



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 1 von 40

Stand: September 2013

Emissionsüberwachung nicht-kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen
Hilfestellung für Planung, Ausrüstung und Betrieb

Bearbeiter: A. Beutmann, Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e.V.
W. Erath, Berthold Technologies GmbH & Co.KG, 75323 Bad Wildbad
E. Frenzel, Frenzel Consulting & Instruments, Straubenhardt
M. Geisler, Leipzig, ehemals TÜV Süd, Industrie Service GmbH Leipzig
Th. Haug, Isotopenlabor & Strahlenschutz, Universität Tübingen
K. Heinemann, Jülich, ehemals Forschungszentrum Jülich GmbH
P. Nemecek[†], ehemals H. Nemecek Industrievertrieb, Erlangen
A. Neu, Durmersheim, ehem. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
H. Rühle, Berlin, ehemals Bundesamt für Strahlenschutz, Berlin
A. Wicke, Bruchsal, ehemals Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
M. Winter, Stutensee, ehemals Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung.....	2
2 Anwendungsbereiche und Regelungen.....	3
2.1 Forschung und Technik.....	3
2.2 Medizin.....	3
3 Ableitung radioaktiver Stoffe.....	4
3.1 Aktivitätsbilanz einer Einrichtung.....	4
3.2 Luftpfad.....	5
3.3 Wasserpfad.....	6
3.4 Bewertung der Ableitungen.....	8
4 Entscheidungskriterien für Maßnahmen der Emissionsüberwachung.....	9
4.1 Vorbemerkungen.....	9
4.2 Fortluftüberwachung.....	9
4.3 Abwasserüberwachung.....	10
5 Dokumentation, Qualitätssicherung und Berichterstattung.....	12
6 Literatur.....	13
Anhang A Emissionsüberwachung in nicht-kerntechnischen Arbeitsbereichen von Forschung und Technik - Empfehlungen für die Praxis / Berechnungsbeispiele.....	15
Anhang B Emissionsüberwachung in medizinischen Einrichtungen - Empfehlungen für die Praxis / Berechnungsbeispiele.....	26
Anhang C Hinweise zur Ermittlung der Strahlenexposition, Luftpfad.....	37
Anhang D Technische Auslegung von Anlagen zur Überwachung luftgetragener radioaktiver Stoffe.....	38



1 Einleitung

Zur Überwachung der Ableitungen radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken, Forschungsreaktoren, Brennelementfabriken, Wiederaufarbeitungsanlagen, Brennelementzwischenlagern oder Endlagern für radioaktive Abfälle in Deutschland sind neben den Forderungen der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /1/ detaillierte Anforderungen in der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) /2/ und den entsprechenden KTA-Regeln /3, 4/ festgelegt.

Für nicht-kerntechnische Bereiche, wie z. B. nuklearmedizinische Einrichtungen, Radionuklidlaboratorien der Forschung und Industrie sowie für den Betrieb von Beschleunigern, gibt es keine übergreifenden Vorschriften, in denen die Überwachung von Emissionen radioaktiver Stoffe geregelt ist. Sowohl die Richtlinie „Strahlenschutz in der Medizin“ /5/ als auch die DIN-Norm „Radionuklidlaboratorien“ /6/ geben nur Rahmenempfehlungen für Maßnahmen zur Emissionsüberwachung.

Tatsächlich gibt es unter den nicht-kerntechnischen Einrichtungen eine Reihe von Emittenten, deren Emissionen im Verhältnis zu den o. g. kerntechnischen Anlagen einen vergleichbaren Beitrag zur äußeren und inneren Strahlenexposition von Personen in der Umgebung liefern. Der § 47 StrlSchV „Begrenzung der Ableitung radioaktiver Stoffe“ verpflichtet deshalb auch diese Anwender zur Beachtung dieser Vorschrift und besonders dahingehend, dass radioaktive Stoffe nicht unkontrolliert mit Fortluft und Abwasser in die Umwelt abgeleitet werden. Darüber hinaus muss nach § 48 StrlSchV die Ableitung radioaktiver Stoffe mindestens jährlich, nach Art und Aktivität spezifiziert, der zuständigen Behörde mitgeteilt werden.

Die Vielfalt der nicht-kerntechnischen Einrichtungen, die sehr unterschiedlichen Arten von Tätigkeiten beim Umgang mit oder bei der Produktion von offenen radioaktiven Stoffen, die weite Spanne ihrer Aktivitätsinventare und nicht zuletzt die sehr unterschiedlichen Radionuklidzusammensetzungen in Fortluft und Abwasser erlauben keine direkte Übernahme von Regeln aus dem kerntechnischen Bereich.

Die folgenden Ausführungen wenden sich an Personen, die für den Strahlenschutz ihrer Einrichtung Verantwortung tragen und sollen ihnen Hilfestellung bei der Erfüllung ihrer Aufgaben geben. Sie sollen den Antragsteller, insbesondere den Strahlenschutzverantwortlichen und die Strahlenschutzbeauftragten, bei der Beantragung von Genehmigungen, der Planung der Emissionsüberwachung und der dazu erforderlichen Maßnahmen beim Betrieb einer Einrichtung oder beim Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen unterstützen.

Die hier formulierten Empfehlungen sollen als Leitfaden und Entscheidungshilfe dienen, an denen sich der o. g. Personenkreis orientieren kann.

Vom Antragsteller wie auch von der zuständigen Behörde sind vor Erteilung der Genehmigung zum Umgang mit radioaktiven Stoffen das Erfordernis und der Umfang von Maßnahmen zur Fortluft- und Abwasserüberwachung zu analysieren und das Konzept dazu konkret und anlagenspezifisch festzulegen. In diesem Sinne soll die in den folgenden Kapiteln enthaltene „Hilfestellung bei der Planung, Ausrüstung und dem Betrieb“ dem Anwender bei der Lösung folgender Fragen helfen:

- *Wie ist für die geplanten Tätigkeiten die Erfüllung der Anforderungen von § 47 und § 48 StrlSchV sicherzustellen?*
- *Ist für die geplante Arbeit eine messtechnische Erfassung der Ableitungen radioaktiver Stoffe notwendig?
Wenn ja, mit welchem apparativen und analytischen Aufwand ist die Überwachung durchzuführen?
Wenn nein, wie kann eine rechnerische Abschätzung der Emissionen durchgeführt werden?*

Im Kapitel 2 wird auf bestehende Regelungen hingewiesen, die bei der Planung von Arbeiten mit offenen radioaktiven Stoffen zu beachten sind, wenn beim Umgang die Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Fortluft oder mit dem Abwasser an die Umgebung nicht ausgeschlossen werden kann.



Das Kapitel 3 gibt allgemeingültige Hinweise zur Abschätzung der Ableitung radioaktiver Stoffe in der Planungsphase und verweist auf die Anhänge A und B, die jeweils für Forschung und Technik einerseits und für die Medizin andererseits praxisnahe Beispiele aufzeigen.

Im Kapitel 4 werden Entscheidungskriterien für Maßnahmen zur Emissionsüberwachung erläutert. Die Frage der Dosisrelevanz luftgetragener Ableitungen für die Umgebung der Einrichtung wird im Anhang C näher diskutiert. Die Hinweise zur Auslegung von Überwachungseinrichtungen werden im Anhang D für die Fortluftüberwachung mit konkreten messtechnischen Parametern ergänzt.

Das Kapitel 5 enthält Empfehlungen zur geeigneten Dokumentation, zu Fragen der Qualitätssicherung von Messeinrichtungen und zur Berichterstattung.

2 Anwendungsbereiche und Regelungen

2.1 Forschung und Technik

Beim Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen oder beim Betrieb von Einrichtungen und Anlagen, die radioaktive Stoffe erzeugen, ist in der Forschung und Technik prinzipiell mit einer Emission von radioaktiven Stoffen in die Umwelt zu rechnen. Das Spektrum an Radionukliden und der Einsatz von radioaktiven Stoffen in Forschung und Technik sind so vielfältig, dass hier nicht alle Anwendungsbereiche behandelt werden können.

Für Laboranwendungen ist neben den Forderungen der StrlSchV die DIN-Norm „Radionuklidlaboratorien“ /6/ bei der Planung zu berücksichtigen. Andere Anwendungsbereiche können damit sinngemäß behandelt werden. Im Teil 1 dieser DIN-Norm „Regeln für die Auslegung“ sind Kriterien für die Einstufung von Radionuklidlabors genannt. Diese führen zur Klassifizierung von Radionuklidlaboren in Abhängigkeit von der pro Laborraum gehandhabten Aktivität und von den nuklidspezifischen Richtwerten der Jahresaktivitätszufuhr (RJAZ) /6a/. Des Weiteren führen sie unter Berücksichtigung von Freisetzungswahrscheinlichkeiten der gehandhabten Radionuklide zu Raumkategorien, die schließlich u. a. auch für die Überwachung der luftgetragenen Ableitungen auslegungsbestimmend sind.

2.2 Medizin

Im medizinischen Bereich kann man die Anwendung und das Auftreten radioaktiver Stoffe in zwei Hauptanwendungsgebiete einteilen. In der Nuklearmedizin werden radioaktive Stoffe dem Patienten appliziert, die dann überwiegend in Form von Ausscheidungen über den Wasserpfad in die Umwelt gelangen können. Beim Einsatz von Beschleunigern treten Emissionen radioaktiver Stoffe im bestimmungsgemäßen Betrieb der Anlagen nur als luftgetragene kurzlebige Aktivierungsprodukte auf.

Die Richtlinie „Strahlenschutz in der Medizin“ /5/ behandelt in Kap. 2.3.1 Fragen zur Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft und Wasser. Zur Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft wird lediglich auf Freisetzungsmöglichkeit bei Untersuchung (Diagnostik) und Behandlung (Therapie) und auf Einsatz entsprechender Rückhaltevorrichtungen für die Raumluft der Kranken- und Untersuchungszimmer, beispielweise bei der Radioiod-Therapie hingewiesen. Die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Raumluft hängt von den verwendeten Radiochemikalien und Behandlungsverfahren ab. Bei Einsatz von nichtflüchtigen radioaktiven Stoffen genügen Abschätzungen zur Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft. Außer bei Radioiod-Therapiestationen, PET und radioaktiven Gasen sind messtechnische Kontrollen der Raum- und Fortluft im Allgemeinen nicht erforderlich.

Zur Ableitung radioaktiver Stoffe mit Wasser ist festgelegt, dass bei Untersuchungen (Diagnostik) eine Bilanzierung der Ableitungen radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser durch rechnerische Abschätzungen über die der zuständigen Behörde mitgeteilte applizierte Aktivität ohne messtechnische Erfassung der realen Ableitungen zugelassen sind.

Fallen höheraktive Abwässer beispielsweise bei Behandlungsstationen (Therapiestationen) an, müssen sie bis zu einer Abklinganlage getrennt von anderen Abwässern geführt werden. Die höheraktiven Abwässer aus Therapiestationen können erst nach Abklingen in den Rückhaltevorrichtungen abgeleitet werden. Die abge-

gebene Aktivität wird dabei über repräsentative Tankproben vor dem Ableiten bestimmt. Sind keine Rückhaltevorrichtungen erforderlich, werden die abgegebenen Aktivitäten kontinuierlich oder durch Sammlung repräsentativer Proben bestimmt und registriert.

Die Konzentration kontaminierter Abwässer am Ort der Einleitung in die öffentliche Kanalisation wird unter Berücksichtigung der gesamten Abwasserfracht der betreffenden Einrichtung berechnet (vgl. auch Abb. 2 in Kap. 3.3), sofern die zuständige Behörde die Grenze des Strahlenschutzbereichs nach § 47 (4) StrlSchV entsprechend festlegt. Eine darüber hinausgehende Abwasserverdünnung während der Ableitung ist ausdrücklich nicht erlaubt, siehe § 79 StrlSchV.

3 Ableitung radioaktiver Stoffe

3.1 Aktivitätsbilanz einer Einrichtung

Vor Aufnahme der Arbeiten mit radioaktiven Stoffen sind Überlegungen zum Aktivitätsfluss im Arbeitsprozess, zu notwendigen Schutz- und Rückhaltemaßnahmen und zur Höhe der nicht vermeidbaren Ableitungen in die Umgebung anzustellen.

Diese Analyse ist einerseits Bestandteil der Unterlagen für die Antragstellung an die zuständige Behörde, zum anderen für die Gestaltung der Maßnahmen zur Emissionsüberwachung und Bilanzierung der Ableitungen radioaktiver Stoffe aus der Einrichtung notwendig.

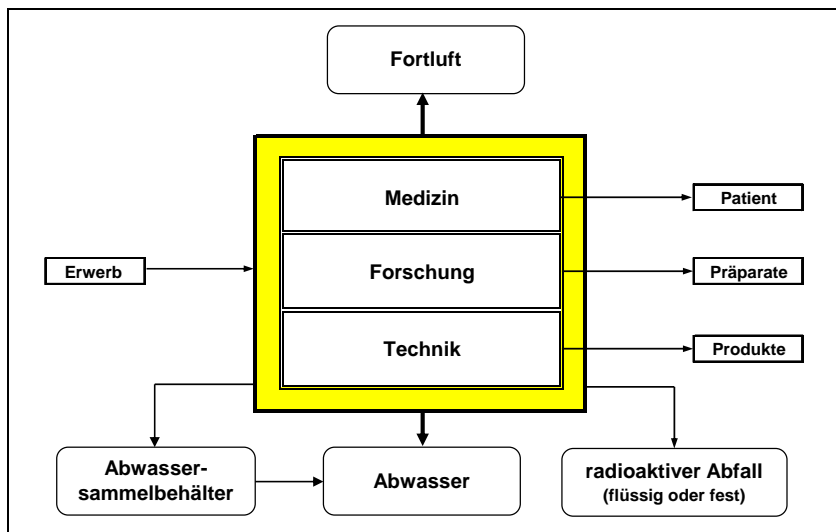


Abb. 1:
Aktivitätsfluss beim Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen in nicht-kerntechnischen Einrichtungen

Die Abb. 1 verdeutlicht in vereinfachter Form den Fluss von radioaktiven Stoffen in Kliniken, in Forschungslaboratorien oder technischen Einrichtungen. Die angedeuteten prinzipiellen Wege sind für jede konkrete Aufgabe zu analysieren.

Handelt es sich um Emissionen von kurzlebigen Radionukliden mit der Fortluft, kann beispielsweise die Höhe der Ableitungen wirkungsvoll durch Verzögerungsstrecken reduziert werden /16, 17/. Handelt es sich um Iod oder Schwefelstoffe mit langlebigen Radionukliden, sollten geeignete Filter eingesetzt werden.

Technische Rückhalteeinrichtungen, wie Abluftfilter, Abwassersammelbehälter, Abklinganlagen, und die chemischen Eigenschaften der eingesetzten radioaktiven Stoffe im Arbeitsprozess sind zu berücksichtigen. Für Parameter, die auf die Freisetzungswahrscheinlichkeit im bestimmungsgemäßen Betrieb Einfluss haben, müssen plausible Annahmen getroffen werden (vgl. Anhänge A und B).



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 5 von 40

Stand: September 2013

3.2 Luftpfad

Die folgenden Überlegungen sind dann anzustellen, wenn für den geplanten Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen im Sinne der DIN 25425-1 /6/ die Raumkategorie RK3 ermittelt wird. Am Beispiel eines radiochemischen Forschungslabors wird gezeigt, wie man mit einfachen Mitteln eine Abschätzung der Abgabe radioaktiver Stoffe über die Fortluft durchführen kann (vgl. Anhang A). Auf andere Anwendungen kann dies sinngemäß übertragen werden.

Zunächst ist für jedes einzelne Radionuklid i , mit dem umgegangen wird, die aus einem einzelnen Laborraum n abgeleitete Aktivität $A_{i,n}$, im Folgenden „Raumemission“ genannt, nach Gl. (1) zu ermitteln. Die Bestimmung der radionuklidspezifischen Gebäudeemission A_i kann für jeweils ein Radionuklid i nach Gl. (2) abgeschätzt werden:

$$A_{i,n} = A_U \cdot H_U \cdot \ddot{U}F_L \quad (1)$$

$$A_i = \sum_n (D_{L,n} \cdot A_{i,n} \cdot K_{L,n}) \quad (2)$$

Dabei bedeuten:

- $A_{i,n}$ radionuklidspezifische Raumemission aus Laborraum n in [Bq/a]
- A_U mittlerer Aktivitätseinsatz pro Umgang in [Bq/Umgang]
- H_U mittlere Umgangshäufigkeit pro Jahr in [Anzahl/a]
- $\ddot{U}F_L$ Übergangsfaktor in Luft
- A_i jährliche mit der Fortluft des Gebäudes abgeleitete Aktivität des Radionuklids i in [Bq/a];
Summe der Beiträge einzelner Laborräume (Gebäudeemission)
- $D_{L,n}$ Filter-Durchlassfaktor des Laborraumes n
- $K_{L,n}$ Abklingfaktor für Laborraum n durch verzögerte Luftableitung

Die berechnete radionuklidspezifische Gebäudeemission A_i ist also eine Summe der Beiträge $A_{i,n}$ aus einzelnen Laborräumen n , in denen ein Umgang mit dem betrachteten Radionuklid i erfolgt, unter Berücksichtigung vorhandener Rückhalteeinrichtungen. Damit müssen der Aktivitätseinsatz pro Jahr [$A_U \cdot H_U$] und die physikalisch-chemischen Eigenschaften der gehandhabten radioaktiven Stoffe bezüglich ihres Freisetzungsverhaltens beurteilt werden. Letzteres ist je nach Radionuklid und dessen chemischer Verbindung, dem Arbeitsprozess, den vorhandenen Lüftungstechnischen Anlagen und Rückhalteeinrichtungen sehr unterschiedlich.

