

Mitteilungen

Atomkernenergie-Risiken und Atommüll-Deponierung im Eis**

Von Karl Philberth *

I. Ein teilweiser Ausweg: Energie-Sparen

Die Menschen werden sich zunehmend bewußt, welche Verantwortung das Atomzeitalter aufbürdet. Jeder muß Stellung beziehen. Verführerisch sind die radikal vereinfachenden Standpunkte. Sie sind so bequem und selbst-überzeugend. „Strom ohne Atom“ sagt der eine Flügel — ohne zu verraten, wieviel Strom gebraucht und woher er genommen werden soll. „Raschester Ausbau der Atomenergie als sauberste Energieform“ sagt der andere Flügel — ohne das Kriegs- und das Sabotage-Risiko zu berücksichtigen. Dazwischen gibt es verschiedene Kompromisse, sinnlose und sinnvolle.

Unser Schöpfer hat uns als Verwalter dieses Planeten eingesetzt. Das ist eine Verpflichtung, die keine Kompromisse duldet, wenn es um die Gesundheit und die Existenzgrundlage unserer Nachkommen geht. Aber gerade bei der bestmöglichen Erfüllung dieser Aufgabe kann die Atomenergie einen angemessenen Platz einnehmen. Wir dürfen uns in der Atomenergie-Frage nicht mit einem billigen „ja“ oder „nein“ begnügen, sondern müssen eine fundierte Meinung erringen und vertreten. Dieser Aufsatz soll eine Hilfe dazu sein.

Der Energie-Verbrauch steigt unerbittlich an, trotz mancher Aufrufe zur Sparsamkeit. Die meisten Menschen sind sich des Ernstes der Energie-Situation noch nicht bewußt, die hergebrachten Gewohnheiten sitzen tief: Energie-Verkauf ist ein gutes Geschäft, und Energie-Verbrauch ist eine schöne Annehmlichkeit. Doch die Fortsetzung der gewohnten Energie-Verschwendung könnte zu einer lebensbedrohenden Gefährdung werden. Energie-Sparen ist ein sittliches Gebot geworden.

Viele Bürger begnügen sich mit Vorwürfen gegen die Industrie. Tatsächlich ist es aber der übertriebene Konsum all der Einzelnen, welcher den allgemeinen Energie- und Rohstoff-Verbrauch vorantreibt. Die Industrie hat auf die gehabte Ölkrise mit beachtlichen Energie-Einsparungen reagiert, während die Haushalte nur Einsparungen von mehreren Prozenten erzielten — obwohl sich gerade hier noch so vieles tun ließe.

Es sind die privaten Lebensgewohnheiten, die den gesamten Energieverbrauch bestimmen. Allein auf die Raumheizung der Haushalte und auf den Verkehr entfallen je rund ein Fünftel des gesamten Energieverbrauchs [4,49]. In beiden Bereichen könnte der Verbrauch drastisch herabgesetzt, beispielsweise halbiert werden. Das würde nur ein Umdenken erfordern und keine finanziellen Opfer, sondern sogar beachtliche Ersparnisse bedeuten. Auf dem Heizungssektor würde der Verbrauch durch wesentlich verbesserte thermische Haus-Isolationen und durch Gewöhnung an niedrigere Raumtemperaturen herabgesetzt. Auf dem Verkehrssektor müßte der private „Straßenkreuzer“ zurückgestellt werden. Massenverkehrsmittel, insbesondere auf Schienen, sind

* Dr. Karl Philberth, Peter-Rosegger-Str. 6, 8031 Puchheim.

** Angesichts der Aktualität der Thematik erschien es vertretbar, über den sonst in dieser Zeitschrift gesetzten Rahmen hinauszugehen und Herrn Dr. Philberth zu bitten, das eigentliche glaziologische „Anliegen“ in einen weitestmöglichen Gesamtzusammenhang zu stellen.
Die Schriftleitung

viel energiesparender als der motorisierte Privatverkehr. Gütertransport auf der Schiene braucht pro Gewichtseinheit nur etwa ein Sechstel der Energie, die auf der Straße benötigt wird.

Die Wasserkraft-Reserven Mitteleuropas sind bereits weitgehend ausgenutzt — teilweise schon mehr als vom Naturschutzstandpunkt aus erfreulich ist. Sonnen-, Wind-, Gezeiten- und Erdwärme-Energie können unter unseren meteorologischen und geophysikalischen Verhältnissen keinen heute konkurrenzfähigen Beitrag zum großtechnischen Energie-Aufkommen liefern. Aber der einzelne Bürger kann die Sonnenstrahlung dazu benutzen, um andere Energieformen zu sparen. Warmwasser-Bereitung durch Sonnenstrahlung hat sich bewährt. Eine Absorberfläche von 2 m² genügt, um an sonnigen Tagen eine normale Familie mit warmem Wasser zu versorgen. Desgleichen hat sich die zusätzliche Direktheizung von Häusern durch Sonnenstrahlung bewährt. Dagegen kommt die Stromerzeugung durch Solarzellen für den normalen Haushalt praktisch noch nicht in Frage.

II. Fossile Energieträger — das Kohlendioxid-Risiko

Nach den derzeitigen Gegebenheiten bleiben fossile Energieträger (Kohle, Öl und Erdgas) und Kernenergie (Spaltung und in weiter Zukunft vielleicht Verschmelzung) die Hauptträger unserer großtechnischen Energieversorgung [4,49]. Wenn zukünftig nicht ganz entscheidende Energieeinsparungen erzielt werden, so bleibt in den nächsten Jahren nur die Wahl: Wollen wir fossiles Material verbrennen oder Atomkerne spalten — oder beides? Wer kein sinn- und wirkungsvolles Energie-Sparprogramm glaubhaft machen kann und dennoch die Atom-Spaltung gänzlich ablehnt, der wird sich offen zur unverminderten oder sogar gesteigerten Verbrennung von Kohle, Öl oder Erdgas bekennen müssen.

Ich persönlich bin für einschneidendes aber realistisches Energiesparen, zusammen mit möglichst reduzierter Kernenergie-Nutzung, die aber ausreicht, um den Verbrauch von Kohle, Öl und Erdgas in vertretbaren Grenzen zu halten. Es gibt nämlich zwei schwerwiegende Gründe, den Verbrauch fossiler Brennstoffe in Grenzen zu halten: Erstens die Erhaltung dieser Rohstoffe für später und zweitens das Kohlendioxid-Risiko.

Die subarktischen und arktischen Regionen bergen zwar gewaltige, zum Teil noch wenig genutzte Vorräte an fossilen Kohlenwasserstoffen [44,59]. Dennoch ist angesichts des fortwährend zunehmenden Weltverbrauchs zu befürchten, daß die gesamten abbauwürdigen Reserven an Öl und Erdgas nicht wesentlich länger als ein halbes Jahrhundert reichen werden [4,49]. Was für uns leichtsinnig vertaner Brennstoff ist, wird für unsere Enkel kostbarer chemischer Rohstoff sein. Eine laufend zunehmende Bevölkerung wird mit laufend abnehmenden Rohstoff-Vorräten auskommen müssen.

Die Kohlereserven reichen noch für viele Jahrhunderte. Das ist aber nur ein halber Trost, denn gerade die Verbrennung von Kohle ist noch umweltfeindlicher als die der anderen Fossilstoffe. In diesem Zusammenhang denkt man zunächst an die viel kritisierte Luftverpestung durch Kohle (Rauch- Schwefeldioxid, Spuren von Quecksilber), Öl (Benzpyrene, Schwefeldioxid) und Erdgas (u. U. Schwefeldioxid). Doch sind diese Arten der Luftverschmutzung durch verbesserte Verbrennung und verbesserte Abgasfilterung grundsätzlich auf ein tragbares Maß herabsetzbar. Das großräumig-langfristige Problem ist das gebildete Kohlendioxid.

Kohle ist fast reiner Kohlenstoff und entwickelt daher von allen fossilen Energieträgern die größte Menge Kohlendioxid pro Wärmeeinheit. Die Verbrennung von fünf Tonnen Steinkohle — diese stattliche Menge ist heute ungefähr das mitteleuropäische Energie-

Äquivalent pro Kopf und Jahr — entläßt fast zwanzig Tonnen Kohlendioxid in die Atmosphäre.

Heute hat die Atmosphäre einen Kohlendioxid-Gehalt von 0,33‰. Dieser Wert ist 10% bis 20% höher als vor einem Jahrhundert. Über den genauen Betrag des Anstiegs herrscht noch Unsicherheit, da die bisherigen Messungen und Modelle kein einheitliches Bild vom präindustriellen Kohlendioxid-Gehalt liefern [55,99]. Noch größere Unsicherheit besteht aber bezüglich der Risiken, die dieser Anstieg durch direkte und indirekte klimatische Auswirkungen mit sich bringt [5].

