KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

Februar 1972

KFK 1515

Umweltbelastung durch Radionuklide in Abluft und Abwasser aus Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland

K. Aurand, M. Ruf, W. Schikarski, J. Schwibach

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M.B.H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Februar 1972 KFK 1515

UMWELTBELASTUNG DURCH RADIONUKLIDE IN ABLUFT UND ABWASSER AUS KERNKRAFTWERKEN IN DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND+)

von

K. Aurand[1)]
M. Ruf[2)]
W. Schikarski[3)]
J. Schwibach[4)]

+) Überarbeitete deutsche Fassung des Berichts 399 der internationalen Konferenz für die friedliche Nutzung der Kernenergie, Genf, September 1971

1) Bundesgesundheitsamt, Berlin
2) Bayerische Biologische Versuchsanstalt, München
3) Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe
4) Bundesgesundheitsamt, Neuherberg bei München

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Abstract

The effect in the environment of radioactive effluent from normally operating nuclear power plants in the Federal Republic of Germany is analysed. The current licencing requirements are discussed in view of the national and international guidelines and regulations on such effluents. The contribution to the radiation burden of individual power plants via both gaseous and liquid effluent is there calculated from measured and estimated data. This contribution is, further, extrapolated for the increasing power requirements of an expanding economy. The results show that for the foreseeable future, up to the year 2000, the expected radiation burden to the population will be small relative to the natural radiation burden.

Zusammenfassung

Die Umweltbelastung durch Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland wird in bezug auf die Abgabe radioaktiver Stoffe im Normalbetrieb diskutiert. Ausgehend von den internationalen und nationalen Richtlinien und Vorschriften zur Begrenzung der Strahlenbelastung durch Ableitungen aus Kernkraftwerken werden zunächst die heute gültigen Genehmigungsbedingungen erörtert. Anhand von gemessenen und theoretisch ermittelten Daten wird dann die Dosisbelastung aus Abluft und Abwasser einzelner Kernkraftwerke ermittelt und ihre Extrapolation in einer expandierenden Energiewirtschaft angegeben. Die Ergebnisse zeigen, daß in dem überschaubaren Zeitraum bis zum Jahre 2000 nur sehr geringe Dosisbelastungen zu erwarten sind, die klein gegen die natürliche Strahlenbelastung sind.

Inhalt | Seite

1. Einleitung

Die in Abgasen und Abwässern von Kernkraftwerken enthaltenen Radionuklide können biologische Organismen direkt oder über eine Kontamination der Umwelt durch ionisierende Strahlung belasten oder Industrieprozesse, wie z. B. die Herstellung photographischer Emulsionen, stören. Im allgemeinen wird die Einwirkung ionisierender Strahlen auf Menschen der stärkste bestimmende Faktor sein. Für den einzelnen hängt das Risiko schädlicher Auswirkungen einer Bestrahlung von der Dosis ab, die er empfangen hat. Andererseits ist das Auftreten bestimmter genetischer Schäden von der genetisch wirksamen Bevölkerungsdosis abhängig. Selbst bei niedrigen Strahlendosen ist ein gewisses Risiko oder eine geringe Wahrscheinlichkeit nachteiliger Auswirkungen nicht auszuschließen.

Jeder Mensch wird bereits durch die ionisierende Strahlung natürlich vorkommender Radionuklide im Boden, den Gewässern, und in der Atmosphäre sowie durch die hochenergetische Höhenstrahlung belastet. In der Bundesrepublik Deutschland führt die hochenergetische Strahlung von der Sonne und aus dem Kosmos zu einer Strahlenbelastung von 35 mrem/Jahr auf Meereshöhe und etwa 130 mrem/Jahr auf einer Höhe von 3000 m ü. d. M. Die im Boden enthaltenen Radionuklide ergeben weitere 50 mrem/Jahr von außen wirkender Bestrahlung. Die Gase Radon und Thoron treten aus dem Boden aus und werden zusammen mit ihren radioaktiven Zerfallsprodukten eingeatmet. Andere natürliche Radionuklide werden mit dem Wasser und den Nahrungsmitteln aufgenommen. Die natürliche Strahlenbelastung ändert sich je nach der Lage, d. h. dem geologischen Ursprung der Oberflächenformationen und selbst mit den natürlichen Baustoffen im Wohnungs- und Ingenieurbau. Insgesamt dürfte die Strahlenbelastung aus natürlichen Quellen, der der Mensch in der Bundesrepublik Deutschland ausgesetzt ist, bei etwa 120 mrem/Jahr liegen, wobei z. B. Teile der Lunge eine noch höhere Bestrahlung von 200 - 1200 mrem/Jahr empfangen. Individuelle Unterschiede, je nach geographischer Lage und Lebensgewohnheiten, in der Größenordnung von etwa 10 mrem/Jahr sind durchaus üblich [1].

Aus der medizinischen Anwendung von Röntgenstrahlen und der Verwendung natürlicher und künstlicher Radionuklide in der Industrie entstehen weitere Strahlenbelastungen. Zur Zeit schätzt man die genetisch wirksame Strahlendosis aufgrund der medizinischen Anwendung ionisierender Strahlen in der Bundesrepublik Deutschland auf insgesamt rund 20 mrem/Jahr. Die Verwendung von Radioisotopen in der Industrie und die mit Strahlung beschäftigten Personen tragen zur Bevölkerungsdosis noch einmal etwa 1 mrem/Jahr bei. In früheren Jahren hat mitunter der Fallout aus

Kernwaffenversuchen zu einer weiteren Strahlenbelastung von ca. 10 mrem/Jahr geführt.

Auch Kernkraftwerke sind eine Quelle zusätzlicher Strahlenbelastung. In der Bundesrepublik Deutschland sind zur Zeit 8 Kernkraftwerke in Betrieb; rund ein Dutzend befinden sich im Bau oder sind in Auftrag gegeben (Abb. 1), rund 30 dürften 1980 vorhanden sein (25 000 MWe Kernkraftwerkskapazität), ca. 120 Kernkraftwerke erwartet man im Jahre 2000 (150 000 MWe Kernkraftwerkskapazität). Kernreaktoren erzeugen eine größere Menge radioaktiver Spalt- und Aktivierungsprodukte im Kernbrennstoff, den Baustoffen und Kühlmitteln. Im allgemeinen werden diese künstlichen Radionuklide lediglich aus Gründen des sicheren und wirtschaftlichen Betriebs im Brennstoff und den Baustoffen festgehalten oder im Reinigungssystem des Primärkühlkreislaufs ständig aus dem Kühlmittel entfernt. Dennoch erfolgt zwangsläufig ein gewisser Übergang oder eine Leckage von Radionukliden in die Abgase und Abwässer dieser Anlagen mit anschließender Freisetzung in die Umwelt.