Der **Übergangsfaktor** $\ddot{U}F_L$ charakterisiert die Übergangswahrscheinlichkeit eines Radionuklids in die Luft. Er hängt ab von der chemisch-physikalischen Beschaffenheit des radioaktiven Stoffes und von der Art der Handhabung /6/. Er kann von 1 für Edelgase und gasförmige Verbindungen (z. B. $^{14}\text{CO}_2$) bis zu Werten von weniger als 10^{-6} für nichtflüchtige, feste Stoffe reichen. $\ddot{U}F = 1$ bedeutet einen vollständigen quantitativen Übergang des Radionuklids aus dem Arbeitsprozess in die Abluft.

In Tab. 1 werden Richtwerte für **Durchlassfaktoren** D_L genannt. $D_L = 0,1$ bedeutet, dass 10 % der Aktivität luftgetragener radioaktiver Stoffe vorhandene Filter passieren können und 90 % zurückgehalten werden. Der Durchlassfaktor D_L kann je nach lufttechnischer Anlage sowohl für einzelne Laborräume und/oder für das Gebäude als auch für einzelne Radionuklide verschieden sein. Bei der Planung von Laborausrüstungen können konkrete Angaben zum Rückhaltegrad von Filtern bei den Herstellern erfragt werden. Weitere Angaben sind in /9, 18/ enthalten.



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 6 von 40

Stand: September 2013

Bei der Bewertung der Emissionen kurzlebiger Radionuklide ist ggf. ein **Abklingfaktor** $K_L < 1$ zu berücksichtigen (z. B. infolge Umluftbetrieb oder anderen Abklingeinrichtungen).

Tab. 1: Durchlassfaktoren für luftgetragene radioaktive Stoffe

lufttechnische Anlagen	Durchlassfaktor D_L	Bemerkungen
ohne Abluftfilterung	1	
für Schwebstofffilter	0,001 ... 0,1	für schwebstoffgebundene Radionuklide
	0,1 ... 1	für gasförmige Verbindungen
für Aktivkohlefilter	0,001 ... 0,1	für gasförmige Iod-Verbindungen

Für jeden Arbeitsschritt beim Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen ist ein bestimmtes zeitliches Abgabeverhalten (zeitliches Emissionsmuster) charakteristisch. Man unterscheidet dabei drei wesentliche Varianten:

- dauernd konstant - kontinuierliche Ableitung
- nur bei Handhabung - diskontinuierliche Ableitung
- nur bei Einzelversuchen - Kurzzeitableitung

Bei der Bestimmung der mittleren Aktivitätskonzentration radioaktiver Stoffe in der Fortluft ist die jährlich abgeleitete Fortluftmenge V_L zu berücksichtigen. Bei der Bestimmung von V_L müssen eventuelle Sparschaltungen der Lüftungstechnischen Anlagen berücksichtigt werden. Die mittlere jährliche Aktivitätskonzentration \bar{C}_i des Radionuklids i in der Fortluft kann nach Gl. (3) berechnet werden:

$$\bar{C}_i = \frac{A_i}{V_L} \quad (3)$$

Dabei bedeuten:

- \bar{C}_i mittlere jährliche Fortluft-Aktivitätskonzentration des Radionuklids i in [Bq/m³]
- A_i jährliche mit der Fortluft des Gebäudes abgeleitete Aktivität des Radionuklids i in [Bq/a];
Summe der Beiträge einzelner Laborräume (Gebäudeemission)
- V_L jährliche abgeleitete Fortluftmenge in [m³/a]

3.3 Wasserpfad

Zur Abschätzung des Abwasseraufkommens und der zu erwartenden Aktivitätskonzentration für Radionuklide oder Radionuklidgemische ist eine Analyse der einzelnen Arbeitsprozesse erforderlich. Im übertragenen Sinne gelten die Überlegungen aus 3.2 auch für den Wasserpfad. Nach Gl. (4) kann die abgeleitete Aktivität berechnet werden. Für jedes einzelne Radionuklid gilt:

$$A = A_U \cdot H_U \cdot \ddot{U}F_w \cdot K_w \quad (4)$$

Dabei bedeuten:

- A jährlich mit dem Abwasser abgeleitete Aktivität in [Bq/a]
- A_U mittlerer Aktivitätseinsatz pro Umgang in [Bq/Umgang]
- H_U mittlere Umgangshäufigkeit pro Jahr in [Anzahl/a]
- $\ddot{U}F_w$ Übergangsfaktor als Verhältnis der ins Abwasser freigesetzten Aktivität zur jeweils gehandhabten Aktivität A_U
- K_w Abklingfaktor durch verzögerte Ableitung des Abwassers

Wenn Sammeleinrichtungen für kontaminierte Abwässer installiert sind, ist die Erfassung der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abwasser – im Vergleich zur Fortluft – einfacher durchzuführen, nämlich über eine Probenentnahme und eine Messung der Aktivitätskonzentration sowie der abgeleiteten Abwassermenge.

Wässer, die als flüssige radioaktive Abfälle in Behältern gesammelt und als solche entsorgt werden, sind nicht Gegenstand dieser Betrachtung.

Die Einhaltung der in § 47 (1) StrlSchV festgelegten Grenzwerte ist sichergestellt, wenn im Jahresdurchschnitt die Grenzwerte der Radioaktivitätskonzentrationen gemäß Anlage 7, Teil D StrlSchV im Abwasser nicht überschritten werden. Dabei wird die direkte Nutzung des in das öffentliche Kanalnetz einzuleitenden Abwassers als Trinkwasser unterstellt.

Der Jahresmittelwert der Aktivitätskonzentration für ein Radionuklid i lässt sich nach Gl. (5) berechnen:

$$\bar{C}_i = \frac{A_i}{V_w} \quad (5)$$

Dabei bedeuten:

- \bar{C}_i mittlere jährliche Aktivitätskonzentration des Radionuklids i in [Bq/m³]
- A_i jährliche abgeleitete Aktivität des Radionuklids i mit dem Abwasser in [Bq/a]
- V_w jährliche abgeleitete Abwassermenge [m³/a]

Bei der Abwassereinleitung (vgl. Abb. 2) ist als Bezugspunkt für den Konzentrationsgrenzwert im Sinne der DIN 25425-1 /6/ der Abwasserkanal an der Stelle der Einleitung in das öffentliche Kanalnetz zu betrachten. Für Einrichtungen wie Kliniken, Forschungsinstitute oder Industrieunternehmen bedeutet dies, dass für die zu bilanzierende Abwassermenge je nach Abwasserführung sowohl Abwasser aus Strahlenschutzbereichen als auch aus den anderen, konventionellen Bereichen der Einrichtungen einzubeziehen sind.

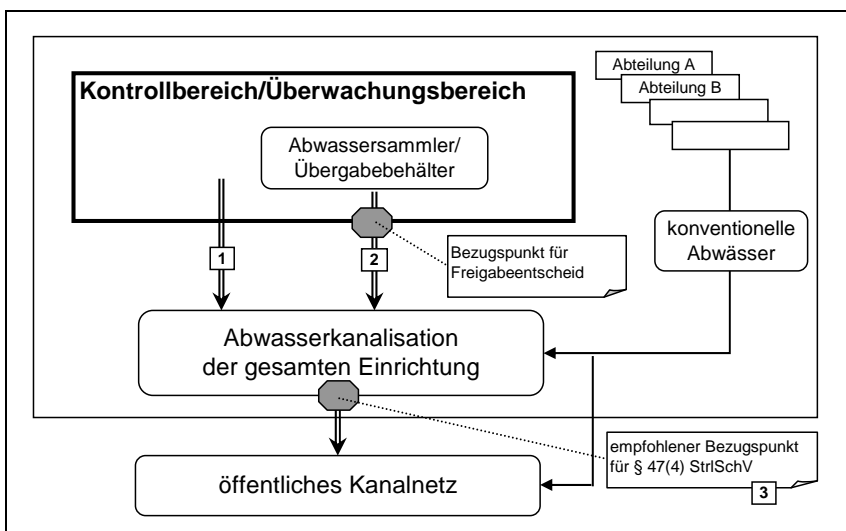


Abb. 2:
 Abwasserschema und Bezugspunkte für Konzentrationsgrenzwerte

- 1 Ableitweg für Anwender **ohne** Sammeleinrichtung (rechnerische Abschätzung der abgeleiteten Aktivität)
- 2 Ableitweg für Anwender **mit** Sammeleinrichtung (messtechnische Kontrolle)
- 3 Dieser Bezugspunkt wird für den Antrag auf Genehmigung empfohlen. Die zuständige Behörde muss dies bestätigen.

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens weist der Antragsteller für den in Abb. 2 empfohlenen Bezugspunkt die Einhaltung der mit § 47 (4) StrlSchV gegebenen Grenzwerte nach. Dieser Bezugspunkt (vgl. 3 in Abb. 2) gilt vorbehaltlich der Zustimmung der zuständigen Behörde. Die Abwassermenge V_w in Gl. (5) ist dann die Summe der Abwassermengen aus Strahlenschutzbereichen und aus konventionellen Bereichen.



3.4 Bewertung der Ableitungen

Radioaktive Emissionen können im Rahmen einer Umgangsgenehmigung von der Genehmigungsbehörde dann zugelassen werden, wenn unter Beachtung von § 47 (1) StrlSchV eine der beiden Voraussetzungen erfüllt ist:

1. Für die aus den Strahlenschutzbereichen mit der Fortluft oder dem Abwasser abgeleiteten Radionuklide oder Radionuklidgemische können die in Anlage VII, Teil D StrlSchV genannten maximal zulässigen Konzentrationswerte im Jahresmittel eingehalten werden.
Genehmigungskriterium sind hier die Konzentrationsgrenzwerte. Dabei darf die Einhaltung dieser Konzentrationsgrenzwerte nicht durch gezielte Verdünnungsmaßnahmen erreicht werden. Sie müssen – über das Jahr gemittelt – für ein Radionuklid oder als Summe für ein Radionuklidgemisch eingehalten werden. Es spielt keine Rolle, ob die Ableitungen als Einzelemissionen oder kontinuierlich, mit über das Jahr konstanten Emissionsraten erfolgen.
In diesem Fall brauchen keine Dosisabschätzungen durchgeführt zu werden.
2. Die Behörde erteilt eine Genehmigung nach § 47 (3) StrlSchV, wenn das unter 1. genannte Konzentrationskriterium nicht erfüllt ist, aber durch eine Dosisberechnung nachgewiesen wurde, dass die Dosisgrenzwerte nach § 47 (1) StrlSchV für die betreffende Einrichtung unter Berücksichtigung der Vorbelastung durch andere Anlagen oder Einrichtungen für Bezugspersonen aus der Bevölkerung eingehalten werden. Bei einem solchen Vorgehen können durchaus höhere Konzentrationswerte als gem. Anlage VII, Teil D StrlSchV oder aber auch maximal zulässige Jahresabgaben festgelegt werden.

Mit Hilfe der in 3.2 und 3.3 beschriebenen Vorgehensweise ist für die meisten Anwender für jedes Umgangsnuklid eine Aussage möglich, ob die in § 47 (4) StrlSchV festgelegten Aktivitätskonzentrationswerte im Jahresdurchschnitt eingehalten werden. Beim Umgang mit einem Radionuklidgemisch oder mit mehreren Radionukliden ist die sog. „Summenformel“ zu berücksichtigen (vgl. Anlage VII, Teil D StrlSchV). Bei allen Betrachtungen sind stets auch die jeweiligen Tochternuklide zu berücksichtigen.

Die maximal zulässigen nuklidspezifischen Aktivitätskonzentrationen für Radionuklide, die mit der **Fortluft** aus Strahlenschutzbereichen abgeleitet werden dürfen, sind in Anlage VII, Teil D, Tab. 4 und Tab. 5, Spalte 2 StrlSchV genannt. Für Radionuklidgemische ist Anlage VII, Teil D, Tab. 6, Spalte 2 heranzuziehen. Die zulässigen Radionuklidkonzentrationen für Ableitungen mit der Fortluft können im Jahresdurchschnitt das 10fache der jeweiligen in der StrlSchV genannten Werte dann betragen, wenn der Fortluftstrom unter 10.000 m³/h liegt. Damit muss im Rahmen des Genehmigungsverfahrens kein weiterer Nachweis der Einhaltung der Dosisgrenzwerte erfolgen. Andernfalls muss nach einer Dosisabschätzung die Festlegung der zulässigen Ableitungswerte radioaktiver Stoffe mit der Fortluft gemäß §47 (3) StrlSchV erfolgen.

Anwender, deren abgeleitetes **Abwasser** im Jahresmittel eine Aktivitätskonzentration von 1/3 der in Anlage VII, Teil D, Tab. 4, Spalte 3 StrlSchV festgelegten Grenzwerte nicht überschreitet, können auf messtechnische Bilanzierungsmessungen verzichten. Hier ist lediglich eine rechnerische Bilanzierung der abgeleiteten radioaktiven Stoffe erforderlich (vgl. Kap. 4.3). Die StrlSchV gestattet im Teil D das 10fache der in Anlage 7, Teil D StrlSchV genannten Werte, wenn die jährliche Abwassermenge unter 100.000 m³ liegt.

In den **Anhängen A und B** werden für ausgewählte Anwendungsbereiche die Ermittlung und Bewertung der Ableitungen radioaktiver Stoffe anhand von Beispielen erläutert und spezifische Hinweise zur Überwachungspraxis gegeben. Die Verwendung der o. g. Summenformel bei Umgang mit mehreren Radionukliden wird näher erläutert.

Der **Anhang C** enthält in Anlehnung an /7/ Hinweise für eine Dosisabschätzung für Personen in der Umgebung der Einrichtung, wenn eine Überschreitung der maximal zulässigen Konzentrationen nach Anlage VII, Teil D StrlSchV in der Fortluft nicht vermieden werden kann.



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 9 von 40

Stand: September 2013

4 Entscheidungskriterien für Maßnahmen der Emissionsüberwachung

4.1 Vorbemerkungen

Die Maßnahmen zur Überwachung der Ableitungen radioaktiver Stoffe erfordern je nach Art des Umgangs mit radioaktiven Stoffen und je nach Dosisrelevanz der Emissionen einen unterschiedlichen Aufwand. Grundsätzlich können drei Möglichkeiten der Überwachung unterschieden werden:

1. Rechnerische Abschätzung der abgeleiteten Aktivität aufgrund des Arbeitsablaufs im Laboratorium oder im Betrieb,
2. Entnahme von Stichproben und Durchführung von Messungen (Messung der Bruttoaktivität und ggf. Einzelradionuklidbestimmungen),
3. Kontinuierliche Probenentnahme oder Entnahme repräsentativer Sammelproben und nuklid-spezifische Messung, ggf. kontinuierliche Messung.

Die hier vorgenommene Einteilung hängt vom Freisetzungverhalten der eingesetzten Radiochemikalien und den verwandten Verfahren in Radionuklidlaboratorien ab. Nach DIN 25425-1 sind grundsätzlich Fortluftfilterungen und Abwassersammlung erforderlich, wenn radioaktiv kontaminierte Fortluft oder radioaktiv kontaminiertes Abwasser anfallen, bei denen eine Überschreitung der nach StrlSchV festgelegten Werte zu erwarten ist. In Radionuklidlaboratorien der Raumkategorie RK3 können Probenentnahmevorrichtungen und Messungen erforderlich sein.

Wenn Messungen durchgeführt werden müssen, sollten Überwachungsprogramme für jede der zu überwachenden Radionuklidgruppen, folgende Angaben enthalten:

- eingesetztes Probenentnahme- und Probenaufbereitungsverfahren (z. B. Luftschwebstoffprobensammler, Wasserrückstellproben, usw.),
- Überwachungszyklen / Sammelzeiten,
- Beschreibung der Messverfahren.

In einem erläuternden Teil dieses Überwachungsprogramms sollte der Nachweis geführt werden, dass die verwendeten Messverfahren, je nach Radionuklidgruppe, für die Kontrolle der Einhaltung der Werte für die zulässige Aktivitätsableitung nach §§ 47 und 67 StrlSchV geeignet sind.

Die Messaufgaben umfassen neben nuklidspezifischen Analysen von α -, β - oder γ -strahlenden Radionukliden auch deren Gesamtaktivitätsbestimmung. In vielen Fällen ist es ausreichend, eine Gesamtaktivitätsmessung durchzuführen und für die betrachtete Radionuklidgruppe ein Bezugsnuklid zu definieren. Es ist dadurch gekennzeichnet, dass es gegenüber den anderen Umgangsnukliden der Gruppe dosisbestimmend ist. Allerdings müssen zur Erfüllung des § 48 (1) StrlSchV auch Kenntnisse über die Nuklidzusammensetzung (Aktivitäten von Einzelnucliden) zur Nennung der nuklidspezifischen Ableitungen vorhanden sein. In begründeten Fällen kann dann als Bezugsnuklid auch ein leicht messbares Radionuklid gewählt werden. Es ist zweckmäßig, das Bezugsnuklid als Kalibrierstandard für die Bestimmung der Gesamtaktivität im Labor zu verwenden.

4.2 Fortluftüberwachung

Die DIN 25425-1 /6/ enthält folgende Vorgaben: "Zur Überwachung der Räume der Raumkategorie RK3 kann die feste Installation zur Probenentnahme oder Messung der Aktivitätskonzentration in der Raum- und Fortluft erforderlich sein. In Radionuklidlaboratorien ist bei den Raumkategorien RK2 und RK3 die Möglichkeit zur Nachrüstung von Einrichtungen zur Filterung der Fortluft bei der baulichen Auslegung vorzusehen. Zur Überwachung der Aktivität in der Abluft sind bei den Raumkategorien RK2 und RK3 „in den Abluftkanälen und im Fortluftkanal Probenentnahmeöffnungen vorzusehen, die leicht und gefahrlos erreichbar sein müssen und eine quasi-isokinetische Probenentnahme ermöglicht.“



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 10 von 40

Stand: September 2013

Bei Radionuklidlaboratorien bis zu RK2 oder RK3 kann demnach eine Abschätzung der Ableitung aus den Umgangs- und Lüftungsdaten (vgl. Kap. 3.2) je nach Laborauslegung und Umgangsart bereits ausreichend sein. Bei neuen Einrichtungen empfiehlt sich schon im Hinblick auf mögliche spätere Erweiterungen eine vorsorgliche Installation einer Probenentnahmeeinrichtung unter Beachtung der Vorgaben aus /9/.