Die wichtigste klimatische Auswirkung besteht offenbar in einer Art Treibhauseffekt infolge der Infrarot-Absorption des atmosphärischen Kohlendioxids. Sie läßt eine allgemeine Temperatur-Erhöhung erwarten; jedoch können auch gegenläufige Effekte noch nicht sicher ausgeschlossen werden. Bestürzende Unsicherheit herrscht in der grundlegenden Frage, ob das Klima auf diese Störungen proportional oder mit instabilen Rückkopplungs-Vorgängen reagiert. Wollte man hinsichtlich dieses Risikos genau so hohe Anforderungen wie bei der regulären Betriebssicherheit von Kernreaktoren stellen, so müßte man die Verbrennung von kohlenstoffhaltigem Material größenordnungsmäßig reduzieren.

Fundierte Modellvorstellungen über den weltweiten Kohlendioxid-Haushalt gibt es erst seit einigen Jahren. Ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor liegt aber in der Frage, wie rasch und wie tief die Ozeane dieses Gas aufnehmen [56].

Der Polarforschung und Glaziologie erwachsen aus dem Kohlendioxid-Problem wichtige Aufgaben. Einerseits geht es darum, den im Blaseneis eingeschlossenen Gasgehalt zu messen [57] und daraus Rückschlüsse auf den Kohlendioxidgehalt im vorindustriellen Zeitalter zu ziehen. Dabei besteht die Schwierigkeit, daß der frisch gefallene Schnee durch noch nicht ausreichend geklärte physiko-chemische Vorgänge einen angereicherten Kohlendioxidgehalt aufweist [7]. Andererseits sind die Gletscher und Eisschilde sensible Indikatoren für klimatische Änderungen [19]. Nach einem unlängst vorgetragenen klimatischen Modell würde die durch Anstieg der Kohlendioxid-Konzentration bedingte Temperaturzunahme in den Polargebieten rund 3mal so hoch sein wie die über die Erdoberfläche gemittelte Temperaturzunahme [48]. Die Abschmelzung des gesamten grönländischen Eisschildes würde bekanntlich den Meeresspiegel um 7 m, die des antarktischen Eisschildes um 70 m ansteigen lassen [46].

III. Störung und Zerstörung von Kernenergie-Anlagen

Durch entschlossenes Energiesparen, durch erhöhten Wirkungsgrad der Wasserkraft- und vor allem der Verbrennungskraftwerke und durch noch bessere Sicherung der Atomkern-Anlagen werden sich die mit der Energie-Erzeugung verknüpften Probleme beachtlich verringern lassen. Dennoch können wir der Abwägung zwischen den genannten Problemen der fossilen Energieträger und den nachfolgend zu besprechenden Risiken der Atomkernenergie nicht ausweichen. Die Menschheit als ganzes wird immer mehr Energie brauchen — selbst wenn eines Tages jede Vergeudung vermieden werden könnte.

Ob die geradezu ideale Nutzung der Wasserstoff-Fusion einmal großtechnisch gelingen wird, weiß heute noch niemand zu sagen. Und wie soll denn an dieser gigantischen Aufgabe gearbeitet werden, wenn nicht heute schon durch ausreichende Atomkern-Forschung und -Industrie Erfahrung gesammelt und Nachwuchs herangebildet wird? Das radikale Nein zu allem, was mit „Atom“ zusammenhängt, ist keine Lösung. Wir müssen abwägen.

Wo liegen die Risiken der friedlichen Kernenergie-Nutzung? Jedenfalls nicht in der „tödlichen Strahlung“, die angeblich von den Kernkraftwerken ausgeht. Die von einwandfrei betriebenen Kernreaktoren herrührende Strahlenbelastung ist um Größenordnungen kleiner als diejenige durch die natürliche Höhenstrahlung und durch die natürliche Strahlung aus dem in der Erdkruste enthaltenen Uran und Thorium [4]. Sie liegt auch weit unter der Strahlenbelastung, die man selbst bei vorsichtigen medizinisch-diagnostischen Untersuchungen durchschnittlich in Kauf nimmt. Die von einwandfrei arbeitenden Reaktoren ausgehende Strahlung und radioaktive Verseuchung sind vernachlässigbar. Auch Kühlung von Kernkraftwerken läßt sich umweltfreundlich gestalten; beispielsweise durch Verwendung von Trockenkühltürmen oder Stauseen. Einwandfrei arbeitende Kernreaktoren sind wesentlich umweltfreundlicher als Verbrennungskraftwerke.

Kritischer ist das Problem des technischen Reaktor-Unfalls. Der „GAU“ (= größter anzunehmender Unfall) und der „Super-GAU“ [22,23] werden von der Fachwelt genauestens untersucht. Mit Recht sträubt sich die Öffentlichkeit gegen eine Verharmlosung tatsächlicher und möglicher technischer Reaktor-Unfälle. Dennoch wird wohl jeder unvoreingenommene Fachkundige zustimmen, daß die Gefahr des technischen Reaktor-Unfalls zwar größte Wachsamkeit erfordert, aber keinen Verzicht auf die Kernenergie rechtfertigen würde.

Die eigentlichen Gefahren der großtechnischen Kernenergie-Nutzung lassen sich in drei Stichwörtern zusammenfassen: Krieg, Sabotage, Abfall.

Im Zusammenhang mit Krieg denkt man zunächst an die mißbräuchliche „Nutzung“ der Kernenergie in der Atom- und Wasserstoffbombe. Freilich kann man sagen: Bei völligem Verzicht auf Kernenergie gäbe es auch keine Kernwaffen. Tatsächlich ist es aber doch so, daß keiner den von der Menschheit entfesselten Flaschengeist wieder in die Flasche zurückbeschwören kann. Selbst wenn wir in unserem Land gänzlich auf die friedliche (und natürlich erst recht militärische) Nutzung der Kernenergie verzichten, so würde das doch die gigantischen Kernwaffen-Arsenale der Welt nicht verringern, geschweige denn auslöschen.

Die schwerste Gefahr der friedlichen Kernenergie-Nutzung besteht in der durch äußere Einwirkung verursachten völligen Zerstörung ihrer Anlagen. Das durch natürliche Katastrophen — wie Unwetter, Überschwemmung, Erdbeben, Vulkanismus, Meteoriteneinfall — verursachte Risiko läßt sich bei ausreichender Erfahrung und Sorgfalt genügend klein halten. Das entscheidende Risiko liegt in der Total-Zerstörung durch menschliche Einwirkung [22,23]. Im Rahmen eines nuklearen Krieges könnte ein Atom- oder Wasserstoffbomben-Volltreffer [67] solche Anlagen total zerstören, sogar völlig zerstäuben oder verdampfen. Mittel- und Langstrecken-Raketen der dritten Generation haben eine Zielunsicherheit von nur noch wenigen hundert Metern. Militärisch wäre es also durchaus möglich, den Großteil der oberirdischen Kernanlagen eines Volkes zu pulverisieren. Falls diese Anlagen zur Gewinnung von militärisch genutztem Plutonium dienen oder dienen könnten, bestünde sogar ein gewisser Anreiz zur Zerstörung.

Die Zerstäubung und insbesondere die Verdampfung von Kernreaktoren würde viel stärkere Verseuchung der Atmosphäre verursachen als die Bombe selbst. Am gefährlichsten wäre bei einer solchen Katastrophe das in die Atmosphäre gelangende feinst verteilte Plutonium, einem α -Strahler, der als Atemgift ganz besonders radiotoxisch ist [14,24]. Geradezu unausdenkbar wären die Folgen, wenn eine Wiederaufbereitungsanlage mit -zig Tonnen Plutonium verdampft würde; das ist bedeutend mehr als die tausendfache Menge der über Nagasaki abgeworfenen Atombombe.

Die Schaurigkeit dieser Perspektiven soll aber nicht zur Resignation, sondern zum vol-

len Bewußtsein unserer Verantwortung führen. Das kann nur heißen: Möglichst eingeschränkte, dafür umso besser und katastrophensicherer geplante Kernanlagen.

Unterirdische Kernanlagen sind wesentlich weniger verwundbar als überirdische. In der Schweiz sind Diskussionen im Gang über tief im Gebirgsfels eingelassene Kernkraftwerke, denen künstliche Speicherseen als Kühlmedium dienen. Das wäre vom Katastrophen- und zugleich vom Umwelt- und Naturschutz her gesehen eine ausgezeichnete Lösung. Nur ist sie bedeutend teurer als die konventionellen Kernanlagen. Doch was bedeutet ein tragbarer Mehrpreis im Vergleich zu der Gefahr einer tödlichen Verseuchung? Von der politischen Seite her müßte man versuchen, sich gegenseitig den nur-friedlichen Gebrauch der Kernenergie-Anlagen und den Verzicht auf deren absichtliche Zerstörung zu garantieren.