2. Internationale Normen und nationale Vorschriften zur Begrenzung der Strahlenbelastung durch Radionuklide in Abluft und Abwasser von Kernkraftwerken

Die wissenschaftliche Gesamtbasis für die Beurteilung des Risikos, das sich für den Menschen aus der Freisetzung von Radionukliden mit Abluft und Abwasser von Kernkraftwerken in die Umwelt ergibt, wird aus der medizinischen Erfahrung auf dem Gebiet der Humanbestrahlung und aufgrund radiobiologischer Daten aus Tierversuchen oder biologischen Experimenten erhalten. Diese Ergebnisse sind von der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) in den Empfehlungen über die höchsten zulässigen Dosen für mit Strahlen Beschäftigte und die Dosisgrenzen für die Öffentlichkeit berücksichtigt worden. Außerdem enthalten die Empfehlungen der ICRP Tabellen der zulässigen Radionuklidkonzentrationen in Luft und Wasser, wie sie für das physiologische und Stoffwechselmodell eines Standardmenschen zusammengestellt worden sind [2].

Die Empfehlungen der ICRP und die Strahlenschutzgrundnormen von Euratom bilden die Grundlage der Strahlenschutzverordnung der Bundesrepublik Deutschland, in der ebenfalls Tabellen der höchsten zulässigen Konzentrationen von Radionukliden in Luft und Wasser enthalten sind [3]. Allerdings kann die Anwendung der höchsten zu-

lässigen Radionuklidkonzentrationen in Luft und in Wasser bei der Ableitung radioaktiver Abluft und Abwässer irreführen. So hat z. B. die Erfahrung gezeigt, daß radioökologische Prozesse in der Umwelt zu einer Strahlenbelastung führen können, die selbst dann die Dosisgrenzen übersteigt, wenn die höchsten zulässigen Radionuklidkonzentrationen nicht erreicht werden. Außerdem kann der Grundsatz der höchsten zulässigen Radionuklidkonzentrationen in Abwässern oder Umweltmedien dazu führen, daß man die Grundprinzipien des Strahlenschutzes außer acht läßt, insbesondere z. B. die Vermeidung unnötiger Bestrahlungen, die Beschränkung jeder einzelnen Quelle künstlicher Bestrahlung auf einen angemessenen Teil der Gesamtbestrahlung sowie die Beschränkung des Risikos schädlicher Auswirkungen für die Öffentlichkeit auf ein Mindestmaß.

Nach diesen Grundsätzen ist in der Bundesrepublik die Entwicklung von Kernkraftwerken mit möglichst niedrigen Radioaktivitätsabgaben gefördert worden; die bisher auf diesem Gebiet vorliegenden Ergebnisse sind gut. Auf der anderen Seite darf man die Strahlenbelastung des Menschen aufgrund natürlicher Radioaktivität, die ja einen Teil der menschlichen Umwelt bildet, nicht außer acht lassen. Deswegen ist z. B. eine Auslegung von Kernkraftwerken, die überhaupt keine Radioaktivitätsabgabe vorsieht, kein Ziel, das unter allen Umständen und auf Kosten anderer Risiken erreicht werden muß. Allerdings sollte die Freisetzung von Radionukliden in Abwässern und der Abluft von Kernkraftwerken so eingeschränkt werden, daß die Strahleneinwirkung auf die Öffentlichkeit den natürlichen Strahlenpegel nicht wesentlich überschreitet. Das muß allerdings für die zukünftige Kernenergieindustrie unter Berücksichtigung der hohen Bevölkerungsdichte und der intensiven Nutzung von Boden und Gewässern in der Bundesrepublik Deutschland sichergestellt sein.

3. Genehmigungsbedingungen und nationale Empfehlungen zur Radionuklidabgabe in Abwasser und Abluft von Kernkraftwerken

3.1 Allgemeines

In der Bundesrepublik Deutschland unterliegt die Abgabe radioaktiver Abluft und Abwässer aus Kernkraftwerken den allgemeinen und speziellen Genehmigungsbedingungen, die die zuständigen Länderbehörden auf der Basis der Strahlenschutzverordnung und an Hand wissenschaftlicher Gutachten von Expertenorganisationen aufstellen.

Außerdem sind weitere einschlägige Länderbestimmungen, beispielsweise über den Gewässerschutz zu berücksichtigen.

3.2 Abgabe von Radionukliden in Abgasen

In der Vergangenheit sind die einschlägigen Bestimmungen der Strahlenschutzverordnung und der ICRP-Empfehlungen im Hinblick auf die Abgabe radioaktiver Abgase so interpretiert worden, als seien im allgemeinen entweder eine Strahlenbelastung von 500 mrem/Jahr für den einzelnen oder 150 mrem/Jahr für die Gesamtbevölkerung und z. B. rund 1500 mrem/Jahr in der Schilddrüse von Einzelpersonen (Kindern) oder 1/10 der höchsten zulässigen Konzentration der berufsbedingten Bestrahlung außerhalb von Kontrollbereichen zulässig und infolgedessen in der Genehmigung auch zuzugestehen. Nun darf nach einer Bestimmung der Strahlenschutzverordnung die Strahlenbelastung von Einzelpersonen allerdings den Wert von 150 mrem/Jahr nicht übersteigen; andernfalls müßte ein Überwachungsbereich eingerichtet werden.

Im allgemeinen wird ein Antragsteller in einer Betriebserlaubnis für ein Kernkraftwerk mittlere und maximale Freisetzungsraten für Radionuklide mit den Abgasen der Anlage über einen Schornstein von 60 - 150 m Höhe fordern. Bei der Beurteilung des Antrags wird die Verdünnung der Abgase durch meteorologische Prozesse in Betracht gezogen. Damit wird nachgewiesen, daß der Einfluß der abgegebenen radioaktiven Gase außerhalb der Umzäunung der Anlage keine Strahlenbelastung von mehr als 150 mrem/Jahr hervorruft. Wegen der unterschiedlichen Zusammensetzung und Emissionsrate werfen Aerosole größere Schwierigkeiten auf. In manchen Fällen wird der Antragsteller lediglich nachweisen, daß die Konzentration der abgegebenen radioaktiven Aerosole weit unterhalb eines Zehntels der höchsten zulässigen Konzentration für berufsbedingte Bestrahlung liegt. Das bedeutet, daß die einschlägigen Dosisgrenzen für die Öffentlichkeit in der Nähe der Anlage bei Einatmung der Aerosole nicht überschritten werden. In diesem Zusammenhang können aus praktischen Erwägungen in der Rechnung die höchsten zulässigen Konzentrationen für unbekannte Gemische verwendet werden. Die Ablagerung und Ansammlung von Aerosolaktivität in der Umgebung könnte grundsätzlich zu anderen Bestrahlungswegen führen, z. B. zur externen Bestrahlung oder zur Aufnahme mit der Nahrung. Diesem Gesichtspunkt wird durch eine umfassende Umgebungsüberwachung Rechnung getragen. In einigen Fällen ist auch die periodische radiochemische Analyse der Aerosole gefordert worden, um

