

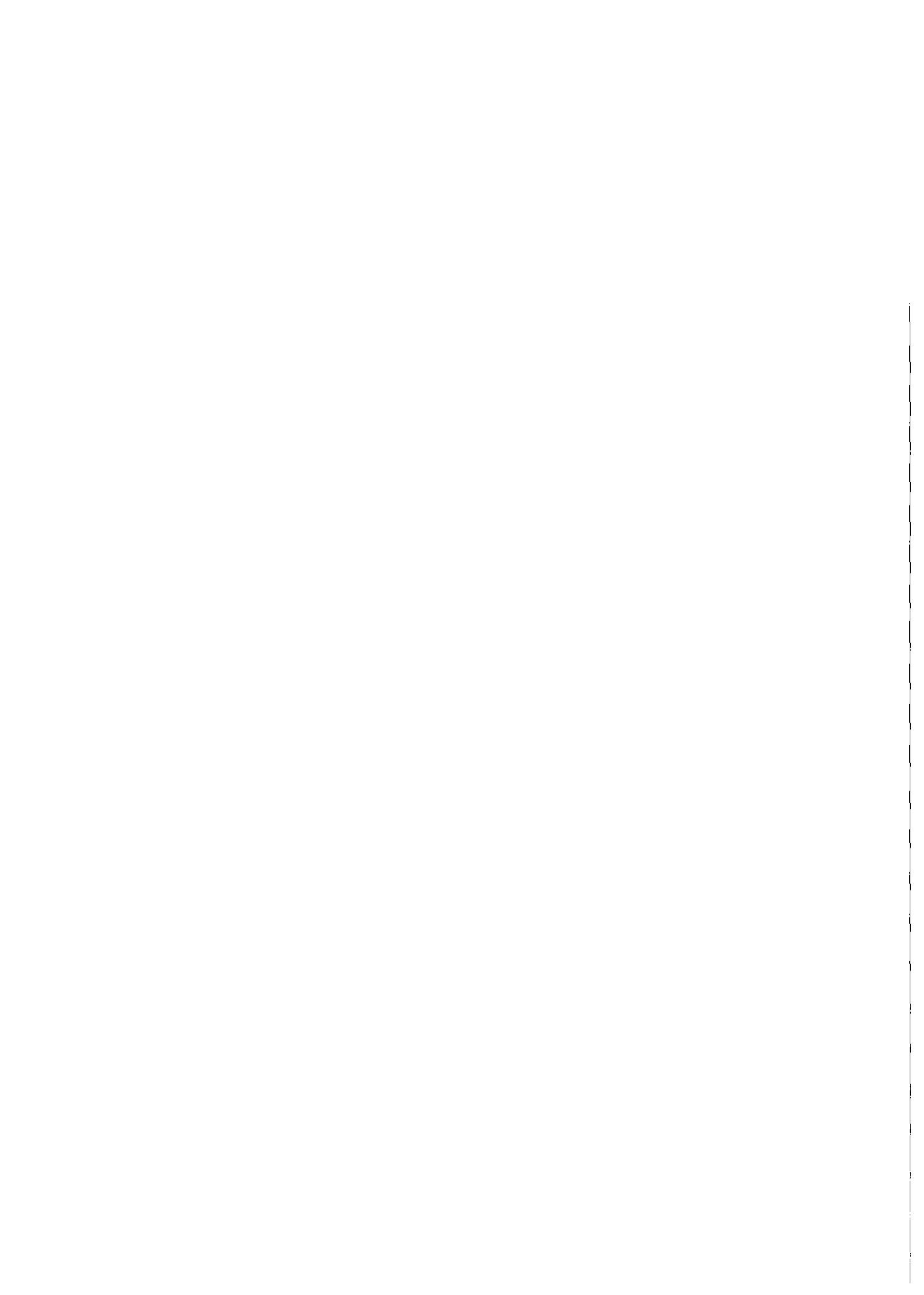


KfK 3044
Oktober 1980

Kosten-Nutzen-Analyse der Kr-85-Rückhaltung in einer Kernbrennstoff- Wiederaufarbeitungsanlage

W. Hübschmann, H. Kiefer, C. H. Leichsenring
Hauptabteilung Sicherheit
Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Hauptabteilung Sicherheit

Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung

KfK 3044

PWA 54/80

Kosten-Nutzen-Analyse der Kr-85-Rückhaltung in einer
Kernbrennstoff-Wiederaufarbeitungsanlage

W. Hübschmann

H. Kiefer

C.H. Leichsenring

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

ZUSAMMENFASSUNG

Das bei der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente anfallende Kr-85 kann entweder in die Atmosphäre freigesetzt oder aus dem Abgas des Auflösers abgetrennt und langfristig gespeichert werden. Es wird eine Kosten-Nutzen-Analyse der Abtrennung und Lagerung für eine Wiederaufarbeitungsanlage einer Kapazität von 1 400 t Kernbrennstoff pro Jahr durchgeführt. Wird die anfallende Kryptonmenge von 18 MCi/a während der Betriebszeit der Wiederaufarbeitungsanlage von 30 Jahren in die Atmosphäre freigesetzt, so beträgt die Folgedosis (Ganzkörper, effektiv) einer Weltbevölkerung von 6,4 Mrd. Personen (abgeschätzt für das Ende des 20. Jahrhunderts) durch die Strahlung des Kr-85 243 000 man-rem, das sind 0,001 % der natürlichen Strahlenbelastung von 23 Mrd. man-rem in 30 Jahren. Da diese Dosis aus Einzelbeträgen im Bereich von μ rem zusammengesetzt ist, ist eine gesundheitliche Schädigung durch diese Art der Belastung statistisch nicht nachweisbar.

Wird das Kr-85 mit einem Wirkungsgrad von 95 % abgetrennt und etwa 100 Jahre gelagert, so zerfallen 99,85 % der Aktivität. Allerdings werden durch Störfälle in der Abtrennanlage schätzungsweise 4,3 % des Kryptons wieder freigesetzt. Außerdem empfängt das Betriebspersonal im Routinebetrieb, bei der Wartung und bei Störungen der Anlagen insgesamt ca. 700 man-rem. Letztere Zahl setzt sich, im Unterschied zur Bevölkerungsdosis, aus Dosen im rem-Bereich zusammen. Eine gewisse, wenn auch tolerierbare und statistisch ebenfalls nicht nachweisbare Erhöhung der Krebssterblichkeit ist dabei in Kauf zu nehmen.

Bewertet man dennoch die Bevölkerungsdosis und die Dosis der in der Anlage Beschäftigten gleich, so zeigt sich, daß die gesamte kollektive Folgedosis der Weltbevölkerung durch die Abtrennung und Lagerung des Kr-85 auf 10 % reduziert wird.

Diese Reduzierung wird durch die Errichtung und den Betrieb der Abtrennanlage und des Kryptonlagers erkauft. Errichtung und Betrieb

erfordern ca. 106 Mio. DM. Das Risiko eines tödlichen Unfalles (incl. Wegeunfälle) während Bau und Betrieb wird auf 10 % während der Gesamtzeit veranschlagt. Es ist, im Unterschied zu den obigen Risiken durch die Krypton-Strahlung, ein aufgrund von Statistiken real zu erwartendes Risiko. Dieses kommt bei großzügiger Bewertung des Menschenlebens einem Wert von 0,6 Mio. DM gleich. Daraus ergibt sich ein Aufwand von DM 485,-- oder \$ 275;-- je eingespartes man-rem. Dieser Aufwand und die Belastung des Personals durch Strahlung und technische Unfallgefahren bleiben dann in den angegebenen Grenzen, wenn vor allem die folgenden Bedingungen eingehalten werden:

- mit begrenztem technischem Aufwand erreichbarer Abtrennfaktor von 95 %,
- Schutz des Personals durch wirksame Abschirmung und - wo möglich - durch Fernbedienung,
- einfaches Krypton-Lager mit Naturkonvektion.

