Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Radioaktivität und Waldschäden

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 64. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 24. März 1986
Veröffentlicht in: – Bundesanzeiger Nr. 73 vom 18. April 1986
– Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 6

Inhaltsverzeichnis

A Zusammenfassung 3

B Bericht der Arbeitsgruppe

1 Einleitung 4

2 Statistische Auswertung von Waldschadenserhebungen 5

3 Externe Strahlenexposition von Bäumen und Baumteilen 6

4 Interne Strahlenexposition von Bäumen und Baumteilen sowie Isotopieeffekte 8

5 Physikalische Effekte ionisierender Strahlung in der Atmosphäre 11

6 Chemische Effekte ionisierender Strahlung in der Atmosphäre 13

7 Kombinationseffekte von ionisierenden Strahlen und Umweltschadstoffen 14

8 Literatur 15

9 Tabellen 20

A Zusammenfassung

In Anbetracht der in jüngerer Zeit aufgestellten Behauptungen, daß zwischen Radioaktivität und Waldschäden kausale Zusammenhänge bestünden, hat der Bundesminister des Innern die Strahlenschutzkommission gebeten, diesen Sachverhalt zu überprüfen. Die Strahlenschutzkommission hat daraufhin eine Arbeitsgruppe einberufen und beauftragt, einen Bericht über die Fragen des vermuteten Zusammenhanges zwischen Ableitungen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen in die Atmosphäre und Waldschäden zu erstellen. Aufgrund der Ergebnisse des nachstehenden Berichtes hat die SSK einerseits die behaupteten Befunde geprüft und andererseits verschiedene Strahlenwirkungen hinsichtlich ihrer Relevanz untersucht. Diese Überprüfung führte zu folgenden Ergebnissen:

I. Es wurde festgestellt - auch unter Berücksichtigung der Prüfung durch Forstexperten -, daß die aus den beschriebenen Schadenskartierungen abgeleiteten Unterschiede der Waldschadensbilder zwischen dem Nahbereich und der weiteren Umgebung kerntechnischer Anlagen einer Überprüfung nicht standhalten.

II. Die Untersuchung der durch die Ableitungen radioaktiver Stoffe bedingten Expositionen in der Umgebung von Kernkraftwerken brachte folgende Ergebnisse:

   a) Die Beiträge zur Strahlenexposition von Bäumen in der Umgebung von Kernkraftwerken liegen unter Berücksichtigung aller Expositionspfade (Direktstrahlung, Bodenstrahlung, Strahlung aus der Abluftfahne und Zerfall der in Pflanzen aufgenommenen Radionuklide) in der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition. Der Dosisbeitrag der in Pflanzenmaterialien gelösten, künstlich radioaktiven Edelgase ist klein (etwa 1/1000) gegenüber dem externen Dosisbeitrag dieser Edelgase.

   b) Die Erhöhung der Bildungsrate an Ionenpaaren in der bodennahen Luft um Kernkraftwerke liegt im ungünstigsten Fall in der Größenordnung der natürlichen Rate; im Jahresmittel beträgt die künstliche Ionenproduktionsrate dort höchstens 10 % der natürlichen.

   c) Die Erhöhung der in der Umwelt vorliegenden Konzentrationen an Ozon und Stickoxid durch Ableitungen radioaktiver Edelgase von Kernkraftwerken liegt um mehrere Zehnerpotenzen unter den natürlichen Werten und ist damit vernachlässigbar klein.

   d) Nach heutigem Kenntnisstand ist nicht zu befürchten, daß die durch Kernkraftwerke in der Umwelt verursachte Strahlenexposition in Kombination mit dort aus anderen Quellen vorhandenen chemischen Schadstoffen zu einer relevanten Verstärkung der Wirkung beider Noxen führt.

   Die Strahlenschutzkommission stellt daher fest, daß Vermutungen über Zusammenhänge zwischen Ableitungen radioaktiver Stoffe aus bestehenden Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland und Waldschäden unbegründet sind, da sie weder durch Befunde belegt werden, noch aufgrund bekannter Wirkungsmechanismen zu befürchten sind.

III. Für die Umgebung der geplanten Wiederaufarbeitungsanlage ergeben sich unter Zugrundelegung der beantragten Abgabewerte folgende Feststellungen:

a) Der Dosisbeitrag der äußeren und inneren Strahlenexposition von Bäumen wird auch in diesem Fall im Schwankungsbereich der natürlichen Strahlenexposition liegen.

b) In unmittelbarer Umgebung der geplanten Wiederaufarbeitungsanlage wäre bei vollständiger Ableitung von Kr 85 im Bereich der Abluftfahne in einem Luftvolumen von einigen km^3 mit gegenüber der natürlichen Bildungsrate an Ionenpaaren deutlich erhöhten Werten zu rechnen.

c) Die Erhöhung der in der Umwelt vorliegenden Konzentrationen an Stickoxiden und Ozon durch Ableitungen radioaktiver Edelgase der geplanten Wiederaufarbeitungsanlage wird gegenüber den natürlichen Werten vernachlässigbar klein sein.

Für eine abschließende Bewertung der Konsequenzen der zu erwartenden lokalen Veränderung physikalischer und chemischer Eigenschaften der Atmosphäre liegen im Rahmen des allgemeinen Umweltschutzes noch keine belastbaren Erkenntnisse vor. Aus den bisherigen Erfahrungen mit Wiederaufarbeitungsanlagen oder aus Forschungsarbeiten sind jedoch keine Ergebnisse bekannt, die eine darauf zurückzuführende direkte oder indirekte Schädigung der Vegetation befürchten lassen.

IV. Auch an Orten mit stark erhöhter natürlicher Radioaktivität konnte keine Erhöhung der Ozonkonzentration nachgewiesen werden.

Zusammenfassend stellt die SSK daher fest, daß nach wissenschaftlichen Bewertungsmaßstäben ein ursächlicher Zusammenhang zwischen Waldschäden und der zivilisatorisch bedingten Radioaktivität der Umwelt in der Bundesrepublik Deutschland nicht hergestellt werden kann.

B Bericht der Arbeitsgruppe

1 Einleitung

In jüngster Zeit wurde die Behauptung aufgestellt, daß radioaktive Emissionen aus kerntechnischen Anlagen für die in der Bundesrepublik Deutschland und im Ausland zu beobachtenden neuartigen Waldschäden mitverantwortlich seien. Ausgelöst wurde diese Behauptung durch die von Reichelt (Re84a, Re84b, Re85a) unter anderem auch in der Umgebung von Kernkraftwerken und im Umfeld einer uranhaltigen Abraumhalde durchgeführten Waldschadenserhebungen sowie durch den sowohl von Metzner als auch von Reichelt und Kollert (Me85, Re85b) aufgrund dieser Erhebungen postulierten kausalen Zusammenhang zwischen Emissionen von Radionukliden und Waldschäden.

Zu diesem Thema existieren bereits verschiedene Stellungnahmen (Bu84, Hi85, Kö84, Kö85, Lo84, St85, Te83). In der hier vorliegenden Stellungnahme wird zunächst auf die von Reichelt erstellten Waldschadenskartierungen eingegangen, ehe theoretisch mögliche Wirkungsmechanismen ionisierender Strahlung erörtert werden, die zu hier relevanten Schädigungen in der Biosphäre führen könnten. Diese werden dann hinsichtlich ihrer möglichen Bedeutung bei der

Verursachung der neuartigen Waldschäden bewertet. Die Wirkungsmechanismen ionisierender Strahlung, die allein oder in Kombination mit in der Umwelt vorhandenen konventionellen Schadstoffen einen Beitrag zu Pflanzenschädigungen liefern könnten, lassen sich in fünf Gruppen einteilen:

- Externe Strahlenexposition von Bäumen und Baumteilen
- Interne Strahlenexposition von Bäumen und Baumteilen durch Aufnahme von Radionukliden sowie Isotopieeffekte
- Physikalische Effekte ionisierender Strahlung in der Atmosphäre
- Chemische Effekte ionisierender Strahlung in der Atmosphäre
- Kombinationseffekte ionisierender Strahlung mit Umweltschadstoffen.