z. B. das Nichtvorhandensein langlebiger Radionuklide nachzuweisen. Unter diesen radioaktiven Aerosolen kann Radiojod mit erfaßt sein. In den meisten Fällen wird jedoch die Strahlungseinwirkung auf dem Wege Gras-Kuh-Milch in Betracht zu ziehen sein, und es werden Rechnungen vorgelegt, um nachzuweisen, daß die Dosisgrenze von 1500 mrem/Jahr in der Schilddrüse von Kindern nicht überschritten wird. Außerdem ist die Überwachung der in der nächsten Umgebung erzeugten Milch sowieso Teil des Umweltüberwachungsprogramms.

Allerdings werden im allgemeinen die nach dieser Beschreibung errechneten "höchsten zulässigen" Emissionen von Radionukliden in Abgasen in den Betriebserlaubnissen für Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland nicht zugelassen. Außerdem haben die Genehmigungsbehörden in der Bundesrepublik Deutschland immer auf dem Einbau und der Verwendung der nach dem jeweiligen Stand der Technik besten vorhandenen Geräte zur Verringerung der Emission von Radionukliden bestanden, wie dies auch von der Kernenergieindustrie angeboten worden ist. Das Kernkraftwerk Gundremmingen (KRB) verfügt z. B. über den ersten Siedewasserreaktor, der mit leistungsfähigen Aktivkohle-Adsorptionsanlagen zur längeren Rückhaltung radioaktiver Gase ausgerüstet ist. Heute werden Kernkraftwerke mit verbesserten Einrichtungen zur Rückhaltung radioaktiver Gase (z. B. mit einer Verzögerungszeit von 40 Tagen für Xenon bei Siedewasserreaktoren) und mit verbesserten Lüftungssystemen ausgerüstet (z. B. Umluftbetrieb im geschlossenen Kreislauf innerhalb der Sicherheitshülle). Außerdem wird große Sorgfalt darauf verwandt, nicht nur Undichtigkeiten im Primärsystem weitgehend zu vermeiden, sondern auch größere Leckagen während des Betriebes zu erkennen und abzustellen. Dementsprechend sind die zu erwartenden Emissionen wesentlich geringer.

Aus diesem Grund werden zur Zeit schärfere Bestimmungen zur Genehmigung der Abgabe radioaktiver Abgase in der Bundesrepublik Deutschland diskutiert und bei den laufenden Genehmigungsverfahren auch bereits angewandt.

In einer ersten Empfehlung sollten von der international vorgeschlagenen genetisch wirksamen Dosis von 5 rem in 30 Jahren der Kernenergieindustrie insgesamt nicht mehr als 2 rem in 30 Jahren zugestanden werden. Für langfristige Planungen wurde außerdem vorgesehen, daß von diesem Wert 1 rem in 30 Jahren für Radionuklide gelten solle, die mit den Abgasen freigesetzt würden. Das entspricht einer mittleren Strahlenbelastung der Bevölkerung von 30 mrem/Jahr. Genau genommen sind diese

30 mrem/Jahr als genetisch wirksame oder, in der Praxis, mittlere Ganzkörperdosis einer Bevölkerung aufzufassen.

Unter Berücksichtigung der heute erreichbaren niedrigen Emissionsrate bei modernen Kernkraftwerken und um die Strahlenbelastung auf ein Mindestmaß zu beschränken, ist außerdem vorgeschlagen worden, das Risiko somatischer Auswirkungen auf Einzelpersonen in der Umgebung von Kernkraftwerken auf dieselbe Art und Weise zu verringern. Das böte nicht nur im Hinblick auf die Frage von Mehrfachbestrahlungen Vorteile. Außerdem wären die Konstruktionsverbesserungen, die erforderlich wären, um diese sehr niedrigen Freisetzungsraten von Radionukliden in Abgasen zu garantieren, auch bei Unfällen von Vorteil. Eine weitere Empfehlung sieht vor, daß eine Ganzkörperdosis von 30 mrem/Jahr in der Umgebung eines Kernkraftwerks, die durch Radionuklide in den Abgasen hervorgerufen wird, für Einzelpersonen nicht überschritten werden darf, selbst wenn am selben Standort oder in dessen Nähe weitere Kernkraftwerke in Betrieb gehen. Die Emission von Radionukliden in der Abluft, die lediglich zu einer Bestrahlung einzelner Körperorgane (z. B. der Schilddrüse) führen, muß entsprechend eingeschränkt werden, denn das Risiko somatischer Schäden sollte ohne Rücksicht auf die Art der Strahlenbelastung dieselbe niedrige Größenordnung aufweisen.

3.3 Abgabe von Radionukliden in Abwässern

Die Einleitung von Abwässern in Flüsse unterliegt in der Bundesrepublik Deutschland einer Sondergenehmigung durch die für den Gewässerschutz zuständigen Behörden. In dieser Erlaubnis wird eine maximal zulässige Aktivitätsfracht pro Jahr angegeben. Bisher war es Kernkraftwerken nicht gestattet, mehr als 5 - 20 Ci/Jahr an Spalt- und Korrosionsproduktgemischen (ausschließlich Tritium) abzuleiten. In jedem Fall wird die genaue Menge von der Genehmigungsbehörde unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse und der Wasserführung des aufnehmenden Flusses festgelegt. Als Faustregel wird dabei zugrundegelegt, daß die Gesamtradionuklidkonzentration im Fluß den Wert von 10 - 30 pCi/l nicht überschreiten soll (ausschließlich natürlicher Radioaktivität, Fallout und Tritium) und daß alle mit einer Konzentration von mehr als beispielsweise 5×10^{-4} µCi/ml anfallenden radioaktiven Abwässer vor der Freigabe zu dekontaminieren sind. Tritium wird getrennt behandelt; als Richtwert wird eine Gesamtkonzentration von höchstens 3000 pCi/l aus allen Quellen (aus-