Es wird betont, daß der Wert der Kr-85-Abtrennung erst dann erreicht wird, wenn die überwiegende Zahl der Kernenergie-Anwender incl. der Ostblockstaaten diese Maßnahme bei der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoff einführt.

Cost-benefit Analysis of Kr-85 Recovery in a Nuclear Fuel Reprocessing
Plant

SUMMARY

The Kr-85 produced by nuclear power generation is released from the fuel mainly during fuel reprocessing. It can either be released into the atmosphere or recovered from the dissolver offgas and stored for a long time. A cost-benefit analysis of the krypton recovery and storage is carried out for a reprocessing plant of an annual capacity of 1.400 metric tons of nuclear fuel. If all the Kr-85 (18 MCi/a) processed during 30 years of plant operation will be released into the atmosphere, the total collective dose commitment (effective whole body dose equivalent) of a world population of 6.4×10^9 people (estimated for the end of the 20th century) by Kr-85 radiation will be 243.000 man-rem; for comparison, this makes up 0.001% of the natural exposure of 23×10^9 man-rem in 30 years. As this population exposure is the sum of individual exposures of the order of μrem , no health effect can be identified to be caused statistically by this exposure.

If Kr-85 is recovered with 95% effectiveness and stored for about 100 years, 99.85% of the recovered activity will decay. However, an estimated fraction of 4.3% of the recovered Kr-85 will be lost due to accidents in the recovery facility. The plant personnel receives a total dose of about 700 man-rem during routine operation, maintenance and due to accidents. The latter exposure is - in contrast to the population exposure - the sum of individual exposures of the order of rem. Within the tolerable limits a certain increase of the personnel's cancer expectancy has to be committed which, however, can neither be identified statistically.

If the difference in the order of magnitude of individual doses is disregarded and the collective doses of the population and the personnel are added, it can be shown that the total collective dose commitment due to Kr-85 radiation is reduced down to 10% by Kr-recovery and storage. This effect is achieved by the construction and operation of the recovery and storage plant which requires a total of about DM 106 Mio. The risk of a fatal

accident (incl. traffic accidents) during construction and operation is estimated to be 10% during the total plant lifetime. In contrast to the risks caused by krypton radiation this risk is to be expected realistically according to statistics. If the value of life is fixed in a generous way, this equals DM 0.6 Mio. Consequently, the reduction of the Kr-85 population dose by one man-rem requires the amount of DM 475,-- or \$ 275,--. This amount and the burden on the personnel by occupational exposure and by conventional risks of accidents remain within the indicated boundaries under the following conditions:

- moderate recovery effectiveness of 95%,
- simple storage facility with natural convection,
- highly effective radiation protection of the personnel by effective shielding and - as far as possible - by remote handling.

It is pointed out that the advantage of Kr-85 recovery and storage is realized only if most of the states producing nuclear energy, including Russia and its satellites, will introduce Kr-85 recovery in fuel reprocessing.

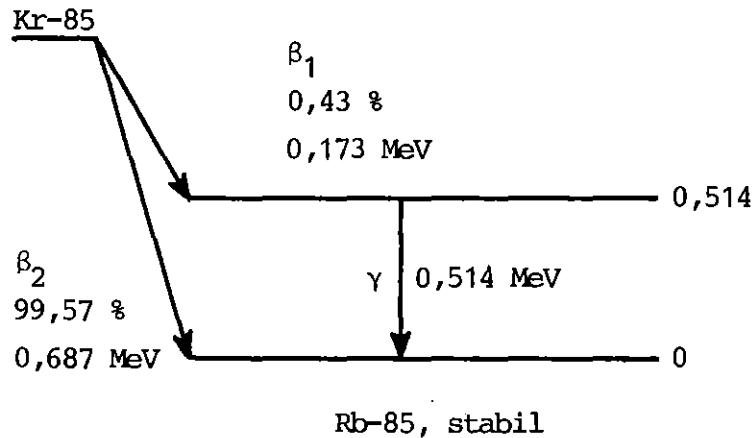
1. PROBLEMSTELLUNG

Krypton-85 (Kr-85) ist eines der vier langlebigen gasförmigen Nuklide (H-3, C-14, Kr-85, J-129), welche bei der Kernspaltung erzeugt, aber zum überwiegenden Teil erst bei der Brennstoffwiederaufarbeitung aus den Brennelementen freigesetzt werden. Wird das Kr-85, wie bisher üblich, in die Atmosphäre abgegeben, dann reichert sich diese mit dem Radionuklid an, was zu einer - wenn auch relativ geringen - Strahlenbelastung der Weltbevölkerung führt. Wird das Kr-85 aus der Abluft abgetrennt, in Gasflaschen gefüllt und gelagert, so sind kostspielige Abtrenn- und Lagereinrichtungen erforderlich, und das dafür notwendige Bedienungspersonal wird sowohl der technischen Unfallgefährdung als auch der Bestrahlung durch Kr-85 ausgesetzt. Es wird daher im folgenden abgeschätzt, ob die Kr-85-Abtrennung letztendlich einen positiven Effekt erbringt. Dabei muß auf ein grundsätzliches Problem eines solchen Vergleiches hingewiesen werden: Der Aufwand zur Errichtung der Anlagen und die Unfall- und Strahlenbelastung des Personals werden von einem einzelnen Staat getragen, der Nutzen in Form einer Verringerung der Bevölkerungsdosis kommt der gesamten Weltbevölkerung zugute, also nur zu einem geringen Bruchteil der Bevölkerung des belasteten Staates. Daraus wird deutlich, daß es zu einer internationalen Übereinkunft über die Kr-Abtrennung kommen muß, damit die Kernenergieanwender den vollen Nutzen aus der Kr-Abtrennung ziehen können.

Die Kosten-Nutzen-Analyse lehnt sich an eine ähnliche Analyse aus den USA [1] an. Die Auslegungsdaten der US-Anlage (1 800 t Brennstoff/a, $21 \cdot 10^6$ Ci Kr-85/a) weichen allerdings von denen der deutschen Anlage ab (1 400 t/a, $18 \cdot 10^6$ Ci Kr-85/a). Die Daten der Strahlenbelastung des Personals werden als übertragbar angesehen.

2. Kr-85-PRODUKTION

Das Edelgasnuklid Kr-85 hat eine Halbwertszeit von 10,76 Jahren. Es zerfällt nach dem folgenden Schema:



Die Spaltproduktausbeute beträgt $0,29 \div 0,34$ %.

Die Hauptquellen der Kr-85-Freisetzung liegen auf der Nordhalbkugel, wo sich das emittierte Kr-85 innerhalb von ein bis drei Monaten ziemlich gleichmäßig verteilt. Der Austausch zwischen Nord- und Südhalbkugel verläuft mit einer Halbwertszeit von ein bis zwei Jahren. Die Verzögerung wird durch die Äquatorbarriere verursacht und führt durch den Zerfall während der Transportzeit zu einer Reduktion der Kr-85-Konzentration um den Faktor 0,9 gegenüber der Nordhalbkugel. Da seine Löslichkeit im Wasser vernachlässigbar gering ist, verbleibt das freigesetzte Kr-85 praktisch vollständig in der Atmosphäre. Als einziger Ausscheidemechanismus wirkt der radioaktive Zerfall.