Ein nicht zu unterschätzendes Risiko ist auch die Sabotage oder die in erpresserischer Absicht angedrohte Zerstörung von Kernanlagen. Auch diesbezüglich sind unterirdische Anlagen sicherer als überirdische; sowohl hinsichtlich der Zerstörbarkeit als auch des Schutzes vor unbefugter Inbesitznahme. Ein weiteres Risiko ist die Drohung mit einer aus gestohlenem Plutonium zusammengebauten Bombe. Derartige Drohungen können sich heute aber auch auf erschreckend kleine Mengen von Giftgasen, Bakterien, Gentransplantierten Viren und dergleichen stützen. Die Menschheit wird lernen müssen, solche Gefahren auszuschalten; durch zuverlässigeren Schutz wichtiger Objekte und grundsätzliche Ablehnung jeglichen Verhandeln mit Erpressern.

Kanada verzichtet gegenwärtig und in nächster Zukunft auf den Bau von Wiederaufbereitungsanlagen. Seine Schwerwasser-Reaktoren benutzen Natur-Uran ohne Anreicherung an U-235. Die „ausgebrannten“ Uranstäbe werden bis auf weiteres unterirdisch gelagert [20,21]. Diese Verfahrensweise ist relativ wenig katastrophenanfällig. Für Länder ohne eigene Uranerze ist sie weniger einladend, sollte aber doch ernsthaft geprüft werden. Das Fehlen der Anreicherungs- und Aufbereitungsanlagen minimalisiert die Risiken durch technische Unfälle, Kriegszerstörung und Sabotage. Außerdem sind die in den ausgebrannten Uranstäben belassenen Reaktionsprodukte darin relativ sicher verwahrt.

IV. Fusion und Fission, Spaltisotope und Anlagerungsisotope

Die Atomkerne bestehen aus Nukleonen, das sind Protonen und Neutronen, die mit einer bestimmten Bindungsenergie aneinander gebunden sind. Die mittelschweren Kerne haben die größte Bindungsenergie pro Nukleon. Daher könnte man grundsätzlich Atomkernenergie gewinnen, indem man irgendwelche leichten Kerne verschmilzt (Fusion) oder irgendwelche schweren Kerne spaltet (Fission). In der Praxis lassen sich zur Fusion [90] nur die allerleichtesten, zur Fission [101] nur die allerschwersten der natürlichen Elemente benutzen.

Der normale Wasserstoff ist die Ursubstanz [68,83] der Schöpfung, aus ihm stammen alle anderen Elemente. Die Verbrennung von Wasserstoff zu Helium ist die Haupt-Energiequelle aller Sterne. Es ist der Menschheit gelungen, sich diese Urquelle der kosmischen Energie nutzbar zu machen — aber vorerst nur in der mißbräuchlichen Form, der Wasserstoffbombe.

Zur technischen Kernfusion dient schwerer Wasserstoff (Deuterium). Er existiert in Überfülle: Jedes sechstausendste Wasserstoff-Atom ist Deuterium. Es läßt sich billig und gefahrlos abtrennen und ist der ideale Kernbrennstoff. Als Endprodukte der Reaktion entstehen leichtes und schweres Helium, die beide weder radiotoxisch noch anderweitig gefährlich sind. Radioaktiver Abfall im eigentlichen Sinne entsteht also überhaupt nicht.

Das als Zwischenprodukt gebildete Tritium (ein β -Strahler mit 12,3 Jahren Halbwertszeit) und die in dem den Reaktorraum umgebenden Material durch Neutroneneinfang gebildeten radioaktiven Substanzen sind ungleich weniger problematisch als der Abfall der Atomkernspaltung.

Es gibt in der Natur nur ein einziges leicht spaltbares Isotop, nämlich U-235, das im natürlichen Uran zu 1/140 enthalten ist. Durch ein thermisches Neutron wird U-235 unter Freisetzung einer Energie von fast 200 MeV in zwei Teilkerne und durchschnittlich zweieinhalb Neutronen zerlegt, die ihrerseits neue U-235-Kerne spalten. So entsteht eine Kettenreaktion. In der Atombombe wächst diese lawinenartig an, im Atomkern-Reaktor ist sie gleichmäßig gesteuert. Durch Anlagerung eines Teils der gebildeten Neutronen an U-238 oder gegebenenfalls an Th-232 werden die Isotope Pu-239 beziehungsweise U-233 „erbrütet“, die ihrerseits durch thermische Neutronen spaltbar sind. Die heute gebauten oder geplanten Brüter [50] sind gewöhnlich „schnelle“ Uranbrüter. Für jeden gespalteten U-235- oder Pu-239-Kern bilden sie mindestens einen Pu-239-Kern.

Die ausgezeichnete Rohstoff-Ausnutzung der Brüter wäre ein willkommener Ausweg aus der bereits vor der Jahrhundertwende drohenden weltweiten Verknappung reichhaltiger Uranerze. Aber die Brüter sind relativ gefährliche Anlagen: sie enthalten große Mengen Plutonium, die für den Kriegsfall und wegen der Möglichkeit heimlicher oder gewaltsamer Entwendung ein schweres Risiko bedeuten.

Die Ordnungszahlen und Atomgewichte der bei der Spaltung des Uran- oder Plutonium-Kerns entstehenden zwei Teilkerne bilden ein ganzes Spektrum [32,97]. Diese Zerfalls-Isotope sind wegen ihres Neutronen-Überschusses fast alle β -radioaktiv, manche zusätzlich noch γ -aktiv. Man kann sie einteilen in kurzlebige, mit Halbwertszeiten bis zu etwa 1 Jahr, in mittellebige, mit Halbwertszeiten bis zu 100 Jahren, und in langlebige Isotope.

Die kurzlebigen Zerfalls-Isotope wirken sich vor allem im Reaktorbetrieb selbst aus, indem sie den Strahlungshaushalt verändern und zur Reaktionswärme einen zusätzlichen Beitrag (die „Nachwärme“) liefern, der nicht steuerbar und damit eine Gefahrenquelle für den Reaktor ist. Das unmittelbare Entweichen von Isotopen mit Lebensdauern von mehr als größenordnungsmäßig 1 Stunde muß verhindert werden. Hinsichtlich der kurzlebigen Isotope geht es also nur darum, sie während des Reaktorbetriebes selbst und ein bis zwei Jahrzehnte danach unter zuverlässiger Kontrolle zu halten. Da zwischen der Entstehung der Zerfalls-Isotope und ihrer endgültigen Deponierung ohnehin einige oder sogar viele Jahre vergehen, kann man — etwas vereinfachend — sagen: Die kurzlebigen Zerfalls-Isotope erschweren die Abfall-Dauerdeponierung nicht.

Auch die langlebigen Zerfalls-Isotope bilden kein entscheidendes Problem. Es handelt sich im wesentlichen um die nur in sehr kleinen Mengen anfallenden Isotope Se-79 und Sn-126 mit Halbwertszeiten von $6,5 \cdot 10^4$ bzw. 10^5 Jahren und um die Isotope Tc-99, Zr-93 und Cs-135, die nur kleine Zerfallsenergien und Halbwertszeiten von $2 \cdot 10^5$, $1,5 \cdot 10^6$ bzw. $2 \cdot 10^6$ Jahren haben. Die extrem langlebigen Isotope haben extrem kleine Zerfalls-Aktivität und entsprechend kleine Radiotoxizität.

Die einzigen bei der Abfallbeseitigung problematischen Zerfalls-Isotope sind die mittellebigen. Im wesentlichen geht es hier um Sr-90 (mit der kurzlebigen Tochter Y-90) und um Cs-137, das neben β - auch γ -Strahlung hat [43,60,97]. Die Halbwertszeit dieser beiden Isotope ist rund 30 Jahre. Sm-151 (Halbwertszeit 93 Jahre) fällt nur in kleinen Mengen an und hat extrem kleine Zerfalls-Energie. Die mittellebigen Isotope leben einerseits so lang, daß die sie produzierende menschliche Generation nicht den Zerfall

abwarten kann, andererseits zerfallen sie noch genügend rasch, um stark radiotoxisch zu sein und nennenswert Wärme zu entwickeln. Nach mehrjähriger Zwischen-Ablagerung des Abfalls ist die in dessen mittellebigen Zerfallsprodukten noch enthaltene latente Wärme etwa ein Promill von der bei der Spaltung selbst freigesetzten Wärme. Diese latente Wärme wird hauptsächlich in den ersten Jahrzehnten freigegeben. Sie ist zu klein für eine sichere und rentable industrielle Nutzung, ist aber zu groß als daß man große Abfallmengen konzentriert lagern könnte.