2 Statistische Auswertungen von Waldschadens-Erhebungen

Zur Untersuchung ursächlicher Zusammenhänge zwischen Schadensverteilungsmuster, meteorologischen Bedingungen sowie Emissions- und Immissionscharakteristika dienen Kartierungen, die in der jüngsten Vergangenheit durch Reichelt für die Umgebung einiger Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland, der Schweiz und in Frankreich sowie für die Umgebung der Abraumhalde einer stillgelegten Kobaltmine in Wittichen veröffentlicht worden sind.

Dabei wurde zur Klassifizierung eines einzelnen Baumes eine in der Waldschadensinventur übliche Methode angewandt, während die Auswahl der angesprochenen Probebäume subjektiv erfolgte. Die Kartierungsergebnisse liegen in Form von "Isomalen"-Darstellungen vor; letztere sind Ausgangspunkt für die gegenwärtige Diskussion um mögliche Zusammenhänge zwischen Radioaktivität und Waldschäden. Die Einzelergebnisse sind nicht veröffentlicht und daher nicht nachprüfbar. Überprüfungen der veröffentlichten "Isomalen"-Kartierungen durch Forstbebörden kommen zu anderen Schadensverteilungsmustern (FVA85, Tr86).

Die Kartierungen Reichelts zeigen nach Ansicht des Autors signifikante Unterschiede zwischen der Schädigung im Nahbereich und derjenigen in der weiteren Umgebung des jeweiligen Kernkraftwerkstandorts bzw. der uranhaltigen Abraumhalde in Wittichen. Die Signifikanz dieser Unterschiede ist zum Teil mit Hilfe statistischer Methoden (t-Test, Korrelationsrechnungen) geprüft worden. Die Beurteilung der Reicheltschen Schadenserhebungen fällt zwar nicht in den Aufgabenbereich des Strahlenschutzes, doch läßt sich bei Anwendung der auch in der Strahlenforschung üblichen statistischen Auswertungen derartiger Daten und der Signifikanz daraus zu ziehender Schlußfolgerungen feststellen, daß

- die Stichproben von Reichelt subjektiv und vor Ort ausgewählt wurden, anstatt nach zufälligen oder systematischen, vorher vorzugebenden Kriterien und
- die Rohdaten für Einflußgrößen wie Alter der Bäume, Standortgegebenheiten etc. (z.B. durch multiple Regressionsanalyse) nicht korrigiert wurden.

Aus diesen Gründen lassen sich aus diesen Kartierungen keine wissenschaftlich belegten Befunde über den möglichen Einfluß von Radioaktivität auf Waldschäden ableiten.

Dennoch sollen hier mögliche Wirkungsmechanismen unter Berücksichtigung der um Kernkraftwerke und die geplante Wiederaufarbeitungsanlage zu erwartenden Strahlenpegel hinsichtlich der Größe ihres theoretisch möglichen Beitrages zu den neuartigen Waldschäden untersucht werden.

3 Externe Strahlenexposition von Bäumen und Baumteilen

Die Strahlenschutzkommission hat bereits 1976 in ihrer Stellungnahme zur "Vergleichbarkeit der natürlichen Strahlenexposition mit der Strahlenexposition durch kerntechnische Anlagen" (SSK76) festgestellt, daß biologische Wirkungen ionisierender Strahlung, unabhängig von der Art ihrer Herkunft, im wesentlichen durch die zeitliche und räumliche Verteilung der primären physikalischen Prozesse bestimmt werden. Diese räumliche Verteilung hängt - bis auf hier zu vernachlässigende Kernumwandlungseffekte - nur von der Energiedosis im betrachteten Objekt, der Strahlenart (α-, β-, γ-Strahlung) und ihrer Energie ab. Sie hängt nicht davon ab, ob ein Verteilungsmuster durch Einwirkung von Strahlung aus natürlich vorkommenden Stoffen oder aus künstlich erzeugten Radionukliden in Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen herrührt. Deshalb sollen in diesem und dem folgenden Abschnitt vor allem Abschätzungen der strahlenart-spezifischen Energiedosis in Bäumen und Baumteilen durchgeführt werden, wie sie in der Umgebung von Kernkraftwerken und der geplanten Wiederaufarbeitungsanlage durch natürliche und künstliche radioaktive Stoffe hervorgerufen werden können.

Eine externe Strahlenexposition von Bäumen oder Baumteilen kann durch luftgetragene Radionuklide erfolgen (Submersion), durch Direktstrahlung aus Anlagengebäuden und durch Radionuklide, die auf Pflanzenoberflächen oder dem Boden (Bodenstrahlung) abgelagert sind.

Bei radioaktiven Edelgasen ist nur die Submersion von Bedeutung. Mit für diese Abschätzung hinreichender Genauigkeit läßt sich die Energiedosisrate $\dot{D}_{ext}$ in Blättern oder Nadeln durch Submersion für homogene Konzentrationsverteilung in der Luft wie folgt berechnen (Ja86):

$$\dot{D}_{ext} \cong 0{,}45 \cdot c_L \cdot \sum_i g_i \cdot w_i \cdot E_i \quad \text{in nGy / h}$$

wobei

c_L = Aktivitätskonzentration in der umgebenden Luft in Bq/m^3

$g_i = g_L \times g_M$ = Korrekturfaktor für bei Zerfall i emittierte Strahlenart

mit Geometriefaktor g_L = 1 für α, β - Strahlung (4π - Geometrie)
0,5 für γ - Strahlung (2π - Geometrie; hier wurde auch für γ - Strahlung überschätzend 4π - Geometrie angenommen)

mit Abschirmfaktor g_M = 1 für γ - und hochenergetische β - Strahlung
0 für α - Str. u. sehr niederenergetische β - Strahlung (wegen der Absorption in Blattepidermis bzw. Wachsschicht von Nadeln)

w_i = Strahlungsemissionswahrscheinlichkeit des Zerfallsprozesses i

E_i = effektive Zerfallsenergie in MeV (wobei das Produkt $w_i \cdot E_i$ z.B. dem ICRP-Bericht 38 entnommen werden kann (IC83)).

Zur Abschätzung der während der Lebensdauer eines Blattes bzw. einer Nadel kumulierten Gesamtdosis kann eine mittlere Lebensdauer von einem halben Jahr bzw. von sieben Jahren angenommen werden:

$$D_{\text{Blätter, ext}} \cong 2 \cdot c_L \cdot \sum_i g_i \cdot w_i \cdot E_i \quad \text{in } \mu\text{Gy}$$

$$D_{\text{Nadeln, ext}} \cong 28 \cdot c_L \cdot \sum_i g_i \cdot w_i \cdot E_i \quad \text{in } \mu\text{Gy}$$

In Tabelle 1 sind Langzeitmittelwerte der so berechneten externen Strahlenexposition durch die Emission eines typischen Kernkraftwerkes (etwa vom Typ Biblis B oder Unterweser (BMI83)), in Tabelle 2 derartige Werte für die der geplanten Wiederaufarbeitungsanlage angegeben (Ja86). Zum Vergleich ist ferner in Tabelle 3 die mittlere natürliche Strahlenexposition von Blättern und Nadeln abgeschätzt, wie sie in Waldgebieten mit normalem natürlichem Strahlen- bzw. Aktivitätspegel zu erwarten ist (Ja86, UN77, UN82). Bei der vergleichenden Bewertung dieser Energiedosen ist zu berücksichtigen, daß α-Strahlung (Tabelle 3) eine höhere biologische Wirksamkeit als ß- und γ-Strahlung besitzt.

Im Vergleich zur natürlichen externen Strahlenexposition ergibt sich bei dem betrachteten Kernkraftwerk eine mehr als tausendfach geringere β- und γ-Submersionsdosis durch Edelgase (Ar, Kr, Xe) am ungünstigsten Aufpunkt.

Auch unter Berücksichtigung von kurzzeitig gegenüber der jährlichen Durchschnittsrate stark erhöhten Edelgasemissionen aus Kernkraftwerken bis zu 1/100 der genehmigten Jahreswerte pro Tag ist somit deren Dosisbeitrag vernachlässigbar gegenüber der natürlichen Strahlenexposition und selbst gegenüber ihrer Schwankungsbreite. In dem hier relevanten Bereich kleiner Dosen ist sowohl nach mikrodosimetrischen Betrachtungen als auch aufgrund strahlenbiologischer Ergebnisse nicht mit einer Verstärkung der biologischen Wirkung durch Dosisleistungseffekte zu rechnen.

