

ZUR DOSISRELEVANZ DER EINZELNEN EXPOSITIONSPFADE BEI EMISSIONEN AUS KERNKRAFTWERKEN

ON THE IMPORTANCE OF THE DIFFERENT CONTRIBUTIONS TO PUBLIC RADIATION EXPOSURE DUE TO RELEASES FROM NUCLEAR POWER STATIONS

A. Beutmann¹⁾, B. Bucher²⁾, E. Kümmerle³⁾, W. Kukla⁴⁾, E. Pomplun³⁾, H. Völkle⁵⁾, A. Wicke⁶⁾

¹⁾ Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik, Rossendorf eV, Dresden/D

²⁾ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Villigen/CH

³⁾ Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich/D

⁴⁾ EnBW Kernkraftwerk Obrigheim GmbH, Obrigheim/D

⁵⁾ Bundesamt für Gesundheit, Bern/CH und Physikdepartement Universität Freiburg/CH

⁶⁾ Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe/D

Zusammenfassung

Die Umgebungsüberwachung von Kernkraftwerken dient dem Nachweis, dass die behördlichen Auflagen bezüglich Emissionen einhalten sind. Sämtliche möglichen Beiträge zur externen und internen Strahlenexposition der Umgebungsbevölkerung werden erfasst und dies sowohl für den Normalbetrieb als auch für den hypothetischen Fall der vollständigen Ausschöpfung der Genehmigungswerte. Diese Messprogramme sind optimiert im Bezug auf Art und Menge der Emissionen bei Normalbetrieb und Störfällen, räumliche und zeitliche Ausbreitung in der Umwelt und den Übergang in die Nahrungskette. Moderne Anlagen werden durch technische Massnahmen laufend verbessert und optimiert, sodass Emissionen über Abluft und Abwasser nur zu unbedeutenden Dosen von weniger als 0.01 mSv/Jahr führen; dabei dominiert der Beitrag durch die ¹⁴C-Emissionen (rund 90%).

Summary

Radioactivity around nuclear power station is monitored continuously, covering all possible pathways to external and internal irradiation. The monitoring program is optimized in regard to measuring points, frequency, sampling and measurement techniques, and takes into account dispersion of radioactivity in air and water as well as transfer into foodstuffs. Calculations are made for the different contributions to irradiation for normal operation and for the hypothetic case of maximum allowed releases. Modern nuclear power stations are technically optimized in order to minimize radiation exposure of the population to less than 0.01 mSv/year, the most important dose contribution (more than 90 %) being carbon-14.

Schlüsselwörter: Kernkraftwerke, Strahlendosen, Umgebungsüberwachung

Keywords: Nuclear Power Plant, Radiation Exposure, Environmental Monitoring

1. Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken

Im Kernreaktor entstehen bei der Spaltung eines ²³⁵U-Kerns zwei radioaktive Spaltfragmente (bei A ≈ 90 und bei A ≈ 140), die – infolge Neutronenüberschuss – über mehrere, meist kurzlebige β⁻-Zerfälle in stabile Isotope übergehen. Gleichzeitig werden ein bis 3 Neutronen freigesetzt, was eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion ermöglicht. Zusätzlich entstehen im

Reaktor durch Neutroneneinfang auch radioaktive Aktivierungs- od. Korrosionsprodukte. Diese Radioaktivität wird zum grössten Teil in den Brennelementen zurückgehalten und kann erst – falls sie in der Zwischenzeit nicht schon zerfallen ist – bei der Wiederaufarbeitung des Kernbrennstoffes freiwerden. Ein kleiner Anteil der mittel- und langlebigen Radionuklide gelangt in den Kühlkreislauf und wird aus diesem entweder als Gase (Edelgase, Tritium, ^{14}C) aus dem Kondensator abgesaugt oder fällt bei der Wasseraufbereitung als radioaktiver Abfall, etwa Ionenaustauscherharze, Filter oder radioaktives Abwasser an. Durch verschiedene technische Massnahmen wird erreicht, dass so wenig Radioaktivität wie möglich über Abluft und Abwasser in die Umwelt gelangt. Bei den Edelgasen sorgen Verzögerungsstrecken und Aktivkohlefilter dafür, dass ein Grossteil bis zur Emission zerfällt. Radioaktives Jod wird durch Aktivkohle zurückgehalten, radioaktive Aerosole durch entsprechende Filter. Abwässer werden filtriert, mittels Ionenaustauscher gereinigt bzw. verdampft und als Kondensat mit Abwasser abgeleitet. Lediglich bei Tritium und ^{14}C werden solche Rückhalteverfahren nicht eingesetzt bzw. von den Aufsichtsbehörden bisher nicht gefordert.

