mit radioaktivem Inventar. Dies sind u.a.:

- Kernkraftwerke und die Anlagen des kerntechnischen Brennstoffkreislaufs (Brennelementefabrik, Wiederaufarbeitungsanlage, Lager, Transporte etc.),
- sonstige stationäre Anlagen mit bedeutendem nuklearen Inventar,
- Land- und Wasserfahrzeuge sowie Luft- und Raumfahrzeuge mit nuklearem Inventar (als Antrieb oder als Ladung),
- Kernwaffen und Anlagen zu ihrer Herstellung,

Im Ereignisfall wird der Ablauf in der Anlage - soweit möglich - mit Hilfe der verfügbaren Anlageninstrumentierung beobachtet. Auf dieser Basis sowie mit Hilfe von Computercodes errechneten Quellltermen verschiedener Unfallabläufe (z.B. in Risikostudien), ggf. auch mit Hilfe von Analogieschlüssen zu bereits stattgefundenen Unfällen, wird man versuchen, zu einer Prognose des voraussichtlichen Freisetzungsvorganges zu gelangen.

Die dann gegebenenfalls als Folge der Freisetzung stattfindende Kontamination der Umwelt hängt zum einen von Art und Menge der Freisetzung ab. Desweiteren hängt sie bei Freisetzung in die Atmosphäre von den herrschenden atmosphärischen Transport- und Depositionsvorgängen und bei Freisetzung in die Hydrosphäre von den herrschenden hydrosphärischen Transport- und Sedimentationsvorgängen ab. An diese Vorgänge schließen sich weitere Transfer- und Bioakkumulationsvorgänge an, die schließlich die Kontamination in der Ökosphäre bestimmen.

### 5.2 Überwachung der Kontamination und der Strahlenexposition

Zur Ermittlung der Kontaminationslage befinden sich Überwachungseinrichtungen vorzugsweise in der Umgebung von stationären Anlagen, um speziell diesen Bereich, in dem mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit bei einem Unfall mit nachfolgender Freisetzung die höchsten Kontaminationen zu erwarten sind, zu überwachen. Dies erfolgt im wesentlichen mit Hilfe der Kernreaktor-Fernüberwachungssysteme (KFÜ) der Länder. Darüberhinaus sind Überwachungseinrichtungen aber auch auf dem gesamten Staatsgebiet installiert, um die Kontaminationslage "flächendeckend" mit Hilfe des "Integrierten Meß- und Informationssystems für die Überwachung der Umweltradioaktivität" (IMIS), eine Einrichtung des Bundes, der die Länder zuarbeiten, zu ermitteln.

Neben Messungen werden Modellrechnungen (Simulation) zur Ermittlung der aus der Kontamination resultierenden Strahlenexposition sowie zur Prognose der in der Folgezeit zu erwartenden Kontaminationslage und der daraus resultierenden Strahlenexposition durchgeführt. Eng an diese Modellrechnungen angekoppelt sind meist weitere Rechenprogramme, mit deren Hilfe die Wirkung möglicher Maßnahmen prognostisch ermittelt werden. Sie stellen damit ein hilfreiches Werkzeug für die Entscheidungsfindung (siehe nächster Abschnitt) dar.

### 5.3 Bewertung der Überwachungsergebnisse und Entscheidungen

Bei der Bewertung sind sowohl Entscheidungen ohne Ermessensbereich zu treffen, als auch solche, bei denen innerhalb vorgegebener Richtwerte ein gewisser Ermessensbereich vorliegt.

Die Vorgabe der Sollwerte erfolgt in der Regel durch internationale Empfehlungen (z.B. der ICRP* und der IAEA** ), die in EU-Recht und in nationales Recht umgesetzt werden können. Hieraus leitet sich ein Dosis-Maßnahmen-Konzept her, in dem Dosisrichtwerte für das Einleiten von Notfallschutzmaßnahmen erarbeitet werden. Durch das Auswerten von Erfahrungen (im eigenen Land wie auch in anderen Ländern) kann es sinnvoll sein, entsprechende Modifikationen vorzunehmen. Schließlich ist es im Ereignisfall zuweilen sinnvoll, die anfänglichen Sollwerte durch Abwägen aus der Situation heraus zu verändern. Hierdurch wird der reine Regelkreis zu einem Lern- und Denkkreis.

### 5.4 Durchführung beschlossener Maßnahmen und ausgesprochener Empfehlungen

Auf der Grundlage der Bewertung und Entscheidung werden die beschlossenen Maßnahmen ergriffen, wobei sich entsprechend dem angewandten Dosisrichtwertesystem Maßnahmen ohne Ermessensbereich und Maßnahmen mit Ermessensbereich unterscheiden lassen. Entsprechend den gesetzlichen Grundlagen unterscheidet man in Deutschland - wie eingangs erwähnt - zwischen den Katastrophenschutzmaßnahmen, deren Anordnung im Kompetenzbereich der Länder liegt, und den Vorsorgemaßnahmen, deren Anordnung im Kompetenzbereich des Bundes liegt.

Die ergriffenen Maßnahmen bzw. ausgesprochenen Empfehlungen können administrativer, agrarischer, technischer oder medizinischer Natur sein. Die prinzipiell möglichen Maßnahmen sind meist vorab in sogenannten Maßnahmenkatalogen zusammengestellt, in denen neben der Maßnahme selbst auch die Effizienz und die Anwendbarkeit bei bestimmten Randbedingungen angeben sind. Darüberhinaus wird i.a. auch auf mögliche Nachfolgeprobleme aufmerksam gemacht.

### 5.5 Informationslogistik

Um im Ereignisfall das Ziel "schnell zielsichere Entscheidungen treffen, um die bestmögliche Beschränkung der potentiellen Auswirkungen zu gewährleisten" zu erreichen, ist ein schneller Informationsfluß

---

* ICRP = International Commission on Radiological Protection

** IAEA = International Atomic Energy Agency

(Informationslogistik) erforderlich. Dies wird mit Hilfe modemer Informationstechniken realisiert, die die technisch zügige Weitergabe von Informationen jeglicher Art sowohl zwischen den Elementen des Regelkreises, als auch innerhalb der Elemente selbst gewährleisten. Hierdurch ist ein schnelles Regelverhalten des Regelkreises erst möglich.

## 6. Das operationelle System Notfallschutz - Aufbau und Erhalt der Funktionsfähigkeit

Der Einrichtung der besprochenen Komponten geht eine Planung voraus, die die optimale Gestaltung des operationellen Systems Notfallschutz mit den vorhandenen Ressourcen zum Ziel hat. Die Schwerpunkte liegen dabei - unter Zugrundelegung unterschiedlicher Unfall-Szenarien - in der vorausschauenden Koordination des Einsatzes der Ressourcen (hier: für die Überwachung und die Umsetzung der Maßnahmen), in der Rationalisierung der Entscheidungsprozesse und der Abstimmung der Teilaufgaben, in der permanenten Erhöhung der Steuerungs- und Lernkapazität des Systems und in der Bewältigung der Führungs- und Organisationsaufgaben, insbesondere während des Prozesses der Konsensbildung bei Entscheidungen.

Damit das so erstellte operationelle System Notfallschutz funktionsfähig ist und bleibt, d.h. damit die allzeitige Bereitschaft des Systems gesichert ist, müssen während der Einrichtung, vor allem aber während des Einsatzes des Systems

- die geltenden Zuständigkeiten sowie die Inhalte der zwischen den beteiligten Institutionen im Ereignisfall auszutauschenden Informationen immer wieder überprüft werden,
- die installierten Einrichtungen, bereitgehaltenen Geräte und Materialien möglichst auf dem neuesten Stand gehalten sowie durch regelmäßige Tests auf ihre Funktionsfähigkeit und Effizienz hin geprüft werden,
- der erforderliche Wissensstand der in diesem Bereich tätigen Personen durch Schulung vermittelt und immer wieder aktualisiert und gefestigt werden,
- durch Übungen die Fähigkeit der Beteiligten, das durch Schulung erworbene Wissen für das Problemlösen umzusetzen, überprüft und gefestigt werden.

**7. Information von nationalen, supranationalen und internationalen Behörden**

Das innerhalb eines Verantwortungsbereichs erstellte operationelle System Notfallschutz wird meist entsprechend den speziellen Aufgaben dieses Bereichs konzipiert und aufgebaut. Bei sich berührenden oder überlagernden Verantwortungsbereichen - z.B. Land : Bund - ist jedoch für einen entsprechenden Informationsaustausch zwischen diesen Bereichen zu sorgen, so daß ein abgestimmtes Vorgehen möglich ist.

Dies gilt für:

- den Informationsaustausch im nationalen Rahmen:

  In Deutschland ist - wie eingangs erwähnt - der nukleare Notfallschutz auf die Länder (Katastrophenschutz) und den Bund (Vorsorge) aufgeteilt. Zur abgestimmten Bewältigung der Gesamtaufgabe ist es in einem Staat jedoch zwingend erforderlich, die Systeme mit all ihren Komponenten so aufeinander abzustimmen, daß die Bewältigung der Gesamtsituation in optimaler Weise gewährleistet ist.

- den bilateralen Informationsaustausch:

  Bei Standorten von Kernkraftwerken nahe an Staatsgrenzen, z.B. Schweiz - Deutschland, Frankreich - Deutschland oder Niederlande - Deutschland, ist es erforderlich, daß ein schneller Informationsaustausch zwischen den jeweiligen Staaten stattfindet. Den Rahmen hierfür geben i.a. bilaterale Übereinkommen; technische und informationsinhaltliche Details sind in speziellen Vereinbarungen geregelt.

- den Informationsaustausch im supranationalen Rahmen:

  Die Europäische Union (EU) bildet einen supranationalen Wirtschaftsraum, in dem bei einem Ereignis mit erheblichen Auswirkungen - vor allem was die Wirtschaft beeinflußende Maßnahmen betrifft - einheitlich gehandelt werden muß. Entsprechende Verordnungen für Grenzwerte bei Nahrungs- und Futtermitteln (Maßnahmen) sind erlassen. Damit die EU entsprechend den ihr zugewiesenen Aufgaben handeln kann, ist es erforderlich, daß ihr die hierfür erforderlichen Informationen aus allen Mitgliedsstaaten zur Verfügung stehen. Gestützt auf den Vertrag zur Gründung der Europäischen Atomgemeinschaft (Euratom), erließ der Rat der EU 1987 eine Entscheidung über Gemeinschaftsvereinbarungen für den beschleunigten Informationsaus-

tausch im Falle einer radiologischen Notstandssituation. Das hierfür geschaffene System heißt ECURIE (European Community Urgent Radiological Information Exchange).