Die durch Direktstrahlung aus einem Kernkraftwerk in unmittelbarer Umgebung (in ca. 100 m Entfernung) hervorgerufene Jahresortsdosis liegt bei Anlagen mit Druckwasserreaktor in der Größenordnung von einigen 10 µGy; bei Anlagen mit Siedewasserreaktor kann sie dort bis zu 1 mGy erreichen. Wegen der schnellen Abnahme der Dosisleistung mit dem Abstand von der Quelle werden jedoch bereits nach 500 Metern Werte von etwa 2 %, in 1 km etwa 0,2 % davon (bei 7 MeV γ-Strahlung) erreicht. Sie sind somit bereits in wenigen hundert Metern Abstand kleiner als die Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition. Deshalb kann ausgeschlossen werden, daß die externe Strahlenexposition durch Edelgase aus Kernkraftwerken und die Direktstrahlung dort einen Beitrag zu den neuartigen Waldschäden liefert.

Im Falle der hier betrachteten Wiederaufarbeitungsanlage ergäbe sich am ungünstigsten Aufpunkt (in ca. 0,5 km Abstand) eine mittlere β- und γ-Strahlensubmersionsdosis durch die emittierten radioaktiven Edelgase, die um etwa den Faktor 6 unter der mittleren externen β- und γ-Strahlendosis durch natürliche Quellen liegt. Betrachtet man zusätzlich die höhere biologische Wirksamkeit der internen α-Strahlenenergiedosis durch natürliche Radon-Zerfallsprodukte, insbesondere durch Po 210, in Blättern und Nadeln (siehe Tabelle 3 und Abschnitt 4), so ist selbst unter Berücksichtigung kurzzeitiger Schwankungen der Edelgasemissionen die biologische Wirkung dieser Emissionen klein im Vergleich zu der der natürlichen Strahlenexposition.

Diese Abschätzung der externen Strahlenexposition von Blättern und Nadeln durch die Emission von Edelgasen aus einer kerntechnischen Anlage gilt sinngemäß auch für die übrigen Teile eines Baumes.

Bei der externen Exposition der unterirdischen Pflanzenteile überwiegt die natürliche Strahlenexposition noch deutlicher als in den oben angegebenen Fällen für die Blätter und Nadeln. Das liegt einerseits daran, daß für das einen hohen Beitrag liefernde natürliche Kaliumisotop K 40 im Wurzelbereich eine 4π- statt einer 2π-Geometrie vorliegt, andererseits an der Tatsache, daß die spezifische Aktivität von natürlichem U 238 und Th 232 sowie die ihrer jeweiligen Folgeprodukte im Boden um einige Zehnerpotenzen höher ist als in den darüber befindlichen bodennahen Luftschichten. Aus Kernkraftwerken und der geplanten Wiederaufarbeitungsanlage emittierte Edelgase können deshalb die externe Strahlenexposition von unterirdischen Baumteilen nur um Beträge verändern, die um Größenordnungen unter der natürlichen Exposition liegen und daher zu vernachlässigen sind. Gleichfalls vernachlässigt werden kann die externe Strahlenbelastung aufgrund von Nukliden, die auf dem Boden deponiert werden. Im Falle der geplanten Wiederaufarbeitungsanlage ist selbst nach fünfzig Betriebsjahren erst mit einer diesbezüglichen Jahresdosis von etwa 10 µGy, bei Kernkraftwerken mit weniger als 1 µGy zu rechnen.

4 Interne Strahlenexposition von Bäumen und Baumteilen sowie Isotopieeffekte

In Analogie zur externen Exposition läßt sich die durch Zerfall von in Pflanzen aufgenommenen Radionukliden verursachte interne Strahlenexposition wie folgt berechnen (Ja86):

$$\dot{D}_{int} \approx 0{,}58 \cdot a_M \cdot \sum_i f_i \cdot w_i \cdot E_i \quad \text{in nGy / h}$$

wobei

a_M = spezifische Aktivität des Pflanzenmaterials (Frischmasse) in Bq/kg

f_i = absorbierter Anteil der bei einem Zerfall emittierten Energie

w_i, E_i haben die gleiche Bedeutung wie in Abschnitt 3.

Umgekehrt wie bei der externen Strahlenexposition kann nun für energiereiche Photonen $f \cong O$ angenommen werden, während für α-Teilchen und sehr niederenergetische β-Teilchen (z.B. von H 3 und C 14) $f \cong 1$ ist.

Bei nicht-gasförmigen radioaktiven Stoffen hängt die Aktivität im Pflanzenmaterial von der Aktivitätszufuhr aus dem Boden über die Wurzeln und von dem Ausmaß der direkten Aufnahme der auf Blättern bzw. Nadeln abgeschiedenen Aktivität ab. Ersteres spielt vor allem für das natürliche Kaliumisotop K 40 eine Rolle, letzteres gilt insbesondere für die langlebigen Rn 222-Zerfallsprodukte Pb 210 und Po 210.

In dem speziellen Fall radioaktiver Edelgase wird die spezifische Aktivität im Pflanzenmaterial durch die Edelgaskonzentration in Interzellularräumen und die Löslichkeit der Edelgase im Pflanzenmaterial limitiert. Die Strahlenexposition durch Radionuklide in den Interzellularräumen ist durch das hier verwendete Rechenverfahren bei der in Abschnitt 3 beschriebenen Berechnung der externen Strahlenexposition mitberücksichtigt. Im Lösungsgleichgewicht besteht

zwischen der Volumenkonzentration des Edelgases im Pflanzenmaterial c_M und derjenigen in der umgebenden Luft c_L die Beziehung

$c_M = L_M \cdot c_L$.

Der auf Luft bezogene, relative Löslichkeitskoeffizient L_M von Pflanzenmaterialien kann aus den bekannten Werten für Wasser abgeschätzt werden. Strukturell bedingte Variationen des Löslichkeitskoeffizienten haben nicht notwendigerweise einen wesentlichen Einfluß auf die Dosisverteilung von Ar, Kr und Xe, da infolge der Reichweite der von diesen Nukliden emittierten β-Teilchen in Blättern und Nadeln allein der mittlere Löslichkeitskoeffizient entscheidend ist. So ist zwar in organischen Stoffen (z.B. Lipiden, Fetten und Ölen) der Löslichkeitskoeffizient im allgemeinen größer als in Wasser (z.B. für Radon 10- bis 20-fach), der mittlere Gehalt derartiger Stoffe in Blättern und Nadeln ist jedoch relativ klein (1 bis 5 Massen-%). Daher ist höchstens eine Verdopplung des gewichtet gemittelten Löslichkeitskoeffizienten in Blättern und Nadeln gegenüber Wasser zu erwarten. Aus derartigen Abschätzungen erhaltene Löslichkeitskoeffizienten für diese Baumteile sind in Tabelle 4 angegeben (Ja86). Der Löslichkeitskoeffizient ist für das natürliche Radionuklid Radon am höchsten und nimmt bei den aus Kernkraftwerken emittierten Edelgasen von Xe über Kr zum Ar hin ab.