Bei Kernkraftwerken findet ein laufender Optimierungsprozess statt, an dem sowohl die Betreiber, als auch die Hersteller und die Behörden beteiligt sind. Er umfasst einerseits technische Massnahmen, u.a. wiederkehrende Prüfungen, zu Erhöhung von Sicherheit, Sicherung und Verfügbarkeit der Anlage als auch solche zur Reduktion der radioaktiven Emissionen. Dabei werden sowohl die Technik, als auch die Auswahl und Ausbildung des Personals und die Organisation des Betriebes (u.a. die Sicherheitskultur) regelmässig überprüft und verbessert. Eine Folge davon ist, dass sowohl die Strahlendosen des Eigen- und Fremdpersonals als auch die Emissionen radioaktiver Stoffe und als Folge davon die Strahlendosen bei der Umgebungsbevölkerung in den letzten Jahrzehnten deutlich gesenkt werden konnten und letztere heute meist unter 1/100 mSv pro Jahr liegen.

2. Ermittlung der Dosen in der Umgebung der Kernkraftwerke

Die Emissionen radioaktiver Stoffe über Abluft und Abwasser werden vom Betreiber laufend quantitativ erfasst und zuhanden der Aufsichtsbehörde bilanziert. Diese führt zur Verifizierung eigene, unabhängige Kontrollmessungen durch. Die Emissionslimiten werden von der Bewilligungsbehörde in Deutschland und der Schweiz (hier inkl. Direktstrahlung) so festgelegt, dass Personen, die in der Nahumgebung wohnen, auch unter den ungünstigsten Annahmen nicht mehr als eine zusätzliche Strahlendosis von 0.3 mSv/Jahr erhalten können. Aufgrund der Emissionen berechnet die Behörde die hypothetische, maximale Strahlendosis für die Umgebungsbevölkerung. Dies erfolgt mittels mathematischer Modelle für die Ausbreitung in der Atmosphäre und im Wasserkreislauf, radioökologischer Modelle (Übersicht über die Expositionspfade siehe Abb. 1a) für den Übergang in Pflanzen, Tiere und in die Lebensmittel und Modellen der Dosisberechnung für alle möglichen Pfade der externen und internen Bestrahlung [1, 2, 3]. Solche Rechnung sind um eine, wenn nicht gar zwei Grössenordnungen konservativ, d.h. sie überschätzen die tatsächlichen Dosen um einen Faktor 10 bis 100. Bei einer störfallbedingten Freisetzung ist weiter der Zeitfaktor zu berücksichtigen. Abb. 1b zeigt, wann nach einem solchen Ereignis welcher Belastungspfad radiologisch relevant ist und entsprechend beim Messprogramm zu berücksichtigen ist.

Zusätzlich zur lückenlosen Emissionsüberwachung wird bei jedem Kernkraftwerke eine Umgebungsüberwachung durchgeführt, die alle möglichen Belastungspfade erfassen soll um eine zusätzliche Redundanz zur Überwachung an der Quelle zu schaffen. Bei modernen Leichtwasserreaktoren sind die Emissionen im Normalbetrieb meist so gering, dass auch mit sehr empfindlichen Verfahren meist keine radioaktiven Immissionen in der Umgebung der Anla-

gen nachgewiesen werden können. Ausnahmen sind ^{14}C , Tritium in Gewässern, sowie gewisse Aktivierungsprodukte, die sich vor allem in den Sedimenten akkumulieren. Die verwendeten Probenahme- und Messverfahren sind an verschiedenen Stellen, u. a. auch in der Lose-Blatt-Sammlung des Fachverband für Strahlenschutz eingehend beschrieben und bewertet [3, 4]. Bei der Optimierung, d. h. der Auswahl der Messpunkte und Überwachungsmassnahmen sind zwei Punkte von Bedeutung: Die Messverfahren sollen sich gegenseitig ergänzen und es soll berücksichtigt werden, welche Belastungspfade im Normalbetrieb und bei Störfällen die grössten Dosisbeiträge liefern, in dem Sinne, dass für die wichtigsten Belastungspfade eine genügende Redundanz vorhanden ist. Das soll nachfolgend anhand von Berechnungen für deutsche und schweizerische Kernkraftwerken dargelegt werden.