Einrichtungen zur Fortluftüberwachung:

1. Periodisch diskontinuierliche Probenentnahme und Laboranalyse (Sammler) werden eingesetzt, wenn das Aktivitätsinventar in der Einrichtung und die Emissionen gering sind. Die Ausschöpfung der Grenzwerte nach § 47 StrlSchV ist ausgeschlossen. Der Nachweis des bestimmungsgemäßen Betriebes der Einrichtung kann durch Messungen erfolgen.
2. Kontinuierliche Probenentnahme und diskontinuierliche Laboranalyse (Sammler) sind sinnvoll, wenn das Aktivitätsinventar in der Einrichtung hoch ist und kontinuierliche Emissionen zu erwarten sind. Die Ausschöpfung der Grenzwerte nach § 47 StrlSchV ist im bestimmungsgemäßen Betrieb der Einrichtung ausgeschlossen. Messungen können dem Nachweis des bestimmungsgemäßen Betriebes, der lückenlosen Bilanzierung der Ableitungen und der Kontrolle der Einhaltung der Konzentrations- und Dosisgrenzwerte dienen.
3. Kontinuierliche Probenentnahme und Messung (Monitoring) ist bei hohem Aktivitätsinventar der Einrichtung und möglichen kurzzeitigen Emissionen zu empfehlen. Die Messungen dienen dem Nachweis des bestimmungsgemäßen Betriebes, der lückenlosen Bilanzierung der Ableitungen und der Kontrolle der Einhaltung der Grenzwerte nach § 47 StrlSchV.

Hinweise auf Methoden zur Aktivitätsbestimmung an Filtern, oder anderen Sorptionsmaterialien sind in verschiedenen Empfehlungen enthalten, z.B. /11, 13, 20/, sie werden hier nicht näher erläutert. Bei der Überwachung kurzlebiger Radionuklide mit Luftsammlern ist bei der Festlegung des Messzyklus das Abklingen während der Beaufschlagung zu berücksichtigen. Wenn diskontinuierliche Arbeiten mit periodischen Ableitungen oder Kurzzeitableitungen zu erwarten sind, sollte der Einsatz eines oder mehrerer Monitoren, die für die jeweilige Radionuklidüberwachung geeignet sind, geprüft werden.

Für die technische Auslegung von Einrichtungen zur Überwachung und Bilanzierung luftgetragener radioaktiver Stoffe sind in **Anhang D** einige Hinweise aufgeführt und erreichbare Nachweisgrenzen für einige Monitoren angegeben.

4.3 Abwasserüberwachung

Für Anwendungsbereiche, aus denen radioaktives Abwasser abgeleitet wird, müssen nach § 47 (4) StrlSchV die in Anlage VII Teil D StrlSchV aufgeführten Radionuklid-Konzentrationen im Jahresmittel eingehalten werden, wenn die jährlich abgeleitete Abwassermenge den Wert von 10^5 m^3 überschreitet. Bei jährlichen Abwassermengen von weniger als 10^5 m^3 dürfen die Radionuklid-Konzentrationen das 10fache der in Anlage VII aufgeführten Werte im Jahresdurchschnitt nicht überschreiten.

Das in Tab. 2 dargestellte Schema dient als Orientierung bei der Entscheidung für eine rechnerische Abschätzung oder eine Bestimmung der Aktivitätskonzentration an repräsentativen Proben. Danach kann eine rechnerische Abschätzung der mit dem Abwasser abgeleiteten Aktivität durchgeführt werden, wenn zu erwarten ist, dass die Radionuklid-Konzentrationen im Abwasser kleiner sind als ein Drittel der in Anlage VII Teil D StrlSchV aufgeführten Werte. Anderenfalls sind repräsentative Proben des abzuleitenden Abwassers zu entnehmen und radionuklidspezifische Messungen oder auch Messungen der Bruttoaktivität durchzuführen. Aus der abgeleiteten Abwassermenge und den gemessenen Konzentrationen lässt sich die jährlich abgeleitete Aktivität ermitteln, die nach § 48 (1) StrlSchV der zuständigen Behörde anzuzeigen ist.

Die Abwasser-Konzentrationswerte in Anlage VII Teil D StrlSchV wurden auf der Basis der Einhaltung des 0,3-mSv-Konzeptes nach § 47 (1) StrlSchV für den Trinkwasserpfad berechnet. Ein Drittel dieses Dosiswer-



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 11 von 40

Stand: September 2013

tes entspricht dem Wert von 0,1 mSv, der infolge der Zufuhr radioaktiver Stoffe mit dem Trinkwasser pro Jahr nach der Trinkwasserverordnung /21/ nicht überschritten werden darf.

Tab. 2: Methoden zur Bestimmung der mit dem Abwasser abgeleiteten radioaktiven Stoffe

Klassifizierung	Methode zur Bestimmung der abgeleiteten Aktivität
$\bar{C}_i < \frac{1}{3} \cdot G_i$	Plausible Abschätzung (Berechnung) aus der gehandhabten Aktivität aufgrund des Arbeitsablaufs im Laboratorium
$\bar{C}_i \geq \frac{1}{3} \cdot G_i$	Repräsentative Probenentnahme und Messung

In Tab. 2 bedeuten:

\bar{C}_i mittlere jährliche Aktivitätskonzentration des Radionuklids i in [Bq/m³]

G_i jährliche maximal zulässige Ableitung des Radionuklids i mit der Fortluft oder dem Abwasser in [Bq/a]

Die in Tab. 2 dargestellte Klassifizierung wird nachfolgend erläutert:

1. $\bar{C}_i < \frac{1}{3} \cdot G_i$

Wenn Ableitungen mit einer mittleren jährlichen Aktivitätskonzentration kleiner $\frac{1}{3}$ der Grenzwerte nach § 47 (4) StrlSchV erwartet werden, kann die zu bilanzierende Aktivitätsableitung mit dem Abwasser aus den Bezugsmengen aufgrund der Arbeitsabläufe und der Art der Handhabung im Laboratorium, insbesondere unter Berücksichtigung der insgesamt in der Einrichtung anfallenden Abwassermenge, abgeschätzt werden. Hinweise dazu enthält Abschnitt 3.3.

2. $\bar{C}_i \geq \frac{1}{3} \cdot G_i$

Können Ableitungen mit einer mittleren jährlichen Aktivitätskonzentration von $\frac{1}{3}$ der Grenzwerte nach § 47 (4) StrlSchV oder größer nicht ausgeschlossen werden, sind nach /6/ Abwassersammelanlagen erforderlich, und es muss eine Erfassung der Ableitungen durch Probenentnahme und Messung erfolgen. Der messtechnische Nachweis der Einhaltung der Konzentrationswerte erfolgt in Abhängigkeit der zu überwachenden Radionuklide oder Radionuklidgruppen durch Bestimmung der Aktivitätskonzentration mittels

- γ -Spektrometrie und/oder
- α - und/oder β -Gesamt-Aktivitätsmessung unter Berücksichtigung eines geeigneten Nuklidvektors, ggf. γ -Spektrometrie und/oder
- Flüssigszintillationsmessungen zur Aktivitätsbestimmung reiner β -Strahler, wie z. B. H-3, C-14, P-32, S-35.

Die Bestimmung der Aktivitätskonzentration an repräsentativen Proben aus Sammelbehältern dient zur Bilanzierung der Ableitungen. Es sind geeignete Rückstellproben zur Beweissicherung aufzubewahren. Um bei der Bilanzierung die an Fest- und Schwebstoffen haftende Aktivität zu erfassen, ist vor Beprobung eine gute Durchmischung des abzuleitenden Abwassers zu gewährleisten.

Unter Umständen sind laborinterne Prüfwerte für die Aktivitätskonzentration der Einzelableitungen aus den Sammelbehältern festzulegen, um die Einhaltung der Grenzwerte nach Anlage VII, Teil D StrlSchV im Jahresmittel sicherzustellen.



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 12 von 40

Stand: September 2013

Als ergänzende Maßnahme kann eine kontinuierliche Probenentnahme oder die Gewinnung von Sammelproben im Abwasserkanal vor Eintritt in die öffentliche Kanalisation vorgesehen werden. Die Probenentnahme sollte mengenproportional zum abfließenden Abwasser erfolgen. Der Sammelzeitraum kann frei gewählt werden, sollte vier Wochen aber nicht überschreiten. Die Proben sollten hinsichtlich der konkreten Umgangsnuklide des betreffenden Labors untersucht werden. Die so gewonnenen Proben können auch zum Zweck der Beweissicherung aufbewahrt werden. Zusätzlich zur Bestimmung der Aktivitätskonzentration wird die abgeleitete Abwassermenge erfasst.

Da bei den Abwasser-Überwachungseinrichtungen in der Regel keine Monitorverfahren eingesetzt werden, sondern alle Bilanzierungen über eine Probenentnahme mit anschließender Labormessung durchgeführt werden, sind geeignete Messverfahren zu verwenden, wie sie z. B. in obiger Ziffer 2 genannt und u. a. in /10, 11, 12, 13/ beschrieben sind.

Diejenigen radioaktiven Stoffe, die aufgrund spezieller Arbeitsprozesse in hohen Konzentrationen angewandt werden oder anfallen und aufgrund ihres relativ geringen Volumens als radioaktive Abfälle separat gesammelt werden, bleiben bei der Bilanzierung der mit dem Abwasser abgeleiteten Stoffe unberücksichtigt. Ebenfalls unberücksichtigt bleiben die radioaktiven Stoffe, die nach nuklearmedizinischer Diagnostik oder Therapie in Form von Patientenausscheidungen außerhalb der nuklearmedizinischen Einrichtung in die öffentliche Kanalisation gelangen. Hinsichtlich der nuklearmedizinischen Diagnostik sind in Anhang B weitere Ausführungen enthalten.

Die DIN 25425-1 /6/ enthält keine Vorgaben zur Überwachung der Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser, sondern definiert unabhängig von der jeweiligen Raumkategorie Kriterien für die Installation von Wassersammel- und Abklinganlagen in Abhängigkeit von der erwarteten Abwassermenge. Nach dieser Norm ist eine Abwasseranlage dann vorzusehen, wenn pro Laborraum mehr als 1 m³ radioaktives Abwasser je Quartal anfallen. In /6/ wird darauf hingewiesen, dass die Entnahme einer repräsentativen Abwasserprobe möglich ist und die Entlüftung der Abwasser-Sammelanlage unter den Kriterien der Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Luft zu betrachten ist.

5 Dokumentation, Qualitätssicherung und Berichterstattung

Bereits in der Projektierungs- und Genehmigungsphase ist eine vollständige Systembeschreibung mit Angaben zur Probenentnahme, Messung und Bilanzierung sowie der technischen Parameter der Überwachungsanlage vorzulegen. Es sollten Verweise auf zu berücksichtigende DIN-Normen und Regelungen enthalten sein. Darüber hinaus sind Beschreibungen und Fließschemata hilfreich, aus denen die Luft- bzw. Wasserführung in die Umgebung hervorgeht und in denen die Probenentnahme- und Messstellen eingetragen sind. Relevante technische Daten der lufttechnischen Anlage (Kaminhöhe, Durchmesser, Kaminvolumenstrom, usw.) und des Abwassersystems (Auffangbehältervolumen, Abwasseranfall pro Jahr, usw.) sind zu dokumentieren.

Die prognostizierten Emissionsraten pro Umgang oder pro Jahr sowie die abgeschätzten, mittleren Aktivitätskonzentrationen in der Fortluft bzw. im Abwasser sind zu begründen und zu erläutern. Die Radionuklidzusammensetzungen, die in Fortluft bzw. Abwasser auftreten können, sind ebenso wie die mögliche physikalische und chemische Form der Radionuklide anzugeben und zu belegen. Das zeitliche Muster der Ableitungen (kontinuierlich, periodisch oder kurzzeitig) ist zu berücksichtigen und zu dokumentieren.

Falls von der zuständigen Aufsichtsbehörde gefordert, sollte die Abschätzung der zu erwartenden Strahlenexposition für Personen in der Umgebung infolge Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Fortluft alle relevanten Annahmen zur Emission, zur Meteorologie sowie zu den betrachteten Aufpunkten in der Umgebung und Expositionsprofilen enthalten (vgl. Anhang C).

Für die Überwachung der radioaktiven Ableitungen sind Sammel- und Messgeräte nach dem Stand von Wissenschaft und Technik einzusetzen. Direktanzeigende Messgeräte und deren Signalisierung wie auch stationäre Messgeräte sind wiederkehrend nach einem Prüfplan zu prüfen. Neben regelmäßigen laborinternen



Qualitätskontrollen sollten auch Vergleichsmessungen, z. B. regelmäßige Teilnahme an nationalen und/oder internationalen Ringversuchen, zur laborexternen Qualitätskontrolle genutzt werden.

Gemäß § 48 StrlSchV ist der zuständigen Behörde mindestens jährlich die tatsächlich erfolgte Ableitung radioaktiver Stoffe, spezifiziert nach Radionukliden und Aktivität, anzuzeigen.

6 Literatur

- /1/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), vom 20.07.2001, BGBl. 2001 Teil 1 Nr.38, S. 1714, zuletzt geändert am 24.02.2012 (BGBl. I Nr.51, S. 1714)
- /2/ Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) vom 07.12.2005 (GMBl. Nr. 14-17 vom 23.03.2006, S. 254)
- /3/ Überwachung der Ableitung gasförmiger und an Schwebstoffen gebundener radioaktiver Stoffe, Sicherheitstechnische Regel des Kerntechnischen Ausschusses (KTA), Teil 1: Überwachung der Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Kaminfortluft bei bestimmungsgemäßen Betrieb, KTA-Regel 1503.1, Fassung 06/02; Bundesanzeiger Nr. 172 vom 13.09.2002
- /4/ Überwachung der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Wasser, Sicherheitstechnische Regel des Kerntechnischen Ausschusses (KTA), KTA-Regel 1504, Neufassung vom 15.07.94, Bundesanzeiger Nr. 238a, 20.12.1994, zuletzt geändert November 2007
- /5/ Strahlenschutz in der Medizin - Richtlinie zur Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung–StrlSchV) vom 17.10.2011 RS II 4 – 11432/1 veröffentlicht am 30.11.2011, Gemeinsames Ministerialblatt 44-47/2011, S. 867 ff
- /6/ DIN 25425-1: 2013-05, Radionuklidlaboratorien; Teil 1: Regeln für die Auslegung
- /6a/ Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosen, Teil II: Ermittlung der Körperdosis bei innerer Strahlenexposition (Inkorporationsüberwachung) (§§ 40, 41 und 42 StrlSchV), Anhang 3.1, RS II 3 - 15530/1 vom 12.01.2007;
- /7/ Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung (Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen) vom 28.08.2012, Bundesanzeiger BAnz AT 05.09.2012 B1
- /8/ H. Völkle, F. Cartier, K. Heinemann, H. Rühle: Die Dosisrelevanz einzelner Expositionspfade; Strahlenschutzpraxis 2/95, S.32, TÜV-Verlag GmbH, Köln
- /9/ DIN ISO 2889: 2012-07, Probenentnahme von luftgetragenen radioaktiven Stoffen aus Kanälen und Kaminen kerntechnischer Anlagen (ISO 2889:2010)
- /10/ Leitstellen für die Überwachung der Umweltradioaktivität: Messanleitungen für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt und zur Erfassung radioaktiver Emissionen aus kerntechnischen Anlagen, Loseblattsammlung, BMU, Stand: 01.09.2012, http://www.bmu.de/strahlenschutz/ueberwachung_der_umweltradioaktivitaet/messanleitungen/doc/42042.php
- /11/ E. Frenzel, R. Maushart: Emissions- und Immissionsüberwachung bei kerntechnischen Anlagen – Überblick über den Stand der Messtechnik; Kompendium der Sommerschule für Strahlenschutz; 5. Auflage 1997, H. Hoffmann Verlag, Berlin
- /12/ I. Gans, H. Rühle: Vorschriften zur Überwachung von Abwasser, Kompendium der Sommerschule Strahlenschutz; 3. Auflage 1993; H. Hoffmann Verlag, Berlin
- /13/ M. Winter, J. Narrog, W. Kukla, M. Vilgis (Red.): Empfehlungen zur Überwachung der Umweltradioaktivität. Loseblattsammlung des Arbeitskreises Umweltüberwachung (AKU), FS-78-15-AKU, 6. Teillieferung März 2004, erschienen in der Publikationsreihe „Fortschritte im Strahlenschutz“ des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V.; aktuell im Internet: <http://osiris22.pi-consult.de/view.php3?show=5100016102053>