Unter Annahme einer mittleren Dichte der Blätter und Nadeln von 800 kg/m^3 berechnet sich für Edelgase dann eine interne Energiedosisleistung von

$$\dot{D}_{int} \cong 0{,}73 \cdot 10^{-3} L_M \cdot c_L \cdot \sum_i f_i \cdot w_i \cdot E_i \quad \text{in nGy / h .}$$

Bei der Berechnung der effektiven Energie ist auch der Beitrag der im Pflanzenmaterial gebildeten Zerfallsprodukte zu berücksichtigen, die im radioaktiven Gleichgewicht mit ihrem Mutternuklid stehen. Das Verhältnis der von Edelgasen verursachten externen zur internen (durch Lösung von Edelgasen verursachten) Dosis läßt sich mittels der oben angegebenen Gleichungen und unter Berücksichtigung des Dichteverhältnisses von Pflanzenmaterial (ρ_M) zu Luft (ρ_L) von 800/1,3 ≅ 600 wie folgt abschätzen:

$$\frac{D_{ext}}{D_{int}} \cong \frac{g}{f} \cdot \frac{1}{L_M} \cdot \frac{\rho_M}{\rho_L} \cong 600 \cdot \frac{g}{f} \cdot \frac{1}{L_M} .$$

Bei interner α-Strahlung ist f ≅ 1; für die β-Strahler Ar, Kr und Xe ist der kombinierte Geometrie- und Abschirmfaktor g mit Sicherheit größer als 0,01; ferner ist der Löslichkeitskoeffizient L_M dieser Edelgase kleiner als 0,5. Somit ergibt sich für das Verhältnis der β-Strahlendosis dieser Edelgase

$$\frac{D_{ext}(\beta)}{D_{int}(\beta)} > 10.$$

Genauere Rechnungen unter Berücksichtigung auch der γ-Strahlung zeigen, daß die externe Strahlenexposition durch die β-strahlenden Edelgase mindestens um etwa einen Faktor 100 höher ist als der Dosisbeitrag durch die in Blättern oder Nadeln gelöste Edelgasaktivität. Dies geht auch aus den in Tabelle 1 und 2 angegebenen Werten für die internen Dosisraten an den ungünstigsten Aufpunkten um die beiden betrachteten kerntechnischen Anlagen hervor.

Die interne Strahlenexposition von Bäumen durch die mit der Wurzel aufgenommenen nichtgasförmigen Radionuklide (z.B. Cs, Ru, Sr, Pu, U) läßt sich über Transferfaktoren Boden-Pflanze abschätzen (Gl84). Bei Anwendung der in der "Allgemeinen Berechnungsgrundlage" (ABG79) angegebenen Transferfaktoren, bei einer 50jährigen Anreicherungszeit in Bäumen und bei den an den ungünstigsten Einwirkungsstellen um kerntechnische Anlagen zu erwartenden Nuklidkonzentrationen im Boden ergeben sich interne Strahlenexpositionen in Bäumen, die - je nach Nuklid - höchstens einige Zehntel µGy pro Jahr betragen (Gl84). Neben einem Vergleich dieses Wertes mit der gesamten natürlichen Strahlenexposition von Pflanzen in der Größenordnung von etwa tausend µGy pro Jahr bietet sich ein Vergleich mit der Strahlenexposition von Bäumen durch die natürlichen Radionuklide C 14 und K 40 an.

Durch die kontinuierliche Erzeugung von C 14 aufgrund von Wechselwirkungen kosmischer Strahlung in der Atmosphäre (etwa 1 PBq* pro Jahr) hat sich im Laufe der Zeit eine mittlere natürliche spezifische Aktivität des C 14 von etwa 0,2 Bq/g Kohlenstoff in der Biosphäre eingestellt; beim biochemischen Einbau in Moleküle wird das schwerere C 14-Isotop um einige Prozent gegenüber dem leichteren C 12-Isotop diskriminiert. Aus diesem Einbau resultiert beim Menschen eine mittlere Jahresdosis von etwa 5 bis 24 µGy (UN82), bei Baumbestandteilen mit einem höheren relativen Kohlenstoffanteil ist mit Werten im oberen Teil dieses Bereichs zu rechnen. Schon dieser kleine Anteil der natürlichen internen Strahlendosis und ihre Schwankungsbreite sind also groß gegenüber der durch Wurzelaufnahme von künstlich erzeugten Radionukliden in Bäumen zu erwartenden Dosis.

Dennoch ist auch dieser Anteil von natürlichem C 14 kleiner als der Beitrag, den die ubiquitäre Existenz von primordialem K 40 liefert. Der natürliche Kaliumgehalt in Pflanzen liegt in der Größenordnung von einigen mg/g Frischgewicht (Gl84) wobei der natürliche Anteil des β-Strahlers K 40 von 0,012 % zu einer spezifischen ß-Strahlenaktivität in Pflanzen von etwa 0,05 bis 0,3 Bq/g Frischgewicht führt. Bei einer mittleren ß-Strahlenenergie von etwa 0,6 MeV wird ein Anteil von etwa 10 % der emittierten Elektronenenergie lokal in Blättern absorbiert, was zu einer mittleren Jahresdosis in diesen Baumbestandteilen von einigen zehn µGy führt. Bei Bäumen ist die Strahlenexposition wegen des geringeren Kaliumgehalts im Holz etwas niedriger als der in Tabelle 3 angegebene Wert für Blätter und Nadeln .

Bei der Abschätzung der natürlichen bzw. anthropogenen internen Strahlenexposition von Bäumen und Baumteilen soll schließlich auch das Wasserstoffisotop H 3 (Tritium) betrachtet werden. Das globale Tritiuminventar wird zu 1,3 EBq+ abgeschätzt (UN82), wobei 99 % in Form von HTO am Wasserkreislauf teilnehmen. Tritium ist daher auch in biologischen Substanzen zu finden, wo es zu Jahresdosen in der Größenordnung von 0,01 µGy führt (UN82). In der Umgebung von Kernkraftwerken ist mit Jahresstrahlenexpositionen von Pflanzen durch Tritium in der Größenordnung von maximal einigen Zehnteln µGy, um die betrachtete Wiederaufarbeitungsanlage mit etwa 10 bis 20 µGy zu rechnen (Ja86, Kö85). Aus dem langjährigen Einsatz von Tritium und C 14 zur Markierung von Stoffen in der wissenschaftlichen Forschung liegen über ihre biologischen Wirkungen umfangreiche Ergebnisse vor. Dabei haben sich bei Tritium selbst spezifische Aktivitäten, die tausendfach über den um eine Wiederaufarbeitungsanlage zu erwartenden Werten lagen, für Bäume als schadlos erwiesen (IA81).

---

* PBq = 10^{15} Bq

+ 1 EBq = 10^{18} Bq

In Tabelle 5 sind Abschätzungen über die Beiträge zur Strahlenexposition anhand der mittleren Energiedosis in Blättern bzw. Nadeln aufgrund interner und externer Exposition durch natürliche Bestrahlung einerseits, sowie durch Submersion mit aus kerntechnischen Anlagen emittierten Radionukliden andererseits, einander gegenübergestellt. Daraus ist ersichtlich, daß selbst an der Stelle in der Umgebung einer kerntechnischen Anlage, an der die höchste Strahlenexposition zu erwarten ist, die Energiedosis durch Submersion in Edelgasen von Kernkraftwerken um mehr als drei Größenordnungen, die durch eine Wiederaufarbeitungsanlage noch um etwa den Faktor 8 geringer ist als die mittlere natürliche Energiedosis. Damit liegt unter Berücksichtigung der erhöhten biologischen Wirksamkeit von α-Strahlung die Einwirkung radioaktiver Edelgase um kerntechnische Einrichtungen selbst am ungünstigsten Aufpunkt im jährlichen Mittel weit unter der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition.

In Zellen aufgenommene Radionuklide können biologische Effekte durch die beim radioaktiven Zerfall ausgesandte ionisierende Strahlung und durch die beim Zerfall stattfindende Änderung der chemischen Natur des Nuklids (Transmutation) hervorrufen. Die biologische Wirksamkeit der Umwandlung in ein anderes Element wurde u.a. auch für H 3 und C 14 untersucht und gegenüber der Strahlenwirkung als vernachlässigbar befunden (SSK76). Chemische Isotopieeffekte z.B. von stabilem schwerem Wasserstoff H 2 (D), von 0 17, 0 18, etc., sind eingehend untersucht worden (z.B. Hü70, IA81, Si66). Dabei deuten die Experimente z.B. für den Fall von D_2O an, daß bei Konzentrationen unter 1 % keine Wirkungen mehr nachgewiesen werden (IA81); diese oder höhere Konzentrationen können jedoch in der Umgebung der hier zur Diskussion stehenden kerntechnischen Anlagen nicht auftreten.

