Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Schutz der Umwelt im Strahlenschutz

Empfehlung der Strahlenschutzkommission
mit Begründung und Erläuterung

Verabschiedet in der 286. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 01. Dezember 2016

Vorwort

Der Schutz der Umwelt ist seit langem ein Teil des Strahlenschutzes, ohne dass jedoch konkrete Regelungen zum Schutz nicht menschlicher Arten und der Umweltmedien Wasser, Boden und Luft getroffen wurden. Aus diesem Grund wurde die SSK im Jahr 2008 gebeten, Maßstäbe zum Schutz der Umwelt im Strahlenschutz zu erarbeiten. In diesem Zusammenhang sollte auch geprüft werden, wie im Umweltschutz geltende Prinzipien, insbesondere das Prinzip der Nachhaltigkeit, im Hinblick auf radioaktive Stoffe angewendet werden können. Zur Bearbeitung dieser komplexen Thematik wurde von der Strahlenschutzkommission die Arbeitsgruppe A305 mit folgenden Mitgliedern eingesetzt:

- Dr. Rainer Gellermann (Vorsitzender)
- Christian Küppers
- Dr. Walfried Löbner
- Dr. Dietmar Barkowski
- Dr. Martin Steiner (Vertreter des BfS).

Für den unermüdlichen Einsatz bei der Vor- und Nachbereitung der Arbeitsgruppensitzungen und ihrer Durchführung sowie bei der Überführung des Entwurfes der Arbeitsgruppe in die endgültige Form und der Redaktion dieser Empfehlung sei Daniela Baldauf von der SSK-Geschäftsstelle gedankt.

Diese Arbeitsgruppe stand vor der Herausforderung, aus den sich international dynamisch entwickelnden Ansätzen und Methoden zum Schutz nicht menschlicher Arten für Deutschland geeignete Vorgehensweisen zu entwickeln und darüber hinaus die in der Vergangenheit weitgehend unabhängig entwickelten Konzepte und Begriffe des Umweltschutzes und Strahlenschutzes auf Schnittstellen und Konflikte zu prüfen. Im Jahr 2010 veranstaltete sie einen Workshop mit Vertretern des Umweltbundesamtes (UBA), um die Konzepte und Betrachtungsweisen des Umweltschutzes und des Strahlenschutzes im Hinblick auf Schutzziele und zum Prinzip der Nachhaltigkeit im Umwelt- und Strahlenschutz zu diskutieren. Im November 2015 traf sich die Arbeitsgruppe erneut mit Vertretern des Umweltbundesamtes, um die Empfehlungen zu den Umweltmedien Wasser, Boden und Luft zu erörtern.

Da es durch die Weiterentwicklung der Strahlenschutzgrundnormen in der Europäischen Union nötig war, Teilfragen des Beratungsauftrages vorzeitig zu beantworten, hatte die SSK in den Jahren 2012 und 2013 zwei diesbezügliche Empfehlungen verabschiedet. Mit den vorliegenden SSK-Empfehlungen werden diese Empfehlungen in Kenntnis der inzwischen gültigen Richtlinie 2013/59/Euratom ersetzt und für Deutschland Eckpunkte beschrieben, mit denen Aussagen zum Schutz der Umwelt im Strahlenschutz klarer als bisher getroffen werden können. Die bisher bestehende konzeptionelle Lücke im System des Strahlenschutzes wird damit geschlossen.

Bonn, im Januar 2017

Prof. Dr. Joachim Breckow	*Dr. Rainer Gellermann*
Vorsitzender der Strahlenschutzkommission	Vorsitzender der Arbeitsgruppe

Inhalt

Schutz der Umwelt im Strahlenschutz - Empfehlung der SSK 1

Schutz der Umwelt im Strahlenschutz - Begründung und Erläuterung der Empfehlung der Strahlenschutzkommission.....15

Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Schutz der Umwelt im Strahlenschutz

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 286. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 01. Dezember 2016

Inhalt

1 Einführung 3

2 Beratungsauftrag 4

3 Begriff der Umwelt und Anwendungsbereiche 4

4 Empfehlungen 5

4.1 Schutz nicht menschlicher Arten 6

4.2 Beurteilung radioaktiver Kontaminationen von Umweltmedien 8

4.3 Radioaktive Kontaminationen von Sachgütern 8

4.4 Anwendung des Prinzips der Nachhaltigkeit 9

Literatur 11

Anlage 1 Werte zur Beurteilung radioaktiver Kontaminationen von Boden und Gewässern im Hinblick auf den Schutz nicht menschlicher Arten 13

1 Einführung

Der Schutz der Umwelt ist seit langem ein Teil des Strahlenschutzes, ohne dass jedoch konkrete Regelungen zum Schutz nicht menschlicher Arten und der Umweltmedien Wasser, Boden und Luft getroffen wurden.

Die Europäische Kommission hat am 29. September 2011 eine neue Richtlinie des Rates zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung (Euratom-Grundnormen) vorgeschlagen. In diesem Zusammenhang hat die Strahlenschutzkommission (SSK) zu Fragen des Schutzes der Umwelt im Strahlenschutz festgestellt (SSK 2012), dass durch die Ausdehnung des Strahlenschutzes auf den Schutz nicht menschlicher Arten der Strahlenschutz um eine Komponente ergänzt wird, die bereits seit langem Teil des auf chemisch-toxische Stoffe bezogenen Umweltschutzes ist. Die SSK unterstützte daher grundsätzlich den Vorschlag der Euratom-Grundnormen, den Schutz der Umwelt explizit in den Regelungsbereich des Strahlenschutzes aufzunehmen, wies aber auch darauf hin, dass der Kenntnisstand zu den Strahlenwirkungen auf nicht menschliche Arten noch erhebliche Unsicherheiten aufweist und dass für eine Reihe von Aspekten noch konkrete Regelungen als Voraussetzung der europaweit harmonisierten Umsetzung nötig sind.

In der inzwischen geltenden Richtlinie 2013/59/Euratom (Euratom 2014) wird einleitend darauf verwiesen, dass für die Zwecke des langfristigen Schutzes der menschlichen Gesundheit Umweltkriterien, gestützt auf international anerkannte wissenschaftliche Daten, berücksichtigt werden sollten. Die SSK hat sich zu den unmittelbaren Fragen der Umsetzung dieser Empfehlung und der darauf basierenden Forderung des Art. 65 der Richtlinie 2013/59/Euratom in ihrer Empfehlung vom 13. Dezember 2013 (SSK 2013) geäußert. Sie sah in der Präambel der Richtlinie 2013/59/Euratom enthaltenen Forderung, die Umwelt vor den schädlichen Wirkungen ionisierender Strahlung zu schützen und in der im Artikel 65 enthaltenen Formulierung, die Einhaltung von Umweltkriterien im Hinblick auf den langfristigen Gesundheitsschutz des Menschen zu demonstrieren, eine Forderung, auch nicht menschliche Arten vor schädlichen Wirkungen ionisierender Strahlung zu schützen. Von diesem Sachverhalt ausgehend empfahl sie zur praktischen Umsetzung, die ICRP-Veröffentlichung 108 (ICRP 2008) zugrunde zu legen. Unter Bezug auf eine Studie des Öko-Instituts (Küppers et al. 2012) wies die SSK darauf hin, dass sie den Schutz von Tieren und Pflanzen als gewährleistet ansieht, wenn bei Ableitungen von Radionukliden mit der Fortluft und dem Abwasser aus Tätigkeiten die Dosisgrenzwerte für die Referenzperson eingehalten werden und wenn zum Nachweis ihrer Einhaltung die AVV zu § 47 StrlSchV (BMU 2012) angewendet wurde. Ein Screening im Einzelfall sei für derartige Fälle nicht erforderlich. Auch zusätzliche generische Begrenzungen von Ableitungen oder die Festlegung von Aktivitätshöchstwerten von Radionukliden in Umweltmedien zum Schutz von Tieren und Pflanzen waren nach Auffassung der SSK nicht erforderlich. Bei der Beurteilung von Expositionssituationen durch natürlich vorkommende Radionuklide sah die SSK allerdings noch weiteren Klärungsbedarf.

Mit der vorliegenden Empfehlung fasst die SSK ihre bisherigen Äußerungen zum Themenbereich „Schutz der Umwelt im Strahlenschutz“ zusammen. In dieser Empfehlung werden Fragen der Umsetzung bei unterschiedlichen Expositionssituationen beantwortet und weitere Aspekte, die im Zusammenhang mit der Beurteilung von Radioaktivität in Umweltprüfungen eine Rolle spielen können, behandelt. Diese Empfehlung ersetzt die SSK-Empfehlungen aus den Jahren 2012 und 2013.

Die SSK beabsichtigt, mit dieser Empfehlung dem Bundesumweltministerium einen methodischen Rahmen an die Hand zu geben, der ein nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft angemessenes Vorgehen bei der Prüfung und Bewertung von radioaktiven Kontaminationen in der Umwelt in Deutschland gestattet. Damit soll die im System des

Strahlenschutzes noch vorhandene konzeptionelle Lücke geschlossen und der bisherige Fokus des Strahlenschutzes auf schädliche Wirkungen ionisierender Strahlung auf Menschen durch eine Komponente ergänzt werden, die auch nicht menschliche Arten und andere Umweltschutzgüter (siehe Kapitel 3) einbezieht.

2 Beratungsauftrag

Mit Schreiben vom 08. Januar 2008 bat das Bundesumweltministerium die SSK, eine Empfehlung für einen Maßstab zum Schutz der Umwelt unter Berücksichtigung

- der Konzepte des konventionellen Umweltschutzes,
- der Ergebnisse der EU-Projekte FASSET, ERICA und PROTECT,
- des Diskussionsstandes der ICRP und
- des durch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) entwickelten Konzeptes zum Schutz der Natur (BfS 2010)

zu erarbeiten.

In diesem Zusammenhang sollte auch geprüft werden, wie im Umweltschutz geltende Prinzipien, insbesondere das Prinzip der Nachhaltigkeit, im Hinblick auf radioaktive Stoffe angewendet werden können. Dabei sollte besonderes Augenmerk auf die natürlichen Radionuklide gerichtet werden.

3 Begriff der Umwelt und Anwendungsbereiche

Unter dem Begriff „Umwelt“ wird in Deutschland das auf ein konkretes Gebiet bezogene Gesamtsystem von Menschen, Naturhaushalt und Landschaft, Kulturgütern und sonstigen Sachgütern sowie das Wirkungsgefüge zwischen diesen Schutzgütern verstanden.

Der Naturhaushalt als Teil dieses Gesamtsystems Umwelt umfasst die Naturgüter, Wasser, Boden, Luft, Klima, Tiere und Pflanzen sowie das Wirkungsgefüge zwischen ihnen (BNatSchG 2009, § 7).

Menschen, Tiere und Pflanzen sowie auch andere lebende Organismen können unmittelbar von ionisierender Strahlung betroffen sein. Umweltmedien, wie Wasser, Boden und Luft, können durch radioaktive Kontamination mittelbar zu schädlichen Wirkungen auf lebende Organismen beitragen und darüber hinaus auch in ihren ökologischen und ökonomischen Funktionen beeinträchtigt werden.

Daher sieht die SSK Menschen, Tiere, Pflanzen und andere lebende Organismen[1] sowie Wasser, Boden und Luft als zu berücksichtigende Schutzgüter für den Strahlenschutz an. Der Schutz der menschlichen Gesundheit ist als Schutz von Personen der Bevölkerung seit langem im Strahlenschutz geregelt und kein Gegenstand dieser Empfehlung. In Übereinstimmung mit den Prinzipien des Umweltschutzes sieht die SSK den Schutz der menschlichen Gesundheit als prioritäres Schutzziel auch für den Schutz der Umwelt im Strahlenschutz an. Im Hinblick auf nicht menschliche Arten bestehen die Schutzziele in einer Vermeidung oder Verringerung der Häufigkeit schädlicher Strahleneffekte auf ein Niveau, auf dem die Strahlung nur vernachlässigbare Wirkungen auf den Erhalt der biologischen Vielfalt und die Erhaltung der

[1] Als Oberbegriff für Tiere, Pflanzen und andere lebende Organismen wird im Weiteren der Term „nicht menschliche Arten“ verwendet.

Arten hat. Die biologischen Endpunkte, die in dieser Hinsicht am wichtigsten sind, betreffen mögliche Veränderungen von Populationsgröße oder -struktur. Die Anwendungsbereiche der im folgenden Kapitel dargestellten Empfehlungen sieht die SSK bei folgenden Sachthemen:

(a) Bewertung des Schutzes nicht menschlicher Arten in geplanten und bestehenden Expositionssituationen,

(b) Bewertung und Begründung von Maßnahmen, die nach Notfallsituationen mit erheblichen langzeitlichen Umweltauswirkungen zu treffen sind,

(c) Bewertung großräumiger Veränderungen der Umweltradioaktivität (z. B. in den Meeren oder in der Atmosphäre),

(d) Erfüllung internationaler Verpflichtungen der Bundesrepublik Deutschland auf dem Gebiet der Kernenergie und des Strahlenschutzes (§ 1 Nr. 4 (AtG 1985)).

In dieser Empfehlung der SSK nicht berücksichtigte Anwendungsbereiche sind:

- Die im Strahlenschutz bereits ausgearbeiteten Regelungen zum Schutz der Bevölkerung vor schädlichen Wirkungen ionisierender Strahlung,
- Umweltschutzaspekte von atomrechtlich oder strahlenschutzrechtlich genehmigten Anlagen oder strahlenschutzrechtlich überwachten Prozessen, die nicht im Zusammenhang mit ionisierender Strahlung oder solcher Strahlung aussendenden Radionukliden stehen (wie z. B. Lärm, Verkehr, Landschaftsveränderung),
- Wirkungen nichtionisierender Strahlung (NIR), wie z. B. elektromagnetische Felder, UV-Strahlung etc., auf die Umwelt,
- radiologische Folgen von nicht kontrollierbaren natürlichen Veränderungen im Naturhaushalt (z. B. Vulkanausbrüche, Radon bei Erdbeben).

Die Empfehlung ist nicht auf Strahlenschutzbereiche im Sinne des § 36 StrlSchV anwendbar, da solche Bereiche dem arbeitsplatzbezogenen Strahlenschutz zuzuordnen sind.

4 Empfehlungen

Mit den folgenden Empfehlungen beschreibt die SSK einen konzeptionellen und methodischen Rahmen, mit dem der Schutz der Umwelt im Strahlenschutz konkretisiert wird. Ausgehend vom Umweltbegriff und ihrer früheren Empfehlung (SSK 2003) sieht die SSK die Notwendigkeit, den Schutz der Umwelt im Strahlenschutz nicht auf den Schutz nicht menschlicher Arten zu beschränken, sondern auch den Schutz von Umweltmedien und Sachgütern sowie Fragen der Nachhaltigkeit einzubeziehen.

Empfehlung 1: Die Ausgestaltung des Schutzes der Umwelt im Strahlenschutz sollte neben nicht menschlichen Arten und Ökosystemen auch die Umweltmedien Wasser, Boden, Luft und Sachgüter sowie den Aspekt der Nachhaltigkeit einbeziehen.

Die in der Empfehlung 1 formulierte systematische Integration der Umwelt in den Strahlenschutz erfordert es nach Meinung der SSK nicht, dass für alle Schutzgüter eigenständige Regelungen im Strahlenschutzsystem zu treffen sind. Vielmehr kann, soweit es nach den in dieser Empfehlung formulierten Maßstäben begründbar ist, davon ausgegangen werden, dass für nicht menschliche Arten kein relevantes Risiko besteht, wenn ein Schutz der menschlichen Gesundheit nach den Maßstäben des Strahlenschutzes gewährleistet ist (vgl. ICRP 1991). Da

allerdings ionisierende Strahlung durch Umweltkontaminationen sowohl auf die Umweltmedien Wasser, Boden und Luft als auch auf Sachgüter in der Regel keine unmittelbar schädlichen Wirkungen ausübt, bedarf es einer Klärung, auf welcher Basis diese Umweltschutzgüter im Rahmen des Strahlenschutzes zu beurteilen sind.

Aus diesen Gründen trifft die SSK zu folgenden Aspekten des Umweltschutzes Empfehlungen:

- Konzeptionelle Klärung, mit welchen Methoden schädliche Wirkungen ionisierender Strahlung auf nicht menschliche Arten im Hinblick darauf bemessen und bewertet werden können, dass die biologische Vielfalt sowie die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts einschließlich der Regenerationsfähigkeit und nachhaltigen Nutzungsfähigkeit nicht beeinträchtigt werden (vgl. § 1 BNatSchG). (*siehe Empfehlungen 2, 3*)
- Beschreibung der praktischen Anwendung der Grundprinzipien des Strahlenschutzes auf den Schutz von nicht menschlichen Arten bei unterschiedlichen Expositionssituationen. *(siehe Empfehlungen 4 bis 8)*
- Klarstellung der Anforderungen an den Schutz von Wasser, Boden und Luft hinsichtlich der Aspekte des Strahlenschutzes und der Anforderungen an die genannten Umweltmedien aus Sicht des sektoralen Umweltrechtes.
  siehe Empfehlungen 9 bis 11)
- Berücksichtigung erheblicher Nachteile für den Einzelnen oder die Allgemeinheit durch radioaktive Kontamination von Sach- und Kulturgütern als Teil eines weiter gefassten Strahlenschutzes der Umwelt.
  (siehe Empfehlungen 12 bis 15)
- Konkretisierung des Prinzips der Nachhaltigkeit im Hinblick auf den Strahlenschutz. *(siehe Empfehlungen 16 bis 20)*

4.1 Schutz nicht menschlicher Arten

Zur Einführung des Schutzes nicht menschlicher Arten in den Strahlenschutz in Deutschland empfiehlt die SSK, folgende Grundlagen zu benutzen:

Empfehlung 2: **Als Grundlage für den Strahlenschutz nicht menschlicher Arten sollen die Empfehlungen der ICRP herangezogen werden. Zur Beurteilung der Strahlenexposition nicht menschlicher Arten sind ausschließlich die in der ICRP-Veröffentlichung 108 aufgeführten 12 Referenztiere und -pflanzen (RAPs) als Vertreter von Organismengruppen und eine gewichtete Energiedosis[2] als Messgröße für die Strahlenexposition von RAPs zu verwenden. Diese RAPs werden mit den in Tabelle 4 (der Begründung und Erläuterung der Empfehlung) genannten deutschen Begriffen bezeichnet.**

Zur Ermittlung der Strahlenexposition sind ausschließlich die 75 Radionuklide der ICRP-Veröffentlichung 108, die für diese Nuklide in der ICRP-Veröffentlichung 108 aufgeführten Dosiskonversionsfaktoren sowie die für die zugehörigen chemischen Elemente in der ICRP-Veröffentlichung 114 (ICRP 2009) aufgeführten Konzentrationsverhältnisse zu verwenden. Die als

[2] Mit Strahlungswichtungsfaktoren multiplizierte absorbierte Energiedosis

Strahlungsquelle wirksame Kontamination der Umweltmedien muss dazu entweder gemessen worden sein oder muss mit Hilfe von Ausbreitungs- und Transfermodellen ermittelt werden.

Bis zum Vorliegen international akzeptierter Werte für Strahlungswichtungsfaktoren für nicht menschliche Arten sollen die bisher von der ICRP verwendeten Werte aus (Ulanowski et al. 2008) übernommen werden.

Die SSK stellt klar, dass die gewichtete Energiedosis als Messgröße für die Strahlenexposition nicht menschlicher Arten und die effektive Dosis als Messgröße für die Strahlenexposition des Menschen nicht direkt vergleichbar sind, da beiden Größen unterschiedliche Dosiskonzepte und -modelle zugrunde liegen.

Empfehlung 3: **Die Bewertung der Strahlenexpositionen der RAPs soll unter Bezug auf die von der ICRP angegebenen Bereiche der Dosisraten, sogenannten „Derived Consideration Reference Levels“ (DCRLs) für den jeweiligen Referenzorganismus erfolgen. Diese Werte wurden von der ICRP als Gesamtwerte der Dosisraten (Summe der zivilisatorisch bedingten und natürlichen Dosisbeiträge) eingeführt.**

Für die Anwendung dieser Grundlagen bei unterschiedlichen Expositionssituationen empfiehlt die SSK:

Empfehlung 4: **Bei Strahlenexpositionen aller für eine Expositionssituation relevanten RAPs unterhalb der oberen Werte der jeweiligen DCRL-Bereiche kann davon ausgegangen werden, dass die Einhaltung der Schutzziele, inklusive der Erhaltung der Arten und der Bewahrung der biologischen Vielfalt, gewährleistet ist. Davon kann ausgegangen werden, wenn die in Anlage 1 aufgeführten Werte bei Anwendung der Summenformel für Radionuklidgemische nicht überschritten werden.**

Empfehlung 5: **Grenzwerte für die Strahlenexposition nicht menschlicher Arten sollen nicht eingeführt werden.**

Empfehlung 6: **Bei Anwendung des geltenden Strahlenschutzregelwerks und bei geplanten Expositionssituationen im Sinne der Richtlinie 2013/59/Euratom werden die oberen Werte der DCRL-Bereiche nicht überschritten. Für diese Expositionssituationen kann daher auf Betrachtungen zur Strahlenexposition nicht menschlicher Arten verzichtet werden.**

Empfehlung 7: **Bei bestehenden Expositionssituationen sollen die RAPs im Optimierungsprozess angemessen berücksichtigt werden, sofern als Folge anthropogener Veränderungen Expositionen oberhalb der oberen Werte der DCRL-Bereiche auftreten.**

Empfehlung 8: **In Notfall-Expositionssituationen muss der Strahlenschutz des Menschen stets im Vordergrund stehen. Soweit bei Notfällen Kontaminationen von Wasser, Boden oder Pflanzen eingetreten sind, sollten Maßnahmen zur Beseitigung solcher Kontaminationen nur erwogen werden, wenn sie unmittelbar dem Schutz des Menschen dienen. Der Schutz nicht menschlicher Arten sollte jedoch bei der Prüfung sonstiger Handlungsoptionen in späten Phasen der Notfall-Expositionssituationen einbezogen werden.**

4.2 Beurteilung radioaktiver Kontaminationen von Umweltmedien

Empfehlung 9: **Die SSK empfiehlt, die Umweltmedien Wasser, Boden und Luft als Schutzgüter im Strahlenschutz zu betrachten.**

Empfehlung 10: **Radioaktive Kontaminationen der Umweltmedien Wasser und Boden durch Radionuklide sollten in geplanten Expositionssituationen als geringfügig im Hinblick auf den Schutz nicht menschlicher Arten sowie von Ökosystemen angesehen werden, wenn die unteren Werte der DCRL-Bereiche nicht überschritten werden. Davon kann ausgegangen werden, wenn jeweils ein Zehntel der in Anlage 1 aufgeführten Werte bei Anwendung der Summenformel für Radionuklidgemische nicht überschritten wird.**

Soweit in bestehenden oder Notfall-Expositionssituationen der Schutz nicht menschlicher Arten sowie von Ökosystemen separat vom Schutz des Menschen zu beurteilten ist, sollen als Maßstab die oberen Werte der DCRL-Bereiche herangezogen werden.

Empfehlung 11: **Die SSK hält es nicht für erforderlich, Werte zur Beurteilung radioaktiver Kontaminationen der Luft nach ökotoxikologischen Gesichtspunkten einzuführen.**

Empfehlung 12: **Zur Beurteilung geplanter oder bestehender Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit durch Radionuklide soll in geeigneter Weise klargestellt werden, unter welchen Voraussetzungen ein Eintrag von Radionukliden in das Grundwasser als geringfügig bewertet werden kann. In Bezug auf die ökotoxikologischen Anforderungen an eine wasserrechtliche Geringfügigkeit verweist die SSK auf die Empfehlung 10.**

Schädliche Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit durch Radionuklide sollen nur nach Maßstäben des Strahlenschutzes beurteilt werden.

Empfehlung 13: **Im Zusammenhang mit der Klarstellung nach Empfehlung 12 soll auch spezifiziert werden, wie die Parameter der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) für Radioaktivität im Hinblick auf die Bewertung einer nachteiligen Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit anzuwenden sind.**

4.3 Radioaktive Kontaminationen von Sachgütern

Radioaktive Kontaminationen von Sachgütern können unabhängig von ihren radiologischen Auswirkungen auf Menschen oder (z. B. bei Bodenkontaminationen) auf nicht menschliche Arten zu Beeinträchtigungen der Nutzbarkeit dieser Sachgüter führen und erhebliche Nachteile

für die jeweiligen Besitzer zur Folge haben. Die SSK sieht es als notwendig an, solche Kontaminationen bei der Planung von Maßnahmen bei Notfall-Expositionssituationen zu berücksichtigen. Darüber hinaus sollten Kontaminationen im Wirtschaftskreislauf aber durch eine weiter gefasste Betrachtung der Radioaktivität in Umweltprüfungen bereits am Ort ihrer Entstehung identifiziert werden, um einen unkontrollierten Eintrag in die Stoffströme der Wirtschaft zu vermeiden.

Davon ausgehend empfiehlt die SSK:

Empfehlung 14 : **Radionuklide in bzw. an Sachgütern, die zur Beeinträchtigung der technischen Nutzbarkeit führen oder erhebliche Nachteile bei der wirtschaftlichen Nutzung bis hin zur Entsorgung verursachen können, sollen bereits in der Phase von Umweltprüfungen anlagenspezifisch identifiziert und berücksichtigt werden.**

Da auch bei Anlagen, in denen keine zulassungspflichtigen Tätigkeiten stattfinden, Radionuklide in bzw. an Sachgütern, insbesondere in Abfällen, ökonomisch nachteilig sein können, sollten betreffende Anlagentypen, z. B. durch Auswertung von Meldeberichten zu Strahlenalarmen bei Entsorgungsunternehmen, ermittelt werden.