Durch nicht zur Spaltung führende Anlagerung von Neutronen an Uran oder Plutonium entstehen schwere Kerne, die praktisch alle β - oder α -Strahler sind und zum Teil sehr lange Halbwertszeiten haben. Im Uranreaktor bildet sich zunächst U—239, das in Bruchteilen einer Stunde unter β -Strahlung in Np—239, und dieses unter erneuter β -Strahlung mit einer Halbwertszeit von zweieinhalb Tagen in Pu—239 übergeht. Je länger das Material im Reaktor verweilt, desto mehr Pu—239 wird aufgebaut, von dem seinerseits ein Teil durch Neutroneneinfang entweder gespalten oder zu Pu—240 aufgebaut wird [14,32]. Immer weiterer Neutroneneinfang führt schließlich zu einem ganzen Spektrum von Anlagerungs-Isotopen, das — im Gegensatz zum Spektrum der Spalt-Isotope — sehr stark abhängt vom Reaktor-Typ und von der Abbranddauer. Die langlebigen Anlagerungs-Isotope und die genannten mittellebigen Spalt-Isotope stellen das eigentliche „Atommüll-Problem“ dar [14, 20, 21, 32, 38, 43, 65, 104].

V. Die Beseitigung des Atommülls

Es ist vorteilhaft, die abgebrannten Reaktorelemente möglichst lang abzulagern. Eines Tages werden sie aber dann doch aufbereitet werden müssen. Es wird noch viele Anstrengungen erfordern, bis die hierzu dienenden Wiederaufbereitungs-Anlagen so weit durchentwickelt sind, daß sie die an Katastrophen-Sicherheit (vergl. Abschnitt III) und quantitativer Isotopentrennung zu stellenden Anforderungen wenigstens einigermaßen erfüllen.

Die Wiederaufbereitung [39] geschieht heute fast überall nach dem sogenannten PUREX-Verfahren, nach welchem mit Hilfe von Tributylphosphat die Uran- und Plutonium-Isotope zwecks erneuter Verwendung ausgewaschen werden. Der Rest ist Abfall. Man sollte solchen Anlagen aber erst dann den sich einbürgernden Namen „Entsorgungsanlagen“ geben dürfen, wenn die Aufbereitung nicht nur zur Material-Rückgewinnung, sondern vor allem auch zur Reinigung des Abfalls geschieht. Dazu gehört erstens, daß Plutonium (—239 und —240) wesentlich besser als nur zu rund 99% (wie bisher) abgetrennt wird und daß zweitens auch die anderen langzeit-gefährlichen Anlagerungs-Isotope ausreichend abgetrennt werden — vor allem Americium (—241 und —243), aber auch Neptunium (—237) und Curium (—245 und —246).

Diese langlebigen Anlagerungs-Isotope sind teilweise benutzbar. Pu—239 ist bekanntlich als spaltbares Reaktormaterial wertvoll. Aber auch Americium und Curium finden immer vielseitigere Anwendungsmöglichkeiten [38]. Man sollte aber gründlich prüfen, ob die so verästelte — wenn auch im Einzelfall kontrollierte — Ausbreitung derart giftigen Materials nicht auch zu einem allgemeinen Risikofaktor werden kann.

Grundsätzlich können die zu beseitigenden Abfälle entweder vernichtet oder „zur Seite gelegt“, das heißt deponiert werden. Vernichtung kommt praktisch nur für Anlagerungs-Isotope in Frage. Durch Anlagerung von Neutronen können solche Isotope entweder gespalten und/oder in kurzlebige oder mittellebige radioaktive Isotope überführt werden [40]. Dieser Weg, dessen technische Gangbarkeit noch geprüft wird, wäre wirklich eine „Entsorgung“ der Menschheit.

Wenden wir uns nun der Abfall-Beseitigung im engeren Sinn, der Deponierung, zu. Man unterscheidet zwischen vorübergehender und endgültiger Deponierung. Die vorübergehende Deponierung ist die einige oder viele Jahre dauernde Zwischen-Aufbewahrung der ausgebrannten Brennelemente vor deren Aufbereitung oder der Abfall-Isotope in mehr oder weniger endgültig verarbeiteter Form. In diesem Stadium zerfällt der größte Teil der verbliebenen kurzlebigen Isotope, wodurch die Eigenerwärmung und die Strahlung stark abklingt. Die allermeisten hochaktiven Abfälle der weltweiten Kernindustrie sind heute in diesem Stadium; teils wegen dieser Abklingung, teils um Zeit zu gewinnen, bis eine wirklich zuverlässige endgültige Deponierungsmöglichkeit gefunden ist. Das Problem der endgültigen Deponierung der hochaktiven Abfallstoffe sollte international gelöst werden. Denn viele Länder haben keine ausreichenden Möglichkeiten dazu, und das Risiko einer Gesamtverseuchung betrifft alle. Die Abfälle sollten nach zuverlässigster Prüfung aller in Frage kommender Verfahren auf eine einzige Weise, möglichst an einem gemeinsamen Ort beseitigt werden. Innerhalb der nächsten Jahrzehnte wird nämlich eine Weltabfallmenge mit der gigantischen Aktivität von 10^{12} Curie erwartet [65, 79], was Millionen Tonnen Radium entspricht. Würde man diese Menge beispielsweise gleichmäßig nach 10 verschiedenen Deponierungsverfahren beseitigen, so entfielen auf jedes davon 10^{11} Curie — das ist immer noch übergenug, um beim völligen Versagen auch nur eines dieser Verfahren die ganze Menschheit tödlich zu vergiften.

Die Kostenfrage hat gegenüber der Sicherheitsfrage gänzlich in den Hintergrund zu treten. Nur extrem hohe Beseitigungskosten, die bereits mit dem gesamten Entstehungspreis der Kernenergie vergleichbar sind, dürfen wirklich ein Hindernis sein.

Man hat eine ganze Reihe von endgültigen Deponierungen vorgeschlagen. Diese lassen sich in zwei Gruppen einteilen: solche, bei denen der Abfall stets im menschlichen Zugriff bleibt, und solche, bei denen das nicht der Fall ist. Dazwischen gibt es Übergangsformen.

Welche von beiden Gruppen ist sicherer? Man berührt hier letztlich eine philosophische Frage: Was ist zuverlässiger, der Mensch oder die Natur. Sollen wir uns mehr auf unsere Nachkommen verlassen, daß sie genügend Kenntnisse und Verantwortung haben und das Kriegs- und Sabotage-Risiko genügend sicher lösen werden — oder sollen wir uns auf die Natur verlassen, daß sie die Abfälle nicht durch unvorhergesehene Katastrophen in die Biosphäre bringt [20, 80]?

Einige endgültige Deponierungsmöglichkeiten seien kurz erwähnt. Zunächst solche aus der zweiten Gruppe.

Mit Hilfe von mehrstufigen Raketen könnte man Abfälle auf Sonne oder Mond bringen. Das wäre aber nicht nur sehr teuer, sondern auch gefährlich; denn schon ein kleinster Teil versagender Raketen könnte eine katastrophale Menge von Abfällen in die Biosphäre bringen.

Feinste Verteilung der Abfälle in den Weltmeeren würde deren natürliche Aktivität nicht wesentlich erhöhen. Aber durch physikalische und biologische Anreicherungsketten können in manchen Organismen gefährlich hohe Konzentrationen entstehen.

Man könnte die Abfälle auch in geologische Formationen bringen, die durch die Bewegungen der Erdkruste immer tiefer unter die Kontinente wandern. Derartige Zonen (z. B. westlich Kalifornien) sind aber im allgemeinen berüchtigte Erdbeben- und Vulkanismus-Gebiete.

Bei der Deponierung am oder im Meeresboden besteht die Gefahr, daß hochbrisante Seebeben die Behälter zerstören. Salzwasser ist aggressiv auf Behälter- und Einbettungs-Material.

Den Verfahren der ersten Gruppe, also den stets im menschlichen Zugriff bleibenden Deponierungen, haften die obengenannten menschlichen Risiken an. Das gilt besonders von der großflächigen Verteilung der Abfälle an oder unmittelbar unter der Oberfläche. Es gilt auch von denjenigen Deponierungen, die in laufend kontrollierter Weise oberflächliches Süßwasser oder Grundwasser zur Kühlung benutzen.

Wichtig ist die Deponierung in besonderen geologischen Formationen, vor allem in Salzstöcken oder in den geologisch noch stabileren Salzschiebungen. Bis zur Jahrtausendwende würden hierfür Salzformationen in Größenordnung von insgesamt hundert Quadratkilometern benötigt, was risikoerhöhende Verzettlung auf verschiedene Lagerstätten bedeutet. Falls die Deponierung nicht sehr tief und unter zuverlässig bleibendem Verschluß erfolgt, würde ein Risikofaktor durch Kriegszerstörung oder Sabotage nicht ganz auszuschließen sein. Dennoch dürfte dieses Verfahren zu den aussichtsreichsten gehören [14].