3. Bewertung der Überwachungsmassnahmen

Zur Bewertung der einzelnen Überwachungsmassnahmen im Bezug auf ihre Wirksamkeit und ihre Eignung für die Umgebungsüberwachung eines Werkes können die nachfolgend aufgelisteten Kriterien benutzt werden. Dabei sind sowohl der bestimmungsgemässe Betrieb, kleinere Störfälle im Bereich der Emissionsgrenzwerte, aber auch Unfälle mit deutlicher Überschreitung der Emissionsgrenzwerte zu berücksichtigen, da Art und Zusammensetzung der Freisetzung unterschiedlich sein können. Bei der Auswahl der Messpunkte, der zu untersuchenden Proben und der Messverfahren ist zusätzlich zum Spektrum der Emissionen auch auf die Ausbreitungsbedingungen in Luft und Wasser, die Geländeform, die Bevölkerungsverteilung, die angebauten landwirtschaftliche Produkte, etc. Rücksicht zu nehmen. Abb. 2 zeigt wie effizient die einzelnen Überwachungsmassnahmen im Bezug auf einzelne Expositionspfade sind. Hier einige Kriterien zur Bewertung der einzelnen Überwachungsmassnahmen:

- 1) Messempfindlichkeit: Vorgängig ist die minimale Aktivität bzw. Dosis oder Dosisleistung zu bestimmen, die mit einem Messverfahren noch erfasst werden kann,
- 2) Es ist zu berücksichtigen, auf welche Nuklide, Nuklidgruppen oder Emissionspfade oder Dosiskomponente ein Messverfahren anspricht,
- 3) Es ist abklären, wieweit ein Verfahren Immissionen des Werkes von solchen einer Vorbelastung (natürliche Radioaktivität, Emissionen einer andern Quelle, Kernwaffen-Fallout etc.) unterscheiden kann,
- 4) es ist zu überlegen, welche räumliche (z.B.: Messpunkt, Mittel über Ortschaft oder ganze Gegend) oder zeitliche (z.B.: Tages-, Woche-, Jahreswerte) Auflösung erwünscht ist,
- 5) Schnelligkeit eines Verfahrens: Schnellverfahren sind in der Regel weniger genau und weniger empfindlich als die aufwendigeren, klassischen Nachweisverfahren,
- 6) Aufwand: für Probenahme und Messung, Material und Messgeräten sowie erforderliche Fachkenntnisse und Ausbildung der für die Messungen eingesetzten Fachkräfte,
- 7) Ortsfeste oder mobile Messstellen: Für die Überwachung eines langfristigen Trends sollte immer an derselben Stelle gemessen werden; im Störfall sind die Messpunkte jedoch entsprechend der aktuellen Windrichtung auszuwählen,
- 8) Labormessung haben sowohl eine höhere Zuverlässigkeit als auch eine grössere Genauigkeit und Empfindlichkeit; auf der andern Seite sind Vor-Ort-Messung mit automatischer Datenfernübertragung schneller und eignen sich besser für Warnnetze,
- 9) Ermittlung der Messunsicherheit: Es soll ein Unsicherheits-Budgets erstellt werden, das sämtliche Beiträge zur Unsicherheit des Endresultates umfasst: Probennahme, Probenvorbereitung, Kalibrierung, Zählstatistik, Auswertprogramme, Kalibrierstandards, verwendeten kernphysikalische Daten, Modellparameter, etc.
- 10) Qualitätssichernde Massnahmen (Zertifizierung und Akkreditierung nach ISO-Standards) sind heute Stand der Technik. Dazu gehören auch die regelmässige Teilnahme an

Ringversuchen und Vergleichsmessungen. Sie ermöglichen systematische Fehler zu eliminieren, die Qualität der Messungen eines Labors laufend zu überprüfen, und die berechnete Messunsicherheit praktisch zu verifizieren.