- den internationalen Informationsaustausch:

  Obwohl in "Risikostudien für kerntechnische Anlagen" durch Simulationsrechnungen frühzeitig gezeigt, wurde doch erst durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl und seine Auswirkungen allgemein bewußt, über welch weite Distanzen freigesetzte Radionuklide in der Atmosphäre transportiert werden können. Diese Erfahrung förderte die Einsicht in die Notwendigkeit der schnellen gegenseitigen internationalen Information über die Emissionen und Immissionen bei einem nuklearen Unfall. Sie fand ihren Niederschlag in den Konventionen der Internationalen Atomenergie Organisation (IAEO) des Jahres 1986 über die frühzeitige Benachrichtigung und die Hilfeleistung bei nuklearen Unfällen.

Damit alle erwähnten Formen des Informationsaustausches im Ereignisfall auch reibungslos funktionieren, gilt es, diese immer wieder zu testen und in allgemeinere Übungen einzubeziehen.

### 8. Information von Medien und Bevölkerung

In dieser Aufzählung an letzter Stelle genannt, sicherlich aber eines der wichtigsten Elemente des Notfallschutzes ist die Information der Öffentlichkeit, d.h. die Information der Medien (genauer: der Massenmedien) und der Bevölkerung. Diese Information sollte im wesentlichen bestehen

- aus einer didaktisch gut aufbereiteten Vor-Information über Strahlenarten und Radioaktivität, über Kontamination und Strahlenexposition, über Strahlenwirkung und Risiko und über Ergreifen von Maßnahmen zur Verminderung der Strahlenwirkung sowie Verhalten bei angeordneten Maßnahmen. Hierfür bieten sich i.a. Informationsblätter und Informationsbroschüren an;

sowie im Ereignisfall

- aus einer durch Eindeutigkeit, Verständlichkeit, Schlüssigkeit und Glaubwürdigkeit überzeugenden Information. Die Information selbst erfolgt dann über Lautsprecheranlagen (stationär und mobil) sowie über die sendenden Medien (Rundfunk und Fernsehen) und - technisch

bedingt etwas verzögert - über die druckenden Medien (Zeitungen, Informationsblätter).

Speziell im Ereignisfall gilt es, die Öffentlichkeit sachgerecht zu informieren und zwar

- über das Ereignis und seine bereits eingetretenen Auswirkungen (Situation),
- über den möglichen weiteren Verlauf des Unfalls (Prognose) und seine Auswirkungen (Bewertung) und
- über Maßnahmen, die angeordnet bzw. empfohlen werden, aber auch über die Aufhebung von Maßnahmen (Empfehlungen).

Bei dieser sehr sensiblen Aufgabe gilt es, genau die Kompetenzen festzulegen und - insbesondere bei sich überlagernden oder angrenzenden Verantwortungsbereichen - die Zusammenführung der Informationen zu regeln, um im Sinne einer einheitlichen und widerspruchsfreien Unterrichtung der Bevölkerung die erforderliche Abstimmung zwischen den Verantwortungsbereichen zu ermöglichen.

## 9. Schlußbemerkungen

Der Notfallschutz ist ein komplexes administrativ-technisches System, in dem Komponenten der Natur- und Ingenieurwissenschaften sowie der Human- und Sozialwissenschaften zum Einsatz kommen. Um das angestrebte Ziel zu erreichen, gilt es, die Überlegungen sowie das Wissen der einbezogenen Fachbereiche zu bündeln, so daß verfügbare bzw. noch zu schaffende Mittel systematisch - gemäß einem Konzept zur Erreichung des vorgegebenen Handlungszieles - eingesetzt werden können.

Auf diese Weise wird es möglich, daß mit dem nuklearen Notfallschutz ein System geschaffen wird, das den Schutz der Bevölkerung optimal gewährleistet. Dieses System ist durch laufende Ertüchtigung stets auf dem aktuellen Stand zu halten, wobei zu hoffen ist, daß es so selten wie möglich in Anspruch genommen werden muß.

## Literatur*

**Zu Kapitel 2 und 4:**

Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 13.10.1976 in der Fassung der Bekanntmachung vom 30. Juni 1989, Bundesgesetzblatt I, S. 1321, ber. S. 1926, zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 25. Juli 1996, Bundesgesetzblatt I, S. 1172 (1996)

Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen. Verabschiedet in der Innenministerkonferenz am 6. Oktober 1988 und im Länderausschuß Atomkernenergie-Hauptausschuß am 1. Dezember 1988, Gemeinsames Ministerialblatt 1989, Nr. 5, S. 71 (z. Zt. in Überarbeitung)

Gesetz zum vorsorgenden Schutz der Bevölkerung gegen Strahlenbelastung (Strahlenschutzvorsorgegesetz - StrVG) vom 19. Dezember 1986, Bundesgesetzblatt I, S. 2610, zuletzt geändert durch Gesundheitseinrichtungen-Neuordnungs-Gesetz vom 24. Juni 1994, Bundesgesetzblatt I, S. 1416

**zu Kapitel 3:**

Radiologische Grundlagen für Entscheidungen über Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung bei unfallbedingten Freisetzungen von Radionukliden. Beschluß des Länderausschusses für Atomkernenergie vom 9./11. Mai 1988, Gemeinsames Ministerialblatt 1989, Nr. 5, S. 94 (z. Zt. in Überarbeitung)

**zu Kapitel 5:**

Kriterien für die Alarmierung der Katastrophenschutzbehörde durch die Betreiber kerntechnischer Einrichtungen, gemeinsame Empfehlung der Reaktorsicherheitskommission (RSK) und der Strahlenschutzkommission (SSK) Berichte der Strahlenschutzkommission, Heft 3, 1995

Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen, Gemeinsames Ministerialblatt 1993, Nr. 29, S. 502

Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Integrierten Meß- und Informationssystem nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz, Bundesanzeiger 47, Nr. 200a, S. 3 (1995)

Richtlinie für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt nach dem StrVG, Teil I - Routinemeßprogramm, Gemeinsames Ministerialblatt Nr. 14, 11. April 1995

Richtlinie für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt nach dem StrVG, Teil II - Intensivmeßprogramm, Gemeinsames Ministerialblatt Nr. 14, 11. April 1995

Atmosphärische Ausbreitung bei kerntechnischen Notfällen, Stellungnahme der Strahlenschutzkommission (SSK) Berichte der Strahlenschutzkommission, Heft 5, 1996

---

* Weitere Literatur zum anlagenexternen nuklearen Notfallschutz findet sich in: A. Bayer, Der anlagenexterne nukleare Notfallschutz - ein Überblick Kerntechnik 62, 128 - 135 (1996)

Übersicht über Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenschutzexposition nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen (Maßnahmenkatalog) Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission (in Vorbereitung)

Verordnung (Euratom) Nr. 3954/87 des Rates vom 22.12.87 zur Festlegung von Höchstwerten an Radioaktivität in Nahrungsmitteln und Futtermitteln im Falle eines nuklearen Unfalls oder einer anderen radiologischen Notstandssituation, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L-371, S.11), 30.12.1987

Verordnung (Euratom) Nr. 944/89 der Kommission vom 12.04.89 zur Festlegung von Höchstwerten an Radioaktivität in Nahrungsmitteln von geringer Bedeutung im Falle eines nuklearen Unfalls oder einer anderen radiologischen Notstandssituation, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L-101 S.17, 13.04.1989

Verordnung (Euratom) Nr. 2218/89 des Rates vom 18.07.89 zur Änderung der Verordnung (Euratom) Nr. 3954/87 zur Festlegung von Höchstwerten an Radioaktivität in Nahrungsmitteln und Futtermitteln im Falle eines nuklearen Unfalls oder einer anderen radiologischen Notstandssituation, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L-211 S.1, 22.07.1989

Verordnung (Euratom) Nr. 770/90 der Kommission vom 29.03.90 zur Festlegung von Höchstwerten an Radioaktivität in Futtermitteln im Fall eines nuklearen Unfalls oder einer anderen radiologischen Notstandssituation, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L-83 S.78, 30.03.1990

Gesetz zu den IAEO-Übereinkommen vom 26. September 1986 über die frühzeitige Benachrichtigung bei nuklearen Unfällen sowie über die Hilfeleistung bei nuklearen Unfällen oder radiologischen Notfällen vom 16. Mai 1989, Bundesgesetzblatt I, S. 434

Entscheidung (Euratom) Nr. 600/87 des Rates vom 14. Dezember 1987 über Gemeinschaftsvereinbarungen für den beschleunigten Informationsaustausch im Fall einer radiologischen Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Nr. L-371 S.76, 30.12.1987

**zu Kapitel 8:**

Richtlinie (Euratom) Nr. 618/89 des Rates vom 27. November 1989 über die Unterrichtung der Bevölkerung über die bei einer radiologischen Notstandssituation geltenden Verhaltensmaßregeln und zu ergreifenden Gesundheitsschutzmaßnahmen Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L-357 S.31, 07.12.1989

Notfallschutz für die Umgebung von Kernkraftwerken - Ein Ratgeber für die Bevölkerung, Bundeseinheitliche Informationsbroschüre (in Vorbereitung)

Georg Arens, Peter Brennecke, Dietrich Ehrlich

# Entwicklungen und Fortschritte bei der Risikobewertung von Endlagern für radioaktive Abfälle

## 1. Einleitung

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) ist für Errichtung und Betrieb von Anlagen des Bundes zur Endlagerung radioaktiver Abfälle zuständig. Dieser gesetzlichen Aufgabe kommt das BfS durch den Betrieb des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben und die Durchführung von Planungsarbeiten für die beiden Endlagerprojekte Konrad und Gorleben nach /1/. Die Sicherheit dieser Anlagen in ihrer Betriebs- und Nachbetriebsphase wird im Rahmen von standortspezifischen Sicherheitsanalysen nachgewiesen /2/. Nachfolgend wird ein Überblick über wesentliche Aspekte derartiger Sicherheitsnachweise, grundlegende Vorgehensweisen und dabei erzielte Fortschritte insbesondere im Hinblick auf die Risikobewertung gegeben.

## 2. Entsorgungskonzept für radioaktive Abfälle

Das integrierte Entsorgungskonzept des Bundes sieht u. a. die Konditionierung und Endlagerung der radioaktiven Abfälle vor /3/. Die Sicherheitskriterien normieren die Endlagerung als wartungsfrei, zeitlich unbefristete und sichere Beseitigung radioaktiver Abfälle ohne Rückholbarkeit in tiefen geologischen Formationen /4/. Für die Planung von Endlagern und die Durchführung von Endlagerbedarfsprognosen stellt die Kenntnis der vorhandenen und zukünftig zu erwartenden Abfallmengen eine wichtige Voraussetzung dar.