Seit dem Beginn der technischen Anwendung der Kernspaltung ist der Kr-85-Gehalt der Erdatmosphäre ständig gestiegen. Während vor 1960 nur vereinzelte Messungen durchgeführt wurden, ist für den Zeitraum von 1960 bis 1975 ein Anstieg auf das Vierfache durch Messungen belegt. Im Jahre 1975 betrug die Konzentration auf der Nordhalbkugel 17 pCi/m^3 [3]. Bis zu diesem Zeitpunkt waren insgesamt ca. 105 MCi in die Atmosphäre abgeleitet worden, wovon noch ca. 62 MCi vorhanden waren. Die aus Brennelementen

von Kernreaktoren bis 1975 freigesetzte Menge wird dabei auf 100 MCi geschätzt, während der Beitrag der Kernwaffentests bei ca. 3 MCi liegt. Aus dem gemessenen Anstieg der Kr-85-Konzentration der Atmosphäre vor 1979 errechnet sich eine weltweite Kr-85-Freisetzung von ca. 6,3 MCi jährlich. Im Jahre 1979 wurde eine Erhöhung des jährlichen Anstiegs der Konzentration beobachtet. Dieser Anstieg ist nicht mit den im Westen in Betrieb befindlichen Wiederaufarbeitungsanlagen zu erklären.

Der Kr-85-Freisetzungsrate aus einer Wiederaufarbeitungsanlage liegen folgende Annahmen zugrunde:

Kernbrennstoff:	Leistung 30 MW/t Schwermetall Abbrand 36 MWd/kg Schwermetall Abkühlzeit 160 Tage Kr-85-Gehalt 12,9 kCi/t Schwermetall
Kernreaktor:	elektrische Leistung 1 000 MWe Wirkungsgrad 33 % abgebrannter Brennstoff 31 t/a
Wiederaufarbeitungsanlage:	zu entsorgende Leistung 45 GWe aufzuarbeitender Brennstoff 1 400 t/a Kr-85-Anfall 18 MCi/a

3. KRYPTON-ABTRENNUNG UND -LAGERUNG

Sowohl für die Abtrennung als auch für die Lagerung gibt es verschiedene mehr oder weniger weit entwickelte Verfahren. Im Kernforschungszentrum Karlsruhe wurde die Abtrennung durch Tieftemperaturrektifikation aus dem Auflöserabgas entwickelt. Dieses Verfahren wird hier zugrundegelegt. Von den verschiedenen möglichen Methoden der Endlagerung (Stahlflaschenlagerung oder -versenkung im Meer, Gasblaseneinschluß in Metallmatrix, Einpressung in Zeolithe) wird als technisch am weitesten entwickeltes Ver-

fahren das Abfüllen in Druckgasflaschen und deren Lagerung als Referenzverfahren gewählt. Die Flaschen werden im Flaschenlager gelagert und mit Luft gekühlt.

4. STRAHLENBELASTUNG DER BEVÖLKERUNG

Es wird angenommen, daß das Kr-85 über einen 200 m hohen Kamin in die Atmosphäre abgeleitet wird.

4.1 Umgebungsbelastung

Die Umgebungsbelastung durch die γ -Strahlung des Kr-85 wurde mit dem Rechenprogramm WOLGA [4] berechnet.

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen die Isodosen im Bereich von 10 und 50 km Radius. Dabei wurde die Ausbreitungsstatistik von Gorleben verwendet. Es wurde freie Ableitung über einen 200 m-Kamin angenommen.

Die Dosis am Kaminfuß beträgt 5 mrem/a und liegt damit weit unter der zulässigen Grenze. Da die Geländegrenze aber einige hundert Meter vom Kamin entfernt liegt, beträgt die γ -Dosis am Zaun ohne Kr-85-Abtrennung < 2 mrem/a. Für 95 %ige Rückhaltung sind die Dosisangaben um den Faktor 20 zu reduzieren. Die Hautdosis durch die β -Strahlung ist zwar wesentlich größer, trägt aber nach ICRP 26 [5] nicht zur effektiven Gesamtdosis von Einzelpersonen bei.

4.2 Weltweite Bevölkerungsdosis bei Freisetzung des Kr-85

Bei gleichmäßiger Verteilung des Kr-85 in Luft ergeben sich die Dosisfaktoren der Tabelle 1 [6]. Im Faktor der effektiven Dosis ist nach einer

ICRP-Empfehlung die Hautdosis mit dem Gewichtungsfaktor 0,001 berücksichtigt. Diese Berücksichtigung ist bei der Bestrahlung von Bevölkerungsgruppen empfohlen; es ist angenommen, daß 90 % der einfallenden β -Strahlung durch Kleidung abgeschirmt werden und nur 10 % die Haut erreichen.

Wird eine Kr-85-Menge von einer Punktquelle abgegeben und in der Erdatmosphäre verteilt, dann beträgt die kollektive Bevölkerungsdosis, über die gesamte Folgezeit integriert:

$$D_{\text{koll}} = \frac{A_0 P_0}{\lambda_1} g$$

- A_0 spezifische Anfangsaktivität (Ci/m^3)
 P_0 Bevölkerung
 λ_1 0,0648/a Zerfallsrate des Kr-85
 g Dosisfaktor ($\text{rem m}^3/\text{Ci a}$)

Diese Formel gilt für den Zeitraum gleichmäßiger Verteilung. Im folgenden ist auch der Prozeß der langsamen Ausbreitung in den ersten zwei Jahren berücksichtigt (siehe Kapitel 2).

Daher ist die spezifische Gesamtkollektivdosis etwas höher, als es der sofortigen Gleichverteilung der Krypton-Aktivität in der Erdatmosphäre entsprechen würde.

Bei einer Weltbevölkerung von $6,4 \cdot 10^9$ Personen (etwa 1995 erreicht) und einer Luftmenge von $4 \cdot 10^{18} \text{ Nm}^3$ ergeben sich die spezifischen Gesamtkollektivdosen der Tabelle 1.

Bei einer Emission von $18 \cdot 10^6 \text{ Ci Kr-85/a}$ und bei einem 30-jährigen Betrieb einer solchen Wiederaufarbeitungsanlage beträgt die kollektive Folgedosis 243 000 man-rem (effektive Ganzkörperdosis). Diese Dosen entstehen zu 11 % in den ersten zwei Jahren.

In der gleichen Zeit empfängt die Weltbevölkerung ca. $2,3 \cdot 10^9$ man-rem an natürlicher radioaktiver Strahlung, die zusätzliche Strahlung durch das Kr-85 aus der angenommenen Wiederaufarbeitungsanlage macht also 0,001 % der natürlichen aus.

4.3 Bevölkerungsdosis der Bundesrepublik Deutschland

Die Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland (BRD) von derzeit 57 Mio. empfängt von der obigen Kollektivfolgedosis einen überproportionalen Anteil von ca. 4 400 man-rem.

4.4 Bevölkerungsdosis bei 95 %-iger Kr-85-Abscheidung

Es wird angenommen, daß das Kr-85 zu 95 % aus dem Auflöserabgas abgeschieden wird, auf Stahlflaschen abgefüllt und langfristig gelagert wird. Eine Leckage aus den Stahlflaschen kann vernachlässigt werden. Es wird aber angenommen, daß die Stahlflaschen nach einem Jahrhundert geöffnet werden. Dann sind noch 0,15 % der gespeicherten Kr-85-Aktivität enthalten. Bei 95 %-iger Abtrennung werden also 5,14 % des Kr-85 freigesetzt. Das ergibt an weltweiter Bevölkerungsdosis 12 500 man-rem effektive Ganzkörperdosis und in der BRD 230 man-rem.

5. STRAHLENBELASTUNG DES PERSONALS IM ROUTINEBETRIEB

Während die Strahlenbelastung der Bevölkerung durch das Kr-85 im μ rem-Bereich liegt, in einem Bereich also, in dem Strahlenschäden auch statistisch nicht nachweisbar sind und die lineare Extrapolation des Krebsrisikos fragwürdig ist, handelt es sich bei der Strahlenbelastung des Personals um Dosen im rem-Bereich. Sie liegen zwar innerhalb der zulässigen Grenzen, eine gewisse, wenn auch statistisch nicht nachweisbare Erhöhung der Krebs-

häufigkeit muß in diesem Bereich jedoch angenommen werden.