Dosisberechnungen gemäss den in Kap. 2 beschriebenen Verfahren wurde für verschieden Fälle durchgeführt und zum Dosis-Schutzziel der Genehmigungsbehörde in Bezug gesetzt. In Abb. 3a und 3b sind die Ergebnisse für eine Normableitung von 3.7×10^{10} Bq/Jahr für den Abluft bzw. den Abwasserpfad (Nahbereich) für die Altersgruppe grösser 17 Jahre graphisch dargestellt. Abb. 3a zeigt die berechneten Strahlendosen für Erwachsene, und zwar einerseits für den hypothetischen Fall der maximalen Emissionslimiten und andererseits für realistische Emissionswerte für die Umgebung eines deutschen Siedewasserreaktors, Abb. 3b für jene eines deutschen Druckwasserreaktors und Abb. 4 für das Schweizer Kernkraftwerke Gösigen (Druckwasserreaktor). Aus den Graphiken ist ersichtlich, dass der grösste Dosisbeitrag im Normalbetrieb vom ^{14}C stammt, und die hypothetische (konservativ gerechnete) Gesamtdosis um etwa 2 Grössenordnungen unter dem Schutzziel von 0.3 mSv/Jahr liegt.

4. Schlussfolgerungen

- 1) Beim Abluftpfad überwiegt bei Normalbetrieb der Dosisbeitrag durch ^{14}C (über 90%). Regelmässige ^{14}C -Messungen bei Schweizer Kernanlagen durch die Universität Bern zeigen in der Nahumgebung Erhöhungen gegenüber dem weltweiten ^{14}C -Pegel von bis 20 % (entsprechend einer zusätzlichen jährlichen Strahlenexposition von wenigen μSv). Dem ist beizufügen, dass der ^{14}C -Pegel in der Nordhemisphäre in den 50er- und 60er-Jahren als Folge der Kernwaffenversuche bis auf das Doppelte des weltweiten, natürlichen (d. h. kosmogenen) ^{14}C -Pegels (von 0.226 Bq/g Kohlenstoff) angestiegen war.
- 2) Beim Abwasserpfad überwiegt der Dosisbeitrag durch Tritium.
- 3) Die berechneten (konservativen) Dosisberechnungen ergeben weniger als 1 % der Dosislimite des Schutzziels von 0.3 mSv/Jahr, sowohl der schweizer (hier inkl. Direktstrahlung) als auch der deutschen Genehmigungsbehörden. Ein Ausschöpfen der Emissionslimiten würde zu Dosen führen, die immer noch eine Grössenordnung tiefer als der Schutzziel-Wert wären.
- 4) Diese Dosisberechnungen gehen von konservativen Annahmen bezüglich Lebens- und Ernährungsgewohnheiten aus. Die tatsächlichen Dosen unter realistischen Annahmen dürften (auch in der Nahumgebung) um mindestens eine Grössenordnung tiefer liegen.
- 5) Die sehr tiefen Emissionen modernere Kernkraftwerke sind auf eine fortlaufende technische und betriebliche Optimierung zurückzuführen. Einzig bei den ^{14}C -Emissionen über die Abluft (dessen Produktion ist an die Leistung gekoppelt und daher berechenbar) sowie bei den Tritium-Emissionen wurden solche Massnahmen bisher nicht als sinnvoll erachtet und daher auch von der Genehmigungsbehörde nicht gefordert. Für diese beiden Radionuklide werden von der Behörde keine Emissionslimiten für die Abluft festgelegt.
- 6) Die Überwachungsprogramme für den Routinebetrieb in Deutschland und in der Schweiz stimmen weitgehend überein; es werden vergleichbare Probeentnahme- und Messverfahren angewendet. Ein regelmässiger Erfahrungsaustausch findet u. a. im Rahmen des FS/AKU und der Deutsch-Schweizerischen Kommission für die Sicherheit kerntechnischer Einrichtungen (DSK) statt.
- 7) Für die Umgebungsmessungen bei Stör- und Unfällen spielen die automatischen Warnnetze oder Fernüberwachung eine immer wichtigere Rolle.
- 8) Wichtig ist eine ganzheitliche Interpretation der Überwachungsdaten, ausgehend von einer klaren Formulierung von Ziel und Zweck der Messprogramme verbunden mit dem Vergleich zu anderen anthropogenen Umweltauswirkungen und Gesundheitsrisiken.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Entwurf der Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen vom 13.05.2005
- [2] Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen: Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GMBI. Nr. 14-17 vom 23.3.2006, S.253 – S.336,
- [3] Empfehlungen zur Überwachung der Umweltradioaktivität. Loseblattsammlung des Arbeitskreises Umweltüberwachung des Fachverband für Strahlenschutz e.V. FS-78-15-AKU; ISSN 1013-4506
- [4] Messanleitungen für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt und zur Erfassung radioaktiver Emissionen aus kerntechnischen Anlagen. Hrsg.: Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn; Gustav Fischer-Verlag, Stuttgart (1992).
- [5] Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition vom 23. Juli 2001; Bundesanzeiger Nr. 160a vom 28.08.2001, Bundesanzeiger Verlag.