In der Bundesrepublik Deutschland waren am 31. Dezember 1995

- etwa 62700 m³ konditionierte (d. h. verarbeitete und/oder verpackte) radioaktive Abfälle,
- etwa 2900 m³ Zwischenprodukte mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, und

- etwa 30600 m³ unbehandelte radioaktive Reststoffe bzw. Abfälle

vorhanden /5/. Nach bisherigen Erfahrungen fallen im Mittel etwa 4300 m³/a an konditionierten radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung an; demgegenüber ist der jährliche Anfall wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle deutlich geringer. Aus den in Betrieb befindlichen 19 Leistungsreaktoren werden pro Jahr im Mittel etwa 480 Mg ausgediente Brennelemente entladen.

Das Entsorgungskonzept des Bundes sieht für die Endlagerung radioaktiver Abfälle die folgenden Möglichkeiten vor:

- Seit der deutschen Vereinigung am 03. Oktober 1990 steht das in der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik betriebene Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) für schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit geringen Konzentrationen an Alpha-Strahlern zur Verfügung. Die Dauerbetriebsgenehmigung des ERAM gilt nach § 57 a Abs. 1 Satz 1 Atomgesetz (AtG) bis zum 30. Juni 2000 fort. Die Einlagerung radioaktiver Abfälle wurde am 13. Januar 1994 wieder aufgenommen; das Volumen der bis Mitte 2000 einzulagernden radioaktiven Abfälle/Abfallgebinde beträgt ca. 40 000 m³.

- Das ehemalige Eisenerzbergwerk Konrad ist als Endlager für alle festen bzw. verfestigten radioaktiven Abfälle vorgesehen, die eine vernachlässigbare thermische Einwirkung auf das Wirtsgestein ausüben. Es ist für ein einzulagerndes Abfallgebindevolumen von bis zu ca. 650 000 m³ vorgesehen. Der Betriebsbeginn dieser Anlage wird kurz nach der Jahrtausendwende erwartet.

- In das geplante Endlagerbergwerk im Salzstock Gorleben sollen alle Arten fester bzw. verfestigter radioaktiver Abfälle eingelagert werden, insbesondere wärmeentwickelnde Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und ausgediente Brennelemente. Die Eignung dieses Salzstocks wird zur Zeit in einem umfassenden Standorterkundungsprogramm untersucht. Nach Abschluß der Erkundungsarbeiten und positiver Bewertung der Eignung des Salzstockes Gorleben sind Errichtung und Betrieb eines Endlagers für alle Arten radioaktiver Abfälle geplant.

## 3. Die Sicherheit in der Betriebsphase

Im Jahr 1967 wurde in Deutschland mit der versuchsweisen Verbringung radioaktiver Abfälle im tiefen geologischen Untergrund begonnen. Im

ehemaligen Salzbergwerk Asse bei Wolfenbüttel wurden von 1967 bis 1978 schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert. Ebenfalls in einem ehemaligen Salzbergwerk wurde fast zeitgleich in der DDR das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) östlich von Helmstedt errichtet, in dem immer noch schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert werden.

In beiden Anlagen wurden im Hinblick auf den Strahlenschutz Erfahrungen im betrieblichen Umgang mit radioaktiven Abfällen gesammelt und Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Endlagerung stärker Wärme entwickelnder Abfälle durchgeführt.

Die Bewertung von Risiken, die sich in der Betriebsphase eines Endlagers ergeben, lassen sich in folgende Teilbereiche untergliedern:

- Risiken, die sich aus dem Antransport der Abfälle ergeben
- Risiken, die sich aus dem Normalbetrieb des Endlagers ergeben
- Risiken, die sich aus Störfällen ergeben

Risiken, die durch den Antransport der Abfälle vom Abfallerzeuger bis zum Endlager entstehen, werden durch die Transportbestimmungen, insbesondere die Eigenschaften der Behälter, begrenzt /6/. Die Transportbestimmungen sind unabhängig vom Betrieb eines Endlagers, und sind deshalb nicht Teil der betrieblichen Risikobewertung. Gleichwohl werden die Eigenschaften der Transportbehälter in den betrieblichen Sicherheitsanalysen berücksichtigt.

Für den Normalbetrieb eines Endlagers sind zunächst die Risiken zu betrachten, die sich im Umgang mit den Abfällen für das Betriebspersonal ergeben. Da die Abfälle nach ihrer Einlagerung in gewissen zeitlichen Abständen mit Versatzmaterial (Salzgrus, Filterasche) eingeschlossen und die so verfüllten Hohlräume z.B. durch eine Abschlußmauer vom betriebenen Grubengebäude abgetrennt werden, ist das Betriebspersonal praktisch nur während der Annahme, der Transport- und der Einlagerungsvorgänge einer äußeren Strahlung ausgesetzt. Flüchtige radioaktive Stoffe, die in Form von Gasen (Tritium, Radiokohlenstoff, Radon) trotz Verarbeitung der Rohabfälle, Verpackung der Abfallprodukte und Versatz der Abfallgebinde in geringen Mengen freigesetzt werden, können teilweise auch aus versetzten Einlagerungsabschnitten in die Atemluft der Bergleute gelangen und zu einer inneren Strahlenexposition führen. Aus Strahlenschutz-Gründen sind hier Begrenzungen der Radionuklidkonzentrationen

(Aktivitätskonzentrationen) in der Bergwerksluft (Wettern) erforderlich. Dies wird durch eine gute Bewetterung (Belüftung) des Bergwerks, durch eine gute Konditionierung der radioaktiven Abfälle, aber auch durch entsprechende Versatz- und Abschlußtechniken, erreicht.

Die Erfahrungen mit dem Einlagerungsbetrieb in der Asse und im ERAM weisen aus, daß die Strahlenexposition des Personals durch äußere Bestrahlung trotz der großen Ansammlung radioaktiver Abfälle gering gehalten werden kann. So konnte im ERAM durch den Einsatz entsprechend abgeschirmter Transport- und Einlagerungsfahrzeuge erreicht werden, daß die Individualdosen des Transport- und Einlagerungspersonals unter 2,5 mSv/a /7/ entsprechend 5% des Jahresgrenzwertes der Strahlenschutzverordnung /8/ liegen (Abb. 1).

Die Freisetzung und Ableitung flüchtiger radioaktiver Stoffe wie Tritium, Radiokohlenstoff und Radon mit der Bewetterung ist durch den Einsatz entsprechender Abfall-Konditionierungs- und Versatz-Techniken ebenfalls gering. Für das Personal im ERAM wurden in den Jahren 1994-96 Individualdosen (Effektivdosen) durch die Inhalation von Radionukliden ermittelt, die weniger als 0,15 mSv/a /7/ entsprechend 3‰ des Jahresgrenzwertes der Strahlenschutzverordnung /8/ betragen (Abb. 1).

Neben den flüchtigen radioaktiven Stoffen ist in der Betriebsphase auch den nicht radioaktiven Gasen Aufmerksamkeit zu widmen, die in den Abfällen durch chemische Reaktionen der Materialien mit oder ohne Sauerstoffzufuhr (Korrosion), durch radiolytische Zersetzung oder durch mikrobielle Vorgänge gebildet werden können.

Bei den entstehenden Gasen handelt es sich vornehmlich um Wasserstoff, Kohlendioxid und Methan. In der Betriebsphase ist vor allem der leicht entzündliche Wasserstoff zu betrachten. Durch den oben erwähnten dichten Einschluß der Abfallgebinde in geeignetes Versatzmaterial, bei dem nur sehr kleine, weitgehend nicht zusammenhängende Hohlräume verbleiben, wird erreicht, daß möglicherweise angesammelte explosive Gasgemische bei einer Zündung keine nennenswerten Auswirkungen hätten.

Zusätzlich zu der meßbaren und gut kontrollierbaren Strahlenexposition für das Betriebspersonal sind in den Sicherheitsanalysen für den Betrieb eines Endlagers die Risiken einzuschätzen, die sich durch die Ableitung von Radionukliden in die Umgebung ergeben können. Im wesentlichen wird hier die mögliche Ausbreitung von flüchtigen Radionukliden über die Abwetter des Endlagers berechnet. Aus den Berechnungsergebnissen

werden dann maximal zulässige Radionuklidkonzentrationen und Radionuklidmengen in den Abwettern abgeleitet. Die im Betrieb des Endlagers gemessenen Radionuklidkonzentrationen bzw. abgeleiteten Aktivitätsmengen sind i. a. deutlich niedriger als die zulässigen. Für den Betriebszeitraum des ERAM ergeben sich Individualdosen für Personen in der Umgebung des ERAM, die unter 1 µSv/a liegen /7/. Das ist weniger als 3‰ des Jahresgrenzwertes der Strahlenschutzverordnung (Abb. 1) und somit weniger als ein Tausendstel der natürlichen Strahlenexposition.

Durch einen Vergleich der Ableitungen von flüchtigen Radionukliden aus Endlagern /7/ mit den Ableitungen aus anderen kerntechnischen Anlagen, z.B. aus kommerziellen Kernkraftwerken /9/, kann das Risiko für die Umgebung eingeordnet werden(Tab. 1). Der Vergleich zeigt, daß im ERAM dosisrelevante Radionuklide nicht (Jod-131) oder in eher geringerem Maße (Aerosole, Radiokohlenstoff) als in Kernkraftwerken und Rn-222 als Edelgas nur in geringem Umfang abgeleitet werden. Die Auswirkungen auf die Umgebung infolge der Ableitung von Radionukliden durch den Betrieb eines Endlagers sind somit geringer als bei Kernkraftwerken. Dabei ist hinsichtlich einer Risikobewertung noch zu beachten, daß dieses Niveau durch den Einsatz einfacher Hilfsmittel erreicht wird und somit keine möglicherweise störanfälligen technischen Systeme, Komponenten und Regelungseinrichtungen erforderlich sind.

Neben dem bisher betrachteten normalbetrieblichen Ablauf sind auch die Wahrscheinlichkeit und die Konsequenzen eines Handhabungsstörfalls durch technisches oder menschliches Versagen bei der Einlagerung der Abfälle im Hinblick auf die radiologischen Auswirkungen für Personal und Umgebung zu bewerten. Die Erfahrungen in der Asse und im ERAM weisen bisher keine solchen Ereignisse mit radiologischen Folgen aus.