- /13a/ Empfehlung für die Anwendung der Richtlinie zur Inkorporationsüberwachung im Bereich der Nuklearmedizin, Bundesamt für Strahlenschutz, Leitstelle Inkorporationsüberwachung des BfS, Fachbereich Strahlenschutz und Gesundheit, Ingolstädter Landstr.1, 85764 Oberschleißheim, verabschiedet am 10.06.2008 in Würzburg; (GMBI 2009 Nr. 12-14 S. 266, 5.1.2009), (http://www.bfs.de/ion/beruf_schutz/inkorpueberwach)
- /14/ Strahlenexposition von Personen durch nuklearmedizinisch untersuchte Patienten, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 152. Sitzung am 23./24.4.1998, veröffentlicht in: Nuklearmedizin 1998; 37 (5) S. 51-56
- /15/ Strahlenschutzgrundsätze für die Radioiod-Therapie, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet am 5./6. 12.1996; Bundesanzeiger Nr. 68 vom 11.04.1997, S. 4769/4770
- /16/ K. Ewen: Luftradioaktivität am PET-Zyklotron; Strahlenschutzpraxis 4/95, S. 53, TÜV-Verlag GmbH, Köln
- /17/ P. Nemecek: Abluftüberwachungssysteme für PET-Zentren; Strahlenschutzpraxis 1/95, S. 40, TÜV-Verlag GmbH, Köln
- /18/ DIN EN 779: 2012-10, Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumlufttechnik - Bestimmung der Filterleistung
- /19/ DIN ISO 2889: 2012-07, Probenentnahme von luftgetragenen radioaktiven Stoffen aus Kanälen und Kaminen kerntechnischer Anlagen;
DIN ISO 2889, Beiblatt 4: 2012-10, Probenentnahme von luftgetragenen radioaktiven Stoffen aus Kanälen und Kaminen kerntechnischer Anlagen - Beiblatt 4: Sammelverfahren
- /20/ DIN ISO 11929: 2011-01, Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung – Grundlagen und Anwendungen (ISO 11929:2010)
- /21/ Trinkwasserverordnung; Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung vom 21. Mai 2001 (BGBl. 2001 Teil I Nr. 24 vom 28.05.2001, Bonn), zuletzt geändert am 01.11.2011 (BGBl. I S. 3044, 3047)
- /22/ Daten und Fakten zum Umgang mit Radionukliden und zur Dekontamination in Radionuklidlaboratorien, Fachverband für Strahlenschutz, Arbeitskreis Praktischer Strahlenschutz, FS-99-103-AKP, ISSN 1013-4506, 01.01.1999
- /23/ Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition.; Bundesanzeiger Nr. 160a und 160b vom 28.08.2001
- /24/ T. Ibach, R. Scheuer: Raumluftaktivitätsüberwachung auf Uran und Transurane; Abschlussbericht zum Vorhaben St.Sch 4055 vom 30.06.1996, TÜV Energie- und Systemtechnik GmbH, TÜV Bayern
- /25/ D. Noske: Bekanntmachung der aktualisierten diagnostischen Referenzwerte für nuklearmedizinische Untersuchungen, Bundesamt für Strahlenschutz, 25.09.2012, http://www.bfs.de/de/ion/medizin/diagnostik/drw_nuklearmedizin.pdf



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 15 von 40

Stand: September 2013

Anhang A Emissionsüberwachung in nicht-kerntechnischen Arbeitsbereichen von Forschung und Technik - Empfehlungen für die Praxis / Berechnungsbeispiele

1 Anwendungsbereiche

Die folgende Zusammenstellung enthält eine Auflistung überwachungsbedürftiger Einrichtungen in Forschung und Technik, ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Anwendungen in der Medizin sind im Anhang B genannt.

Radionuklidlaboratorien Durchführung von Arbeiten mit offenen radioaktiven Stoffen

Radiochemische Laboratorien	Aufarbeitung von Radionukliden aus der Radionuklidproduktion; Herstellung von markierten Verbindungen mit Radionukliden wie z. B. H-3, C-14, I-125
Radiotracerlaboratorien	Einsatz von markierten Verbindungen für Umwelt-, Medizin- und Technik-Forschung. In der Forschung im Bereich der Biologie, Biochemie und der Pharmazie überwiegender Einsatz von H-3, C-14, P-32, P-33, S-35, Ca-45, Cr-51, Fe-55, Rb-85, I-125
Präparateherstellung	Herstellung von Referenzquellen mit Radionukliden, wie z. B. H-3, C-14, Cl-36, Fe-55, Co-57, Co-60, Ni-63, Sr-90, Tc-99, Ru-106/Rh-106, I-125, I-129, Ba-133, Cs-137, Pm-147, Tl-204, Po-210, Th-230, U-234, Natururan, Pu-238, Am-241

Beschleunigerbetrieb

Isotopenproduktion	Herstellung von Radionukliden für Forschung, Medizin und Technik (Aufbereitung siehe Radionuklidlaboratorien): Für die Medizin: z. B. C-11, F-18, Rb-81/Kr-81m, I-123, Für Forschung und Technik: z. B. Be-7, Na-22, Mg-28, Mn-54, Co-57, Fe-55, Cu-64, Zn-65, Sr-85, Y-88, Ag-105, Cd-109, In-111, Ce-139, Au-195
Targetbeschuss	H-3-Targets (Aktivierung der Raumluft)
Aktivierungsanalyse	Im Probenmaterial durch Aktivierung erzeugte Radionuklide (Luftaktivierung beispielsweise bei Elektronenbeschleunigern ab Beschleunigerenergien oberhalb 10 MeV)

Andere Anwendungsbereiche

Verbrennungsanlagen	Beim Verbrennungsprozess freigesetzte Radionuklide, wie z. B. H-3, C-14, Cs-137. Im Verbrennungsrückstand verbleibende Radionuklide wie z. B. Cs-137, Ra-226
Messlaboratorien	unabhängige und kommerzielle Laboratorien
Uhrenindustrie	Verarbeitung von H-3 und Pm-147, Altlasten von Ra-226
Landessammelstellen für radioaktive Abfälle (mit Konditionierung)	Radionuklide in Abfällen aus Forschung, Medizin und Technik



2 Ermittlung der Ableitungen radioaktiver Stoffe

Am Beispiel zweier unterschiedlicher Radionuklidlaboratorien soll im Folgenden die Ermittlung der abgeleiteten Aktivität erläutert werden. Dabei sind die Gl. A-1 und A-2 für jedes Radionuklid hinsichtlich seiner Handhabung (Umgangsmenge, Flüchtigkeit, Rückhaltevermögen, Halbwertzeit,...) separat anzuwenden. Sie entsprechen denen im Kap. 3.2. bzw. 3.3. des Hauptteils.

Die jährlich mit dem Abwasser in das öffentliche Kanalnetz oder mit der Fortluft in die Atmosphäre abgeleitete Aktivität kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$\text{Luftpfad:} \quad A = A_U \cdot H_U \cdot \ddot{U}F_L \cdot K_L \cdot D_L \quad (\text{A-1})$$

$$\text{Wasserpfad:} \quad A = A_U \cdot H_U \cdot \ddot{U}F_W \cdot K_W \quad (\text{A-2})$$

Dabei bedeuten:

- A jährliche mit der Fortluft je Laborraum bzw. mit dem Abwasser abgeleitete Aktivität in [Bq/a]
- A_U Aktivitätseinsatz pro Umgang in [Bq/Umgang]
- H_U mittlere Umgangshäufigkeit pro Jahr in [Anzahl/a]
- D_L Filter-Durchlassfaktor
- $\ddot{U}F_L$ Übergangsfaktor in Luft als Verhältnis der in die Raumluft freigesetzten Aktivität zur jeweils gehandhabten Aktivität
- $\ddot{U}F_W$ Übergangsfaktor in das Abwasser als Verhältnis der ins Abwasser freigesetzten Aktivität zur jeweils gehandhabten Aktivität
- K_L Abklingfaktor durch verzögerte Luftableitung (z.B. bei PET)
- K_W Abklingfaktor durch verzögerte Ableitung des Abwassers (Abklinganlagen)

Übergangs- und Abklingfaktoren für den Abwasserpfad

Beim Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen hängt die Aktivität, die beim Arbeiten in das Abwasser gelangt, in der Praxis wesentlich davon ab, wie die Arbeitsabläufe organisiert und überwacht werden. Der Anteil der gehandhabten Aktivität, der ins Abwasser gelangt, hängt ab von der Art der Handhabung, dem Arbeitsverhalten und der Abfallführung.

Zur Berechnung der abgeleiteten Aktivität ist für den Übergangsfaktor $\ddot{U}F_W$ der Wert 1 einzusetzen, wenn Arbeiten mit radioaktiv markierten Verbindungen durchgeführt werden, bei denen die gehandhabten Aktivitäten ohne Rückhaltung über Abwassersammeltanks in den Vorfluter bzw. in die Kanalisation gelangen. $\ddot{U}F_W = 0$ gilt, wenn kontaminiertes Abwasser am Arbeitsplatz in Behältnissen gesammelt wird und im Laborbereich keine Spül- oder Wasserbecken installiert sind. In Tab. A-1 sind Übergangsfaktoren für Abwasser zusammengefasst.

Bei Abwassersammelanlagen, die im Allgemeinen aus mehreren Auffangbehältern bestehen, wird der Wert für K_W je Radionuklid zwischen 1 und 0,01 liegen ($K_W = 0,01$ entspricht ca. 6 Halbwertzeiten). Der Abklingfaktor K_W hängt von der gewählten Abklingzeit ab, die sich u. a. nach der Anzahl der Auffangbehälter und der anfallenden Abwassermenge richtet.

Ist keine Abwassersammelanlage im Radionuklidlaboratorium vorhanden, ist für den Abklingfaktor $K_W = 1$ zu setzen.



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 17 von 40

Stand: September 2013

Tab. A-1: Übergangsfaktoren \dot{U}_{Fw} radioaktiver Stoffe in das Abwasser

Art des Umgangs	\dot{U}_{Fw}
ohne Sammlung der radioaktiv kontaminierten Abwässer	1
mit Sammlung der radioaktiv kontaminierten Abwässer am Entstehungsort	0
➤ keine Entwässerungsinstallation im Radionuklidlabor (nur Handwaschbecken in der Schleuse)	
➤ mit Entwässerungssystem (entsprechende Arbeitsmethoden, die die Kontamination des Abwassers vermeiden, separates Sammeln von ersten und zweiten Spülwässern, Verwendung von Vakuum- anstatt Wasserstrahlpumpen)	< 0,001

Übergangs- und Abklingfaktoren für den Luftpfad

Beim Arbeiten mit offenen radioaktiven Stoffen ist zwischen dem Umgang mit geringer Freisetzungswahrscheinlichkeit in die Luft und dem Umgang mit erhöhter Freisetzungswahrscheinlichkeit zu unterscheiden (siehe hierzu DIN 25 425 Teil 1, Kap. 6.3 /6/).

Luftfiltereinrichtungen reduzieren die freigesetzte Aktivität in die Fortluft. Wertebereiche von Filter- Durchlassfaktoren für luftgetragene radioaktive Stoffe sind in Tab. 1, Kap. 3.2 im Hauptteil angegeben, spezielle Übergangsfaktoren \dot{U}_{FL} werden in der nachfolgenden Tab. A-2 genannt. Abklingfaktoren K_L berücksichtigen das Absinken der Aktivität in der Fortluft infolge verzögerter Luftableitung.

Tab. A-2: Ausgewählte Übergangsfaktoren \dot{U}_{FL} radioaktiver Stoffe in die Luft

Art des Umgangs / Radionuklid	\dot{U}_{FL}
Radioaktive Gase (z. B. HT, $^{14}CO_2$, Rn-222, Edelgase, HTO)	1
S-35 markierte organische Verbindungen und Aminosäuren (Radiolyse)	0,001..0,005
Radioiod	
➤ Markierungsversuche; je nach Arbeitsmethoden und Reaktionsablauf	0,001...1
➤ z. B. beim Öffnen von Natriumiodidvorratsfläschchen	0,08....0,1 (aus /22/)
Radioiod in gebundener Form (RIA-Kits ¹ mit max. 370 kBq können ohne Abzug verarbeitet werden)	< 0,001

3 Bewertung der Ableitungen radioaktiver Stoffe

Für die Bilanzierung der Ableitungen mit der Fortluft oder dem Abwasser kann die zuständige Behörde für Radionuklidlaboratorien rechnerische Abschätzungen ohne Messung der realen Abgaben zulassen, wenn sichergestellt ist, dass die Konzentrationsgrenzwerte in Fortluft oder Abwasser entsprechend Anlage VII, Teil D, Tab. 4 StrlSchV stets eingehalten sind. (Siehe auch Kap. 4 im Hauptteil.)

Die Konzentration kontaminierter Fortluft kann unter Berücksichtigung der gesamten Fortluftmenge des Gebäudes berechnet werden. Die Konzentration kontaminierter Abwässer am Ort der Einleitung kann unter Berücksichtigung der gesamten Abwasserfracht berechnet werden (siehe auch Kap. 3.3 im Hauptteil).

¹ Der Radioimmunoassay (RIA) ist ein Standardtestverfahren der Bioanalytik, bei dem kleinste Substanzmengen wie Hormonspiegel im Blut quantitativ nachgewiesen werden können. In einem sog. Kit sind die für die Durchführung des Assays erforderlichen Chemikalien und die für die Markierung benötigten Radiochemikalien, z. B. I-125-Antikörper, enthalten.



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 18 von 40

Stand: September 2013

Wird von der zuständigen Behörde nichts anderes festgelegt, gelten für die jährlich maximal zulässigen Aktivitätsabgaben mit Luft oder Wasser aus Strahlenschutzbereichen die Grenzwerte des § 47 StrlSchV als mittlere Aktivitätskonzentration über das Jahr.

Bei dem **Umgang mit mehreren Radionukliden** ist die Summe der Verhältniszahlen

- aus der durch Messung oder Abschätzung bestimmten mittleren, jährlichen Aktivitätskonzentration \bar{C}_i des Radionuklids i in Luft bzw. im Wasser und
- dem Konzentrationsgrenzwert C_i des jeweiligen Radionuklids i

zu beachten. In der Praxis ist oftmals die Verwendung von radionuklidspezifischen Jahresgrenzwerten G_i bzw. Jahresbilanzwerten A_i in [Bq/a] hilfreich. In Tab. A-3 sind diese Summenformeln in den Gl. A-3 bis A-6 zusammengefasst. Wichtig ist, dass bei geringeren Abwassermengen bzw. Fortluftströmen der jeweilige 10fach höhere Konzentrationsgrenzwert verwendet werden darf.

Tab. A-3: Ermittlung der jährlichen maximal zulässigen Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Fortluft oder dem Abwasser bei Umgang mit mehreren Radionukliden und in Abhängigkeit von der Ableitmenge (nach Anlage VII, Teil D StrlSchV)

Fortluftstrom im Jahresdurchschnitt	Abwassermenge im Jahr	Summenformel
$Q \leq 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$	$V_w \leq 10^5 \text{ m}^3/\text{a}$	$\sum_i \frac{\bar{C}_i}{C_i} \leq 10 \quad (\text{A-3})$
		$\sum_i \frac{A_i}{G_i} \leq 10 \quad (\text{A-4})$
$10^4 \text{ m}^3/\text{h} < Q \leq 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$	$V_w > 10^5 \text{ m}^3/\text{a}$	$\sum_i \frac{\bar{C}_i}{C_i} \leq 1 \quad (\text{A-5})$
		$\sum_i \frac{A_i}{G_i} \leq 1 \quad (\text{A-6})$

Die für ein Radionuklid i jährlich zu bilanzierende mit Luft oder Wasser abgeleitete Aktivität A_i wird nach Gl. A-7 aus der mittleren jährlichen Aktivitätskonzentration \bar{C}_i und der Ableitmenge V berechnet:

$$A_i = \bar{C}_i \cdot V \quad (\text{A-7})$$

mit

$$V = \begin{cases} V_L = Q \cdot 8760 \text{ h} \\ V_w \end{cases} \quad (\text{A-8})$$

Der Fortluftstrom im Jahresdurchschnitt Q ist abhängig vom Fortluftstrom bei Betrieb der lufttechnischen Anlagen, deren jährlicher Betriebsdauer und von möglichen Betriebsweisen mit reduzierten Fortluftströmen (Sparschaltung).

Für die jährliche, maximal zulässige Aktivitätsableitung G_i mit Luft oder Wasser gilt

$$G_i = C_i \cdot V \quad (\text{A-9})$$



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 19 von 40

Stand: September 2013

Die verwendeten Symbole bedeuten:

- \overline{C}_i mittlere jährliche Aktivitätskonzentration des Radionuklids i in der Fortluft oder im Abwasser in [Bq/m³]
- C_i maximal zulässige Aktivitätskonzentration des Radionuklids i in der Fortluft oder im Abwasser in [Bq/m³] gemäß Anlage VII, Teil D, Tab. 4, StrlSchV
- A_i jährliche abgeleitete Aktivität des Radionuklids i mit der Fortluft oder dem Abwasser in [Bq/a]
- G_i jährliche mit der Fortluft oder dem Abwasser maximal zulässige Ableitung des Radionuklids i in [Bq/a]
- V Ableitmenge mit der Fortluft oder mit dem Wasser in [m³/a]
- Q Fortluftstrom im Jahresdurchschnitt aus Strahlenschutzbereichen bzw. Gebäuden in [m³/h]
- V_w jährliche Abwassermenge aus Strahlenschutzbereichen bzw. am Ort der Einleitung in die öffentliche Kanalisation in [m³/a]
- V_L jährliche abgeleitete Fortluftmenge in [m³/a]

In Tab. A-4 sind für einige in der Forschung häufig eingesetzte Radionuklide die nach § 47 StrlSchV maximal zulässigen Aktivitätskonzentrationen im Jahresmittel zusammengestellt.