Langlebige Anlagerungs-Isotope können wegen ihrer geringen Wärmeentwicklung beispielsweise in Bohrlöchern deponiert werden, die in tiefliegende stabile geologische Formationen reichen [80].

Das Battelle-Institut hat für die U. S. Atomic Energy Commission ein ausführliches Gutachten über verschiedene endgültige Beseitigungs-Methoden erstellt ([6]; Vol. 2: Geologic disposal, Vol. 3: Ice sheet disposal, seabed disposal, Vol. 4: Waste partitioning, extraterrestrial disposal, transmutation processing). Darunter ist auch die Deponierung im grönländischen oder antarktischen Eisschild [13, 18, 28, 46, 60—65, 79, 80, 82, 95, 106, 107, 108], die wir anschließend besprechen.

VI. Die Deponierung im Eis — allgemein

Im Jahre 1956 schlug Bernhard Philberth vor [60], die radioaktiven Abfälle der friedlichen Atomkernenergie-Nutzung in einem der großen irdischen Eisschilde zu beseitigen. Der Grundgedanke ist einfach. Im Zentralgebiet der großen Eisschilde liegt die mittlere Firntemperatur weit unter dem Schmelzpunkt. Unter dem Einfluß von Druck und Zeit wird der Firn nach unten immer dichter und geht schließlich in Blaseneis über.

Selbst wenn man die Behälter einfach nur auf die Oberfläche brächte, würden sie durch die laufend hinzukommenden Niederschläge [25, 88] immer tiefer unter die Oberfläche begraben. Von Flugzeugen aus abgeworfene Behälterbomben könnten sich durch ihre Fallenergie rund 10 m tief eingraben und anschließend durch ihre Eigenwärme noch ein Stück weit einschmelzen. Das Inlandeis Grönlands ist bis über 3000 m, das der Antarktika bis über 4000 m mächtig.

Abgesehen von der relativ kurzen Zeit, in der sich die Behälter einschmelzen, sind sie immer von kaltem Eis umgeben; ohne freies Wasser, das die Behälter korrodieren oder die Abfallsubstanzen forttragen könnte. Die hohe Wärmeleitfähigkeit des Eises führt die thermische Leistung der Behälter gut ab. Sollten doch Isotope aus den Behältern entkommen, so können sie nicht zur Oberfläche diffundieren, da die Diffusion gegen den fortgesetzten Oberflächenzuwachs nicht anlaufen kann. Gletscherspalten treten in der Zentralregion nicht auf. Sollten sich durch Erdbeben welche bilden, so fließen sie rasch wieder zusammen.

Eis ist quasi-viskos. Unter dem Druck seines eigenen Gewichts fließt es von der Zentralregion gegen den Rand [28, 29, 30, 91]. Die Abfallbehälter nimmt es mit sich und gibt sie nach extrem langen Einschlußzeiten wieder frei. Bis dahin sind die radioaktiven Isotope weitgehendst zerfallen (siehe unten) und damit schadlos. Man sollte nur den grönländischen oder den antarktischen Eisschild in Betracht ziehen. Betreffend

Grönland ist es die freie Entscheidung Dänemarks, ob es — gegen angemessene Entschädigung — den anderen Ländern die Atommüll-Deponierung erlauben möchte. Betreffend Antarktika gilt der von den Signatarmächten im Jahr 1959 gefaßte, sich auf 30 Jahre erstreckende Antarktis-Vertrag [6, 108], nach dem kein Land dort Atommüll deponieren darf. Diese Bestimmung könnte aber durch gemeinsamen Beschluß jederzeit aufgehoben werden, wenn die internationale Deponierung realisationsreif wird. Deponierung einzelner Länder in eigener Regie wäre ohnehin nicht wünschenswert. In der ursprünglich vorgeschlagenen Form dieses Deponierungsverfahren war empfohlen worden, die Behälter in nicht zu große Tiefe einzuschmelzen und im wesentlichen nur Spaltisotope zu beseitigen [65]. Später sind von anderer Seite abweichende Varianten ins Gespräch gekommen: Durchschmelzung der Behälter bis zum Felsboden und Deponierung von Abfall, der auch Plutonium enthält [108]. Beides hat mit Recht heftige Diskussionen ausgelöst [106, 107]. Die Ganz-Durchschmelzung ist insofern riskant, als die Behälter in der Boden-Eis-Grenzschicht pulverisiert und die zermahlenden Abfälle zusammen mit Schmelzwasser hinaus in die Biosphäre gepreßt werden könnten. Zudem könnte die Erwärmung dieser anfälligen Grenzschicht eine wenn auch geringfügige Störung der Stabilität des Eisschildes bedeuten. Die Deponierung von wesentlichen Mengen Pu—239 (Halbwertszeit 24 400 Jahre) würde Einschlußzeiten in Größenordnung von 250 000 Jahren erfordern. Diese lassen sich aber nur unter der hypothetischen Annahme eines stationären Zustandes des Eisschildes gewährleisten.

Als Deponierungsstelle bietet sich in Grönland der die Eisscheide [84] umgebende Bereich an. Nach den bisherigen Messungen und Berechnungen liegt dort und in einer großen Umgebung die Eistemperatur bis hinab zum Felsboden weit unter dem Druckschmelzpunkt [76, 78, 85]. In der Antarktika liegen die Verhältnisse komplizierter. Es gibt dort Gebiete, in denen die Boden-Eis-Grenzschicht den Druckschmelzpunkt erreicht [8, 9, 17, 58]. Das schadet aber nichts, wenn die Behälter genügend weit über dem Boden bleiben. Es ist in jüngeren Jahren auch die Heranziehung solcher Stellen vorgeschlagen worden, wo der Boden domartig angehoben ist und dadurch seine Temperatur unter dem Druckschmelzpunkt liegt (nach M. D. Turner, siehe [108]). Die insgesamt über $14 \cdot 10^6$ km² große Eisfläche der Antarktika bietet reiche Auswahl.

Für die endgültige Entscheidung ist an vielen Stellen die Temperatur und der Bewegungszustand des Eises zu messen [12, 33, 34, 96, 100] und zu berechnen [11, 15, 26, 37, 51, 52, 76, 77, 85, 86, 87, 89, 91]. In Camp Century (Grönland; [102]) und Byrd-Station (Antarktika; [103]) sind Kern-Bohrungen bis zum Felsboden niedergebracht worden. Weitere Kern-Tiefbohrungen in Grönland [41, 42] und Antarktika [31] sind für die nächsten Jahre geplant. Die in den letzten Jahren zu hoher Vollkommenheit gesteigerte Isotopenanalyse [10, 16, 47, 57, 94] der Bohrkerne liefert Aussagen über die Entstehungsgeschichte der Eisschilde. Auf der Internationalen Glaziologischen Grönland-Expedition (EGIG; [33]) 1968 gut bewährt [75, 78, 81] hat sich ein von mir erfundenes [69—74] und in Zusammenarbeit mit CRREL (Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, USA; [1, 2, 3]) entwickeltes thermisches Tiefbohrverfahren, das wegen seines geringen Aufwandes zum Masseneinsatz geeignet ist. Es dient vorzugsweise zur genauen Messung der Temperatur und der Scherbewegung des Eises. Erfolgsversprechend ist auch der Einsatz von zwei anderen modernen Hilfsmitteln der Polarforschung: Satelliten [27, 36] und Radioecho [53, 54, 93].

VII. Die Deponierung im Eis — konkret

Es ist vorgeschlagen worden, die Abfallbehälter entweder verteilt über sehr große (10 000 bis 100 000 km²; [65, 108]) oder über sehr kleine (100 km²; [79]) Eisflächen zu deponieren. Diese beiden Extreme haben Nachteile und Risiken, welche sich durch einen

geeigneten Kompromiß gänzlich vermeiden lassen. Das ist im letzten Jahr anhand eines konkreten Beispiels [82] nachgewiesen worden.