schließlich Fallout) in einem Fluß vorgeschlagen. Üblicherweise werden Forschungsinstitute mit der Anfertigung einer radioökologischen Analyse des aufnehmenden Flußsystems beauftragt. Die Schätzung der zulässigen Aktivitätsbelastung eines aufnehmenden Flußsystems im Rahmen einer radioökologischen Analyse muß auf den für die Öffentlichkeit festgelegten Dosisgrenzen basieren, wobei die unterschiedlichen Radionuklide und Strahlenbelastungswege in Betracht zu ziehen sind. Nach den neuen staatlichen Empfehlungen, von der international empfohlenen genetisch wirksamen Dosis von 5 rem in 30 Jahren der Kernenergieindustrie insgesamt nicht mehr als 2 rem in 30 Jahren zuzugestehen, wovon 1 rem in 30 Jahren auf Radionuklide entfällt, die mit Abgasen abgegeben werden, kommt man zu 1 rem in 30 Jahren als Wert für die mit Abwässern freigesetzten Radionuklide. Es ist vorgeschlagen worden, für die langfristige Planung diesen Wert in 0,3 rem auf 30 Jahre für die drei Hauptbelastungswege Trinkwasser, Lebensmittel und von außen wirkende Strahlung aufzugliedern; das entspricht einer mittleren Strahlenbelastung von 10 mrem/Jahr für jeden dieser Belastungswege. Somit ergibt die radioökologische Analyse die Gesamtaktivitätsbelastung eines Flußsystems für jedes Radionuklid, die nicht überschritten werden darf, auch wenn eine zunehmende Anzahl von Kernkraftwerken ihre Abwässer in dieses Flußsystem abgibt.

4. Strahlenbelastung durch Radionuklide in Abwässern und Abgasen aus Kernkraftwerken

4.1 Abgabe von Radionukliden in Abwässern und Abgasen aus Kernkraftwerken mit wassergekühlten Reaktoren

Früher haben die Betreiber von Kernkraftwerken oft die höchste zulässige Abgabe von Radionukliden in den Abwässern und Abgasen ihrer Kernkraftwerke hauptsächlich deshalb gefordert, weil sie mögliche betriebliche Schwierigkeiten umgehen wollten. Die erwartete und tatsächliche Betriebserfahrung ist jedoch günstiger gewesen. Die Tabellen I, II und III fassen die beantragten, genehmigten und tatsächlichen Abgabewerte von Radionukliden in den Abwässern und Abgasen von Kernkraftwerken mit wassergekühlten Reaktoren zusammen. Daten kleinerer oder veralteter Anlagen sind nicht aufgenommen. Zum besseren Vergleich werden die Abgabewerte in Ci/Jahr angegeben, wogegen sie in der Genehmigung z. B. in Ci/s oder Ci/h aufgeführt sein können.

4.2 Strahlenbelastung durch Radionuklide in Abgasen aus Kernkraftwerken

Für die gegenwärtige Generation von Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland kann eine typische Abgabe radioaktiver Gase aus einem Siedewasserreaktor mit 30 000 Ci/Jahr, bei einem Druckwasserreaktor mit 6000 Ci/Jahr angesetzt werden; dabei ist der Abbau der kurzlebigen Radionuklide mit Hilfe von Aktivkohle-Adsorptionsbetten bereits berücksichtigt. In diesem Fall sind für die Strahlenbelastung aus der Wolke als wichtigste Radionuklide Xe 133 und Kr 85 in Betracht zu ziehen; Xe 133 tritt dabei am häufigsten auf.

Die auf die mittlere jährliche Abgabe von radioaktiven Gasen zurückzuführende Dosis läßt sich mit Hilfe des Modells von Bresser et al. [4] ermitteln: es beruht auf der mittleren Jahreskonzentration in Bodennähe in Hauptwindrichtung und der typischen Häufigkeitsverteilung der hauptsächlichen Wetterlagen in Deutschland. Die in Bodennähe berechneten Konzentrationen sind in der zweiten Spalte der Tabelle IV für die Emissionsrate von 1 Ci/s (= 30 MCi/Jahr) aus einem Kamin von 100 m in Abhängigkeit von der Entfernung aufgeführt. Die entsprechenden Jahresdosen aufgrund einer mittleren Emissionsrate von 1000 µCi/s (= 30 000 Ci/Jahr) Xe 133 und 20 µCi/s (= 600 Ci/Jahr) Kr 85, die in der dritten und vierten Spalte der Tabelle IV zusammengefaßt sind, sind für heutige deutsche Siedewasserreaktor-Kraftwerke typisch. Die Xe 133-Emission ist gemessen, die Kr 85-Emission anhand der Daten für das Abgassystem geschätzt worden. Ähnliche Rechnungen für die Abgabe radioaktiver Gase aus einem Druckwasserreaktor-Kraftwerk finden sich in Tabelle V. Dabei ist darauf hinzuweisen, daß die auf der örtlichen meteorologischen Verdünnung basierenden Modelle von bestimmten Annahmen besonderer Parameter abhängen und daß die berechneten Dosiswerte um einen Faktor 2 oder 3 schwanken können. Unter der Annahme einer Verdopplung der Emissionsrate für Blöcke von 800 - 1000 MWe ergibt sich der doppelte Wert der in Tabelle IV und V aufgeführten Jahresdosen.

Die Abgabe anderer Radionuklide, z. B. von Aerosolen, oder von Radiojod ist im Vergleich zu Xe 133 und Kr 85 niedrig. Bei Druckwasserreaktoren kann auch einiges H 3 in die Atmosphäre abgegeben werden. Diese beiden Aspekte werden in den Tabellen IV und V nicht behandelt, obwohl ein bestimmter (relativ niedriger) Beitrag dieser Radionuklide zur Strahlenbelastung berücksichtigt werden muß. Im praktischen Fall würde eine Umgebungsüberwachung dazu dienen, mögliche wesentliche Beiträge dieser Radionuklide zur Umgebungsbestrahlung aufzuzeigen.

4.3 Strahlenbelastung durch Radionuklide in Abwässern aus Kernkraftwerken

In der Bundesrepublik Deutschland werden die Flußsysteme des Rheins, der Donau, der Elbe und der Weser oder Ems alle Abwässer aufnehmen. Deshalb ist eine radioökologische Analyse dieser Flußsysteme in die Wege geleitet worden, um sich gegen eine mögliche Anhäufung von Radionukliden aus mehreren Quellen zu schützen. Bei diesen Studien werden die in den Abwässern enthaltenen Radionuklide identifiziert, und es werden die verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten des aufnehmenden Flußsystems untersucht, wie z. B. Benutzung als Trink- und Brauchwasser, für Fischereizwecke, zur Viehtränke, Bewässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen,und zusätzlich wird noch die externe Bestrahlung von Personen bei der Erholung oder bei der Arbeit ermittelt.