Tab. A-4: Maximal zulässige Aktivitätskonzentrationswerte im Jahresmittel für einige in der Forschung häufig eingesetzte Radionuklide in Abhängigkeit von der Ableitmenge (aus /1/)

Radionuklid	Maximal zulässige Aktivitätskonzentration in [Bq/m ³]			
	im Abwasser		in der Fortluft	
	$V_w \leq 10^5 \text{ m}^3/\text{a}$	$V_w > 10^5 \text{ m}^3/\text{a}$	$Q \leq 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$	$10^4 \text{ m}^3/\text{h} < Q \leq 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$
H-3 A ¹⁾	1 E+08	1 E+07	1 E+03	1 E+02
H-3 O ²⁾	7 E+07	7 E+06	-	-
C-14	6 E+06	6 E+05	6 E+01	6 E+00
Na-22	4 E+05	4 E+04	1 E+01	1 E+00
P-32	3 E+05	3 E+04	1 E+01	1 E+00
P-33	3 E+06	3 E+05	2 E+02	2 E+01
S-35	7 E+06	7 E+05	2 E+02	2 E+01
Cl-36	1 E+05	1 E+04	1 E+00	1 E-01
Ca-45	8 E+05	8 E+04	2 E+01	2 E+00
Cr-51	3 E+07	3 E+06	8 E+03	8 E+02
Fe-55	1 E+06	1 E+05	2 E+02	2 E+01
Fe-59	2 E+05	2 E+04	8 E+01	8 E+00
Ni-63	6 E+06	6 E+05	3 E+02	3 E+01
Rb-86	3 E+05	3 E+04	1 E+02	1 E+01
Tc-99m	4 E+07	4 E+06	2 E+04	2 E+03
I-125 E ³⁾	2 E+05	2 E+04	5 E+00	5 E-01
I-131 E ³⁾	5 E+04	5 E+03	5 E+00	5 E-01

¹⁾ A = Aerosol (Luft); ²⁾ O = Organisch; ³⁾ E = Elementar



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 20 von 40

Stand: September 2013

4 Berechnungsbeispiele

Die Abschätzung der Ableitung radioaktiver Stoffe über Luft und Wasser soll anhand folgender Beispiele erläutert werden:

In den Tabellen A-5 bis A-8 wird jeweils in den Spalten 1 bis 3 die jährlich gehandhabte Aktivität der eingesetzten Radionuklide angegeben. Unter der gehandhabten Aktivität wird die Aktivität verstanden, mit der tatsächlich im Labor jährlich umgegangen wird. Da bei kurzlebigen Radionukliden ein Teil bei der Aufbewahrung bzw. Lagerung abklingt, ist die gehandhabte Aktivität vielfach kleiner als die erworbene Aktivität.

Für den Wasserpfad ist jeweils in der Spalte 4 und für den Luftpfad in der Spalte 9 unter Berücksichtigung der tatsächlichen jährlich abgeleiteten Wasser- bzw. Luftmengen die pro Radionuklid maximal zulässige Ableitung (G_w bzw. G_L) nach § 47 StrlSchV angegeben.

Die Spalten 8 (A_i/G_i) weisen die pro Radionuklid erreichte Ausschöpfung der zulässigen Werte aus (berechnet nach Gl. A-3 bis A-6). Der jeweilige Wert zeigt an, ob bei Einzelwerten oder Summenwerten Rückhalteeinrichtungen erforderlich sind, was bei Werten $> 100\%$ der Fall ist.

Beispiel 1; Tab. A-5 und A-6

In einem Radionuklidlaboratorium in einer Forschungseinrichtung wird mit H-3, C-14, S-35, P-32 und P-33 umgegangen [Spalten 1].

Es werden Arbeiten durchgeführt, bei denen die Freisetzungswahrscheinlichkeit der gehandhabten radioaktiven Stoffe gering ist, beispielsweise Lagerung oder Handhabung von Lösungen zum Zwecke der Aufteilung, Umfüllen, Verdünnen, Messen, Aktivitätsbestimmung, vergleichsweise einfache chemische und physikalische Operationen (Handhabungsart a) nach DIN 25425 /6/).

Aufgrund der Arbeitsvorhaben (Handhabungsart a) mit Raumkategorie RK1 nach DIN 25425 /6/) ist eine Überschreitung der maximal zulässigen Aktivitätskonzentrationen nicht zu erwarten und deshalb sind keine Rückhalteeinrichtungen erforderlich.

Luftpfad (Tab. A-5)

Der Luftdurchsatz in den Räumen des Radionuklidlaboratoriums beträgt $1600 \text{ m}^3/\text{h}$. Für den Betrieb der Lüftung werden 4000 h im Jahr angenommen (entspr. $6,3\text{E}+06 \text{ m}^3/\text{a}$).

Für die Abschätzung der jährlichen Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Fortluft werden aufgrund der geplanten Arbeitsprozesse folgende konservative Übergangsfaktoren angenommen [Spalte 5]: $\text{ÜF}_L = 0,01$ für H-3, $\text{ÜF}_L = 0,001$ für C-14, P-32 und P-33 und $\text{ÜF}_L = 0,005$ für S-35. Für den Durchlassfaktor D_L gilt der Wert $D_L = 1$ [Spalte 6].

Wenn man also annimmt, dass 1% der gehandhabten H-3-Aktivität in die Luft freigesetzt werden, liegt die jährlich erwartete H-3-Ableitung bei $< 2\%$ der nach § 47 StrlSchV zulässigen Werte [Spalte 8] an der Grenze des Strahlenschutzbereiches. Die nach Summenformel (Gl. A-3 bzw. A-4) berechnete Ausschöpfung der zulässigen Ableitung für das Radionuklidgemisch beträgt rund $4,5\%$ [Spalte 8, letzte Zeile].

Wird bei der Bilanzierung statt der $6,3\text{E}+06 \text{ m}^3/\text{a}$ Fortluftmenge die Gesamtmenge der Fortluftmenge der Einrichtung (aus Strahlenschutzbereichen und konventionellen Bereichen) von z. B. $5,0\text{E}+08 \text{ m}^3/\text{a}$ als Bezugsmenge berücksichtigt, verringert sich die Ausschöpfung unter Berücksichtigung der Summenformel der Werte nach § 47 StrlSchV auf $< 1\%$.



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 21 von 40

Stand: September 2013

Tab. A-5: Abschätzung der zu erwartenden Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft ($Q < 1,0E+04 \text{ m}^3/\text{h}$) für ein Radionuklidlaboratorium ohne Rückhalteeinrichtungen

1	2	3	4	5	6	7	8
Nuklid	Gehandhabte Aktivität		max. zulässige Ableitung mit $6,3E+06 \text{ m}^3/\text{a}$ G_i	Übergangs- faktor \ddot{U}_{FL}	Durchlass- faktor D_L	Ableitung A_i	$\frac{A_i}{G_i}$
	[MBq/a]	Vielfaches der FG	[MBq/a]			[MBq/a]	[%]
H-3	10.000	10	6.300	0,01	1	100	1,6
C-14	1.000	100	378	0,001	1	1	0,3
P-32	1.000	10.000	63	0,001	1	1	1,6
P-33	2.000	20	1.260	0,001	1	2	0,2
S-35	2.000	20	1.260	0,005	1	10	0,8
Summenformel							4,5
jährl. Fortluftmenge aus Gebäude: $5,0E+08 \text{ m}^3$ ($Q > 1,0E+04 \text{ m}^3/\text{h}$)							0,6

Wasserpfad (Tab. A-6)

Es wird von einer jährlichen Abwassermenge von $V_w = 20 \text{ m}^3$ ausgegangen. Durch organisatorische Maßnahmen werden alle radioaktiv kontaminierten Flüssigkeiten am Arbeitsplatz in Behältnissen separat gesammelt. Durch entsprechende Kontrollen wird die Einhaltung der Anweisung zur Sammlung von kontaminierten Flüssigkeiten überwacht. Darüber hinaus werden Arbeitsmethoden eingesetzt, die die Kontamination des Abwassers vermindern bzw. vermeiden. Es ist nur der Einsatz von Vakuumpumpen und geschlossenen Kühlkreisläufen erlaubt.

Entsprechend der Handhabungsart und der angewandten Arbeitsmethoden werden für alle Radionuklide folgende konservative Werte für Übergangsfaktoren in das Abwasser angenommen: $\ddot{U}_{FW} = 0,001$ [Spalte 5]. Ohne Rückhalteeinrichtung sind die Abklingfaktoren $K_w = 1$ zu setzen [Spalte 6].

In diesem Beispiel sind die zu erwartenden Aktivitätsableitungen A_i [Spalte 7] über den Wasserpfad ohne Sammel- oder Abklinganlagen gering. Unter Berücksichtigung der Summenformel (Gl. A-3 bzw. A-4) erhält man 23 % der nach § 47 StrlSchV zulässigen Werte (A_i/G_i) [Spalte 8, vorletzte Zeile].

Wird bei der Bilanzierung statt der 20 m^3 Laborabwasser die Gesamtmenge des Abwassers der Einrichtung (aus Strahlenschutzbereichen und konventionellen Bereichen, siehe auch Abb. 2) von 10.000 m^3 pro Jahr als Bezugsmenge berücksichtigt und angenommen, dass die gesamte gehandhabte Aktivität von H-3 und C-14 ($\ddot{U}_{FW} = 1$) mit Abwasser abgeleitet wird, werden unter Berücksichtigung der Summenformel am Ort der Einleitung in die öffentliche Kanalisation nur 2,7 % der nach § 47 StrlSchV zulässigen Werte erreicht [Spalte 8, letzte Zeile]. Damit könnte nach DIN 25425-1, Kap. 10.2.1 /6/ in diesem Beispiel das Abwasser in das Netz für weitgehend kontaminationsfreies Abwasser eingeleitet werden, da 10% des Wertes für die maximal zulässige Aktivitätskonzentration nach § 47 StrlSchV deutlich unterschritten werden.



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 22 von 40

Stand: September 2013

Tab. A-6: Abschätzung der zu erwartenden Ableitung radioaktiver Stoffe mit Wasser ($V_w < 1,0E+05 \text{ m}^3/\text{a}$) für ein Radionuklidlaboratorium ohne Rückhalteeinrichtungen

1	2	3	4	5	6	7	8
Nuklid	Gehandhabte Aktivität		max. zulässige Ableitung mit 20 m ³ /a	Übergangsfaktor	Abklingfaktor	Ableitung	$\frac{A_i}{G_i}$
	[MBq/a]	Vielfaches der FG	G_i [MBq/a]	$\ddot{U}F_w$	K_w	A_i [MBq/a]	[%]
H-3	10.000	10	2.000	0,001	1	10	0,5
C-14	1.000	100	120	0,001	1	1	0,8
P-32	1.000	10.000	6	0,001	1	1	16,7
P-33	2.000	20	60	0,001	1	2	3,3
S-35	2.000	20	140	0,001	1	2	1,4
Summenformel							22,7
jährl. Abwassermenge in öffentliche Kanalisation: 1,0E+04 m ³ ; $\ddot{U}F_w=1$ für H-3 und C-14							2,7

Beispiel 2; Tab. A-7, A-8 und A-9

In einem großen Radionuklidlaboratorium einer Forschungseinrichtung wird mit einer Vielzahl von Radionukliden umgegangen. Aufgrund der gehandhabten Aktivität und der Handhabungsart sind die Laborräume der Raumkategorie RK2 zugeordnet. Bei den Arbeitsprozessen fallen mehr als 1 m³ kontaminiertes Abwasser pro Labor und Vierteljahr an. Eine Abwassersammelanlage ist erforderlich /6/.

In den Tabellen A-7 und A-8 sind für beide Ableitungspfade die Konsequenzen ohne bzw. mit Rückhalteeinrichtungen für die Einhaltung der nach § 47 StrlSchV zulässigen Werte für die Ableitung radioaktiver Stoffe gegenübergestellt. In Tab. A-9 wird die Ausschöpfung der maximal zulässigen Ableitung radioaktiver Stoffe mit Wasser am Ort der Einleitung in die öffentliche Kanalisation betrachtet.

Luftpfad (Tab. A-7)

Der Luftdurchsatz im Radionuklidlaboratorium beträgt 11.400 m³/h (entspr. 1,0E+08 m³/a), und es wird der ganzjährige Betrieb der Lüftung angenommen.

Für die Abschätzung der jährlichen Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Fortluft werden aufgrund der Arbeitsprozesse unterschiedliche Übergangsfaktoren $\ddot{U}F_L = 0,001$ bis 0,1 abgeschätzt [Spalte 5].

Ohne Abluftfilterung ist bei der Handhabung von I-125 (Durchführung von chemischen Synthesen, Markierungen) die Einhaltung der zulässigen Werte nach § 47 StrlSchV nicht gewährleistet [$(A_i/G_i) = 235 \%$, Spalte 8a, vorletzte Zeile]. Diese chemischen Synthesen mit I-125 dürfen demzufolge nur in einem Laborraum mit Radionuklidabzug und Abluftfilterung (Aktivkohle) durchgeführt werden, um die zulässigen Werte zu erreichen [$(A_i/G_i) = 37 \%$; Spalte 8b, vorletzte Zeile].



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 23 von 40

Stand: September 2013

Tab. A-7: Abschätzung der zu erwartenden Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Fortluft;
 Fortluftmenge: $V_L = 1,0E+08 \text{ m}^3/\text{a}$; Betrachtung ohne und mit Rückhalteeinrichtungen

					ohne Rückhalteeinrichtung			mit Rückhalteeinrichtung		
1	2	3	4	5	6a	7a	8a	6b	7b	8b
Nuklid	Gehandhabte Aktivität		max. zulässige Ableitung mit $1,0E+08 \text{ m}^3/\text{a}$	Übergangsfaktor	Durchlassfaktor	Ableitung	$\frac{A_i}{G_i}$	Durchlassfaktor	Ableitung	$\frac{A_i}{G_i}$
	[MBq/a]	Vielfaches der FG								
			[MBq/a]			[MBq/a]	[%]		[MBq/a]	[%]
H-3	10.000	10	10.000	0,1	1	1.000,0	10,0	1	1.000,0	10,0
C-14	5.000	500	600	0,01	1	50,0	8,3	1	50,0	8,3
Na-22	500	500	100	0,001	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5
P-32	10.000	100.000	1.000	0,001	1	10,0	1,0	1	10,0	1,0
P-33	50.000	500	2.000	0,001	1	50,0	2,5	1	50,0	2,5
S-35	50.000	500	2.000	0,005	1	250,0	12,5	1	250,0	12,5
Cr-51	10.000	1.000	8.000	0,001	1	10,0	0,0	1	10,0	0,0
Fe-55	500	500	2.000	0,001	1	0,5	0,0	1	0,5	0,0
Ca-45	500	50	200	0,001	1	0,5	0,3	1	0,5	0,3
Fe-59	500	500	800	0,001	1	0,5	0,1	1	0,5	0,1
Zn-65	500	500	300	0,001	1	0,5	0,2	1	0,5	0,2
Rb-86	500	5.000	1.000	0,001	1	0,5	0,0	1	0,5	0,1
I-125	1.000	1.000	50	0,1	1	100,0	200,0	0,01	1,0	2,0
Summenformel							235,4			37,5
Maßnahmen zur Rückhaltung erforderlich										

Wasserpfad (Tab. A-8 und A-9)

Es wird von einer jährlichen Abwassermenge von 250 m^3 ausgegangen. Durch organisatorische Maßnahmen werden radioaktive Abwässer am Arbeitsplatz in Behältnissen gesammelt. Als Übergangsfaktor in das Abwasser werden für Radionuklide konservative Werte von $\text{ÜF}_W = 0,001$ angenommen [Spalte 5].

Durch die Verwendung einer Rückhalteeinrichtung (Abwassersammelanlage) kann bei einer Abklingzeit von 60 Tagen die Ausschöpfung dieser nach § 47 StrlSchV maximal zulässigen Werte A_i/G_i nach Anwendung der Summenformel von 28 % [Spalte 8a, letzte Zeile] um einen Faktor 4 [Spalte 8b, letzte Zeile] reduziert werden. Gegenüber einer Einrichtung ohne Rückhalteeinrichtung mit $K_W=1$ [Spalte 6a], betragen dort die Abklingfaktoren z.B. für P-32: $K_W = 0,05$, für P-33: $K_W = 0,25$, für S-35: $K_W = 0,70$ und für I-125: $K_W = 0,5$ [Spalte 6b].



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 24 von 40

Stand: September 2013

Tab. A-8: Abschätzung der zu erwartenden Ableitung radioaktiver Stoffe mit Wasser;
Abwassermenge: $V_w = 250 \text{ m}^3/\text{a}$; Betrachtung ohne und mit Rückhalteeinrichtungen

				ohne Rückhalteeinrichtung				mit Rückhalteeinrichtung		
1	2	3	4	5	6a	7a	8a	6b	7b	8b
Nuklid	Gehandhabte Aktivität		max. zulässige Ableitung mit 250 m^3/a G_i	Übergangsfaktor \ddot{U}_{Fw}	Abklingfaktor K_w	Ableitung A_i	$\frac{A_i}{G_i}$	Abklingfaktor K_w	Ableitung A_i	$\frac{A_i}{G_i}$
	[MBq/a]	Vielfaches der FG								
H-3	10.000	10	25.000	0,001	1	10,0	0,0	1	10,00	0,0
C-14	5.000	500	1.500	0,001	1	5,0	0,3	1	5,00	0,3
Na-22	500	500	100	0,001	1	0,5	0,5	1	0,50	0,5
P-32	10.000	100.000	75	0,001	1	10,0	13,0	0,05	0,50	0,7
P-33	50.000	500	750	0,001	1	50,0	6,7	0,25	12,50	1,7
S-35	50.000	500	1.750	0,001	1	50,0	2,9	0,70	35,00	2,0
Cr-51	10.000	1.000	7.500	0,001	1	10,0	0,1	0,06	0,60	0,0
Fe-55	500	500	250	0,001	1	0,5	0,2	1	0,50	0,2
Ca-45	500	50	200	0,001	1	0,5	0,3	1	0,50	0,3
Fe-59	500	500	50	0,001	1	0,5	1,0	0,50	0,25	0,5
Zn-65	500	500	75	0,001	1	0,5	0,7	1	0,50	0,7
Rb-86	500	5.000	75	0,001	1	0,5	0,7	0,06	0,03	0,0
I-125	1.000	1.000	50	0,001	1	1,0	2,0	0,50	0,50	1,0
Summenformel							28,4			7,9
Maßnahmen zur Rückhaltung sinnvoll										

In Tab. A-9 wird bei der Bilanzierung anstatt der 250 m^3 Laborabwasser (vgl. Tab. A-8) die Gesamtmenge des Abwassers der Einrichtung von 10.000 m^3 pro Jahr als Bezugsmenge berücksichtigt. Das entspricht der Gesamtmenge aus Strahlenschutzbereichen und konventionellen Bereichen (siehe auch Abb. 2).