Die folgenden Zahlenwerte sind für die US-amerikanische Anlage (21 MCi/a) [1] ermittelt, können aber in guter Näherung auch auf das deutsche Projekt (18 MCi/a) übertragen werden.

5.1 Abtrennanlage

Die Abtrennanlage läuft im 24-stündigen Routinebetrieb, ohne daß das Personal zu anderen als zu Wartungsarbeiten eingreifen müßte. Daher verursachen nur die Wartung und Reparatur nennenswerte Strahlenbelastungen. Es wird angenommen, daß die Kältebox (Isolierung der Tieftemperaturanlage) mit mindestens 5 cm Blei abgeschirmt ist. Dann beträgt die Strahlenbelastung des Personals ca. 67 man-rem in 30 Jahren. Eine weitere Möglichkeit, Strahlenbelastung zu reduzieren, besteht darin, die Anlage vor Wartungs- oder Reparaturarbeiten von Kr-85 zu entleeren und mit inaktivem Gas zu spülen. Damit wird die Strahlenbelastung auf ca. 9 man-rem reduziert.

5.2 Transport

Die gefüllten Kr-85-Flaschen werden in einem 7 cm-Bleischirm über etwa 0,5 km bis zum Flaschenlager transportiert. Diese Operation verursacht, inclusive der Inspektion usw., weniger als 0,1 man-rem in 30 Jahren, ist also vernachlässigbar.

5.3 Lager

Die Krypton-Flaschen werden in Zellen gelagert. Die Betonabschirmung ist allseitig mindestens 0,75 m dick. Die Flaschen werden mit Luft gekühlt. Die Strahlenbelastung des Personals ist vorwiegend durch Wartungs- und

Reparaturarbeiten bedingt. Die notwendige Dauer der Wartung wurde in [1] aufgrund der Betriebserfahrung der PNL Maintenance and Craft Serv. abgeschätzt und wegen der erhöhten Schwierigkeiten im Strahlenfeld mit dem Faktor 2 multipliziert. Dieser Faktor erscheint allerdings niedrig; daher wird hier statt des Faktors 2 der Faktor 10 verwendet. Damit ergibt sich folgende Dosisbelastung für die gesamte Lagerzeit:

	Fern- bedienung	Berufliche Strahlenexposition in man-rem		
		Betrieb	Wartung	gesamt
horizontale Lagerung	nein	165	245	410
" "	ja	15	245	260
vertikale Lagerung	ja	5	330	335

Die Lagerzeit der einzelnen Flaschen ist in [1] zwar mit nur 80 Jahren angenommen, die Verlängerung auf 100 Jahre erhöht die obigen Zahlen jedoch nicht, da die Strahlung der Flaschen bereits nach 80 Jahren Lagerzeit vernachlässigbar klein geworden ist. Für das nukleare Entsorgungszentrum in Gorleben wurde eine vertikale Lagerung mit Fernbedienung konzipiert.

6. STRAHLENBELASTUNG DURCH NUKLEARE STÖRFÄLLE

In [1] sind elf verschiedene Störfälle in der Kr-Abtrennanlage und neun Störfälle beim Abfüllen, Transportieren und Lagern der Gasflaschen analysiert. Nur wenige dieser Störfälle tragen wesentlich zur Strahlenbelastung des Personals und der Bevölkerung bei. Nur diese werden hier behandelt.

6.1 Strahlenbelastung der Bevölkerung

Die folgenden Störfälle in der Kr-Abtrennanlage führen zu einer nennenswerten Kr-Freisetzung und somit zu einer Erhöhung der weltweiten Bevölkerungsdosis:

Störfall	Häufigkeit in a^{-1}	wahrscheinlicher Wert der freigesetzten Kr-85-Aktivität
1. Verstopfung (Ausfrierungen in den App.)	6	$120 \cdot 10^3$ Ci/a
2. Leckage aus dem System in den Kamin	1	$120 \cdot 10^3$ Ci/a
3. Leckage aus dem System in die Zelle	3	$200 \cdot 10^3$ Ci/a
4. Abschaltung mit Kr-Abblasen	0,2	$350 \cdot 10^3$ Ci/a
5. Explosion eines H_2O_2 - oder NO_x / O_2 -Gemisches	0,055	$110 \cdot 10^3$ Ci/a
Summe		$900 \cdot 10^3$ Ci/a

Unter diesen Störfällen fällt die große Häufigkeit Nr. 1, Verstopfung, mit 6 pro Jahr auf. Eine so große Häufigkeit wäre sicher wegen des Aufsehens in der Öffentlichkeit weder tolerierbar noch wahrscheinlich.

Die Bevölkerungsdosis wird mit denselben Randbedingungen wie in Abschnitt 4.2 berechnet und beträgt bei 30-jährigem Betrieb der Abtrennanlage

$$12,2 \cdot 10^3 \text{ man-rem Ganzkörperdosis.}$$

Störfälle beim Transport oder der Lagerung tragen nur unwesentlich zur Bevölkerungsdosis bei.

6.2 Strahlenbelastung des Personals

Nur wenige Störfälle - und nur solche beim Abfüllen, bei Transport und Lagerung der Gasflaschen - tragen wesentlich zur Strahlenbelastung des Personals bei:

Störfall	Häufigkeit pro Jahr	kumulative Strahlenbelastung in 100 Jahren
1. Geringe Direktbestrahlung aus der Kr-Flasche	2	200 man-rem
2. Mäßige Direktbestrahlung durch Kr-Flasche infolge Fehlbedienung	0,1	80 man-rem
3. Kr-Flaschen-Bruch	0,02	10 man-rem
		Summe 290 man-rem

Der Bruch einer Kr-Druckgasflasche kann zwar zu einer relativ hohen Strahlendosis führen, er ist aber so selten zu erwarten, daß er hinsichtlich der kumulativen Strahlenbelastung nicht dominiert.

7. KONVENTIONELLE ARBEITSUNFÄLLE

Durch den Bau und den Betrieb der Kr-Abtrennanlage und des Flaschenlagers entstehen neben den nuklearen auch konventionelle Risiken. Zu diesen zählen Arbeitsunfälle, welche Tod oder Invalidität zur Folge haben, sowie Berufskrankheiten. In der ICRP-Publikation 27 [7] wird dargelegt, daß das Risiko des Todes durch Unfall oder Berufskrankheit wesentlich schwerer wiegt als das Risiko einer nicht tödlichen Verletzung oder Invalidität, selbst wenn letztere wesentlich häufiger vorkommen.

Zu dieser Schlußfolgerung gelangt man auch auf folgendem Wege: Aus [14] kann entnommen werden, daß der überwiegende Teil der Ausgaben gewerblicher Berufsgenossenschaften (über 80 %) für Entschädigungen aufgewendet wurden. Diese betragen ca. 300,-- DM je Vollbeschäftigtem. Davon wurden ca. 45 % an Renten für Verletzte und Erkrankte aufgewendet. Schätzt man die für eine Belegschaft von 12 Mann über die gesamte Betriebsdauer notwendigen Aufwendungen für nicht-tödliche Unfälle großzügig ab, dann ergibt sich nur ein geringer Bruchteil der 0,3 Mio. DM für das tödliche Unfallrisiko (siehe Kapitel 9.2). Dieser Sachverhalt wird daher auch für die Beschäftigten der Kr-85-Abtrennung und -Lagerung angenommen.