Bei der Studie über die Donau wurde die radioökologische Analyse in erster Linie auf die radioaktiven Abwässer abgestellt, die aus dem Siedewasser-Kernkraftwerk Gundremmingen abgegeben wurden [5]. Die gemessenen Radionuklidkonzentrationen aus gemischten monatlichen Proben des Abwassers und des Kühlwassers der Anlage und aus der Donau sind in Tabelle VI zusammengestellt und werden mit der natürlichen Aktivitätsbelastung der Donau in der Nähe von Gundremmingen in Tabelle VII verglichen. Die Konzentration der Radionuklide in biologischen Substanzen (Fisch, Fischnahrung, Plankton, Wasserpflanzen usw.) sowie in Sedimenten der Donau wurde für die einzelnen Radionuklide ebenfalls untersucht. Diese Studien haben z. B. gezeigt, daß eine angenommene Konzentration von 30 pCi/l in der Donau an Spalt- und Aktivierungsproduktgemischen aus dem Siedewasserreaktor Grundremmingen zu einer Strahlenbelastung von Einzelpersonen aufgrund aller denkbaren Expositionswege (Trinkwasser, Nahrungsmittel und Bestrahlung von außen) führen würde, die 30 mrem/Jahr nicht überschreitet.

Untersuchungen des Bundesgesundheitsamtes haben sich mit der Überwachung der mit Abwässern aus Kernkraftwerken abgegebenen Radionuklide in der Umgebung befaßt [6]. Tabelle VII bietet Angaben über die relative Konzentration und die relative Radiotoxizität auf der Basis der Aufnahme von Wasser mit den in den Abwässern von Siedewasserreaktor- und Druckwasserreaktor-Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland gemessenen Radionukliden. Diese Daten spiegeln die Betriebsbedingungen und die Art der Abwasserbehandlung der untersuchten Kernkraftwerke wider. Die Schwankung des Radionuklidgehalts in verschiedenen Proben wird im Vergleich auf

der Grundlage der relativen Konzentration und Radiotoxizität in Abb. 2 gezeigt.

5. Probleme der akkumulierten Strahlenbelastung durch Radionuklide in den Abwässern und Abgasen der zukünftigen Kernenergieindustrie

5.1 Allgemeines

Das schnelle Wachstum der Kernenergieindustrie wird zu einer Akkumulation der Strahlenbelastung durch Radionuklide aus den Abwässern und Abgasen von Kernkraftwerken führen, wenn z. B. mehr als ein Block pro Standort geplant ist oder mehrere Anlagen ihre Abwässer in dasselbe Flußsystem abgeben. Früher oder später ist mit einer Häufung von Anlagen in dicht besiedelten Räumen der Bundesrepublik Deutschland zu rechnen.

5.2 Strahlenbelastung durch Radionuklide in Abgasen der zukünftigen Kernenergieindustrie

Wegen des wirtschaftlichen Vorteils, den die Verwendung der besten verfügbaren Kühlkapazität bietet, werden Kernkraftwerke vorzugsweise an den größeren Flüssen gebaut werden. Es wird bereits heute sichtbar, daß z. B. im Rheintal in Zukunft Kernkraftwerke mit typischen Abständen von 20 km entlang des Flusses errichtet werden.

Das wirft die Frage auf, welchen Einfluß eine so dichte Kette von Kernkraftwerken auf die Strahlenbelastung der Öffentlichkeit hat. Da die Hauptwindrichtung im Rheintal vorwiegend eine Südnordrichtung ist, somit also etwa der Strömungsrichtung des Rheins entspricht, könnte es eine Überlagerung der Abgaswolken verschiedener Emissionsquellen geben. Allerdings ist dieser Effekt voraussichtlich sehr gering, wie sich aus den Werten in Tabelle IV und V ablesen läßt. Bei einer Extrapolation der Verdünnung der Jahresdosis bis zu 20 km Entfernung erhalten wir für eine Emission von 60 000 Ci/Jahr Xe 133 eine mittlere Jahresdosis von 0,05 mrem/Jahr in 20 km, was nur rund 5 % der"Dosis in unmittelbarer Nachbarschaft" von ca. 1 mrem/Jahr entspricht. Natürlich kann der 5 %-Wert ansteigen, wenn die angenommene Kapazität von 1000 MWe pro Standort auf größere Blöcke anwächst oder wenn mehr als ein 1000-MWe-Kraftwerk pro Standort errichtet wird.

Man kann daraus schließen, daß die durch die Emission radioaktiver Gase unter normalen Betriebsbedingungen hervorgerufene Strahlenbelastung verhältnismäßig gering ist, auch wenn mehrere Kernkraftwerke dicht beieinander errichtet werden. Die über eine Entfernung von 20 km gemittelte Jahresdosis liegt bei etwa 0,15 mrem/Jahr. Das ist für den Fall eines dichten Netzes von Kernkraftwerken wohl als repräsentativer Wert anzunehmen.

Über diese vereinfachte Betrachtung lokaler Verhältnisse hinaus kann man den Fall untersuchen, daß sich in den nächsten drei Jahrzehnten in der Bundesrepublik Deutschland eine Situation entwickelt, in der die Gesamtzahl der Kernkraftwerke als ziemlich gleichmäßig über Deutschland verteilt betrachtet werden kann. Die Berechnung der mittleren Strahlenbelastung der Öffentlichkeit unter Vernachlässigung der örtlichen meteorologischen Verdünnung könnte dann auf den Fall einer starken Inversion praktisch ohne jede atmosphärische Turbulenz und ohne jeden Austausch abgestellt werden, wobei alle radioaktiven Abgaben in einer großen Zelle akkumuliert und gespeichert werden, die aus der Fläche der Bundesrepublik Deutschland, multipliziert mit einer Höhe von 2 km über dem Boden, besteht. Nach dem von Schikarski u.a. entwickelten Modell [7] errechnet sich in diesem Fall die mittlere Jahresdosis für die Xe 133-Emission von 120 x 60 000 Ci/Jahr für Xe 133 zu 0,7 mrem/Jahr.