Dabei wird angenommen, dass 100% der gehandhabten Aktivitäten der Radionuklide mit HWZ > 100 Tage (H-3, C-14, Na-22, Ca-45, Fe-55, Zn-65), mit dem Wert $\ddot{U}_{Fw} = 1$, ins Abwasser abgeleitet wird. Unter Berücksichtigung der Summenformel am Ort der Einleitung in die öffentliche Kanalisation wird der Wert für die maximal zulässige Aktivitätskonzentration nach § 47 StrlSchV nicht überschritten und ebenfalls nur zu 50% ausgeschöpft [Tab. A-9, Spalte 8, letzte Zeile].

Die Abwässer der kurzlebigen Radionuklide werden in Kanistern gesammelt, gemessen, gelagert (etwa 5 bis 10 HWZ) und ins Abwasser eingeleitet. Der Wert des Quotienten (A_i/G_i) für die maximal zulässige Aktivität, abgeleitet mit Wasser, liegt hierbei unter Berücksichtigung der Summenformel unter 0,1 % und braucht bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt zu werden.



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 25 von 40

Stand: September 2013

Tab. A-9: Abschätzung der zu erwartenden Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser;
 Abwassermenge: $V_w = 10.000 \text{ m}^3/\text{a}$; prozess- und nuklidspezifische Übergangs- und
 Abklingfaktoren

					mit Rückhalteeinrichtung und Abfallsammlung		
1	2	3	4	5	6	7	8
Nuklid	Gehandhabte Aktivität		max. zulässige Ableitung mit $1,0E+04 \text{ m}^3/\text{a}$	Übergangs- faktor	Abkling- faktor	Ableitung	$\frac{A_i}{G_i}$
	[MBq/a]	Vielfaches der FG	G_i [MBq/a]	\bar{U}_{Fw}	K_w	A_i [MBq/a]	[%]
H-3	10.000	10	1.000.000	1	1	10.000,00	1,0
C-14	5.000	500	60.000	1	1	5.000,00	8,3
Na-22	500	500	4.000	1	1	500,00	12,5
P-32	10.000	100.000	3.000	0,001	0,01	0,10	0,0
P-33	50.000	50	30.000	0,001	0,1	5,00	0,0
S-35	50.000	50	70.000	0,001	0,5	25,00	0,0
Cr-51	10.000	1.000	300.000	0,001	0,01	0,10	0,0
Fe-55	500	500	10.000	1	1	500,00	5,0
Ca-45	500	50	8.000	1	1	500,00	6,3
Fe-59	500	500	2.000	0,001	0,01	0,01	0,0
Zn-65	500	500	3.000	1	1	500,00	16,7
Rb-86	500	5.000	3.000	0,001	0,1	0,05	0,0
I-125	1.000	1.000	2.000	0,001	0,3	0,30	0,0
Summenformel							49,8



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 26 von 40

Stand: September 2013

Anhang B Emissionsüberwachung in medizinischen Einrichtungen - Empfehlungen für die Praxis / Berechnungsbeispiele

Anwendungsbereiche

Mit der Anwendung oder dem Auftreten radioaktiver Stoffe ist prinzipiell auch immer die Möglichkeit ihrer Emission in die Umgebung gegeben. Im Folgenden sind die Bereiche der Anwendung offener radioaktiver Stoffe in der Medizin (oder auch ihres Auftretens als unerwünschtes Nebenprodukt), typische Radionuklide und hauptsächlich belastete Medien stichpunktartig zusammengestellt.

Nuklearmedizin

In-vivo-Diagnostik	Tc-99m, Tl-201 u. a., PET-Nuklide (C-11, N-13, O-15, F-18) zu bildgebenden Verfahren, z. T. auch Probenentnahme	Abwasserkontamination durch Patientenausscheidungen und bei Radiopharmaka-Aufbereitung durch Laborspülwasser. Anwendung vorwiegend ambulant in Krankenhäusern, PET-Zentren oder Praxen.
In-vitro-Diagnostik	H-3, C-14, Co-57, Co-58, I-125 zur Laboruntersuchung von Körperflüssigkeiten	Kontamination des Abwassers über Laborspülwasser und der Fortluft. Anwendung in Krankenhäusern und Praxen.
Therapie	I-131 zur Schilddrüsentherapie, Y-90, Re-186, Sm-153 u. a. zur Gelenk- und Schmerztherapie, Lu-177 und Y-90 für Peptidrezeptor Radiotherapien	Abwasser- und Fortluftkontamination durch Patientenausscheidungen. Anwendung stationär in Krankenhäusern

Beschleunigerbetrieb

Elektronenbeschleuniger	zur Strahlentherapie (Gamma- und Elektronenbestrahlung). Fortluftkontamination durch Luftaktivierung (N-13, O-15, Ar-41) ab Beschleunigungsenergien >10 MeV.	Anwendung im Allgemeinen in Krankenhäusern.
Zyklotron	zur Herstellung der PET-Nuklide	Fortluftkontamination durch Luftaktivierung (N-13, O-15, Ar-41) oder durch die PET-Nuklide im Falle des Targetbruchs bei der Aktivierung. Anwendung in wenigen PET-Zentren.



1 Ermittlung der Ableitungen radioaktiver Stoffe

Die jährlich mit der Fortluft in die Atmosphäre oder mit dem Abwasser in das öffentliche Kanalnetz abgeleitete Aktivität kann wie folgt abgeschätzt werden:

Luftpfad: $A = A_U \cdot H_U \cdot \ddot{U}F_L \cdot K_L \cdot D_L$ (B-1)

Wasserspfad: $A = A_U \cdot H_U \cdot \ddot{U}F_W \cdot K_W$ (B-2)

Dabei bedeuten:

- A jährliche mit der Fortluft bzw. mit dem Abwasser abgeleitete Aktivität in [Bq/a]
- A_U Aktivitätseinsatz pro Umgang in [Bq/Umgang]
- H_U mittlere Umgangshäufigkeit pro Jahr in [Anzahl/a]
- D_L Filter-Durchlassfaktor
- $\ddot{U}F_L$ Übergangsfaktor in Luft als Verhältnis der in die Raumluft freigesetzten Aktivität zur jeweils gehandhabten Aktivität
- $\ddot{U}F_W$ Übergangsfaktor in das Abwasser als Verhältnis der ins Abwasser freigesetzten Aktivität zur jeweils gehandhabten Aktivität
- K_L Abklingfaktor durch verzögerte Luftableitung (z.B. bei PET)
- K_W Abklingfaktor durch verzögerte Ableitung des Abwassers (Abklinganlagen)

Die in den folgenden Tabellen B-1 bis B-4 angegebenen Übergangsfaktoren sind Beispiele für verschiedene Radionuklide und ihre Anwendungen im medizinischen Bereich. Die Übergangsfaktoren für ein Radionuklid hängen bei gleicher applizierter Aktivität vom Radiopharmakon und von der individuellen Physiologie des Patienten ab.

Die in Tabelle B-1 angegebenen Werte in der letzten Spalte sind Schätzgrößen aus den Ausscheidungsraten der Patienten. Im Allgemeinen liegt der Aufenthalt der Diagnostikpatienten 33 % stationär, 67 % ambulant. Erfahrungsgemäß geben nur 50 % der Patienten ihre Ausscheidungen im Krankenhausbereich ab.

Tab. B-1: Übergangsfaktoren $\ddot{U}F_W$ radioaktiver Stoffe in das Abwasser - In-vivo-Diagnostik

Art des Umgangs			Ausscheidungsrate	$\ddot{U}F_w$
Laborbetrieb in Arztpraxen und Krankenhäusern bei Sammlung höheraktiver Abfälle			0,01	
Patientenausscheidungen (bei ambulantem Betrieb nur teilweise in der nuklearmedizinischen Einrichtung in das Abwassernetz abgegeben, Richtwert: 50 %)				
<i>Radionuklid</i>	<i>Anwendung</i>	<i>typische appl. Aktivität in [MBq]</i>		
F-18	Tumorzellenmarkierung (FDG) ^{a)}	350-380	0,2	0,1
	Skelett (Na[18F]fluorid) ^{b)}	285-370	0,4	0,4
Ga-67	Tumor/Entzündung (Zitrat) ^{c)}	180-220	0,3	0,15
Rb-82	Herzdurchblutung (Chlorid) ^{d, e)}	1110-2220	0	0



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 28 von 40

Stand: September 2013

Art des Umgangs			Ausscheidungsrate	ÜF _w
<i>Radionuklid</i>	<i>Anwendung</i>	<i>typische appl. Aktivität in [MBq]</i>		
Tc-99m	Skelett (MDP) ^{d)}	370 – 700	0,5	0,25
	Skelett (DPD) ^{g)}	300 - 700	0,3-0,5	0,15-0,25
	Schilddrüse (Pertechnetat) ^{h)}	40-75	0,5	0,25
	Herz (Isonitrit, Erythrozyten) ^{i,j)}	400 - 750	0,5	0,25
	Lunge (MMA) ^{i,j)}	100 - 200	0,1	0,05
	Lunge Ventilation (DTPA) ^{i,j)}	800 - 1000	0,05	0,0-0,05
In-111	Nieren (DTPA, MAG3, DMSA) ^{i,j)}	80- 100	0,2-1,0	0,1-0,5
	Leukozyten (Oxin) ^{k)}	20-75	k.A.	
	Thrombozyten	30-40	0,5	0,25
	Tumormarkierung (Octreoscan) Pentetreotide ^{l)}	110 - 220	0,8	0,4
I-123	Schilddrüsenfunktion (Iodid) ^{m)}	10 / 3	0,6 – 0,8	0,3 – 0,4
	Parkinson etc. (Ioflupan) ⁿ⁾	110- 185	0,6	0,3
	Nieren (Hippuran) ⁱ⁾	100	0,2-1,0	0,1-0,5
Tl-201	Herz (Chlorid) ^{i, o, p)}	75-90	0,1	0,05

- a) Leitlinien der DGN: FDG-PET/CT in der Onkologie, B. J. Krause, T. Beyer, A. Bockisch, D. Delbeke, J. Kotzerke, V. Minkov, M. Reiser, N. Willich, Nuklearmedizin 2007; 46: 291-301
- b) Hellwig, B. J. Krause, H. Schirmmeister, M. Freesmeyer, Handlungsempfehlung: Skelettdiagnostik mittels ¹⁸F-Natriumfluorid-PET und -PET/CT, Stand: 12/2011 – AWMF-Registernummer: 031-047, DGN
- c) J. Meller, Abteilung Nuklearmedizin der Universität Göttingen; Leitlinien: Verfahrensweisung zur Gallium-67-Zitrat-Szintigraphie bei entzündlichen Erkrankungen Überarbeitet nach: W. Becker, Abteilung Nuklearmedizin der Universität Göttingen, Aktuelle Leitlinien, <http://www.nuklearmedizin.de> Mai 2013
- d) James R. Ballinger, (Rb-82) PET Radiopharmaceuticals in Nuclear Cardiology: Current Status and Limitations, Find out how to access preview-only content Integrating Cardiology for Nuclear Medicine Physicians, 2009, pp 379-385
- e) Sr-82/Rb-82-Generator, Cardiogene, manufactured for Bracco Diagnostics Inc. Princeton, NJ 08543, By GE Healthcare, Medipysics, Inc., South Plainfield, NJ 07080, March 2012
- f) MDP-BRACCO™ Tc-99m, Bracco Diagnostics Inc. Princeton, NJ 08543, by Nycomed Amersham plc Little Chalfont England, October 1999
- g) TECEOS® Tc-99m Markierungsbesteck, CIS bio International, F-91192 GIF SUR YVETTE, CBI Medical Products Vertriebs GmbH, Baar, CH, Dez. 2012
- h) Leitlinien der DGN: M. Dietlein, J. Dressler, W. Eschner, B. Leisner, C. Reiners, H. Schicha, Verfahrensweise für die Schilddrüsenszintigraphie, www.nuklearmedizin.de, Stand 11. Juni 2007.
- i) H. Schicha, O. Schober, Nuklearmedizin, Basiswissen und klinische Anwendung, Schattauer Verlag, 6. Auflage 2013 und Leitlinien für die Myokard-Perfusions-Szintigraphie, Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin, www.nuklearmedizin.de
- j) Diagnostische Referenzwerte in der Nuklearmedizin, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 167. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 6./7. Juli 2000,
- k) J. Meller, Abteilung Nuklearmedizin der Universität Göttingen; Leitlinien: Verfahrensweisung für In-111-Oxin-Leukozyten-Szintigraphie bei entzündlichen oder infektiösen Erkrankungen, Aktuelle Leitlinien, <http://www.nuklearmedizin.de> Mai 2013
- l) Octreoscan, In-111, Danish Medicines Agency, SUMMARY OF PRODUCT CHARACTERISTICS for Octreoscan, 11. September 2012
- m) Leitlinien der DGN: M. Dietlein, J. Dressler, W. Eschner, B. Leisner, C. Reiners, H. Schicha, Verfahrensweise für die Schilddrüsenszintigraphie, Tc-99m, I-123, www.nuklearmedizin.de, Stand 11. Juni 2007.
- n) DaTscan™ (Ioflupane I 123 Injection), HIGHLIGHTS OF PRESCRIBING INFORMATION, GE HealthCare, February 2012 73-JB1407US Printed in USA
- o) <http://www.staff.uni-marburg.de/~hoeffken/akn3.htm>
- p) Bundesamt für Strahlenschutz: Bekanntmachung der aktualisierten diagnostischen Referenzwerte für nuklearmedizinische Untersuchungen, 25. September 2012



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 29 von 40

Stand: September 2013

Tab. B-2: Übergangsfaktoren $\ddot{U}F_w$ radioaktiver Stoffe in das Abwasser
 - In-vitro-Diagnostik (Radioimmunoassays u. ä.) –

Art des Umgangs / Radionuklid	$\ddot{U}F_w$
➤ Arztpraxen und Diagnostikstationen ohne Sammlung der radioaktiven Flüssigkeiten	1
➤ Dito, mit Sammlung höheraktiver Flüssigkeiten	0,01

Tab. B-3: Übergangsfaktoren $\ddot{U}F_w$ radioaktiver Stoffe in das Abwasser – Therapie –

Art des Umgangs			$\ddot{U}F_w$
Patientenausscheidungen			
<u>Radionuklid</u>	<u>Anwendung</u>	<u>typische appl. Aktivität in [MBq]</u>	
I-131	Schilddrüsenkarzinom ¹⁾	1.800 – 3.700	0,5 – 0,9
	Schilddrüsenfunktion ¹⁾	300	0,5
Sr-89	Skelettmetastasen (Chlorid) ²⁾	100 - 150	0,8
Y-90	Gelenke (Citrat/Silikat) ³⁾	185-275	0,3
	Skelettmetastasen (Citrat)	100	0,3
	Lebertumor (SIR-Spheres) ⁴⁾	1.000- 3.000	k.A.
Lu-177	Peptidrezeptor Radiotherapien ⁵⁾ (48h Therapiestation)	3700	0,6-0,8
Re-186	Gelenke (Kolloid/Sulfid) ¹⁾ (Beispiel für ambulante Behandlung) ⁶⁾	37 – 185	0 - 0,1
Re-188	Knochenmetastase-Therapie (HEDP) ^{7a)}	2.500 - 3.300	0,7
Re-188	Radioimmuntherapie (RIT) ^{7b)}	ca. 3.700 – 30.000	k.A.
	palliative Schmerztherapie (PST) ^{7b)}	ca. 3.700 – 30.000	k.A.
	endovaskuläre Brachytherapie (IVB) ^{7b)}	ca. 3.700 – 30.000	k.A.
	intraarterielle Radioembolisation (RET) ^{7b)}	ca. 3.700 – 30.000	k.A.
Sm-153	Knochenschmerz-Therapie (EDTMP) ⁸⁾	2.000 – 4.000	0,3

1) H. Schicha, O. Schober, Nuklearmedizin, Basiswissen und klinische Anwendung, Schattauer Verlag, 7. Auflage 2013

2) M. Fischer, Leitlinie für die Radionuklidtherapie bei schmerzhaften Knochenmetastasen, Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin, Stand Mai 2013

3) Leitlinien für die Radiosynoviorthese, J. Farahati, Chr. Reiners, M. Fischer, G. Mödder, C. Franke, J. Mahlstedt, H. Störensen, Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin, www.nuklearmedizin.de, Stand 01.11.1997

4) SIR-Spheres® Fachinformation (Yttrium-90 Mikrosphären), Sirtex Medical (Europe) Limited, Bonn, Germany, , www.sirtex.com, April 2005 SIR-Spheres®, Yttrium-90 Mikrosphären, package insert, Sirtex Medical (Europe) Limited, Walter-Flex-Straße 2, 53113 Bonn, Germany, www.sirtex.com, Date of Issue: Nov 2012

5) J. P. Esser et al, Comparison of [¹⁷⁷Lu-DOTA0,Tyr³]octreotate and [¹⁷⁷Lu-DOTA0, Tyr³]octreotide: which peptide is preferable for PRRT, European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging Vol. 33, No. 11, November 2006

6) <http://radiologie.klinik-am-ring.de/index.php/Nuklearmedizin/radiosynoviorthese-rso.html>

7a) A. Manka-Waluch, Radionuklidtherapie mit Rhenium-188-HEDP beim hormonrefraktären, ossär metastasierten Prostatakarzinom, Inaugural-Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2006, <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2006/0766/0766.pdf>



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 30 von 40

Stand: September 2013

- 7b) M. Andreeff¹, G. Wunderlich¹, K. Behge², Th. Schönmath², J. Kotzerke¹, β -radiation exposure with ¹⁸⁸Re-labelled pharmaceuticals, Schattauer GmbH, ¹Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Universitätsklinikum an der TU Dresden ²Fachbereich Strahlenschutz, Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V. Seite 95, Nuklearmedizin 3/2005
- 8) Quadramet, Samarium [¹⁵³Sm]-EDTMP, Fachinformation, CBI Medical Products Vertriebs GmbH, Schöffland, CIS bio international F-91192 GIF SUR YVETTE, Februar 2012

Tab. B-4: Übergangsfaktoren \ddot{U}_{FL} radioaktiver Stoffe in die Luft

Art des Umgangs	\ddot{U}_{FL}
Radioaktive Gase in Diagnostikstationen	
➤ mit Atemmasken und Rückhaltung	0,01
➤ ohne Atemmasken	1,0
I-131 in der Therapie	0,001 ... 0,0001
I-125 in der In-vitro-Diagnostik	
➤ Radioimmunoassays (RIA)	< 0,001
➤ andere Laborarbeiten	0,02 ... 0,03
nichtflüchtige radioaktive Stoffe in Diagnostik und Therapie	< 0,0001

Weitere Hinweise zu Übergangsfaktoren radioaktiver Stoffe in die Luft lassen sich aus Inkorporationsfaktoren ableiten. Werte zu den einzelnen Verfahren sind in den „Empfehlung für die Anwendung der Richtlinie zur Inkorporationsüberwachung im Bereich der Nuklearmedizin“ des Bundesamtes für Strahlenschutz publiziert /13a/.

