

DIN EN ISO 16638-1



ICS 17.240

Einsprüche bis 2018-12-05

Entwurf**Strahlenschutz –
Überwachung und interne Dosimetrie für bestimmte Stoffe –
Teil 1: Inhalation von Uranverbindungen (ISO 16638-1:2015);
Deutsche und Englische Fassung EN ISO 16638-1:2017**

Radiological protection –
Monitoring and internal dosimetry for specific materials –
Part 1: Inhalation of uranium compounds (ISO 16638-1:2015);
German and English version EN ISO 16638-1:2017

Radioprotection –
Contrôle et dosimétrie interne des éléments spécifiques –
Partie 1: Inhalation de composés d'uranium (ISO 16638-1:2015);
Version allemande et anglaise EN ISO 16638-1:2017

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2018-10-05 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nar@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Radiologie (NAR), Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 107 Seiten

DIN-Normenausschuss Radiologie (NAR)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument enthält die deutsche Übersetzung der EN ISO 16638-1:2017, in die der Inhalt des internationalen Schriftstücks ISO 16638-1:2015 „*Radiological protection — Monitoring and internal dosimetry for specific materials — Part 1: Inhalation of uranium compounds*“ unverändert übernommen wurde.

Das internationale Dokument wurde vom ISO/TC 85 „*Nuclear energy, nuclear technologies, and radiological protection*“, Unterkomitee 2 „*Radiological protection*“, erarbeitet.

Für das vorliegende Dokument ist das nationale Gremium NA 080-00-03 AA „Nuklearmedizin“ des DIN-Normenausschusses Radiologie (NAR) in Arbeitsgemeinschaft mit der Deutschen Röntgengesellschaft und in Zusammenarbeit mit der Deutschen Gesellschaft für Nuklearmedizin e.V. (DGN), der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Physik e.V. (DGMP) und der Deutschen Gesellschaft für Radioonkologie e.V. (DEGRO) zuständig.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfs gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Strahlenschutz — Überwachung und interne Dosimetrie für bestimmte Stoffe — Teil 1: Inhalation von Uranverbindungen (ISO 16638-1:2015)

Radioprotection — Contrôle et dosimétrie interne des éléments spécifiques — Partie 1: Inhalation de composés d'uranium (ISO 16638-1:2015)

Radiological protection — Monitoring and internal dosimetry for specific materials — Part 1: Inhalation of uranium compounds (ISO 16638-1:2015)

ICS:

Deskriptoren

Dokument-Typ: Europäische Norm
Dokument-Untertyp:
Dokument-Stage: Annahme
Dokument-Sprache: D

STD Version 2.9d

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
4 Symbole und Abkürzungen	13
4.1 Symbole	13
4.2 Abkürzungen	13
5 Zweck und Notwendigkeit von Überwachungsprogrammen	14
6 Allgemeine Aspekte	18
6.1 Radiologische Aspekte	18
6.2 Chemische Toxizität	19
7 Referenzwerte für Uran	20
7.1 Radiologische Aspekte	20
7.2 Chemische Toxizität	23
7.2.1 Allgemeines	23
7.2.2 Expositionsgrenzwerte	24
7.3 Anwendung von Referenzwerten	24
8 Routineüberwachungsprogramme	25
8.1 Allgemeines	25
8.2 Arbeitsplatzüberwachung	25
8.3 Personendosisüberwachung	26
8.3.1 Allgemeines	26
8.3.2 Dosimetrie und Strahlung	26
8.3.3 Chemische Gefährdung	26
8.4 Verfahren und Überwachungsintervalle	27
8.4.1 Allgemeines	27
8.4.2 Zeitintervalle bei toxikologischen Risiken	27
8.4.3 Zeitintervalle bei radiotoxikologischem Risiko	27
8.4.4 Grundsätze und Annahmen	28
9 Sonderüberwachungsprogramme	29
9.1 Arbeitsplatzüberwachung	29
9.2 Personendosisüberwachung	29
9.2.1 Empfohlene Überwachung bei toxikologischem Risiko	29
9.2.2 Empfohlene Überwachung und empfohlener Zeitraum bei radiotoxikologischem Risiko	29
10 Aufgabenbezogene Überwachungsprogramme	30
10.1 Arbeitsplatzüberwachung	30
10.2 Personendosisüberwachung	31
11 Leistungskriterien für Laboratorien	31
11.1 Allgemeines	31
11.2 Kritische Werte	31

11.3	Referenzwerte	32
11.4	Leistungskriterien für die Arbeitsplatzüberwachung.....	33
12	Qualitätssicherung und Qualitätssteuerung für Laboratorien, die Biotests durchführen.....	33
13	Verfahren zur Beurteilung von Expositionen	34
13.1	Allgemeines	34
13.2	Beurteilung von Daten aus der Arbeitsplatzüberwachung.....	34
13.3	Beurteilung von Daten aus der Personendosisüberwachung.....	35
13.4	Anforderungen an eine Software.....	35
13.5	Unsicherheiten.....	36
13.6	Qualitätssicherung der Bewertungsmethode	37
14	Berichterstattung und Dokumentation.....	37
14.1	Berichterstattung der Ergebnisse für <i>In-vitro</i> -Messungen	37
14.2	Berichterstattung der Ergebnisse für <i>In-vivo</i> -Messungen.....	38
14.3	Dokumentation der Beurteilung der Dosis.....	39
Anhang A (informativ) Nukleare Daten des Zerfalls von U-238 und U-235.....		40
Anhang B (informativ) Standardklassifizierung von Uranverbindungen.....		41
Anhang C (informativ) Messmethoden für Uran.....		43
C.1	Allgemeines	43
C.2	<i>In vitro</i>	43
C.2.1	Allgemeines	43
C.2.2	Natürlicher Untergrund	44
C.3	<i>In vivo</i>	45
C.4	Arbeitsplatzüberwachung.....	46
Anhang D (informativ) Effektive Folgedosis je Inkorporation für Uranverbindungen.....		47
Anhang E (informativ) Schätzung von Unsicherheiten für Beurteilungen der internen Dosis		48
Literaturhinweise.....		52

Europäisches Vorwort

Der Text von ISO 16638-1:2015 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 85 „Nuclear energy, nuclear technologies, and radiological protection“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und als EN ISO 16638-1:2017 durch das Technische Komitee CEN/TC 430 „Nuclear energy, nuclear technologies, and radiological protection“ übernommen, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis April 2018, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis April 2018 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Entsprechend der CEN-CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO 16638-1:2015 wurde von CEN als EN ISO 16638-1:2017 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Themen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Eine Erläuterung zum freiwilligen Charakter von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT) berücksichtigt, enthält der folgende Link: www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 85, *Nuclear energy, nuclear technologies, and radiological protection*, Unterkomitee SC 2, *Radiological protection* erarbeitet.

Einleitung

Bei Arbeiten mit radioaktivem Material können Angestellte im Rahmen ihres Beschäftigungsverhältnisses unter ungünstigen Umständen dieses Material inkorporieren. Der Schutz von Beschäftigten vor Inkorporation erfordert die Überwachung möglicher Aufnahmewege und/oder die quantitative Bestimmung tatsächlicher Aktivitätszufuhren und Expositionen. Eine direkte Bestimmung der Körperdosen durch inkorporierte Radionuklide, welche sich aus einer inneren Strahlenexposition ergeben, ist nicht möglich. Vielmehr muss für die Bestimmung der Körperdosis festgelegt werden, mit welchem Verfahren, Techniken, Häufigkeiten usw. diese bestimmt und beurteilt werden kann. Kriterien für die Gestaltung eines Überwachungsprogramms wie dessen Anforderungen, Verfahren und Zeitplan, hängen üblicherweise von der Gesetzgebung, dem Zweck des übergreifenden Strahlenschutzprogramms, den Wahrscheinlichkeiten von möglichen Radionuklidzufuhren und den Eigenschaften des gehandhabten Materials ab.

Aus diesen Gründen wurden drei Internationale Normen entwickelt, welche Überwachungsprogramme (ISO 20553:2006), Anforderungen an Laboratorien (ISO 28218:2010) und Beurteilungen der Dosis (ISO 27048:2011) behandeln. Die gezeigten Methoden können bei vielen Radionukliden angewendet werden. Für eine Reihe von besonderen Radionukliden und/oder Matrices ist die praktische Anwendung dieser Internationalen Normen nicht ohne weiteres möglich und weiterführende Anleitung daher erforderlich, z. B. für Akkreditierungszwecke.

Die vorliegende Internationale Norm wurde entwickelt, um spezifische Aspekte der Überwachung und der interner Dosimetrie im Fall der Inhalation von Uranverbindungen zu behandeln, und widerspiegelt Folgendes

- das wachsende Interesse an der Energieerzeugung durch Kernenergie und den zugehörigen Anstieg des Uranabbaus und der Brennstoffherstellung,
- die großen Varianz der Isotopenzusammensetzungen der Uranverbindungen, die am Arbeitsplatz angetroffen werden können, und
- die Berücksichtigung der chemischen als auch der radiologischen Risiken, die sich aus Expositionen gegenüber Uran ergeben.

Sie trägt zur Harmonisierung der Verfahrensweisen bei der Überwachung von berufsbedingt exponierten Personen bei, wobei sie eine Ergänzung zu ISO 20553:2006, ISO 28218:2010 und ISO 27048:2011 bleibt.

Diese Internationale Norm beschreibt den Bedarf an einem Programm für die Überwachung und interne Dosimetrie für die verschiedenen Uranverbindungen und bietet eine Anleitung zu dessen Gestaltung. Bei ihrer Entwicklung wurden Empfehlungen von internationalen Expertengremien und sachkundigen Personen mit internationaler Erfahrung bei der praktischen Anwendung der Empfehlungen in Strahlenschutzprogrammen berücksichtigt. Ihre Anwendung erleichtert den Austausch von Informationen zwischen zuständigen Stellen, Aufsichtsbehörden und Arbeitgebern.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm legt Mindestanforderungen an die Gestaltung von Überwachungsprogrammen fest für den Umgang mit Uranverbindungen. Sie legt Grundsätze für die Entwicklung von kompatiblen Zielen, Anforderungen an die Überwachungsprogramme und die Beurteilung der Dosis von beruflich exponierten Beschäftigten mit der Möglichkeit der Inkorporation. Sie legt Verfahren und Annahmen für die Risikoanalyse, Überwachungsprogramme und die genormte Auswertung von Überwachungsdaten fest, um annehmbare Zuverlässigkeitsniveaus für Uran und dessen Verbindungen zu erreichen. Die Norm legt Dosisgrenzen für die Anwendbarkeit der Verfahren fest, oberhalb derer komplexere Verfahren anzuwenden sind.

Uran und seine Verbindungen sind sowohl radiologisch als auch chemisch als toxisch einzuordnen. Daher werden die wissenschaftlichen Grundlagen derzeitiger Normen zur berufsbedingten Exposition zusätzlich auf Grenzwerte für die Strahlenexposition überprüft. Diese Internationale Norm behandelt die Umstände, unter denen die Exposition entweder hinsichtlich der radiologischen oder der chemischen Toxizität beschränkt werden könnte.