5 Physikalische Effekte ionisierender Strahlung in der Atmosphäre

In der Luft finden infolge der kosmischen und terrestrischen Strahlung sowie aufgrund ihrer natürlichen Radioaktivität (überwiegend Rn 222 und Folgeprodukte) ständig Ionisierungsvorgänge statt. Diese tragen zur natürlichen elektrischen Leitfähigkeit der Atmosphäre bei. Der Absolutwert und die Variationsbreite der natürlichen Ionisationsrate ist durch umfangreiche Meßreihen dokumentiert. So werden z.B. nach einer Zusammenfassung von Loosli (Lo84) in der bodennahen Luft über dem Kontinent ca. 2 Ionenpaare pro Sekunde und cm^3 Luft durch die kosmische Strahlung, 2 bis 20 Ionenpaare durch die terrestrische Strahlung und 0,5 bis 10 Ionenpaare durch Radon und seine Folgeprodukte erzeugt. Die bekannten Änderungen des Ionisationsgrades der Luft mit der Höhe sowie Unterschiede zwischen kontinentaler und maritimer Atmosphäre bewegen sich alle im Schwankungsbereich von 1 bis 30 Ionenpaaren pro cm^3 Luft und Sekunde. Wegen der großen Rekombinationsfähigkeit der gebildeten Ionenpaare ist deren mittlere atmosphärische Lebensdauer auf wenige Minuten beschränkt und die mittlere Ionendichte deshalb typisch einige hundert Ionen/cm^3. Allgemein gilt, daß die Lebensdauer der Ionen mit zunehmender Ionendichte abnimmt. Dies bedeutet, daß die Wirkung nur kurzzeitiger Erhöhungen der Pegel ionisierender Strahlung zeitlich gleichfalls sehr begrenzt ist. Infolge der kurzen Lebensdauer sind auch bei kontinuierlicher Bestrahlung einer Anreicherung der Ionen enge Grenzen gesetzt.

Für den Fall von Genehmigungswerten (nicht von realen Emissionen wie in Tabelle 1) eines Kernkraftwerkes und von Antragswerten der geplanten Wiederaufarbeitungsanlage (nämlich für Jahresaktivitätsableitungen von 3,7 bzw. 160 PBq) ergeben von König (Kö85) für einen Kurzzeitausbreitungsfaktor $\chi = 10^{-5}$ s/m^3 durchgeführte Rechnungen im Nahbereich dieser Anlagen (bis zu 1 km) nahe dem Erdboden im Fall des Kernkraftwerkes eine Obergrenze der

Ionenbildung, die mit 35 Ionen pro cm^3 und Sekunde im oberen Bereich der natürlichen Schwankungsbreite liegt. In Höhe der Baumwipfel ist kurzzeitig mit bis zu 4-fach höheren Werten zu rechnen. In der Realität liegen die Radioaktivitätsableitungen deutscher Kernkraftwerke und damit die Werte der Ionenbildung am maximalen Aufpunkt noch um etwa einen Faktor 10 bis 100 unter dem für das Kernkraftwerk angenommenen Antragswert.

Die Größenordnung der physikalischen Effekte ionisierender Strahlung in der Atmosphäre, die durch eine anthropogen erzeugte Erhöhung der natürlichen Strahlung hervorgerufen werden, kann z.B. durch Vergleich der durch sie hervorgerufenen Ionenproduktionsraten in der Luft mit der natürlichen Ionenproduktion bewertet werden. In Tabelle 6 ist ein solcher Vergleich durchgeführt. Daraus läßt sich erkennen, daß die Anzahl der in der Umgebung eines Kernkraftwerks in Bodennähe gebildeten Ionenpaare im ungünstigsten Fall in der Größenordnung der Anzahl liegt, die durch natürliche Quellen gebildet wird. Im Jahresmittel beträgt die künstliche Ionenproduktionsrate um Kernkraftwerke selbst bei Ausschöpfung der Antragswerte höchstens zehn Prozent der natürlichen.

Im Fall der Antragswerte der geplanten Wiederaufarbeitungsanlage würden die entsprechenden Kurzzeitwerte in der bodennahen Luft dagegen bei ca. 3000 Ionen pro cm^3 und Sekunde und damit im Bereich natürlich auftretender Spitzenwerte liegen. Im Bereich der Abluftfahne wäre im Luftvolumen einiger km^3 mit wesentlich höheren Werten zu rechnen. Eine abschließende Bewertung der Konsequenzen dieser starken lokalen Erhöhung der Luftionisation ist gegenwärtig nicht möglich. Es sind jedoch keine Befunde um Wiederaufarbeitungsanlagen oder Ergebnisse aus Forschungsarbeiten bekannt, die eine negative Auswirkung dieser erhöhten Ionisationsraten auf die Vegetation befürchten lassen.

Es ist wegen der räumlich beschränkten Veränderung der Ionendichte jedoch äußerst unwahrscheinlich, daß die von Israel (Is61) berichtete Abnahme des atmosphärisch-elektrischen Potentialgefälles zwischen 1952 und 1958 in Eskdalemuir durch die Kr 85-Ableitungen der etwa 100 km entfernten Wiederaufarbeitungsanlage in Windscale verursacht wurde. Im fraglichen Zeitraum lagen nämlich die Kr 85-Ableitungen dieser Anlage unterhalb von 3 PBq pro Jahr, was aufgrund der obigen Abschätzung zu keiner meßbaren Erhöhung der Ionisationsrate selbst in größerer Nähe zu der Anlage geführt haben kann.

Aufgrund der z.Zt. absehbaren globalen atmosphärischen Kr 85-Pegel können die von Boeck (Bo76) geäußerten Bedenken hinsichtlich möglicher globaler Klimaveränderungen durch die Kr 85-Ableitungen von Wiederaufarbeitungsanlagen gegenwärtig nicht geteilt werden; zwischenzeitlich hat Boeck selbst seine diesbezügliche frühere Meinung revidiert (Bo84).

6 Chemische Effekte ionisierender Strahlung in der Atmosphäre

In der Atmosphäre werden durch die Wirkung des ultravioletten Lichtes ständig Ozon, Stickoxide und andere Photooxidantien gebildet. Diese Photooxidantien können bei hinreichend hohen Konzentrationen zu Pflanzenschäden führen. Zu Zeiten hoher UV-Strahlung und während extremer Wetterlagen sind in Ballungsgebieten solche schädlichen Konzentrationen von Photooxidantien beobachtet worden.

Auch durch den Zerfall von in der Luft enthaltenen Radionukliden werden Photooxidantien gebildet. Pro Energieeintrag von 100 eV werden bis zu 10 Moleküle Ozon bzw. 6 bis 7 Moleküle NO_2 gebildet.

Laboruntersuchungen von Colin (Co81) zeigen, daß bei einer Dosisleistung von 7,5 Gy/h (verursacht durch dem Luftgemisch beigefügtes Kr 85) im Reaktionsgefäß nur Ozon- und NO_2-Konzentrationen von weniger als 1 ppm erreicht werden. Für den in der Natur nicht vorkommenden Fall trockener Luft sind diese Ergebnisse durch Modellrechnungen quantitativ erklärbar; für den realistischen Fall feuchter Luft versagt das Modell von Colin. Experimentelle Ergebnisse zeigen, daß bei feuchter Atmosphäre die Bildungsrate von Ozon um etwa einen Faktor 2 geringer ist als bei trockener Luft.

Laborbefunde über die Bildung von Schwefelsäure unter dem Einfluß ionisierender Strahlung liegen in großer Zahl vor. Ihnen ist gemeinsam, daß sie alle mit relativ hohen Dosen bzw. Dosisleistungen durchgeführt wurden. Dies trifft z.B. auch auf die Ergebnisse von Raes et al. und Vohra (Ra85a, Ra85b, Vo75, Vo84) zu. Eine Übertragung der Laborergebnisse auf reale Umweltbedingungen ist nicht nur wegen der unterschiedlichen Dosen bzw. Dosisleistungen schwierig, sondern auch deshalb, weil die im Labor möglichen Untersuchungsbedingungen nicht die Vielfalt der chemischen Substanzen der Luft berücksichtigen können, und außerdem reaktionsfördernde Oberflächen die Interpretation der Meßergebnisse erschweren können.