Allerdings muß auch der Beitrag von Kr 85 berücksichtigt werden. Während bei der Schätzung der Jahresdosen für ein einziges 1000-MWe-Kraftwerk bei örtlicher meteorologischer Verdünnung der Beitrag von Kr 85 im Vergleich zu Xe 133 kaum ins Gewicht fällt, ist beim homogenen Zellenmodell der Dosisbeitrag von Kr 85 beträchtlich. Die auf Kr 85 zurückgehende Jahresdosis ergibt für das Jahr 2000 den Wert 12 mrem/Jahr durch externe β-Strahlung.

Daraus läßt sich folgendes schließen:

- Kernkraftwerke, die im Mittel 60 000 Ci/Jahr Xe 133 + 1200 Ci/Jahr Kr 85 abgeben, werden zu einer Strahlenbelastung der Öffentlichkeit führen, die weit unter dem heute geforderten Maximum von 30 mrem/Jahr liegt.

- In der Berechnung der Umweltbelastung durch radioaktive Gase auf der Basis eines Modells mit örtlicher meteorologischer Ausbreitung können

die mittleren Jahresdosen zu niedrig angesetzt sein, wenn ein System aus mehreren dicht beieinander liegenden Kernkraftwerken betrachtet wird.

- Bei einem Modell mit örtlicher meteorologischer Verdünnung trägt Xe 133 am stärksten zur Jahresdosis bei, auch bei Anlagen, die mit einer Aktivkohle-Adsorptionsanlage ausgerüstet sind, in der die Abgase 40 Tage gespeichert werden.

- Bei einem Modell mit homogen verteilten radioaktiven Gasen in der unteren Troposphäre und mit einer großen Anzahl von Kernkraftwerken, die gleichmäßig über die Fläche der Bundesrepublik Deutschland verteilt sind, trägt Kr 85 am stärksten zur Jahresdosis (bezogen auf externe β-Strahlung) bei.

Bei den obigen Überlegungen sind nur Kernkraftwerke berücksichtigt worden. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, daß der weitaus größte Beitrag zur Umweltbelastung durch radioaktive Gase in Zukunft sehr wohl von den Emissionen der Wiederaufarbeitungsanlagen stammen könnte [7].

5.3 Strahlenbelastung durch Radionuklide in Abwässern der zukünftigen Kernenergieindustrie

Nach der Lage der industriellen Ballungsräume läßt sich absehen, daß 60 % der in der Bundesrepublik Deutschland zu erwartenden Kernkraftwerke entweder am Rhein oder an dessen Nebenflüssen errichtet werden. Im Mittel dürfte jede dieser Anlagen höchstens 5 Ci/Jahr Spalt- und Aktivierungsprodukte und etwa 100 Ci/Jahr Tritium mit ihren Abwässern in den betreffenden Fluß abgeben. Damit würde im Jahr 2000 die gesamte Aktivitätsbelastung des Rheins beim Verlassen des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland höchstens 350 Ci/Jahr an Spalt- und Aktivierungsprodukten und einige 10 000 Ci/Jahr an Tritium betragen. Es läßt sich leicht abschätzen, daß dies auf der Basis des jährlichen mittleren Niedrigwassers von 960 m^3/sec an der Wassermeßstelle Rees kurz vor der deutsch-holländischen Grenze einer Konzentration von höchstens 12 pCi/l an Spalt- und Aktivierungsprodukten und ca. 1000 pCi/l an Tritium im Fluß entspräche. Außerdem wäre im Zusammenhang mit der Schätzung der tatsächlichen Strahlenbelastung der Öffentlichkeit nicht das Niedrigwasser, sondern

die mittlere Wasserführung von 2000 m^3/s die richtige Basis, was einer Konzentration von etwa 5 pCi/l an Spalt- und Aktivierungsprodukten bzw. rund 500 pCi/l an Tritium entspräche.

Aus der Erfahrung läßt sich schätzen, daß eine mittlere Konzentration von rund 5 pCi/l gemischter Spalt- und Aktivierungsprodukte und rund 500 pCi/l Tritium im Rhein zu einer Strahlenbelastung des einzelnen von weit weniger als 10 mrem/Jahr auf jedem beliebigen Einwirkungsweg führt. Eine tatsächliche Berechnung der Strahlenbelastung hinge sehr stark von den im Flußsystem vorhandenen Radionukliden ab. Deshalb muß es Hauptzweck der radioökologischen Analyse bleiben, die in Flußsysteme abgegebenen Radionuklide zu identifizieren. Eine Messung der Bruttoaktivität der abgegebenen Abwässer reicht nicht aus; statt dessen muß die Emissionsrate der einzelnen Radionuklide bestimmt werden. Nur auf diese Weise wird es möglich sein, die radioökologische Analyse ständig auf dem neuesten Stand zu halten und zu beurteilen, so daß alle möglichen Wege der Strahlenbelastung genügend überprüft werden.

5.4 Schlußbemerkungen

Die oben genannte Schlußfolgerung gilt hauptsächlich für wassergekühlte Reaktoren. Unterschiede in der Abgabe von Radionukliden aus Reaktoren fortgeschrittener Bauart sind zu erwarten, aber grundsätzlich ist es bereits jetzt möglich, Kernreaktoren auf jeden gewünschten niedrigen Emissionsgrad hin zu konstruieren. Allerdings müssen die örtlichen ebenso wie die auf der ganzen Welt bestehenden Probleme der Abgabe von Kr 85 und H 3 in den Abwässern und der Abluft großer Wiederaufarbeitungsanlagen, die in der Bundesrepublik Deutschland erst nach 1980 in Betrieb gehen werden, mit Hilfe verbesserter Rückhaltetechniken gelöst werden, die sich bereits in der Untersuchung befinden. In der Bundesrepublik Deutschland ist es allgemein anerkanntes Ziel, daß die Strahlenbelastung der Öffentlichkeit aufgrund der zukünftigen Kernenergieindustrie insgesamt nur einen kleinen Bruchteil der natürlichen Strahlenbelastung betragen darf.