Diese Internationale Norm behandelt die folgenden Punkte in Bezug auf Uran und dessen Verbindungen:

- a) Zwecke von Überwachung und Überwachungsprogrammen;
- b) Beschreibung der verschiedenen Kategorien von Überwachungsprogrammen;
- c) quantitative Kriterien für die Durchführung von Überwachungsprogrammen;
- d) geeignete Verfahren zur Überwachung und Kriterien für deren Auswahl;
- e) Informationen, die für die Gestaltung eines Überwachungsprogramms zu sammeln sind;
- f) allgemeine Anforderungen an Überwachungsprogramme (z. B. Nachweisgrenzen, Unsicherheiten);
- g) Häufigkeiten von Messungen;
- h) Verfahren zur Beurteilung der Dosis auf der Grundlage von Referenzwerten für Routine- und Sonderüberwachungsprogramme;
- i) Annahmen für die Auswahl von dosiskritischen Parameterwerten;
- j) Kriterien für die Bestimmung der Signifikanz von Überwachungsergebnissen;
- k) Auswertung von Ergebnissen der Arbeitsplatzüberwachung;
- l) Unsicherheiten, die sich aus der Beurteilung der Dosis und Auswertung von Biotest-Daten ergeben;
- m) Berichterstattung/Dokumentation;
- n) Qualitätssicherung;
- o) Anforderungen an Aufzeichnungen.

Sie gilt nicht für die folgenden Punkte:

- a) Überwachung der Exposition aufgrund von Tochternukliden von Uran, einschließlich Radon;
- b) ausführliche Beschreibungen von Messmethoden und -techniken für Uran;

- c) Dosimetrie bei Rechtsstreitigkeiten;
- d) Modellierung für die Verbesserung der internen Dosimetrie;
- e) mögliche Einflüsse von Gegenmaßnahmen (z. B. Verabreichung von Komplexbildnern);
- f) Untersuchung der Ursachen oder Auswirkungen einer Inkorporation;
- g) Dosimetrie bei Inkorporation durch Ingestion und bei kontaminierten Wunden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

ISO/IEC Guide 99, *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*

ISO 5725-1, *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: General principles and definitions*

ISO 5725-2, *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method*

ISO 5725-3, *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 3: Intermediate measures of the precision of a standard measurement method*

ISO 20553:2006, *Radiation protection — Monitoring of workers occupationally exposed to a risk of internal contamination with radioactive material*

ISO 28218:2010, *Radiation protection — Performance criteria for radiobioassay*

ISO 27048:2011, *Radiation protection — Dose assessment for the monitoring of workers for internal radiation exposure*

ISO 15189:2012, *Medical laboratories — Requirements for quality and competence*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO/IEC Guide 99, ISO 5725-1, ISO 5725-2, ISO 5725-3 und die folgenden Begriffe.

3.1
Absorption
Bewegung von Material ins Blut, unabhängig vom Mechanismus, was im Allgemeinen auf die Dissoziation von Partikeln und die Aufnahme von löslichen Substanzen und von Partikeln dissoziiertem Material ins Blut zutrifft

3.2

Absorptionsklasse F

schnelle Absorptionsraten von abgelagerten Stoffen aus den Atemwegen in ins Blut

[QUELLE: ICRP 66]

3.3

Absorptionsklasse M

mäßige Absorptionsraten von abgelagerten Stoffen aus den Atemwegen ins Blut

[QUELLE: ICRP 66]

3.4

Absorptionsklasse S

langsame Absorptionsraten von abgelagerten Stoffen aus den Atemwegen ins Blut

[QUELLE: ICRP 66]

3.5

Aktivität

Anzahl von spontanen Kernzerfällen je Zeiteinheit

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Aktivität wird in Becquerel (Bq) angegeben, d. h. die Anzahl von Zerfällen je Sekunde.

3.6

aktivitätsbezogener Medianwert des aerodynamischen Durchmessers

AMAD

aktivitätsbezogener Medianwert des aerodynamischen Durchmessers, Messwert für die Aerosolgröße. 50 % der Aktivität im Aerosol ist verknüpft mit Teilchen, deren aerodynamischer Durchmesser größer als der AMAD ist.

Anmerkung 1 zum Begriff: Der aerodynamische Durchmesser eines luftgetragenen Partikels ist der Durchmesser, den eine Kugel mit Einheitsdichte haben müsste, um beim Absetzen in Luft die gleiche Absetzgeschwindigkeit zu haben wie das interessierende Partikel.

3.7

Clearance

Nettoeffekt der biologischen Prozesse, durch die Radionuklide aus dem Körper oder aus einem Gewebe, Organ oder Bereich des Körpers entfernt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Clearance-Rate ist die Geschwindigkeit, bei der das erfolgt.

3.8

Kontamination

radioaktive Substanzen auf Oberflächen oder in Feststoffen, Flüssigkeiten oder Gasen (einschließlich des menschlichen Körpers), wobei ihr Vorhandensein unbeabsichtigt oder unerwünscht ist, oder der Prozess, der zum Vorhandensein an derartigen Orten führt

3.9

kritischer Wert

Höchstwert für das Ergebnis einer einzelnen Messung in einem Überwachungsprogramm, bei dem es sicher ist anzunehmen, dass die entsprechend extrapolierte Jahresdosis einen zuvor festgelegten Wert der Dosis nicht überschreitet

3.10

Erkennungsgrenze

festgelegter oder A-posteriori-Wert der Messgröße, bei dessen Überschreitung durch das Ergebnis einer aktuellen Messung einer Messgröße, die einen physikalischen Effekt quantifiziert, entschieden wird, dass der physikalische Effekt vorliegt

3.11

Nachweisgrenze

kleinster Wert einer Messgröße, der mit diesem Messmethodenerfahren nachweisbar ist

3.12

Jahresdosis

effektive Folgedosis, die sich aus allen während eines Kalenderjahres auftretenden Zufuhren ergibt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Benennung „Jahresdosis“ wird nicht verwendet, um die in einem Jahr von allen vorangegangenen Zufuhren erhaltene Dosis darzustellen.

3.13

effektive Folgedosis

Summe der Folge-Organ- oder -Gewebe-Äquivalentdosen und der entsprechenden Gewebe-Wichtungsfaktoren

Anmerkung 1 zum Begriff: Im Rahmen dieser Internationalen Norm beträgt die Integrationszeit 50 Jahre nach einer Zufuhr.

3.14

Äquivalentdosis

Produkt aus der absorbierten Dosis und dem Strahlungs-Wichtungsfaktor für die konkrete Strahlungsart an diesem Punkt der Absorption

3.15

Folge-Äquivalentdosis

Zeitintegral der Äquivalentdosisleistung in einem bestimmten Gewebe oder Organ nach der Zufuhr von radioaktivem Material in den Körper einer Referenzperson

Anmerkung 1 zum Begriff: Im Rahmen dieser Internationalen Norm beträgt die Integrationszeit 50 Jahre nach einer Zufuhr.

3.16

Ausscheidungsfunktion

Funktion, die den Anteil einer Aktivitätszufuhr beschreibt, der je Tag ausgeschieden wird, nachdem eine bestimmte Zeit seit der Zufuhr vergangen ist

3.17

Ereignis

jegliche unbeabsichtigte Begebenheit, einschließlich Bedienungsfehler, Geräteausfall oder eines sonstigen Zwischenfalls, deren Auswirkungen oder mögliche Auswirkungen aus der Sicht des Schutzes oder der Sicherheit nicht vernachlässigbar sind

3.18

Zufuhr

<Prozess> Akt oder Prozess der Aufnahme von Radionukliden in den Körper durch Inhalation oder Ingestion oder über die Haut

3.19

Aktivitätszufuhr

<Größe> Aktivität eines Radionuklids, das vom Körper in einer gegebenen Zeitdauer oder als Folge eines Ereignisses aufgenommen wurde

3.20

In-vitro-Analysen

indirekte Messungen

Analysen, die Messungen der Radioaktivität umfassen, die in biologischen Proben vorliegt, die einer Person entnommen wurden

Anmerkung 1 zum Begriff: Dazu gehören Urin- und Stuhlproben sowie Nasenabstriche; in Sonderüberwachungsprogrammen können Proben von anderen Materialien, wie z. B. Blut und Haare, entnommen werden.

3.21

In-vivo-Messungen

direkte Messungen

Messung der im menschlichen Körper vorliegenden Radioaktivität, durchgeführt mit Detektoren zum Messen der emittierten Strahlung

Anmerkung 1 zum Begriff: Üblicherweise sind die Messgeräte Ganzkörper- oder Teilkörperzähler (z. B. Lungen-, Schilddrüsenzähler).

3.22

Überwachung

Messungen zum Zweck der Bewertung oder Kontrolle der Exposition gegenüber radioaktivem Material, und die Auswertung der Ergebnisse

Anmerkung 1 zum Begriff: In dieser Internationalen Norm werden vier verschiedene Kategorien von Überwachungsprogrammen unterschieden, und zwar *bestätigendes Überwachungsprogramm* (3.23), *Routineüberwachungsprogramm* (3.24), *Sonderüberwachungsprogramm* (3.25) und *aufgabenbezogenes Überwachungsprogramm* (3.26), sowie zwei verschiedene Arten der Überwachung, und zwar *Personendosisüberwachung* (3.27) und *Arbeitsplatzüberwachung* (3.28), die in jeder Kategorie vorkommen.

3.23

bestätigendes Überwachungsprogramm

Überwachungsprogramm, das zur Bestätigung von Annahmen zu den Arbeitsbedingungen durchgeführt wird

BEISPIEL Überwachungsprogramm, das durchgeführt wird um zu bestätigen, dass keine signifikanten Zufuhren erfolgt sind.

3.24

Routineüberwachungsprogramm

Überwachungsprogramm, das mit fortlaufenden Arbeitsabläufen verbunden ist und dafür vorgesehen ist nachzuweisen, dass die Arbeitsbedingungen, einschließlich der Werte der Körper-Äquivalentdosis, zufriedenstellend bleiben und behördliche Anforderungen erfüllen

3.25

Sonderüberwachungsprogramm

Überwachungsprogramm, das zur quantitativen Bestimmung signifikanter Expositionen nach tatsächlichen oder vermuteten ungewöhnlichen Ereignissen durchgeführt wird

3.26

aufgabenbezogenes Überwachungsprogramm

Überwachungsprogramm, das auf einen bestimmten Arbeitsablauf bezogen ist oder Informationen zu einem bestimmten Arbeitsablauf von begrenzter Dauer oder nach wesentlichen Änderungen, die für die Anlagen oder Betriebsverfahren gelten, liefert oder bestätigt, dass das Routineüberwachungsprogramm geeignet ist

3.27

Personendosisüberwachung

Überwachung mit Geräten, die von dem jeweiligen Beschäftigten getragen werden, durch Messung der Mengen an radioaktiven Materialien in oder auf deren Körper oder durch Messung des durch den jeweiligen Beschäftigten ausgeschiedenen radioaktiven Materials

3.28

Arbeitsplatzüberwachung

Überwachung durch Messungen in der Arbeitsumgebung

3.29

Überwachungsintervall

Zeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messzeitpunkten

3.30

Qualitätssicherung

geplante und systematische Maßnahmen, die notwendig sind, um ein angemessenes Vertrauen sicherzustellen, dass ein Prozess, eine Messung oder Dienstleistung die vorgegebenen Qualitätsanforderungen erfüllt, wie sie zum Beispiel in einer Lizenz festgelegt sind

3.31

Qualitätssteuerung

Teil der Qualitätssicherung, der dafür bestimmt ist nachzuweisen, dass Systeme und Bestandteile den zuvor festgelegten Anforderungen entsprechen