Diese Einschränkung gilt auch für theoretische Überlegungen von König (Kö84, Kö85), die für eine Vielzahl denkbarer Fälle radioaktiver Ableitungen von Kernkraftwerken und Wiederaufarbeitungsanlagen vorliegen. Die Rechnungen (Tabelle 7) zeigen allerdings, daß selbst unter pessimistischen Annahmen über die atmosphärische Ausbreitung im Nahbereich dieser Anlagen weder Ozon- noch NO_2-Konzentrationswerte erreicht werden, die mehr als 0,001 % der in der Natur beobachteten Konzentrationen dieser Stoffe betragen. Dabei wurde die strahlenchemische Erzeugung dieser Gase im Kamin und auf dem Transportweg zu den betrachteten bodennahen Aufpunkten in der Umwelt sowie ihre Verdünnung aufgrund turbulenter Diffusion berücksichtigt (Kö85). Es ist nicht zu erwarten, daß bei dieser Abschätzung nicht berücksichtigte chemische Substanzen in Folge der Einwirkung der ionisierenden Strahlung die bekannten Bildungsraten von Ozon und NO_2 um so viele Größenordnungen erhöhen, daß dies zu einer meßbaren Abweichung von den natürlichen Pegeln dieser Stoffe führen könnte.

Eine Überprüfung dieser Schlußweise ist z.B. anhand von Daten über die Radonaktivität und Ozonkonzentration am gleichen Ort und zur gleichen Zeit möglich, wie sie für den Bereich der ehemaligen Kobaltmine in Wittichen vorliegen (We86). Aus diesen Datensätzen geht hervor, daß selbst bis zu einer atmosphärischen Radonkonzentration von 72 Bq/m^3 keine Korrelation zwischen der Radioaktivität und der Ozonkonzentration gefunden wurde. Zum anderen stimmen die Ozonkonzentrationen in Wittichen mit denen auf dem Schauinsland größenordnungsmäßig überein, während die auf dem Schauinsland beobachteten Radonaktivitäten z.T. um mehr als 2 Größenordnungen unter denen von Wittichen liegen. Da für die Bildung von Ozon durch ionisierende Strahlung in erster Näherung die in der Luft insgesamt vorliegende Energiedosis maßgeblich ist, läßt sich aus dem negativen Ergebnis bei Wittichen ableiten, daß für eine Kr 85-Aktivitätskonzentration der Luft von weniger als 6 kBq/m^3 unter vergleichbaren Bedingungen keine meßbare Erhöhung der Ozonkonzentration der Luft auftritt. Dies gilt entsprechend für Xe 133-Aktivitätskonzentrationen von weniger als 13 kBq/m^3. Derart hohe Aktivitätskonzentrationen wurden aber bisher in der Umwelt in Bodennähe nicht beobachtet.

Zusammenfassend läßt sich also feststellen, daß ionisierende Strahlen prinzipiell schädliche chemische Produkte in der Atmosphäre erzeugen und die Aerosolpartikelzahl in der Atmosphäre erhöhen können. Dieser Effekt ist jedoch nur etwa proportional zu der Erhöhung der natürlichen Strahlenexposition durch die anthropogen erzeugte Strahlung. Das Ausmaß der durch ionisierende Strahlung von kerntechnischen Anlagen ausgelösten strahlenchemischen

Effekte in der Atmosphäre bzw. mit ihren Inhaltsstoffen läßt sich deshalb - ähnlich wie bei den physikalischen Effekten - durch einen quantitativen Vergleich mit den durch natürliche Vorgänge hervorgerufenen Effekten bewerten. Effekte werden z.B. durch strahlenchemische Reaktionen erwartet, die zur Ozon- und Stickoxidbildung in der Atmosphäre führen. Abschätzungen der Ozon- und Stickoxid-Produktionsraten aufgrund von Edelgasableitungen (z.B. Kr 85) führen jedoch zu Werten an der ungünstigsten Einwirkungsstelle, die um mehrere Größenordnungen kleiner sind als die zur Zeit in der Natur vorliegenden Konzentrationen (Tabelle 7, Kö85).

7 Kombinationseffekte von ionisierenden Strahlen und Umweltschadstoffen

Zu Fragen des Synergismus von ionisierender Strahlung und Chemikalien im Hinblick auf den Strahlenschutz des Menschen hat die Strahlenschutzkommission bereits Stellung genommen (SSK77). Sie ist dabei sinngemäß zu dem Schluß gekommen, daß jede experimentelle oder empirische Abschätzung des Gefährdungspotentials von Umweltschadstoffen wegen der Existenz der natürlichen Strahlenexposition notwendigerweise immer auch eventuell vorhandene Kombinationseffekte miterfaßt. Dies gilt analog auch für die Wirkung ionisierender Strahlung auf die Biosphäre bei Werten der anthropogenen Strahlenexposition, die in der Größenordnung der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition liegen. Bislang sind keine abgesicherten Ergebnisse bekannt, daß in Gegenden erhöhter natürlicher Radioaktivität erhöhte Schäden in der Vegetation vorliegen.

Befunde von Freiluftexperimenten, bei denen in Waldbeständen vor etwa 25 Jahren über längere Zeit hinweg durch künstliche Bestrahlung hohe Dosisraten erzeugt worden sind (z.B. Sp62, Sp71, Wo67), zeigen, daß erst bei chronischen Dosisraten von etwa 10 mGy pro Tag strahlenbedingte Effekte auf Bäume auftreten. Im Zusammenhang dieser Stellungnahme sind jedoch Effekte von mittleren Dosisraten von nur einigen µGy pro Tag, d.h. einer mehr als tausendfach geringeren Dosisrate, zu betrachten. Trotz der seit diesen Experimenten gestiegenen Luftverschmutzung ist nach heutigem Kenntnisstand deshalb nicht zu erwarten, daß die durch Kernkraftwerke in der Umwelt verursachte zusätzliche Strahlenexposition in Kombination mit dort bereits vorhandenen chemischen Schadstoffen zu einer meßbaren Verstärkung der Wirkungen beider Noxen führt. Für die hier zu betrachtenden chemischen Schadstoffe sind nämlich bisher keine Kombinationseffekte mit ionisierenden Strahlen beobachtet worden, die in dem hier vorliegenden Dosis- und Konzentrationsbereich eine Verstärkung der Wirkungen hervorrufen (UN82, St84).

8 Literatur

ABG79 Allgemeine Berechnungsgrundlage für die Bestimmung der Strahlenexposition bei radioaktiven Ableitungen mit der Abluft oder in Oberflächengewässer (Richtlinie zu § 45 StrlSchV) vom 15.8.1979 (GMB1. 1979, S. 371), (siehe auch Nr. 5.9) berichtigt am 9.10.1980 (GMB1.1980, S.- 576), zuletzt berichtigt und geändert am 6.10.1982 (GMBl. 1982, S. 7353)

BMI83 Der Bundesminister des Innern:
Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1982 und 1983

Bo76 Boeck, W.L.:
Meteorological Consequences of Atmospheric Krypton 85
Science 193, 195-198 (1976)

Bo84 Boeck, W.L.:
Atmospheric Krypton 85
A ten year overview
Status Report, 7. Conference on atmospheric electricity
Albany, New York 4.-8. Juni 1984

Bu84 Burkart, W.:
Besteht ein Zusammenhang zwischen künstlicher Radioaktivität und Waldsterben?
Schweiz. Z. Forstwes. 135, 329-338 (1984)

Co81 Colin, J.P.:
Contribution a l'etude du compartement d'atmospheres polluees
sans faible debit de dose de rayonnement beta.
Bull. Dir. Etude., Rech., Serie A
ISSN 0013-449 X Nr. 4, 1984

FVA85 Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abt. Biometrie und Informatik, Arbeitsgruppe Waldschadensinventur:
Abschlußbericht: Waldschadenssituation in den Räumen Obrigheim und Wittichen vom 24.05.1985

Gl84 Gluhrecht, H., W. Kühn:
Radiooekologische Untersuchungen und Gutachten
(Im Rahmen des atomrechtlichen Genehmigungsverfahren für die WAA Dragahn)
Im Auftrag des Niedersächsischen Ministeriums für Bundesangelegenheiten
April 1983 - Juni 1984

Hi85 Hillerbrand, M., J. Martin, H. Müh:
Waldschäden und Kernkraftwerke
Atomwirtschaft, S. 92, Februar 1985

Hü70 Hübner, G., K. Jung, E. Winkler:
Die Rolle des Wassers in biologischen Systemen
WTB, Band 78, Akademie-Verlag, Berlin; Pergamon Press, Oxford;
Vieweg + Sohn, Braunschweig, 1970