Die Sicherheit in der Betriebsphase, wie sie in den bisherigen Abschnitten beschrieben wurde, ist nicht per se vorhanden, sondern beruht auf mehr oder weniger detaillierten Sicherheitsuntersuchungen, die Bestandteil einer jeden Einlagerungs- oder Endlageranlagen-Genehmigung sind.

Für die Versuchsanlage Asse (Einlagerungsbetrieb 1967-1978) war seinerzeit ein weniger aufwendiges Genehmigungsverfahren nach § 3 der Strahlenschutzverordnung erforderlich. Im Rahmen der durchgeführten Sicherheitsbetrachtungen erwiesen sich für die Begrenzung der Strahlenexposition des Personals und der Ableitungen im wesentlichen die Bestimmungen des Transportrechts und gewisse Grundanforderungen an die

Abfälle (z.B. "nicht faulen", "nicht gären", "keine freien Flüssigkeiten") als ausreichend.

Diese auf Erfahrungen basierende, heuristische Vorgehensweise wurde auch im ERAM praktiziert. Dabei wurde abschnittsweise vorgegangen: 1972 wurde nach detaillierten Eignungsuntersuchungen die Standortgenehmigung erteilt. 1974 erfolgte die Genehmigung zur Errichtung des Endlagers mit der Maßgabe, die Umrüstung der Schachtanlage sowie Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu den Transport- und Endlagertechniken durchzuführen. Nach der Errichtung schloß sich 1978 die Phase der Inbetriebnahme mit einem Versuchsbetrieb an, dem Funktionstests an Anlagen und Komponenten sowie Tests mit nichtradioaktiven und radioaktiven Stoffen vorausgegangen waren. 1981 schließlich wurde die erste Genehmigung zum Betrieb für 5 Jahre, 1986 die zweite, noch heute gültige Genehmigung zum Dauerbetrieb erteilt. Bei diesem formal bereits weiter ausgebildeten Genehmigungsverfahren wurden sukzessive immer umfangreichere Sicherheitsbetrachtungen einbezogen.

Für das geplante Endlager Konrad schließlich ist nach dem Atomgesetz ein atomrechtliches Planfeststellungsverfahren mit geschlossener, quantitativer Sicherheitsanalyse festgelegt. Diese umfaßt für die Betriebsphase die theoretische Analyse der radiologischen und ggf. nichtradiologischen, aber abfallbedingten Auswirkungen wie die Wärmeerzeugung der Abfälle auf Anlage, Personal und Umgebung im Normalbetrieb und bei Störfällen. Auf die Konsequenzen aus dieser Analyse, die nach einem iterativen Prozeß schließlich in Anforderungen an Abfall, Anlage und Betrieb mündet, wird in Kap. 6 eingegangen.

Gegenstand der Sicherheitsanalyse sind neben Berechnungen der zu erwartenden Strahlungsfelder in der Anlage (Handhabung des Abfalls) und ihrer Umgebung (Anlieferung des Abfalls) vor allem Modelle zur Beschreibung des Flusses freigesetzter radioaktiver Stoffe vom Abfall bis in die Umgebung. Rückhalteprozesse in den verschiedenen Barrieren (Abfallmatrix, Verpackung, Versatzmaterial, Kammerabschlüsse) und das Ausbreitungsverhalten in den Grubenwettern und in der Atmosphäre sind hierbei für den Normalbetrieb und für Störfälle konservativ, aber möglichst realitätsnah zu beschreiben.

F- und E-Arbeiten zur Abfallcharakterisierung unter normalen und einwirkungsbedingten Umständen (Fallversuche, Brandversuche) /10, 11/ haben in den vergangenen Jahren erste quantitative Kenntnisse darüber erbracht, wodurch und wie stark Radionuklide aus den Abfallgebinden

freigesetzt werden können. Als radiologisch bedeutsamster Störfall erwies sich dabei das Ereignis "Brand eines mit Abfall beladenen Transport- bzw. Handhabungsfahrzeuges im Grubengebäude". Im Fall eines Brandes kommt es - aufgrund von Kaminwirkung und wegen der relativ engen Räumlichkeiten untertage - zu höheren Brandtemperaturen und zu längeren Brandzeiten als übertage. So mußte im Planfeststellungsverfahren Konrad als abdeckendes Ereignis ein Brand mit 800° C und 1 Stunde Dauer - statt ½ Stunde Dauer wie in den Transportbestimmungen - unterstellt werden. Insgesamt sind die freigesetzten Radionuklidanteile im Verfahren Konrad unter sehr konservativen Annahmen ermittelt worden. Untersuchungen an einer realistischen Abfalldatenbasis zeigen außerdem, daß die nach der Störfallanalyse maximal zulässigen Radionuklidkonzentrationen in den Abfallgebinden nur zu einem geringen Anteil ausgeschöpft werden. Die realistisch zu erwartenden Konsequenzen eines Störfalls liegen somit weit unterhalb der rechnerisch ermittelten maximalen Konsequenzen.

Weiterhin wurde das Instrumentarium zur Beschreibung der atmosphärischen Ausbreitung laufend ergänzt und verfeinert. So konnte z. B. durch die Verwendung standortspezifischer meterologischer Daten und unter Berücksichtigung des Austrittsimpulses und der höheren Temperatur der Abwetter gegenüber derjenigen der Umgebungsluft bei gleichzeitigem Einsatz probabilistischer Methoden hinsichtlich der Wettersituationen gezeigt werden, daß die in der Umgebung theoretisch im Normalbetrieb und bei einem Störfall erwarteten Dosiswerte um über 1 Größenordnung niedriger liegen als bei den standortunabhängigen Standardmodellen, die im Genehmigungsverfahren verwendet wurden /12, 13/ (Abb. 2).

Außer diesen radiologischen Untersuchungen sind Analysen zur Wärme- bzw. Temperatur-Ausbreitung im Wirtsgestein des Endlagers durch die eingelagerten Abfälle vorgenommen und aus zulässigen Temperaturerhöhungen Begrenzungen der Aktivität in den Abfallgebinden ermittelt worden. Schließlich ist eine Begrenzung des Spaltstoffinventars in Abfallgebinden bzw. eine Begrenzung der Spaltstoffkonzentration erforderlich, um die Kritikalitätssicherheit in der Betriebsphase und der Nachbetriebsphase zu gewährleisten. Auch hier konnten in den vergangenen Jahren durch bessere Modellierung Konservativitäten abgebaut werden. Beispielsweise konnte gezeigt werden, daß für Abfälle, die in eine Zement-/Betonmatrix eingebunden sind, eine Erhöhung der Spaltstoffinventare bzw. Spaltstoffkonzentrationen um etwa den Faktor 10 zulässig wäre.

## 4. Entwicklungen in der Langzeitsicherheitsbewertung

Die Bundesregierung hat sich in ihrem Entsorgungskonzept für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen entschieden. Die Entscheidung, alle radioaktive Abfälle in "tiefen" geologischen Formationen endzulagern, und nicht wie in anderen Ländern (USA, Frankreich, England) auch in oberflächennahen Formationen, beruhte im wesentlichen auf der Vorstellung, daß Radionuklide in geeigneten Formationen zeitlich nahezu unbeschränkt von der Biosphäre ferngehalten werden können. Eine ungeeignete Endlagerformation auszuwählen wurde somit als alleiniges Risiko betrachtet. Wobei der Begriff Risiko hier nicht im mathematischen Sinn als Produkt aus den Auswirkungen und der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses zu verstehen ist, sondern allein als die Wahrscheinlichkeit verstanden wurde, daß es überhaupt zu einer Radionuklidfreisetzung kommt.

Erste Risikobewertungen waren demnach von qualitativer Art und bezogen sich auf die Auswahl der Endlagerformation und des Standortes. Salz wurde als Endlagerformation für wärmeentwickelnde Abfälle ausgewählt, weil es insbesondere unter Wärmeeinwirkung plastische Eigenschaften aufweist und somit langsame Gebirgsbewegungen ohne Brucherscheinungen erträgt und geschaffene Hohlräume wieder rasch verschließt. 1979 wurden Kriterien /14/ für die Standortauswahl eines Endlagers im Salz veröffentlicht, die im wesentlichen bergmännische Risiken minimieren, für ausreichend Hohlraum sorgen und den Schutz von Lagerstätten (einschließlich Grundwasserreserven) sicherstellen. Sie enthielten kein auf den Menschen bezogenes Schutzziel.

Begleitend zur Standortauswahl für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im Salz wurde 1978 vom Bundesminister für Forschung und Technologie mit dem Projekt SICHERHEITSSTUDIEN ENTSORGUNG (PSE) /15/ in siebenjähriger Forschungsarbeit ein sicherheitsanalytisches Instrumentarium für die Sicherheitsbewertung eines Endlagers im Salz entwickelt. PSE hatte als Ergebnis, daß bei einem Endlager im Salz im Normalfall kein Mechanismus denkbar ist, der eine merkliche Freisetzung von eingelagerten Radionukliden verursachen könnte. Unter ungünstigen Bedingungen kann allerdings die Barrierenwirkung des Salzstocks reduziert werden. Dann sind Mechanismen vorstellbar, die einen Kontakt von Salzlösungen und eingelagerten Abfällen bewirken und Radionuklide freisetzen können. Zur Abschätzung der radiologischen Konsequenzen sol-

cher Szenarien sind im Verlauf des Projektes Modelle und Rechenprogramme entwickelt und angewendet worden.

Mit der Erkenntnis, Radionuklide können auch aus einem sorgfältig konzipierten Endlager freigesetzt werden, wurde es erforderlich, für die Phase nach Abschluß des Endlagerbetriebes quantitative Schutzziele für Mensch und Umwelt festzulegen. In den 1983 im Bundesanzeiger veröffentlichten und heute noch gültigen "Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk" /4/ wurde folgendes Schutzziel für die Nachbetriebsphase formuliert:

***Nach Beendigung der Betriebsphase muß das gesamte Endlager sicher gegen die Biosphäre abgeschlossen werden. Auch nach der Stillegung dürfen Radionuklide, die als Folge von nicht vollständig ausschließbaren Transportvorgängen aus einem verschlossenen Endlager in die Biosphäre gelangen könnten, nicht zu Individualdosen führen, die die Werte des § 45 StrlSchV überschreiten.***

Hiermit wurde ein Schutzziel formuliert, das Grenzwerte für Individualdosen (Strahlenexpositionen) festschreibt, die nur etwa ein zehntel der natürlichen Strahlenexposition betragen. Ein Zeitraum, über den das Schutzziel eingehalten werden muß, wurde nicht festgelegt.