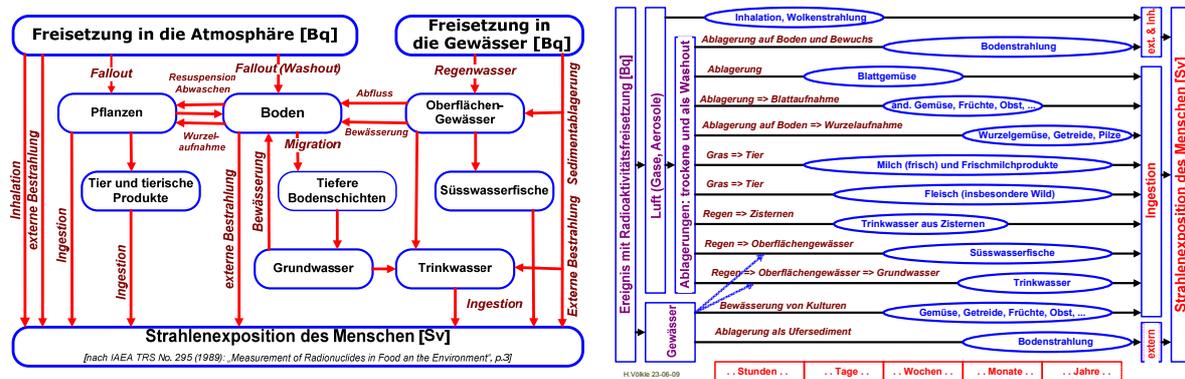


Abb. 1a, b : Links: Übersicht über die verschiedenen radiologischen Expositionspfade in der Umgebung von Kernkraftwerken
Rechts: Zeitskala (pseudo-logarithmisch) bei einer störfallbedingten Freisetzung

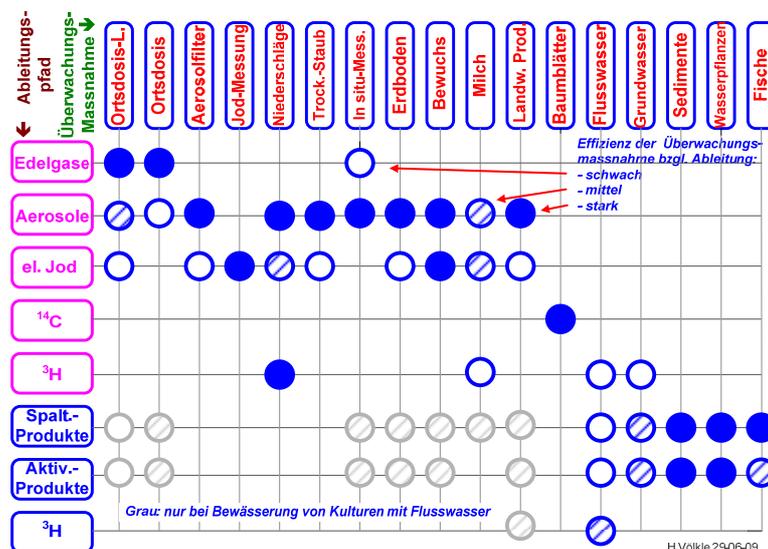


Abb. 2: Effizienz der einzelnen Überwachungsmaßnahmen bezüglich der Emissionspfade

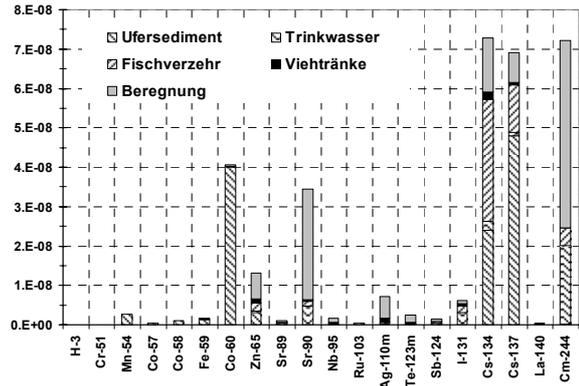
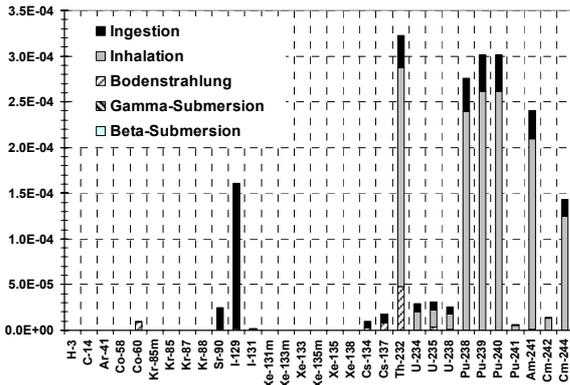