3.32

Qualitätsmanagement

alle Tätigkeiten der Gesamtführungsaufgabe, welche die Qualitätspolitik, Ziele und Verantwortungen festlegen sowie diese zum Beispiel mittels Qualitätsplanung, Qualitätssteuerung, Qualitätssicherung und Qualitätsverbesserung im Rahmen des Qualitätsmanagementsystems verwirklichen

3.33

Untersuchungsschwelle

Schwellenwert der Dosis, Exposition oder Zufuhr, bei dem oder oberhalb dessen eine Untersuchung zu erfolgen hat, um die mit der Beurteilung der Dosis verbundene Unsicherheit zu verringern

3.34

Registrierschwelle

Schwellenwert der Dosis, festgelegt vom Arbeitgeber oder der Aufsichts- oder Genehmigungsbehörde, bei dem oder oberhalb dessen die Werte der durch die Beschäftigten aufgenommenen Dosis in deren individuellen Unterlagen einzutragen sind

3.35

Referenzwert

Wert von Messgrößen, oberhalb dessen eine bestimmte festgelegte Maßnahme eingeleitet oder Entscheidung getroffen werden sollte

3.36

Retentionsfunktion

Funktion, die den Anteil einer Aktivitätszufuhr beschreibt, die im Körper oder in einem Gewebe, Organ oder Bereich des Körpers vorhanden ist, nachdem eine bestimmte Zeit seit der Zufuhr vergangen ist

3.37

Streufaktor

geometrische Standardabweichung der logarithmischen Normalverteilung von Biotest-Messungen

3.38

Zeitpunkt der Probenahme

<In-vitro-Analyse> Zeitpunkt, an dem die biologische Probe (z. B. Urin, Stuhl) von der betreffenden Person bereitgestellt wurde, d. h. der Endzeitpunkt des Sammelzeitraums

3.39

Zeitpunkt der Messung

<In-vivo-Analyse> Zeitpunkt, an dem die Messung beginnt

4 Symbole und Abkürzungen

4.1 Symbole

D_v	effektive Folgedosis aufgrund der Jahresaktivitätszufuhr (S_v), derart, dass geringere Dosen zum Zweck des Überwachungsprogramms unberücksichtigt gelassen werden dürfen
$E(50)$	effektive Folgedosis für einen Integrationszeitraum von 50 Jahren
$e(50)$	Dosiskoeffizient: effektive Folgedosis je Inkorporation
f_1	Aufnahmefaktor für den Magen-Darm-Trakt
I	Aktivitätszufuhr
$m(t_i)$	vorhergesagter Wert der Messgröße zum Zeitpunkt t_i für eine Inkorporation (Ausscheidungs- oder Retentionsfunktion zum Zeitpunkt t_i für eine Inkorporation)
$m_c(t_i)$	vorhergesagter Wert der Größe, gemessen nach einem Zeitraum von t_i Tage, einer chronischen Inkorporation je Tag (Ausscheidungs- oder Retentionsfunktion zum Zeitpunkt t_i für eine chronische Inkorporation je Tag)
M_i	Messwert zum Zeitpunkt t_i
M_c	kritischer Wert
ΔT	Dauer des Überwachungsintervalls (in Tagen)
$\Delta T/2$	Mitte des Überwachungsintervalls (in Tagen)
$E(t)$	Wert der Ausscheidungskfunktion zum Zeitpunkt t (Tag) nach einer Inkorporation
$R(t)$	Wert der Retentionsfunktion zum Zeitpunkt t (Tag) nach einer Inkorporation
A_{DL}	Nachweisgrenze

4.2 Abkürzungen

AMAD	aktivitätsbezogener Medianwert des aerodynamischen Durchmessers
ZRM	zertifiziertes Referenzmaterial (ISO 28218)
DAC	abgeleitete Luftkonzentration
DIL	abgeleitete Untersuchungsschwelle

DL	Grenzwert der Jahresdosis = 0,02 Sv
DRL	abgeleitete Registrierschwelle
DU	abgereichertes Uran (Uran mit einem Gehalt an U-235, der geringer ist als dessen Gehalt in natürlich vorkommendem Uran)
HEU	hochangereichertes Uran (Uran mit einem Gehalt an U-235 von 20 % oder mehr)
IARC	International Agency for Research on Cancer (Internationale Agentur für Krebsforschung)
ICRP	International Commission on Radiological Protection (Internationale Strahlenschutzkommission)
LEU	schwach angereichertes Uran (Uran mit einem Gehalt an U-235 vom natürlichen Gehalt bis 20 %)
LOAEL	niedrigste Dosis für eine zu beobachtende unerwünschte Wirkung
MRL	minimales Risikoniveau
NOAEL	Dosis ohne zu beobachtende unerwünschte Wirkungen
PAS	personengetragener Luftsammler
RPE	Atemschutzausrüstung
SAS	ortsfester Luftsammler
TRS	Transfer-Bezugsnormal (ISO 28218)
U-nat	Uranverbindung mit natürlicher Isotopenzusammensetzung
WHO	World Health Organization (Weltgesundheitsorganisation)

5 Zweck und Notwendigkeit von Überwachungsprogrammen

Uranverbindungen setzen sich hauptsächlich aus drei unterschiedlichen Isotopen zusammen: U-234, U-235 und U-238; in bestimmten Fällen sind jedoch auch U-233 und U-232 enthalten. Diese Internationale Norm beschreibt vier verschiedene Isotopenzusammensetzungen, die für natürliche (U-nat), abgereicherte (DU), schwach (LEU) und hoch (HEU) angereicherte Formen von Uran (siehe Tabelle 1) auf der Grundlage ihrer typischen, in der Nuklearindustrie anzutreffenden, Isotopenzusammensetzungen stehen. Spezifische Isotopenzusammensetzungen sollten/können verwendet werden, sofern verfügbar.

Tabelle 1 — Isotopenzusammensetzung von natürlichem Uran (U-nat), abgereichertem Uran (DU), schwach angereichertem Uran (LEU) und hochangereichertem Uran (HEU), als Massenanteil, und Gesamt-Alpha-Aktivitäten von Uran, auf der Grundlage von Werten für die spezifische Aktivität in ICRP 107 [20]

	U-238		U-235		U-234		Gesamt-Alpha-Aktivität	Alpha-Aktivitäts-verhältnis U-234/U-238
	Isotopen-zusammen-setzung, als Massenanteil	Gesamt-Alpha-Aktivi-tät	Isotopen-zusammen-setzung, als Massen-anteil	Gesamt-Alpha-Aktivität	Isotopen-zusammen-setzung, als Massenanteil	Gesamt-Alpha-Aktivi-tät		
	%	%	%	%	%	%	Bq/g	
U-nat	99,275	48,26	0,72	2,25	0,005 5	49,49	2,56E+04	1,03
DU	99,799	83,45	0,2	1,07	0,001 0	15,48	1,49E+04	0,186
LEU	96,471	14,78	3,5	3,45	0,028 84	81,78	8,12E+04	5,54
HEU	6,41	0,042	92,8	3,92	0,79	96,04	1,89E+06	2 282

In der Industrie findet Uran in einer Vielzahl von chemischen Formen Anwendung, häufig in Kombination mit anderen Radionukliden. Die Bestimmung der Absorptionsparameter für Uran und die Beschreibung der Biokinetik für die Inhalation ist durch das Fehlen von ausreichender Datenmenge mit hoher Qualität nicht möglich und aus diesem Grund ist die Beurteilung radiologischer Beschränkungen oder Optimierungen von Überwachungsverfahren schwierig. Die Absorptionsdaten können jedoch aus speziell dafür ausgelegten Tierversuchen erhalten werden um die materialspezifischen Absorptionsparameter einer Reihe industrieller Verbindungen zu berechnen. Die materialspezifische Dosiskoeffizienten und die Biokinetik von Urannukliden im Menschen vorher sagen zu können, erfolgt eine Kombination von Absorptionsparameter (aus Tierversuchen) mit Daten zur Ablagerung im Menschen und zum Partikeltransport. Diese können dem ICRP-Modell für den menschlichen Respirationstrakt [8] und dem systemischen Model der ICRP für Uran [10] entnommen werden. Von der ICRP wird angenommen, dass die Parameter für Ablagerung und Partikeltransport unabhängig von der inhalierten chemischen Form der Uranverbindungen sind.

Der Zweck der *Überwachung* ist im Allgemeinen zu verifizieren und dokumentieren, dass die Beschäftigten angemessen vor Risiken durch die Zufuhr von Radionukliden geschützt sind und dass der Schutz gesetzlichen Bestimmungen entspricht. Deshalb stellt die Überwachung einen Teil des übergreifenden Strahlenschutzprogramms dar. Das Programm beginnt mit einer Beurteilung der Arbeitssituationen, in denen das Risiko einer Inkorporation von Beschäftigten besteht, der quantitativen Ermittlung der voraussichtlichen Zufuhr von radioaktivem Material und der sich daraus ergebenden aufgenommenen effektiven Folgedosis. Entscheidungen über die Notwendigkeit einer Überwachung und die Gestaltung des Überwachungsprogramms sollten vor dem Hintergrund einer derartigen Risikobeurteilung getroffen werden, wie in ISO 20553 beschrieben.

Eine *Routineüberwachung* wird durchgeführt, um arbeitsbedingte Expositionen quantitativ zu bestimmen. Hier wird der Fall betrachtet, dass akute Zufuhren nicht nachweisbar sind aber chronische Expositionen nicht ausgeschlossen werden können. Routineüberwachungsprogramme gehen davon aus, dass Arbeitsbedingungen und das Risiko einer Zufuhr weitgehend konstant bleiben. Die Gestaltung der regelmäßigen Messungen hängt stark vom Wert der Jahresdosis ab, die auf einfache und zuverlässige Weise quantitativ bestimmt werden muss. Der Wert sollte deutlich unterhalb rechtlich relevanter Grenzwerte liegen und Unsicherheiten, zum Beispiel bei der Aktivitätsmessung und Beurteilung der Dosis, Rechnung tragen. Wenn der Wert zu hoch ist, können Zufuhren, die beträchtliche Anteile der Dosisgrenzwerte darstellen, übersehen werden, während ein niedriger Wert möglicherweise zu unnötigem Aufwand bei geringen Expositionen führt.

Eine *Sonderüberwachung* wird zur quantitativen Bestimmung signifikanter Expositionen nach tatsächlichen oder vermuteten ungewöhnlichen Ereignissen durchgeführt. Im Vergleich zur Routineüberwachung ist der Zeitpunkt der Zufuhr üblicherweise besser bekannt und möglicherweise stehen zusätzliche Informationen zur Verfügung, die zur Verringerung der Unsicherheit der Beurteilung beitragen. Die Zwecke der Beurteilung der Dosis in derartigen Fällen umfassen

- Hilfe bei Entscheidungen über Gegenmaßnahmen (z. B. Dekorporationstherapie),
- Einhaltung von Rechtsvorschriften, und
- Beitrag zur Verbesserung der Bedingungen am Arbeitsplatz.

In den meisten Fällen wird eine Sonderüberwachung individuell durchgeführt. In Fällen, in denen ein begründeter Verdacht vorliegt, dass Expositionsgrenzwerte überschritten sein könnten, ist es möglicherweise angemessen, die Messungen auszuweiten, um individuelle Retentions- und Ausscheidungsfunktionen sowie biokinetische Modellparameter zu bestimmen.