In Tabelle 2 sind Angaben aus den Unfallstatistiken der Berufsgenossenschaften [8, 9, 10] zusammengestellt. Danach tragen Wegeunfälle mehr als die Hälfte zu den tödlichen Arbeitsunfällen bei, Berufskrankheiten dagegen tragen z.B. in der chemischen Industrie nur ca. 10 % zu diesen bei. Die Häufigkeit der Todesfälle variiert von $0,8 \cdot 10^{-4}$ bis $1,73 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr und Beschäftigtem. Angesichts des hohen Sicherheitsstandards in der kerntechnischen Industrie wäre es nicht gerechtfertigt, eine besonders hohe Unfallrate wie im Bergbau oder der Bauwirtschaft anzunehmen. Es wird hier wegen der ähnlichen Tätigkeit die mittlere Rate der chemischen Industrie angenommen: Todesfälle durch Unfall (incl. Wege-) und Berufskrankheit:

$$1,5 \cdot 10^{-4} \text{ pro Jahr und Beschäftigtem.}$$

In der Abgasreinigungsanlage der WAK (AZUR) werden im Schichtbetrieb fünf Schichten je zwei Mann, ein Leiter und eine Aufsicht, also insgesamt 12 Mann, benötigt. Zu den Aufgaben von AZUR gehört - im Unterschied zu einer Kr-85-Anlage - auch die Abgasfilterung, dagegen nicht die Flaschenlagerung (2 Flaschen/Woche). Es wird in erster Näherung angenommen, daß der Personalbedarf für beide Aufgaben etwa gleich groß ist. Daher werden 12 Mann benötigt. Deren Unfallrate (tödliche Unfälle und Berufskrankheiten) - über 30 Betriebsjahre integriert - beträgt

$$12 \cdot 30 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = 0,054,$$

d.h. mit einer Wahrscheinlichkeit von 5,4 % wird es in 30 Betriebsjahren einen Unfalltoten geben.

Dazu kommt das Risiko tödlicher Unfälle während des Baus der Anlage. Nach Tabelle 2 ist die Unfallhäufigkeit (tödliche Unfälle) im Baugewerbe um den Faktor 2,3 höher als im gesamten Gewerbe. Nimmt man eine zweijährige Bauzeit mit einer Mannschaft von 60 Personen an, dann ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von

$$2,3 \cdot 2 \cdot 60 \cdot 1,7 \cdot 10^{-4} = 0,05$$

für einen tödlichen Unfall*.

8. BEEINFLUSSUNG DES KLIMAS

Bisher sind noch keine Auswirkungen des Kr-85 auf meteorologische Vorgänge zu beobachten. Die von dem Betastrahler Kr-85 emittierten Elektronen bewirken eine Erhöhung der natürlicherweise vorhandenen Ionisation der Luft, die durch natürliche Radionuklide und durch die kosmische Höhenstrahlung erzeugt wird. Zur Zeit liegt die durch Kr-85 hervorgerufene zusätzliche Ionisation noch unter 1 %. Sollten sich jedoch Prognosen bestätigen, die bereits für die ersten Jahrzehnte des 21. Jahrhunderts eine Erhöhung der

*Auch aus dem Bereich der Kerntechnik ergibt sich, wenn auch mit geringerer statistischer Relevanz, ein ähnlicher Wert.

Im KfK gab es bei einem Investitionsvolumen von ca. 2 Mrd. DM bisher zwei tödliche Unfälle, d.h. bei 63 Mio DM (siehe Kapitel 9.1) wäre die Wahrscheinlichkeit für einen tödlichen Unfall

$$2 \frac{63}{2\,000} = 0,063.$$

Konzentration von derzeit 20 pCi/m^3 auf ca. 3 nCi/m^3 prognostizieren, so stiege die Ionisationsrate um maximal 57 % an. (Eine Konzentration von 3 nCi/m^3 Luft führt zu einer Beta-Submersionsdosis der Haut in Höhe von ca. 5 mrem/a.) Die unmittelbare Folge wäre eine Abnahme des elektrischen Widerstandes zwischen Erde und Ionosphäre. Zum heutigen Zeitpunkt erlauben jedoch weder Theorien noch praktische Erfahrungen zuverlässig abzuschätzen, welche Auswirkungen die beschriebenen Veränderungen des luftelektrischen Feldes auf meteorologische Prozesse haben. Eine Reihe möglicher Effekte wird von den Meteorologen diskutiert. Insbesondere ist die Frage unentschieden, ob die Niederschlagshäufigkeit in bestimmten Regionen erhöht oder erniedrigt werden könnte. Angesichts dieser ungeklärten Fragen erscheint es notwendig, das Kr-85 als möglicherweise klimabeeinflussend im Auge zu behalten. Dies nicht zuletzt wegen des schnellen Anstieges der Kr-85-Konzentration in der Atmosphäre, der langen Halbwertszeit und der weltweiten Verbreitung. Bedeutsam ist, daß bei einer Konzentration unterhalb der zulässigen radiologischen Grenzwerte weltweite Auswirkungen nach heutigem Wissensstand nicht ausgeschlossen werden können.

Für eine wirksame Begrenzung der Kr-85-Konzentration in der Atmosphäre ist es allerdings erforderlich, das Kr-85 nicht nur einer einzelnen Wiederaufarbeitungsanlage, sondern aller im globalen Maßstab wesentlichen Anlagen - inclusive der militärischen und der des Ostblocks - abzutrennen und zu lagern.

9. KOSTEN-NUTZEN-ANALYSE

9.1 Kosten der Krypton-Abtrennung und -Lagerung

Nach [11] betragen die Kosten einer Kr-85-Abtrennanlage (Stand 1976) in den USA:

Investition	16 - 20	Mio. \$
Betrieb	0,3 - 0,425	Mio. \$ pro Jahr
Gesamt bei 30 Jahren Betrieb	25 ÷ 32,75	Mio. \$

Für das Krypton-Flaschenlager wird eine deutsche Kostenschätzung gewählt. Im Jahre 1978 wurde die Investition auf 17 Mio. DM geschätzt. Dieser Wert ist für einen 20-jährigen Betrieb einer Kr-Abtrennanlage ermittelt. Obwohl die Vergrößerung der Kapazität um 50 % (30 Jahre Einlagerung) die Baukosten um weniger als 50 % steigert, wird konservativerweise diese Steigerung angenommen und gleichzeitig auf den Stand 1980 umgerechnet:

Investition ca. 28 Mio. DM

Dieses Lager wird mit Naturkonvektion gekühlt, erfordert daher einen nur geringen Wartungsaufwand. Da die Betriebskosten der Abtrennanlage bereits hoch angesetzt sind, werden für die 30-jährige Beschickungszeit keine weiteren Betriebskosten des Lagers eingesetzt. Für die folgenden 70 Jahre Bewachung wird ein Viertel der vorherigen Betriebskosten angenommen.

Die Gesamtkosten betragen somit (Stand 1980):

Kr-Abtrennung, Investition	35 Mio. DM
Kr-Lager, Investition	28 Mio. DM
Betrieb, erste 30 Jahre*	27 Mio. DM
Betrieb, folgende 70 Jahre	16 Mio. DM
<hr/>	
gesamt	ca. 106 Mio. DM

Zum Vergleich wird eine Kostenschätzung aus den USA hinzugefügt. Nach [12] betragen die Kosten eines Kr-Flaschenlagers (Stand 1979):

*Dabei wurde die obere Grenze des o.a. Bereiches angesetzt. Eine Abschätzung der Betriebskosten einer solchen Anlage im KfK ergab den etwas höheren Betrag von 1,5 Mio. DM/a.