Abb. 3a, b: Links: Berechnete effektive Dosen [Sv/Jahr] für die Altersgruppe grösser 17 Jahre für eine Normableitung von 3.7×10^{10} Bq/Jahr über den Abluftpfad
Rechts: Berechnete effektive Dosen [Sv/Jahr] für die Altersgruppe grösser 17 Jahre für eine Normableitung von 3.7×10^{10} Bq/Jahr über den Abwasserpfad

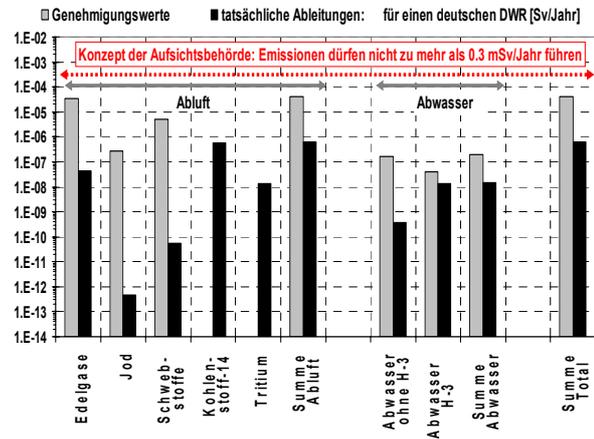
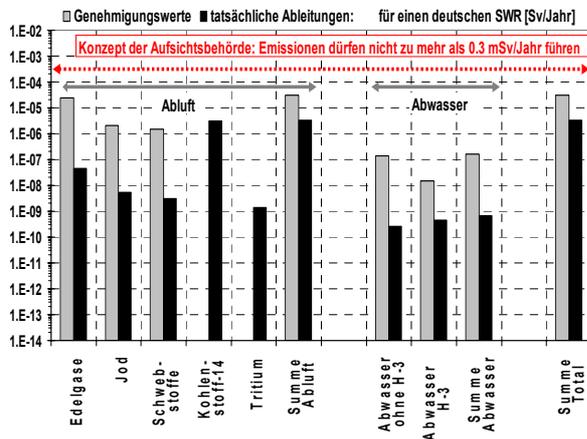


Abb. 4a, b: Links: Berechnete effektive Dosen [Sv/Jahr] für die Umgebung eines deutschen Siedewasserreaktors
Rechts: Berechnete effektive Dosen [Sv/Jahr] für die Umgebung eines deutschen Druckwasserreaktors

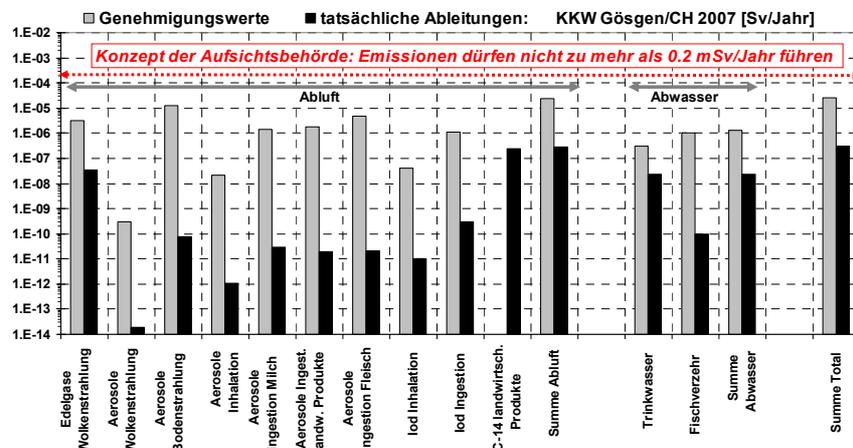


Abb. 5: Berechnete effektive Dosen [Sv/Jahr] für die Umgebung des Kernkraftwerkes Gösgen / Schweiz (Druckwasserreaktor)