IA81 International Atomic Energy Agency:
Tritium in Some Typical Ecosystems
Techn. Report Series 207, Wien 1981

IC83 International Commission on Radiological Protection:
Radionuclide Transformations - Energy and Intensity of Emission,
ICRP-Report 38, Pergamon Press, 1983

Is61 Israel, H.:
Atmosphärische Elektrizität, Teil II
Akadem. Verlagsges., Leipzig, 1961

Ja86 Jacobi, W., H.G. Paretzke:
Betrachtungen zur Strahlenexposition von Bäumen durch natürliche und künstliche Strahlenquellen
GSF-Bericht 5/86, 1986

Kö84 König, L.A., R.-D. Penzhorn, H. Schüttelkopf:
Kerntechnik und Waldschäden, Kernforschungszentrum Karlsruhe,
KfK-Bericht 3704 (März 1984)

Kö85 König, L.A.:
Gibt es einen Zusammenhang zwischen Umweltradioaktivität und Waldschäden?
GIT: Fachzeitschrift für das Laboratorium, Heft 11 und 12 (1985)

Lo84 Loosli, H.W.: .
Haben künstlich erzeugte Radionuklide wie Kr-85, C-14 und H-3 mit der Luftionisation, mit dem sauren Regen und dem Waldsterben etwas zu tun?
SVA-Bulletin Nr. 3, S. 21 (1984)
Offizielles Organ der schweizerischen Vereinigung für Atomenergie und des österreichischen Atomforums

Me85 Metzner, H.:
Waldschäden durch kerntechnische Anlagen?
Literaturstudie
(Im Auftrag des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten Baden-Württemberg)
Tübingen, September 1985

Ra85a Raes, F., A. Janssens:
Ion-induced Aerosol Formation in a H_2O-H_2SO_4 System -
I. Extension of the Classical Theory and Research for Experimental Evidence
J. Aerosol Sci. 16, 217-227 (1985)

Ra85b Raes, F., A. Janssens, G. Eggermont:
A Synergism between Ultraviolet and Gamma Radiation in Producing Particles from SO_2-H_2SO_4 Laden Atmospheres
Atmospheric Environment 19, 1069-1073 (1985)

Re84a Reichelt, G.:
Zur Frage des Zusammenhanges zwischen Waldschäden und dem Betrieb von Atomanlagen
Forstwiss. Centralblatt 103, 290 (1984)

Re84b Reichelt, G.:
Zusammenhänge zwischen Radioaktivität und Waldsterben?
Ökologische Konzepte, Herbst 1984, S. 25, G.M. Pfaff Gedächtnisstiftung

Re85a Reichelt, G.:
Waldschadensmuster im Umkreis atomtechnischer und industrieller Anlagen im Vergleich zu industriefernen Gebieten (Kartierung)
Manuskript: Herbst 1985

Re85b Reichelt, G., R. Kollert:
Waldschäden durch Radioaktivität?
C.F. Müller Verlag, Karlsruhe 1985

Si66 Simon, H.D., D. Palm:
Isotopeneffekte in der organischen Chemie und Biochemie
Angew. Chem. 78, Nr. 22, 993 (1966)

Sp62 Sparrow, A.H., G.M. Woodwell:
Prediction of the Sensitivity of Plants to Chronic Irradiation
Radiation Botany 2, 9 (1962)

Sp71 Sparrow, A.H., S.S. Schwemmer, P.J. Bottino:
The Effects of External Gamma-Radiation from Radioactive Fallout on Plants with Special Reference to Production
Radiation Botany 11, 85 (1971)

SSK76 Strahlenschutzkommission beim Bundesminister des Innern:
Vergleichbarkeit der natürlichen Strahlenexposition mit der Strahlenexposition durch kerntechnische Anlagen
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission (verabschiedet am 16./17. Dezember 1976), Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 1, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/New York, 1985

SSK77 Strahlenschutzkommission beim Bundesminister des Innern:
Synergismus und Strahlenschutz
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission (verabschiedet am 22./23. September 1977), Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 1, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/New York, 1985

St84 Streffer, C., W. -U. Müller:
Radiation risk from combined exposure to ionizing radiations and chemicals
Advances in Radiation Biology, Vol. 11, 173 (1984)

St85 Stoll, E.:
Die Kernkraftwerke und das Waldsterben
SVA-Bulletin, Nr. 14, S. 20 (1985)
Offizielles Organ der schweizerischen Vereinigung für Atomenergie und des österreichischen Atomforums

Te83 Teufel, D.:
Waldsterben, natürliche und kerntechnisch erzeugte Radioaktivität
IFEU-Bericht Nr. 25
Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg e.V.,
Juni 1983

Tr86 Tränkner, H. (Bayr. Forstl. Versuchs- und Forschungsanstalt, München):
Radioaktivität und Waldschäden
Stellungnahme zum Gutachten "Waldschadensmuster im Umkreis atomtechnischer und industrieller Anlagen im Vergleich zu industriefernen Gebieten" von Prof. Dr. G. Reichelt, Donaueschingen
zur Publikation eingereicht bei: Forstwiss. Centralblatt

UN77 United Nations Scientific Commitee on the Effects of Atomic Radiation:
Report to the General Assembly, United Nations, Publ. E.77.IX.1
New York, 1977

UN82 United Nations Scientific Commitee on the Effects of Atomic Radiation:
Report to the General Assembly, United Nations, Publ. E.82.IX.8,
New York, 1982

Vo75 Vohra, K.G.:
Synergistic Effects of Atmospheric Releases of Radioactive Gases and SO_2 in Inducing Nucleation in the Atmosphere
Proc. Symp. "Combined Effects of Radioactive, Chemical and Thermal Releases to the Environment"
Stockholm, 2.-5. Juni 1975, IAEA-SM-197/3, Vienna, 1975

Vo84 Vohra, K.G., M.C. Subba Ramu, T.S. Muraleedharan:
An Experimental Study of the Role of Radon and its Daughter Products in the Conversion of Sulphur Dioxide into Aerosol Particles in the Atmosphere
Atmospheric Environment, 18, 1633 (1984)

We86 Weiss, W., H. Stockburger, H. Satorius, K.O. Münnich:
Negative Korrelation zwischen der Radioaktivität und der Ozonkonzentration der Luft in der Umgebung der uranhaltigen Abraumhalde in Wittichen (Mittelschwarzwald)
zur Publikation eingereicht bei: Naturwissenschaften

Wo67 Woodwell, G.M., A.L. Rebuck:
Effects of Chronic Gamma Radiation on the Structure and Diversity of an Oak-Pine Forest
Ecological Monographs 37, 53 (1967)

9 Tabellen

Tabelle 1 Mittelwerte realer Jahresemissionen ($\bar{Q}$) von radioaktiven Edelgasen von Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland (BMI83) und der am ungünstigsten Aufpunkt zu erwartenden Luftkonzentrationen ($\bar{c}_{max}$) sowie daraus zu erwartende Energiedosen in Blättern bzw. Nadeln (Ja86)

Radionuklid	$\bar{Q}$	$\bar{c}_{max}$ [1)]	Jahresenergiedosen in nGy am ungünstigsten Aufpunkt		
	in 10^{10} Bq	in Bq/m^3	externe Bestr. β, γ [2)]	interne Bestr. β [3)]	gesamt β, γ
Ar 41	20	0,004	27	0,0002	27
Kr 85m	10	0,002	2	0,0002	2
Kr 85	300	0,067	24	0,006	24
Kr 87	10	0,002	18	0,0001	18
Kr 88 [4)]	10	0,002	23	0,0002	23
Xe 131m	300	0,067	11	0,02	11
Xe 133m	100	0,022	6	0,01	6
Xe 133	1000	0,22	46	0,06	46
Xe 135m	100	0,022	37	0,005	37
Xe 135	200	0,045	63	0,01	63
Xe 138 [5)]	20	0,004	25	0,0006	25
Σ Edelgase, H 3, C 14	2100 50 10	0,46 0,011 0,002	280 [6)] [6)]	0,12 20 940	280 20 940
Σ Edelgase, H 3, C 14			280	960	1240

[1)] berechnet mit einem Langzeit-Ausbreitungsfaktor von 7×10^{-7} s/m^3

[2)] Werte inklusive Beiträge von Edelgasen in Interzellularräumen von Blättern und Nadeln (ca. 30 Vol. %).