Empfehlung 15: **Für Sachgüter, deren Radionuklidgehalt durch bestehende oder Notfall-Expositionssituationen erhöht wurde, sollen geeignete Regelungen zur Handhabung, Dekontamination, Wiederverwendung oder Entsorgung getroffen werden, die im Bedarfsfall angewendet werden können.**

4.4 Anwendung des Prinzips der Nachhaltigkeit

Das Prinzip der Nachhaltigkeit ist ein strategisches Konzept der Umweltpolitik, das Elemente enthält, die im Sinne strategischer Management-Prinzipien zur Gewährleistung einer nachhaltigen Entwicklung auch in den Schutz der Umwelt im Strahlenschutz integriert werden sollen. Dabei sind neben dem Schutz der menschlichen Gesundheit auch der Schutz von nicht menschlichen Arten sowie die zeitliche Stabilität hinreichend geringer Kontamination der Umweltmedien zu verfolgende Ziele. Es geht damit über das Vorsorgeprinzip hinaus, wobei letzteres, auch im Sinne einer starken Nachhaltigkeit, sowohl als Instrument der Risikovorsorge als auch als Ressourcenvorsorge bei zu treffenden Entscheidungen über erhebliche Umweltauswirkungen Anwendung finden muss. Von diesen Gedanken ausgehend empfiehlt die SSK:

Empfehlung 16: **Regionale oder lokale Trends radioaktiver Umweltkontaminationen, die ohne geeignete Maßnahmen zu radiologisch relevanten Kontaminationen führen können, sollen unter dem Aspekt der Vorsorge bewertet und es soll einer unerwünschten Entwicklung entgegen gewirkt werden. Bei einer solchen Bewertung ist die in der Regel begrenzte Dauer von geplanten Ableitungen zu berücksichtigen.**

Empfehlung 17: **Auf langfristige Veränderungen der großräumigen bis globalen Konzentrationen von Radionukliden, die einer nationalen Regelsetzung nicht zugänglich sind, sollte international Einfluss genommen werden, wenn diese Veränderungen absehbar zu radiologisch relevanten Kontaminationen von Sachgütern und Rohstoffen oder zu nicht vernachlässigbaren Expositionen für den Menschen führen können. Um dieses Ziel umzusetzen, sollte die Entwicklung der**

Konzentration langlebiger Radionuklide in Umweltmedien beobachtet werden. Dazu sollten Daten aus bereits durchgeführten Monitoring-Programmen gezielt auf diesen Aspekt hin ausgewertet werden.

Empfehlung 18: **Losgelöst von Monitoring-Programmen und realen Kontaminationsentwicklungen soll bei geänderter oder neuer Genehmigung existierender Anlagen, die einer strahlenschutzrechtlichen Überwachung unterliegen und die Radionuklide in die Umweltmedien ableiten, geprüft werden, ob durch Umsetzung von Maßnahmen zur Emissionsminderung eine Reduzierung der Freisetzungen im Sinne des ALARA-Prinzips mit vertretbarem Aufwand erreichbar ist.**

Empfehlung 19: **Um auf zeitliche Veränderungen von Umweltkontaminationen reagieren zu können, sollen die existierenden Monitoring-Programme der Umweltmedien Wasser, Boden und Luft in angemessenen zeitlichen Abständen daraufhin überprüft werden, ob sie nach Stand der Wissenschaft hinreichend umfassend und geeignet sind, um langfristig wirkende ansteigende Trends zu erkennen. Sind solche langfristigen Trends nachgewiesen, so sollen die Monitoring-Programme so ausgerichtet werden, dass sie geeignet sind, Ursachen zu identifizieren und Maßnahmen, die eine Trendumkehr zum Ziel haben, zu begründen.**

Empfehlung 20: **Bei geplanten Expositionssituationen, die sich über Zeiträume erstrecken, die eine Steuerung durch den Menschen nicht mehr zulassen (z.B. im Zusammenhang mit der tiefen geologischen Endlagerung radioaktiver Abfälle), soll der Vorsorgegedanke nicht im Sinne eines Besorgnisgrundsatzes ausgestaltet und Nachhaltigkeit nicht anhand wenig wahrscheinlicher Entwicklungen beurteilt werden.**

Bei Betrachtungen, die im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle dem Schutz der Umwelt und des Menschen in ferner Zukunft dienen, darf eine mögliche Strahlenexposition der mit den Abfällen umgehenden Beschäftigten jetzt und in naher Zukunft nicht vernachlässigt werden.

Literatur

AtG 1985	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 20. November 2015 (BGBl. I S. 2053) geändert worden ist
BfS 2010	Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Schutz der belebten Natur vor ionisierender Strahlung – Internationale Ansätze und das Stufenkonzept des Bundesamtes für Strahlenschutz. In: „Natürliche und künstliche Radionuklide in unserer Umwelt“ – 42. Jahrestagung des Fachverbands für Strahlenschutz e. V., Borkum, Hersg.: A. von Neu, A. Bayer, T. Steinkopff, TÜV Media GmbH, TÜV Rheinland Group, Köln, 2010, Seite 338-343, ISSN 1013-4506
BMU 2012	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung (Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen) vom 28.08.2012. BAnz AT 05.09.2012 B1
BNatSchG 2009	Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG) vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das durch Artikel 4 Absatz 96 des Gesetzes vom 18. Juli 2016 (BGBl. I S. 1666) geändert worden ist
Euratom 2014	Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2013/59/Euratom des Rates vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom. Amtsblatt der Europäischen Union, L 13/1, 17.01.2014
ICRP 1991	International Commission on Radiological Protection (ICRP). 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21(1-3), Pergamon Press, 1991, ISBN 0080411444
ICRP 2008	International Commission on Radiological Protection (ICRP). Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108, Ann. ICRP 38(4-6), Elsevier, 2008, ISBN 978-0444529343
ICRP 2009	International Commission on Radiological Protection (ICRP). Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants. ICRP Publication 114, Ann. ICRP 39(6), Elsevier, 2009, ISBN: 978-1-4557-2708-7

Küppers et al. 2012	Küppers C, Ustohalova V, Ulanovsky A. Systematische Untersuchung der Exposition von Flora und Fauna bei Einhaltung der Grenzwerte der StrlSchV für den Menschen - Vorhaben 3609S70006. Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz, BfS-RESFOR-62/12, Salzgitter, März 2012, http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-201203227814
SSK 2003	Strahlenschutzkommission (SSK). Beiträge zur Weiterentwicklung der Konzepte im Strahlenschutz. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet von der SSK am 23.05.2003. BAnz Nr. 218 vom 21.11.2003
SSK 2012	Strahlenschutzkommission (SSK). Zur Umsetzbarkeit der Vorschläge der Europäischen Kommission zu Kapitel IX der neuen europäischen Grundnormen des Strahlenschutzes. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 257. Sitzung der SSK am 05./06. Juli 2012. urn:nbn:de:101:1-201310215783, BAnz AT 08.10.2013 B1
SSK 2013	Strahlenschutzkommission (SSK). Umsetzung von Artikel 65 Abs. 2 der neuen europäischen Grundnormen des Strahlenschutzes zum Schutz der Umwelt. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 267. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 12.12.2013. urn:nbn:de:101:1-201404076720, BAnz AT 04.11.2014 B3
TrinkwV 2001	Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV 2001) in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), die durch Artikel 4 Absatz 21 des Gesetzes vom 18. Juli 2016 (BGBl. I S. 1666) geändert worden ist
Ulanowski et al. 2008	Ulanowski A, Pröhl G, Gómez-Ros JM. Methods for calculating dose conversion coefficients for terrestrial and aquatic biota. J Environ Radioact. 2008 Sep;99(9):1440-8

Anlage 1 Werte zur Beurteilung radioaktiver Kontaminationen von Boden und Gewässern im Hinblick auf den Schutz nicht menschlicher Arten

Tab. A-1: Werte der spezifischen Aktivität im Boden („terrestrisch"), der Aktivitätskonzentration in Binnengewässern (limnisch") und der Aktivitätskonzentration in Küstengewässern oder dem Meer („marin"), für die die Strahlenexposition von (den nuklidspezifisch sensitivsten) RAPs den oberen Werten der DCRL-Bereiche nach (ICRP 2008) entspricht

Nuklid	terrestrisch Bq/kg	limnisch Bq/l	marin Bq/l
H-3	$3{,}4 \times 10^{4}$	$1{,}7 \times 10^{7}$	$5{,}1 \times 10^{7}$
C-14	$1{,}1 \times 10^{3}$	$3{,}4 \times 10^{2}$	$1{,}2 \times 10^{3}$
P-32	$8{,}0 \times 10^{1}$	1,5	$1{,}2 \times 10^{1}$
P-33	$6{,}9 \times 10^{2}$	$1{,}3 \times 10^{1}$	$9{,}4 \times 10^{1}$
S-35	$9{,}4 \times 10^{3}$	$5{,}9 \times 10^{3}$	$6{,}0 \times 10^{6}$
Cl-36	$3{,}8 \times 10^{4}$	$1{,}1 \times 10^{4}$	$3{,}5 \times 10^{6}$
K-40	$5{,}6 \times 10^{5}$	$1{,}7 \times 10^{6}$	$2{,}8 \times 10^{6}$
Ca-45	$1{,}8 \times 10^{5}$	$7{,}6 \times 10^{3}$	$2{,}3 \times 10^{6}$
Cr-51	$2{,}9 \times 10^{6}$	$2{,}8 \times 10^{5}$	$1{,}5 \times 10^{5}$
Mn-54	$1{,}0 \times 10^{5}$	$2{,}1 \times 10^{3}$	$1{,}9 \times 10^{3}$
Co-57	$9{,}3 \times 10^{5}$	$7{,}2 \times 10^{3}$	$2{,}0 \times 10^{4}$
Co-58	$8{,}1 \times 10^{4}$	$2{,}7 \times 10^{3}$	$9{,}7 \times 10^{3}$
Co-60	$3{,}4 \times 10^{4}$	$1{,}2 \times 10^{3}$	$4{,}2 \times 10^{3}$
Ni-59	$2{,}1 \times 10^{7}$	$1{,}6 \times 10^{4}$	$2{,}3 \times 10^{4}$
Ni-63	$1{,}5 \times 10^{7}$	$1{,}2 \times 10^{4}$	$1{,}7 \times 10^{4}$
Zn-65	$1{,}4 \times 10^{5}$	$2{,}1 \times 10^{2}$	$3{,}0 \times 10^{2}$
Se-75	$1{,}7 \times 10^{5}$	$1{,}4 \times 10^{3}$	$1{,}1 \times 10^{3}$
Se-79	$1{,}2 \times 10^{6}$	$2{,}2 \times 10^{3}$	$1{,}3 \times 10^{3}$
Sr-89	$5{,}8 \times 10^{4}$	$1{,}0 \times 10^{2}$	$3{,}7 \times 10^{4}$
Sr-90+	$3{,}0 \times 10^{4}$	$5{,}4 \times 10^{1}$	$2{,}1 \times 10^{4}$
Zr-95	$1{,}1 \times 10^{5}$	$8{,}9 \times 10^{2}$	$8{,}7 \times 10^{3}$
Nb-94	$5{,}1 \times 10^{4}$	$2{,}7 \times 10^{3}$	$4{,}0 \times 10^{4}$
Nb-95	$1{,}0 \times 10^{5}$	$6{,}6 \times 10^{3}$	$1{,}2 \times 10^{5}$
Tc-99	$1{,}9 \times 10^{6}$	$6{,}0 \times 10^{4}$	$1{,}9 \times 10^{2}$
Ru-103+	$1{,}7 \times 10^{5}$	$5{,}8 \times 10^{4}$	$1{,}9 \times 10^{4}$
Ru-106+	$1{,}3 \times 10^{5}$	$8{,}7 \times 10^{3}$	$2{,}9 \times 10^{3}$
Ag-110m+	$2{,}9 \times 10^{4}$	$5{,}0 \times 10^{3}$	$8{,}9 \times 10^{1}$
Cd-109+	$8{,}9 \times 10^{4}$	$1{,}6 \times 10^{3}$	$5{,}3 \times 10^{2}$
Sb-124	$1{,}6 \times 10^{4}$	$1{,}7 \times 10^{2}$	$1{,}4 \times 10^{3}$
Sb-125	$5{,}7 \times 10^{4}$	$5{,}9 \times 10^{2}$	$4{,}0 \times 10^{3}$
Te-129m+	$3{,}8 \times 10^{5}$	$5{,}4 \times 10^{2}$	$1{,}4 \times 10^{2}$
Te-132	$3{,}1 \times 10^{4}$	$3{,}7 \times 10^{2}$	$1{,}2 \times 10^{2}$
I-125	$2{,}2 \times 10^{6}$	$1{,}7 \times 10^{4}$	$1{,}1 \times 10^{4}$
I-129	$1{,}7 \times 10^{6}$	$1{,}1 \times 10^{4}$	$6{,}2 \times 10^{3}$
I-131	$1{,}8 \times 10^{5}$	$4{,}4 \times 10^{3}$	$2{,}6 \times 10^{3}$
I-132	$3{,}3 \times 10^{4}$	$1{,}4 \times 10^{3}$	$1{,}1 \times 10^{3}$
I-133+	$1{,}0 \times 10^{5}$	$2{,}2 \times 10^{3}$	$1{,}4 \times 10^{3}$
Cs-134	$3{,}6 \times 10^{4}$	$1{,}2 \times 10^{3}$	$7{,}9 \times 10^{4}$
Cs-135	$6{,}6 \times 10^{5}$	$6{,}2 \times 10^{3}$	$4{,}0 \times 10^{5}$
Cs-136	$2{,}7 \times 10^{4}$	$1{,}1 \times 10^{3}$	$7{,}0 \times 10^{4}$

Nuklid	terrestrisch Bq/kg	limnisch Bq/l	marin Bq/l
Cs-137+	$6{,}9 \times 10^{4}$	$1{,}3 \times 10^{3}$	$8{,}8 \times 10^{4}$
Ba-140+	$3{,}0 \times 10^{4}$	$4{,}6 \times 10^{2}$	$5{,}1 \times 10^{2}$
La-140	$3{,}7 \times 10^{4}$	$1{,}2 \times 10^{3}$	$2{,}6 \times 10^{2}$
Ce-141	$1{,}6 \times 10^{6}$	$2{,}1 \times 10^{3}$	$4{,}5 \times 10^{3}$
Ce-144+	$1{,}9 \times 10^{6}$	$3{,}1 \times 10^{2}$	$8{,}8 \times 10^{2}$
Eu-152	$7{,}7 \times 10^{4}$	$1{,}6 \times 10^{4}$	$1{,}1 \times 10^{3}$
Eu-154	$7{,}1 \times 10^{4}$	$9{,}9 \times 10^{3}$	$6{,}9 \times 10^{2}$
Eu-155	$2{,}8 \times 10^{6}$	$5{,}9 \times 10^{4}$	$3{,}7 \times 10^{3}$
Ir-192	$1{,}0 \times 10^{5}$	$3{,}2 \times 10^{4}$	$3{,}0 \times 10^{3}$
Pb-210+	$3{,}0 \times 10^{6}$	$1{,}8 \times 10^{4}$	$5{,}0 \times 10^{2}$
Po-210	$3{,}4 \times 10^{4}$	$3{,}0 \times 10^{1}$	1,1
Ra-226	$5{,}9 \times 10^{3}$	2,7	$4{,}7 \times 10^{1}$
Ra-228	$8{,}8 \times 10^{4}$	$9{,}8 \times 10^{2}$	$1{,}9 \times 10^{4}$
Th-227	$1{,}3 \times 10^{5}$	1,5	5,1
Th-228	$2{,}3 \times 10^{4}$	$2{,}7 \times 10^{-1}$	$9{,}4 \times 10^{-1}$
Th-229+	$1{,}5 \times 10^{5}$	1,8	6,1
Th-230	$1{,}6 \times 10^{5}$	1,8	6,4
Th-231	$1{,}1 \times 10^{7}$	$4{,}0 \times 10^{2}$	$1{,}5 \times 10^{3}$
Th-232	$1{,}9 \times 10^{5}$	2,1	7,6
Th-234+	$3{,}8 \times 10^{6}$	$9{,}9 \times 10^{1}$	$4{,}7 \times 10^{2}$
Pa-231	$3{,}4 \times 10^{4}$	$1{,}9 \times 10^{1}$	$1{,}4 \times 10^{2}$
U-233	$2{,}8 \times 10^{4}$	$3{,}8 \times 10^{2}$	$5{,}1 \times 10^{2}$
U-234	$2{,}8 \times 10^{4}$	$3{,}9 \times 10^{2}$	$5{,}2 \times 10^{2}$
U-235+	$3{,}0 \times 10^{4}$	$4{,}2 \times 10^{2}$	$5{,}6 \times 10^{2}$
U-238	$3{,}2 \times 10^{4}$	$4{,}4 \times 10^{2}$	$5{,}9 \times 10^{2}$
Np-237+	$3{,}5 \times 10^{4}$	$2{,}0 \times 10^{1}$	$2{,}8 \times 10^{2}$
Pu-238	$3{,}1 \times 10^{4}$	$1{,}8 \times 10^{1}$	5,5
Pu-239	$3{,}3 \times 10^{4}$	$1{,}9 \times 10^{1}$	5,9
Pu-240	$3{,}2 \times 10^{4}$	$1{,}9 \times 10^{1}$	5,8
Pu-241	$1{,}2 \times 10^{8}$	$6{,}9 \times 10^{4}$	$2{,}2 \times 10^{4}$
Am-241	$6{,}7 \times 10^{4}$	$1{,}6 \times 10^{1}$	$6{,}9 \times 10^{1}$
Cm-242	$6{,}0 \times 10^{4}$	$1{,}5 \times 10^{1}$	1,4
Cm-243	$6{,}2 \times 10^{4}$	$1{,}5 \times 10^{1}$	1,5
Cm-244	$6{,}4 \times 10^{4}$	$1{,}5 \times 10^{1}$	1,5
Cf-252	$2{,}8 \times 10^{4}$	$1{,}6 \times 10^{1}$	$6{,}3 \times 10^{1}$

Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Schutz der Umwelt im Strahlenschutz

Begründung und Erläuterung der Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 286. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 01. Dezember 2016

INHALT

1 Einführung 18

2 Begriff Umwelt 20

3 Anwendungsbereich 20

4 Ziele und Prinzipien zum Schutz der Umwelt 23

4.1 Schutz der menschlichen Gesundheit im Strahlenschutz 23

4.2 Ziele und Prinzipien im Umweltschutz 24

4.3 Erweiterung der Schutzziele zur Integration des Schutzes der Umwelt in den Strahlenschutz 28

5 Strahlenschutz nicht menschlicher Arten 29

5.1 Strahleneffekte bei Individuen 29

5.2 Strahleneffekte bei Populationen und Ökosystemen 32

5.3 Internationale Studien zur Erarbeitung eines Strahlenschutzkonzeptes zur Bewertung von Strahlenexpositionen nicht menschlicher Arten 33

5.3.1 Europäische Forschungsprojekte 33

5.3.2 Konzept des US Department of Energy (DOE) zur Bewertung von nicht menschlichen Arten 37

5.3.3 Der Strahlenschutz nicht menschlicher Arten aus der Sicht der IAEA 38

5.3.4 Zusammenfassende Bewertung des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes durch UNSCEAR 38

5.4 Nationale Arbeiten für ein Strahlenschutz-Konzept zur Bewertung von Strahlenexpositionen nicht menschlicher Arten 42

5.4.1 Das BfS-Konzept zum Schutz der belebten Natur 42

5.4.2 Studie des Öko-Instituts 43

5.5 Konzept und Empfehlungen zum Schutz nicht menschlicher Arten 46

5.5.1 Historie der Konzeptentwicklung 46

5.5.2 Repräsentative Tiere und Pflanzen (RAPs) und deren Dosimetrie 48

5.5.3 Maßstäbe zur Bewertung von Strahlenexpositionen von nicht menschlichen Arten 52

5.5.4 Schutz nicht menschlicher Arten bei unterschiedlichen Expositionssituationen 59

6 Bewertung radioaktiver Kontaminationen von Umweltmedien 61

6.1 Umweltmedien als Schutzgüter im Strahlenschutz 61

6.2 Maßstäbe zum Schutz der Umweltmedien 62

6.3 Sonderfall: Maßstäbe zur Beurteilung radioaktiver Kontaminationen im Grundwasser 66

7 Radioaktive Kontaminationen von Sachgütern 70

7.1 Sachgüter als Teil von Umweltprüfungen 70

7.2 Sachgüter als Teil des Schutzes der Umwelt im Strahlenschutz 70

8 Anwendung des Prinzips der Nachhaltigkeit 74

8.1 Konzeptionelle Rahmenbedingungen für eine Anwendung des Prinzips der Nachhaltigkeit im Strahlenschutz 74

8.2 Zum Aspekt der Risikovorsorge 76

8.3 Zum Aspekt der Ressourcenvorsorge 79

8.4 Endlagerung 81

Literatur 83

Anlage 1

Werte zur Beurteilung radioaktiver Kontaminationen von Boden und Gewässern im Hinblick auf den Schutz nicht menschlicher Arten 106

1 Einführung

Die Strahlenschutzverordnung – StrlSchV (StrlSchV 2001) definiert im § 1 als Zweck der Verordnung „*zum Schutz des Menschen und der Umwelt vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung Grundsätze und Anforderungen für Vorsorge- und Schutzmaßnahmen zu regeln, die bei der Nutzung und Einwirkung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung zivilisatorischen und natürlichen Ursprungs Anwendung finden*". Bei konkreten Begrenzungen von Strahlenexpositionen und Kontaminationen werden durch die StrlSchV aber – anders als bezogen z. B. auf den Schutz des Menschen – keine spezifischen Anforderungen gestellt.

Der Schutz vor schädlichen Wirkungen ionisierender Strahlung hat seit langem einen hohen Stellenwert. Als in Folge der Kernwaffentests in den 1950er und frühen 1960er Jahren erkennbar wurde, dass durch großräumige radioaktive Kontaminationen Situationen eintreten können, die aus Strahlenschutzgründen auf Dauer nicht akzeptabel sind, wurde im Jahr 1963 ein internationaler Vertrag über das Verbot von Kernwaffenversuchen in der Atmosphäre, im Weltraum und unter Wasser geschlossen, der explizit den Schutz der Umwelt vor radioaktiver Kontamination als Ziel benannte (PTBT 1963).

Auch das Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (OSPAR-Übereinkommen) vom 22. September 1992 (OSPAR 1992) enthält Anforderungen an den Schutz der Umwelt vor radioaktiven Kontaminationen.

Die aus diesen internationalen Verträgen erwachsenden Verpflichtungen betreffen vor allem Fragen, die sich dem Konzept der Nachhaltigkeit zuordnen lassen. Die Frage, wie dieser Aspekt der Nachhaltigkeit in den Strahlenschutz einzuordnen ist, wurde bisher allerdings international noch nicht vertiefend behandelt.

In der ICRP-Veröffentlichung 60 (ICRP 1991) wurde der Grundsatz formuliert, dass, wenn der Mensch nach Maßstäben des Strahlenschutzes vor ionisierender Strahlung geschützt ist, auch der entsprechende Schutz der Umwelt hinreichend ist. Die Frage, inwieweit dieser Grundsatz zutreffend und wissenschaftlich begründbar ist, hat, nicht zuletzt ausgelöst durch den Unfall von Tschernobyl, in der internationalen Entwicklung von Strahlenschutzkonzepten in den letzten Jahrzehnten einen längeren Entwicklungsprozess durchlaufen. Dabei rückten Expositionssituationen in den Vordergrund, bei denen nach einer unfallbedingten Freisetzung von Radionukliden und nach Evakuierung der Bevölkerung länger andauernde Strahlenexpositionen von Pflanzen und Tieren auftraten, die weit über dem Hintergrundniveau lagen und für die schädliche Wirkungen auf Lebewesen nach Ergebnissen von Laboruntersuchungen nicht ausgeschlossen werden können.

Um in derartigen Situationen, aber auch in anderen Fällen mit einer möglichen oder realen Strahlenexposition von nicht menschlichen Arten[3] objektive Beurteilungen vornehmen und sachgerechte Entscheidungen treffen zu können, sieht die SSK ein methodisch konsistentes Bewertungssystem auf wissenschaftlicher Basis für notwendig an. Wie sie bereits in einer Stellungnahme im Jahr 2003 feststellte, kann der Schutz der Umwelt im Strahlenschutz nicht auf den Schutz nicht menschlicher Arten reduziert werden (SSK 2003a). Da die Umweltmedien in ihren sektoralen Regelungsbereichen als Schutzgüter betrachtet werden, deren Schutzanspruch aus ihrem eigenen Wert resultiert, sind die daraus resultierenden

[3] Für Pflanzen, Tiere und andere lebende Organismen wird im Weiteren der Begriff „nicht menschliche Arten" synonym zu den Begriffen „belebte Natur" sowie „Biota" verwendet

Konsequenzen für den Strahlenschutz zu klären und ggf. zu berücksichtigen. In ihrer Veröffentlichung 103 (ICRP 2007) wies die ICRP darauf hin, dass im Unterschied zum Strahlenschutz des Menschen die Zielsetzungen des Schutzes der Umwelt im Strahlenschutz komplexer und schwerer zu formulieren sind. Die ICRP sah es im Konsens mit anderen internationalen Organisationen (IAEA, UNSCEAR, IUR) als notwendig an, die Erhaltung der biologischen Vielfalt, die Sicherung der Erhaltung der Arten sowie einen gesunden Zustand des natürlichen Lebensraumes, der Lebensgemeinschaften und Ökosysteme explizit zum Gegenstand des Strahlenschutzes zu machen. Auf der Grundlage intensiver, international geführter Forschungsarbeiten und Diskussionen wurden die Konzepte des Strahlenschutzes in dieser Richtung weiterentwickelt und verschiedene Ansätze zur Integration des Schutzes der belebten Umwelt vor den schädlichen Wirkungen ionisierender Strahlung in das bestehende System des Strahlenschutzes des Menschen bzw. auch in das Gefüge des allgemeinen Umweltschutzes entwickelt (siehe z. B. ICRP 2008). Damit liegt auf internationaler Ebene ein System zum Schutz der belebten Umwelt im Strahlenschutz vor, das zur Umsetzung des im § 1 StrlSchV formulierten Zwecks herangezogen werden kann, um Grundsätze und Anforderungen für den Schutz der Umwelt vor Schäden durch ionisierender Strahlung festzulegen.