Literaturangaben

/1/ LINDACKERS, K.H. u.a., Kernenergie - Nutzen und Risiko (1970)

/2/ ICRP-Veröffentlichungen 2 (1959) und 9 (1966)

/3/ ERSTE STRAHLENSCHUTZVERORDNUNG, Bundesgesetzblatt I, 1654 (1965)

/4/ BRESSER, H. et al., "Site selection for nuclear power plants: Guides for estimation of consequences due to release of contaminated air and water during normal operation", IAEA-Symposium Containment and Siting of Nuclear Power Plants; Wien (1967)

/5/ RUF, M., "Über die Einleitungsbedingungen für radioaktive Abwässer aus Kernenergieanlagen und die radiologische Kapazität von Gewässern", Münchner Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flußbiologie 17 (1970) 133

/6/ AURAND, K. u.a., Zur Kontrolle radioaktiver Abwässer aus Kernkraftwerken, Bundesgesundheitsamt, WaBoLu - Bericht 3/70 (1970)

/7/ SCHIKARSKI, W. et al., "An approach to comparing air pollution from fossil-fuel and nuclear power plants", IAEA-Symposium Environmental Aspects of Nuclear Power Stations; New York (1970)

Tabelle I) Zusammenstellung der Abgabe von Radionukliden in Abluft und Abwässern von in Betrieb befindlichen amerikanischen Kernkraftwerken mit Siedewasserreaktoren (SWR) oder Druckwasserreaktoren (DWR)

Radionuklide:	Emission je Kernkraftwerk (Ci/a)	
	höchst zugelassener Wert[1)]	Betriebserfahrung
über den Abluftkamin:		
radioaktive Gase	SWR: 10 000 000-30 000 000 DWR: 5 000- 5 000 000	SWR: 200 000-1 000 000 DWR: 10- 1 000
Aerosole und Radiojod	SWR: 5-200 DWR: 0,1- 10	SWR: 0,05-0,5 DWR: 0,001-0,03
in den Fluß:		
Spalt- und Aktivierungsprodukte (ausschließlich H 3)		1 - 30
Tritium		SWR: 10 - 100 DWR: 500 - 5 000

[1)] Aufgrund der Genehmigungsbedingungen berechnet.

Tabelle II) Zusammenstellung der Abgabewerte von Radionukliden in Abgasen und Abwässern aus in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland mit Siedewasserreaktoren (SWR) oder Druckwasserreaktoren (DWR)

Radionuklide:	Emission je Kernkraftwerk (Ci/a)	
	höchst zugelassener Wert[1)]	Betriebserfahrung
über den Abluftkamin:		
radioaktive Gase	SWR: 2 000 000-3 000 000 DWR: 50 000- 100 000	SWR: 10 000-200 000 DWR: 5 000- 10 000
Aerosole und Radiojod	z. B. 500-3 000	0,03 - 0,9
nur Radiojod	z. B. 5 - 20	0,02 - 0,3
in den Fluß:		
Spalt- und Aktivierungsprodukte (ausschließlich H 3)	5 - 20[2)]	1 - 10
Tritium	z. B. 100 - 2 000	SWR: 20 - 30 DWR: 300 - 500

[1)] Aufgrund der Genehmigungsbedingungen berechnet.

[2)] In der Genehmigung zahlenmäßig als obere Grenze aufgeführt.

Tabelle III) Zur Zeit geforderte und erwartete Abgabewerte von Radionukliden in Abwässern und Abgasen aus geplanten Kernkraftwerken mit wassergekühlten Reaktoren in der Bundesrepublik Deutschland

Radionuklide:	Emission je Kernkraftwerk (Ci/a)	
	beantragt	erwartet
über den Abluftkamin:		
radioaktive Gase	100 000 - 200 000[1)]	SWR: 30 000 DWR: 6 000
Aerosole	30 - 100	10
Radiojod	0,5 - 3	0,5
in den Fluß:		
Spalt- und Aktivierungsprodukte (ausschließlich H 3)	10	5
Tritium	500 - 2 000	SWR: 40 DWR: 300 - 2 000

[1)] Bei ungünstigen örtlichen meteorologischen Verhältnissen, z. B. in Tälern, weniger.

Tabelle IV: Geschätzte Dosen aufgrund typischer Edelgasemission aus einem deutschen Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor (250 MW)

Entfernung vom Abluftkamin (Höhe 100 m) [m]	Mittlere Jahreskonzentration K in Bodennähe in Hauptwindrichtung, nach [4] [Ci m^{-3} / Ci s^{-1}]	Jahresdosis[1)] aufgrund der Emission von 1000 µCi/s Xe 133 (= 30 000 Ci/Jahr) [mrem/Jahr]	Jahresdosis[2)] aufgrund der Emission von 20 µCi/s Kr 85 (= 600 Ci/Jahr) [mrem/Jahr]
500	$2,5 \times 10^{-7}$	0,4	0,009
1000	$1,5 \times 10^{-7}$	0,2	0,005
5000	6×10^{-8}	0,09	0,002
10 000	3×10^{-8}	0,05	0,001

[1)] Externe Ganzkörperdosis.

[2)] Externe β-Dosis.

Tabelle V: Geschätzte Dosen aufgrund typischer Edelgasemission aus einem deutschen Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor (300 MW)

Entfernung vom Abluftkamin (Höhe: 100 m) [m]	Mittlere Jahreskonzentration K in Bodennähe in Hauptwindrichtung, nach [4] [Ci m^{-3} / Ci s^{-1}]	Jahresdosis[1)] aufgrund der Emission von 200 µCi/s Xe 133 (= 6000 Ci/Jahr) [mrem/Jahr]	Jahresdosis[2)] aufgrund der Emission von 20 µCi/s Kr 85 (= 600 Ci/Jahr) [mrem/Jahr]
500	$2,5 \times 10^{-7}$	0,09	0,009
1000	$1,5 \times 10^{-7}$	0,05	0,005
5000	6×10^{-8}	0,02	0,002
10 000	3×10^{-8}	0,01	0,001

[1)] Externe Ganzkörperdosis.

[2)] Externe β-Dosis.

Tabelle VI: Mit den Abwässern aus dem Siedewasserreaktor-Kernkraftwerk Gundremmingen in die Donau abgegebene Radionuklide und Gesamtaktivität (an der Einlaßstelle gemessen)

Radionuklid	abgegebene Ci		
	Jahr: 1967	1968	1969
Sr 90	0,09	0,02	0,09
Sr 89	1,30	0,70	1,60
J 131	0,70	0,50	0,70
Ba 140 und La 140	0,40	0,20	0,18
Cs 137	0,60	0,70	0,22
Co 58	0,30	0,20	0,18
Co 60	0,07	0,10	0,09
Tritium	26,0	21,4	17,8
Gesamtaktivität (ausschließlich H 3)	3,4	2,4	3,0

Tabelle VII: Aktivitätsbelastung der Donau bei Gundremmingen

Radionuklid	Aktivitätsbelastung (Ci)		
	Jahr: 1967	1968	1969
natürliche K 40-Aktivität	7,7	9,6	7,5
natürliche Ra 226-Aktivität	1,3	1,6	1,3
natürliche U 238-Aktivität	0,4	0,5	0,4
Fallout-Aktivität (ausschließlich H 3)	3,1	2,7	7,0
Spalt- und Aktivierungsprodukte aus Gundremmingen (ausschließlich H 3)	3,5	2,4	3,0
Tritium aus Fallout	4000	3200	4000
Tritium aus Gundremmingen	26	21	18