[3)] interne Exposition durch in Blätter oder Nadeln aufgenommene Edelgase bei einem Jahresmittelwert der Temperatur von 15 °C; siehe Abschnitt 4

[4)] einschließlich Tochterprodukt Rb 88

[5)] einschließlich Tochterprodukt Cs 138

[6)] nur Oberflächendosis

Tabelle 2 Beantragte Grenzwerte der Jahresemissionen ($\bar{Q}$) von Tritium, Radiokohlenstoff und Edelgasen aus der geplanten Wiederaufarbeitungsan1age und der danach am ungünstigsten Aufpunkt zu erwartenden mittleren Luftkonzentrationen ($\bar{c}_{max}$) sowie daraus zu erwartende Energiedosen in Blättern und Nadeln von Bäumen (Ja86)

Radio-nuklid	$\bar{Q}$	$\bar{c}_{max}$ [1]	Jahresenergiedosen in nGy (am ungünstigsten Aufpunkt)		
	in 10^{10} Bq	in Bq/m^3	externe Bestr. β, γ [2]	Interne Bestr. β [3]	Gesamt β, γ
C 14	$1{,}3 \times 10^3$	0,03	[4]	12 000	12 000
H 3	$1{,}5 \times 10^5$	3,3	[4]	6 000	6 000
Kr 85 [5]	$1{,}6 \times 10^7$	350	120 000	30	120 000
gesamt			ca. 120 000	18 000	140 000

[1] berechnet mit einem Langzeit-Ausbreitungsfaktor von 7×10^{-8} s/m^3

[2] Werte inklusive Beiträge von Edelgasen in Interzellularräumen von Blättern und Nadeln (ca. 30 Vol. %)

[3] interne Exposition durch in Blätter oder Nadeln aufgenommene Edelgase bei einem Jahresmittelwert der Temperatur von 15 °C; siehe Abschnitt 4

[4] nur Oberflächendosis

[5] die Beiträge durch andere Edelgase sind vernachlässigbar

Tabelle 3 Abgeschätzte, mittlere Jahresdosen in Blättern bzw. Nadeln von Bäumen durch natürliche Strahlenquellen in Gebieten normaler natürlicher Aktivität (Ja86)

Art der Exposition, Radionuklid	Mittlere Jahresenergiedosen in µGy	
	α	β, γ
EXTERNE QUELLEN:		
- Kosmische Strahlung (500 m über NN)	-	350
- Radon u. Zerfallsprodukte in Luft	-[2)]	40
- γ-Strahlung d. Bodens	-	525
INTERNE QUELLEN:		
- K 40	-	25
- C 14		14
- H 3	-	0,01
- U 238 bis Ra 226	2,6	0,05
- Th 232 bis Ra 224		
- Rn 222, Rn 220 u. kurzleb. Zerfallsprod.	0,88	0,01
- Pb 210 bis Po 210[1)]	180	3,5
GESAMTE NATÜRLICHE JAHRESENERGIEDOSIS	ca. 180	ca. 960
Schwankungsbreite	(50 bis 500)	(450 bis 1700)

Hieraus ergibt sich rechnerisch eine kumulierte Äquivalentdosis (unter Annahme einer relativen biologischen Wirksamkeit von 20 für α-Teilchen) für Blätter (angenommene Lebensdauer: 0,5 a) von etwa 2,6 mSv und für Nadeln (angenommene Lebensdauer: 7 a) von etwa 25 mSv.

[1)] gemittelt über Blätter und Nadeln
[2)] nur Oberflächendosis

Tabelle 4 Abgeschätzter mittlerer Löslichkeitskoeffizient von Edelgasen in Blättern und Nadeln bei einer mittleren Temperatur von 15 °C (Ja86)

Edelgas	$L_M = c_M/c_L$
Argon	0,06
Krypton	0,13
Xenon	0,30
Radon	0,50

Tabelle 5 Abgeschätzte mittlere Energiedosen in Blättern bzw. Nadeln von Bäumen.
Vergleich der durch die Emission von Edelgasen aus kerntechnischen Anlagen zu erwartenden Submersionsdosis am ungünstigsten Aufpunkt (im Abstand von ca. 0,5 km) mit der mittleren natürlichen Strahlenexposition der Blätter bzw. Nadeln (Ja85)

Strahlenquelle	Mittlere jährliche Energiedosen in µGy					
Art der Exposition	β, γ-Strahlung			α-Strahlung		
	externe Bestrahl.	interne[1] Bestrahl.	Gesamt	externe Bestrahl.	interne Bestrahl.	Gesamt
Submersion am ungünstigsten Aufpunkt durch						
- Kernkraftwerk	0,17	x[2]	0,17	–	–	–
- Wiederaufarbeitungsanlage	125	8,3	133	–	–	–
Mittlere natürliche Strahlenexposition:						
- Kosmische u. terrestrische Strahlung	720	-	750	–	–	220
- Submersionsdosis durch Rn 222, Rn 220 u. ihre kurzlebigen Zerfallsprodukte	ca. 25	ca. 0,05		–	0,5	
- Deposition von Pb 210 u. Po 210	-	5		–	220	

[1] die interne Dosis durch in Blätter und Nadeln aufgenommene Edelgase bezieht sich auf einen Jahresmittelwert der Temperatur von 15°C
[2] x-Wert wird z.Zt. berechnet

Tabelle 6 Ionenproduktionsraten aufgrund ionisierender Strahlung anthropogenen und natürlichen Ursprungs (Kö85, Lo84)

Quelle	mittlere Aktivitäts-konzentration in Luft	Ionenpaare pro cm^3 und Sekunde	Bemerkungen
kosmische Strahlung	-	2,1	Meeresniveau
	-	2,4	500 m üNN
terrestrische Strahlung ohne Rn	-	2 bis 20	
Rn 222/Rn 220	2 bis 20 Bq/m^3	0,5 bis 10	einschl. Folgeprodukte
	bis zu 5000 Bq/m3	bis zu 2500	lokale Spitzenwerte
Kr 85	0,7 Bq/m^3	$6 \cdot 10^{-3}$	1983
C 14	0,04 Bq/m^3	$0,8 \cdot 10^{-4}$	natürlich
	0,06 Bq/m^3	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1983
HTO	0,03 Bq/m^3	$7 \cdot 10^{-6}$	1983
HT	0,07 Bq/m^3	$2 \cdot 10^{-5}$	(1968-1974)
Umgebung Kernkraftwerk 0,5 bis 1 km			Genehmigungswerte
Edelgase		35	kurzzeitig
		0,35	Mittel
Direktstrahlung		ca. 0,1	
Umgebung Wiederaufar-beitungsanlage 0,5 bis 1 km			
Edelgase		3000	kurzzeitig, gepulste Abgabe
Aerosole		3 bis 4	Mittel
		ca. 0,1	nach 50 Jahren

Tabelle 7 Ozon- und Stickoxidkonzentrationen (Kö35)

Zeitintervall	Schadstoffkonzentration in µg/m^3		
	Kernkraftwerk (1300 MWe, Genehmigungswerte)		
kurzzeitig	NO_2: $2 \cdot 10^{-6}$ O_3: $3 \cdot 10^{-6}$		
Jahresmittel	NO_2: $2 \cdot 10^{-8}$ O_3: $3 \cdot 10^{-8}$		
	Wiederaufarbeitungsanlage (350 t/a)		
kurzzeitig	NO_2: $2 \cdot 10^{-5}$ O_3: $3 \cdot 10^{-5}$		
Jahresmittel	NO_2: $2 \cdot 10^{-7}$ O_3: $3 \cdot 10^{-7}$		
	In Natur vorhandene Untergrundkonzentration Reinluft-verhältnisse	ländliche Bereiche	Ballungs-gebiete
³	NO_2: ³ 1	10 bis 20	50 bis 100
£	O_3 : Sommer:	£ 80; sommerliche Episoden:	> 200
	Winter: 20 bis 30;	kurzzeitig:	> 300