Die Richtlinie 2013/59/Euratom (Euratom 2014) zum Strahlenschutz in Europa gibt einen Rechtsrahmen für die Weiterentwicklung des Strahlenschutzes in Deutschland vor. In Absatz 27 der Präambel wird dort ausgeführt:

„*Die Kontamination der Umwelt kann eine Bedrohung für die menschliche Gesundheit darstellen. Diese Kontamination wurde in den Sekundärrechtsvorschriften der Gemeinschaft bisher lediglich als ein Expositionspfad für die Einzelpersonen der Bevölkerung, die unmittelbar von in die Umwelt abgegebenen radioaktiven Stoffen betroffen sind, angesehen. Der Umstand, dass der Zustand der Umwelt langfristige Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben kann, macht eine Politik erforderlich, mit der die Umwelt vor den schädlichen Auswirkungen ionisierender Strahlung geschützt wird. Für die Zwecke des langfristigen Schutzes der menschlichen Gesundheit sollten auf international anerkannte wissenschaftliche Daten (wie sie etwa von der Europäischen Kommission, der ICRP, dem Wissenschaftlichen Ausschuss der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Auswirkungen der atomaren Strahlung oder der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) veröffentlicht werden) gestützte Umweltkriterien berücksichtigt werden*.“

Die SSK hat sich unter Bezug auf einen Vorschlag der Europäischen Kommission zur neuen Richtlinie des Rates zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung (Euratom-Grundnormen) vom 29. September 2011 in ihrer Empfehlung vom 06. Juli 2012 (SSK 2012) zu allgemeinen konzeptionellen Fragen des Schutzes der Umwelt im Strahlenschutz geäußert und eine stärkere Einbeziehung der Umwelt in den Strahlenschutz begrüßt. Zu den unmittelbaren Fragen der Umsetzung des Artikels 65 der Richtlinie 2013/59/Euratom und der Forderung, bei der Genehmigung von Ableitungen den langfristigen Schutz der menschlichen Gesundheit zu gewährleisten und dabei international anerkannte wissenschaftliche Empfehlungen zu berücksichtigen, hat sich die SSK in ihrer Empfehlung vom 13. Dezember 2013 (SSK 2013) geäußert. Sie betonte dabei, dass sie in der Formulierung des Artikels 65 eine Forderung sieht, auch nicht menschliche Arten vor schädlichen Wirkungen ionisierender Strahlung zu schützen. Sie empfahl, zur Umsetzung dieser Forderung die Veröffentlichung 108 der ICRP (ICRP 2008) zugrunde zu legen. Unter Bezug auf eine Studie (Küppers et al. 2012) wies die SSK darauf hin, dass sie den Schutz von Tieren und Pflanzen als gewährleistet ansieht, wenn bei Ableitungen von Radionukliden mit der Fortluft und dem Abwasser aus Tätigkeiten die Dosisgrenzwerte für die Referenzperson eingehalten sind und wenn zum Nachweis ihrer Einhaltung die AVV zu § 47 StrlSchV (BMU 2012a) angewendet wurde. Ein Screening im Einzelfall sei für derartige

Fälle nicht erforderlich. Auch zusätzliche generische Begrenzungen von Ableitungen oder die Festlegung von Aktivitätshöchstwerten von Radionukliden in Umweltmedien zum Schutz von Tieren und Pflanzen waren nach Auffassung der SSK nicht erforderlich. Bei der Beurteilung von Expositionssituationen durch natürlich vorkommende Radionuklide sah die SSK allerdings noch weiteren Klärungsbedarf.

Mit der vorliegenden, weiter gefassten Empfehlung zu Fragen des Schutzes der Umwelt im Strahlenschutz knüpft die SSK an ihre früheren Aussagen an (darunter auch SSK 1996, SSK 2003a), sieht aber ihre Empfehlungen vom 06. Juli 2012 (SSK 2012) und 13. Dezember 2013 (SSK 2013) durch die vorliegende Empfehlung als ersetzt an.

2 Begriff Umwelt

Umwelt: Unter dem Begriff Umwelt wird in Deutschland das auf ein konkretes Gebiet bezogene Gesamtsystem von Menschen, Naturhaushalt und Landschaft, Kulturgütern und sonstigen Sachgütern sowie das Wirkungsgefüge zwischen diesen Schutzgütern verstanden.

Naturgüter: Wasser, Boden, Luft, Klima, Tiere und Pflanzen sowie das Wirkungsgefüge zwischen ihnen (BNatSchG 2009, § 7).

Naturhaushalt: Der Naturhaushalt ist Teil des Gesamtsystems Umwelt und umfasst die Naturgüter.

Umweltmedien: Unter Umweltmedien werden hier Wasser, Boden und Luft verstanden. Diese können durch radioaktive Kontamination mittelbar zu schädlichen Wirkungen auf lebende Organismen beitragen und darüber hinaus auch in ihren ökologischen und ökonomischen Funktionen beeinträchtigt werden.

Schutzgüter: Die SSK sieht Menschen, Tiere, Pflanzen und andere lebende Organismen sowie Wasser, Boden und Luft als zu berücksichtigende Schutzgüter für den Strahlenschutz an. Schutzgüter gemäß § 2 UVPG (2010) sind Menschen, einschließlich der menschlichen Gesundheit, Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt, Wasser, Boden, Luft, Klima und Landschaft, Kulturgüter und sonstige Sachgüter sowie die Wechselwirkung zwischen den vorgenannten Schutzgütern.

Nicht menschliche Arten: Für Pflanzen, Tiere und andere lebende Organismen wird der Begriff „nicht menschliche Arten“ synonym zu den Begriffen „belebte Natur“ sowie „Biota“ verwendet.

3 Anwendungsbereich

Die vorliegende Empfehlung soll herangezogen werden, wenn die Einhaltung der derzeit im Strahlenschutzrecht deklaratorisch formulierten Anforderungen an den Schutz der Umwelt im Strahlenschutz beurteilt werden muss.

Schnittstellen von Umweltschutz und Strahlenschutz resultieren u. a. aus der Verpflichtung, für bestimmte Vorhaben oder Pläne Umweltbewertungen als Grundlage einer Entscheidungsfindung vorzunehmen. In solchen Fällen geplanter Expositionssituationen können auf der Grundlage dieser Empfehlung Beurteilungen vorgenommen werden.

Rechtliche Verpflichtungen zur Umweltbewertung bestehen für bestimmte öffentliche und private Vorhaben sowie bei bestimmten Plänen und Programmen in Form von Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP) und Strategischen Umweltprüfungen (SUP) (s. UVPG,

Teil 1). Sowohl die UVP als auch die SUP sind ein unselbständiger Teil verwaltungsbehördlicher Verfahren. Die UVP dient der Entscheidung über die Zulässigkeit von Vorhaben. Eine SUP ist bei der Aufstellung von Plänen und Programmen durchzuführen, die von einer Behörde, einer Regierung oder im Wege eines Gesetzgebungsverfahrens vorgenommen werden (§ 2(4) UVPG). Beide Prüfungen umfassen die Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen eines Vorhabens auf Menschen, einschließlich der menschlichen Gesundheit, auf Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt, auf Wasser, Boden, Luft, Klima und Landschaft, Kulturgüter und sonstige Sachgüter sowie auf die Wechselwirkung zwischen den vorgenannten Schutzgütern.

UVP-pflichtige Vorhaben, bei denen Auswirkungen radioaktiver Stoffe oder ionisierender Strahlung auf die Umwelt nicht ausgeschlossen werden können, sind neben den in Anlage 1 Nr. 11.1 UVPG genannten Anlagen zur Erzeugung, Bearbeitung, Verarbeitung oder zur Spaltung von Kernbrennstoffen oder zur Aufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe auch folgende in Anlage 1 UVPG genannte Vorhaben:

- Errichtung und Betrieb von Anlagen zur Sicherstellung oder zur Endlagerung radioaktiver Abfälle (Nr. 11.2) sowie anderer Anlagen zur Bearbeitung oder Verarbeitung von Kernbrennstoffen, hochradioaktiven Abfällen (Nr. 11.3) oder anderer Einrichtungen zur Lagerung, Bearbeitung oder Verarbeitung radioaktiver Abfälle nach Nr. 11.4,
- Errichtung und Betrieb von Sinteranlagen (Nr. 3.1), Hüttenwerken (Nr. 3.2) und Mineralölraffinerien (Nr. 4.3), da in diesen Anlagen überwachungsbedürftige Rückstände nach Anlage XII Teil A StrlSchV anfallen können,
- Errichtung und Betrieb von Anlagen zur Verwertung und Beseitigung von Abfällen und sonstigen Stoffen (Nr. 8) sowie Abfalldeponien (Nr. 12), da in diesen Anlagen freigegebene radioaktive Stoffe, entlassene Rückstände oder sonstige strahlenschutzrechtlich überwachte Materialien mit natürlich vorkommenden Radionukliden behandelt, verwertet oder beseitigt werden können,
- Errichtung und Betrieb von Anlagen zur Lagerung von Eisen- und Nichteisenmetallschrott (Nr. 8.7.1, wobei die UVP-Pflicht nach entsprechender Vorprüfung auch entfallen kann), da diese Anlagen durch herrenlose Strahlenquellen gefährdet sind und in Zukunft die Anforderungen von Kapitel IX Abschnitt 3 der Richtlinie 2013/59/Euratom zu beachten sind,
- bergbauliche Vorhaben, die zu erheblichen Umweltauswirkungen führen können (UVP-V-Bergbau 1990).

Auch ohne explizite gesetzliche Verpflichtung werden im Zusammenhang mit Zulassungsverfahren auf der Basis der Fachgesetze (insbesondere Wasser- und Immissionsschutzrecht) umweltbezogene Auswirkungen eines Vorhabens untersucht und bewertet.

Im Hinblick auf umweltbezogene Auswirkungen eines Vorhabens gibt nach Ansicht der SSK der Artikel 65 der Richtlinie 2013/59/Euratom einen Handlungsrahmen vor. Ergänzend zu den Anforderungen an den Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung fordert Artikel 65 die Mitgliedsstaaten auf, bei zugelassenen Tätigkeiten die Einhaltung von Umweltkriterien im Hinblick auf den langfristigen Gesundheitsschutz des Menschen zu demonstrieren. Die SSK sieht in dieser Formulierung die Forderung, auch nicht menschliche Arten vor schädlichen Wirkungen ionisierender Strahlung zu schützen. In Verbindung mit Artikel 7 der Richtlinie 2013/59/Euratom sieht die SSK den Anwendungsbereich dieser Empfehlungen grundsätzlich auch in Notfall-Expositionssituationen und in bestehenden Expositionssituationen.

Die vorliegenden Empfehlungen beschreiben die im Hinblick auf Radioaktivität und ionisierende Strahlung anzuwendenden Maßstäbe und Methoden. Die Begrenzung von Strahlenexpositionen von Einzelpersonen der Bevölkerung als Folge von potenziellen Kontaminationen der Umweltmedien durch derartige Vorhaben ist Teil des derzeitigen Strahlenschutzsystems. Da bei UVP- und SUP-Verfahren allerdings Auswirkungen auf alle Schutzgüter systematisch zu behandeln sind, bedarf es einer Klärung, wie die nach Maßgabe von Fachgesetzen zu prüfende Schutzbedürftigkeit von Schutzgütern im Hinblick auf Radioaktivität und ionisierende Strahlung festgestellt werden kann. Dazu gehört auch die Abgrenzung der natürlichen und zivilisatorischen Vorbelastungen von solchen Umweltkontaminationen, die bei der Ermittlung der Summe der Expositionen aus allen zugelassenen Tätigkeiten gemäß Artikel 66 der Richtlinie 2013/59/Euratom zu berücksichtigen sind (SSK 2015).

Weiterhin sieht die SSK folgende Sachgründe für eine Anwendung ihrer Empfehlung:

- Bei der Nutzung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung in Wissenschaft, Medizin und Technik zum Wohle des Menschen kann eine Ableitung von radioaktiven Stoffen in die Umwelt und eine daraus resultierende Kontamination der Umweltmedien nicht ausgeschlossen werden. Das gestiegene Umweltbewusstsein und auch internationale Verpflichtungen der Bundesrepublik erfordern es, in nachvollziehbarer Weise den Nachweis zu führen, dass nicht nur die menschliche Gesundheit hinreichend geschützt ist, sondern dass auch den Belangen des Umweltschutzes als Ganzes Rechnung getragen wird. Um diesen Nachweis führen zu können, bedarf es der Anwendung geeigneter Maßstäbe zum Schutz der Umwelt im Strahlenschutz.
- Soweit andere Anwendungen von Radionukliden oder ionisierender Strahlung zu Emissionen in die Umwelt führen können, erfordert deren Planung und Zulassung eine fundierte Bewertung ihrer Auswirkungen auf die Umwelt, um ggf. geeignete Schutz- und Vorsorgemaßnahmen ergreifen zu können.
- Der im Umweltrecht seit langem etablierte Schutz der Umweltmedien Wasser, Boden und Luft enthält vor allem im Bodenschutz und wasserrechtlichen Regelwerk Berührungspunkte zur Radioaktivität, die nach Meinung der SSK einer Klarstellung bedürfen.
- Die seit 2010 in das Umweltrecht eingeführte Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen (EU 2010) setzt einen Handlungsrahmen im Hinblick auf ein integriertes Konzept für die Vermeidung und Verminderung von Emissionen in Wasser, Boden und Luft und für die Abfallwirtschaft. Die Industrieemissionsrichtlinie nimmt zwar radioaktive Stoffe explizit aus dem Regelungsbereich aus, da sie aber auch für Anlagen gilt, bei denen Radioaktivität als ein spezieller Aspekt der Umweltauswirkungen auftritt (insbesondere NORM-Industrien), sind die in dieser Richtlinie formulierten allgemeinen Prinzipien auch eine Orientierung für den Schutz der Umwelt im Strahlenschutz bei der Planung von entsprechenden technischen Anlagen.
- Auch bei bestehenden Expositionssituationen infolge radioaktiver Hinterlassenschaften des Bergbaus oder von NORM-Industrien und bei der Planung von Interventionsmaßnahmen sollten Aspekte des Schutzes der Umwelt, wie sie in dieser Empfehlung dargestellt sind, berücksichtigt werden.
- Im Falle von Notfall-Expositionssituationen, wie z. B. nach den Reaktorunfällen in Tschernobyl und Fukushima, können erhebliche langzeitliche Umweltauswirkungen auftreten. Nach Auffassung der SSK sollten bei der Auswahl und Begründung adäquater

Maßnahmen in solchen Expositionssituationen auch Aspekte des Schutzes der Umwelt als Teil von strahlenschutzfachlichen Erwägungen beachtet werden.

In dieser Empfehlung der SSK nicht berücksichtigte Anwendungsbereiche sind:

- Die im Strahlenschutz bereits ausgearbeiteten Regelungen zum Schutz der Bevölkerung vor schädlichen Wirkungen ionisierender Strahlung,
- Umweltschutzaspekte von atomrechtlich oder strahlenschutzrechtlich genehmigten Anlagen oder strahlenschutzrechtlich überwachten Prozessen, die nicht im Zusammenhang mit ionisierender Strahlung oder solcher Strahlung aussendenden Radionukliden stehen, wie z. B. Lärm, Verkehr oder Landschaftsveränderungen,
- Wirkungen nichtionisierender Strahlung (NIR), wie z. B. elektromagnetische Felder, UV-Strahlung etc., auf die Umwelt,
- radiologische Folgen von nicht kontrollierbaren natürlichen Veränderungen im Naturhaushalt (z. B. Vulkanausbrüche, Radon bei Erdbeben).

Die vorliegende Empfehlung ist nicht auf Strahlenschutzbereiche im Sinne des § 36 StrlSchV anzuwenden, da solche Bereiche dem arbeitsplatzbezogenen Strahlenschutz zuzuordnen sind. Weitere Abgrenzungen, die sich z. B. am Betriebsgelände orientieren, können vorgenommen werden.

4 Ziele und Prinzipien zum Schutz der Umwelt

4.1 Schutz der menschlichen Gesundheit im Strahlenschutz

In seiner inhaltlichen Ausgestaltung war der umweltbezogene Strahlenschutz bisher auf den Schutz der menschlichen Gesundheit fokussiert. Dabei fungierte die Umwelt als „Transfermedium“ zwischen den durch menschliches Handeln erzeugten Quellen der Radioaktivität und dem Menschen als Rezeptor. Die Schutzstrategien im Strahlenschutz sind gegenwärtig meistens quellenbezogen oder im beruflichen Strahlenschutz am Menschen selbst orientiert.

Die StrlSchV definiert derzeit in ihrem § 1 den Zweck, Mensch und Umwelt vor möglichen schädlichen Wirkungen vor ionisierender und nichtionisierender Strahlung zu schützen und eine sichere Nutzung der Strahlung im Rahmen menschlicher Tätigkeiten zu gewährleisten. Von diesem Zweck ausgehend regelt die StrlSchV die Grundsätze und Anforderungen für Vorsorge- und Schutzmaßnahmen bei der Anwendung und Nutzung radioaktiver Stoffe.

Als schädliche Wirkungen ionisierender Strahlung sind die bei hoher Dosis auftretenden deterministischen Strahlenschäden zu vermeiden und die bei niedriger Dosis möglichen stochastischen Strahlenschäden zu begrenzen. Im Zusammenhang mit einer Kontamination von Umweltmedien sind als schädliche Wirkungen radioaktiver Stoffe vor allem krebsauslösende und erbgutverändernde Effekte zu beachten.

Die grundlegenden Prinzipien, die den Regelungen der StrlSchV zugrunde liegen, entsprechen international anerkannten Standards (IAEA, ICRP) und haben sich bewährt. Mit der ICRP-Veröffentlichung 103 (ICRP 2007) und der Richtlinie 2013/59/Euratom (Euratom 2014) wurde bekräftigt, dass die drei Grundprinzipien des Strahlenschutzes

- *Rechtfertigung*: Jede Entscheidung, die die Höhe der Strahlenexposition verändert, soll mehr nutzen als schaden.

- *Optimierung*: Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Exposition auftritt, die Zahl der exponierten Personen und die Höhe der individuellen Dosis sollen so niedrig gehalten werden, wie es unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Faktoren vernünftiger Weise erreichbar ist.
- *Begrenzung*: Die Personendosis aus überwachten Quellen bei geplanten Expositionssituationen, außer medizinischen Expositionen, soll die vorgegebenen Grenzwerte nicht überschreiten.

nach wie vor als Handlungsgrundlage für die Implementierung von Schutzstrategien, die insbesondere auf den Schutz der Gesundheit des Menschen gerichtet sind, dienen.

Die praktische Umsetzung dieser Grundprinzipien im Strahlenschutz basiert auf dem Konzept einer linearen Dosis-Wirkungsbeziehung für stochastische Strahlenwirkungen bis hinab zu kleinen Dosiswerten (LNT-Hypothese). Als zugänglich für Maßnahmen im Strahlenschutz werden dabei in der Regel nur solche Strahlenexpositionen angesehen, die zusätzlich zu den natürlichen Expositionen aus kontrollierbaren Strahlenquellen stammen oder die aus Expositionssituationen resultieren, die durch menschliche Aktivitäten herbeigeführt wurden (z. B. Exposition durch Höhenstrahlung in der Luftfahrt).

Die im Strahlenschutzsystem festgelegten Grenzwerte für Einzelpersonen der Bevölkerung charakterisieren quellenbezogene Expositionen, die nach dem Risiko-Akzeptanz-Konzept für chemisch-toxische Stoffe (TRGS 910) als tolerable Expositionen verstanden werden können. Eine einheitliche Schwellendosis für allgemein akzeptable Strahlenexpositionen durch künstliche und natürlich vorkommende Radionuklide (Abgrenzung eines Akzeptanzbereiches im Sinne von TRGS 910, ist im Strahlenschutz nicht etabliert.

Soweit durch frühere Handlungen oder Störfälle erhebliche radioaktive Kontaminationen von Umweltmedien entstanden, verlangt bereits der Strahlenschutz geeignete und angemessene Interventionsmaßnahmen.

4.2 Ziele und Prinzipien im Umweltschutz

Die Zielstellungen und Prinzipien des Umweltschutzes in Deutschland entwickelten sich in den letzten Jahrzehnten aus den Konflikten von Nutzungs- und Bewahrungsansprüchen, wobei Funktionen und Wechselwirkungen einzelner Teilsysteme des Naturhaushalts als unabhängig von menschlichen Tätigkeiten existierende Systeme hier stärker als bisher im Strahlenschutz Berücksichtigung fanden.

Mit der Einführung von Artikel 20a in das Grundgesetz der Bundesrepublik Deutschland wurde 1994 die Verantwortung des Staates für die künftigen Generationen und davon ausgehend der Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen und der Tiere als Staatsziel erklärt.

Die historisch gewachsene Zielsetzung des Schutzes der Umwelt ist auf die Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlage aller Lebewesen (einschließlich des Menschen) mit einem funktionierenden Naturhaushalt fokussiert. Der Umweltschutz bezweckt zum Schutz heutiger und künftiger Generationen, Gefahren für Mensch oder Umwelt infolge von nachteiligen Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten abzuwehren sowie darüber hinaus erhebliche Nachteile bei der Nutzung von Sachgütern und ggf. erhebliche Belästigungen von Personen zu vermeiden sowie Risiken für Mensch oder Umwelt durch vorsorgendes Handeln soweit wie möglich zu vermeiden oder zu vermindern.

Als Einflussfaktoren auf die Umwelt werden nicht nur schädliche Wirkungen von Stoffen, sondern auch nichtstoffliche Wirkungen, wie z. B. Veränderungen des Landschaftsbildes, Wirkungen von Lärm oder lokale Klimaeinflüsse durch Änderungen landschaftlicher

Strukturen, einbezogen. Damit ist der Umweltschutz von seinen Zielstellungen deutlich weiter gefasst als der Strahlenschutz.

Da ionisierende Strahlung und ihre schädliche Wirkung in der Umwelt in den meisten Fällen an Radionuklide als stoffliche Träger dieser Eigenschaft gebunden ist, ist Strahlenschutz im Gesamtsystem des Umweltschutzes mit dem auf stoffliche Wirkungen bezogenen Umweltschutz vergleichbar. Durch die historisch gewachsene besondere Rolle des Atomrechtes und des darauf basierenden Strahlenschutzes sind in den fachgesetzlichen Regelungen zum Schutz der Umweltmedien (BBodSchG 1998, WHG 2009, BImSchG 2013) und anderen umweltbezogenen Fachgesetzen (z. B. KrWG 2012) radioaktive Stoffe im Sinne des Atomgesetzes (AtG) explizit ausgenommen. Daher sieht die SSK die Notwendigkeit, Strahlenschutzaspekte zum Schutz der Umwelt als Gegenstand des Strahlenschutzes zu betrachten.

In den Leitlinien zur Umweltvorsorge durch Vermeidung und stufenweise Verminderung von Schadstoffen hat die Bundesregierung bereits 1986 eine Hierarchie von Schutzzielen definiert (BMU 1986). Auch wenn Pflanzen, Tiere und Ökosysteme sowie die Umweltmedien Wasser, Boden und Luft aufgrund ihres eigenen Wertes gesetzlich geschützt werden, ist diese Hierarchie nötig, um in Notfällen oder bei historisch entstandenen Situationen Handlungsoptionen abzuwägen. Bezogen auf die Schutzgüter ergibt sich damit folgende Hierarchie:

Schutzgut 1: *Leben und Gesundheit des Menschen*

Die Bewahrung dieser Güter wird als oberstes Schutzziel definiert. Sie sollen in der Gegenwart und in Zukunft vor Schäden, insbesondere durch Stoffeinträge in die Umwelt, bewahrt werden.

Schutzgut 2: *Tiere, Pflanzen, Ökosysteme*

Da die Existenz des Menschen über Nahrungsketten und Stoffkreisläufe unabdingbar mit den Lebensgemeinschaften der Tiere und Pflanzen verknüpft ist, hat die Umweltpolitik den Schutz der Ökosysteme in ihrer Ganzheit wie auch den Schutz und die Erhaltung der einzelnen Arten von Tieren und Pflanzen zum Ziel. Sie schützt Tiere, Pflanzen und Ökosysteme aber auch um ihrer selbst willen.

Schutzgut 3: *Wasser, Boden, Luft, Klima*

Verunreinigungen nutzbarer Umweltgüter stellen eine Form des Ressourcenverbrauchs dar. Die Umweltpolitik verfolgt daher das Ziel, die natürlichen Ressourcen Wasser, Boden und Luft zu schützen und nachteilige Veränderungen des Klimas zu vermeiden.

Schutzgut 4: *Sachgüter*

Umweltschutz ist auch auf Sachgüter zu erstrecken. Die Bundesregierung versteht ihre Umweltpolitik als einen unmittelbaren Beitrag auch zum Schutz des Eigentums, zur Senkung volkswirtschaftlicher Kosten und zur Erhaltung des kulturellen Erbes. Der Aspekt Sachgüter wurde bereits 1990 im UVPG um den Term Kulturgüter erweitert.

Als Handlungsprinzipien legte die Bundesregierung in ihren Leitlinien ein dreistufiges Konzept vor, das der Abwehr konkreter Umweltgefahren („Gefahrenabwehr“), der Vermeidung oder Verminderung von Risiken („Risikovorsorge“) und der vorausschauenden Gestaltung der zukünftigen Umwelt, insbesondere dem Schutz und der Entwicklung der natürlichen Lebensgrundlagen („Zukunftsvorsorge“), dient. Sie wies schon 1986 darauf hin, dass diese

Bereiche der Umweltvorsorge sich nicht immer eindeutig voneinander abgrenzen lassen. Das in diesen Leitlinien dargestellte Konzept liegt bis in die Gegenwart dem stoffbezogenen Umweltschutz zugrunde.

In Umsetzung dieser Leitlinien wurden unterschiedlich ausgerichtete Regelungen entwickelt und eingeführt. Neben Regelungen, die den Schutz der Umweltgüter bei Planungen sicherstellen sollen (BauGB 2004, EG 2008, ROG 2008, UVPG 2010), dienen andere Regelungen (ChemG 1980, GenTG 1993, KrWG 2012) der Vermeidung von Risiken für die Umwelt, die aus technischen Prozessen resultieren können. Daneben werden Anforderungen an den Schutz der Umweltmedien Wasser, Boden und Luft durch entsprechende Gesetze (WHG, BBodSchG, BImSchG) definiert. Unmittelbar auf den Schutz nicht menschlicher Arten ausgerichtet ist das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG).

In der Ausarbeitung des Umweltschutzes hat sich in den sektoralen Regelungen zum Schutz von Wasser (WHG), Boden (BBodSchG), Luft (BImSchG) sowie nicht menschlicher Arten (BNatSchG) eine Betrachtungsweise etabliert, die den eigenständigen Wert dieser Schutzgüter betont und in den Mittelpunkt von Handlungsaufforderungen stellt. Diese Betrachtungsweise unterscheidet sich grundlegend vom bisherigen Strahlenschutz, der die Umweltmedien Wasser, Boden und Luft vor allem als Transferpfade von Radionukliden im Zusammenhang mit dem Schutz des Menschen betrachtet.

Für den Schutz von Wasser und Boden vor anthropogenen Kontaminationen wurde seit den 1990er Jahren ein abgestuftes Bewertungssystem entwickelt, das zum einen räumlich begrenzte, geringfügige Kontaminationen nach Maßstäben einer Risikovorsorge akzeptiert, zum anderen in der Lage ist, nachteiligen Veränderungen vorzubeugen und schädliche Veränderungen nach Maßstäben der Gefahrenabwehr festzulegen (vgl. Zeddel et al. 2016).

Die Ziele der EU-Umweltpolitik wurden 2009 im Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union (AEUV) festgeschrieben (AEUV 2009) und stimmen vom Grundsatz her mit den Leitlinien der deutschen Umweltpolitik überein. Gemäß Artikel 191 AEUV stehen folgende Ziele im Mittelpunkt:

- Erhaltung und Schutz der Umwelt sowie Verbesserung ihrer Qualität,
- Schutz der menschlichen Gesundheit,
- Umsichtige und rationelle Verwendung der natürlichen Ressourcen,
- Förderung von Maßnahmen auf internationaler Ebene zur Bewältigung regionaler oder globaler Umweltprobleme und insbesondere zur Bekämpfung des Klimawandels.