Dieser Mangel und die Formulierung, daß nicht vollständig ausschließbare Transportvorgänge betrachtet werden müssen, hat dazu geführt, daß in der Folgezeit in den Langzeitsicherheitsanalysen vornehmlich Extremszenarien oder abdeckende hyphotetische Szenarien betrachtet wurden. Für Zeiträume jenseits von einigen zehntausend Jahren wird es jedoch immer problematischer, die Entwicklung eines Endlagers einzuschätzen. Dementsprechend schwieriger wird der Ausschluß denkbarer Transportvorgänge. In der Bewertung von Langzeitsicherheitsanalysen tritt somit zwangsläufig die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenariums gegenüber der Konsequenz eines Ereignisses zurück. Insbesondere für die Entwicklung alternativer Endlagerkonzepte ist eine solche Vorgehensweise aber nicht geeignet. Endlagerkonzepte, die in der Regel zu einem sicheren Einschluß der Radionuklide und nur in extrem ungünstigen Fällen zu hohen Individualdosen führen, würden gegenüber Endlagerkonzepten, die gleichmäßig geringe Mengen an Radionukliden freisetzen, nachteilig bewertet. Im Extremfall führt dies zur Schlußfolgerung, daß es besser ist, den radioaktiven Abfall gleichmäßig in der Umwelt zu verteilen statt ihn in einem Endlager zu konzentrieren.

Auf der technisch-wissenschaftlichen Ebene ist schon früh erkannt worden, daß die Risikobewertung von Endlagern unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in den Szenarienbeschreibungen, den Eintrittswahrscheinlichkeiten und den Konsequenzen zu erfolgen hat. So wurden von den Sandia National Laboratories bereits im Jahr 1978 spezielle statistische Methoden /16/ für die Sicherheitsbewertung der Endlagerung radioaktiver Abfälle entwickelt. Im Rahmen der von der EU von 1982 bis 1991 geförderten Projekte PAGIS /17/ (Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste) und PACOMA (Performance Assessment of Confinements for Medium-Level and Alpha-Contaminated Waste) wurden Instrumentarien entwickelt und angewandt, mit denen die Unsicherheiten in den Langzeitsicherheitsanalysen und Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien mit Hilfe von stochastischen Methoden berücksichtigt werden können. Basierend auf diesen Methoden wurden in den vom Bundesministerium für Forschung und Technik geförderten Projekten SAM (Systemanalyse Mischkonzept) /18/ verschiedene Einlagerungsstrategien für das Endlager Gorleben bewertet. In Abb. 3 ist die kumulierte relative Häufigkeit der berechneten maximalen Individualdosen in den verschiedenen Sicherheitsanalysen dargestellt. Für das bevorzugte Einlagerungskonzept der gemischten Bohrloch-Streckenlagerung (GBS) in einem Endlager im Salz liefert die Langzeitsicherheitsanalyse in weniger als 10 % der Rechenfälle Individualdosen, die größer als 10 % des Grenzwertes sind.

Die Formulierung des Schutzziels in den Sicherheitskriterien hat die Langzeitsicherheitsanalysen noch in eine weitere Problematik geführt. Für Szenarien, die nicht ausschließbar sind und nicht aufgrund der Standortbefunde zur normalen Entwicklung des Endlagersystems gehören, sind kaum belastbare Daten zu ermitteln. Solche Szenarien sind in Genehmigungsverfahren somit immer angreifbar und vermitteln leicht den Eindruck, daß die Langzeitsicherheit nicht nachweisbar ist. Von der schwedischen Kern-Energie Behörde SKI (Swedish Nuclear Power Inspectorate) wurde das Projekt INTRAVAL (An International Project to Study Validation of Geosphere Transport Models 1987 -1993) ins Leben gerufen, um das Vertrauen in die Langzeitsicherheitsanalysen zu stärken. Innerhalb des Projektes wurden Validierungsmöglichkeiten und -strategien für Modelle, die den Transport radioaktiver Stoffe in der Geosphäre beschreiben, untersucht und entwickelt. Daten von ausgewählten Labor- und Feldexperimenten wurden in systematischer Weise mit Modellergebnissen verglichen. Auch wurden Testfälle für die Modellierung von Strömungs- und

Transportprozessen am Standort Gorleben behandelt. Das Projekt hat bestätigt, daß Modellrechnungen zum Transport von radioaktiven Stoffen in der Geosphäre eine wesentliche Grundlage für die Risikobewertung von Endlagern darstellen können.

1988 haben die RSK (Reaktor-Sicherheitskommission) und die SSK (Strahlenschutz-kommision) eine gemeinsame Stellungnahme zum "Zeitrahmen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle" /19/ verfaßt. Hiernach wird ein quantitativer Langzeitsicherheitsnachweis, der an dem Schutzziel Individualdosis gemessen wird, für einen Zeitraum von etwa 10.000 Jahren gefordert. Für diesen Zeitraum kann die Entwicklung des Endlagersystems noch quantitativ eingeschätzt und die Verhaltensweisen und Eigenschaften des Menschen als vergleichbar mit den heutigen betrachtet werden. Soweit es wissenschaftlich sinnvoll ist, sollen die Sicherheitsanalysen auch über diesen Zeitraume hinaus geführt werden. Allerdings werden für diese Zeiträume keine Bewertungsmaßstäbe genannt. Diese Empfehlung hat sich weder auf der wissenschaftlichen noch auf der Verwaltungsebene durchgesetzt. Nicht zuletzt deswegen, weil sorgfältig konzipierte Endlager erst nach Zeiträumen jenseits von 10.000 Jahren Radionuklide in die Biosphäre freisetzen können. Aus Mangel an akzeptierten Bewertungsmaßstäben wurde deshalb in dem Genehmigungsverfahren für das Endlager Konrad berechnete Individualdosen für Zeiträume jenseits von 1 Millionen Jahre noch zur Bewertung der Langzeitsicherheit herangezogen (Abb. 4).

Es hat sich die wissenschaftliche Erkenntnis durchgesetzt, daß für Zeiträume weit jenseits von 10.000 Jahren berechnete Individualdosen nicht der alleinige Maßstab für die Risikobewertung eines Endlagers sein können und die mit der Zeit anwachsenden Unsicherheiten in den Berechnungen einen quantitativen Nachweis der Langzeitsicherheit nur noch eingeschränkt zulassen. Deshalb wird heute nach ergänzenden Bewertungsmaßstäben (sogenannten Sicherheitsindikatoren) gesucht.

Eine wichtige Rolle spielen hierbei natürliche Analoga. Naturbeobachtungen, die etwas über die Rückhaltewirkung von natürlichen Barrieren gegenüber Grundwasser oder Schadstoffen aussagen, werden verglichen mit den Barrieren des Endlagersystems. Im günstigsten Fall können die Naturbeobachtungen am Endlagerstandort selber gewonnen werden. Mikroeinschlüsse von Salzlösungen im Salzstock Gorleben sind seit ihrer Entstehung vor mehr als 200 Millionen Jahren in der chemischen Zusammensetzung unverändert. Diese Naturbeobachtung demonstriert z. B. die

enorme Barrierewirkung des Salzes gegenüber von außen zusetzenden Grundwässern am Standort Gorleben. Die lineare Zunahme des Salzgehaltes mit der Tiefe und die chemische Zusammensetzung der Grundwässer am Standort Konrad zeigen, daß tiefes Grundwasser nur über diffusive Transportvorgänge mit frischem oberflächennahen Grundwasser wechselwirkt. Nur über Zeiträume von mehreren Millionen Jahren können somit Schadstoffe aus dem tiefen Untergrund in das oberflächennahe Grundwasser transportiert werden. An Bevölkerungen, die oberhalb von Uranerzlagerstätten leben, sind keine Strahlenschädigungen nachweisbar. Dies demonstriert die i. a. vorhandene hohe Rückhaltewirkung der Geosphäre gegenüber den natürlichen Radionukliden Uran, Radium und Thorium. Es sind die Radionuklide, für die aufgrund ihrer langen Halbwertszeiten in den Langzeitsicherheitsanalysen die höchsten Individualdosen berechnet werden (Abb. 4).

Für Zeiträume, in denen die Entwicklung eines Endlagerstandortes quantitativ nicht mehr eingeschätzt werden kann, erfolgt die Risikobewertung im wesentlichen anhand von qualitativen Vergleichen der Endlagersystemeigenschaften mit Naturbeobachtungen. Quantitative Modellrechnungen können dabei unterstützend eingesetzt werden. Für solche Zeiträume wird dann auch nicht mehr von einem Langzeitsicherheitsnachweis gesprochen. Sicherheitsanalysen und Risikobewertungen werden als vertrauensbildende Maßnahmen bezeichnet. Sie haben zur Feststellung beigetragen, daß von sorgfältig konzipierten Endlagern in der Nachbetriebsphase auch über sehr lange Zeiträume mit begründeter Sicherheit keine Gefährdung für den Menschen ausgeht.

Neben der auf den Menschen bezogenen radiologischen Risikobewertung gewinnen zwei weitere Punkte zunehmend an Bedeutung. Zusammen mit den radioaktiven Stoffen werden auch konventionelle toxische Substanzen eingelagert. Die Langzeitsicherheitsanalysen berücksichtigen zunehmend diese Stoffe /20/, wobei aufgrund der langen Verweilzeiten in der Geosphäre organische Stoffe weitgehend zersetzt werden und somit nur sehr wenige anorganische Stoffe in die Biosphäre gelangen können. Weiterhin wird in den internationalen Kriterien für die Entsorgung von radioaktiven Abfällen, zu deren Einhaltung sich die Bundesregierung verpflichtet hat, nicht nur der Schutz der menschlichen Gesundheit, sondern auch der Schutz der Umwelt gefordert /21/. Hierfür müssen noch angemessene Schutzziele in den deutschen Kriterien entwickelt werden. Allgemein wird hierzu der Standpunkt vertreten, daß wenn der Schutz des Menschen gegeben ist, es auch keine Gefährdung für Fauna und Flora

gibt. Die Gefährdung bezieht sich dabei nicht auf ein Individuum aus Fauna oder Flora, sondern auf die Art am Standort. Problematisch dabei ist es, die Bereiche festzulegen, die noch als Umwelt zu betrachten sind.