Investition	150 Mio. \$
Betrieb	0,9 Mio. \$ pro Jahr
Gesamt bei 100 Jahren Betrieb	240 Mio. \$

Diese Zahlen für das Krypton-Lager scheinen allerdings überhöht zu sein. Sie sind zum Teil durch den Aufwand für die Zwangskühlung bedingt, die bei Naturkonvektion entfällt.

9.2 Wirtschaftlicher Nutzen

Bei der Tieftemperatur-Rektifikation fällt auch das inaktive Xenon, allerdings leicht kontaminiert durch radioaktives Krypton, an. Je 1 t abgebrannten Urans enthält $0,9 \text{ Nm}^3$ Xe. Bei einem Durchsatz von 1 400 t Uran/a und bei 90 %-iger Abtrennung werden $1\,130 \text{ Nm}^3$ Xe/a gewonnen.

An inaktivem Xenon besteht durchaus ein reges Interesse, was sich in dem hohen Preis dieses Edelgases ausdrückt (13,50 DM/l Xe). Xenon kann z.B. als Lampenfüllung oder im medizinischen Bereich verwendet werden. Ob dieses Gas aus der Kr-Abtrennanlage in der notwendigen Reinheit bezüglich der Aktivität gewonnen werden kann, kann im Moment noch nicht abschließend beurteilt werden. Zumindest sind weitere Verfahrensschritte zur Feinreinigung des Xenon notwendig, bevor es weiterverwendet werden könnte. Auf der anderen Seite steht ein Verkaufswert des Xenon im Bereich von einigen Mio. DM jährlich selbst dann, wenn das vergrößerte Angebot nur zu einem Bruchteil des jetzigen Preises abgesetzt werden kann.

Die Möglichkeit der Weiterverwendung des anfallenden Xenon soll hier lediglich angedeutet, jedoch nicht ausführlich diskutiert werden.

9.3 Kosten konventioneller Unfallrisiken

Wie bereits in Kapitel 7 erläutert, wird nur das Risiko des Todes durch Arbeitsunfall (im Betrieb oder im Verkehr) oder durch Berufskrankheit (ausgenommen Schädigung durch radioaktive Strahlung) berücksichtigt.

Das Risiko eines tödlichen Unfalls beträgt

bei 30 Betriebsjahren und 12 Mann	0,054
beim Bau der Anlagen	0,05
<hr/>	
Gesamtrisiko	~ 0,1

Dieses Risiko ist aufgrund der Statistik realistischerweise zu erwarten. Der Wert eines Menschenlebens wird in [13] für den Strahlenschutz mit bis zu 5 Mio. \$, für andere technische Bereiche z.B. mit ca. 150 000 \$ beziffert. Da dieser Kostenfaktor gegenüber den direkten Kosten der Anlage nur wenig ins Gewicht fällt, kann hier ein Wert von $3 \cdot 10^6$ \$ pro Menschenleben eingesetzt werden (20-facher Wert der anderen technischen Bereiche).

Die wahrscheinlichen Kosten durch Unfalltod betragen daher

$$0,1 \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 1,75 = 0,6 \text{ Mio. DM .}$$

9.4 Kosten-Nutzen-Vergleich

Durch die Kryptonabtrennung und -lagerung wird die weltweite Bevölkerungsdosis durch das Kr-85 netto um 220 000 man-rem, d.h. um 90 %, reduziert (siehe Tab. 3). Diese Reduktion wird mit einem Aufwand von 106 Mio. DM für Bau und Betrieb über 30 bzw. 100 Jahre erreicht. Dazu kommen Kosten für einen mit 10 %-iger Wahrscheinlichkeit zu erwartenden Unfalltod in Höhe von 0,6 Mio. DM. Es sind also DM 485,-- oder \$ 275,-- für ein eingespartes man-rem aufzuwenden.

Tabelle 8 enthält auch die Bevölkerungsdosen in der BRD allein. Die Strahlenbelastung der beruflich Strahlenexponierten zählt selbstverständlich ebenfalls dazu. Die Bilanz der BRD ergibt eine Reduzierung um nur 75 %.

Nach ICRP 26 [5] beträgt der Sterblichkeitsrisikofaktor für strahleninduzierten Krebs 10^{-4} /rem. Wendet man diesen Faktor auf die durch die Kr-Abtrennung vermiedene Bevölkerungsdosis an (obwohl die vermiedenen Äquivalentdosen im μ rem-Bereich liegen), so werden statistisch 22 tödliche Krebsfälle vermieden, was einem Aufwand von 5 Mio. DM oder 3 Mio. \$ für die Vermeidung eines Todesfalles entspricht. Dieser Wert wurde auch in Kapitel 9.3 eingesetzt.

10. DISKUSSION

Die Kryptonabtrennung und -lagerung hat den begrenzten Zweck, den größten Teil des bei der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente freiwerdenden Kr-85 so lange zurückzuhalten, bis dieses weitgehend zerfallen ist. Aus der Analyse von notwendigem Aufwand und erreichbarem Effekt können mehrere Schlüsse gezogen werden:

1. Wegen der möglichen Störungen bei der Abtrennung und der bisher geringen Betriebserfahrungen ist es nicht sinnvoll, einen höheren Abscheidegrad als 95 % anzusetzen. Mit diesem Abscheidegrad läßt sich die globale Strahlenbelastung durch Kr-85 mit begrenztem Aufwand um eine Größenordnung reduzieren.
2. Der Aufwand für die Lagerung der Krypton-Flaschen sollte nicht größer als derjenige für die Abtrennung sein, denn durch eine Zerstörung der Kr-Flaschen wird lediglich der Effekt der Kr-Abtrennung durch dessen Freisetzung teilweise wieder rückgängig gemacht. Abgesehen von der notwendigen Strahlenabschirmung durch Betonwände ist es nicht sinnvoll, einen besonders hohen Aufwand, z.B. für Zwangskühlung (siehe die US-Studie [12]), für Flugzeugabsturz-sicherheit oder für Objektschutz, zu fordern.

3. Dem Strahlenschutz des Personals sollte jedoch besonderes Gewicht zukommen. Da sich die vermiedene Bevölkerungsdosis aus Dosen im μ rem-Bereich zusammensetzt, dafür aber Strahlendosen des Personals im rem-Bereich in Kauf genommen werden, darf die Gesamtbelastung des Personals (700 man-rem nach Tab. 3) nur einen kleinen Bruchteil der vermiedenen Bevölkerungsdosis der Welt (220 000 man-rem) sowie auch der der Bevölkerung der BRD (3 300 man-rem) ausmachen. Das ist bei der hier beschriebenen Auslegung (siehe Kapitel 5) der Fall.
4. Die konventionelle Unfallgefahr spielt im Kosten-Nutzen-Vergleich nur eine untergeordnete Rolle. Die Unfallstatistiken geben keinen Hinweis auf erhöhtes Unfallrisiko beim Umgang mit Druckgasflaschen. Auch die Strahlengefährdung des Personals beim Bersten einer Flasche spielt keine dominante Rolle im gesamten Unfallrisiko.
5. Werden die obigen Schlußfolgerungen beachtet, dann läßt sich die globale Bevölkerungsdosis durch Kr-85 mit einem auch in anderen kerntechnischen Bereichen vorkommenden Aufwand von DM 485,-- je vermiedenes man-rem um 90 % reduzieren (siehe [15]). Es wird aber darauf hingewiesen, daß der Aufwand zur Risikoverminderung in anderen technischen Bereichen im allgemeinen ungleich geringer ist. Da in der BRD nicht nur der finanzielle Aufwand, sondern auch die Strahlenexposition des beschäftigten Personals zu tragen ist, wird hier nur eine Reduzierung um 75 % erreicht.
6. Diese Reduzierung der Kr-85-Bevölkerungsdosis um eine Größenordnung darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, daß die Strahlenbelastung der Weltbevölkerung durch das Kr-85 einer Wiederaufarbeitungsanlage der betrachteten Größe nur 0,001 % der natürlichen Strahlenbelastung ausmacht. Darüber hinaus wird der größte Teil dieses winzigen Inkrements der natürlichen Strahlenbelastung von den volkreichen Ländern, z.B. den Entwicklungsländern, empfangen. Angesichts dieser Zahlenverhältnisse ist man versucht, sich zu fragen, ob dem Gesundheitsschutz und der Risikominderung dieser Völker mit der Kr-85-Abtrennung auf optimale Weise gedient ist.