Die EU-Umweltpolitik zielt unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Gegebenheiten auf ein hohes Schutzniveau ab. Sie beruht auf den Grundsätzen der Vorsorge und Vorbeugung, auf dem Grundsatz, Umweltbeeinträchtigungen mit Vorrang an ihrem Ursprung zu bekämpfen, sowie auf dem Verursacherprinzip (AEUV, Artikel 191).

Zusätzlich zu den Zielen sind in der EU-Umweltpolitik einige Prinzipien verankert, nach denen gesetzliche umweltpolitische Maßnahmen zu ergreifen sind. Diese befinden sich im Einklang mit den Leitbildern des deutschen Umweltrechts, die auf unterschiedliche Weise in den umweltrechtlichen Gesetzen verankert sind:

- *Das Vorsorgeprinzip:*
  Umweltbelastungen und -gefahren sind durch frühzeitiges und vorausschauendes Handeln von vornherein auszuschließen oder zu minimieren.
  (vgl. z. B. Artikel 191 AEUV, § 1 UVPG)

- *Das Vermeidungsprinzip:*
  Es beinhaltet eine vorbeugende Handlungsweise in Bezug auf Umweltbelange. Es sollen Maßnahmen, die Umweltschäden vermeiden, gegenüber Maßnahmen zur Wiederherstellung der bereits geschädigten Umwelt bevorzugt werden.
  (vgl. Artikel 191 AEUV)
- *Das Ursprungsprinzip:*
  Umweltbeeinträchtigungen sind an ihrem Ursprung zu bekämpfen.
  (vgl. Artikel 191 AEUV)
- *Das Verursacherprinzip:*
  Der Verursacher ist für Umweltbelastungen verantwortlich. Er trägt die Kosten für Vermeidung, Beseitigung oder Ausgleich.
  (vgl. z. B. Artikel 191 AEUV, § 15 BNatSchG)
- *Das Kooperationsprinzip:*
  Realisierung von Umweltschutz durch Zusammenarbeit des Staates mit Wirtschaft und Gesellschaft und Verzicht auf einseitiges hoheitliches Handeln. Beteiligung von gesellschaftlichen Organisationen an Entscheidungsprozessen.
  (vgl. z. B. § 63 BNatSchG, § 68 KrWG, § 51 BImSchG)
- *Das Integrationsprinzip:*
  Erfordernisse des Umweltschutzes müssen bei der Festlegung und Durchführung politischer Entscheidungen und Maßnahmen, auch solcher, die an sich außerhalb des Umweltschutzes angesiedelt sind, einbezogen werden.
  (vgl. Artikel 11 AEUV)

Das im Rahmen politischer Zielsetzungen häufig genannte Konzept der Nachhaltigkeit ist ein gesamtgesellschaftlicher Ansatz, der neben einer umweltbezogenen (ökologischen) Komponente auch soziale und ökonomische Aspekte einbezieht. Im Hinblick auf die Umwelt enthält dieses Konzept die Zielbestimmung einer dauerhaft umweltverträglichen, d. h. die natürlichen Lebensgrundlagen erhaltenden Entwicklung. Der Nachhaltigkeitsgedanke schließt auch den Leitgedanken der Generationengerechtigkeit ein, der vor allem im Zusammenhang mit der Endlagerung von großer Bedeutung ist.

Da gesellschaftliche Entwicklung nicht nur auf Vermeidung möglicherweise schädlicher Veränderung ausgerichtet werden kann, darf Nachhaltigkeit nicht auf das Vorsorgeprinzip reduziert werden (siehe Kapitel 8), sondern muss einen Handlungsrahmen abstecken, der unter Beachtung ökonomischer und sozialer Aspekte akzeptable Veränderungen zulässt.

Auch wenn sie nicht explizit im Strahlenschutz benannt werden, sind wesentliche der oben dargestellten Prinzipien der Umweltpolitik im Strahlenschutz bereits berücksichtigt. So sind das Prinzip eines hohen Schutzniveaus, das Ursprungs- und Verursacherprinzip Bestandteil des Strahlenschutzrechts. Darüber hinaus finden sich in § 6 StrlSchV sowie in den Regelungen zu radioaktiven Ableitungen (§§ 47, 48 StrlSchV) klare Bezüge zum Vorsorgeprinzip. Die Grenzwertsetzungen und die Limitierung von Strahlenexpositionen für die Freigabe von Abfällen (§ 29 StrlSchV) bzw. Entlassung von Rückständen (§ 98 StrlSchV) basieren auf dem Vorsorgegedanken.

Durch die UVP-Pflicht im Rahmen des Atomrechtes wird das Integrationsprinzip in strahlenschutzrelevanten Vorhaben beachtet.

Bei der praktischen Umsetzung der Schutzziele im Zusammenhang mit Kontaminationen von Umweltmedien hat sich ein Vorgehen bewährt, bei dem Schwellenwerte, die nach human- und/oder ökotoxikologischen Kriterien abgeleitet wurden, als Maßstab für geringfügige

Kontaminationen rechtlich verankert werden, Festlegungen für die Erheblichkeit von Kontaminationen im Sinne einer Gefahrenabwehr aber nicht formal getroffen werden, sondern im Einzelfall zu prüfen und zu entscheiden sind. Insbesondere bei der Entscheidung über Sanierungsmaßnahmen sind neben dem stoffbezogenen Gesundheitsrisiko auch Aspekte der technischen Machbarkeit und des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes zu berücksichtigen.

Die SSK sieht wichtige Ziele eines Schutzes der menschlichen Gesundheit als Teil des Schutzes der Umwelt im Strahlenschutz bereits berücksichtigt:

- Zentraler Zweck des Strahlenschutzes ist der Schutz der menschlichen Gesundheit heutiger Generationen bei allen menschlichen Handlungen, die im Zusammenhang mit der Nutzung oder Handhabung von Strahlenquellen stehen, aber auch der Schutz der Bevölkerung bei Freisetzungen von Radionukliden oder Strahlung in die Umwelt. Dieser Zweck wird erreicht, indem durch Rechtfertigung, Optimierung und Begrenzung von Strahlenexpositionen des Menschen bei geplanten Expositionssituationen Strahlenrisiken vermieden bzw. auf ein akzeptables Maß begrenzt werden.
- Das vor allem im Zusammenhang mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle und der Endlagerung relevante Prinzip der Generationengerechtigkeit (Gleichheitsprinzip) soll sicherstellen, dass künftige Generationen nach denselben Maßstäben geschützt sind wie derzeitige.
- Durch Interventionen bei bestehenden Expositionssituationen aus zeitlich zurückliegenden menschlichen Aktivitäten oder durch Maßnahmen bei Notfall-Expositionssituationen ist es vorgesehen, erhebliche Risiken für den Menschen abzuwehren bzw. auf ein akzeptables Niveau zu reduzieren.[4]

4.3 Erweiterung der Schutzziele zur Integration des Schutzes der Umwelt in den Strahlenschutz

Anknüpfend an ihre Empfehlung aus dem Jahr 2003 (SSK 2003a) und die im Kapitel 3 dargestellten Grundlagen zu den Anwendungsbereichen dieser Empfehlungen sieht die SSK es als sinnvoll an, die im Zusammenhang mit dem Schutz der Umwelt für den Strahlenschutz relevanten Aspekte in einer auf den in Deutschland etablierten Begriffen und Grundkonzepten des Umweltschutzes beruhenden Form auszuarbeiten.

Da unmittelbare schädliche Wirkungen ionisierender Strahlung außer beim Menschen auch bei nicht menschlichen Arten vorkommen können, ist es erforderlich, Expositionen abzugrenzen, bei denen nicht menschliche Arten hinreichend geschützt sind. Nach Ansicht der SSK ist der Schutz von Populationen vor schädlichen Wirkungen ionisierender Strahlung ein hinreichender Ansatz, um das Erreichen des Schutzzieles für nicht menschliche Arten zu gewährleisten.

Neben dem unmittelbaren Schutz vor schädlichen Wirkungen ionisierender Strahlung sind auch Auswirkungen radioaktiver Kontaminationen zu berücksichtigen, die die Nutzbarkeit von Sachgütern einschränken und zu erheblichen wirtschaftlichen Nachteilen führen können. Im Hinblick auf langfristige und großräumige Veränderungen der Umweltradioaktivität kann das Konzept der Nachhaltigkeit als Leitlinie bei der Ausgestaltung des Strahlenschutzes hilfreich sein.

[4] Es fehlen aber in Deutschland derzeit strahlenschutzrechtliche Regelungen für die Festlegung von Interventionsmaßnahmen bei bestehenden dauerhaften Expositionen (s. Gellermann et al. 2010).

Die SSK empfiehlt daher:

Empfehlung 1: **Die Ausgestaltung des Schutzes der Umwelt im Strahlenschutz sollte neben nicht menschlichen Arten und Ökosystemen auch die Umweltmedien Wasser, Boden, Luft und Sachgüter sowie den Aspekt der Nachhaltigkeit einbeziehen.**

Die in der Empfehlung 1 formulierte systematische Integration der Umwelt in den Strahlenschutz erfordert es nach Meinung der SSK nicht, dass für alle Schutzgüter eigenständige Regelungen im Strahlenschutzsystem zu treffen sind. Vielmehr kann, soweit es nach den in dieser Empfehlung formulierten Maßstäben begründbar ist, davon ausgegangen werden, dass für nicht menschliche Arten kein relevantes Risiko besteht, wenn ein Schutz der menschlichen Gesundheit nach den Maßstäben des Strahlenschutzes gewährleistet ist (vgl. ICRP 1991). Da allerdings ionisierende Strahlung durch Umweltkontaminationen sowohl auf die Umweltmedien Wasser, Boden und Luft als auch auf Sachgüter in der Regel keine unmittelbar schädlichen Wirkungen ausübt, bedarf es einer Klärung, auf welcher Basis diese Umweltschutzgüter im Rahmen des Strahlenschutzes zu beurteilen sind.

Aus diesen Gründen trifft die SSK zu folgenden Aspekten des Umweltschutzes Empfehlungen:

- Konzeptionelle Klärung, mit welchen Methoden schädliche Wirkungen ionisierender Strahlung auf nicht menschliche Arten im Hinblick darauf bemessen und bewertet werden können, dass die biologische Vielfalt sowie die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts einschließlich der Regenerationsfähigkeit und nachhaltigen Nutzungsfähigkeit nicht beeinträchtigt werden (vgl. § 1 BNatSchG).
  (*siehe Empfehlungen 2, 3*)
- Beschreibung der praktischen Anwendung der Grundprinzipien des Strahlenschutzes auf den Schutz von nicht menschlichen Arten bei unterschiedlichen Expositionssituationen.
  (siehe Empfehlungen 4 bis 8)
- Klarstellung der Anforderungen an den Schutz von Wasser, Boden und Luft hinsichtlich der Aspekte des Strahlenschutzes und der Anforderungen an die genannten Umweltmedien aus einer Sicht des sektoralen Umweltrechtes.
  (siehe Empfehlungen 9 bis 11)
- Berücksichtigung erheblicher Nachteile für den Einzelnen oder die Allgemeinheit durch radioaktive Kontamination von Sach- und Kulturgütern als Teil eines weiter gefassten Strahlenschutzes der Umwelt.
  (siehe Empfehlungen 12 bis 15)
- Konkretisierung des Prinzips der Nachhaltigkeit im Hinblick auf den Strahlenschutz.
  (siehe Empfehlungen 16 bis 20)

5 Strahlenschutz nicht menschlicher Arten

5.1 Strahleneffekte bei Individuen

Es ist seit langem bekannt, dass lebende Organismen gegenüber ionisierender Strahlung empfindlich sind. Schon relativ geringe Strahlendosen übertragen Energie auf Moleküle und rufen damit in lebenden Organismen Wirkungen auf physiologische und metabolische Abläufe hervor, welche den ganzen Organismus betreffende Veränderungen verursachen können. Diese Effekte können bei Pflanzen zu Wachstumsbeschleunigung, Zunahme des Ertrages,

Ernteverfrühung und bei höheren Strahlendosen zu deutlichen Schäden, wie Verkümmerung, Abnahme des Ertrags und der Blütenzahlen oder Abnahme der Widerstandsfähigkeit führen. Eine umfassende deutschsprachige Zusammenstellung empirischer Daten und der dazugehörigen Literatur zur Einwirkung von Strahlung auf Pflanzen erfolgte in (Fendrik und Bors 1991).

Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts erkannte man, dass Mutationen durch verschiedene äußere Faktoren ausgelöst werden können. In den 1930er Jahren kam die Mutationszüchtung auf, bei der man Pflanzensamen erhöhten Röntgen- oder Neutronenstrahlen aussetzt und anschließend bei den ausgewachsenen Pflanzen nach neuen, für die Züchtung interessanten Eigenschaften sucht. In den 1960er Jahren gründeten die Welternährungsorganisation (FAO) und die Internationale Atomenergiebehörde (IAEA) eine gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsabteilung, die Mutationszüchtung an Nutzpflanzen betreibt.

Nach dem 2. Weltkrieg, den in dieser Zeit einsetzenden Kernwaffentests und der Entwicklung einer friedlichen Nutzung der Kernenergie wurden umfangreiche Untersuchungen auch zu den Auswirkungen ionisierender Strahlung auf Pflanzen, Tiere und Ökosysteme durchgeführt. Eine für die Öffentlichkeit konzipierte Zusammenstellung wissenschaftlicher Untersuchungen aus den USA wurde von Hines publiziert (Hines 1966). Die in dieser Arbeit aufgeführten Befunde aus Untersuchungen an Orten von Kernwaffentests oder Umweltkontaminationen im Umfeld von Nuklearanlagen wurden weitgehend als Belege für die hohe Toleranz der dabei strahlenexponierten Arten interpretiert. Es wurden aber auch Laborversuche berichtet, die deutlich schädliche Wirkungen der Strahlung zeigten.

Bis in die Gegenwart sind Laboruntersuchungen ein Standardverfahren, um die Wirkung ionisierender Strahlung auf nicht menschliche Arten sowohl bei kurzeitiger (akuter) Exposition als auch bei chronischer Exposition zu untersuchen. Die Ergebnisse solcher Untersuchungen wurden sowohl im Projekt FASSET (s. Abschnitt 5.3) als auch von UNSCEAR (s. Abschnitt 5.3.4) zusammenfassend ausgewertet. Die Frage der Übertragbarkeit dieser Laborbefunde auf reale Ökosysteme ist ein seit langem bekanntes und wissenschaftlich diskutiertes Problem. Nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl wurde daher der Einfluss der erhöhten Radioaktivität auf Pflanzen und Tiere in den kontaminierten Regionen intensiv untersucht.

Die dabei erhaltenen Erkenntnisse stehen weitgehend in Einklang mit früheren Untersuchungen seit Mitte der 1970er Jahre über die Folgen von akuten und chronischen Expositionen für verschiedene Gruppen von Lebewesen. Bezugsgröße für die Bemessung der Strahlenexposition bei Lebewesen ist dabei die in Gray (Gy) gemessene Energiedosis. Eine Zusammenfassung von Befunden zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen aus dem Umfeld von Tschernobyl enthält der Review-Artikel (Geras'kin et al. 2008).

Deterministische Strahlenwirkungen auf Pflanzen

Die IAEA hat die Entwicklung des Zustandes von Nadelwäldern innerhalb der Sperrzone (30 km-Zone) des Kernkraftwerks Tschernobyl über den Zeitraum von 1986 bis 1994 in (IAEA 2001) detailliert ausgewertet und in einer Übersicht (siehe Tabelle 1) dargestellt.

Tab. 1: Die Entwicklung des Zustandes der Nadelwälder innerhalb der Sperrzone des Kernkraftwerks Tschernobyl über den Zeitraum von 1986 bis 1994 (IAEA 2001)

<table>
<tr><th>Ausmaß des Schadens, absorbierte Dosis im apikalen Meristem (Gy)</th><th>1986</th><th>1987</th><th>1988</th><th>1989-1990</th><th>1991-1994</th></tr>
<tr><td>Erkennbar
0,1-0,5</td><td>Auswirkungen auf das Wachstum</td><td colspan="4" rowspan="3">ERHOLUNG</td></tr>
<tr><td>Geringfügig
0,5-5</td><td>Einschränkung des Wachstums</td><td>Morphosen</td></tr>
<tr><td>Mäßig
5-10</td><td>Starke Unterdrückung des Wachstums, Morphosen, Absterben einzelner Bäume</td><td>Teilweise Erholung der Population, Morphosen, fehlende Blüte</td><td>Zunahme des Populations-wachstums, Morphosen</td></tr>
<tr><td>Stark
10-20</td><td>Fehlendes Populations-wachstum, Nadeln färben sich braun, Teile der Bäume sterben ab</td><td>Einzelne Bäume überleben, Absterben weiter Bereiche des Waldes</td><td>Zunahme des Wachstums der Populationen lebender Bäume, Wachstum von Laubbäumen, Morphosen, Entwicklung von Schädlingen</td><td>Populations-wachstum, Grasbewuchs, Zunahme des Blattabwurfs</td><td>Umstürzen abgestorbener Bäume, Ausbildung neuer Pflanzen-gemeinschaften</td></tr>
<tr><td>Vollständiges Absterben
> 20</td><td>Nadeln werden braun, Absterben der Pflanzen, Entwicklung von Schädlingen</td><td>Nadelverlust, Rinde schält sich ab, Schädlings-befall</td><td>Rinde schält sich, Wachstum und vegetative Fortpflanzung von Laub-bäumen und Gräsern sind zu beobachten</td><td>Umstürzen abgestorbener Bäume, Aus-bildung neuer Pflanzenge-meinschaften</td><td>Umstürzen abgestorbener Bäume, Ausbildung neuer Pflanzen-gemeinschaften</td></tr>
</table>

Deterministische Strahlenwirkungen auf Tiere

Unmittelbare Auswirkungen der Strahlung auf Tiere durch den Reaktorunfall in Tschernobyl konnten vor allem an Vieh beobachtet werden, das nicht aus der 30 km-Zone evakuiert worden war. Von einigen 100 in der Zone verbliebenen Kühen waren im Herbst 1986 einige Tiere verstorben, andere zeigten beispielsweise Schwächungen des Immun- sowie des Herz-Kreislauf-Systems.

Andere Strahlenwirkungen

Erste Berichte über genetische Veränderungen bei Nagetieren in der Umgebung von Tschernobyl (Baker et al. 1996) wurden von den Autoren später zurückgezogen (Baker et al. 1997, Chesser und Baker et al. 2006). Berichte über die Abnahme des Artenreichtums, der Häufigkeit und der Populationsdichte von Brutvögeln bei zunehmender Dosis oder ähnliche Beobachtungen bei Insekten und Spinnen sowie Raubvögeln (Møller und Mousseau 2007, 2008, 2009) sind wissenschaftlich umstritten.

Gesamtbewertung

Die Beobachtungsergebnisse aus dem Raum Tschernobyl haben dazu beigetragen, den Kenntnisstand zu den Strahlenwirkungen und Wirkungsschwellen bei Tieren und Pflanzen zu vertiefen. Es ist jedoch oft schwierig, beobachtete Veränderungen als unmittelbare Effekte der Strahlungseinwirkung zu identifizieren. So kam es bereits in der Folge der unmittelbaren Strahlenwirkungen im Ökosystem zu einer starken Entwicklung von Schädlingen. Durch den Unfall hat sich aber nicht nur das Niveau der Strahlung verändert. Auch andere Bedingungen, die wesentlichen Einfluss auf die Ökologie haben, sind neu. Der Mensch hat sich weitgehend aus der 30 km-Zone zurückgezogen, landwirtschaftliche Aktivitäten wurden eingestellt. Das Absterben von Wäldern wirkt sich auf das gesamte Ökosystem einschließlich des Wasserhaushalts aus, so dass die vielfältigen Zusammenhänge bei unterschiedlichen Spezies teils zu ungünstigeren und teils zu günstigeren Lebensbedingungen geführt und bestimmte Populationen zugenommen haben.

5.2 Strahleneffekte bei Populationen und Ökosystemen

Soweit sich die Ausgestaltung eines Schutzes der Umwelt im Strahlenschutz auf den Schutz nicht menschlicher Arten bezieht, ist das übergeordnete Schutzziel der Erhalt der biologischen Vielfalt und der Funktionalität der Ökosysteme. Durch den Strahlenschutz sind zu diesem Zweck solche Expositionen abzugrenzen, die zum einen nach Stand der Wissenschaft schädlichen Auswirkungen auf das Erreichen dieser Schutzziele zur Folge haben können und zum anderen solche, die nur geringfügige Auswirkungen auf das Erreichen dieser Schutzziele haben.

In Anbetracht der Komplexität von Ökosystemen ist es allerdings schwierig, den Einfluss der Strahlung auf Populationen aus der Beobachtung von Strahlungseffekten bei einzelnen Individuen in existierenden Umweltsituationen abzuleiten. In den letzten Jahren wurden intensiv Daten, die an Orten stattgefundener Notfall-Expositionssituationen mit lokal stark erhöhten Strahlenexpositionen (Reaktorunfälle Tschernobyl, Fukushima) erhoben wurden, dahingehend wissenschaftlich untersucht, ob sich biologische Effekte bzw. Risiken für nicht menschliche Arten, die die Populationen gefährden, zweifelsfrei nachweisen lassen (siehe z. B. Geras'kin et al. 2005, Geras'kin et al. 2008, Geras'kin et al. 2010, Garnier-Laplace et al. 2013, Fuller et al. 2015, IAEA 2015a).

In einer Auswertung von Publikationen wissenschaftlicher Untersuchungen im Umfeld von Fukushima schlussfolgert die IAEA (IAEA 2015a), dass Auswirkungen auf Populationen und Ökosysteme sowohl in terrestrischer als auch in mariner Umwelt nicht zu erwarten sind (IAEA 2015a, Section 4.5.4.3). Von UNSCEAR wird auf der weitgehend gleichen wissenschaftlichen Grundlage eine entsprechende Auswirkung nicht ausgeschlossen (s. Abschnitt 5.3.4). In diesen unterschiedlichen Bewertungen zeigt sich die noch erhebliche Unsicherheit im Hinblick auf die wissenschaftlichen Grundlagen zur Gefährdung von Populationen nicht menschlicher Arten und von Ökosystemen als Ganzes. Eine Ausweisung von Gefahrenschwellen der Dosis für nicht menschliche Arten und eine darauf basierende Festlegung von rechtlich einzuhaltenden Dosisschwellen („Grenzwerten") ist daher beim gegenwärtigen Stand der Kenntnisse nicht möglich.

Umgekehrt ist aber eine Abgrenzung von geringfügigen Expositionen, bei denen nach derzeitiger Kenntnis schädliche Auswirkungen ionisierender Strahlung auf Populationen auszuschließen oder zumindest hinreichend unwahrscheinlich sind, mit den vorhandenen Kenntnissen möglich.

Eine solche quantifizierende Abgrenzung von geringfügigen Auswirkungen nichtletaler Strahlungseffekte auf Populationen in einer Umwelt, die mit Radionukliden kontaminiert ist,

erfordert die Anwendung von Modellen, die die Mortalitäts-, Morbiditäts- oder Reproduktionsraten, die an ausgewählten Individuen meist unter Laborbedingungen bestimmt wurden, auf die Populationsebene überträgt. Eine mögliche Näherung sind Matrix-Populations-Modelle (Caswell 2001). Für die Vorhersage der Strahlenwirkung auf Populationen kann z. B. das Leslie-Matrix-Modell (Britton 2005, Alonzo et al. 2012) angewendet werden. Durch eine entsprechende Modellierung der Übertragung von Strahlungseffekten durch chronische Exposition von Individuen auf Populationsauswirkungen (Woodhead 2003, Alonzo et al. 2008, Monte 2013) konnte gezeigt werden, dass unter Zuhilfenahme von geeigneten Modellen die Auswirkung von radioaktiven Stoffen auf Populationen, wenn auch noch mit größeren Unsicherheiten, beschrieben werden kann.

5.3 Internationale Studien zur Erarbeitung eines Strahlenschutzkonzeptes zur Bewertung von Strahlenexpositionen nicht menschlicher Arten

In den vergangenen Jahrzehnten wurden neben den Arbeiten einzelner Forschungsgruppen zur Untersuchung von Strahlenexpositionen nicht menschlicher Arten einige große, international koordinierte Studien durchgeführt, die sich speziell mit der Entwicklung eines Konzeptes zur Bewertung solcher Strahlenexpositionen befassten. Entsprechend dem Beratungsauftrag wurden wesentliche Erkenntnisse und Ergebnisse der europäischen Studien FASSET (Framework for Assessment of Environmental Impact)[5], ERICA (Environmental Risk from Ionising Contaminants: Assessment and Management)[6], PROTECT (Protection of the Environment from Ionising Radiation in a Regulatory Context)[7] und STAR (Strategy for Allied Radioecology)[8] sowie von Arbeiten in den USA und der IAEA analysiert und werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

5.3.1 Europäische Forschungsprojekte

Von der Europäischen Union wurden in den letzten Jahren mehrere Forschungsvorhaben, die teilweise aufeinander aufbauen, initiiert (Projekte FASSET, ERICA, PROTECT, STAR). Ihre Ergebnisse haben hinsichtlich der spezifischen Problemstellung unter Berücksichtigung der international verfügbaren Informationen und Daten zu einem wesentlichen Fortschritt bei der Konzeptfindung zu einem Schutz der Umwelt im Strahlenschutz geführt. Die Ergebnisse von FASSET und ERICA wurden bereits von UNSCEAR mit ausgewertet (UN 2011) und gingen auch in ICRP-Empfehlungen (z. B. ICRP 2014) mit ein. Diese Forschungsprojekte erbrachten folgende wesentlichen Ergebnisse:

FASSET (2000-2003):

Als wesentliches Ergebnis entstand eine Datenbank (FRED), die alle beobachteten Effekte infolge einer chronischen Strahlenexposition nicht menschlicher Arten für verschiedene Kategorien der Endpunkte (Morbidität, Mortalität, reduzierte Reproduktion, Mutationen) zusammenfasste. Für terrestrische Ökosysteme wurden 579 Quellen und für Frischwasser-Ökosysteme 195 Quellen ausgewertet. Als eine grobe Verallgemeinerung der Datenanalyse kann die Feststellung gewertet werden, dass eine Dosisrate von 100 µGy/h als eine gewisse Schwelle für statistisch signifikante Effekte bei Individuen angesehen werden kann. Das stimmt grundsätzlich mit den Einschätzungen von UNSCEAR überein. Es wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass eine Reihe anderer Faktoren bei der Effektanalyse berücksichtigt werden muss. Es wurden Schlussfolgerungen hinsichtlich der Kategorisierung der verfügbaren Effekt-

[5] https://wiki.ceh.ac.uk/display/rpemain/FASSET
[6] https://wiki.ceh.ac.uk/display/rpemain/ERICA
[7] https://wiki.ceh.ac.uk/display/rpemain/PROTECT
[8] http://www.star-radioecology.org/

Daten, der Dosis-Wirkungsbeziehungen, des Einflusses der Strahlungsqualität, der Extrapolation zum Füllen von Datenlücken und des möglichen Einflusses anderer Umweltstressoren formuliert und Empfehlungen für zukünftige Arbeiten gegeben. Eine begrenzte Anzahl von Referenzorganismen wurde in diesem Projekt nicht vorgeschlagen.