Die *bestätigende Überwachung* kann erforderlich sein, um die den zuvor ausgewählten Verfahren zugrunde liegen Annahmen zu überprüfen. Sie darf/kann aus Arbeitsplatz- oder Personendosisüberwachung bestehen, z. B. als gelegentliche Messungen zur Untersuchung der möglichen Akkumulation von Aktivität im Körper.

Die *aufgabenbezogene Überwachung* gilt für einen bestimmten Arbeitsablauf. Der Zweck und die Dosiskriterien für die Durchführung einer aufgabenbezogenen Überwachung sind identisch mit denen für die Routineüberwachung.

Die *Personendosisüberwachung* liefert Informationen, die für die Beurteilung der Exposition eines einzelnen Beschäftigten notwendig sind, durch Messung personenbezogener Körperaktivitäten, Ausscheidungsraten oder der inhalierten Aktivität (unter Verwendung von personengetragenen Luftsammlern, siehe 8.2).

Die *Arbeitsplatzüberwachung*, schließt die *gemeinsame Überwachung* ein, liefert Expositionsbeurteilungen für eine Gruppe von Beschäftigten mit identischen Arbeitsbedingungen, d. h. gleiche Zufuhr Risiken sowie gleiche Faktoren, die die sich ergebenden Dosen beeinflussen. Sie wird hauptsächlich in Fällen angewendet, in denen die Personendosisüberwachung nicht geeignet ist, und wird möglicherweise auch in Fällen benötigt, in denen die Personendosisüberwachung nicht ausreichend empfindlich ist. In einigen Fällen werden Ergebnisse einer Arbeitsplatzüberwachung für die Beurteilungen der Körper-Äquivalentdosis benötigt (z. B. kann die Überwachung der Luft Informationen zum Zeitpunkt der Zufuhr liefern).

Faktoren, die den Umfang eines Überwachungsprogramms bestimmen, sind

- die Größenordnung wahrscheinlicher Expositionen,
- die Anforderung, unfallbedingte Expositionsereignisse zu ermitteln, und
- die Notwendigkeit, die Wirksamkeit von Atemschutzausrüstung/persönlicher Schutzausrüstung (PSA) zu beurteilen.

Für die Verbesserung der Risikobeurteilung und der Handhabung von Uran besteht der Bedarf an angepassten Expositionsgrenzwerten. Die Festlegung der Expositionsgrenzwerte beginnt mit einer sorgfältigen Analyse von toxikologischen Studien mit relevanten Expositionsbedingungen, die mit der tatsächlichen Exposition verglichen wird. Der abschließende Wert berücksichtigt das Risiko sowie praktische und wirtschaftliche Einschränkungen. Grenzwerte werden regelmäßig überprüft und in Abhängigkeit von neuen Forschungsergebnissen, neuen Risikobeurteilungen oder durch Verbesserung von Nachweisgrenzen (neuen instrumentellen Analyseverfahren) angepasst. Die Toxizität von Uran ist abhängig von seiner chemischen Form und der Isotopenzusammensetzung der Verbindung. Die Absorptionsraten hängen von der Löslichkeit der Verbindung ab. Die abgeleiteten Grenzwerte müssen sowohl diese chemische als auch radiologische Risiken berücksichtigen. Die meisten Regulierungsbehörden stimmen darin überein, dass die chemische Toxizität von Uran vorherrschend ist, wenn der Urangehalt in der Niere $3 \mu\text{g g}^{-1}$ (retrospektiv) überschreitet. Für eine radiologische Gefährdung liegt bei einer jährlichen, effektive Dosis über 6 mSv (voraussichtlich) vor.

Beurteilungen der Wirksamkeit und Genauigkeit von Überwachungsprogrammen hängen von ausführlichen Informationen über die Biokinetik von Uran, insbesondere Lungenretentions- und Ausscheidungskinetik, ab. Diese Informationen stehen meist nicht aus Inkorporationsfällen zur Verfügung. Sie beruhen häufig auf biokinetischen Daten, die durch eine Kombination von materialspezifischen Absorptionsparameterwerten (Tierversuchen oder *In-vitro*-Studien), Ablagerungsdaten beim Menschen und Partikeleigenschaften (Größe/Transport) vorhergesagt werden unter Berücksichtigung der Atemwegen und des systemischen Verhalten von Uran. Die ICRP hat es lange Zeit als angemessen erachtet, derartige materialspezifische Parameter zu nutzen und nicht Standardparameter.

Bei Uran und dessen Verbindungen muss die Risikoanalyse auf der Berücksichtigung sowohl der chemischen Toxizität als auch der Strahlentoxizität beruhen. Die Gültigkeit von derzeit empfohlenen Grenzwerten für Uran, die aus voreingenommenen Entscheidungen zur Nephrotoxizität, grob vereinfachenden biokinetischen Modellen des menschlichen Respirationstrakts und überholten Definitionen der spezifischen Aktivität von Uran abgeleitet sind, ist zweifelhaft. Bei allen Uranverbindungen können große Fehler bei der Beurteilung der Zufuhr auftreten, wenn materialspezifische biokinetische Daten für die inhalierte chemische Form fehlen, unzureichende Informationen zum Muster der Exposition vorliegen und eine ungeeignete Wahl des Überwachungsintervalls erfolgt.

Die Toxizität von Uran richtet sich nach seiner chemischen Form, Isotopenzusammensetzung und dem Expositionspfad. Auf der Grundlage der Toxizität verschiedener Uranverbindungen in Tieren wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass mit steigender Wasserlöslichkeit der Verbindungen die Toxizität gegenüber der Niere steigt. Die weniger wasserlöslichen Verbindungen wiesen eine mäßige bis geringe Nierentoxizität auf und die nicht löslichen Verbindungen hatten geringes Potential, eine Nierentoxizität zu verursachen, konnten jedoch bei einer Exposition durch Inhalation eine Lungentoxizität verursachen.

Uran ist einzigartig unter den Elementen, weil es sowohl eine chemische als auch radiologische Gefährdung darstellt. Bei löslichen Uranverbindungen mit einer U-235-Anreicherung von nicht mehr als 3 % (Massenanteil) richten sich die Grenzwerte für die Zufuhr und die Luftkonzentrationen für im Strahlenbereich tätige Beschäftigte nach der chemischen Toxizität von Uran, da diese höher einzuschätzen ist als die radiologische Gefährdung (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2 — Die vorherrschende Form der Urantoxizität je nach der Art der Exposition

Physikalisch-chemische und isotopische Eigenschaften		Toxizität	
Absorptionsklasse der Uranverbindung	U-235-Anreicherung, Massenanteil	Akute oder einmalige Zufuhr	Chronische oder mehrmalige Zufuhr
Klasse F	weniger als 3 %	chemisch	chemisch
	über 3 %		radiologisch
Klasse M	weniger als 30 %	chemisch	radiologisch
	über 30 %	chemisch und radiologisch	
Klasse S	jede Anreicherung	radiologisch	radiologisch
Alle Klassen	mit ²³² U und/oder ²³⁶ U	radiologisch	radiologisch

6 Allgemeine Aspekte

6.1 Radiologische Aspekte

Uran ist ein alphastrahlendes, radioaktives Schwermetall, das in der Erdkruste in einer durchschnittlichen Konzentration von 2 ppm natürlich vorkommt.¹ Uran kommt natürlicherweise in der Umwelt und somit im Menschen vor. Es gibt drei natürlich vorkommende Isotope von Uran, U-238, U-235 und U-234, die alle hauptsächlich Alphateilchen mit Energien im Bereich von etwa 4,0 MeV bis 4,5 MeV aussenden. Zwei dieser Isotope, U-238 ($T_{1/2} = 4,47 \times 10^9$ Jahre) und U-235 ($T_{1/2} = 7,04 \times 10^8$ Jahre), sind die Mutternuklide von natürlich vorkommenden radioaktiven Zerfallsreihen [1]. Uran-234 ($T_{1/2} = 2,46 \times 10^5$ Jahre) gehört zur U-238-Zerfallsreihe [42]. Die beiden Zerfallsreihen sind in Anhang A (Tabellen A.1 und A.2) dargestellt und tragen als (primordialen) Untergrundstrahlung [2] einen bedeutenden Anteil zur Jahresdosis bei. Aufgrund der langen Halbwertszeiten von U-238 und U-235 im Vergleich zu ihren Tochternukliden, befinden sich die diese in einem stationären Gleichgewicht mit ihren entsprechenden Mutternukliden, es sei denn, sie werden physikalisch oder chemisch abgetrennt. Nach der Mineralgewinnung erfolgt die Abtrennung aller Tochternuklide aus dem Uranerz. Nach einigen Monaten stellt sich das Gleichgewicht der Th-234- und Pa-234m-Aktivitäten zu ihren U-238-Eltern wieder ein.

Natürlich vorkommendes Uran ist eine Isotopenmischung, mit einem großen Massenanteil (%) von U-238 und sehr geringen Massenanteilen von U-234 und U-235 enthält. Der als Anreicherung bezeichnete industrielle Prozess wird durchgeführt, um den prozentualen Anteil der Nuklide U-235 zu erhöhen und von U-238 zu verringern.

Die wichtigsten im Arbeitsbereich anzutreffenden Verbindungen können folgende sein:

- a) *Uranhexafluorid* (UF_6) – Uranhexafluorid wird im Anreicherungsprozess verwendet und liegt gasförmig vor, in Gegenwart von Wasser (Atmosphäre) und in den Atemwegen reagiert es zu Uranylfluorid (UO_2F_2) und liegt als Aerosol vor;
- b) *Uranylinitrat* ($\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$) – Uranylinitrat in wässriger Lösung ist in der Kernbrennstoffherstellung und Wiederaufbereitung weit verbreitet;
- c) *Uranyl-Tributylphosphat (U-TBP)* – TBP wird weitgehend als ein Extraktionsmittel bei der Herstellung von Kernbrennstoff und zur Abtrennung von Uran und Plutonium bei der Wiederaufbereitung verwendet;
- d) *Ammoniumdiuranat (ADU)* ($(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$) – ADU ist ein Zwischenprodukt im Uran-Brennstoffkreislauf;
- e) *Uranperoxid-Hydrat* ($\text{UO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) – Uranperoxid-Hydrat kommt Herstellung von Brennstoffen vor;
- f) *Urantetrafluorid* (UF_4) – Urantetrafluorid ist ein Zwischenprodukt im Uran-Brennstoffkreislauf;
- g) *Urantrioxid* ($\text{UO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) – bei der Brennstoffherstellung wird Urantrioxid-Hydrat durch Erhitzen von Uranylinitrat gebildet;
- h) *Uranoxotrid* (U_3O_8) – Tri-Uranoxotrid kann im Erzkonzentrat „Yellowcake“ vorhanden sein und tritt auch in späteren Synthesestufen im Uran-Brennstoffkreislauf auf;
- i) *Urandioxid* (UO_2) – Urandioxid ist das Endprodukt bei der Herstellung von Kernbrennstoffpellets;
- j) *Uranmetall* – das Metall wird bei der Laser-Isotopentrennung zur Urananreicherung und für einige Reaktor-brennstoffe verwendet;
- k) *Uranlegierungen* – üblicherweise mit Silicium oder Aluminium, für einige Reaktor-brennstoffe.

¹ 0,01 Volumenprozent (Volumenanteil in Prozent) entspricht 100 ppm; ppm ist keine ISO-Einheit.