Eine Sonderrolle in der Sicherheitsbewertung von Endlagersystemen nehmen Szenarien ein, die auf ein unbeabsichtigtes Eindringen in das Endlagersystem durch menschliche Aktivitäten zurückzuführen sind. Solche Aktivitäten sind weder in ihrer Art noch in ihren Konsequenzen belastbar einschätzbar. Der Endlagerstandort sollte deshalb so gewählt sein, daß die Wahrscheinlichkeit einer unbeabsichtigten Schwächung des Endlagersystems durch menschliche Aktivitäten gering ist. Dies wird dadurch gewährleistet, daß geologische Formationen als Endlagerstandorte gewählt werden, die keine wesentlichen Rohstoffvorkommen enthalten und sich in einer ausreichenden Tiefe befinden. Zunehmend wird diskutiert, ob nicht für heute bekannte menschliche Aktivitäten (z. B. Erkundungsbohrungen nach Rohstoffen) Konsequenzanalysen durchgeführt werden sollen. Ziel dieser Analysen könnte es sein, das Endlagersystems im Hinblick auf diese "Referenzszenarien" zu optimieren.

## 5. Chemotoxizität

Endzulagernde Abfallgebinde enthalten neben vergleichsweise geringen Massen an Radionukliden vor allem große Massen an nichtradioaktiven Materialien, die z. T. chemotoxische Stoffe in Spuren enthalten oder selbst aus chemotoxischen Stoffen bestehen können. Diese Stoffe können als Bestandteile

- des Abfallbehälters (z. B. Blei von Innenauskleidungen),
- des Fixierungsmittels (z. B. Chromate im Zementstein), und
- des radioaktiven Abfalls (z. B. Cadmium in Steuerstäben und Absorberblechen oder Bleisulfat in Kabelisolationen oder chlorierte Kohlenwasserstoffe in PVC-Folien)

auftreten.

Im Hinblick auf eine Gesamtbewertung der Gefahrenpotentiale bzw. Risiken bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen ist es daher erforderlich, die o. a. Sicherheitsanalysen/-betrachtungen, die insbesondere auf radiologischer Basis durchgeführt werden, durch entsprechende Untersuchungen unter Einbezug der stofflichen Zu-

sammensetzung der radioaktiven Abfälle zu ergänzen. Derartige Untersuchungen sind in Deutschland erstmals im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens für die Schachtanlage Konrad als Endlager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung durchgeführt worden /22, 23/.

Um Aussagen über die zu erwartenden Anteile chemotoxischer Stoffe in Abfallgebinden machen zu können, werden zunächst die entsprechenden organischen und anorganischen Stoffe identifiziert und mengenmäßig abgeschätzt. Aus Gründen der Transparenz und Eindeutigkeit wurde dabei zwischen denjenigen Anteilen unterschieden, die auf den eigentlichen radioaktiven Abfall, das verwendete Fixierungsmittel und die Abfallbehälter entfallen.

Die möglicherweise in den endzulagernden Abfallgebinden enthaltenen organischen chemotoxischen Stoffe konnten aufgrund von chemischen Ähnlichkeiten in acht Verbindungsklassen zusammengefaßt werden. Unter Berücksichtigung von modellmäßig unterstellten Annahmen (Lösung des Schadstoffinventars der Abfallgebinde in einer wäßrigen Lösung mit einem Volumen von $10^6$ m³), der Löslichkeit der Verbindungen sowie von chemischen und strahlenchemischen Reaktionen (Abbau durch Hydrolyse und/oder Radiolyse) ist das chemische Verhalten der organischen chemotoxischen Stoffe analysiert worden. Als Ergebnis bleibt festzuhalten, daß diese Verbindungen in sehr viel kürzerer Zeit abgebaut werden als ein Transport vom Endlager bis zur Biosphäre benötigen würde. Damit sind nach gegenwärtigem Kenntnisstand keine Limitierungen der Anteile organischer chemotoxischer Stoffe in radioaktiven Abfällen erkennbar, die in das Endlager Konrad verbracht werden sollen.

Für die möglicherweise in den endzulagernden Abfallgebinden enthaltenen anorganischen chemotoxischen Stoffe bietet es sich an, vergleichbare Modellbetrachungen und -bewertungen vorzunehmen. Dabei ist es sinnvoll, die Inventare chemotoxischer Stoffe in den Abfallgebinden des Endlagers Konrad mit den zugehörigen Radionuklidinventaren und mit einer Uranerzlagerstätte (3% Natururan) gleichen Volumens oder mit den Inventaren chemotoxischer Stoffe in den Konrad-Sedimenten zu vergleichen, wobei der gesamte Einlagerungshorizont heranzuziehen ist. Als Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigte sich, daß die Chemotoxizität der Abfallgebinde im Vergleich zu ihrer Radiotoxizität über Zeiträume von etwa 10 000 Jahren vernachlässigbar und im Bereich von $10^5$ a bis $10^7$ a vergleichbar ist.

Ferner konnte belegt werden, daß die anorganischen chemotoxischen Stoffe in Abfallgebinden im Vergleich zu den chemotoxischen Stoffen des Einlagerungshorizontes zu keinem ins Gewicht fallenden Gefährdungspotential führen. Diese Einschätzungen werden auch durch eine weitere Modellbetrachtung bestätigt, in der bei der Ausbreitung von chemotoxischen Stoffen aus dem Einlagerungshorizont zur Biosphäre keine Barrierefunktion der geologischen Formation in Ansatz gebracht und lediglich von einer Verdünnung der Tiefenwässer auf annähernd Trinkwasserkonzentration Kredit genommen wurde.

Als Gesamtergebnis der durchgeführten Untersuchungen ist somit festzuhalten, daß keine neuen, bisher unbekannten Gefährdungspotentiale durch die chemotoxischen Stoffe in Abfallgebinden in der Schachtanlage Konrad auftreten. Somit ist auch keine Basis gegeben, auf der zusätzliche, über die Ergebnisse der o. a. "radiologischen" Sicherheitsanalysen hinausgehende Anforderungen an endzulagernde Abfallgebinde abzuleiten wären. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, daß es sich bei der geplanten Anlage Konrad um ein Endlager in Gesteinsformationen im tiefen geologischen Untergrund handelt, bei dem - standortspezifisch - mit Transportzeiten von den zukünftigen Einlagerungshorizonten bis zur Biosphäre von deutlich über 300 000 a zu rechnen ist. Derart günstige Verhältnisse müssen nicht an anderen Standorten bzw. bei anderen Wirtsgesteinen vorliegen, so daß in jedem Fall bei einem Endlagerprojekt Untersuchungen zur Chemotoxizität der jeweils zu entsorgenden radioaktiven Abfälle einschließlich einer Bewertung durchgeführt werden sollten. In diesem Zusammenhang sei auf ausländische Planungen und Endlagerprojekte verwiesen. In den vorläufigen Annahmebedingungen für eine derartige Anlage sind beispielsweise Angaben zur stofflichen Zusammensetzung der Abfälle gefordert und sicherheitsrelevante Materialien wie Cyanide quantitativ begrenzt worden. Derartige Entwicklungen können im Rahmen der Fortführung von Arbeiten zur Chemotoxizität radioaktiver Abfälle - und damit ggf. im Rahmen zukünftiger Endlagerungsbedingungen - auch in Deutschland nicht ausgeschlossen werden.

## 6. Anforderungen an Abfallgebinde (Endlagerungsbedingungen)

Nach den vorangegangenen Kapiteln werden im Rahmen einer standortspezifischen Sicherheitsanalyse insbesondere Vorgänge untersucht, die zu einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus den endzulagernden Abfallgebinden führen können. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wer-

den sowohl in Anforderungen an das Einlagerungsgut, d. h. an die zu entsorgenden radioaktiven Abfälle, als auch in Anforderungen an die Auslegung des Endlagers einschließlich seiner Systeme und Komponenten umgesetzt.

Um die aus den Sicherheitsanalysen abgeleiteten Anforderungen an radioaktive Abfälle/Abfallgebinde eindeutig unterscheiden und transparent darstellen zu können, wird in Endlagerungsbedingungen grundsätzlich zwischen

- allgemeinen Anforderung an das Abfallgebinde,
- Anforderungen an das Abfallprodukt,
- Anforderungen an den Abfallbehälter,
- Anforderungen an die Aktivität von Radionukliden pro Abfallgebinde

unterschieden /24, 25/. Da diese Anforderungen aus den Sicherheitsanalysen zum bestimmungsgemäßen Betrieb, zu unterstellten Störfällen, zur thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins, zur Kritikalitätssicherheit und zu den radiologischen Langzeitauswirkungen resultieren, bestehen sie unabhängig voneinander und müssen jeweils einzeln erfüllt werden.

In den allgemeinen Anforderungen an Abfallgebinde spiegeln sich verschiedene Randbedingungen aus den Planungsarbeiten wider, wobei ein Teil der betreffenden Anforderungen als Eingangsgrößen für die Sicherheitsanalysen gedient haben, aus der Handhabung und Stapelung der Abfallgebinde resultieren oder im Zusammenhang mit der Dokumentation stehen. Als Anforderungen sind hier z. B. die Grenzwerte der Ortsdosisleistung und Flächenkontamination oder die Masse eines Abfallgebindes bzw. einer Transporteinheit und die Kennzeichnung von Abfallgebinden an ihrer Außenseite zu nennen.

Als ein Ergebnis der sicherheitsanalytischen Untersuchungen zu unterstellten repräsentativen Störfällen war es möglich, die verschiedenen zur Endlagerung vorgesehenen radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die ähnliche Abfalleigenschaften aufweisen (insbesondere ein vergleichbares Verhalten bei der Freisetzung von radioaktiven Stoffen durch mechanische und/oder thermische Einwirkungen), zu Abfallproduktgruppen zusammenzufassen. Auf diese Weise konnten für das Endlagerprojekt Konrad sechs Abfallproduktgruppen mit spezifischen Anforderungen an die Abfallprodukte definiert werden /24/. Diese Gruppen unterscheiden sich in den Anforderungen, die an die Qualität eines Abfallproduktes (z. B. Preßling oder zementiertes Konzentrat) aus sicherheit-

stechnischer Sicht gestellt werden. Dabei wird zwischen Grundanforderungen, die für alle Abfallprodukte verbindlich sind, und zusätzlichen Anforderungen unterschieden, die von der jeweiligen Konditionierung der radioaktiven Abfälle abhängen. Für das Endlager Morsleben war es auf analoge Weise möglich, die Qualitätsmerkmale QM1 bis QM6 von Abfallprodukten (hier: feste Abfälle der Abfallart A1) zu definieren /25/.