ERICA (2004-2007):

Mit dem Projekt ERICA sollte ein integrierter Bewertungsansatz entwickelt werden, mit dem bei Entscheidungen zu umweltrelevanten Veränderungen der Exposition der Umwelt den Effekten und Risiken, die von ionisierender Strahlung ausgehen, ein entsprechendes Gewicht gegeben wird, um die Struktur und Funktionalität der Ökosysteme zu erhalten. Damit ging die Zielstellung über den Rahmen von FASSET weit hinaus. Die in Europa etablierten Konzepte des Umweltschutzes und der Ökotoxikologie rückten stärker in den Vordergrund. Die integrierte Herangehensweise umfasste die drei wesentlichen Elemente Management, Bewertung und Charakterisierung.

Zur Charakterisierung des Problems gehörten:

- Auswahl von Referenzorganismen,
- Definition von Screening-Werten für die Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft),
- Ableitung von Dosisraten als Screening-Werte,
- Bereitstellung einer entsprechenden Datenbank (FREDERICA[9]) und
- Detailanalyse und Bewertung der Daten.

Durch Referenzorganismen sollte eine Grundlage geschaffen werden, um Dosisraten für Lebewesen abzuschätzen, die repräsentativ für eine radioaktiv kontaminierte Umwelt (Wasser, Boden) sind. Ausgehend von solchen Dosisraten sollten Wahrscheinlichkeit und Grad schädlicher Effekte beurteilt werden. Dazu wurden im ERICA-Projekt 38 nicht menschliche Arten (13 aus terrestrischen Lebensräumen, 12 aus limnischen Lebensräumen und 13 aus marinen Lebensräumen) ausgewählt.

Für die Bewertung von radioaktiven Kontaminationen wurde ein stufenweises Vorgehen vorgeschlagen:

Stufe 1: Ein einfaches und konservatives Screening unter Verwendung eines einheitlichen Vergleichswertes für die Dosisrate von 10 µGy/h als Screening-Referenzwert für alle Ökosysteme und Organismen. Dieser Wert ist um eine Größenordnung geringer als die Dosisraten, bei denen infolge chronischer Expositionen Effekte zu erwarten sind. Dieser Screening-Wert wurde aus der Sensitivitätsanalyse der chronischen Expositionen der FREDERICA-Datenbank abgeleitet. (Die Datenbank FREDERICA enthält die Daten von 1945 bis 2005 und umfasst 29 400 Datensätze und 1 509 Literaturstellen.) Aus diesem einheitlichen Screening-Wert wurden rückwärts für alle Organismen Screening-Werte für alle Konzentrationen in den Umweltmedien ermittelt. Für jedes Radionuklid ließ sich damit ein Risikoquotient RQ berechnen. War der RQ > 1, so war die Stufe 2 der Bewertung durchzuführen.

Stufe 2: Durch ein interaktives Vorgehen konnten die Defaultwerte geändert und die Berechnungen für bestimmte Referenzorganismen ausgeführt werden. Die Berechnung von Dosiswerten erfolgte im direkten Vergleich mit einem

[9] http://www.frederica-online.org

Referenzwert (10 µGy/h). In der Datenbank FREDERICA wurden zur Entscheidungsunterstützung Tabellen für verschiedene nicht menschliche Arten bereitgestellt.

Stufe 3: Es ist eine probabilistische Risikobewertung vorzunehmen, in der Unsicherheiten berücksichtigt werden können und Sensitivitätsanalysen bezüglich empfindlicher Modellparameter erfolgen. Der Bewerter kann standortspezifische Daten oder neuere Literaturdaten hinzuziehen. Erst in der Diskussion mit den Stakeholdern wird entschieden, ob das Risiko für nicht menschliche Arten akzeptabel ist. Es handelt sich damit um keine Screening-Stufe mit einer Ja-Nein-Entscheidung mehr.

Die Screening-Werte für die Stufen 1 und 2 wurden auf der Basis der Daten aus FASSET (Datenbank FRED) und ERICA (Datenbank FREDERICA[10]) sowie der Datenbank EPIC[11] abgeleitet. Hierbei kam methodisch die Empfehlung der Europäischen Kommission zur Bestimmung einer „Predicted No-Effect Concentration“ (PNEC) für chemische Stoffe zur Anwendung (EC 1994, Larsson 2008, Andersson et al. 2009). Ein vergleichbares Konzept wird auch in der konventionellen Ökotoxikologie zur Bewertung schädlicher Expositionen durch chemische Substanzen verwendet (s. Abschnitt 6.1).

Der Wert für die PNEC wurde aus Beobachtungen zu den Expositions-Wirkungsbeziehungen verschiedener relevanter Endpunkte (im Wesentlichen Mortalität, verringerte Reproduktion und Morbidität) mit einem statistischen Modell (Species Sensitivity Distribution, SSD) abgeleitet. Dabei wurden Dosisraten (Hazard Dose Rates HDR_5) abgeschätzt, bei deren Überschreitung für 5 % der Arten ein (schädlicher) Effekt bei 10 % der Individuen zu erwarten ist. Bei Dosisraten unterhalb dieses Effektniveaus wird davon ausgegangen, dass 95 % der Arten eines aquatischen bzw. terrestrischen Ökosystems als geschützt angesehen werden können (Beresford et al. 2007).

Eine Analyse der Daten verschiedener Ökosysteme ergab, dass es keine aus der Statistik ableitbare Begründung für ökosystemspezifische Screening-Werte gab. Daher wurden alle Ökosysteme zu einem generischen Ökosystem zusammengeführt.

Der für dieses generische Ökosystem erhaltene HDR_5-Wert lag bei 82 µGy/h (mit einem 95 % Konfidenzintervall von 24 µGy/h bis 336 µGy/h). Um daraus eine geringfügige Dosisrate (Predicted No-Effect Doserate, PNEDR) abzuleiten, wurde zusätzlich ein Sicherheitsfaktor von 5 benutzt und das Ergebnis (ab)gerundet.

Nach den Ausführungen in ERICA soll der so abgeleitete Screening-Wert von 10 µGy/h als inkrementale Dosisrate verstanden und im Sinne eines generischen Dosiskriteriums eines PNEDR auf alle Referenzorganismen und alle Ökosysteme angewendet werden (Larsson 2008, Andersson et al. 2009). Für einzelne taxonomische Gruppen wurden jedoch auch niedrigere Dosisraten als PNEDR diskutiert, z. B. 2 µGy/h für Wirbeltiere (Andersson et al. 2009).

Für Screening-Zwecke bei akuten Expositionssituationen wurde im ERICA-Projekt eine geschätzte „Predicted No-Effect-Dosis“ (PNED) von 900 mGy für Meeres-Ökosysteme und 300 mGy für terrestrische und Oberflächenwasser-Ökosysteme abgeleitet.

Im Rahmen des ERICA-Projektes ist eine Software (ERICA Assessment Tool[12]) entstanden, die besonders dann hilfreich ist, wenn Expositionssituationen mit vernachlässigbaren Risiken für die Umwelt zu identifizieren sind.

---

[10] http://www.frederica-online.org
[11] Environmental protection from ionising contaminants in the Arctic (EPIC)
[12] http://www.erica-tool.com/

Die SSK sieht die im Rahmen des ERICA-Projektes entwickelten Werkzeuge und Ansätze zur Ermittlung und Bewertung der Strahlenexposition von nicht menschlichen Arten durchaus als eine Basis für wissenschaftliche Untersuchungen an. Sie hat zur Kenntnis genommen, dass das Institut für Strahlenschutz und kerntechnische Sicherheit in Frankreich (IRSN 2016) die ERICA-Methodik als Kern ihrer Empfehlungen zur Ausdehnung des Strahlenschutzes auf nicht menschliche Arten gewählt hat. Die SSK sieht jedoch aufgrund der relativ komplexen und für eine Regelsetzung noch sehr variablen Methodik die Ergebnisse des ERICA-Projektes als nicht geeignet an, um darauf aufbauend eine Implementierung in das deutsche Regelwerk zum Strahlenschutz zu empfehlen. So ist z. B. das Screening-Niveau von 10 µSv/h bei Moosen und Flechten schon bei den allgemeinen Werten der Umweltradioaktivität in Deutschland erreicht. Auch die Frage, wie Referenzorganismen für die in Deutschland lebenden typischen Organismen im Einzelfall festzulegen sind, ist nicht pauschal zu beantworten.

PROTECT (2006-2008):

PROTECT (PRORECT 2009) bestand aus drei miteinander verknüpften Arbeitspaketen (WP):

- WP1: Analyse der Konzepte des Umweltschutzes,
- WP2: Analyse der Bewertungsansätze: Praktikabilität, Relevanz und Mängel,
- WP3: Anforderungen an den Schutz der Umwelt vor ionisierender Strahlung.

Es wurden die verschiedenen Bewertungsansätze der international verfügbaren Werkzeuge RESRAD-BIOTA (USDOE 2004), R&D128 (Copplestone et al. 2001) und ERICA Assessment Tool (Euratom) untersucht. Der in der ICRP-Veröffentlichung 108 (ICRP 2008) vorgelegte Ansatz der ICRP zur Nutzung einer begrenzten Zahl von Referenzlebewesen (Reference Animals and Plants) wurde einbezogen.

Die wesentlichen Feststellungen im Ergebnis dieser Studien waren:

- Keiner der verfügbaren Bewertungsansätze war umfassend.
- Das ERICA-Programm verfügt über die umfassendste Datenbasis und ermöglicht vorausschauende Bewertungen, wenn keine standortspezifischen Daten zur Verfügung stehen. Das Computerprogramm RESRAD-BIOTA ist mehr auf standortspezifische Daten angewiesen.
- Die Analyse der verschiedenen vorhandenen Softwarelösungen ergab, dass die verwendeten Transferraten in den Programmen am meisten zu den Bewertungsunsicherheiten bei der Ermittlung der Dosisraten beitragen und sich deutlich unterscheiden.
- Wurden mit den Werkzeugen Screening-Bewertungen durchgeführt, so ergaben die verfügbaren Werkzeuge durchaus unterschiedliche Ergebnisse.

Das ERICA-Programm wurde für die europäischen Mitgliedsstaaten zur Anwendung unter der Voraussetzung empfohlen, dass es gewartet und weiter verbessert wird. Innerhalb des Projektes PROTECT erfolgte die Anwendung eines einheitlichen PNEDR-Wertes von 10 µGy/h. Es wurde dabei festgestellt, dass diese generische Screening-Dosisrate innerhalb der Bewertungen als eine zusätzliche Dosis (incremental dose rate) oberhalb der Dosis, die sich aus der natürlichen Strahlenexposition ergibt, verwendet werden sollte.

Die SSK weist darauf hin, dass mit dieser Interpretation methodische Widersprüche verbunden sind. Im Unterschied zur stochastischen Wirkung geringer Expositionen beim Menschen sind Effekte von Strahlenwirkungen auf Populationen bei nicht menschlichen Arten nichtlinear und

die in den wissenschaftlichen Untersuchungen betrachteten Energiedosen lagen soweit über dem natürlichen Hintergrund, dass eine gesonderte Betrachtung dieses Hintergrundes nicht nötig war. Um allerdings bei geplanten Expositionssituationen Bewertungen vornehmen zu können, ist es nach Meinung der SSK nötig, die Maßstäbe so zu definieren, dass sie hinreichend weit oberhalb der üblichen Hintergrundwerte in Deutschland liegen, oder davon auszugehen, dass im Bereich der Hintergrundwerte zusätzliche (inkrementale) Expositionen, bei denen keine schädlichen Effekte auf Ökosysteme nachgewiesen sind (No-Adverse-Effect-Level), aus Gründen des Strahlenschutzes außer Acht gelassen werden können.

Es wurde in PROTECT weiterhin argumentiert, dass bei Unterschreitung des Referenzwertes für ein Screening kein weiterer Regelungsbedarf durch die zuständigen Behörden besteht. Dieser Intention folgt prinzipiell auch die SSK. Diese Feststellung ist jedoch in Anbetracht der unterschiedlichen Sensitivität von Organismen gegenüber ionisierender Strahlung nicht zwingend an den einheitlichen PNEDR-Wert von 10 µGy/h gebunden.

Es wurde in PROTECT auch darauf hingewiesen, dass die Verwendung eines einzelnen Screening-Wertes in radiologischen Risikobewertungen von nicht menschlichen Arten ein Schlüsselproblem darstellt. Da dieser Wert auf alle Spezies angewendet wird, kann das zur Über- oder Unterbewertung des Risikos führen. Es wurde bereits empfohlen, für bestimmte Organismengruppen (taxometrisch auf Familien- oder Klassenniveau) spezifische Screening-Werte zu verwenden.

Zusammenfassend wird von der SSK eingeschätzt, dass die europäischen Studien wesentlich zur Konzeptentwicklung für die Integration der nicht menschlichen Arten in das Strahlenschutzsystem beigetragen haben, die dabei entstandenen methodischen Konzepte allerdings derzeit nicht für eine direkte Anwendung in Deutschland geeignet erscheinen. So bestehen z. B. für die vorgeschlagenen Referenzorganismen noch erhebliche Datenlücken, die die Belastbarkeit von Bewertungsergebnissen erheblich einschränken würden.

5.3.2 Konzept des US Department of Energy (DOE) zur Bewertung von nicht menschlichen Arten

Vom US Department of Energy (DOE) wurde ein eigenständiges, abgestuftes Konzept zum Schutz nicht menschlicher Arten erarbeitet (USDOE 2002). In diesem Konzept sind keine einheitlichen Referenzorganismen vorgesehen. Es wurde davon ausgegangen, dass jeweils standortspezifische „repräsentative Tiere und Pflanzen“ den Dosisabschätzungen zugrunde gelegt werden. Die Auswahl erfolgt nach typischen Lebensräumen (aquatische Tiere, aquatische Pflanzen, Uferbewohner, terrestrische Tiere, terrestrische Pflanzen). Das Konzept beruht auf einer ökologischen Risikobewertung (ERA, ecological risk assessment) und fokussiert auf ein Populationsniveau, wobei als Endpunkt die Reproduktionsrate der Organismen angesehen wird. Die Dosisberechnungen erfolgen mit dem Programm RESRAD-BIOTA (USDOE 2004).

Basierend auf einer Analyse von akuten und chronischen Strahlungseffekten bei Tieren und Pflanzen werden Referenzwerte von 1 mGy/d (etwa 40 µGy/h) für Landtiere sowie 10 mGy/d (etwa 400 µGy/h) für Landpflanzen sowie aquatische Tiere und Pflanzen (USDOE 2002) angegeben, die für Screening-Zwecke Verwendung finden. Diese Werte sind mit dem Begriff „limit“ (Grenzwert) belegt. Kanadische Behörden verwendeten außer für Wirbellose und Fische den Referenzwert von 110 µGy/h, für Wirbellose 220 µGy/h und für Fische 20 µGy/h (Hinton et al. 2004).

5.3.3 Der Strahlenschutz nicht menschlicher Arten aus der Sicht der IAEA

Die IAEA entwickelte kein eigenes Konzept zum Schutz nicht menschlicher Arten. In den aktuellen Sicherheitsstandards (BSS) der IAEA (IAEA 2014a) wird der Strahlenschutz nicht menschlicher Arten nicht explizit ausgeführt. Sie enthalten auch keine Referenzwerte für die Exposition nicht menschlicher Arten. Die Grundlage für die Aktualisierung der IAEA-Sicherheitsstandards bildeten jedoch die Veröffentlichungen von UNSCEAR und die aktuellen Empfehlungen der ICRP. Es wurden insbesondere die Empfehlungen der ICRP-Veröffentlichung 103 (ICRP 2007) aufgenommen. Als allgemeine Zielstellungen des Schutzes der Umwelt wurden formuliert:

- Vermeidung von radiologischen Effekten bei nicht menschlichen Arten,
- Betrachtung des Menschen als einen integralen Bestandteil der Umwelt,
- Sicherstellung, dass die natürlichen Ressourcen jetzt und in Zukunft nachhaltig genutzt werden können (Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischwirtschaft, Tourismus).

Es wird der Schutz der Umwelt als ein Faktor während der Optimierung bei bestehenden und Notfall-Expositionssituationen gesehen. Zum Schutz der Umwelt hält es die IAEA für erforderlich, Grenzen für radioaktive Ableitungen zu setzen. In Veröffentlichungen der IAEA wird das ICRP-Konzept der Referenztiere und -pflanzen unterstützt und darauf bei der Begrenzung von Ableitungen (in das Meer) Bezug genommen (Pröhl 2012).

Es gibt jedoch eine Reihe von Aktivitäten der IAEA, die das Konzept des Schutzes nicht menschlicher Arten im Strahlenschutz tangieren. In den IAEA-Projekten EMRAS (2003 bis 2007), EMRAS II (2009-2011) und im Projekt MODARIA (2012 bis 2015) werden die international verfügbaren Modellansätze diskutiert und bewertet.

Die IAEA erarbeitete ein Handbuch des Radionuklidtransfers zu wild lebenden Tieren und Pflanzen (IAEA 2014b). Die angegebenen Transferraten unterscheiden sich im Detail erheblich von denen aus dem ERICA-Projekt und sind auch nicht mit den Daten der ICRP identisch.

5.3.4 Zusammenfassende Bewertung des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes durch UNSCEAR

Eine zusammenfassende Auswertung der wissenschaftlichen Fachliteratur zum Sachgebiet der Strahlenwirkungen auf nicht menschliche Arten durch UNSCEAR erfolgte erstmals im UNSCEAR-Report 1996 (UN 1996). Eine aktualisierte Auswertung des wissenschaftlichen Kenntnisstandes, die die verfügbare internationale Literatur zu Effekten ionisierender Strahlung infolge von Strahlenexpositionen nicht menschlicher Arten neu analysierte und die dokumentierten Erkenntnisse des Reaktorunfalles von Tschernobyl zu dieser Problematik einschloss, ist im UNSCEAR-Report 2008 (UN 2010) dargestellt. Dieser Report enthält einen wissenschaftlichen Anhang E „Effects of Ionizing Radiation on non-human Biota“, der in abschließender Form erst im Jahr 2011 veröffentlicht wurde (UN 2011) und in dem durch Untersuchungen im Raum Fukushima neue Befunde hinzugefügt wurden.

Der Kenntnisstand zu Dosis-Wirkungsbeziehungen vor allem bei Strahlenexpositionen weit unterhalb der letalen Dosis wird in vieler Hinsicht als noch unsicher und teilweise nur wenig mit Daten belegt angesehen. So weist UNSCEAR darauf hin, dass strahlenbedingte Zellschäden bei Lebewesen mit Elektronentransfer durch freie Radikale verbunden sind (UN 2011). Da ähnliche biochemische Prozesse wie bei ionisierender Strahlung auch anderen Stressoren zugrunde liegen, könnten z. B. Wechselwirkungen mit Schwermetallen dazu führen, dass sich die Radiosensitivität von Lebewesen verändert. Das ist jedoch mit Daten noch nicht sicher belegbar.

Grundlage aller vergleichenden Bewertungen von Strahlenexpositionen nicht menschlicher Arten ist eine Dosimetrie, die die absorbierte Fraktion der auf den Organismus von innen bzw. von außen auftreffenden Energie der ionisierenden Strahlung bestimmt. Mit modelltechnisch bestimmten Dosiskonversionskoeffizienten für die interne und externe Strahlenexposition kann aus einer (homogenen) radioaktiven Kontamination eines Umweltmediums (Wasser, Boden) eine Dosisrate errechnet werden (UN 2011).

Im Zusammenhang mit der Bewertung von Effekten ionisierender Strahlung auf nicht menschliche Arten stellte UNSCEAR schlussfolgernd fest, dass die Sensitivität von verschiedenen Organismen gegenüber Strahlenexpositionen sich jeweils über einen weiten Dosisbereich erstreckt (UN 2011). Die Bandbreiten und die jeweilige Größenordnung der akuten letalen Dosis unterscheiden sich für die verschiedenen taxonomischen Gruppen der nicht menschlichen Arten erheblich. Eine Zusammenfassung der Daten zur Wirkung chronischer Strahlenexpositionen von Pflanzen, Fischen und Säugetieren ist in der Tabelle 2 angegeben. Nicht menschliche Arten lassen sich hinsichtlich ihrer Strahlungsempfindlichkeit somit nicht mit einem einheitlichen Wert/Maßstab charakterisieren.

Für niedrige Lebensformen, z. B. Bakterien im Boden, in Oberflächen- und Grundwasser, die eine hohe Bedeutung für die Funktionalität der Umweltmedien aufweisen, gibt es derzeit keine Hinweise, dass sie bei den für Tiere und Pflanzen typischen Kontaminationssituationen durch ionisierende Strahlung geschädigt werden (UN 2011). Sie können deshalb bei der Definition von Referenzorganismen unberücksichtigt bleiben.

Für die Dosis-Wirkungsbeziehungen mit einem niedrigen linearen Energietransfer (LET) der Strahlung gibt UNSCEAR in (UN 2011) als Werte für Strahlungswichtungsfaktoren bei Beta- und Gammastrahlung einen Wert 1 an, weist aber darauf hin, dass für niedrigenergetische Betastrahlung ($E<10$ keV) aus den Arbeiten in Projekt FASSET (Larsson et al. 2004) ein Wert für die relative biologische Wirksamkeit (relative biological effectiveness, RBE) von 3 empfohlen wurde. Aus diesem Grund sieht UNSCEAR noch weiteren wissenschaftlichen Klärungsbedarf vor allem zum RBE-Wert niederenergetischer Betastrahlung. In Fällen, in denen die Strahlenexposition durch Strahlung mit hohem LET verursacht wird, sieht es UNSCEAR für erforderlich an, die unterschiedliche relative biologische Wirksamkeit der Strahlung zu berücksichtigen. Für intern auf Organismen einwirkende Alphastrahlung schlägt UNSCEAR in Übereinstimmung mit FASSET einen RBE-Wert von 10 vor.

Tab. 2: Zusammenfassung der Daten zu Wirkungen der chronischen Strahlenexposition von Pflanzen, Fischen und Säugetieren (nach UN 2011)

Kategorie	Dosisrate (µGy/h)	Wirkungen	Endpunkt	Referenz
Pflanzen	100 – 1 000	Reduziertes Stammwachstum von Nadelbäumen	Morbidität	Woodwell und Miller 1963
	400 – 700	Reduzierte Zahl krautiger Pflanzen	Morbidität	Geras'kin et al. 2008
Fische	100 – 1 000	Reduzierung der Hodenmasse und der Spermienproduktion; verminderte Fruchtbarkeit, verspätetes Laichen	Reproduktion	Hyodo-Taguchi 1980, Knowles 1999, NCRP 1991
	200 – 499	reduzierte Spermatogonien und Spermien	Reproduktion	Copplestone et al. 2003
Säugetiere (ohne Mensch)	< 100	Es wurden keine schädlichen Endpunkte beschrieben	Morbidität Mortalität Reproduktion	Caratero et al. 1998, Laskey et al. 1973, Pinon-Lataillade et al. 1988, Real et al. 2004, Upton et al. 1967, Yamamoto et al. 1998
generische Ökosysteme (terrestrische und aquatische)	etwa 80	Neue statistische Näherung zur Bestimmung von HDR_5*(95 % der Spezies im Ökosystem geschützt)	Morbidität Mortalität Reproduktion	Garnier-Laplace et al. 2006, Garnier-Laplave und Gilbin 2006; Garnier-Laplace et al. 2008

* HDR_5 = Hazardous Dose Rate (gefährliche Dosisrate: Dosisrate, bei der 95 % der Arten im aquatischen/terrestrischen Ökosystem geschützt sind)

Die SSK sieht im Konzept der gewichteten absorbierten Dosis, die aus der mit Strahlungswichtungsfaktoren multiplizierten absorbierten Energiedosis resultiert, eine geeignete Messgröße zur Charakterisierung der Strahlenexposition nicht menschlicher Arten, selbst wenn die Strahlungswichtungsfaktoren infolge lückenhafter Daten noch unsicher sind. Sie hat daher die Verwendung dieser Größe empfohlen (siehe Empfehlung 2).

Schlussfolgernd aus der Analyse des wissenschaftlichen Kenntnisstandes betrachtete UNSCEAR folgende Schlüsselelemente für den Bewertungsrahmen von Effekten einer Strahlenexposition von nicht menschlichen Arten, die in Tabelle 3 zusammengefasst sind, als wesentlich:

Tab. 3: Schlüsselelemente des Bewertungsrahmens für Strahlenexpositionen von nicht menschlichen Arten (nach UN 2011)

Element	Gesichtspunkte
Exposition der Organismen	• Räumliche und zeitliche Verteilung der Radionuklide in der Umwelt bzw. im Material • Aufnahme durch die Organismen • Ungleichförmige Verteilung im Organismus
Referenzorganismen	• Unmöglichkeit alle Arten zu berechnen, • Auswahl von Referenzorganismen oder Indikatorspezies für ein interessierendes Gebiet, • mögliches Erfordernis, bestimmte Individuen per se zu berücksichtigen, wenn sie gefährdet sind
Dosimetrisches Modell für Referenzorganismen	• Absorbierte Dosis (gesamter Körper) • Berücksichtigung unterschiedlicher Geometrien • Relative biologische Wirksamkeit (RBE): Effekte unterschiedlicher Strahlungsqualitäten auf die Lebewesen
Endpunkte in der radiologischen Bewertung	• Auswahl von geeigneten Populationsmaßstäben wie Mortalität, oder Reproduktionskapazität und korrespondierende Referenzdosen
Effekte bei den Organismen	• Verbindung zwischen Strahlungseffekten auf den Endpunkt eines Individuums und möglichen Effekten für die Population • Rolle des Hintergrundniveaus der Strahlung • Natürliche Variabilität der Populationen

Die Auswertung der Daten aus Fukushima führt UNSCEAR zu dem Schluss, dass die bereits vor 2011 erarbeiteten Aussagen zu Wirkungen ionisierender Strahlung auf nicht menschliche Arten durch die neueren verfügbaren Daten gestützt werden. Allerdings stellt UNSCEAR auch fest, dass die Maßstäbe zur Bewertung der Strahlenexpositionen nicht menschlicher Arten in den früheren Berichten (UN 1996, UN 2010) und auch die im Fukushima-Bericht von 2013 (UN 2014) auf einer Synthese von Informationen basierten, die hauptsächlich aus radiobiologischer Literatur über Laborversuche abgeleitet wurden, bei denen kleine Gruppen von Individuen, die in Isolation und unter kontrollierten Laborbedingungen gehalten wurden, exponiert worden waren. Analysen von Feldbeobachtungen früherer Unfälle konnten nur eingeschränkt herangezogen werden. Ausgehend von den bei ihrer Auswertung verfügbaren aktuellen Publikationen leitet UNSCEAR ab, dass die Extrapolation von Dosis-Wirkungsbeziehungen auf Ökosysteme noch weiterer Klärung bedarf. Neue Metaanalysen von Effekt-Daten weisen nach UNSCEAR darauf hin, dass Organismen in ihrer natürlichen Umwelt empfindlicher sind als solche, die unter Laborbedingungen getestet werden (UN 2015).