Im Uran-Brennstoffkreislauf ist ein breites Spektrum von uranhaltigen Verbindungen anzutreffen. Das reicht von löslichen Verbindungen, wie z. B. Uranylнитрат ($\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$) über mäßig lösliches UO_3 bis hinzu nicht löslichen Verbindungen, wie z. B. UO_2 und U_3O_8 . Die physikalische und chemische Form der Uranverbindung sowie deren Synthesebedingungen beeinflussen deren Löslichkeitseigenschaften, z. B. kann sich die Sintertemperatur (Calcinierung) auf die Lungenretention auswirken. Standardparameter sind in Anhang B angeführt.

Diese Internationale Norm setzt das Lungenmodell nach ICRP 66 [8] und die Dosimetrie-Konzepte nach ICRP 103 [19] um und steht im Einklang mit dem Kompendium der Dosiskoeffizienten von ICRP 119 [35].

Neue vorgegebene Absorptionsparameter und überarbeitete Dosiskoeffizienten für die Inhalation werden von der ICRP Teil 3 der Reihe „Occupational Intakes of Radionuclides“ (OIR-Reihe) vorgeschlagen, der 2016 veröffentlicht werden soll. Diese pulizierten Werte ersetzen die Werte in den Anhängen B und D dieser Internationalen Norm.

6.2 Chemische Toxizität

Uran ist ein Schwermetall mit chemischen Gefahren. Die Niere ist das wichtigste Zielorgan einer akuten Urantoxizität, unabhängig vom Pfad und von der Dauer der Exposition. Nach einer akuten Exposition wurden histopathologischen Veränderungen, einschließlich degenerativer Veränderungen oder Nekrose des Epithels der proximalen Tubuli und der Glomeruli, beobachtet. Einige histologische Veränderungen wurden nach einer chronischen Exposition in Nierentubuli festgestellt. Es hat den Anschein, dass eine akute Exposition zu glomerulären und tubulären Veränderungen führen kann, eine chronische Exposition gegenüber Uran scheint jedoch nur tubuläre Funktionen zu betreffen. Nach einer akuten Exposition waren renale Veränderungen mit veränderten Biomarkern der Nierenfunktion im Blut oder Urin verbunden. Um den Arbeitsmediziner dabei zu unterstützen, auf die Bedürfnisse von Beschäftigten einzugehen, die Uranverbindungen ausgesetzt sind, beruht der Grad der Toxizität auf verschiedenen Expositionspfaden: Inhalation, oral und dermal, und auf den Auswirkungen auf die Gesundheit: systemische, immunologische, neurologische, fortpflanzungsspezifische, entwicklungsbezogene, genotoxische und krebserzeugende Wirkungen. Niveaus von signifikanten Expositionen für jeden Pfad und jede Dauer müssen durch Bezugnahme auf Dosen ohne zu beobachtende unerwünschte Wirkungen (NOAEL) und niedrigste Dosen für eine zu beobachtende unerwünschte Wirkung (LOAEL) kontrolliert werden.

ANMERKUNG Die NOAEL ist von der WHO [24, 25] und IARC [26] definiert als „die höchste Dosis oder Menge eines Bestandteils, die keine nachweisbare schädigende Veränderung der Morphologie, der Körperfunktionen, des Wachstums, der Entwicklung oder der Lebensdauer des Zielorganismus unter festgelegten Expositionsbedingungen hervorruft. Es können Veränderungen der Morphologie, der Körperfunktionen, des Wachstums, der Entwicklung oder der Lebensdauer des Zielorganismus festgestellt werden, die aber als nicht schädigend beurteilt werden können“.

UF_6 wird schnell zu HF (gasförmig) und UO_2F_2 - (Aerosol) hydrolysiert. Die Exposition gegenüber UF_6 -Aerosol kann zu einer Schädigung der Atemwege durch das in der Luft gebildete HF führen. Deshalb darf der Expositionsgrenzwert für UF_6 mit Hilfe der LOAEL von Flusssäure anstatt von UF_6 selbst bestimmt werden; siehe ATSDR 2013 [27].

Biomarker der Exposition gegenüber Uran schließen den chemischen oder radiologischen Nachweis von Uran im Urin ein, weil das über orale, dermale und inhalative Expositionspfade absorbierte Uran im Urin hauptsächlich in Form von Uranylionen ausgeschieden wird. Es wurde gezeigt, dass die Daten der Urinanalyse auf Uran mit den Expositionen gegenüber luftgetragenen Uran korrelieren, wenn sie über einen Zeitraum gemittelt werden.

7 Referenzwerte für Uran

7.1 Radiologische Aspekte

Die ISO 20553 führt aus, dass „Referenzwerte die Werte von Größen sind, oberhalb derer eine bestimmte Maßnahme eingeleitet oder Entscheidung getroffen werden muss“. Der Zweck der Festlegung dieser Werte besteht darin, dass unnötige, erfolglose Beurteilungen oder Eingriffe vermieden und Ressourcen dort genutzt werden können, wo sie am meisten benötigt werden. Referenzwerte schließen die Registrierschwelle, oberhalb derer eine Beurteilung der Dosis aufzuzeichnen ist, geringere Werte werden vernachlässigt, und die Untersuchungsschwelle ein, oberhalb derer die Schätzwerte für die Exposition durch zusätzliche Untersuchungen zu bestätigen sind.

Die ISO 20553 legt weiterhin dar (siehe Tabelle 3), dass „die Registrierschwelle bei einem Wert festgelegt werden muss, der (unter Berücksichtigung der Länge des Überwachungsintervalls) einer Jahresdosis entspricht, die nicht höher ist als 5 % des Grenzwertes der Jahresdosis. Die Untersuchungsschwelle muss bei einem Wert festgelegt werden, der einer Jahresdosis entspricht, die nicht höher ist als 30 % des Grenzwertes der Jahresdosis.“ Bei einem Grenzwert der Jahresdosis von 20 mSv sollte somit die Registrierschwelle auf einen Höchstwert von 1 mSv und die Untersuchungsschwelle auf einen Höchstwert von 6 mSv festgelegt werden.

Tabelle 3 — Referenzwerte für die Überwachung innerer Strahlenexpositionen (ISO 20553)

Schwelle	Bedeutung
Registrierschwelle	Die Registrierschwelle ist der Schwellenwert der Dosis, Exposition oder Zufuhr, bei dem oder oberhalb dessen die Beurteilungen der Dosis in den individuellen Unterlagen zur Exposition aufzuzeichnen sind. Sie muss bei einem Wert festgelegt werden, der einer Jahresdosis entspricht, die nicht höher ist als 5 % des Grenzwertes der Jahresdosis. Ergebnisse unterhalb dieses Wertes dürfen als „unterhalb der Registrierschwelle“ angegeben werden.
Untersuchungsschwelle	Die Untersuchungsschwelle ist der Schwellenwert der Dosis, Exposition oder Zufuhr, bei dem oder oberhalb dessen eine Untersuchung zu erfolgen hat, um die mit der Beurteilung der Dosis verbundene Unsicherheit zu verringern. Die Untersuchungsschwelle muss bei einem Wert festgelegt werden, der einer Jahresdosis entspricht, die nicht höher ist als 30 % des Grenzwertes der Jahresdosis.

Die obere Schwelle, bei der die abgeleitete Registrierschwelle (DRL) und die abgeleitete Untersuchungsschwelle (DIL) auf der Grundlage von Biotest-Messungen festgelegt werden sollten, kann nach Gleichung (1) bzw. Gleichung (2) berechnet werden:

$$DRL = \frac{5\% \times DL \times m(\Delta T/2)}{e(50)} \times \frac{\Delta T}{365} \quad (1)$$

$$DIL = \frac{30\% \times DL \times m(\Delta T/2)}{e(50)} \times \frac{\Delta T}{365} \quad (2)$$

Dabei ist

DRL und DIL entweder als Retention (Bq) oder Ausscheidung (Bq d⁻¹) angegeben;

DL der Grenzwert der Jahresdosis (Sv);

e(50) die Dosiskoeffizienten (effektive Folgedosis je Inkorporation) für radiotoxikologische Gefährdung (siehe Tabelle D.1 in Anhang D) (Sv Bq⁻¹);

ΔT/2 die Mitte des Überwachungszeitraums (d);

$m(\Delta T/2)$ der Wert der Ausscheidungs- oder Retentionsfunktion zum Zeitpunkt $\Delta T/2$ (Bq je Bq Aktivitätszufuhr) oder (Bq/d je Bq Aktivitätszufuhr);

$\Delta T/365$ der dem Überwachungsintervall zugeordnete Anteil des Jahresexpositionsgrenzwertes.

Tabelle 4 — Abgeleitete Registrier- und Untersuchungsschwellen für natürliche Uranverbindungen

Art der Überwachung	Absorptionsklasse	Zeitintervall für die Messung (Tage)	Natürliches Uran ^a		Einheit ^b
			Abgeleitete Registrier-schwelle	Abgeleitete Untersuchungs-schwelle	
Urin ^c	F – Hexafluorid ^d	30	1,4E-01	8,5E-01	Bq d ⁻¹
	F – Peroxid, Nitrat ^d	30	2,4E-01	1,5E+00	Bq d ⁻¹
	Ammoniumdiuranat ^d				
	M	90	2,7E-02	1,6E-01	Bq d ⁻¹
	S	90	2,4E-04	1,4E-03	Bq d ⁻¹
Stuhl ^c	M	180	1,7E-02	9,9E-02	Bq d ⁻¹
	S	180	8,7E-03	5,2E-02	Bq d ⁻¹
Lunge	M	180	5,8E+00	3,5E+01	Bq
	S	180	3,0E+00	1,8E+01	Bq

^a Isotopenzusammensetzung in Tabelle 1.
^b Einheiten, angegeben in Gesamt-Alpha-Aktivitäten.
^c Schwellen, wenn keine frühere Zufuhr von Uran und keine zusätzliche zu den natürlichen Zufuhren vorliegt.
^d Schwellen für Verbindungen der Absorptionsklasse F hängen von deren Reaktivität ab.

Tabelle 5 — Abgeleitete Registrier- und Untersuchungsschwellen für abgereicherte Uranverbindungen

Art der Überwachung	Absorptionsklasse	Zeitintervall für die Messung (Tage)	Abgereichertes Uran ^a		Einheit ^b
			Abgeleitete Registrier-schwelle	Abgeleitete Untersuchungs-schwelle	
Urin ^c	F – Hexafluorid ^d	30	1,5E-01	8,9E-01	Bq d ⁻¹
	F – Peroxid, Nitrat ^d	30	2,5E-01	1,5E+00	Bq d ⁻¹
	Ammoniumdiuranat ^d				
	M	90	2,9E-02	1,7E-01	Bq d ⁻¹
	S	90	2,5E-04	1,5E-03	Bq d ⁻¹
Stuhl ^c	M	180	1,8E-02	1,1E-01	Bq d ⁻¹
	S	180	9,2E-03	5,5E-02	Bq d ⁻¹
Lunge	M	180	6,4E+00	3,8E+01	Bq
	S	180	3,2E+00	1,9E+01	Bq

^a Isotopenzusammensetzung in Tabelle 1.
^b Einheiten, angegeben in Gesamt-Alpha-Aktivitäten.
^c Schwellen, wenn keine frühere Zufuhr von Uran und keine zusätzliche zu den natürlichen Zufuhren vorliegt.
^d Schwellen für Verbindungen der Absorptionsklasse F hängen von deren Reaktivität ab.