Das Beispiel geht aus von mehrjährig vorabgelagerten Abfall-Spaltisotopen mit einem Residual-Wärmegehalt von $2 \cdot 10^{18}$ Wattsekunden. Das entspricht dem hochaktiven Abfall, der in der ganzen Welt aus einer 30jährigen Kernenergie-Nutzung mit 10^{12} Watt elektrischer Leistung anfällt. Dieser Abfall ist, mit Glas verschmolzen, in $3 \cdot 10^7$ kugelförmigen Behältern mit 0,2 m Radius untergebracht und auf einer Eisfläche mit 15 km Radius und in einem Tiefenbereich von 20—100 m unter der Oberfläche deponiert. Die Behälter bringen sich durch Selbst-Einschmelzung innerhalb weniger Jahre bis Jahrzehnte von selbst auf diesen Tiefenbereich und frieren dort ein. Von dann ab wächst die Tiefe unter der jeweiligen Oberfläche nur noch durch die laufende Akkumulation; rund 30 cm/Jahr in Grönland [25, 88] und 5 cm/Jahr in Antarktika [9].

Die Behälter sind also viele Jahrhunderte lang in einem mäßigen Tiefenbereich, aus dem sie — falls das je notwendig werden sollte — durch ein übliches Tunnel- und Stollen-System wiedergewonnen werden könnten. Das ist relativ einfach, denn ihr mittlerer Abstand ist nur in Größenordnung von 10 m. Andererseits erfordert ihre Auffindung und Rückgewinnung doch moderne technische Hilfsmittel. Daher ist nicht zu befürchten, daß die Behälter von Unberufenen zu Tage gefördert und mißbraucht werden könnten.

Diese Deponierung verursacht keine klein- oder großklimatischen Störungen. Auch das rheologische Verhalten und die Stabilität des Eisschildes beeinträchtigt sie weder jetzt noch in ferner Zukunft. Denn innerhalb des ersten Jahrzehntausends beschränkt sich die vom Abfall verursachte Temperaturerhöhung auf die rheologisch praktisch bedeutungslosen zentralen und bodenfernen Eisschichten; später wird sie zu klein, um nennenswert Einfluß nehmen zu können.

Aufgrund zahlreicher Messungen und verbesserter Theorien wird man innerhalb zehn Jahre mit großer Sicherheit sagen können, ob und an welchen Stellen ein Eisschild innerhalb der nächsten fünfhundert Jahre von spontanen oder klimabedingten Instabilitäten (z. B. katastrophalen Vorstößen; [35, 45, 78, 82, 92, 98, 105]) heimgesucht werden kann. Solche Stellen sind bei der Abfall-Deponierung zu meiden. Aber selbst im aller schlimmsten Fall — einem katastrophalen, den Eisschild in einigen Jahrhunderten abschmelzenden Klimasturz und/oder einer gigantischen, die Hauptmasse des Eises wegtragenden Instabilität — würden die Abfälle die Biosphäre nicht verseuchen können. Sie gelangen nicht an die Boden-Eis-Grenzfläche oder ins Meer [82]. Höchstens kommen sie nach Jahrhunderten zur Eisoberfläche und/oder werden sie nach vielen Jahrhunderten am Boden abgesetzt und können dort gegebenenfalls aufgesammelt werden.

Somit ist für ein Jahrtausend, kürzestenfalls ein halbes Jahrtausend, jedes erdenkliche Deponierungsrisiko ausgeschaltet. Das genügt für ausreichendes Unschädlichwerden der Spalt-Isotope; langlebige Anlagerungs-Isotope sollten anderweitig beseitigt werden (vergl. Abschnitte IV und V; [80]).

Der Abbau etwaiger Bodenschätze in Grönland oder Antarktika wird durch die Abfall-Deponierung nicht beeinträchtigt, geschweige denn vereitelt. Die Beseitigungsfläche ist ja nur $3 \cdot 10^{-4}$ der grönländischen und sogar nur $5 \cdot 10^{-5}$ der antarktischen Eisfläche. Wenn gerade dort unter dem 3 km dicken Eis wertvolle Schätze liegen sollten, so könnte man ohne weiteres zwischen den Abfallbehältern durchbohren oder durchgraben.

Der Transport der Abfallbehälter [6] zur Deponierungsstelle im Eis läßt sich zuverlässig und preisgünstig durchführen. Geeignet sind Lufttransport mit direktem Abwurf der Behälter am Deponierungsort oder Verschiffung mit anschließendem Transport über Eis. Letzteres kann auf der Oberfläche durch Raupenfahrzeuge und Schlitten oder durch

unter der Oberfläche geführte Eisenbahn mit die Eisdeformation auffangenden Spezi-
sialschienen erfolgen. Versuche mit im Firn geführten Eisenbahnen haben im Camp
Century (Nord-Grönland) zu positiven Ergebnissen geführt.

Die γ -Strahlung aus den Behältern stammt fast nur vom Cs-137 (Halbwertszeit 30 Jahre)
und wesentlich kürzerlebigen Isotopen. Eine die Behälterkugeln umgebende, in deren
genanntem Radius von 0,2 m bereits inbegriffene, 0,1 m dicke Bleischicht reicht zur
Schirmung aus. Vom Kostenstandpunkt aus könnte diese Schirmung ohne weiteres
mitdeponiert werden. Große Bleimengen lassen sich aber einsparen ([82] Diskussion),
wenn die ungeschirmten oder nur dünnwandig (mit Blei oder anderweitig) geschirmten
Behälterkugeln am Deponierungsort aus einem Transport-Bleisarg direkt in mehrere
Meter tiefe vorgefertigte Firnlöcher entleert werden.

L i t e r a t u r

- [1] A a m o t, M. W. C. (1967a): The Philberth probe for investigating polar ice caps. U.S. Army CREEL Special Report 119.
- [2] A a m o t, H. W. C. (1967b): Heat transfer and performance analysis of a thermal probe for glaciers. U.S. Army CREEL Technical Report 194.
- [3] A a m o t, H. W. C. (1968): Instrumented probes for deep glacial investigations. J. Glaciol. 7 (50): 321—328.
- [4] A c h e r m a n n, P. (1976): Weichenstellen. Ein Beitrag zum besseren Verständnis des Energie-problems. Firmenschrift der Brown, Boveri & Cie, CH Baden, 46 Seiten.
- [5] B a e s, C. F., H. E. G o e l l e r, J. S. O l s o n & R. M. R o t t y (1976): The global carbon dioxide problem. Publikation ORNL-5194, Bericht vom Oak Ridge National Laboratory, USA, an ERDA.
- [6] B a t t e l l e P a c i f i c N o r t h w e s t L a b o r a t o r y, S c h n e i d e r K. J. & P l a t t A. M., E d i t o r s (1974): High-level radioactive waste disposal alternatives, Vol. 3, Ice sheet disposal and seabed disposal. U.S. Atomic Energy Commission-Report BNWL-1900.
- [7] B e r n e r, W. (1977): Persönliche Mitteilung auf der Hochalpinen Forschungsstation Jungfrau-Joch, Schweiz (Universität Bern).
- [8] B u d d, W. F., D. J e n s s e n & U. R a d o k (1969): The extent of basal melting in Antarctica. Polarforschung 39 (1): 293—306.
- [9] B u d d, W. F., D. J e n s s e n & U. R a d o k (1971): Derived physical characteristics of the Antarctic ice sheet. ANARE Interim Reports, Series A (IV) Glaciology. Publication no. 120.
- [10] B u d d, W. F. & V. I. M o r g a n (1973): Isotope measurements as indicators of ice flow and palaeo-climates. In: Zinderen Bakker, E. M. van, sr., ed. Palaeoecology of Africa, and of the surrounding islands and Antarctica, Vol. 8. Cape Town, A. A. Balkema, 5—22.
- [11] B u d d, W. F. & N. W. Y o u n g (1976): Computer modelling of temperature distributions in polar ice sheets. J. Glaciol. 16 (74): 293—294.
- [12] B u d d, W. F., N. W. Y o u n g & C. R. A u s t i n (1976): Measured and computed temperature distributions in the law dome ice cap, Antarctica. J. Glaciol. 16 (74): 99—110.
- [13] B u l l, C. (1975): Radioactive waste disposal. Science (U.S.A.), Vol. 189, pp. 596, 597, 658.
- [14] C o h e n, B. L. (1977): The disposal of radioactive wastes from fission reactors. Scientific American. 236 (6): 21—31.
- [15] D a n s g a a r d, W. & S. J. J o h n s e n (1969): A flow model and a time scale for the ice core from Camp Century, Greenland. J. Glaciol. 8 (53): 215—223.
- [16] D a n s g a a r d, W., S. J. J o h n s e n, N. R e e h, N. G u n d e s t r u p, H. B. C l a u s e n & C. U. H a m m e r (1975): Climatic changes, Norsemen and modern man. Nature, 255 (5503): 24—28.
- [17] D e w a r t, G. (1976): Seismic evidence of a wet zone under the West Antarctic ice sheet. J. Glaciol. 16 (74): 73—88.
- [18] D o l g u s c h i n, L. D. (1959): [Das Internationale Symposium über die Physik der Bewegung von Gletschereis]. Izvestija Akademii Nauk SSSR, Seria geografitscheskaja (1): 141—45.
- [19] D o r r e r, E. & G. W e n d l e r (1976): Climatological and photogrammetric speculations on mass-balance changes of McCall Glacier, Brooks Range, Alaska. J. Glaciol. 17 (77): 479—490.
- [20] D y n e, P. J. (1975a): AECL's responsibilities and programs for management of high level radioactive wastes. Atomic Energy of Canada Limited, AECL-5111, Whiteshell Nuclear Research Establishment, Pinawa, Manitoba.
- [21] D y n e, P. J. (1975b): Managing nuclear wastes. Firmenschrift der Atomic Energy of Canada Ltd., Canada, AECL-Publikation no. 5136, 17 Seiten.
- [22] v o n E h r e n s t e i n, D. (1976a): Vor überhastetem Großeinsatz von Atomenergie muß gewarnt werden. Der Bürger im Staat (Herausgegeben v. d. Landeszentrale f. Polit. Bildung Baden-Württemberg), 26 (1).
- [23] v o n E h r e n s t e i n, D. (1976b): Sorge vor Mißbrauch bleibt; einige Gesichtspunkte zur Problematik der Atomenergie. VDI-Nachrichten (40): 28—29.
- [24] E i d g e n ö s s i s c h e s A m t f ü r E n e r g i e w i r t s c h a f t (1976): Verordnung über den Strahlenschutz. CH 5303 Würenlingen.