UNSCEAR sieht es als nötig an, die Wirkungen von Strahlung auf der Ebene von Ökosystemen oder molekularer und zellulärer Ebene besser zu verstehen, um davon ausgehend die Wirkung ionisierender Strahlung auf Ökosysteme fundiert bewerten zu können.

Für akute (kurzfristige) Expositionen sind nach Auffassung von UNSCEAR auf der Basis aller verfügbaren Daten signifikante Effekte für nicht menschliche Arten bei einer Dosis unterhalb von etwa 1 Gy unwahrscheinlich. Eine chronische Strahlenexposition von weniger als

100 µGy/h in terrestrischen und weniger als 400 µGy/h in aquatischen Ökosystemen führt nach den Einschätzungen von UNSCEAR nicht zu signifikanten, schädlichen Wirkungen auf der Populationsebene (UN 2011). Angesichts dieser hohen Dosis und Dosisraten kann festgestellt werden, dass eine Ausdehnung des Strahlenschutzes auf den Schutz von nicht menschlichen Arten nicht aus hohen, bisher übersehenen oder vernachlässigten Risiken durch ionisierende Strahlung resultiert, sondern vielmehr aus dem Bestreben, eine konzeptionelle Lücke des Strahlenschutzsystems zu schließen.

5.4 Nationale Arbeiten für ein Strahlenschutzkonzept zur Bewertung von Strahlenexpositionen nicht menschlicher Arten

5.4.1 Das BfS-Konzept zum Schutz der belebten Natur

Das Bundesamt für Strahlenschutz hat sich als Fachbehörde seit 2008 mit dem Thema Schutz der belebten Natur im Strahlenschutz befasst und hat auf der Grundlage der Kenntnisse aus den europäischen Forschungsvorhaben ein eigenes Konzept zur Bewertung von Strahlenexpositionen der belebten Natur entwickelt (BfS 2010a). Das BfS ging in seinen Überlegungen davon aus, dass auf die belebte Natur eine Vielzahl von Stressoren wirken, wie beispielsweise Nahrungsmangel, Krankheiten, Parasiten und Fressfeinde. Ionisierende Strahlung ist ein weiterer Umweltstressor, dessen Bedeutung im Vergleich zu anderen Stressoren jedoch noch nicht systematisch untersucht und quantifiziert wurde. Dem BfS-Konzept zum Schutz der belebten Natur liegt deshalb die Annahme zugrunde, dass ionisierende Strahlung ein relevanter Stressor unter mehreren Umweltstressoren ist.

Das BfS schlug für chronische Expositionssituationen ein zweistufiges Dosiskriterium mit einer einzigen Dosisschwelle in Höhe der generischen PNEDR vor:

Stufe 1: Zunächst wird die gesamte Strahlenexposition, also die Summe natürlicher und zivilisatorischer Beiträge, betrachtet. Liegt dieser Wert unterhalb der generischen PNEDR von 10 µGy/h, so gelten Tiere und Pflanzen nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand als angemessen geschützt.

Stufe 2: Übersteigt die gesamte Strahlenexposition die generische PNEDR, wird im zweiten Schritt nur der zivilisatorische Anteil betrachtet. In einem vom Menschen weitgehend unbeeinflussten Ökosystem ist dieser Beitrag Null. Ungeachtet der Höhe der Strahlenexposition ergibt sich dann kein behördlicher Handlungsbedarf. Ist der zivilisatorische Anteil jedoch nicht vernachlässigbar, ist dieser Beitrag entweder zu begrenzen (bei geplanten Expositionssituationen) oder im Rahmen eines Optimierungsprozesses so gering wie vernünftigerweise möglich zu halten (bei bestehenden Expositionssituationen). Bei radiologischen Notfallsituationen wird der Strahlenschutz des Menschen als prioritär erachtet.

Das BfS schlug vor, bei geplanten Expositionssituationen den zivilisatorischen Beitrag im Hinblick auf die Nichtlinearität der Expositions-Wirkungsbeziehungen und eine mögliche nichtlineare Reaktion des Ökosystems auf einen kleinen Bruchteil der generischen PNEDR zu begrenzen. Hiermit wird auch berücksichtigt, dass für einzelne taxonomische Gruppen niedrigere Werte für die PNEDR diskutiert werden, z. B. 2 µGy/h für Wirbeltiere (Andersson et al. 2009).

Die SSK sieht das vom BfS vorgeschlagene Konzept als einen auf dem Stand der Kenntnisse und internationalen Diskussionen bis 2010 entwickelten sachgerechten Vorschlag an. Der vom BfS verfolgte Ansatz entspricht dem im stoffbezogenen Umweltschutz üblichen Herangehen. Die Nutzung eines einheitlichen Sceening-Wertes von 10 µGy/h für alle nicht menschlichen Arten und der Vorschlag des BfS, bei geplanten Expositionssituationen die zusätzliche

Strahlenexposition von Lebewesen auf einen kleinen Bruchteil der PNEDR zu begrenzen, führt jedoch nach Meinung der SSK zu sehr konservativen Bewertungen, insbesondere, da ionisierende Strahlung im Bereich dieser Dosiswerte für zahlreiche nicht menschliche Arten wahrscheinlich nur ein unbedeutender Umweltstressor ist.

5.4.2 Studie des Öko-Instituts

Das BfS beauftragte das Öko-Institut im Jahr 2009 mit der Studie „Systematische Untersuchung der Exposition von Tieren und Pflanzen bei Einhaltung der Grenzwerte der StrlSchV für den Menschen“ (Küppers et al. 2012). In dieser Studie sollte ausgehend von den Modellen, Parameterwerten und Annahmen der AVV zu § 47 StrlSchV (BMU 2012a) die potenzielle Exposition von Tieren und Pflanzen durch Ableitungen von Radionukliden mit Luft und Wasser untersucht werden, wenn die Dosisgrenzwerte für Personen der Bevölkerung eingehalten werden. Auf diese Weise sollte überprüft werden, ob und gegebenenfalls wo sich Handlungsbedarf bezüglich des Schutzes der nicht menschlichen Arten ergibt.

Bei dieser Überprüfung waren die folgenden Randbedingungen vorgegeben:

- Berücksichtigung von Referenzorganismen, die von der ICRP (2008) sowie in den Forschungsvorhaben FASSET (Larsson 2004) und ERICA (Larsson 2008) betrachtet wurden und im Lebensraum Deutschland heimisch sind,
- Berücksichtigung aller 750 Radionuklide der Anlage VII Teil D StrlSchV und
- Verwendung des im ERICA-Projekt abgeleiteten Werts von 10 μGy/h als generisches Kriterium des angemessenen Schutzes.

Referenzorganismen

Die Auswahl relevanter Referenzorganismen führte in der Studie des Öko-Instituts (Küppers et al. 2012) zu folgendem Ergebnis:

- terrestrische Referenzorganismen: Hirsch, Ratte, Ente, Entenei, Regenwurm, Assel/ Laus, Schnecke, Amphibie, Reptil, Hummel/Biene, Flechte/Moos, Wildgras, Strauch, Baum,
- limnische Referenzorganismen: Bisamratte, Wasservogel, Amphibie, benthischer Fisch, Forelle, Schnecke, Muschel, Krebs, Libellenlarve, Gefäßpflanze, Phytoplankton, Zooplankton und
- marine Referenzorganismen: Schweinswal, Meeresschildkröte, Seevogel, Scholle, pelagischer Fisch, Krebs, Schnecke, Seeanemone, Wattwurm, Gefäßpflanze, Makroalge, Phytoplankton, Zooplankton.

Dieser Satz von Referenzorganismen ist deutlich größer als der der (ICRP 2008).

In (Küppers et al. 2012) wurden für diese Referenzorganismen Dosiskonversionskoeffizienten[13] (Dose conversion coefficient, DCC) abgeleitet, die sich auf eine längerfristig in den Umweltmedien (Wasser, Boden und Luft) vorhandene Konzentration eines Radionuklids beziehen und gegebenenfalls entstehende Tochternuklide einschließen. Die DCCs enthalten die externe Exposition einschließlich der Submersion und die interne Exposition (soweit für die einzelnen Elemente international Datensätze zur Verfügung standen). Für die untersuchten terrestrischen Säugetiere wurde ein Modell entwickelt, mit dem auch die Dosis durch Inhalation

[13] von der ICRP (in ICRP 2008) als Dosiskonversionsfaktoren bezeichnet

abgeschätzt werden konnte. Die DCCs der Studie sind als beste Schätzer zu verstehen, die entsprechend dem damaligen Stand der Wissenschaft abgeleitet wurden.

Für Alphastrahlung wurde ein Strahlungswichtungsfaktor von 10, für niederenergetische Betastrahlung ein Strahlungswichtungsfaktor von 3 und für hochenergetische Betastrahlung sowie Gammastrahlung ein Strahlungswichtungsfaktor von 1 angesetzt.

Rechnerisch zusätzliche Konzentrationen in Umweltmedien durch Ableitungen

In Abbildung 1 ist die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Ermittlung der rechnerisch zusätzlichen Exposition der Referenzorganismen durch Ableitungen dargestellt. Dabei werden für die einzelnen Referenzorganismen Dosiskonversionskoeffizienten (DCC) bestimmt, die die Exposition in Abhängigkeit von Kontaminationen von Wasser, Boden und Luft beschreiben. Anhand der Vorgaben der AVV zu § 47 StrlSchV wird ermittelt, welche Kontaminationen von Boden, Luft und Wasser möglich sind, wenn die Dosisgrenzwerte für den Menschen noch eingehalten werden. Aus der Verbindung dieser beiden Größen ergibt sich die rechnerisch zusätzliche Exposition der Referenzorganismen durch Ableitungen.

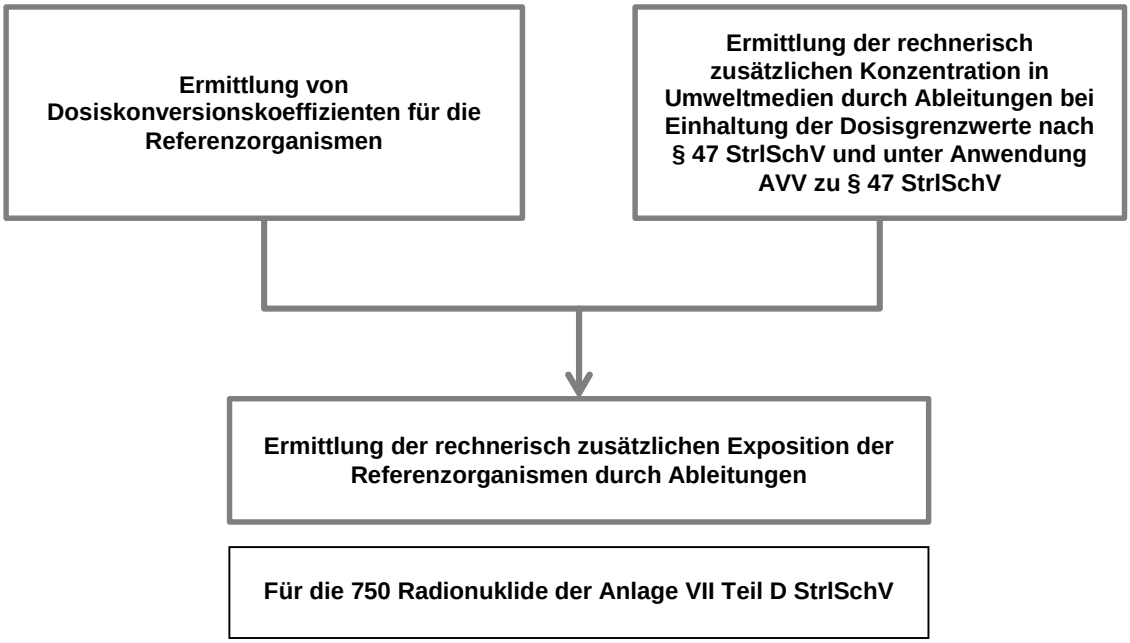

Abb. 1: Grundsätzliche in (Küppers et al. 2012) genutzte Vorgehensweise bei der Ermittlung der rechnerisch zusätzlichen Exposition der Referenzorganismen durch Ableitungen

Für alle 750 Radionuklide der Anlage VII der StrlSchV wurde die rechnerisch zusätzliche Konzentration in Wasser, Boden und Luft durch Ableitungen bestimmt, wenn die Dosisgrenzwerte für die höchstexponierte Referenzperson und das relativ zum Grenzwert höchstexponierte Organ eingehalten sind.

Die Expositionsszenarien im Hinblick auf die Referenzpersonen wurden so ausgewählt, dass sie als typische Szenarien angesehen werden können, wie sie zur Herleitung generischer Werte (z. B. Werte der maximal zulässigen Aktivitätskonzentration aus Strahlenschutzbereichen nach Anlage VII Teil D StrlSchV) üblich sind. Hinsichtlich von Ableitungen mit der Fortluft wurde das ungünstigere Ergebnis von zwei Szenarien mit unterschiedlicher Freisetzungshöhe (20 m und 200 m) verwendet. Für diese Szenarien wurden plausible Langzeitausbreitungsfaktoren, Langzeitfalloutfaktoren und Langzeitwashoutfaktoren verwendet. In der AVV zu § 47 StrlSchV

fehlende Transferfaktoren einzelner chemischer Elemente (Ti, Fr, Es, Fm, Md) wurden, ausgehend von der chemischen Ähnlichkeit zu anderen Elementen, ergänzt.

Aus den maximal bei Gewährleistung des Schutzes des Menschen zulässigen Ableitungen von Radionukliden mit der Abluft wurden die dann möglichen Konzentrationen in der Luft (bodennah und in Freisetzungshöhe) ermittelt. Hinsichtlich der Ablagerung auf dem Boden wurde von einem über 50 Jahre anhaltenden Eintrag ausgegangen und die Kontamination im 50. Jahr als Grundlage der Ermittlung der Strahlenexposition der Referenzorganismen herangezogen.

Hinsichtlich der Einleitung in ein Fließgewässer wurde ermittelt, welche Höchstkonzentration eines Radionuklids in diesem Gewässer enthalten sein darf, wenn bei Anwendung der AVV zu § 47 StrlSchV die Dosisgrenzwerte für die Referenzpersonen eingehalten werden sollen. Die so ermittelten Höchstkonzentrationen sind unabhängig von einem konkreten Vorfluter. Bei der Einleitung in ein Fließgewässer ist hinsichtlich der Sedimentation zwischen dem Nahbereich (Anlagerungszeit an Schwebstoffe $\leq$ 10 Stunden) und dem Fernbereich (Anlagerungszeit an Schwebstoffe > 5 Tage) zu unterscheiden. Für die Ermittlung der Strahlenexposition des Menschen wurde der Fall ausgewählt, der zur geringeren Exposition führt, um im Sinne der Aufgabenstellung konservativ zu sein. Zur Abdeckung aller Radionuklide der Anlage VII Tabelle 4 StrlSchV waren Konzentrationsfaktoren für Fischfleisch, Halbwertszeiten für die Anlagerung an Schwebstoffe und Übergangskonstanten von Wasser in Sediment zu ergänzen. Die Zuordnung erfolgt entsprechend der Ähnlichkeit chemischen Verhaltens. Für Süßwasserfisch wurden darüber hinaus ergänzende Daten aus der internationalen Fachliteratur herangezogen.

Da in Deutschland keine kerntechnischen Anlagen radioaktive Abwässer direkt ins Meer einleiten, gibt es in der AVV zu § 47 StrlSchV keine Modellierung für eine solche Situation. Eine Einleitung ins Meer über ein Fließgewässer kann als abgedeckt durch die Untersuchungen zu Fließgewässern angesehen werden. Es wurde daher der Fall einer direkten Einleitung in einen marinen Lebensraum betrachtet. Bei der Auswahl der Parameterwerte wurde auf internationale Literatur zurückgegriffen und erforderlichenfalls wurden Ergänzungen aufgrund chemischer Ähnlichkeit vorgenommen. Die verwendeten Verzehrraten mariner Nahrungsmittel für die Referenzpersonen nach StrlSchV wurden so angesetzt, dass sie der Philosophie der AVV zu § 47 StrlSchV entsprechen. Berücksichtigt wurde der Verzehr mariner Lebensmittel (Fisch, Krebstiere, Weichtiere und Algen) sowie der Aufenthalt auf Strandflächen.

Rechnerisch zusätzliche Exposition der Referenzorganismen durch Ableitungen

Für Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft zeigten die Ergebnisse, dass für alle Radionuklide und alle Referenzorganismen eine Dosisrate von 10 µGy/h unterschritten wird, wenn der Schutz des Menschen entsprechend den Anforderungen der Strahlenschutzverordnung in Verbindung mit der AVV zu § 47 StrlSchV gewährleistet ist.

Wird von der in einem Gewässer möglichen Konzentration radioaktiver Stoffe ausgegangen, bei der der Schutz des Menschen noch gewährleistet wäre, so ergeben sich bei Einleitungen in Fließgewässer und marine Gewässer bei vielen Radionukliden Überschreitungen der Referenzdosisrate von 10 µGy/h. Dabei handelt es sich weitgehend um sehr kurzlebige Radionuklide mit Halbwertszeiten im Bereich von Minuten und Stunden. Außerdem sind sämtliche dieser Radionuklide von keiner praktischen Bedeutung in der Kerntechnik, der Isotopenanwendung und der Forschung. Bei kurzlebigen Radionukliden wäre darüber hinaus nach Stand von Wissenschaft und Technik eine Rückhaltung durch Abklingen statt einer Ableitung in ein Gewässer erforderlich.

In (Küppers et al. 2012) wurden daher zusätzliche Bedingungen eingeführt, um realistischere Ableitungsszenarien in Gewässer zu beschreiben. Da nicht der Schutz eines Individuums beim Schutz von Tieren und Pflanzen im Vordergrund steht, muss zur möglichen Schädigung ein gewisses Wasservolumen kontaminiert sein. Auf dieser Basis ergibt sich eine Gesamtaktivität, die kontinuierlich in diesem Wasserkörper vorhanden sein muss. Um eine gleichbleibende Konzentration eines Radionuklids in einem definierten Wasserkörper aufrecht zu erhalten, muss der radioaktive Zerfall durch kontinuierliche Ableitungen kompensiert werden. Hieraus lässt sich eine notwendige jährliche Ableitung ermitteln. Neben dem radioaktiven Zerfall kommt es auch zu einem Verlust an Radionukliden durch Wasseraustausch im zu betrachtenden Wasserkörper. Auch dieser Verlust muss durch kontinuierliche Ableitungen kompensiert werden. Insgesamt ergibt sich so eine notwendige jährliche Ableitung in ein Gewässer, die auf eine in der Praxis maximal übliche Gesamtaktivität begrenzt werden kann.

Der zu betrachtende Lebensraum wurde bei einem Fließgewässer zu 5 000 m³ (z. B. 1 m Tiefe, 10 m Breite, 500 m Länge) angesetzt. Es wurde von einer Fließgeschwindigkeit von 0,1 m/s ausgegangen, einem für Flüsse konservativen Wert. Beim Meer wurde ein Wasserkörper von 10^7 m³ (z. B. 10 m Tiefe, 1 Mio. m² Fläche) als Lebensraum zugrunde gelegt, wobei 1 % des Wassers pro Tag ausgetauscht werden sollte. Mit diesen zusätzlichen Annahmen ergaben sich bei Fließgewässern keine Überschreitungen des Dosiskriteriums von 10 µGy/h mehr, wenn die jährlich abgeleitete Aktivität eines Radionuklids kleiner ist als die maximalen jährlichen Ableitungen aus deutschen Kernkraftwerken in Fließgewässer.

Ähnliche Überlegungen führten auch hinsichtlich von Einleitungen in ein marines Gewässer zum Ergebnis, dass bei Einhaltung der gegenwärtig gültigen Vorschriften – insbesondere im Hinblick auf die Rückhaltung sehr kurzlebiger Radionuklide durch Abklinglagerung – keine Überschreitungen des Dosiskriteriums von 10 µGy/h zu erwarten sind.

In (Küppers et al. 2012) wurde aber einschränkend festgestellt: Nicht abgedeckt sind mit dieser Betrachtung Populationen von Lebewesen, die nur ein kleineres Wasservolumen besiedeln würden, beispielsweise Schnecken oder Muscheln ohne besonderes Wanderverhalten. Für diese kann eine Schädigung nicht grundsätzlich aufgrund der Anforderungen zum Schutz des Menschen ausgeschlossen werden. Die Frage, ob ein ausreichender Schutz besteht, kann dann nur im Einzelfall bezogen auf einen konkreten Aktivitätseintrag, einen konkrete Ausbreitungssituation und eine konkrete Spezies beurteilt werden. Hierbei wäre dann auch zu berücksichtigen, dass die Referenzdosisrate von 10 µGy/h für die meisten Referenzorganismen sehr konservativ angesetzt ist.

5.5 Konzept und Empfehlungen zum Schutz nicht menschlicher Arten

5.5.1 Historie der Konzeptentwicklung

Durch die ICRP wurde bereits in den 1950er Jahren der Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung durch Begrenzung von Ableitungen in die Umweltmedien als Teil des Strahlenschutzsystems etabliert (ICRP 1959). Bis 1975 wurde allerdings der Schutz nicht menschlicher Arten international im Strahlenschutz ignoriert. Die ICRP formulierte erst im Jahre 1977 die Annahme, wenn der Mensch hinreichend geschützt sei, dann seien auch andere Lebewesen geschützt (ICRP 1977). Der gleiche Standpunkt wurde in etwas anderer Formulierung noch in den Empfehlungen der ICRP von 1990 vertreten (ICRP 1991). Dies spiegelte sich auch in den gesetzlichen Regelungen zum Strahlenschutz in der Bundesrepublik Deutschland wider (StrlSchV 2001, BMU 2012a).

Die Annahme der ICRP basierte u. a. auf Kenntnissen zur Wirkung ionisierender Strahlung auf Tiere und Pflanzen, die auf Untersuchungen aufbauten, die bereits wenige Jahre nach der Entdeckung von Röntgenstrahlen begannen und die mit unterschiedlichen wissenschaftlichen

Zielstellungen (z. B. Erzeugen von Mutationen zu Züchtungszwecken) ständig fortgeführt wurden (siehe u. a. Fendrik und Bors 1991).

Seit 2005 befasste sich das ICRP-Komitee 5 „Protection of the Environment“ gezielt mit dem Schutz nicht menschlicher Arten vor ionisierender Strahlung. Der Schutz nicht menschlicher Arten wurde in die überarbeiteten Empfehlungen der ICRP-Veröffentlichung 103 aufgenommen (ICRP 2007). In der Veröffentlichung 108 stellte die ICRP ihr Konzept der Referenzorganismen vor (ICRP 2008).

Bereits in ihrer Veröffentlichung 103 stellte die ICRP fest, dass es im Hinblick auf den Schutz der Umwelt einen wachsenden Beratungs- und Anleitungsbedarf im Bereich des Strahlenschutzes gibt. Sie sah es daher als notwendig an, dieses Thema in eigener Initiative zu bearbeiten. Im Ergebnis veröffentlichte die ICRP weitere Empfehlungen (ICRP 2008, ICRP 2009, ICRP 2014) und etablierte damit einen konzeptionellen und methodischen Rahmen für den Schutz nicht menschlicher Arten im Strahlenschutz.

Als Schutzziele wurden in ICRP 124 (ICRP 2014) eine Vermeidung oder Verringerung der Häufigkeit schädlicher Strahleneffekte auf ein Niveau benannt, auf dem die Strahlung nur vernachlässigbare Wirkungen auf den Erhalt der biologischen Vielfalt, die Erhaltung der Arten sowie den gesunden Zustand des natürlichen Lebensraumes, der Lebensgemeinschaften und Ökosysteme hat. Die biologischen Endpunkte, die in dieser Hinsicht am wichtigsten sind, betreffen mögliche Veränderungen von Populationsgröße oder -struktur.

In der Veröffentlichung 108 der ICRP „Envionmental protection: The concept and use of reference animals and plants” (ICRP 2008) wurde in diesem Zusammenhang festgestellt, dass beobachtete Effekte durch ionisierende Strahlung bei einigen Exemplaren einer Population nicht notwendiger Weise zu Konsequenzen für die gesamte Population führen müssen. Stattdessen werden die biologischen Endpunkte nach einer Strahlenexposition eher so sein, dass sie zu Veränderungen in der Größe der Population oder der Populationsstruktur führen.

Zur Bemessung von Expositionen verwendet die ICRP die absorbierte Energiedosis. In ihrer Veröffentlichung 108 weist die ICRP darauf hin, dass die relative biologische Wirksamkeit von Strahlung auch bei nicht menschlichen Arten berücksichtigt werden sollte (ICRP 2008). Die von der ICRP publizierten Dosiskoeffizienten, die auf einem Modell von (Ulanowski und Pröhl 2006) aufbauen, weisen daher für die innere Strahlenexposition den Anteil der Alphastrahlung und spontaner Spaltungen, den Anteil der niederenergetischen Betastrahlung ($E < 10$ keV) und den Anteil von Gammastrahlung und hochenergetischer Betastrahlung separat aus. In aktuellen Diskussionen des Komitees 5 der ICRP wird für einen Strahlungswichtungsfaktor von 10 für Alphastrahlung und einen Strahlungswichtungsfaktor zwischen 1 und 3 für die niederenergetische Betastrahlung des Tritiums plädiert (Real 2016). In den Arbeiten des Öko-Instituts (Küppers et al. 2012), die die SSK zur Beurteilung von Strahlenexpositionen nicht menschlicher Arten durch Ableitungen aus zugelassenen Tätigkeiten herangezogen hat, wurden konservativ Strahlungswichtungsfaktoren von 1 für Gammastrahlung und Betastrahlung mit Energien über 10 keV, 3 für niederenergetische Betastrahlung ($E < 10$ keV) und 10 für Alphastrahlung verwendet. Die gleichen Strahlungswichtungsfaktoren wurden auch bei der Ableitung der Werte der Anlage 1 benutzt.