Tabelle 6 — Abgeleitete Registrier- und Untersuchungsschwellen für schwach angereicherte Uranverbindungen

Art der Überwachung	Absorptionsklasse	Zeitintervall für die Messung (Tage)	LEU ^a		Einheit ^b
			Abgeleitete Registrierchwelle	Abgeleitete Untersuchungsschwelle	
Urin ^c	F – Hexafluorid ^d	30	1,4E-01	8,2E-01	Bq d ⁻¹
	F – Peroxid, Nitrat ^d	30	2,3E-01	1,4E+00	Bq d ⁻¹
	Ammoniumdiuranat ^d				
	M	90	2,4E-02	1,5E-01	Bq d ⁻¹
	S	90	2,2E-04	1,3E-03	Bq d ⁻¹
Stuhl ^c	M	180	1,5E-02	9,1E-02	Bq d ⁻¹
	S	180	8,2E-03	4,9E-02	Bq d ⁻¹
Lunge	M	180	5,3E+00	3,2E+01	Bq
	S	180	2,8E+00	1,7E+01	Bq

^a Isotopenzusammensetzung in Tabelle 1.
^b Einheiten, angegeben in Gesamt-Alpha-Aktivitäten.
^c Schwellen, wenn keine frühere Zufuhr von Uran und keine zusätzliche zu den natürlichen Zufuhren vorliegt.
^d Schwellen für Verbindungen der Absorptionsklasse F hängen von deren Reaktivität ab.

Tabelle 7 — Abgeleitete Registrier- und Untersuchungsschwellen für hochangereicherte Uranverbindungen

Art der Überwachung	Absorptionsklasse	Zeitintervall für die Messung (Tage)	LEU ^a		Einheit ^b
			Abgeleitete Registrierchwelle	Abgeleitete Untersuchungsschwelle	
Urin ^c	F – Hexafluorid ^d	30	1,4E-01	8,1E-01	Bq d ⁻¹
	F – Peroxid, Nitrat ^d	30	2,3E-01	1,4E+00	Bq d ⁻¹
	Ammoniumdiuranat ^d				
	M	90	2,4E-02	1,4E-01	Bq d ⁻¹
	S	90	2,2E-04	1,3E-03	Bq d ⁻¹
Stuhl ^c	M	180	1,5E-02	8,9E-02	Bq d ⁻¹
	S	180	8,0E-03	4,8E-02	Bq d ⁻¹
Lunge	M	180	5,2E+00	3,1E+01	Bq
	S	180	2,8E+00	1,7E+01	Bq

^a Isotopenzusammensetzung in Tabelle 1.
^b Einheiten, angegeben in Gesamt-Alpha-Aktivitäten.
^c Schwellen, wenn keine frühere Zufuhr von Uran und keine zusätzliche zu den natürlichen Zufuhren vorliegt.
^d Schwellen für Verbindungen der Absorptionsklasse F hängen von deren Reaktivität ab.

In den Tabellen 4 bis 7 sind die abgeleiteten Registrier- und Untersuchungsschwellen für natürliche, abgereicherte, schwach angereicherte und hochangereicherte Uranverbindungen mit den in Tabelle 1 angegebenen Isotopenzusammensetzungen bei Zuführen von Partikeln mit einem AMAD von 5 µm durch Inhalation angeführt. Für andere Verbindungen oder wenn das konkrete Material zusammen mit den Absorptionsparameterwerten bekannt ist, sollten spezifische Werte berechnet werden.

Einige der in den Tabellen 4 bis 7 aufgeführten abgeleiteten Registrierschwellen liegen unterhalb der Nachweisgrenzen der üblichen Analysenmethoden-Technik, insbesondere bei der Lungenüberwachung. Daraus folgt, dass bei der Routineüberwachung das gewählte Messverfahren allein nicht ausreichend ist, und die Bedeutung von ergänzenden *In-vivo*-, *In-vitro*- und Arbeitsplatzüberwachungsprogrammen unterstreicht. Die Eignung des Überwachungsverfahrens kann anhand der aufgeführten Daten überprüft werden.

Radionuklide aus den drei natürlichen radioaktiven Zerfallsreihen von Uran sind in allen Umweltmedien vorhanden und können deshalb auch in Lebensmitteln, Trinkwasser und in der Luft nachgewiesen werden. Daraus ergeben sich für die Allgemeinbevölkerung Aufnahmen von Uran(verbindungen), einen schwankenden Körpergehalt und eine Ausscheidung von Uran. Kenntnisse über die aus *In-vitro*-Methoden (Stuhl und Urin) ermittelte natürliche Hintergrundaktivität sind unerlässlich, wenn eine berufsbedingte Zufuhr zu beurteilen ist. Deshalb sollte vor Beginn der Arbeit in potentiell kontaminierten Bereichen eine „Nulleffekt“-Probe bestimmt werden, um in der Lage zu sein, zwischen natürlichen, nicht berufsbedingten und berufsbedingten Zuführen zu unterscheiden [32, 52] (siehe 13.3).

7.2 Chemische Toxizität

7.2.1 Allgemeines

In einigen Fällen, insbesondere bei Uranverbindungen der Klasse F, dürfen Grenzwerte, die sich aus der chemischen Toxizität ergeben, restriktiver sein als die DRL- und DIL-Werte.

Schätzwerte von Expositionsniveaus, die ein minimales Risikoniveau (MRL) für Menschen darstellen, wurden von ATSDR [27] für Uran ermittelt und veröffentlicht: „Ein MRL ist definiert als ein Schätzwert der täglichen Exposition des Menschen gegenüber eine Substanz, die ohne nennenswertes Risiko für negative Wirkungen über eine bestimmte Dauer der Exposition ist“. MRL können für akute und chronische Expositionsdauern und für inhalative und orale Pfade abgeleitet werden. Das Konzept von NOAEL ist informativ und wird zur Ermittlung des Ausgangspunktes für die MRL verwendet.

Während das MRL eine Orientierung bezüglich einer unteren Schwelle bietet, unterhalb derer die chemische Toxizität von Uran nicht berücksichtigt zu werden braucht, liefern die Expositionsgrenzwerte eine obere Schwelle, bei der ein Handeln erforderlich ist. Zwischen diesen Schwellen ist es weiterhin notwendig, potentielle toxische Wirkungen von Chemikalien zu beachten.

Die MRL für toxikologische Profile [53], festgelegt von der Agentur zur Registrierung toxischer Substanzen und Krankheiten (en: Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR) [27], sind in Tabelle 8 angeführt.

- MRL von 8E-03 mg U m⁻³ für eine Inhalationsexposition mittlerer Dauer gegenüber nicht löslichen Verbindungen von Uran auf der Grundlage einer NOAEL von 1,1 mg U m⁻³ für Wirkungen auf die Nieren bei Hunden.
- MRL von 4E-04 mg U m⁻³ für eine Inhalationsexposition mittlerer Dauer gegenüber löslichen Verbindungen von Uran auf der Grundlage einer LOAEL von 0,15 mg U m⁻³ für Wirkungen auf die Nieren bei Hunden.
- MRL von 3E-04 mg U m⁻³ für eine Inhalationsexposition chronischer Dauer (365 Tage oder mehr) gegenüber löslichen Verbindungen von Uran auf der Grundlage einer NOAEL von 0,05 mg U m⁻³ für Wirkungen auf die Nieren bei Hunden.

Tabelle 8 — Minimale Risikoniveaus (MRL) für toxikologische Profile für Uranverbindungen

Verbindung	Pfad	Dauer	MRL	Endpunkt
Gut lösliche Uransalze	Inhalation	Akut	4E-04 mg U m ⁻³ (1,0 E-02 Bq m ⁻³) ^a	Renal
		Chronisch	3 E-04 mg U m ⁻³ (7,7E-03 Bq m ⁻³) ^a	Renal
Nicht lösliche Uranverbindungen	Inhalation	Akut	8E-03 mg U m ⁻³ (2,1E-01 Bq m ⁻³) ^a	Renal

^a In Klammern ist die Entsprechung in Bezug auf die Aktivität für natürliches Uran (unter Verwendung der spezifischen Aktivität in Tabelle 1) angegeben.

7.2.2 Expositionsgrenzwerte

In den Vereinigten Staaten sind die derzeitigen zulässigen Expositionsgrenzen (en: permissible exposure limits, PEL) für Uran und den nicht löslichen Uranverbindungen (gemessen als Uran) von der Occupational Safety and Health Administration (OSHA) für einen, über 8 h zeitlich gewichteter Mittelwert der Konzentration (en: time-weighted average, TWA) auf 0,2 Milligramm je Kubikmeter (mg m⁻³) Luft festgelegt. Für eine Kurzzeitexposition (en: short-term exposure limit, STEL; 15 min) darf ein Grenzwert von 0,6 mg m⁻³ nicht überschritten werden. Der STEL-Wert entspricht einer Höchstkonzentration in welcher der Beschäftigte während eines Arbeitstages ausgesetzt sein darf [29 CFR 1910.1000]. Vom National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) sind keine empfohlenen Expositionsgrenzwerte (en: recommended exposure limit, REL) für Uran oder dessen nicht lösliche Uranverbindungen herausgegeben worden; das NIOSH pflichtet jedoch dem für diese Substanz durch OSHA festgelegten PEL bei [NIOSH 1988]. Die American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) ordnet Uran und dessen nicht löslichen Uranverbindungen einen Schwellengrenzwert (en: threshold limit value, TLV) von 0,2 mg m⁻³ als TWA-Wert für einen 8-h-Arbeitstag und einer 40-h-Arbeitswoche zu und einen STEL-Wert von 0,6 mg m⁻³ für Zeiträume, die 15 min nicht überschreiten [ACGIH 1988, p. 37 [55]]. Die Grenzwerte von OSHA und ACGIH beruhen auf dem Risiko von Nieren- und Blutstörungen und auf der mit der Exposition gegenüber Uran oder einer nicht löslichen Uranverbindung verbundenen radiologischen Schädigung.

7.3 Anwendung von Referenzwerten

Urinuntersuchung ist das Verfahren der Wahl bei der Beurteilung des chemischen Risikos für Uranverbindungen. Wenn Tabelle 2 anzeigt, dass die chemische Toxizität signifikant sein könnte, muss ausgeschlossen werden, dass die chemischen Grenzwerte nicht überschritten werden. Es wurde gezeigt, dass die Daten der Urinanalyse auf Uran mit den Expositionen gegenüber luftgetragendem Uran korrelieren, wenn sie über einen Zeitraum gemittelt werden. Folglich können Urinproben zur Verifizierung der Angemessenheit der Luftprobenahme verwendet werden. In Tabelle 9 sind die abgeleiteten Untersuchungsschwellen bei Urin auf der Grundlage einer Höchstkonzentration in der Niere von 3 µg g⁻¹ angeführt [48].

Tabelle 9 — Abgeleitete Untersuchungsschwellen für das chemische Risiko von Uranverbindungen [48]

Art der Überwachung	Absorptionsklasse	Zeitintervall für die Messung (Tage)	Chemische Toxizität	Einheit
			Abgeleitete Untersuchungsschwelle	
Urin	F	30	20	µg d ⁻¹
	M	90	16	µg d ⁻¹
	S	90	0,17	µg d ⁻¹

Das kann auch durch direkte Messung der Luftkonzentrationen erreicht werden.