Tabelle VIII: Relative Konzentration und relative Radiotoxizität[1] von in den Abwässern von Siedewasserreaktor- und Druckwasserreaktor-Kernkraftwerken gemessenen Radionukliden

a) Druckwasserreaktor, 98 Proben mit einer mittleren Gesamtkonzentration von $1{,}4 \times 10^{-2}$ µCi/ml

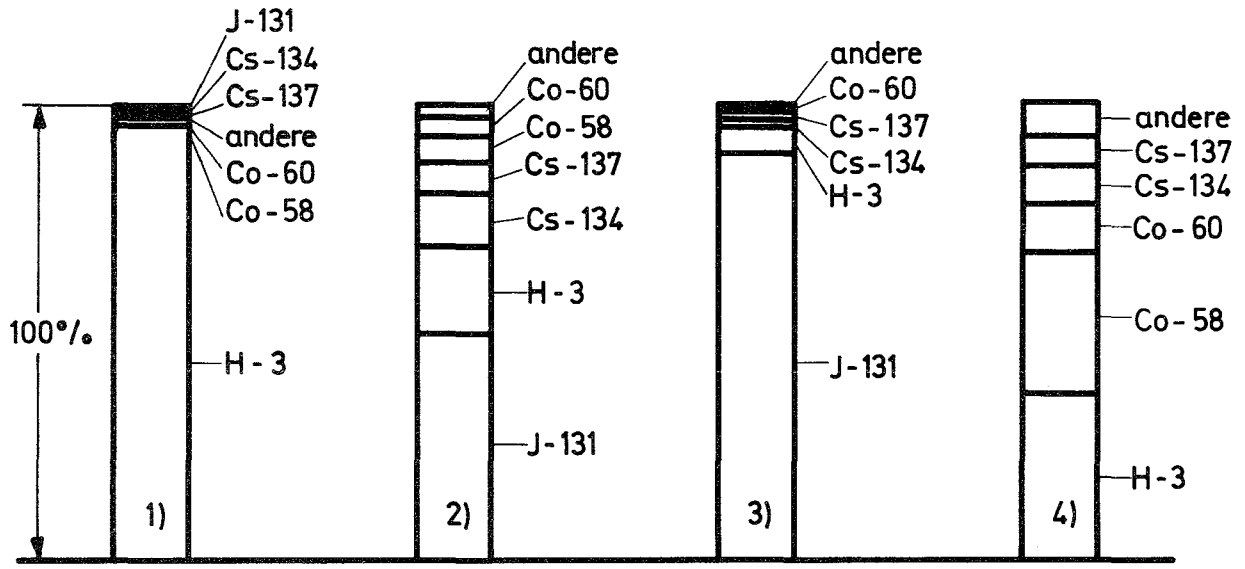
Radionuklid	mittlere % der Gesamtkonzentration	mittlere % der Gesamtradiotoxizität[1]
H 3	97,5	19,0
Co 58	1,1	5,6
Co 60	0,3	4,5
J 131	0,03	50,0
Cs 134	0,2	12,0
Cs 137	0,3	6,9
Sonstige	0,6	2,0

b) Siedewasserreaktor, 58 Proben mit einer mittleren Gesamtkonzentration von $3{,}5 \times 10^{-3}$ µCi/ml

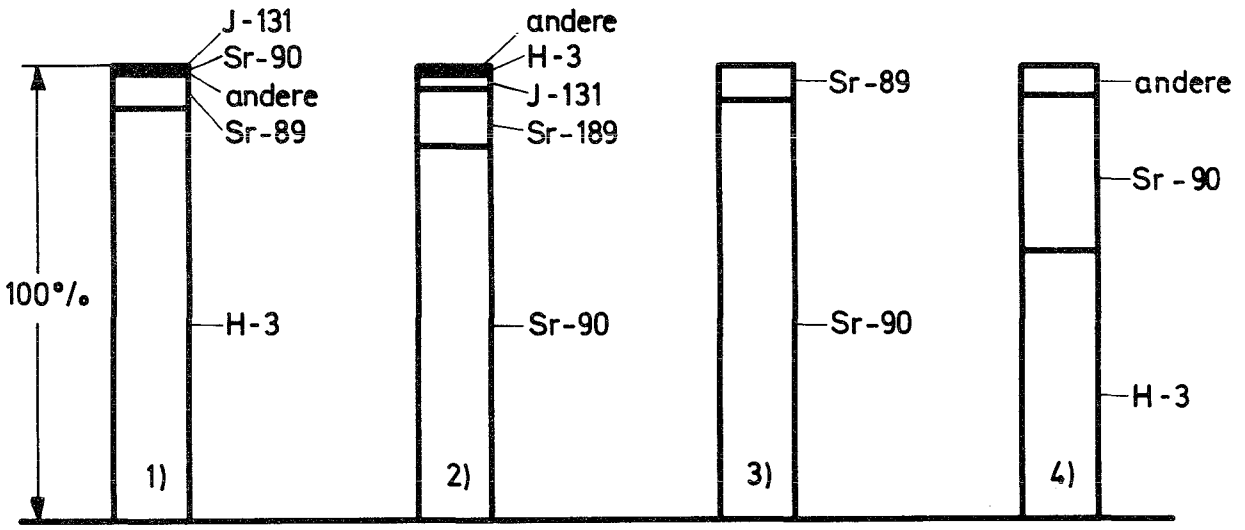
Radionuklid	mittlere % der Gesamtkonzentration	mittlere % der Gesamtradiotoxizität[1]
H 3	91,0	0,5
Sr 89	7,6	12,0
Sr. 90	0,5	83,0
J 131	0,3	4,3
Sonstige	0,6	0,2

[1] Berechnung der Radiotoxizität an Hand der Aufnahme des Radionuklidgemischs mit dem Trinkwasser.

Druckwasserreaktor



Siedewasserreaktor



1) °/o - Aktivität der Radionuklide in mittlerer Probe

2) °/o - Radiotoxizität von Radionukliden in mittlerer Probe

3) °/o - Radiotoxizität von Radionukliden in Probe mit höchster Radiotoxizität

4) °/o - Radiotoxizität von Radionukliden in Probe mit niedrigster Radiotoxizität

Abb. 2 Schwankung der relativen Konzentration und relativen Radiotoxizität von in Abwässern aus Siedewasserreaktor - und Druckwasserreaktor - Kernkraftwerken gemessenen Radionukliden