7. Die Ionisationsdichte der Luft wird durch die β -Strahlung des Kr-85 erhöht, gegenwärtig um unter 1 %. Erst mit stark steigendem Kr-85-Gehalt der Luft wird sich die Ionisationsdichte merklich erhöhen. Obwohl ein möglicher Zusammenhang mit dem Klima noch ungeklärt ist, erscheint es doch zweckmäßig, das Kr-85 als möglicherweise klimabeeinflussend unter Kontrolle zu halten.
8. Eine Wiederaufarbeitungsanlage allein macht hinsichtlich der Kr-85-Emission im globalen Maßstab nur einen verschwindend geringen Effekt und diesen zum überwiegenden Teil im Ausland. Erst wenn die Kr-85-Emission aller Wiederaufarbeitungsanlagen auf der Welt betrachtet wird, kann die Strahlenbelastung durch Kr-85 zu nennenswerter Größe anwachsen. Daher sollte die Kr-85-Abtrennung und -Lagerung nicht auf das eigene Land beschränkt bleiben. Erst wenn alle Kernenergieanwender - inklusive der Länder des Ostblocks - diese Technik anwenden, wird auch für das eigene Land der Nutzen dieser relativ teuren technischen Einrichtung voll zum Tragen kommen.

11. LITERATUR

- [1] P.J. Mellinger, G.R. Hoenes, L.W. Brackenbush, J. Greenborg, Kr-85- Management Trade-offs: A Perspective to Total Radiation Dose Commitment. PNL-3176, UC-70, January 1980
- [2] Bericht über das in der Bundesrepublik Deutschland geplante Entsorgungszentrum für ausgediente Brennelemente in Kernkraftwerken. DWK-Bericht, Hannover, September 1977
- [3] Umwelt, Informationen des Bundesministers des Innern, Nr. 76, S. 24-25, 1980
- [4] D. Nagel, D. Papadopoulos, WOLGA-1 - Ein FORTRAN-IV-Programm zur Berechnung der Dosisleistung durch Gammastrahlung aus der radioaktiven Abluft eines oder mehrerer Daueremittenten, KFK 2189, Oktober 1975

- [5] ICRP Publication 26, Recommendations of the ICRP, Pergamon Press, 1977
- [6] ICRP Publication 30, Supplement to Part 1, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, 1978
- [7] ICRP Publication 27, Problems Involved in Developing an Index of Harm, 1977
- [8] W. Abt, Unfall-Analyse 76, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V., Bonn, Mai 1978
- [9] Jahresberichte 1977 und 1978, Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, Heidelberg
- [10] Technischer Jahresbericht 1978, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln
- [11] Environmental Protection Agency, Environmental Analysis of the Uranium Fuel Cycle, Part IV. EPA 520/4-76-017, Washington, D.C., 1976
- [12] Department of Energy, Technology for Commercial Radioactive Waste Management, DOE/ET-0028, Washington, D.C., 1979
- [13] R.A. Howard, J.E. Matheson, D.L. Owen, The Value of Life and Nuclear Design, ANS Meeting on Probabilistic Analysis of Nuclear Reactor Safety, Los Angeles, May 1978
- [14] Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V., Bonn: Arbeitsunfallstatistik für die Praxis 1979
- [15] S.C. Black, F. Niehaus, How Safe is "Too" Safe?, IAEA Bulletin, Vol. 22, No. 1, p. 42-50 (1980)

	Dosisfaktor in $\frac{\text{rem m}^3}{\text{Ci a}}$	kollektive Folgedosis in man-rem		
		spezifisch je Ci	bei 30 x 18 M Ci Kr-85 weltweit	in der BRD
Gonaden	$16,9 \cdot 10^3$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$250 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^3$
rotes Knochenmark	$18,5 \cdot 10^3$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$270 \cdot 10^3$	
Haut	$1530 \cdot 10^3$	$415 \cdot 10^{-4}$	$224 \cdot 10^5$	
Ganzkörper, effektiv	$16,5 \cdot 10^3$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$243 \cdot 10^3$	

Tab. 1: Kollektive Folgedosis

	Chemie	Feinmechanik, Elektrotechnik			Baugewerbe	Gewerbliche Berufsgenossenschaft			Chemie	
	1978	1977	1978	1972-1978	1976	1974	1975	1976	1977	1976
Arbeitsunfälle Männer						0,1086	0,0975	0,104		
Frauen						0,0277	0,0257	0,0263		
mittel	0,0589				0,15	0,0790	0,0720	0,075		
Wegeunfälle	0,0087				0,0095	0,0094	0,0084	0,0095		
gesamt	0,0676				0,16	0,0884	0,0804	0,0845		
tödl. Arbeitsunfälle	$0,73 \cdot 10^{-4}$	$0,36 \cdot 10^{-4}$	$0,28 \cdot 10^{-4}$	$0,40 \cdot 10^{-4}$	$2,87 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$0,47 \cdot 10^{-4}$	$0,70 \cdot 10^{-4}$
tödl. Wegeunfälle	$0,66 \cdot 10^{-4}$	$0,59 \cdot 10^{-4}$	$0,51 \cdot 10^{-4}$	$0,70 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	$0,60 \cdot 10^{-4}$	$0,65 \cdot 10^{-4}$	$0,62 \cdot 10^{-4}$	$0,79 \cdot 10^{-4}$	$0,70 \cdot 10^{-4}$
Tod durch Berufskrankh.	$0,16 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{-4}$	$0,09 \cdot 10^{-4}$	$0,09 \cdot 10^{-4}$	$0,09 \cdot 10^{-4}$	$0,08 \cdot 10^{-4}$	$0,14 \cdot 10^{-4}$	$0,17 \cdot 10^{-4}$
Todesfälle gesamt	$1,55 \cdot 10^{-4}$	$0,96 \cdot 10^{-4}$	$0,80 \cdot 10^{-4}$	$1,10 \cdot 10^{-4}$	$4,00 \cdot 10^{-4}$	$1,92 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$	$1,76 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-4}$

Tab. 2: Unfallhäufigkeit in Industrie und Gewerbe pro Jahr und Beschäftigtem

	Folgedosis in man-rem	
	ohne Kr-85-Abtrennung	95 %-ige Kr-85-Abtrennung
1. Langzeitbelastung Bevölkerung	243 000 (4 400)	12 500 (230)
beruflich Strahlen- exponierte:		
Abtrennanlage		67
Lager		335
2. Belastung durch Störfälle Bevölkerung		12 200 (220)
beruflich Strahlen- exponierte:		
Abtrennanlage		-
Abfüllen und Lagern der Flaschen		290
3. Summe	243 000 (4 400)	25 400 (1 140)

Tab. 3: Ganzkörper-Submersionsfolgedosis durch die γ -Strahlung des Kr-85 (in Klammern die auf die BRD entfallende Dosis)