Radioaktive Abfallprodukte werden zur Beförderung, Handhabung und Einlagerung in Behälter verpackt, die entsprechend den bei einer Bauartprüfung festgelegten Bedingungen gefertigt sind. Wie bei den Abfallprodukten wird auch hier zwischen Grundanforderungen, die in jedem Fall eingehalten werden müssen, und zusätzlichen Anforderungen unterschieden, die aus sicherheitstechnischer Sicht an die Qualität des betreffenden Abfallbehälters bzw. der betreffenden Verpackung gestellt werden /24, 25/.

Von besonderer Bedeutung sind die aus den sicherheitsanalytischen Untersuchungen auf der Basis von Begrenzungskriterien abgeleiteten zulässigen Aktivitäten von Radionukliden pro Abfallgebinde (Endlagerprojekt Konrad) bzw. zulässigen Aktivitätskonzentrationen (Endlager Morsleben). Die Aktivitätsbegrenzungskriterien resultieren aus sehr unterschiedlichen Anforderungsbereichen und bestehen daher unabhängig voneinander. So spielt im bestimmungsgemäßen Betrieb die Flüchtigkeit, im Störfall das Freisetzungsverhalten, bei der thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins die Zerfallswärmeleistung der Radionuklide und bei der Kritikalitätssicherheit die Massenkonzentration spaltbarer Stoffe eine Rolle. Bei der Langzeitsicherheitsanalyse sind die Ausbreitung der radioaktiven Stoffe auf dem Wasserpfad einschließlich von Sorptions- und Desorptionsprozessen von Bedeutung.

In den Endlagerungsbedingungen Konrad finden sich insbesondere folgende Aktivitätsbegrenzungen /24/:

- Aus der Sicherheitsanalyse für den bestimmungsgemäßen Betrieb sind Aktivitätswerte für fünf Radionuklide und zwei Radionuklidgruppen abgeleitet worden.
- Bei den aus der Störfallanalyse abgeleiteten Aktivitätsgrenzwerten wird zwischen 30 radiologisch wichtigen Radionukliden (sog. Leitnuklide), 66 weiteren Radionukliden und zwei Radionuklidgruppen unterschieden.

- Aus der Analyse zur thermischen Beeinflussung des Wirtsgesteins resultieren ebenfalls 30 Leitnuklide, 76 weitere Radionuklide und zwei Radionuklidgruppen.
- Aus der Analyse zur Kritikalitätssicherheit sind zulässige Aktivitäten bzw. Massen für 4 Radionuklide und 10 höhere spaltbare Aktiniden ermittelt worden.

Darüber hinaus wurden für 10 Radionuklide und zwei Radionuklidgruppen die maximal einlagerbaren Aktivitäten am Ende der Betriebsphase des Endlagers Konrad angegeben.

Die abgeleiteten Aktivitätswerte und Aktivitätsgrenzwerte sind in umfangreichen Tabellen zusammengefaßt. Sie demonstrieren am nachhaltigsten die Entwicklungen und Fortschritte bei der Ableitung von Endlagerungsbedingungen in den Jahren seit dem Ende der Versuchseinlagerung im Salzbergwerk Asse. Als Ursache hierfür sind das weiterentwickelte sicherheitsanalytische Instrumentarium, insbesondere aber die deutlich gesteigerten Anforderungen und Sicherheitsnachweise zu nennen, die das seit 1976 mit der damaligen Novellierung des Atomgesetzes gebotene atomrechtliche Planfeststellungsverfahren mit sich bringt.

Die Erfahrungen, die bei der Erarbeitung der Endlagerungsbedingungen Konrad gewonnen wurden, sind auch in die Ableitung der Endlagerungsbedingungen Morsleben mit eingeflossen. Im Hinblick auf das Endlagerprojekt Gorleben sind noch keine Anforderungen abgeleitet worden; hier ist der erste Lauf einer standortspezifischen Sicherheitsanalyse noch abzuwarten. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß sich die Erarbeitung derartiger Anforderungen vor allem an die entsprechenden Bedingungen für das Endlagerprojekt Konrad anlehnen dürfte.

## 7. Alternative Entsorgungsstrategien

Die radiologischen Auswirkungen eines Endlagerbergwerkes auf das Personal und die Umgebung sind gering, wie in Kap. 3 "Die Sicherheit in der Betriebsphase" gezeigt wurde. Das gilt auch bei einer unterstellten Ausschöpfung der Grenzwerte für die Ableitung über den Luftpfad. Die berechneten oder gemessenen Dosiswerte liegen im Bereich dessen, was international als "de minimis" - Dosis (einige10 µSv/a) bezeichnet wird. Erreicht wird dies durch technische Maßnahmen in den Endlagerbergwerken und nicht, weil die Radionuklidkonzentrationen in den Abfällen in einigen

Fällen in die Nähe von Werten rücken, die für Reststoffe nach dem de minimis Konzept abgeleitet wurden /26, 27/. Nach dem de minimis Konzept ist eine schadlose Wiederverwertung oder eine konventionelle Beseitigung möglich, wenn die radiologischen Folgen solcher Tätigkeiten nicht zu Individualdosen führen, die einige 10 µSv/a überschreiten. Hierbei wird unterstellt, daß eine Ansammlung von mit Radionukliden belasteten Stoffen unwahrscheinlich ist. Gerade dies ist aber in einem Endlager nicht der Fall. Die Entsorgung größerer Mengen von radioaktiven Stoffen auf einer konventionellen Abfalldeponie ist somit keine Entsorgungsalternative.

Eine oft diskutierte "oberflächennahe Endlagerung", wie sie z.B. in Frankreich durchgeführt wird, bietet sich in Deutschland auch nicht an. Die (zusätzliche) Einrichtung eines solchen Endlagers für einige wenige spezielle Abfälle ist aufgrund der Reserven der bestehenden Endlager nicht erforderlich und deshalb unter gesamtwirtschaftlichen Aspekten nicht vertretbar. Überdies wäre aufgrund von Akzeptanzproblemen mit großen politischen und genehmigungstechnischen Schwierigkeiten zu rechnen.

## 8. Ausblick

Derzeit werden im Rahmen eines vom BMU geförderten Forschungsprojektes Vorschläge für die Weiterentwicklung der 1983 veröffentlichten Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk erarbeitet, die die o. a. Mängel und Lücken beheben sollen. Zusätzlich sollen die internationalen Kriterien, die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission und die Vorschläge und Kriterien der Kommission der Europäischen Gemeinschaft und OECD berücksichtigt werden. Außerdem wird die Vorgehensweise für die Ablagerung und Beseitigung von nichtradioaktiven toxischen Abfällen berücksichtigt. Es bleibt zu hoffen, daß die neuen Kriterien zu einer höheren Akzeptanz in der Öffentlichkeit und zu einer problemangepassteren Risikobewertung von Endlagern führen.

## Literatur

/1/ P. Brennecke/H. Illi/H. Röthemeyer "Final Disposal in Germany" Kerntechnik 59 (1994) Nr. 1/2, S. 23 - 27.

/2/ H. Röthemeyer (Hrsg.) "Endlagerung radioaktiver Abfälle - Wegweiser für eine verantwortungsbewußte Entsorgung in der Industriegesellschaft" VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim (1991).

/3/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit "Bericht der Bundesregierung zur Entsorgung der Kernkraftwerke und anderer kerntechnischer Einrichtungen" Deutscher Bundestag, 11. Wahlperiode, Drucksache 11/1632, Bonn, 13. Januar 1988.

/4/ "Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk" Bundesanzeiger 35 (1983) Nr. 2, S. 45 - 46.

/5/ P. Brennecke/A. Hollmann "Anfall radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland - Abfallerhebung für das Jahr 1995" Bundesamt für Strahlenschutz, Bericht BfS-ET-25/97, Salzgitter, Januar 1997.

/6/ F. Lange/D. Gründler/G. Schwarz "Transportstudie Konrad: Sicherheitsanalyse des Transports radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad" Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH, Bericht GRS-84, Köln, Juli 1991.

/7/ D. Ehrlich, T. Ibach, V. Kunze, H. Schulze: "Flüchtige radioaktive Stoffe in einem Endlager" in: Strahlenschutz-Praxis, Hrsg. Fachverband für Strahlenschutz. 3. Jahrgang, Heft 3/97. ISSN 0947-434 X

/8/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung) vom Oktober 1976, i.d. Fassung der Bekanntmachung v. 30.6.1989 (BGBl. I, S. 1321, ber. S. 1926).

/9/ Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 1995. Bericht der Bundesregierung an den Deutschen Bundestag. Drucksache 13/5572, 23.9.1996.

/10/ W. Heyn, W. Foit: "Die Auswirkungen brennender Gleislosfahrzeuge auf sonderbewetterten Strecken." Glückauf-Forschungshefte 47 (1986). S. 146-148

/11/ B. Droste, G. Wieser, U. Probst:" Thermal Test Requirements and their Verification by Different Test Methods". PATRAM´92 - Proc., Vol 3, pp 1263-1272.

/12/ H. Thielen: "Ermittlung der Langzeit-Ausbreitungs- und -Ablagerungsfaktoren unter Berücksichtigung der thermischen und mechanischen Kaminüberhöhung auf der Basis von standortmeteorologischen Daten der Jahre 1986-1993" am Standort Konrad. Interner Bericht der GRS, Köln, Dez. 1996, im Auftrag des BfS.

/13/ F. Lange, H.P. Berg, D. Ehrlich: "Dosisgrenzwerte-Aktivitätsgrenzwerte-Minimierungsgebot" Diskussion der Vorgehensweisen bei den Sicheheitsanalysen für das Endlager Konrad. Jahrestagung Kerntechnik 13.-15. Mai 1997, Aachen; Tagungsbericht, S. 319, ISSN 0720-9207.

/14/ Deutscher Bundestag Celle-Drucksache 8/3082, Punkt 8, S. 5-6, 26.7.1979

/15/ Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE): Zusammenfassender Abschlußbericht, Kapitel 4, Entwicklung eines sicherheitsanalytischen Instrumentariums für das

geologische Endlager für radioaktive Abfälle in einem Salzstock, Hahn-Meitner-Institut, Berlin 1985

/16/ R. L. Iman, J. C. Helton, J.E. Campbell: Risk Methodology for Geologic Disposal of Radioactive Waste: Sensitivity Analysis Techniques, Sand 7809122, Sandia National Laboratories, Albuquerque 1978

/17/ R. Storck, J. Aschenbach, R. P. Hiersekorn, A. Nies, N. Stelte: Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste, EUR 11778 EN, GSF-Bericht 23/88, Commision of the European Communities, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München, Brüssel-Luxemburg 1988

/18/ D. Buhmann, A. Nies, R. Storck: Systemanalyse Mischkonzept, Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle, Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, KWA-Nr. 5702 A, 1991

/19/ Gemeinsame Stellungnahme der Reaktorsicherheitskommission und der Strahlenschutzkommission, 30.6.1988

/20/ D. Ehrlich/H. Röthemeyer/G. Stier-Friedland/B. Thomauske "Langzeitsicherheit von Endlagern" Atomwirtschaft-Atomtechnik 31 (1986) Nr. 5, S. 231 - 236.