2 Bewertung der Ableitungen radioaktiver Stoffe

Für die Bilanzierung der Ableitungen mit der Fortluft oder dem Abwasser kann die zuständige Behörde wie für Radionuklidlaboratorien (Anhang A) auch für nuklearmedizinische Einrichtungen rechnerische Abschätzungen ohne Messung der realen Abgaben zulassen.

Die Konzentration kontaminierter Fortluft kann unter Berücksichtigung der gesamten Fortluftmenge des Gebäudes berechnet werden. Die Konzentration kontaminierter Abwässer am Ort der Einleitung kann unter Berücksichtigung der gesamten Abwasserfracht berechnet werden (siehe auch Kap. 3.3 im Hauptteil).

Wird von der zuständigen Behörde nichts anderes festgelegt, gelten für die jährlich maximal zulässigen Aktivitätsabgaben mit Luft oder Wasser aus Strahlenschutzbereichen die Grenzwerte des § 47 StrlSchV als mittlere Aktivitätskonzentration über das Jahr.

Bei dem **Umgang mit mehreren Radionukliden** ist die Summe der Verhältniszahlen

- aus der durch Messung oder Abschätzung bestimmten mittleren, jährlichen Aktivitätskonzentration \overline{C}_i des Radionuklids i in Luft bzw. im Wasser und
- dem Konzentrationsgrenzwert C_i des jeweiligen Radionuklids i

zu beachten.

In der Praxis ist oftmals die Verwendung von radionuklidspezifischen Jahresgrenzwerten G_i bzw. Jahresbilanzwerten A_i in [Bq/a] hilfreich. In Tab. B-5 sind diese Summenformeln in den Gl. B-3 bis B-6 zusammen-



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 31 von 40

Stand: September 2013

gefasst. Wichtig ist, dass bei geringeren Abwassermengen bzw. Fortluftströmen der jeweilige 10fach höhere Konzentrationsgrenzwert verwendet werden darf.

Tab. B-5: Ermittlung der jährlichen maximal zulässigen Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Fortluft oder dem Abwasser bei Umgang mit mehreren Radionukliden und in Abhängigkeit von der Ableitmenge (nach Anlage VII, Teil D StrlSchV)

Fortluftstrom im Jahresdurchschnitt	Abwassermenge im Jahr	Summenformel
$Q \leq 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$	$V_W \leq 10^5 \text{ m}^3/\text{a}$	$\sum_i \frac{\bar{C}_i}{C_i} \leq 10 \quad (\text{B-3})$
		$\sum_i \frac{A_i}{G_i} \leq 10 \quad (\text{B-4})$
$10^4 \text{ m}^3/\text{h} < Q \leq 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$	$V_W > 10^5 \text{ m}^3/\text{a}$	$\sum_i \frac{\bar{C}_i}{C_i} \leq 1 \quad (\text{B-5})$
		$\sum_i \frac{A_i}{G_i} \leq 1 \quad (\text{B-6})$

Die für ein Radionuklid i jährlich zu bilanzierende mit Luft oder Wasser abgeleitete Aktivität A_i wird nach Gl. B-7 aus der mittleren jährlichen Aktivitätskonzentration \bar{C}_i und der Ableitmenge V berechnet:

$$A_i = \bar{C}_i \cdot V \quad (\text{B-7})$$

mit

$$V = \begin{cases} V_L = Q \cdot 8760 \text{ h} \\ V_W \end{cases} \quad (\text{B-8})$$

Der Fortluftstrom im Jahresdurchschnitt Q ist abhängig vom Fortluftstrom bei Betrieb der lufttechnischen Anlagen, deren jährlicher Betriebsdauer und von möglichen Betriebsweisen mit reduzierten Fortluftströmen (Sparschaltung).

Für die jährliche, maximal zulässige Aktivitätsableitung G_i mit Luft oder Wasser gilt

$$G_i = C_i \cdot V \quad (\text{B-9})$$

Die verwendeten Symbole bedeuten:

- \bar{C}_i mittlere jährliche Aktivitätskonzentration des Radionuklids i in der Fortluft oder im Abwasser in $[\text{Bq}/\text{m}^3]$
- C_i maximal zulässige Aktivitätskonzentration des Radionuklids i in der Fortluft oder im Abwasser in $[\text{Bq}/\text{m}^3]$ gemäß Anlage VII, Teil D, Tab. 4, StrlSchV
- A_i jährliche abgeleitete Aktivität des Radionuklids i mit der Fortluft oder dem Abwasser in $[\text{Bq}/\text{a}]$
- G_i jährliche mit der Fortluft oder dem Abwasser maximal zulässige Ableitung des Radionuklids i in $[\text{Bq}/\text{a}]$
- V Ableitmenge mit der Fortluft oder mit dem Wasser in $[\text{m}^3/\text{a}]$
- Q Fortluftstrom im Jahresdurchschnitt aus Strahlenschutzbereichen bzw. Gebäuden in $[\text{m}^3/\text{h}]$



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 32 von 40

Stand: September 2013

V_W jährliche Abwassermenge aus Strahlenschutzbereichen bzw. am Ort der Einleitung in die öffentliche Kanalisation in [m³/a]

V_L jährliche abgeleitete Fortluftmenge in [m³/a]

Tab. B-6: Maximal zulässige Aktivitätskonzentrationswerte im Jahresmittel für einige in der Medizin häufig eingesetzte Radionuklide in Abhängigkeit von der Ableitmenge (aus /1/)

Radionuklid	Maximal zulässige Aktivitätskonzentration in [Bq/m ³]			
	im Abwasser		in der Fortluft	
	$V_W \leq 10^5 \text{ m}^3/\text{a}$	$V_W > 10^5 \text{ m}^3/\text{a}$	$Q \leq 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$	$10^4 \text{ m}^3/\text{h} < Q \leq 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$
H-3 A ¹⁾	1 E+08	1 E+07	1 E+03	1 E+02
H-3 O ²⁾	7 E+07	7 E+06	-	-
C-14	6 E+06	6 E+05	6 E+01	6 E+00
F-18	2 E+07	2 E+06	5 E+03	5 E+02
P-32	3 E+05	3 E+04	1 E+01	1 E+00
Cr-51	3 E+07	3 E+06	8 E+03	8 E+02
Fe-59	2 E+05	2 E+04	8 E+01	8 E+00
Ga-67	5 E+06	5 E+05	1 E+03	1 E+02
Se-75	4 E+05	4 E+04	2 E+01	2 E+00
Sr-89	3 E+05	3 E+04	4 E+01	4 E+00
Y-90	3 E+05	3 E+04	2 E+02	2 E+01
Tc-99m	4 E+07	4 E+06	2 E+04	2 E+03
In-111	4 E+06	4 E+05	1 E+03	1 E+02
I-123	4 E+06	4 E+05	7 E+02	7 E+01
I-131 E ³⁾	5 E+04	5 E+03	5 E+00	5 E-01
Sm-153	1 E+06	1 E+05	5 E+02	5 E+01
Lu-177	1 E+06	1 E+05	3 E+02	3 E+01
Re-186	5 E+05	5 E+04	3 E+02	3 E+01
Re-188	5 E+05	5 E+04	4 E+02	4 E+01
Tl-201	1 E+07	1 E+06	5 E+03	5 E+02

¹⁾ A = Aerosol (Luft); ²⁾ O = Organisch; ³⁾ E = Elementar

Gemäß der Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin /5/ sind die Grenzwerte der Aktivitätskonzentrationen bei Abwässern aus diagnostischen Verfahren am Ort der Einleitung in die öffentliche Kanalisation einzuhalten, d.h., es darf z. B. bei einem Krankenhaus die gesamte Abwassermenge berücksichtigt werden. Bei Arztpraxen reicht im Allgemeinen das Aufkommen inaktiven Abwassers des Gebäudes nicht aus, die Grenzwerte zu unterschreiten. Hier könnte die Genehmigungsbehörde gemäß § 47(4) StrlSchV höhere Grenzwerte festlegen. Dabei ist zu beachten, dass die Einwirkung auf die Inkorporationsketten frühestens ab der Kläreinrichtung für das Abwasser und die externe Exposition von Personen ab der Begehbarkeit der Abwasserkanäle beginnt, so dass bis dahin die Verdünnung durch die übrigen inaktiven Einleiter wirksam wird (vgl. auch Kap. 3.2, S. 7). Dieser Standpunkt wird gestützt durch die Aussage in der Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin /5/, dass bei den Ableitungen nach nuklearmedizinischen Untersuchungen wegen der kurzen Halbwertszeiten der verwendeten radioaktiven Stoffe eine Gefährdung der Allgemeinheit oder der Umwelt nicht zu befürchten ist, und die Konkretisierung in der Empfehlung der Strahlenschutzkommission vom April 1998 /14/, dass die Einrichtung von Abklinganlagen für nur diagnostisch eingesetzte Radiopharmaka für nicht erforderlich gehalten wird.



Für die Ableitung radioaktiver Abwässer aus Abklinganlagen von Iod-Therapiestationen wird die Möglichkeit der Berücksichtigung des Aufkommens inaktiven Wassers in der Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin nicht explizit eingeräumt, sondern auf in der Genehmigung zu treffende Regelungen verwiesen. Allerdings wird eine „zusätzliche“ Verdünnung untersagt. Das inaktive Abwasser einer Einrichtung wird in diesem Sinne nicht als zusätzliche Verdünnung betrachtet. Unter Beachtung der Tatsache, dass gemäß § 47 (4) StrlSchV die Behörde einen anderen Bezugspunkt als Grenze des Strahlenschutzbereiches festlegen kann, sollte auch bei der Festlegung der zulässigen Abwasserkonzentration aus Abklinganlagen von Therapiestationen das Gesamtabwasseraufkommen der Einrichtung berücksichtigt werden.

Eine Empfehlung der Strahlenschutzkommission zu Strahlenschutzgrundsätzen für die Radioiod-Therapie /15/ bestätigt dies. Danach ist die Konzentration des Abwassers aus Abklinganlagen an dem Ort zu ermitteln, an dem die Ableitungen zum ersten Mal in den begehbaren oder offenen Teil der Abwasserkanäle einmünden, beziehungsweise, wenn keine begehbaren Abwasserkanäle bis zur Einmündung in die Kläranlage vorhanden sind, an der Einleitung zum Klärwerk. Da die Wasserfracht an diesen Stellen im Allgemeinen schwer zu ermitteln ist, reicht in den meisten Fällen die Einbeziehung des Gesamtabwassers des Krankenhauses.

In Tab. B-7 ist modellmäßig mit verkürzten Radionuklidlisten ein Beispiel einer Bewertung der Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser für ein Krankenhaus unter Bezug auf das Gesamtabwasser dargestellt.

Die Diagnostik schöpft für die betrachteten Radionuklide den Grenzwert nur zu ca. 5 % aus. Danach ist keine Abklinganlage oder eine Festlegung erhöhter Abgabewerte nötig.

Für die Ableitung in der Therapie übersteigen in unserem Beispiel die ermittelten Werte in Summe den Grenzwert nach § 47 StrlSchV um das rund 130fache. Das Krankenhaus benötigt demnach eine Abklinganlage.

Sollen die neben der Diagnostik verbleibenden 95 % Grenzwertausnutzung vom Abwasser der Abklinganlage ausgeschöpft werden, und betrachtet man hier nur das I-131, dann sind im Gesamtabwasser noch 46 Bq/l (= $0,92 \cdot 50$ Bq/l) zulässig. Das aus der Abklinganlage abzuleitende Abwasser darf dann eine im Verhältnis von Gesamtabwasser zu Abwasser aus der Abklinganlage höhere Aktivitätskonzentration besitzen. Bei einem Jahresaufkommen der Therapiestation an Abwasser von z.B. 150 m³ und der Ausschöpfung der o.g. zulässigen 46 Bq/l ergäbe sich für I-131 eine zulässige mittlere Konzentration des Abwassers aus der Abklinganlage von 15.330 Bq/l (= $46 \text{ Bq/l} \cdot 50.000 / 150$). Zur Vermeidung von Grenzwertüberschreitungen durch Betriebsschwankungen, z. B. beim Gesamtabwasseranfall, sollte in der Genehmigung der rechnerische Wert nicht voll ausgeschöpft werden.

Die jährliche Meldung der Ableitungen muss zum Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte auch das Gesamtabwasseraufkommen der Einrichtung beinhalten. Letzteres ist auch jährlich wirklich zu prüfen, da technische Neuerungen (z. B. Umstellungen von Kühleinrichtungen u. ä.) u. U. zu drastischen Reduzierungen des Gesamtabwassers führen können.



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 34 von 40

Stand: September 2013

Tab. B-7: Beispielrechnung für die Ableitung radioaktiver Stoffe aus einer nuklearmedizinischen Abteilung mit dem Abwasser aus einem Krankenhaus

Nuklid/ Anwendung	Verbrauch/ gehandhabte Aktivität $A_U \cdot H_U$ ¹⁾ [GBq/a]	Ableitung A_i [GBq/a]	Aktivitäts- Konzentration ²⁾ \bar{C}_i [Bq/l]	10facher Grenzwert C_i [Bq/l]	Grenzwert- ausschöpfung \bar{C}_i / C_i [%]
<u>Diagnostik</u> ³⁾					
F-18	148	15	300	20.000	1,5
Ga-67	5	0,5	10	5.000	0,2
Tc-99m	200	38	760	40.000	1,9
In-111	5	2	40	4.000	1,0
I-123	5,5	1,6	32	4.000	0,8
					$\Sigma = 5,4$
<u>Therapie</u>					
I-131 / Karz.	300	297	5940	50	11.900
I-131 / Funkt.	60	30	600	50	1.200
Y-90	15	5	100	300	33
					$\Sigma = 13.133$

¹⁾ entspr. Gl. (4) in Kap. 3.3 ist $A_U \cdot H_U$ die gehandhabte Aktivität

²⁾ entspr. Gl. (5) in Kap. 3.3; Wasserverbrauch des Krankenhauses : $V_w = 50.000 \text{ m}^3/\text{a} = 5 \cdot 10^7 \text{ l/a}$

³⁾ Diagnostikpatienten 33 % stationär, 67 % ambulant (geben nur 50 % ihrer Ausscheidungen im Krankenhausbereich ab) sind hier berücksichtigt.

Die Kontamination der Luft in Iod-Therapiestationen ist wie folgt zu charakterisieren:

Die Abgabe von I-131 durch die Atemluft liegt für eine solche Station in der Größenordnung von einigen hundert MBq pro Jahr. Die Luftaktivitätskonzentration in Patientenzimmern erreicht dabei einige zehn Bq/m³ und kann bei Karzinompatienten kurz nach der Applikation ohne Raumluftwechsel bis zu einigen kBq/m³ ansteigen. Angesichts dieser Sachlage und der zulässigen mittleren Aktivitätskonzentration von 5 Bq/m³ in der Fortluft ist eine Entlüftung der Patientenzimmer mit Rückhaltung des I-131 durch Aktivkohlefilter inklusive messtechnischer Kontrolle erforderlich.

Die Luftaktivierung durch medizinische Elektronenbeschleuniger spielt wegen der Schwellenwerte der Gamma-Aktivierungsreaktionen an N-14 und O-16 und der auch damit verbundenen Neutronenbildung erst ab Beschleunigungsenergien über 10 MeV eine Rolle. Bis 16 MeV liegen die Luftaktivitätskonzentrationen an N-13 und O-15 bei 1 kBq/m³ und darunter, so dass unter Berücksichtigung der Einschaltzeiten (außerhalb der Betriebszeit kann die Fortluftkonzentration gleich 0 gesetzt werden) im Jahresmittel die Grenzwerte des § 47 StrlSchV unterschritten werden. Bei 20 MeV bzw. 25 MeV können allerdings Aktivitätskonzentrationen von 3 bzw. 30 kBq/m³ erreicht und die Grenzwerte des § 47 StrlSchV überschritten werden.

Eine solche Überschreitung sollte bereits im Genehmigungsverfahren berücksichtigt werden, indem höhere zulässige Ableitungswerte von der Behörde festgelegt werden, was im Allgemeinen möglich ist, da die Ableitungen innerhalb des Geländes der medizinischen Einrichtung erfolgen und wegen der Verdünnung mit der Außenluft und des Abklingens der kurzlebigen Radionuklide an der kritischen Einwirkungsstelle die Grenzwerte des § 47 (1) StrlSchV dennoch eingehalten werden können.