8 Routineüberwachungsprogramme

8.1 Allgemeines

Routineüberwachungsprogramme werden eingerichtet, um Expositionen quantitativ zu bestimmen, für die bestehende Möglichkeit von nicht erkannter unfallbedingter Zufuhr oder chronischer Zufuhr. Messungen in einem Routineüberwachungsprogramm erfolgen an zuvor festgelegten Zeitpunkten und sind nicht mit beliebigen bekannten Zufuhreignissen verbunden. Entscheidungen in Bezug auf Verfahren, Häufigkeiten und die zugrunde liegenden biokinetischen Modelle müssen deshalb im Voraus getroffen werden. Für die Bewertung der gemessenen Werte hinsichtlich der Zufuhr ist es außerdem notwendig, Annahmen in Bezug auf das Zeitintervall zwischen Zufuhr und Messung zu treffen. Routineüberwachungsprogramme müssen unter Einbeziehung geeigneter Arbeitsplatz- und Personendosisüberwachung in Übereinstimmung mit den Kriterien in ISO 20553 eingerichtet werden.

Die Ziele eines Überwachungsprogramms und die Art und Weise, wie es zu organisieren ist, müssen einschließlich der Grundlage für die Auswertung der Ergebnisse nach Abschnitt 14 aufgezeichnet werden. Das Überwachungsprogramm muss mit Hilfe eines bestätigenden Überwachungsprogramms überprüft werden, nachdem beliebige wesentliche Änderungen bei Anlagen, Betriebsabläufen oder behördlichen Anforderungen vorgenommen wurden.

8.2 Arbeitsplatzüberwachung

Arbeitsplatzüberwachung schließt die gemeinsame Überwachung (d. h. die Personendosisüberwachung von ausgewählten Beschäftigten, die für eine Gruppe von Beschäftigten stehen) und Messung der luftgetragenen Aktivität und Oberflächenkontamination am Arbeitsplatz ein. Die Oberflächenkontamination ist nicht direkt mit der individuellen Exposition verbunden, kann jedoch ein erhöhtes Risiko einer Zufuhr anzeigen.

Eine kontinuierliche Überwachung von luftgetragenen radioaktivem Material ist wichtig, weil die Inhalation üblicherweise der hauptsächliche Expositionspfad bei Beschäftigten ist. Die Hauptziele bei der Überwachung der luftgetragenen Aktivität sind

- Unterstützung bei der Beurteilung der inneren Exposition von Beschäftigten durch Inhalation,
- die schnelle Feststellung anomaler oder sich verschlechternder Bedingungen, wodurch das Ergreifen geeigneter Schutzmaßnahmen, zum Beispiel die Nutzung von Atemschutzausrüstung, ermöglicht wird, und
- das Bereitstellen von Informationen zur Einrichtung von Personendosisüberwachungsprogrammen für Beschäftigte.

Die Einrichtung eines Luftüberwachungssystems zur Feststellung und Beurteilung einer gemeinsamen oder individuellen Exposition erfordert Kenntnisse über die Bedingungen am Arbeitsplatz und die dort gehandhabten Materialien. Es ist zu erwarten, dass die Gestaltung des Systems an das Risiko einer Zufuhr angepasst wird.

Die Ergebnisse der Luftüberwachung können zur Schätzung der Aufnahme einer radioaktiven Substanz durch Beschäftigte genutzt werden, das Vertrauen allein auf die Messung luftgetragener Aktivitäten kann jedoch zu Fehlern bei den Schätzwerten der Exposition führen. Das gilt, wenn die Quellen der Luftkontamination örtlich begrenzt sind oder sich deren Lage im Zeitverlauf verändern, häufig aufgrund der Tätigkeit oder Bewegung des Beschäftigten.

Die Ergebnisse der Luftüberwachung am Arbeitsplatz können als repräsentativ angesehen werden, vorausgesetzt, sie erfüllen zwei Kriterien. Erstens dürfen sie in verlässlicher Weise die *in vivo* gemessenen oder durch individuelle *In-vitro*-Messungen (siehe Anhang C) bestimmten Zufuhren nicht unterschätzen. Zweitens müssen sie durch ein bestätigendes Überwachungsprogramm unter Einbeziehung der Nutzung individueller (personenbezogener) Vorrichtungen für die Luftprobenahme oder der Anwendung der Messung individueller Ausscheidungen bestätigt werden.

Eine Unterschätzung kann vermieden werden, indem Korrekturfaktoren angewendet werden, die die räumliche und zeitliche Variabilität der Radionuklidkonzentrationen im Atembereich des Beschäftigten berücksichtigen.

8.3 Personendosisüberwachung

8.3.1 Allgemeines

Routineüberwachungsprogramme werden eingerichtet, um Expositionen quantitativ zu bestimmen, wenn die Möglichkeit entweder nicht erkannter unfallbedingter Zufuhren oder chronischer Zufuhren besteht. Messungen in einem Routineüberwachungsprogramm erfolgen an zuvor festgelegten Zeitpunkten und sind nicht mit beliebigen bekannten Zufuhreignissen verbunden. Entscheidungen in Bezug auf Verfahren, Häufigkeiten und die zugrunde liegenden biokinetischen Modelle müssen deshalb im Voraus getroffen werden. Für die Bewertung der gemessenen Werte hinsichtlich der Zufuhren ist es außerdem notwendig, Annahmen in Bezug auf das Zeitintervall zwischen Zufuhr und Messung zu treffen. Routineüberwachungsprogramme müssen unter Einbeziehung geeigneter Arbeitsplatz- und Personendosisüberwachung eingerichtet werden.

Die in 8.3.2 und 8.3.3 beschriebenen allgemeinen Anforderungen müssen bei der Festlegung eines Routineüberwachungsprogramms beachtet werden.

Die annehmbaren Verfahren für die quantitative Bestimmung von Uran in Urin sollten eine Nachweisgrenze von $5 \mu\text{g l}^{-1}$ ($0,13 \text{ Bq l}^{-1}$ für U-nat oder $0,2 \text{ Bq d}^{-1}$ auf der Grundlage einer täglichen Ausscheidung von $1,6 \text{ l d}^{-1}$ [15]) und eine Messunsicherheit von 30 % aufweisen.

8.3.2 Dosimetrie und Strahlung

Für dosimetrische und Strahlenschutz

- müssen die sich aus einem unbekannten Zeitintervall zwischen Zufuhr und Messung ergebenden Auswirkungen begrenzt werden, so dass die Dosen im Durchschnitt über viele Überwachungsintervalle nicht unterschätzt werden,
- überschreitet die durch die Annahme über den Zeitpunkt der Zufuhr bedingte maximale Unterschätzung der Dosis, die sich aus einer einmaligen Zufuhr ergibt, einen Faktor von drei nicht,
- muss der Nachweis von allen jährlichen Expositionen, die 1 mSv überschreiten können, sichergestellt sein – für einige Uranverbindungen kann diese Anforderung nur durch Arbeitsplatzüberwachung erfüllt werden, und
- müssen jährlich mindestens zwei Messungen durchgeführt werden, wie in der ISO 20553 gefordert wird.

8.3.3 Chemische Gefährdung

Bei einer chemischen Gefährdung

- müssen die sich aus einem unbekannten Zeitintervall zwischen Zufuhr und Messung ergebenden Auswirkungen begrenzt werden, so dass die Expositionen im Durchschnitt über viele Überwachungsintervalle nicht unterschätzt werden, und
- muss der Nachweis von täglichen Expositionen sichergestellt sein, die die toxikologischen Grenzwerte überschreiten können.

8.4 Verfahren und Überwachungsintervalle

8.4.1 Allgemeines

Die Verfahren zur Bestimmung der Überwachungsintervalle beruhen auf der Bewertung der Arbeitsumgebung in Bezug auf berufsbedingte Risiken und Gefährdungen. Bei der Bestimmung der Häufigkeit der Probenahme werden auch die Informationen von der letzten gemeinsamen und individuellen Überwachung berücksichtigt. Es ist umsichtig, in einer neuen Einrichtung die Probenahme mit einer höheren als der geforderten Häufigkeit im Vergleich zur alten Einrichtung durchzuführen. Die in 8.4.2 und 8.4.3 angeführten Zeitintervalle beruhen auf einem gut bekannten Arbeitsbereich, regelmäßigen Expositionen und einem Routineüberwachungsprogramm.

8.4.2 Zeitintervalle bei toxikologischen Risiken

Für die Bestandsaufnahme einer toxikologischen Risikobeurteilung werden Urinproben auf der Basis von „Stichproben“ gesammelt. Bei Beschäftigten gibt es in Abhängigkeit von der Auswertung (Exposition, Aufnahme und Akkumulation) mehrere Möglichkeiten für die Routineüberwachung bei einer systematischen Exposition gegenüber Uranverbindungen, Stichproben zu Beginn oder am Ende der Arbeitszeit. In Tabelle 10 sind die maximalen Zeitintervalle für natürliches oder angereichertes Uran zusammengefasst.

Tabelle 10 — Maximale Zeitintervalle für Routineüberwachungsprogramme für natürliches oder angereichertes Uran nach Inhalation von Verbindungen der Klasse F im Fall eines toxikologischen Risikos

Probenahme von Urin in Form von „Stichproben“ für <i>In-vitro</i> -Analysen		
Radionuklid/Material	Absorptionsklasse	Tage
Uranhexafluorid	F	30
Uranperoxid	F	30
Urannitrat	F	30
Ammoniumdiuranat	F	30

8.4.3 Zeitintervalle bei radiotoxikologischem Risiko

Die für ein Routineüberwachungsprogramm erforderliche Messhäufigkeit hängt von der Retention und Ausscheidung der Radionuklide, der Empfindlichkeit der verfügbaren Messtechnik und der Unsicherheit ab, die bei der Schätzung der Jahresaktivitätszufuhr und effektiven Folgedosis annehmbar ist:

bei *In-vivo*-Messungen

$$e(50) \cdot \frac{A_{DL}}{R(\Delta T)} \cdot \frac{365}{\Delta T} \leq 1 \text{ mSv}$$

bei *In-vitro*-Analysen

$$e(50) \cdot \frac{A_{DL}}{E(\Delta T)} \cdot \frac{365}{\Delta T} \leq 1 \text{ mSv} \quad (3)$$

Wenn eine Exposition von mehr als einem Radionuklid nicht ausgeschlossen werden kann, muss die Messhäufigkeit so angepasst werden, dass eine Gesamtjahresdosis von 1 mSv zuverlässig nachgewiesen und beurteilt werden kann.