/21/ IAEA: The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111 - F, IAEA, Vienna 1995

/22/ E. Warnecke/P. Brennecke/B. Buchheim "Chemotoxicity of Radioactive Wastes with Negligible Heat Generation"in: G. Johansson (Hrsg.) Proceedings of the Joint International Symposium on Environmental Consequences of Hazardous Waste Disposal, Stockholm, 27. - 31. Mai 1991, Vol. II, S. 377 - 391, Statens Stralskyddsinstitut, Stockholm (1991).

/23/ P. Brennecke/B. Buchheim/H. Günthard/E. Warnecke/U. Weilenmann "Chemotoxicity of Organic Radioactive Waste with Negligible Heat Generation" in: D. Langer (Hrsg.), Proceedings of the GTDC Workshop on Toxic Waste, Wien, 04. - 06. September 1996, S. 46 - 56, Global Technology Development Center, Wien (1996).

/24/ P. Brennecke (Hrsg.) "Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Dezember 1995) - Schachtanlage Konrad -"Bundesamt für Strahlenschutz, interner Bericht ET-IB-79, Salzgitter, Dezember 1995.

/25/ K. Kugel/W. Noack/H. Giller/B.-R. Martens/P. Brennecke "Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle und Maßnahmen zur Produktkontrolle radioaktiver Abfälle, Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM), Teil I: Endlagerungsbedingungen, Stand August 1996" Bundesamt für Strahlenschutz, interner Bericht ET-IB-85, Salzgitter, August 1996.

/26/ Strahlenschutzfragen bei Anfall und Beseitigung von radioaktiven Reststoffen. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 11 (Hrsg. BMU). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart-New York 1988.

/27/ G. Schaller: "Richtwerte für die spezifische Aktivität von schwach radioaktiv kontaminierten Abfällen, die konventionell entsorgt werden". Bundesamt für Strahlenschutz, ISH-Bericht BfS-ISH-169/95, Neuherberg Jan. 1995. ISSN 0937-4558.

**Abbildungen und Tabellen**

**Tabelle 1:** Vergleich der gemessenen Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken (KKW) und aus dem Endlager Morsleben (ERAM). Werte in Bq/Jahr, gerundet.

| | Edelgase ohne Radon | Rn-222 Gleichgew.-äquivalent | Aerosole $T_{1/2} > 8$ d | I-131 | C-14 als $CO_2$ | H-3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| KKW 1995 | $2 \cdot 10^{11}$ - $3 \cdot 10^{13}$ | keine Angaben | $7 \cdot 10^{3}$ - $8 \cdot 10^{7}$ | $2 \cdot 10^{5}$ - $4 \cdot 10^{8}$ | $2 \cdot 10^{9}$ - $7 \cdot 10^{11}$ | $1 \cdot 10^{9}$ - $2 \cdot 10^{12}$ |
| ERAM 1994-96 | – | $2{,}4 \cdot 10^{10}$ | $< 3{,}5 \cdot 10^{6}$ | – | $2{,}4 \cdot 10^{9}$ | $2{,}4 \cdot 10^{10}$ |

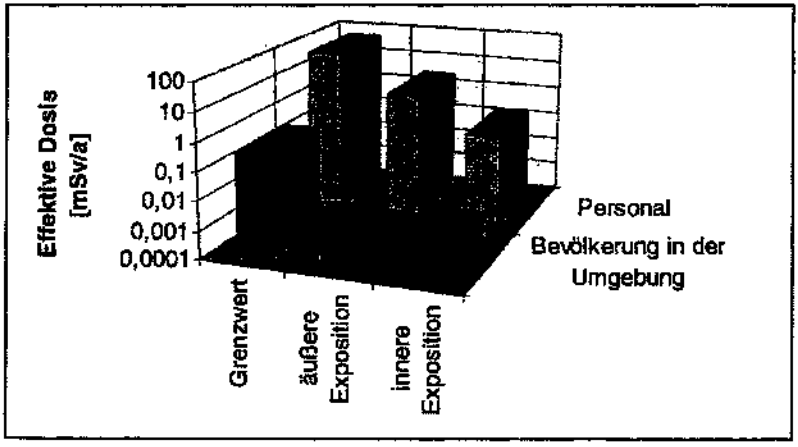


*Abb. 1: Strahlenexposition des Personals und der Bevölkerung in der Umgebung durch Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Abluft des ERAM in den Jahren 1994-96. Individualdosen.*

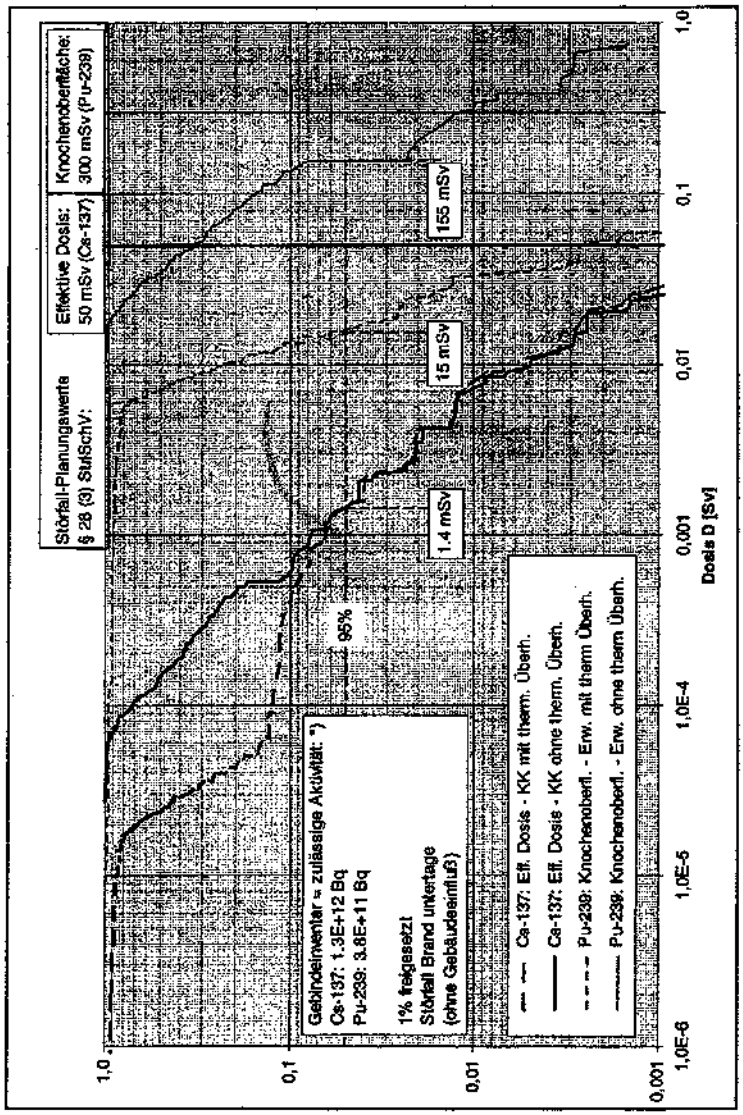


*Abb. 2: Strahlenexposition in der Umgebung des geplanten Endlagers Konrad bei Störfallen. Häufigkeitsverteilung (CCFD) der Dosis aufgrund realer Wetterdaten. *) Bei deterministischer Dosisberechnung wird der Dosisgrenzwert gerade erreicht, wenn sich die zulässige Aktivität im Gebinde befindet.*

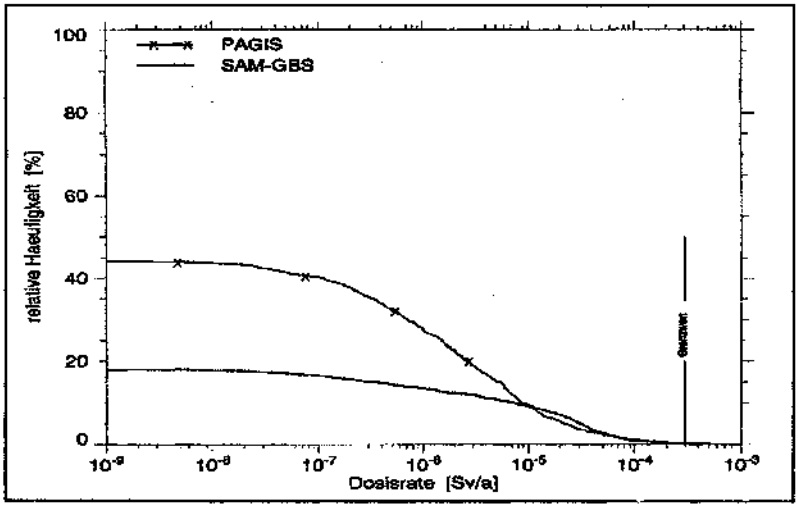


*Abb. 3: relative Häufigkeit der maximalen Individualdosen*

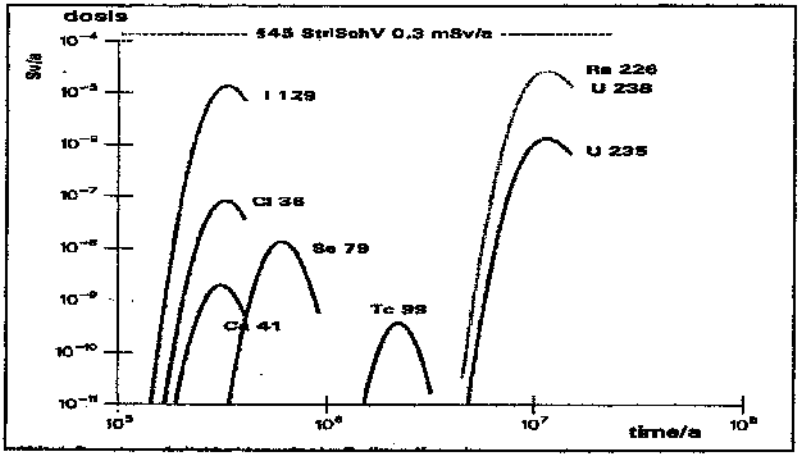


*Abb. 4: Berechnete Individualdosen für das Endlager Konrad*