- [25] Federer, B. (1969): Nivologische Arbeiten der Intern. Glaziol. Grönlandexped. EGIG 1968. Interner Bericht des Eidgenöss. Instituts f. Schnee- und Lawinenforschung, Davos; erscheint in Meddelelser om Grønland.
- [26] Federer, B., H. von Sury, K. Philberth & M. de Quervain (1970): Outflow and accumulation of ice in Jarl-Joset station, Greenland. *J. Geophys. Res.* 75 (24), 4567—69.
- [27] Gloersen, P. & V. V. Salomonson (1975): Satellites — new global observing techniques for ice and snow. *J. Glaciol.* 15 (73): 373—389.
- [28] Haefeli, R. (1961a): Glaziologische Einführung zur Frage der Beseitigung radioaktiver Abfallstoffe in den großen Eiskappen der Erde. *Schweizerische Z. f. Hydrologie* 23 (1): 253—262.
- [29] Haefeli, R. (1961b): Contribution to the movement and the form of ice sheets in the Arctic and the Antarctic. *J. Glaciol.* 3 (30): 1133—1151.
- [30] Haefeli, R. & F. Brandenberger (1968): Rheologisch-glaziologische Untersuchungen im Firngebiet des Grönländischen Inlandeises: E.G.I.G.-Publikation 5 (2). *Meddelelser om Grønland* 177 (1), 340 Seiten.
- [31] Hansen, B. L. (1976): Deep core drilling in the East Antarctic ice sheet: a prospectus. In: Spletstoeser, J. F., editor, *Ice-core drilling*. University of Nebraska Press, 29—36.
- [32] Haug, H. O. (1974): Calculations and compilations of composition, radioactivity, thermal power, gamma and neutron release rates of fission products and actinides of spent power reactor fuels and their reprocessing wastes: Bericht KFK-1945 des Kernforschungszentrums Karlsruhe, Institut für heiße Chemie.
- [33] Hofmann, W. (1973): Die Internationale Glaziologische Grönland-Expedition (EGIG). 1. Das Forschungsprojekt und seine Ausführung. *Z. f. Gletscherkunde u. Glaziol. geol.* 9 (1—2): 239—252.
- [34] Hofmann, W. (im Druck): Horizontalbewegung des Grönländischen Inlandeises 1959 bis 1967: E.G.I.G.-Publikation 2 (7). *Meddelelser om Grønland*.
- [35] Hughes, T. J. (1976): The theory of thermal convection in polar ice sheets. *J. Glaciol.* 16 (74): 41—71.
- [36] Kaminski, H. (1971): Bestimmung von kurz- und langzeitlichen Eis-, Meereis- und Schneebewegungen in der Arktis aus Satelliten-Luftbildern. *Polarforschung* 41 (1/2): 89—111.
- [37] Karsten, A. & Stober, M. (1975): Deformationsmessungen auf dem Grönländischen Inlandeise während der Intern. Glaziologischen Grönlandexpedition 1974. *Polarforschung* 45 (1): 45—50.
- [38] Keller, C. (1976): Americium und Curium. *Bild der Wissenschaft* 13 (11): 106—116.
- [39] Keller, C. & K.-L. Huppert (1977): Wiederaufbereitung von Kernbrennstoffen. *Bild der Wissenschaft* 14 (6): 124—132.
- [40] Koch, L., G. Coltone & A. Cricchio (1975): Accumulation of transplutonium elements in wastes and possibilities for their nuclear incineration: TRANSPLUTONIUM 1975, 4th International Transplutonium Element Symposium, Proceedings of the Symposium at Baden Baden, Sept. 1975, North-Holland Publishing Company, 459—469.
- [41] Kuivinen, K. C. & J. F. Spletstoeser (1976a): Greenland Ice Sheet Program. *Arctic Bulletin* 2 (9): 146—152.
- [42] Kuivinen, K. C. & J. F. Spletstoeser (1976b): The Greenland Ice Sheet Program: 1975 field activities. *Polar Record* 18 (113): 168—171.
- [43] Lewis, W. B. (1972): Radioactive waste management in the long term. Atomic Energy of Canada Limited, AECL-4268, Chalk River Nuclear Laboratories Chalk River, Ontario.
- [44] Lindemann, R. (1974): Erdöl- und Erdgasvorkommen in der Arktis — Ein Überblick. *Polarforschung* 44 (2): 177—182.
- [45] Lliboutry, L. (1968): Steady state temperatures at the bottom of ice sheets and computation of the bottom ice flow law from the surface profile. *J. Glaciol.* 7 (51): 363—76.
- [46] Loewe, F. (1964): Arktis und Antarktis im Lichte neuerer Forschung. *Polarforschung* 34 (1/2): 225—236.
- [47] Lorius, C. & M. Briat (1976): Teneur en éléments traces dans la glaces: variations temporelles liées à l'activité humaine et au climat. Société Hydrotechnique de France, XIV^{es} Journées de l'Hydraulique (Paris).
- [48] Manabe, S. & R. T. Wetherald (1975): *J. Atmos. Sci.* 32, 3—15.
- [49] Mandel, H. (1977): Der Energiebedarf und Möglichkeiten der Energieversorgung. Vortrag vor der katholischen Akademie Bayern am 19. Februar 1977 in München.
- [50] Martin-Edingshaus, L. (1977): Wie Deutschland zur Kernenergie kam; Serie II: Bild der Wissenschaft 14 (5): 92—104.
- [51] Matschinski, M. (1958): Considérations sur la mécanique de la glace et spécialement des glaciers: Symposium de Chamonix, International Association of Scientific Hydrology, Publ. No. 47, 213—226.
- [52] Nye, J. F. (1951): The flow of glaciers and ice-sheets as a problem in plasticity. *Proceedings of the Royal Society, A*, Vol. 207, 554—72.
- [53] Nye, J. F. (1975): Deducing thickness changes of an ice sheet from radioecho and other measurements. *J. Glaciol.* 14 (70): 49—56.
- [54] Nye, J. F. (1977): Thickness change of the Greenland ice sheet: comments on the letter by B. Federer and H. von Sury. *J. Glaciol.* 18 (78): 159.
- [55] Oeschger, H. & U. Siegenthaler (1976): Prognoses for the expected CO₂ increase due to fossil fuel combustion. Paper presented at the 9th Internat. Radiocarbon Conference, Univers. of California, Juni 1976, 15 Seiten.
- [56] Oeschger, H., U. Siegenthaler, U. Schotterer & A. Gugelmann (1975): A box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature. *Tellus* 27 (2): 168—192.
- [57] Oeschger, H., B. Stauffer, P. Bucher & M. Moell (1976): Extraction of trace components from large quantities of ice in bore holes. *J. Glaciol.* 17 (75): 117—128.