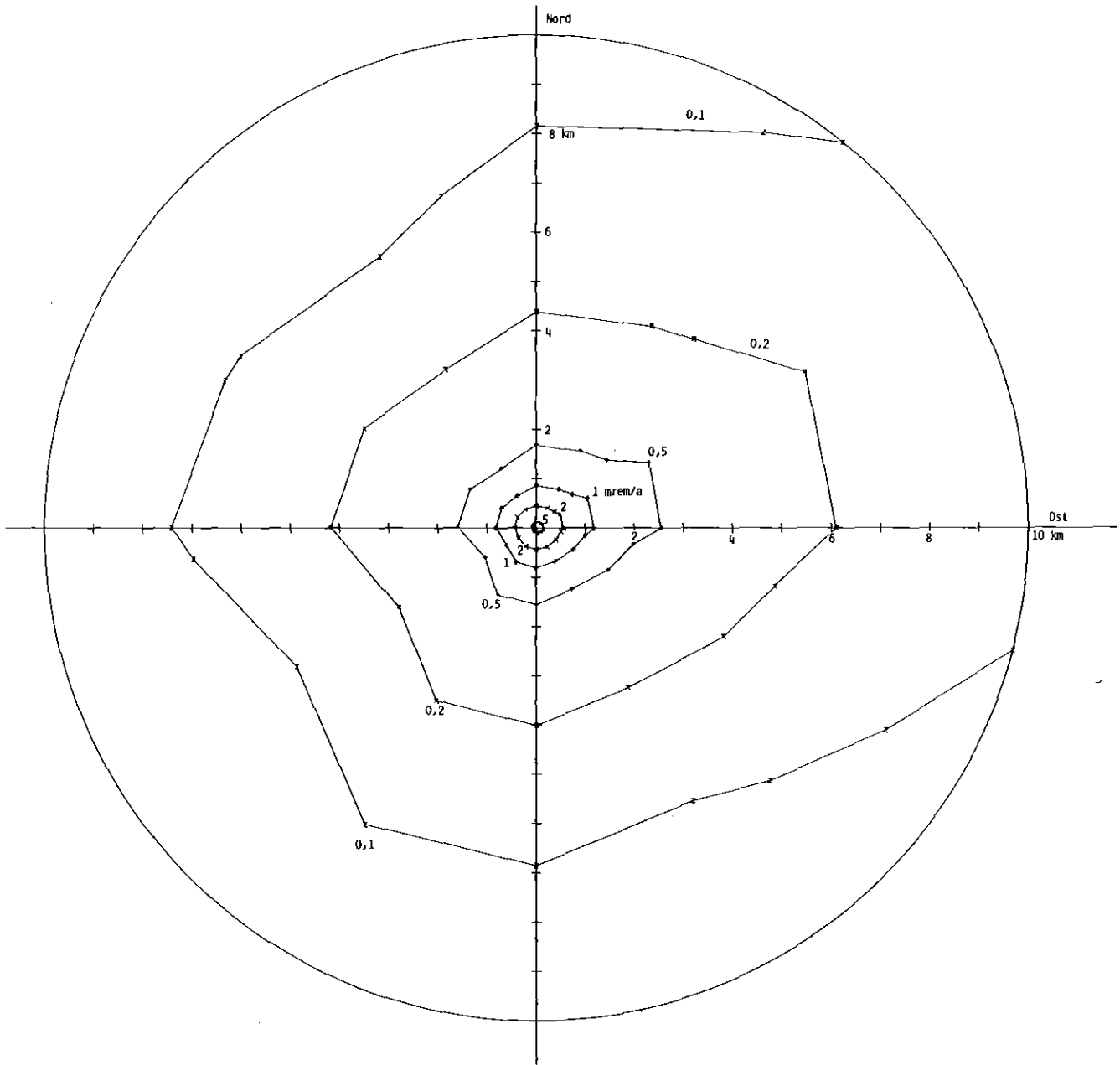


Abb. 1: Externe Gammastrahlung bis 10 km Entfernung, Standort Gorleben, Fall A, Emissionshöhe 200 m

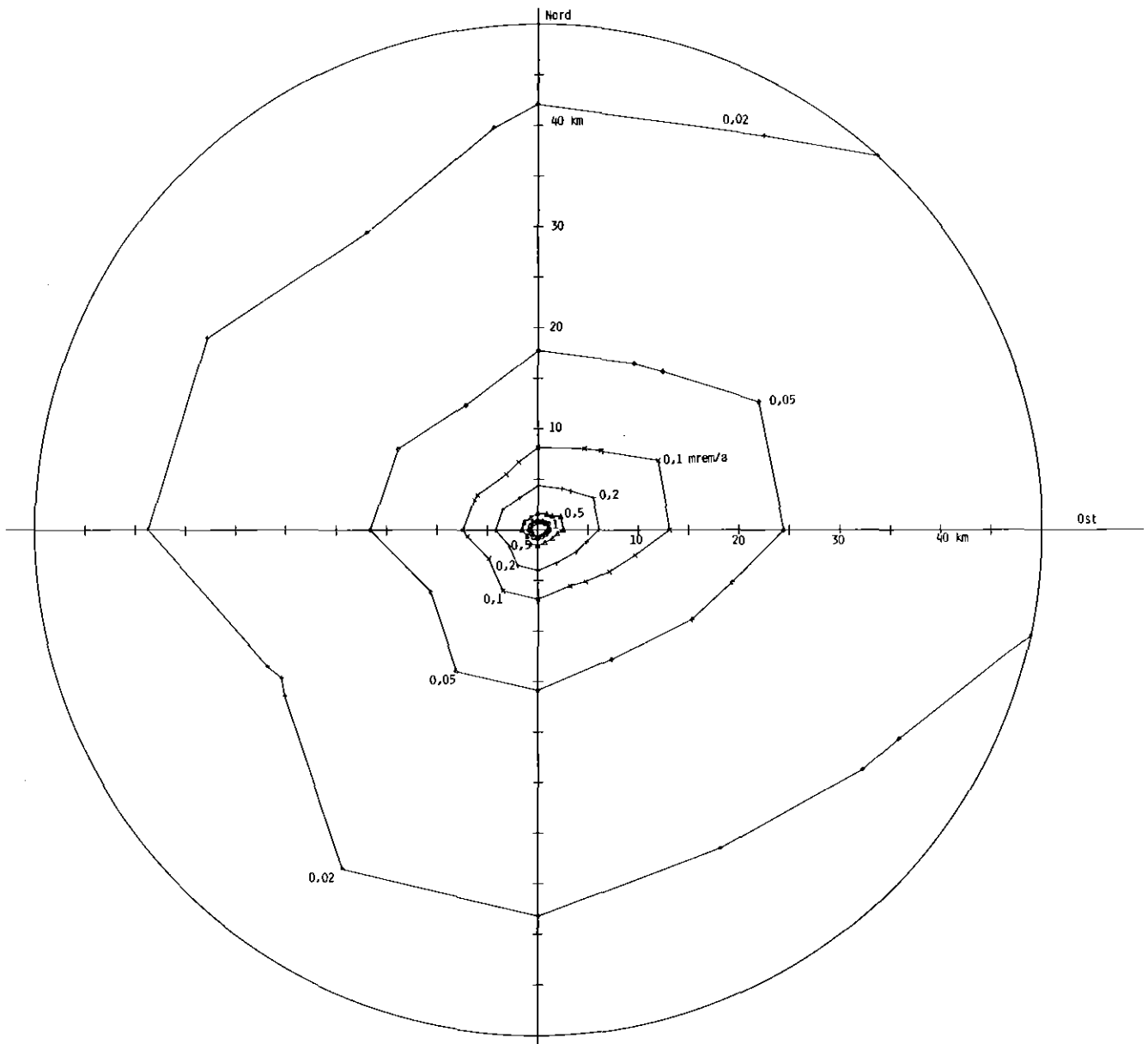


Abb. 2: Externe Gammastrahlung bis 50 km Entfernung, Standort Gorleben, Fall A, Emissionshöhe 200 m