Obwohl es keine wissenschaftlichen Belege dafür gibt, dass als Folge von bestehenden Expositionssituationen eine reale Gefahr für Populationen nicht menschlicher Arten bzw. ganze Ökosysteme existiert, ergibt sich die Notwendigkeit, das vorhandene Wissen über Strahlungseffekte bei unterschiedlichen nicht menschlichen Arten in Management-Entscheidungen und Bewertungen zum Strahlenschutz bei unterschiedlichen Expositionssituationen in geeigneter Weise im Sinne des Schutzes der Umwelt einfließen zu lassen. Als praktikables Mittel, um dieses Ziel auf der Basis eines wissenschaftlich begründeten Systems zur Beschreibung von Exposition,

Dosis und Wirkung (kompatibel zum Vorgehen beim Strahlenschutz des Menschen) umzusetzen, wurde in wissenschaftlichen Arbeiten (siehe z. B. Pentreath 1998, 1999, 2002a,b, 2003, 2004, 2005) und internationalen Forschungsprojekten, wie z. B. ERICA, ein System von Referenztieren und -pflanzen (Reference Animals and Plants, RAPs) vorgeschlagen. Diese Referenzorganismen sind so auszuwählen, dass sie auch Lebensräume abdecken, die durch den Schutz des Menschen im Strahlenschutz nicht oder nur indirekt erfasst sind.

5.5.2 Repräsentative Tiere und Pflanzen und deren Dosimetrie

In Anlehnung an den Referenzmenschen wurden von der ICRP eine Gruppe von 12 Referenztieren und -pflanzen (RAPs) vorgeschlagen und ihre fiktiven Eigenschaften im Hinblick auf den Strahlenschutz definiert. Referenzorganismen werden als hypothetische Individuen ausgewählter Arten verstanden, die aufgrund ihrer Lebensbedingungen als repräsentativ im Hinblick auf die Strahlenexposition in dem betrachteten Ökosystem angesehen werden können und deren Strahlenexposition als Maß für den Schutz eines Ökosystems dient.

Die von der ICRP eingeführten RAPs sind deshalb hypothetische Entitäten, die jeweils bestimmte grundlegende taxonomische Gruppen nicht menschlicher Arten abbilden sollen. Bei ihrer Festlegung wurden weiterhin folgende Aspekte zugrunde gelegt:

- Sind sie typisch für wichtige Ökosysteme?
- Ist ihr Lebensraum typisch für bestimmte Umweltbereiche (Land, Oberflächenwasser, Meere)?
- Welche Stadien ihres Lebenszyklus sind für die Dosis relevant?
- Welche radiologischen Daten/Informationen sind verfügbar?
- Sind sie für künftige Forschungen verfügbar?
- Sind sie für andere Bereiche des Umweltschutzes relevant?

Die RAPs der ICRP sind mit bestimmten Artenbezeichnungen belegt und charakterisieren terrestrische, limnische und maritime Lebensräume. Mit ihrer Klassifizierung als Referenzorganismen sollen auch solche Arten berücksichtigt sein, die einen besonderen Schutzstatus im Naturschutzrecht genießen.

Die SSK empfiehlt, als Bezug für die Strahlenexposition nicht menschlicher Arten die in der ICRP-Veröffentlichung 108 aufgeführten 12 RAPs zu verwenden und sie mit den in Tabelle 4 genannten deutschen Begriffen zu bezeichnen.

Tab. 4: Referenztiere und -pflanzen (RAPs) und repräsentierte Gruppen von Organismen

Name der Referenztiere und -pflanzen (RAP)	**Durch die RAPs repräsentierten Gruppen von Organismen**
Referenz-Hirsch	große (pflanzenfressende) Landsäugetiere
Referenz-Ratte	kleine (allesfressende) Landsäugetiere, teils auch im Boden lebend
Referenz-Ente	Wasservögel, auf Land und in Wasser lebend
Referenz-Frosch	Amphibien, auf Land und in Wasser lebend
Referenz-Erdwurm	erdbewohnende Würmer
Referenz-Biene	Insekten
Referenz-Forelle	Süßwasserfische
Referenz-Plattfisch	am Sediment lebende Meeresfische
Referenz-Krebs	höhere Krebse
Referenz-Braunalge	große Meeresalgen
Referenz-Nadelbaum	Bäume
Referenz-Wildgras	Gräser

Abweichend von dieser begrenzten Zahl der Referenzorganismen werden in wissenschaftlichen Arbeiten (z. B. Torudd und Saetre 2013) und auch im ERICA Assesssment Tool andere Referenzorganismen (z. B. standorttypische Tiere und Pflanzen) betrachtet. Die ICRP schließt daher in ihrer Veröffentlichung 124 (ICRP 2014) Modifikationen zur Anpassung an konkrete Standorte nicht aus.

Ausgehend von der Studie des Öko-Instituts (Küppers et al. 2012) wurde von der SSK geprüft, welche Konsequenzen sich aus der Beschränkung auf 12 RAPs nach ICRP ergeben. Die Ergebnisse der Studie, in der ein breiteres Spektrum von Referenzorganismen betrachtet wurde als es durch die RAPs nach ICRP vorgegeben wird, zeigen, dass es Referenzorganismen mit deutlich höherer Exposition als die der RAPs gibt. Im limnischen Lebensraum sind dies beispielsweise Bisamratte, Schnecke sowie Phytoplankton. Bei aquatischen Lebensräumen ist es möglich, dass bei Einhaltung der Anforderungen zum Schutz des Menschen vor ionisierender Strahlung nicht bei allen möglichen – über die der ICRP 2008 hinausgehenden – Referenzorganismen die Unterschreitung des unteren Wertes des DCRL-Bereiches („Derived Consideration Reference Level“, siehe auch Abschnitt 5.5.3) gegeben ist. Allerdings wird die Exposition auch solcher Referenzorganismen (und ggf. anderer Organismen in den aquatischen Lebensräumen) bei Unterschreitung des unteren Wertes des DCRL-Bereiches für RAPs nach ICRP begrenzt. Der Schutz von Organismen vor ionisierender Strahlung wird dadurch im Vergleich zum bisherigen Konzept, das nur die Begrenzung der Strahlenexposition des Menschen beinhaltete, verbessert. In Anbetracht der Unsicherheiten bei der Bewertung von ionisierender Strahlung als relevanter Stressor in Ökosystemen auch bis in den Bereich der oberen Werte des DCRL-Bereichs hinein, sieht die SSK diese Verbesserung beim derzeitigen Kenntnisstand als ausreichend an.

Der Kenntnisstand bezüglich der möglichen Strahlenexposition von speziellen Arten ist bislang sehr beschränkt, insbesondere im Hinblick auf die innere Strahlenexposition und die Konzentrationsverhältnisse von (modelliertem) Gewebe der RAPs zu denen der Umweltmedien Wasser, Boden und Luft. Die SSK sieht zurzeit keinen Anlass, zusätzliche generische Anforderungen zum Schutz von Tieren und Pflanzen zu empfehlen, die weitere RAPs oder abweichend bemessene RAPs gegenüber der (ICRP 2008) umfassen würden.

In Anbetracht der noch offenen Fragen in den methodischen Konzepten und den wissenschaftlichen Grundlagen empfiehlt sie, zur Prüfung und Bewertung von Strahlenexpositionen auf nicht menschliche Arten zunächst ausschließlich die 12 von ICRP eingeführten RAPs zu verwenden (vgl. Empfehlung 2). Die Betrachtung anderer Organismen oder auch eine Anwendung des ERICA Assessment Tools ist im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen jederzeit möglich.

Die SSK weist darauf hin, dass die Begriffe „Referenzorganismen“ und „repräsentative Lebewesen“ von der ICRP analog auch für den Menschen verwendet werden und die derzeit geltende Definition der Referenzperson in der StrlSchV bei der Umsetzung der Richtlinie 2013/59/Euratom weiter entwickelt werden sollte.

In der Veröffentlichung 108 der ICRP sind für die Referenztiere und -pflanzen ebenfalls die relevanten Expositionspfade und erforderlichen dosimetrischen Daten in den unterschiedlichen Stadien ihres Lebenszyklus und notwendige Modellannahmen zusammengestellt. Die dosimetrischen Daten beruhen auf dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand und beinhalten die Erkenntnisse aus international durchgeführten Studien. Sie können nach Ansicht der SSK unter Berücksichtigung der weiterhin bestehenden Informations- und Datendefizite als eine Konvention betrachtet werden, die sich international im Konsens befindet.

Durch die Verwendung von Strahlungswichtungsfaktoren unterscheidet sich die gewichtete Energiedosis nach ICRP trotz der gewählten Einheitsbezeichnung „Gray“ (Gy) von der rein physikalischen Energiedosis. Da als Strahlungswichtungsfaktor für Alphastrahlung ein RBE-Wert von 10 verwendet wird und nicht menschliche Arten als homogene Körper ohne Unterscheidung von Gewebearten modelliert werden, sind die für RAPs ermittelten Energiedosiswerte nicht mit Äquivalentdosen von Menschen vergleichbar.

Zur Vereinfachung der praktischen Anwendung des Konzeptes der Referenztiere und -pflanzen wurden in der ICRP-Veröffentlichung 108 abgeleitete Dosiskonversionsfaktoren (in (µGy/d)/(Bq/kg)) für die interne und externe Strahlenexposition für 75 Radionuklide angegeben. Die SSK sieht es nicht für erforderlich an, für die konkreten Verhältnisse in Deutschland dieses Nuklidspektrum zu erweitern. Die von der ICRP ausgewählten Radionuklide decken die Radionuklide hinreichend ab, die bei Notfall-Expositionssituationen praktisch relevant sein können, und enthalten alle Radionuklide, die bei langdauernden Expositionssituationen wesentlich zu einer Exposition nicht menschlicher Arten beitragen können. Expositionen durch kurzlebige Radionuklide ohne langlebige Mutternuklide haben für den Schutz nicht menschlicher Arten im Hinblick auf die Akkumulation in den Umweltmedien bzw. die Bioakkumulation praktisch keine Bedeutung.

In der Studie des Öko-Instituts (Küppers et al. 2012) wurden für einige der kurzlebigen Radionuklide aus der Liste der ICRP bei Einhaltung eines Ableitungsgrenzwertes nach § 47 StrlSchV für aquatische Lebensräume Überschreitungen der unteren Werte der DCRL-Bereiche errechnet.

Da K-40 zu den Radionukliden der Veröffentlichung 108 der ICRP (ICRP 2008) zählt, in der Anlage VII Teil D StrlSchV aber nicht enthalten ist, wurden für dieses Radionuklid in (Küppers et al. 2012) keine Berechnungen rechnerisch zusätzlicher Konzentrationen in Umweltmedien vorgenommen. Die entsprechenden Werte wurden daher durch die SSK analog zusätzlich berechnet. Es sei darauf hingewiesen, dass die Dosiskonversionsfaktoren der ICRP nur die äußere Exposition durch K-40 beinhalten, da allgemein von einem Sättigungszustand durch natürliches Kalium in Lebewesen ausgegangen wird.

Bei Lebewesen, die sich sowohl in terrestrischen als auch limnischen Lebensräumen aufhalten, wurde die jeweilige Aufenthaltszeit zu 70 % terrestrisch und 30 % limnisch bei der Referenz-

Ente sowie zu 80 % terrestrisch und 20 % limnisch beim Referenz-Frosch angesetzt. Bei der Referenz-Ratte wurde konservativ vom dauernden Aufenthalt im Boden ausgegangen.

Bei RAPs in terrestrischen und marinen Lebensräumen treten für die 75 Radionuklide der (ICRP 2008) bei Ableitungen, die den Anforderungen nach § 47 StrlSchV genügen, keine Überschreitungen der unteren Werte des DCRL-Bereichs auf. Für die RAPs in limnischen Lebensräumen gilt dies überwiegend, für die RAPs in marinen Lebensräumen wird der untere Wert der DCRL-Bereiche stets unterschritten. Überschreitungen der unteren Werte der DCRL-Bereiche – bei Unterschreitungen der oberen Werte der DCRL-Bereiche – ergeben sich beim Nuklid P-33 für die Referenz-Forelle sowie bei den Nukliden Th-227 und Th-231 für die Referenz-Ente. Für die durch die Studie des Öko-Instituts (Küppers et al. 2012) abgedeckten geplanten Expositionssituationen sieht die SSK keine Erfordernis, zusätzliche Anforderungen des Strahlenschutzes nicht menschlicher Arten in den Strahlenschutz zu implementieren. Die SSK sieht es daher als ausreichend an, bei einer Ausgestaltung des Schutzes nicht menschlicher Arten im Strahlenschutz ausschließlich die 75 von ICRP vorgeschlagenen Radionuklide zu verwenden. Da sich der wissenschaftliche Kenntnisstand und internationale Konzepte des Strahlenschutzes nicht menschlicher Arten derzeit dynamisch entwickeln, empfiehlt die SSK, daraus resultierende Veränderungen zu beobachten und ggf. in Deutschland umzusetzen. Dabei sollten auch Erfahrungen, die sich ggf. aus einer praktischen Anwendung dieser Empfehlung in Deutschland ergaben, einbezogen werden.

In der ICRP-Veröffentlichung 114 werden für die RAPs die erforderlichen Daten präzisiert und für den Anwender übersichtlich zusammengestellt. Sie wird damit zur primären Datenquelle für die Anwendung des ICRP-Konzeptes der Referenztiere und -pflanzen. Die detaillierte statistische Information der Konzentrationsverhältnisse und die Grundlagen zur Ermittlung des besten Wertes für die jeweiligen Konzentrationsverhältnisse tragen zur guten Nachvollziehbarkeit der Datensätze bei. Die Anwendung der in der ICRP-Veröffentlichung 114 aufgeführten Daten wird von der SSK empfohlen. Es ist allerdings davon auszugehen, dass bei neuen Erkenntnissen eine Aktualisierung der Modellparameter und Daten erfolgen wird.

Zusammenfassend wird von der SSK festgestellt, dass das ICRP-Konzept beim derzeitigen Kenntnisstand zur Bewertung der Strahlenexposition von nicht menschlichen Arten am besten geeignet ist. Es erweitert den Schutz der Umwelt, indem es die „Referenzentität Mensch“ durch weitere „Referenz-Biota“ ergänzt. Durch die Beschränkung auf relativ wenige Arten (12 Referenzorganismen) bleibt das System überschaubar und pragmatisch. Das ICRP-Konzept stellt einen internationalen Konsens dar und trägt somit bei der praktischen Anwendung auch zu einer hohen Akzeptanz bei.

In Auswertung der Ergebnisse der durchgeführten wissenschaftlichen Studien der letzten Jahre und unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Vorzüge des ICRP-Konzeptes empfiehlt die SSK:

Empfehlung 2: **Als Grundlage für den Strahlenschutz nicht menschlicher Arten sollen die Empfehlungen der ICRP herangezogen werden. Zur Beurteilung der Strahlenexposition nicht menschlicher Arten sind ausschließlich die in der ICRP-Veröffentlichung 108 aufgeführten 12 Referenztiere und -pflanzen (RAPs) als Vertreter von Organismengruppen und eine gewichtete Energiedosis[14] als Messgröße für die Strahlenexposition von RAPs zu verwenden. Die RAPs werden mit den in Tabelle 4 genannten deutschen Begriffen bezeichnet.**

[14] Mit Strahlungswichtungsfaktoren multiplizierte absorbierte Energiedosis

Zur Ermittlung der Strahlenexposition sind ausschließlich die 75 Radionuklide der ICRP-Veröffentlichung 108, die für diese Nuklide in der ICRP-Veröffentlichung 108 aufgeführten Dosiskonversionsfaktoren sowie die für die zugehörigen chemischen Elemente in der ICRP-Veröffentlichung 114 (ICRP 2009) aufgeführten Konzentrationsverhältnisse zu verwenden. Die als Strahlungsquelle wirksame Kontamination der Umweltmedien muss dazu entweder gemessen worden sein oder muss mit Hilfe von Ausbreitungsmodellen ermittelt werden.

Bis zum Vorliegen international akzeptierter Werte für Strahlungswichtungsfaktoren für nicht menschliche Arten sollen die bisher von ICRP verwendeten Werte aus (Ulanowski et al. 2008) übernommen werden.[15]

Die SSK stellt klar, dass die gewichtete Energiedosis als Messgröße für die Strahlenexposition nicht menschlicher Arten und die effektive Dosis als Messgröße für die Strahlenexposition des Menschen nicht direkt vergleichbar sind, da beiden Größen unterschiedliche Dosiskonzepte und -modelle zugrunde liegen.

5.5.3 Maßstäbe zur Bewertung von Strahlenexpositionen von nicht menschlichen Arten

Als Bezugsgrößen zur Bewertung von Strahlenexpositionen nicht menschlicher Arten sieht die ICRP zum einen die natürliche Umweltradioaktivität an, der nicht menschliche Arten kontinuierlich und „typischerweise“ ausgesetzt sind, zum anderen solche zusätzlichen kontaminationsbedingten Strahlendosen, von denen erwartet wird, dass sie biologische Wirkungen auf diese nicht menschlichen Arten haben können.

In Anbetracht der Kenntnisdefizite und beträchtlicher Unsicherheiten im Hinblick auf Strahlenwirkungen bei niedrigen Dosisraten führt die ICRP als Maßstab zur Bewertung von Strahlenwirkungen bei nicht menschlichen Arten Dosisbereiche ein, die sie als „Derived Consideration Reference Level“ (DCRL) bezeichnet (ICRP 2008). Diese DCRL-Bereiche umfassen jeweils Bandbreiten der Dosisraten von einer Größenordnung und berücksichtigen die unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit von Organismengruppen und die bestehenden Unsicherheiten aufgrund der aktuellen Datenlage.

[15] Bisher gibt es keine international akzeptierten Strahlungswichtungsfaktoren für nicht menschliche Arten. Für die Berechnung der Werte nach Anlage 1 wurden die Strahlungswichtungsfaktoren nach (Ulanowski et al. 2008) angewendet.

Die in (ICRP 2008) eingeführten DCRL-Bereiche wurden in (ICRP 2014) noch einmal leicht modifiziert und umfassen folgende Dosisraten:

- (0,1 – 1) mGy/d; (4 – 40) µGy/h für terrestrische Wirbeltiere und Nadelbäume,
- (1 – 10) mGy/d; (40 – 400) µGy/h für Wildgras, Forelle, Frosch, Plattfisch, Seealge,
- (10 – 100) mGy/d; (400 – 4 000) µGy/h für Biene, Erdwürmer, Krebse.

Die SSK empfiehlt, die DCRL-Bereiche der ICRP als Bewertungsmaßstab von Strahlenexpositionen nicht menschlicher Arten zu verwenden.

Empfehlung 3: **Die Bewertung der Strahlenexpositionen der RAPs soll unter Bezug auf die von der ICRP angegebenen Bereiche der Dosisraten, sogenannten „Derived Consideration Reference Levels“ (DCRLs) für den jeweiligen Referenzorganismus, erfolgen. Diese Werte wurden von der ICRP als Gesamtwerte der Dosisraten (Summe der zivilisatorisch bedingten und natürlichen Dosisbeiträge) eingeführt.**

In der Abbildung 2 sind für die 12 RAPs der ICRP die DCRL-Bereiche gegenübergestellt. Als Vergleich sind in das Diagramm die absorbierten Dosisraten eingezeichnet, die sich ergeben, wenn die jeweiligen RAPs in einer Umwelt leben, deren Aktivitätskonzentrationen um jeweils etwa eine halbe Größenordnung (Faktor 3) über bzw. unter den Werten der natürlichen Umweltradioaktivität im Boden, Süßwasser und Meerwasser nach Tabelle 5 liegen. Diese Wertebereiche werden in Abbildung 2 als Hintergrund (grau) bezeichnet. Zur Ermittlung der Hintergrund-Dosisraten wurden die in Empfehlung 2 beschriebene Vorgehensweise verwendet und die im Abschnitt 5.5.2 beschriebene Verteilung der Aufenthaltszeiten in verschiedenen Lebensräumen für die Referenz-Ente und den Referenz-Frosch berücksichtigt.

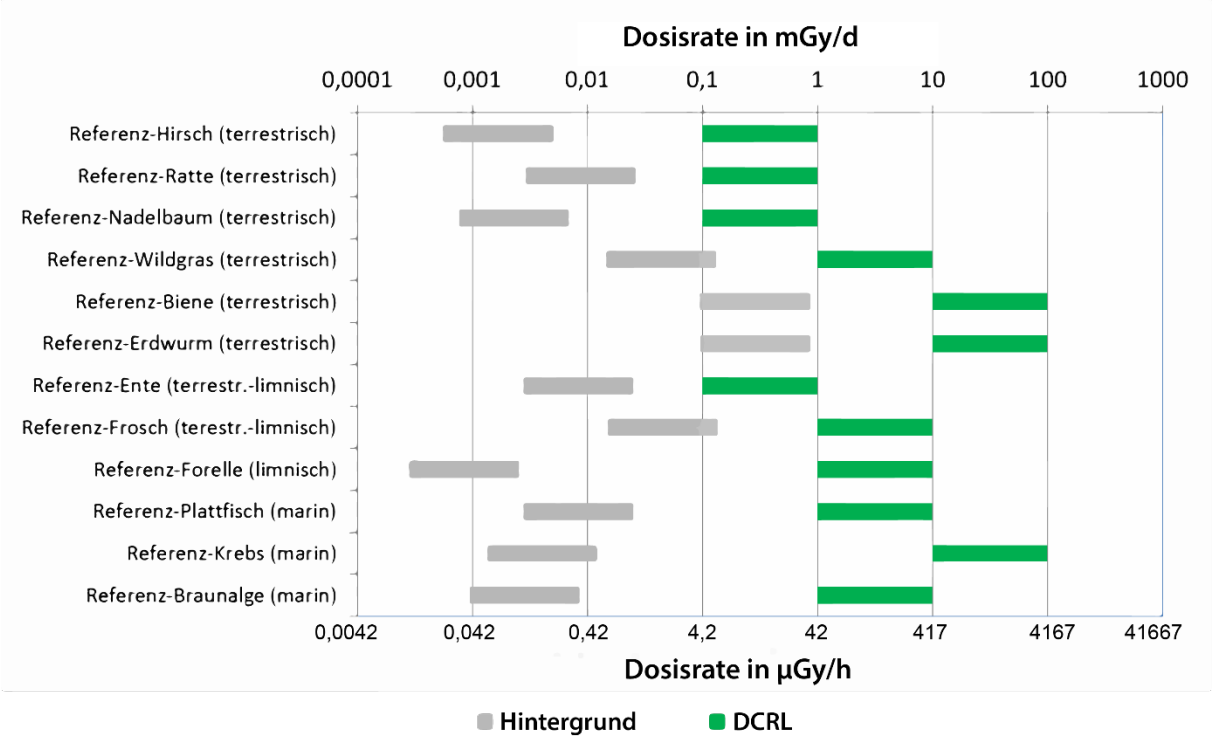

Abb. 2: DCRL-Bereiche nach (ICRP 2014), zugehörige Bereiche des Hintergrunds

Tab. 5: Zur Abschätzung der Hintergrundwerte der absorbierten Dosis von RAPs benutzte Werte der Umweltradioaktivität in Böden, Süßwasser und Meerwasser. Datenquellen: (a) Berechnungsgrundlagen Bergbau (BfS 2010b); (b) Medianwerte von Trinkwasser in Deutschland (BfS 2009); (c) Werte aus (BMU 2012b), (d) Werte aus *(Norse Decom AS 2003)*

	Boden in (Bq/kg) (a)	**Binnengewässer in (Bq/m³) (b)**	**Meerwasser in (Bq/m³) (c)**
Th-232	40	(vernachlässigbar)	< 0,03 (c)
Ra-228	40	4,6	5 (+)
Th-228	40	(vernachlässigbar)	<0,3 (c)
U-238	40	3,2	42 (c)
U-234	40	5,4	47 (c)
Th-230	40	(vernachlässigbar)	0,0025 (c)
Ra-226	40	5,6	5 (d)
Pb-210	40	2,3	0,8 (d)
Po-210	40	1,4	0,8 (d)
U-235	2	0,16	1,9
Pa-231	2	(vernachlässigbar)	(vernachlässigbar)
K-40	400 (#)	40 (#)	12 000 (c)

(#) abgeschätzt aus Daten in (BMU 2012b); (+) übertragen von Ra-226

In den Tabellen 6 bis 9 sind die Dosisratenbereiche und angenommenen Wirkungen nach (ICRP 2014) wiedergegeben.

Aus den Angaben in den Tabellen geht hervor, dass teilweise noch erhebliche Informations- und Kenntnislücken bestehen und die abgeleiteten Referenzbereiche für die einzelnen RAPs auf einer Expertenabschätzung beruhen.

Tab. 6: Dosisraten und Wirkungen [DCRL-Bereiche (grau)] für Referenz-Hirsch, Referenz-Ratte und Referenz-Ente (nach ICRP 2014)

Dosisrate (mGy/d)	**Referenz-Hirsch**	**Referenz-Ratte**	**Referenz-Ente**
>1 000	Mortalität infolge eines hämopoietischen Syndroms (LD50/30 = 1-8 Gy)	Mortalität adulter Tiere infolge eines hämopoietischen Syndroms (LD50/30 = 6-10 Gy)	Mortalität adulter Tiere (LD50/30 = 7-11 Gy)
100-1 000	Multifaktoriell bedingte Lebenszeitverkürzung	Multifaktoriell bedingte Lebenszeitverkürzung	Langzeitwirkungen auf Embryonen in der Entwicklung
10-100	Morbidität erhöht. Möglicherweise verkürzte Lebenszeit. Niedrigerer Fortpflanzungserfolg	Morbidität erhöht. Möglicherweise verkürzte Lebenszeit. Niedrigerer Fortpflanzungserfolg	Morbidität erhöht
1-10	Erhöhte Wahrscheinlichkeit für niedrigeren Fortpflanzungserfolg bedingt durch die Sterilität adulter männlicher Tiere	Wahrscheinlich niedrigerer Fortpflanzungserfolg bedingt durch die verminderte Fertilität adulter männlicher und weiblicher Tiere	Erhöhte Wahrscheinlichkeit für niedrigeren Fortpflanzungserfolg bedingt durch die verminderte Lebensfähigkeit der frisch geschlüpften Nachkommen.
0,1-1	Sehr geringe Wahrscheinlichkeit, dass Wirkungen auftreten	Sehr geringe Wahrscheinlichkeit, dass Wirkungen auftreten	Keine Informationen vorliegend
0,01-0,1	Keine Wirkungen beobachtet	Keine Wirkungen beobachtet	Keine Informationen vorliegend.
<0,01	Natürlicher Hintergrund	Natürlicher Hintergrund	Natürlicher Hintergrund

LD50 ist die Dosis, die 50 % der Individuen tötet; LD50/30 ist die Dosis, die 50 % der Individuen innerhalb eines Zeitraums von 30 Tagen tötet.