Die maximal mögliche Unterschätzung darf einen Faktor von drei nicht überschreiten, wie in CRP 75 [12] und in ISO 20553 gefordert; ausgehend von der Annahme, dass in der Mitte des Überwachungsintervalls eine einzelne Zufuhr stattgefunden hat, bedeutet diese Anforderung:

bei *In-vivo*-Messungen

$$\frac{R\left(\frac{\Delta T}{2}\right)}{R(\Delta T)} \leq 3$$

bei *In-vitro*-Analysen

$$\frac{E\left(\frac{\Delta T}{2}\right)}{E(\Delta T)} \leq 3 \quad (4)$$

8.4.4 Grundsätze und Annahmen

Die in 8.4 zusammengefassten Verfahren und Zeitintervalle wurden aus den vorstehend dargelegten Grundsätzen und den folgenden Annahmen abgeleitet:

- Modelle für die Inhalation nach ICRP 66 (Standardwerte für Beschäftigte; AMAD = 5 µm);
 - $e(50)$ = Dosiskoeffizient: effektive Folgedosis, akkumuliert innerhalb von 50 Jahren nach einer Inkorporation;
- elementspezifische Retentions- und Clearancefunktionen, definiert durch ICRP 78;
 - $E(t)$ = Wert der Ausscheidungsfunktion zum Zeitpunkt t (Tag) nach einer Inkorporation;
 - $R(t)$ = Wert der Retentionsfunktion zum Zeitpunkt t (Tag) nach einer Inkorporation;
- akute Zufuhr durch Inhalation in der Mitte des Überwachungsintervalls. Das ist eine vertretbare Annahme bei chronischen Zufuhren und im Durchschnitt verhindert sie die Unterschätzung von Zufuhren; und
 - ΔT = Dauer des Zeitintervalls (Tag) zwischen zwei Messungen in einem Routineüberwachungsprogramm;
- mit A_{DL} -Werten der Nachweisgrenze für Routinemessungen, wie aus ICRP 78.

In Tabelle 11 sind die maximalen Zeitintervalle für Routineüberwachungsprogramme für festgelegte Uranverbindungen bei durch ICRP-Publikationen empfohlenen Standardwerten von Parametern zusammengefasst. Im Fall von validierten spezifischen Werten wie Löslichkeits- oder anderen biokinetische Modellen können diese Zeitintervalle neu berechnet werden.

Tabelle 11 — Maximale Zeitintervalle für Routineüberwachungsprogramme für Uranverbindungen im Fall eines radiologischen Risikos

Material	Absorptionsklasse	In-vitro-Analysen		In-vivo-Messungen
		Urin (Tage)	Stuhl (Tage)	Lungen (Tage)
Uranhexafluorid	F	30	-	-
Uranperoxid	F	30	-	-
Urannitrat	F	30	-	-
Ammoniumdiuranat	F	30	-	-
Uranteralphafluorid	M	90	180	180
Urantrioxid	M	90	180	180
Tri-Uranooctoxid	S	90	180	180
Urandoxid	S	90	180	180

9 Sonderüberwachungsprogramme

9.1 Arbeitsplatzüberwachung

Sonderüberwachung bezieht sich auf Messungen, wenn nach einem Ereignis eine Zufuhr vermutet wird. Eine spezielle Arbeitsplatzüberwachung beruht auf den gleichen Grundsätzen wie eine routinemäßige Arbeitsplatzüberwachung und die gleichen Anforderungen müssen erfüllt sein. Es sollten mit Alarmen ausgestattete Geräte, die dauerhaft in Betrieb sind, verwendet werden.

9.2 Personendosisüberwachung

Das Ziel der speziellen Personendosisüberwachung ist sicherzustellen, dass eine signifikante Zufuhr frühzeitig festgestellt wird und dass die zugehörigen Folgedosen bewertet werden. Sonderüberwachungsprogramme sind investigativ; sie beruhen üblicherweise auf einer geeigneten Kombination von *In-vivo*-Messungen und *In-vitro*-Analysen in Verbindung mit dem entsprechenden biokinetischen Modell.

9.2.1 Empfohlene Überwachung bei toxikologischem Risiko

Bei einem einzelnen Ereignis mit löslichen Verbindungen von Uran sollten „Stichproben“ gesammelt werden, um die Ausscheidung von Uran quantitativ zu bestimmen und die betroffenen Biomarker für Nierenerkrankungen zu verfolgen. Eine Verlaufskontrolle der Ausscheidung während der darauf folgenden Tage kann wegen der daraus erhaltenen Informationen in Bezug auf die Menge der Aktivitätszufuhr auch von Bedeutung sein. 24-h-Proben ermöglichen die Ermittlung der Übertragbarkeitsklasse der Verbindung. In Tabelle 12 sind die empfohlenen Verfahren für natürliches oder abgereichertes Uran zusammengefasst.

Tabelle 12 — Empfohlene Verfahren für Sonderüberwachungsprogramme für natürliches oder abgereichertes Uran nach Inhalation von Verbindungen der Klasse F im Fall eines toxikologischen Risikos

Verbindung	<i>In-vitro</i> -Analysen Urin	
	Stichprobe	24 h
Uranhexafluorid	R	S
Uranperoxid	R	S
Urannitrat	R	S
Ammoniumdiuranat	R	S
R = empfohlen S = ergänzend (hilfreich, jedoch nicht obligatorisch)		

9.2.2 Empfohlene Überwachung und empfohlener Zeitraum bei radiotoxikologischem Risiko

Den nach einem Kontaminationsereignis durchgeführten Analysen ermöglichen die quantitative Bestimmung der Signifikanz des Störfalls und die Abschätzung der Zufuhr nach ICRP-Modellen. Bei der systematischen Überwachung wird als Zufuhrpfad die Inhalation angenommen. Angesichts der Tatsache, dass Lungenmessungen für Uran häufig unterhalb der Nachweisgrenzen liegen, liefern Stuhl- und Urinproben Informationen über das Ausmaß der Exposition gegenüber nicht resorbierbaren Verbindungen. Für Zwecke der internen Dosimetrie sollten zur Validierung der Zufuhr nur Ergebnisse von 24-h-Urin-Proben verwendet werden. Zusätzlich zur Ermittlung einer täglich ausgeschiedenen Aktivität kann der Arzt oder Dosimetrie-Spezialist diese Proben untersuchen, um die Herkunft der Exposition zu ermitteln und um spezifische Überprüfungen durchzuführen. Große Schwankungen bei der Ausscheidung von Radionukliden im Stuhl von einem Tag auf den anderen führen zu einer Unsicherheit bei der Auswertung der Ergebnisse. Folglich sollten Stuhlproben vorzugsweise über einen Zeitraum von etwa drei aufeinanderfolgenden Tagen gesammelt werden, um diese Unsicherheit zu verringern. In Tabelle 13 sind die empfohlenen Verfahren für eine Sonderüberwachung nach Inhalation von Uranverbindungen angeführt.

Tabelle 13 — Empfohlene Verfahren für Sonderüberwachungsprogramme nach Inhalation von Uranverbindungen der Klassen F, M oder S für alle Anreicherungen im Fall eines radiologischen Risikos

Verbindung	Nasenabstrich	In-vitro-Analysen		In-vivo-Messungen
		Urin	Stuhl	Organ
		24 h	72 h	Lunge
Uranhexafluorid	R	R		
Uranperoxid	R	R		
Urannitrat	R	R		
Ammoniumdiuranat	R	R		
Uranterfluorid	R	R	S	S
Urantrioxid	R	R	S	S
Tri-Uranooxid	R	R	R	R
Urandioxid	R	R	R	R
R = empfohlen S = ergänzend (hilfreich, jedoch nicht obligatorisch)				

Bei der Sonderüberwachung ist die Dauer der Probennahme oder Messung eine Funktion der Zeit nach dem Ereignis. Es kann festgehalten werden, dass in Abhängigkeit der Biokinetik der Verbindung ein begrenzter Zeitraum vorhanden sein kann, in dem brauchbare Ergebnisse erhalten werden können. In Tabelle 14 ist der Zeitbereich angegeben, der der Vorgabe entspricht, um eine Untersuchungsschwelle für Uranverbindungen zu erreichen.

Tabelle 14 — Mindesthäufigkeit der Probenahme nach einer akuten Inhalation von festgelegten Verbindungen

Verbindung	Lunge	Urin	Stuhl
Uranhexafluorid	Nicht zutreffend	1 d bis 90 d	Nicht zutreffend
Uranperoxid			
Urannitrat			
Ammoniumdiuranat	1 d bis 7 d	1 d bis 90 d	1 d bis 180 d
Uranterfluorid	1 d bis 7 d	1 d bis 90 d	1 d bis 180 d
Urantrioxid	1 d bis 180 d	1 d bis 365 d	1 d bis 365 d
Triuranooxid			
Urandioxid			

10 Aufgabenbezogene Überwachungsprogramme

10.1 Arbeitsplatzüberwachung

Eine Arbeitsplatzüberwachung beruht auf den gleichen Grundsätzen wie eine routinemäßige Arbeitsplatzüberwachung. Die gleichen Anforderungen müssen erfüllt sein. Die Einrichtung eines Luftüberwachungssystems zur Feststellung und Beurteilung einer kollektiven oder individuellen Exposition erfordert Kenntnisse über die Bedingungen am Arbeitsplatz und die dort gehandhabten Materialien.

10.2 Personendosisüberwachung

Personendosisüberwachung als Teil von aufgabenbezogenen Überwachungsprogrammen hat oft die Form einer bestätigenden Überwachung. Personendosisüberwachung kann das Einführen einer Reihe von geeigneten Messungen erfordern. Zu Beginn und am Ende des Aufgabenzeitraums erfolgt je eine Messung und in Abhängigkeit von der Dauer der Aufgabe werden diese mit einer oder mehreren Proben während des Aufgabenzeitraums ergänzt.

11 Leistungskriterien für Laboratorien

11.1 Allgemeines

In ISO 27048 ist der kritische Wert M_c definiert als „Höchstwert für das Ergebnis einer Einzel-Messung, wobei die entsprechend extrapolierte Jahresdosis einen zuvor festgelegten Wert der Dosis nicht überschreitet“. Sie legt fest, dass kritische Werte „für jedes Routineüberwachungsprogramm abgeleitet werden müssen. Dieser Dosiswert muss so festgelegt werden, dass niedrigere Dosen als vernachlässigbar angesehen werden dürfen“.

11.2 Kritische Werte

M_c , definiert in ISO 27048:2011, kann verwendet werden, um die Kriterien von Dienstleistungslaboratorien für jedes Routineüberwachungsprogramm festzulegen. Ausgehend von der Annahme einer einzelnen akuten Zufuhr in der Mitte des Überwachungsintervalls kann M_c für ein Routineüberwachungsprogramm unter Anwendung von Gleichung (5) berechnet werden:

$$M_c = \frac{D_v \times m(\Delta T/2)}{e(50)} \times \frac{\Delta T}{365} \quad (5)$$

Dabei ist

D_v der Wert der Jahresdosis (Sv), derart, dass niedrigere Dosen für die Anwendung des Überwachungsprogramms unberücksichtigt gelassen werden dürfen;

$m(\Delta T/2)$ bei *In-vitro*-Messungen der Wert der Ausscheidungsfunktion zum Zeitpunkt $\Delta T/2$ (Tage) nach einer Inkorporation, und bei *In-vivo*-Messungen der Wert der Retentionsfunktion zum Zeitpunkt $\Delta T/2$ (Tage) nach einer Inkorporation;

$e(50)$ der Dosiskoeffizient: die effektive Folgedosis je Inkorporation bei Inhalation (geeignete Absorptionsklasse).

Bei Messergebnissen unter M_c besteht keine Notwendigkeit, die Zufuhr oder Dosis explizit zu bewerten: die Dosis darf als unbedeutend angesehen werden. Der Messwert (falls oberhalb der Erkennungsgrenze) muss aufgezeichnet werden, um die Tatsache zu dokumentieren, dass die Messung durchgeführt wurde, und um Informationen zur Unterstützung einer möglichen zukünftigen Neubeurteilung der Dosis bereitzustellen. In Tabelle 15 sind Werte von M_c für die in ISO 20553 festgelegten Überwachungszeiträume und für einen Wert für D_v von 10^{-4} Sv aufgeführt.