Für PET-Zyklotrons gibt Ewen /16/ Luftaktivierungskonzentrationen im Bereich um 1 kBq und darunter an. Unter Beachtung der Einschaltzeit und der Summenformel wird im Allgemeinen der Grenzwert des



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 35 von 40

Stand: September 2013

§ 47 StrlSchV eingehalten. Die messtechnische Überwachung ist aber wegen Aktivitätsfreisetzung bei einem Bruch der Targetfolie oder durch Störungen bei der Verarbeitung der PET-Nuklide erforderlich.

3 Maßnahmen zur Emissionsüberwachung

3.1 Wasserpfad

Eine messtechnische Überwachung der Aktivität des Abwassers aus medizinischen Einrichtungen ist, bis auf spezielle Laborbetriebssituationen, nur für das Abwasser aus Abklinganlagen von Therapiestationen notwendig. Patientenausscheidungen aus der nuklearmedizinischen Diagnostik gelangen direkt ins Abwasser ebenso wie niederaktive Spülwässer aus Laboratorien, wenn eine Sammlung der flüssigen radioaktiven Abfälle gewährleistet ist. Die Sicherung der Einhaltung der Grenzwerte aus § 47 StrlSchV erfolgt für diese Fälle durch rechnerische Abschätzung (vgl. Kap. 3. und Tab. B-3.6).

Zur Messung der Aktivitätskonzentration vor Ableitung des Abwassers aus Abklinganlagen von Therapiestationen, das überwiegend I-131 enthält, werden vorzugsweise NaI-Szintillationsdetektoren in Becher- oder Ringbechergeometrie benutzt. Vorzuziehen ist dagegen die Anwendung hochauflösender Gammaskpektrometrie, da hierdurch ggf. mehrere gammastrahlende Radionuklide erfasst werden können.

Besitzen nuklearmedizinische Laboratorien Rückhalteeinrichtungen für das Abwasser, dann ist, falls das Abwasser nicht als flüssiger radioaktiver Abfall entsorgt wird, vor seiner Ableitung messtechnisch durch Probenentnahme und -messung sicherzustellen, dass die Grenzwerte des § 47 StrlSchV unter Einbeziehung der Summenformel eingehalten werden. Die eingesetzten Messverfahren müssen in der Lage sein, alle verwendeten Radionuklide mit Halbwertszeiten, die zum Zeitpunkt der Ableitung noch Beiträge zur Aktivität des Abwassers liefern können, möglichst selektiv und so empfindlich zu erfassen, dass die Nachweisgrenzen deutlich unter den einzuhaltenden Grenzwerten liegen. Gammaskpektrometrische Messungen an Volumenproben mittels Szintillations- oder Halbleiterdetektoren (je nach Anzahl der Radionuklide und damit notwendiger Auflösung) sind durchzuführen ggf. ergänzt durch Betastrahlungsmessungen an Eindampfrückständen oder LSC- Messungen beim Umgang mit reinen Betastrahlern.

4 Luftpfad

Messtechnische Kontrollen der Einhaltung der zugelassenen Aktivitätskonzentrationen sind in der Nuklearmedizin vor allem bei der Anwendung der radioaktiven Iod-Isotope wegen der hohen Flüchtigkeit des Iods und der geringen zulässigen Aktivitätskonzentration in der Fortluft notwendig.

Direkte Kontaminationen des Luftpfades treten bei diagnostischen Anwendungen im Allgemeinen nur beim - abgesehen von PET - relativ seltenen Einsatz von gasförmigen Radionukliden oder Aerosolen, z. B. bei der Lungenventilation, auf. Messtechnische Kontrollen der Fortluft sind abgesehen von PET (s. u.) meist nicht erforderlich.

Die messtechnische Kontrolle der Aktivitätskonzentrationen der Fortluft von Iod-Therapiestationen kann mit kontinuierlich arbeitenden Messgeräten, aber auch durch kontinuierliche Probenentnahme und anschließende Messung erfolgen. Die Probenentnahme geschieht mit Luftprobensammelgeräten auf Aktivkohlefiltern, die dann z. B. mit der gleichen Messapparatur wie die Abwässer der Abklinganlage der Therapiestation ausgewertet werden können. Die Sammelzeit eines Messfilters kann z. B. eine Woche betragen, wobei der Aktivitätsverlust durch Abklingen während der Sammelzeit unter der Voraussetzung gleichmäßigen Aktivitätsanfalls rechnerisch korrigiert werden kann.

Beim Nachweis der sicheren Unterschreitung der zulässigen Aktivitätskonzentration in der Fortluft von Iod-Therapiestationen über einen repräsentativen Zeitraum kann die kontinuierliche Überwachung durch eine Kontrolle der Filtereffektivität mit Probensammlung vor und nach dem Filter der Abluftanlage nach längerer Standzeit der Filter abgelöst werden. Die Häufigkeit solcher Kontrollen hängt vom Wechselrhythmus der Filter ab, sollte aber mindestens einmal im Jahr erfolgen.



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 36 von 40

Stand: September 2013

Für In-vitro-Laboratorien, in denen mit Na^{125}I und Na^{131}I umgegangen wird, und die zweckmäßigerweise über einen Abzug mit Aktivkohlefilter zu entlüften sind, sollte die Einhaltung der Abgabewerte zumindest durch repräsentative Einzelprobenentnahme über Geräte mit Sammlung auf Aktivkohlefiltern nachgewiesen werden.

Bei RIA-Verfahren (RIA-Kits) mit ^{125}I gibt es praktische keine Freisetzung. Eine Raumluftüberwachung und eine Filterung sind deshalb nicht erforderlich.

Eine Fortluftüberwachung von medizinischen Elektronenbeschleunigern ist, auch bei hohen Beschleunigungsenergien, nicht üblich. Es kann von einer wegen des Patienten-Routinebetriebes relativ gleichmäßigen Fortluftkontamination ausgegangen werden, deren Höhe, wie in Abschnitt 2 dargelegt, bereits im Genehmigungsverfahren zu bewerten ist.

Die Fortluft von PET-Zyklotrons wird aus zwei Gründen messtechnisch überwacht. Zum einen ist die zulässige Konzentration der Luftaktivierungsnuklide N-13, O-15 und Ar-41 einzuhalten, was im Allgemeinen der Fall ist. Zum anderen muss ein möglicher Austritt von PET-Aktivierungsnukliden, z. B. bei einer radiochemischen Aufarbeitung, erkannt und die Fortluftableitung bis zum Abklingen der Nuklide in der Anlage gestoppt werden. Die Abluft der Boxen zur Radionuklidbearbeitung wird häufig zwischengespeichert und nach Abklingen über die Überwachungsmesseinrichtung abgegeben. Auch die Atemluft von Patienten bei PET-Untersuchungen enthält die kurzlebigen PET-Nuklide.

Fortluftüberwachungssysteme für PET-Zentren werden zweckmäßigerweise auf der Betaaktivitätsmessung der Positronenstrahler mit Großflächenproportionalzählrohren aufgebaut. Eine nützliche Übersicht findet sich in /17/. Dabei werden auch Koinzidenzmessverfahren eingesetzt.



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 37 von 40

Stand: September 2013

Anhang C Hinweise zur Ermittlung der Strahlenexposition, Luftpfad

Höhere mittlere Aktivitätskonzentrationen als die in § 47 (4) StrlSchV genannten sind nur dann genehmigungsfähig, wenn rechnerisch nachgewiesen wird, dass die Dosisgrenzwerte nach § 47(1) StrlSchV eingehalten werden. Die Ermittlung der Strahlenexposition infolge von Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft gliedert sich in zwei Schritte: die Ausbreitungs- und die Dosisberechnung für die abgeleiteten radioaktiven Stoffe. Das Rechenmodell ist in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV (AVV) /7/ vorgegeben.

Die Ausbreitung radioaktiver Stoffe wird im Wesentlichen festgelegt durch den Quellterm, standortspezifische Parameter wie Emissionshöhe, zeitliche Verteilung der Emissionen und lokale meteorologische Ausbreitungsstatistik, während im zweiten Schritt allgemeine radioökologische Parameter von Bedeutung sind.

Zunächst müssen folgende Fragen beantwortet werden:

1. Aus welcher Höhe wird abgeleitet?
2. Handelt es sich dabei um Ableitungen mit konstanten Emissionsraten oder um Einzelemissionen?

Bei kleineren Anlagen wird die Fortluft in der Regel über kleinere Stutzen auf dem Dach eines Gebäudes abgegeben und die Ausbreitung der radioaktiven Stoffe durch die Größe und Art des Gebäudes beeinflusst. Für diesen Fall hält /7/ im Abschnitt 4.6.2 eine konservative Rechenvorschrift bereit, die sicherstellt, dass die Strahlenexposition für Personen in der Umgebung infolge der Ableitung radioaktiver Stoffe nicht unterschätzt wird. Erfolgen die Emissionen mit der Fortluft über einen Kamin, dessen Bauhöhe die umliegenden Gebäude um mindestens einen Faktor 2 überragt, dann ist nach /7/, Kap. 4.6.2, die Kaminhöhe gleich der effektiven Emissionshöhe zu setzen.

Zur Durchführung der Ausbreitungsrechnung ist eine 4-parametrische mindestens 5-jährige Ausbreitungsstatistik zu verwenden. Als Ergebnis der Rechnung ergeben sich die sog. Langzeitausbreitungsfaktoren bzw. die bodennahen Konzentrationen in verschiedenen Richtungen und Entfernungen. Das absolute Maximum bestimmt dann die so genannte ungünstigste Einwirkungsstelle, wo die Strahlenexposition für eine Referenzperson am größten ist. Bei dieser statistischen Abschätzung wird unterstellt, dass die Emissionen über das Jahr konstant sind. Ist die Berechnung mit einer 4-parametrischen Ausbreitungsstatistik nicht möglich, ist ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung des Langzeitausbreitungsfaktors in den einzelnen Sektoren zulässig auf der Grundlage der Windrichtungshäufigkeiten in den einzelnen Sektoren.

Im Fall ungleichmäßiger Emissionen ist unter Umständen mit dem Kurzzeitausbreitungsfaktor zu rechnen. Einzelheiten sind in Abschnitt 4.4 von /7/ beschrieben.

Nach Klärung aller anlagen- und standortspezifischen Fragen sind die effektive Dosis und die Organdosen für die sechs in der StrlSchV vorgegebenen Altersgruppen und alle Expositionspfade zu berechnen. Für das Kleinkind ist die Aufnahme von Radionukliden über die Muttermilch zu berücksichtigen. Alle dazu benötigten Parameter werden in /7/ bereitgestellt. Die erforderlichen Dosiskoeffizienten sind /23/ zu entnehmen. Allerdings muss nicht für jedes Radionuklid die Strahlenexposition für alle Expositionspfade betrachtet werden; so braucht z. B. keine Dosis durch Ingestion für Edelgase und für sehr kurzlebige Radionuklide berechnet zu werden, da ihr Beitrag vernachlässigt werden kann.

Einen Anhaltspunkt zur Höhe der Strahlenexposition für eine Reihe von Radionukliden erhält man auch aus den Angaben in der Arbeit „Die Dosis-Relevanz einzelner Expositionspfade“ /8/.



Anhang D Technische Auslegung von Anlagen zur Überwachung luftgetragener radioaktiver Stoffe

Nach /3/ ist die Überwachung ein „Sammelbegriff für alle Arten einer kontrollierten Erfassung der physikalischen Größen einschließlich eines Vergleiches mit vorgegebenen Werten.“ Die Überwachung von Emissionen kann durch

- Abschätzung,
- diskontinuierliche Messung oder
- kontinuierliche Messung

erfolgen.

Für die kontinuierliche Messung werden in der Regel Monitore eingesetzt, mit denen Messen, Auswerten und ggf. Alarmieren gleichzeitig erfolgt. Für die diskontinuierliche Messung sind Sammler einzusetzen, deren Filter später im Labor ausgewertet werden. Unter Bilanzierung versteht man eine besondere Form der Überwachung, bei der eine Identifizierung sowie eine Aktivitätsbestimmung von abgeleiteten Radionukliden oder Radionuklidgruppen für ein bestimmtes Zeitintervall durchgeführt werden.

Eine generelle Empfehlung für die jeweilige Messtechnik ist nicht möglich, da viele Spezialfälle vorkommen können. In jedem Fall aber ist es notwendig, neben der reinen Messtechnik auch Randbedingungen in die Überlegungen bei der Auswahl der Messtechnik einzubeziehen, z. B.:

- Abgastemperaturen
- hoher Luftfeuchtigkeitsgehalt
- geringe Kamindurchsätze
- Isokinetik

Bei der Auswahl der entsprechenden Messtechnik sind aber mindestens die nachstehenden Aspekte zu beachten (im Sinne einer Merkpostenliste):

Probenentnahmesystem:

- Repräsentativität
- Minimierung von Abscheideverlusten in der Probenentnahmeleitung bis zum Sammelmedium
- Dichtheit
- Probenentnahme günstiger Weise im Kamin-Bypass *)
- Ausfallsignalisation
- Regelsystem für Probenentnahme
- Minimierung von chemischen Reaktionen luftführender Teile mit korrosiven Gasen

*) Bei PET-Zentren ist kein Bypass notwendig, Großflächenzählrohre werden direkt auf dem Abluftkanal montiert.

Einzelheiten dazu finden sich in der DIN ISO 2889 und Beiblatt /9/.

Luftsammler/-monitore:

- Umgebungsbedingungen für Geräte (Zugang, Kontaminations-/Staubschutz, Strahlungsfeld bei Monitoring)
- Zählgasproblematik (bei Alpha-/Beta-Aerosol- und H-3-Monitoren)
- Alarm- und Ausfallsignalisation
- Abscheidegrad auf Sammler je nach Radionuklidgruppe (Filter, Sorptionsmittel)



- Probenentnahmefrequenz (Halbwertszeit, Handhabung, Filterstandzeit)
- Analysenverfahren für die zu überwachenden Radionuklidgruppen
- Überlegungen zu Messunsicherheiten bei der Bilanzierung

Charakteristika der Radionuklide

- Alpha-, Beta-, Gammastrahler
- Gasförmige Radionuklide (Direktmessung oder Sammlung in Behälter zur Laboranalyse)
- spezielle Radionuklide, wie Iod und Tritium (spezielle Mess- und Sammelsysteme nötig)
- bei Umgang mit verschiedenen Radionuklidgruppen sind evtl. mehrere unterschiedliche Mess- und Sammelsysteme nötig

Kontrolle der Einhaltung von Grenzwerten und Messbereiche

- Ermittlung der nach StrlSchV einzuhaltenden Grenzwerte (vgl. Anhänge A und B)
- Festlegung des Messbereiches anhand der maximal möglichen Aktivitätsabgabe (vgl. Kap. 3.)
- Auswahl der dafür geeigneten Mess- und Sammelsysteme

Nachweisgrenzen (NWG) für Luftmonitore

Die Abschätzung geschieht in Anlehnung an die DIN ISO 11929 /20/
mit $\alpha = \beta = 0,05$; entsprechend $k_{1-\alpha} + k_{1-\beta} = 3,3$ ergeben sich folgende Werte :

- *Gasmonitor* zur Messung von Edelgasen und PET-Nukliden
(Messzeit 10 min; Messküvetten mit Volumen von 12 l)

Ar-41, C-11, O-15:	300 Bq/m ³
F-18, Kr-85:	600 Bq/m ³
Xe-133:	1.000 Bq/m ³

Bei großen Messküvetten (80 l) können für Ar-41 NWG bis 60 Bq/m³ erreicht werden.
- *Direktmessung am Abluftkanal:*

F-18:	120 Bq/m ³
Ar-41, C-11, O-15:	70 Bq/m ³
- *H-3/C-14- Monitor*
(Messzeit 60 min; Durchfluss-Proportionalzählrohr; Verhältnis von Messluft zu Zählgas muss extrem konstant gehalten werden)

H-3:	500 Bq/m ³
C-14:	250 Bq/m ³
- *Iodmonitor*
(Messzeit 60 min; Szintillations- oder Ge-Detektoren, Marinelli-Geometrie mit Schüttgut- oder Aktivkohlefilterpatrone)

I-131:	0,5 bis 1 Bq/m ³
--------	-----------------------------



LOSEBLATTSAMMLUNG FS-78-15-AKU
EMPFEHLUNGEN ZUR ÜBERWACHUNG
DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

Blatt: 4.2

Seite: 40 von 40

Stand: September 2013

- *Aerosolmonitor*

mögliche Sammel- und Messverfahren	Nachweisbare Aktivitätskonzentration in [Bq/m ³] Messzeit 60 min		
	α (Am-241)	β (Sr-90)	γ (Co-60)
Filterband; α -/ β -Messung	0,6	1	-
Festfilter; α -/ β -Messung	0,15	0,3	-
Festfilter; nur α -Messung	0,07	-	-
Festfilter mit γ -Spektrometrie	-	-	0,1
Filterband mit γ -Spektrometrie	-	-	0,1

Die o. g. Verfahren verfügen über automatische Kompensationsverfahren, wie

- ABPD: α -/ β -Pseudokoinzidenz-Differenzverfahren,
- AERD: α -Energie-Reichweiten-Diskriminierungsverfahren oder
- α -/ β -Verhältnismessung
(nur Beta-Messung, wenn keine künstliche Alpha-Aktivität vorhanden).

Die o. g. NWG sind für einen Pegel der natürlichen Aktivitätskonzentration von 10 Bq/m³ abgeschätzt, da die in den Herstellerunterlagen genannte „apparative NWG“ für den praktischen Betrieb unbrauchbar ist. Detaillierte Erläuterungen sind in /11, 24/ enthalten.