- [58] Oswald, G. K. A. & G. de Q. Robin (1973): Lakes beneath the Antarctic ice sheet. *Nature* 245 (5423): 251—254.
- [59] Pantenburg, V. (1969): Öl aus den Teersanden am Athabasca im subarktischen Kanada. *Polarforschung* 39 (1): 275—276.
- [60] Philberth, B. (1956): Beseitigung radioaktiver Abfallsubstanzen. *Atomkern-Energie (München)* 1 (11—12): 396—400.
- [61] Philberth, B. (1958): Disposal of atomic fission products in Greenland or Antarctica. *Union Géodésique et Géophysique Internationale, Association Internationale d'Hydrologie Scientifique. Symposium de Chamonix, 16—24 Sept. 1958*, p. 350.
- [62] Philberth, B. (1959a): Beseitigung radioaktiver Abfallsubstanzen in den Eiskappen der Erde. *Atomkern-Energie (München)* 4 (3): 116—19.
- [63] Philberth, B. (1959b): Stockage des déchets atomiques dans les calottes glaciaires de la Terre. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris)* 248 (14): 2090—92.
- [64] Philberth, B. (1960): Discussion of advantages and disadvantages of radioactive waste disposal into geological structures. (In *Disposal of radioactive wastes. II. Proceedings of the scientific conference on the disposal of radioactive wastes, . . . held at the Oceanographic Museum in the Principality of Monaco, 16—21 November 1959*. Vienna, International Atomic Energy Agency, p. 557.
- [65] Philberth, B. (1961): Beseitigung radioaktiver Abfallsubstanzen in den Eiskappen der Erde. *Schweizerische Z. f. Hydrologie* 23 (1): 263—84.
- [66] Philberth, B. (1967): Measurement of the permittivity of ice. *J. Glaciol.* 6 (47): 765—766.
- [67] Philberth, B. (1975): *Christliche Prophetie und Nuklearenergie*. Paul Pattloch Verlag, Aschaffenburg.
- [68] Philberth, B. (1976): *Der Dreieine*. 4. Aufl.: Paul Pattloch Verlag, Aschaffenburg.
- [69] Philberth, K. (1962a): Une méthode pour mesurer les températures à l'intérieur d'un Inlandsis. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences* 254 (22): 3881—3883.
- [70] Philberth, K. (1962b): Remarque sur une sonde thermique pour mesure la température des couches de glace. *Comptes Rendus de Séances de l'Académie des Sciences*. 255: 3022—3024.
- [71] Philberth, K. (1962c): Ecoulement de la glace Groenlandaise. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, No. 1, 2, 3.
- [72] Philberth, K. (1964): Über zwei Elektro-Schmelzsonden mit Vertikal-Stabilisierung. *Polarforschung* 34 (1/2): 278—280.
- [73] Philberth, K. (1966a): Sur la stabilisation de la course d'une sonde thermique. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences* 262: 456—459.
- [74] Philberth, K. (1966b): Eine Schmelzsonde zur Messung des Temperaturprofils in Eiskalotten. *Umschau in Wissenschaft und Technik* (11): 360.
- [75] Philberth, K. (1970): Thermische Tiefbohrung in Zentralgrönland. *Umschau in Wissenschaft und Technik* (16): 515—516.
- [76] Philberth, K. (1972a): Factors influencing deep ice temperatures. *Nature, Physical Science* 237 (72): 44—45.
- [77] Philberth, K. (1972b): Über den inneren Wärmehaushalt in mächtigen Eisschilden. *Polarforschung* 42 (1): 11—17.
- [78] Philberth, K. (1973): Die thermische Tiefbohrung in Station Jarl-Joset und ihre theoretische Auswertung. *Interner Bericht des Eidgenöss. Institutes f. Schnee- u. Lawinenforschung, Davos; erscheint in Meddelelser om Grønland*.
- [79] Philberth, K. (1976a): On the temperature response in ice sheets to radioactive waste deposits. *J. Glaciol.* 16 (74): 89—98.
- [80] Philberth, K. (1976b): Future regard to the atomic waste disposal problem. *J. Glaciol.* 16 (74): 277.
- [81] Philberth, K. (1976c): The thermal probe deep-drilling method by EGIG in 1968 at station Jarl-Joset, central Greenland. In: Spletstoesser, J. F., editor, *Ice-core drilling*. University of Nebraska Press, 117—31.
- [82] Philberth, K. (1977a): On the disposal of radioactive waste in ice sheets. *J. Glaciol.* 19 (81).
- [83] Philberth, K. (1977b): The generation of matter and the conservation of energy. Chapter IX in: *Cosmology, History and Theology*, Plenum Press, New York.
- [84] Philberth, K. & B. Federer (1970): A note on the surface profile of the Greenland ice sheet. *J. Glaciol.* 9 (55): 150—153.
- [85] Philberth, K. & B. Federer (1971): On the temperature profile and the age profile in the central part of cold ice sheets. *J. Glaciol.* 10 (58): 3—14.
- [86] Philberth, K. & B. Federer (1973): On the temperature gradient in cold ice sheets. *Interner Bericht Nr. 530 des Eidgen. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos (Schweiz)*.
- [87] Philberth, K. & B. Federer (1974): On the temperature gradient in the upper part of cold ice sheets. *J. Glaciol.* 13 (67): 148—151.
- [88] Quervain, de M. (1969): *Schneekundliche Arbeiten der Internationalen Glaziologischen Grönland-Expedition (Nivologie)*: E.G.I.G.-Publikation 5 (1), *Meddelelser om Grønland* 177 (4) 1—282.
- [89] Radok, U., D. Jenssen & W. F. Budd (1970): Steady-state temperature profiles in ice sheets: *International Association of Scientific Hydrology, Publication* 86: 151—165.
- [90] Reynolds, J. A. (1974): Fusion. In: *The encyclopedia of physics*, 2. ed., Von Nostrand Reinhold Company, 376—381.
- [91] Robin, G. de Q. (1955): Ice movement and temperature distribution in glaciers and ice sheets. *J. Glaciol.* 2 (18): 523—32.
- [92] Robin, G. de Q. (1970): Stability of ice sheets as deduced from deep temperature gradients. *International Association of Scientific Hydrology, Publication* 86: 141—51.

- [93] Robin, G. de Q. (1975): Radio-echo sounding: Glaciological interpretations and applications. *J. Glaciol.* 15 (73): 49—64.
- [94] Robin, G. de Q. (1976): Reconciliation of temperature-depth profiles in polar ice sheets with past surface temperatures deduced from oxygen-isotope profiles. *J. Glaciol.* 16 (74): 9—22.
- [95] SCAR-Report, Robin, G. de Q., Chairman (1975): The disposal of radioactive wastes in the Antarctic ice sheet. SCAR-Bulletin, No. 50, *Polar Record* 17 (110): 578—79.
- [96] Seckel, H. & M. Stober (1968): Höhenänderung des grönländischen Inlandeises 1959—1968. *Polarforschung* 38 (1/2): 215—221.
- [97] Seelmann-Eggebert, W., et al. (1974): Karlsruhe Nuklidkarte, 4. Auflage, von W. Seelmann-Eggebert, G. Pfennig and H. Münzel. Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe.
- [98] Shoemaker, E. M. (1976): Temperature-gradient induced mass-instability theory of glacier surge. *J. Glaciol.* 17 (77): 433—445.
- [99] Siegenthaler, U. & H. Oeschger (im Druck): Predicting future atmospheric CO₂ levels; CO₂ predictions provide a basis for evaluating the possible impact of the continuing use of fossil fuel. *Science*.
- [100] Sury, v. H. & R. Haefeli (im Druck): Rheologisch-glaziologische Untersuchungen im Firngebiet des grönländischen Inlandeises: E.G.I.G.-Publikation 5 (5). Meddelelser om Grønland.
- [101] Terrell, J. (1974): Fission. In: *The encyclopedia of physics*, 2. ed., Van Nostrand Reinhold Company, 351—356.
- [102] Ueda, H. T. & D. E. Garfield (1968): Drilling through the Greenland ice sheet. U.S. Army CRREL Special Report 126.
- [103] Ueda, H. T. & D. E. Garfield (1969): Core drilling through the Antarctic ice sheet: U.S. Army CRREL Special Report 231.
- [104] U. S. Atomic Energy Commission, Pittman, Respons. (1974): High-level radioactive waste management alternatives. WASH-1297.
- [105] Weertman, J. (1964): Rate of growth or shrinkage of nonequilibrium ice sheets. *J. Glaciol.* 5 (38): 145—58.
- [106] Weertman, J. (im Druck): Radioactive waste disposal in Antarctica. (Paper presented at Scientific Committee on Antarctic Research meeting, Cambridge, September 1974.)
- [107] Weertman, J., J. Sibert, W. F. Weeks & J. Sternig (1973): Radioactive wastes on ice. Further discussion: *Bulletin of the Atomic Scientists* 29 (4): 2—3, 53—56 (enthält die Antwort von E. J. Zeller, D. F. Saunders und E. E. Angino; vergl. Zeller et al., 1973).
- [108] Zeller, E. J., D. F. Saunders & E. E. Angino (1973): Putting radioactive wastes on ice. A proposal for an international radionuclide depository in Antarctica. *Bulletin of the Atomic Scientists* 29 (1): 4—9, 50—52.