Tab. 7: Dosisraten und Wirkungen [DCRL-Bereiche (grau)] für Referenz-Frosch, Referenz-Forelle und Referenz-Plattfisch (nach ICRP 2014)

Dosisrate (mGy/d)	**Referenz-Frosch**	**Referenz-Forelle**	**Referenz-Plattfisch**
>1000	Mortalität adulter Tiere (LD50/30 = 19 Gy); Mortalität von Kaulquappen (LD50/30 = 17 Gy)	Mortalität von Embryonen (LD50 = 0,3-19 Gy) in Abhängigkeit vom Embryonalstadium	Mortalität adulter Tiere (LD50/50 = 30 Gy); Mortalität von Eiern (LD50 = 1 Gy)
100-1000	Mortalität von Eiern (LD50/40 = 19 Gy)	Erhöhte Wahrscheinlichkeit für erhöhte Morbidität	Mit einem gewissen Grad an Mortalität ist bei Larven und frisch geschlüpften Nachkommen zu rechnen
10-100	Keine Information über nachgewiesene Effekte	Bei jungen Fischen ist mit einem gewissen Ausmaß an schädlichen Wirkungen zu rechnen (z. B. verminderte Resistenz gegenüber Infektionen). Niedrigerer Fortpflanzungserfolg	Niedrigerer Fortpflanzungserfolg
1-10	Keine Information über nachgewiesene Effekte	Möglicherweise niedrigerer Fortpflanzungserfolg	Möglicherweise niedrigerer Fortpflanzungserfolg bedingt durch niedrigere Fertilität männlicher Tiere
0,1-1	Keine Informationen vorliegend	Keine Informationen vorliegend	Keine Informationen vorliegend
0,01-0,1	Keine Informationen vorliegend	Keine Informationen vorliegend	Keine Informationen vorliegend
<0,01	Natürlicher Hintergrund	Natürlicher Hintergrund	Natürlicher Hintergrund

Tab 8: Dosisraten und Wirkungen [DCRL-Bereiche (grau)] für Referenz-Biene, Referenz-Krebs und Referenz-Erdwurm (nach ICRP 2014)

Dosisrate (mGy/d)	Referenz-Biene	Referenz-Krebs	Referenz-Erdwurm
>1000	Mortalität adulter Tiere (LD50 = 20-3 000 Gy); Mortalität von Larven (LD50 = 1-2 Gy)	Mortalität adulter Tiere (LD50/40 = 420 Gy)	Mortalität adulter Tiere (LD50/50 = 650 Gy); Mortalität von Eiern (LD50 = 1 Gy)
100-1000	Möglicherweise niedrigerer Fortpflanzungserfolg durch Wirkungen auf Gonaden und durch Mortalität im Puppenstadium	Wahrscheinlich Wirkungen auf Wachstumsraten und niedrigerer Fortpflanzungserfolg	Mit einem gewissen Grad an Morbidität und niedrigerem Fortpflanzungserfolg ist zu rechnen
10-100	Keine Informationen vorliegend.	Keine Informationen vorliegend	Wirkungen unwahrscheinlich
1-10	Keine Informationen vorliegend	Keine Informationen vorliegend	Keine Informationen vorliegend
0,1-1	Keine Informationen vorliegend	Keine Informationen vorliegend	Keine Informationen vorliegend
0,01-0,1	Keine Informationen vorliegend	Keine Informationen vorliegend	Keine Informationen vorliegend
<0,01	Natürlicher Hintergrund	Natürlicher Hintergrund	Natürlicher Hintergrund

Tab. 9: Dosisraten und Wirkungen [DCRL-Bereiche (grau)] für Referenz-Nadelbaum, Referenz-Wildgras und Referenz-Braunalge (nach ICRP 2014)

Dosisrate (mGy/d)	Referenz-Nadelbaum	Referenz-Wildgras	Referenz-Braunalge
>1000	Mortalität (LD50 = 5-16 Gy);	Mortalität (LD50 = 16-22 Gy)	Schädliche Wirkungen bei sehr hoher Dosis zu erwarten. Keine LD50-Daten vorliegend
100-1000	Mortalität einiger Bäume nach längerer Exposition	Niedrigere Fortpflanzungskapazität.	Wirkungen auf Wachstumsrate
10-100	Mortalität einiger Bäume nach sehr langer Exposition, Wachstumsstörungen. Niedrigerer Fortpflanzungserfolg	Niedrigere Fortpflanzungskapazität	Wahrscheinlich Wirkungen auf Wachstumsrate und Fortpflanzungserfolg
1-10	Morbidität, die sich in anatomischen und morphologischen Schäden manifestiert. Längere Exposition führt zu niedrigerem Fortpflanzungserfolg	Keine Informationen vorliegend	Wahrscheinlich Wirkungen auf Wachstumsrate
0,1-1	Keine Informationen vorliegend	Keine Informationen vorliegend	Keine Informationen vorliegend
0,01-0,1	Keine Informationen vorliegend	Keine Informationen vorliegend	Keine Informationen vorliegend
<0,01	Natürlicher Hintergrund	Natürlicher Hintergrund	Natürlicher Hintergrund

Anmerkung: Der für die Referenz-Braunalge angegebene Bereich weicht von dem Bereich ab, der in der ICRP-Veröffentlichung 108 (ICRP 2008) vorläufig angegeben wurde.

Die SSK hat folgende Interpretation des jeweiligen DCRL-Bereichs für die RAPs vorgenommen:

- Wird der untere Wert des jeweiligen DCRL-Bereichs unterschritten, so kann davon ausgegangen werden, dass für nicht menschliche Arten die Strahlenexposition als geringfügig eingestuft werden kann und weitere Betrachtungen zum Strahlenschutz nicht erforderlich sind. Diese Interpretation ist mit dem Geringfügigkeitskonzept im medienbezogenen Umweltschutz kompatibel.
- Die SSK sieht es als ausreichend an, beim derzeitigen Stand der Kenntnisse davon auszugehen, dass bis zu Dosisraten, die den oberen Werten der jeweiligen DCRL-Bereiche entsprechen, nicht menschliche Arten (d. h. Populationen) bzw. die Umwelt (Ökosysteme) hinreichend geschützt sind.
- Werden die oberen Werte der DCRL-Bereiche der ICRP überschritten, so können nachteilige Effekte nicht mehr ausgeschlossen werden und der Schutz der Populationen bzw. Ökosysteme kann gefährdet sein. Hier ist eine nähere Bewertung der speziellen Situation erforderlich und es können Maßnahmen zur Verringerung der Strahlenexposition nicht menschlicher Arten erforderlich sein.
- Bei Kontaminationen der Umweltmedien, die zu Strahlenexpositionen im Bereich der oberen Werte der DCRL-Bereiche oder darüber liegen, trägt der natürliche Hintergrund in der Regel nur in einem vernachlässigbaren Maße zur Strahlenexposition bei.

Die SSK hat auch zur Kenntnis genommen, dass die Strahlenexpositionen von einzelnen Arten, deren Lebensraum oder Lebensweise sich von denen der RAPs unterscheidet, bei detaillierter Betrachtung zu höheren Dosiswerten als denen der RAPs führen kann (siehe Abschnitt 5.4.2 und Küppers et al. 2012). Sie sieht aber keine ausreichenden Befunde, die es erforderlich machen, das hier vorgeschlagene Bewertungskonzept zu verändern. Damit wird vor allem der Bewertungsunsicherheit infolge von Kenntnislücken, die im Hinblick auf Dosis-Wirkungs-beziehung bestehen, Rechnung getragen.

Aus den dargestellten Kenntnisdefiziten, die auch die im Abschnitt 5.5.1 beschriebenen Defizite und Unsicherheiten einschließen, und in Kenntnis der aktuell dynamischen Entwicklung des Kenntnisstandes durch laufende Forschungsvorhaben ergibt sich nach Auffassung der SSK die Notwendigkeit, die von ihr in diesem Dokument empfohlene Methodik aufgrund aktueller Erkenntnisse ggf. anzupassen[16].

Wie die Daten der Tabellen 6 bis 9 zeigen, sind bei radioaktiven Kontaminationen der Umweltmedien, die zu Expositionen oberhalb der oberen Werte der DCRL-Bereiche führen, schädliche Effekte bei einigen RAPs zu erwarten. Obwohl unmittelbare Aussagen zur Gefährdung von Populationen und Ökosystemen in konkreten Einzelfällen damit nicht möglich sind, sollten solche Expositionen im Sinne eines Schutzes der Umwelt im Strahlenschutz vermieden werden.

[16] In der ICRP werden die Arbeiten zum Strahlenschutz nicht menschlicher Arten gegenwärtig aktiv weitergeführt. Es ist eine Aktualisierung der Dosiskoeffizienten für nicht menschliche Arten in Vorbereitung (ICRP Draft Report for Consultation "Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation, http://www.icrp.org/docs/TG74DraftForPublicConsultation(4July2016).pdf).

Daher empfiehlt die SSK:

Empfehlung 4: **Bei Strahlenexpositionen aller für eine Expositionssituation relevanten RAPs unterhalb der oberen Werte der jeweiligen DCRL-Bereiche kann davon ausgegangen werden, dass die Einhaltung der Schutzziele, inklusive der Erhaltung der Arten und der Bewahrung der biologischen Vielfalt, gewährleistet ist. Davon kann ausgegangen werden, wenn die in Anlage 1 aufgeführten Werte bei Anwendung der Summenformel für Radionuklidgemische nicht überschritten werden.**

Die Ergänzung der Empfehlung 4 durch die Anlage 1 soll für den potenziellen Anwendungsfall die Prüfung der Einhaltung der Schutzziele erleichtern. Damit können die Radionuklidkonzentrationen in den Umweltmedien für die typischen Lebensräume der relevanten RAPs auf einfache Weise bewertet werden. Das entspricht auch dem stufenweisen Vorgehen unter Verwendung eines Screenings zur Prüfung eines Gefährdungsverdachtes.

Die in Empfehlung 4 formulierte Anforderung, dass die Strahlenexposition für alle relevanten RAPs unterhalb der jeweiligen DCRL-Bereiche liegen muss, um die Schutzziele einzuhalten, ist fallkonkret auf diejenigen RAPs anzuwenden, deren Lebensraum von Kontaminationen betroffen ist oder betroffen sein kann. Für jeden Lebensraum sollte diese Anforderung aber in der Regel für alle diesen Lebensraum repräsentierenden RAPs erfüllt sein. Ein Ausschluss bestimmter Artengruppen (z. B. große Säugetiere) ist nach Meinung der SSK nur dann gerechtfertigt, wenn ein Vorkommen dieser Artengruppe an dem betreffenden Standort mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann.

5.5.4 Schutz nicht menschlicher Arten bei unterschiedlichen Expositionssituationen

Um sicherzustellen, dass das aktualisierte Strahlenschutzkonzept für den Schutz des Menschen (ICRP 2007) mit dem Schutz nicht menschlicher Arten kompatibel bleibt und zu kohärenten Entscheidungen führt, wurde in der ICRP-Veröffentlichung 124 (ICRP 2014) ein Rahmenkonzept entwickelt, das den Schutz vor jeder Expositionsquelle in jeder Expositionssituation einheitlich behandelt. In der ICRP-Veröffentlichung 124 wurde der Schutz der Umwelt für unterschiedliche Expositionssituationen präzisiert.

Die SSK vertritt die Auffassung, der ICRP-Empfehlung folgend, dass die unterschiedlichen Expositionssituationen vom Grundsatz her beim Schutz der nicht menschlichen Arten auch differenziert betrachtet werden müssen. Damit werden die bestehenden Schutzkonzepte für den Menschen vom Grundsatz her zwar erweitert, aber nicht grundlegend geändert.

Die SSK schließt sich der Empfehlung der ICRP (ICRP 2014) an, dass keine Begrenzung der Dosis für nicht menschliche Arten vorgenommen werden sollte. Die von der ICRP genannten Gründe, dass das im Strahlenschutz des Menschen praktizierte Schutzkonzept der Dosisbegrenzung im Schutz der Umwelt nicht unmittelbar umsetzbar ist und die hoch variable Natur der Expositionssituationen es schwierig macht, wissenschaftlich begründete Grenzen festzulegen, werden von der SSK geteilt.

a) *Geplante Expositionssituationen*:
Unter Berücksichtigung der bisherigen Regelungen im deutschen Strahlenschutz für geplante Expositionssituationen konnte mit generischen Rechnungen gezeigt werden, dass bei Einhaltung der genehmigungsfähigen Ableitungen nach § 47 StrlSchV auch die oberen DCRL-Bereiche für die nicht menschlichen Arten unterschritten werden und folglich bei geplanten Expositionssituationen nach bisherigen Maßstäben auch der Schutz der nicht menschlichen Arten unter Anwendung des ICRP-Konzeptes gewährleistet ist. Die SSK sieht vor diesem

Hintergrund und in Kenntnis der wissenschaftlich noch nicht abschließend geklärten Wirkungen keine Notwendigkeit, Grenzwerte für nicht menschliche Arten einzuführen. Sie empfiehlt daher:

Empfehlung 5: **Grenzwerte für die Strahlenexposition nicht menschlicher Arten sollen nicht eingeführt werden.**

Empfehlung 6: **Bei Anwendung des geltenden Strahlenschutzregelwerks und bei geplanten Expositionssituationen im Sinne der Richtlinie 2013/59/Euratom werden die oberen Werte der DCRL-Bereiche nicht überschritten. Für diese Expositionssituationen kann daher auf Betrachtungen zur Strahlenexposition nicht menschlicher Arten verzichtet werden.**

Empfehlung 5 soll sicherstellen, dass die DCRL-Bereiche bzw. die entsprechenden oberen Werte nicht, entgegen ihrer im ICRP-Konzept begründeten Bestimmung, als Grenzen, die nicht überschritten werden dürfen, gehandhabt werden.

Empfehlung 6 weicht von (ICRP 2014) unter Berücksichtigung der spezifischen Situation zugelassener Tätigkeiten in Deutschland in der praktischen Umsetzung bei geplanten Expositionssituationen ab, ohne zu einem anderen Schutzziel zu führen. Die Empfehlung basiert auf generischen Berechnungen der SSK für die RAPs der ICRP und mit den von der ICRP empfohlenen Parametern. Die in Deutschland zum Schutz des Menschen bei Berechnungen der Dosis mit der AVV zu § 47 StrlSchV maximal zulässigen Kontaminationen von Wasser, Boden und Luft wurden aus (Küppers et al. 2012) übernommen.

b) Bestehende Expositionssituationen:
Bei bestehenden Expositionssituationen kann mit generischen Rechnungen nicht gezeigt werden, dass die oberen Werte der DCRL-Bereiche sicher eingehalten werden, so dass daraus folgende Empfehlung resultiert:

Empfehlung 7: **Bei bestehenden Expositionssituationen sollen die RAPs im Optimierungsprozess angemessen berücksichtigt werden, sofern als Folge anthropogener Veränderungen Expositionen oberhalb der oberen Werte der DCRL-Bereiche auftreten.**

Diese Empfehlung befindet sich vom Grundsatz her in Übereinstimmung mit der ICRP-Veröffentlichung 124, in der empfohlen wird, bei bestehenden Expositionssituationen durch Maßnahmen in einem Optimierungsprozess die Dosis für die nicht menschlichen Arten soweit zu verringern, dass die Dosisraten für die relevanten RAPs innerhalb der jeweiligen DCRL-Bereiche liegen. Bei der Entscheidungsfindung zur Optimierung ist neben den Kosten der Maßnahmen und anderen Aspekten der Verhältnismäßigkeit sowie der öffentlichen Akzeptanz vor allem zu beachten, dass Maßnahmen, die zu einer Verringerung bestehender Expositionen führen, in der Regel mit Eingriffen in den Naturhaushalt verbunden sind, die zur Störung oder Zerstörung existierender Lebensräume führen. Solche Maßnahmen sind daher vor allem dann gerechtfertigt, wenn sie prioritär dem Schutz der menschlichen Gesundheit dienen.

Die Bewertung von bestehenden Expositionssituationen kann nach Einschätzung der SSK neben radioökologischen Modellen auch Messwerte der Radioaktivität in Umweltmedien erfordern, die für die Ermittlung der Strahlenexposition des Menschen bisher nicht erforderlich waren. Das gilt insbesondere, da die Richtlinie 2013/59/Euratom die natürlich vorkommenden Radionuklide als integralen Teil des Strahlenschutzsystems behandelt und diese Gruppe von Radionukliden bei geplanten und bestehenden Expositionssituationen in Zukunft stärker berücksichtigt werden muss. Die in solchem Zusammenhang zu beprobenden Orte sind so

auszuwählen, dass besondere Expositionssituationen von nicht menschlichen Arten auch angemessen erfasst werden. Beurteilungsrelevant sind dabei stets die gesamten Strahlenexpositionen aus natürlicher Radioaktivität und kontaminationsbedingtem Beitrag.

c) *Notfall-Expositionssituationen*:
In Notfall-Expositionssituationen sind einerseits die Konsequenzen des Notfalles selbst zu bewerten, andererseits sind Maßnahmen zur Verringerung von Schäden im Rahmen einer Notfallvorsorge zu planen.

Schwerwiegende Effekte auf nicht menschliche Arten sind erst bei Strahlenexpositionen, die deutlich oberhalb der jeweiligen DCRL-Bereiche liegen, zu erwarten. Sie können in frühen Phasen eines Notfalls in der Regel nicht vermieden werden. Bei der Planung von Maßnahmen der Notfallvorsorge steht der Schutz des Menschen grundsätzlich im Vordergrund.

In späten Phasen von Notfall-Expositionssituationen, in denen die Menschen aus dem Notfallgebiet evakuiert sind, kann es nötig sein, Entscheidungen z. B. zur Ableitung radioaktiv kontaminierter Medien (Wasser, Luft) zu treffen, mit denen Lebensräume oberhalb der oberen Werte der DCRL-Bereiche kontaminiert werden. Solche Entscheidungen, mit denen eine Tätigkeit im Zusammenhang mit Notfall-Expositionssituationen und Notfallmaßnahmen eingeführt wird und mit denen ein Expositionspfad eröffnet oder verändert wird, erfordern eine Abwägung von Nutzen und Schaden der dazu beitragenden Handlungen unter Berücksichtigung ökologischer, ökonomischer und sozialer Faktoren (siehe auch SSK 2006). In einem solchen Abwägungsprozess sollte die Wirkung von Strahlenexpositionen auf nicht menschliche Arten grundsätzlich nicht vernachlässigt werden. Allerdings ist auch in solchen Fällen nach Meinung der SSK der Schutz des Menschen prioritär. Soweit allerdings in späten Phasen einer Notfallsituation Planungen zur Verringerung bestehender Kontaminationen von Gewässern oder Boden vorgenommen werden, sollte der Schutz nicht menschlicher Arten in Analogie zu den Vorgehensweisen bei bestehenden Expositionssituationen behandelt werden.

Daraus resultiert folgende Empfehlung:

Empfehlung 8: **In Notfall-Expositionssituationen muss der Strahlenschutz des Menschen stets im Vordergrund stehen. Soweit bei Notfällen Kontaminationen von Wasser, Boden oder Pflanzen eingetreten sind, sollten Maßnahmen zur Beseitigung solcher Kontaminationen nur erwogen werden, wenn sie unmittelbar dem Schutz des Menschen dienen. Der Schutz nicht menschlicher Arten sollte jedoch bei der Prüfung sonstiger Handlungsoptionen in späten Phasen der Notfall-Expositionssituationen einbezogen werden.**

6 Bewertung radioaktiver Kontaminationen von Umweltmedien

6.1 Umweltmedien als Schutzgüter im Strahlenschutz

Ein eigenständiger Schutz der Umweltmedien um ihrer selbst willen war bisher kein Aspekt im Strahlenschutz, da stets davon ausgegangen wurde, dass Wasser, Boden und Luft nicht selbst durch ionisierende Strahlung geschädigt werden. Sie sind aber durch die Begrenzung der Strahlenexposition des Menschen bei Ableitungen radioaktiver Stoffe implizit Teil des Strahlenschutzsystems, da sie Teil der Ausbreitungspfade von einer Strahlenquelle zum Menschen sind.

Wie im Abschnitt 4.2 beschrieben, ist der Schutz der Umweltmedien Wasser, Boden und Luft vor Kontaminationen ein Grundgedanke des Umweltschutzes in Deutschland und in der

europäischen Union. Bei der Ausgestaltung dieses Schutzes zeigte sich, dass das Schutzziel menschliche Gesundheit nicht abdeckend ist. Die Funktionen der Umweltmedien Wasser, Boden und Luft sind vielfältig und umfassen, außer der Funktion Lebensgrundlage für den Menschen zu sein, weitere natürliche Funktionen z. B. als Lebensgrundlage und Lebensraum für Tiere, Pflanzen und andere Organismen, als Bestandteil des Naturhaushalts und seiner Stoffkreisläufe, als Reaktionsraum und Speichermedium für Stoffe. Böden und z. T. auch Gewässer haben darüber hinaus Nutzungsfunktionen als Rohstofflagerstätte, Fläche für Siedlung und Erholung, land-, forst- oder fischereiwirtschaftliche Nutzung sowie als Standort für sonstige wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, wie Verkehr, Ver- und Entsorgung. Der Schutz der Umweltmedien im medienbezogenen Umweltschutz ist daher wesentlich breiter angelegt als der Schutz vor Kontamination und auf die Sicherung der vielfältigen Funktionen ausgerichtet.

Obwohl der Strahlenschutz nur Einfluss auf die Begrenzung oder Reduzierung radioaktiver Kontaminationen der Umweltmedien nehmen kann, hält es die SSK für angemessen, den Schutz der Umweltmedien im Strahlenschutz stärker zu betonen:

Empfehlung 9: Die SSK empfiehlt, die Umweltmedien Wasser, Boden und Luft als Schutzgüter im Strahlenschutz zu betrachten.

Angelehnt an ihre Empfehlung (SSK 2003a) drückt die SSK damit aus, dass sie dem Schutzgedanken des in Deutschland etablierten Umweltrechtes folgt und den Schutz der Umweltmedien losgelöst vom unmittelbaren Schutz der menschlichen Gesundheit als nötig erachtet.

Als Konsequenz dieser Empfehlung sieht die SSK, dass

- Kontaminationen der Umweltmedien auch daran bemessen werden müssen, dass Umweltmedien langfristig als Lebensraum von nicht menschlichen Arten dienen können, und
- auch die Erhaltung der Nutzungsfunktionen von Umweltmedien als Teil eines Strahlenschutzes der Umwelt anzusehen ist.

6.2 Maßstäbe zum Schutz der Umweltmedien

Zum Schutz der Umweltmedien vor Kontamination sind im medienbezogenen Umweltschutz ökologische Kriterien (eine Geringfügigkeit ökotoxikologischer Effekte) und humantoxikologische Anforderungen, die eine dauerhaft gefahrlose Nutzung der Umweltmedien durch Menschen sicherstellen sollen (humantoxikologische Kriterien), üblich.

Durch die Regelungen zur Begrenzung der Strahlenexposition von Personen der Bevölkerung ist implizit auch ein Schutz von Wasser, Boden und Luft vor radioaktiver Kontamination nach humantoxikologischen Kriterien im Strahlenschutz enthalten. Dabei steht als wichtigste gesundheitliche Wirkung die Kanzerogenität von ionisierender Strahlung bei geringen Expositionen im Mittelpunkt. In diesem Zusammenhang wurde bereits früher die Frage gestellt, ob Maßstäbe des Strahlenschutzes den im medienbezogenen Umweltschutz etablierten Maßstäben für Erkrankungsrisiken entsprechen (Jacob et al. 1997). Unter Bezug auf solche Erkrankungsrisiken wurden auch bereits Prüfwerte zur Beurteilung radioaktiver Bodenkontaminationen abgeleitet und angewandt (Gellermann et al. 2010). Es ist aber bisher nicht geklärt, ob dieser unmittelbare Vergleich von Maßstäben, die bei der Bewertung chemisch-toxischer Kanzerogene anzuwenden sind, mit den Maßstäben des Strahlenschutzes kompatibel ist.

Der Aspekt der ökotoxikologischen Wirkungen radioaktiver Kontaminationen wird im bisherigen System des Strahlenschutzes nicht behandelt. Für eine Einordnung des Strahlenschutzes nicht menschlicher Arten in die etablierten Regelungsfelder des Wasser- und Bodenschutzes ist daher zu klären, wie die DCRL-Werte konzeptionell zu interpretieren sind.

Kanzerogene Schadstoffe im Wasser-, Boden- und Immissionsschutz

Den Schutzkonzepten im Wasser-, Boden- und Immissionsschutz bezüglich des Schutzgutes menschliche Gesundheit liegen Bewertungen der humantoxischen Wirkung chemisch-toxischer Kontaminanten zugrunde, die bei kanzerogenen Stoffen genau wie im Strahlenschutz bei Radionukliden von einer schwellenfreien Schadwirkung ausgehen.

Für die Bewertung kanzerogener Noxen im Boden wird in den Methoden zur Ableitung von Prüfwerten nach (BBodSchV 2012) ein akzeptables zusätzliches Krebsrisiko von 1×10^{-5} bezogen auf 70 Jahre Lebenszeit zugrunde gelegt (UBA 2007). Im Unterschied zum Strahlenschutz, bei dem die effektive Dosis die Wirkung aller Radionuklide zusammenfasst, wird im Bodenschutz allerdings das Erkrankungsrisiko von Einzelstoffen separat betrachtet.

Im Wasserrecht geht die Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) von einem Ansatz aus, bei dem geringfügige Kontaminationen nach humantoxikologischen Aspekten dann gegeben sind, wenn die Anforderungen der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) eingehalten sind (LAWA 2004). Die Ableitung der Grenzwerte kanzerogener Stoffe im Trinkwasser orientiert sich wiederum an einem akzeptablen zusätzlichen Krebsrisiko von 1×10^{-5} bezogen auf 70 Jahre Lebenszeit (WHO 2006). Für die Ableitung von Grenzwerten von Radionukliden im Trinkwasser benutzt die WHO allerdings nicht diesen Risikobezug, sondern legt einen Wert von 1×10^{-1} mSv im Jahr unter Verweis auf den unteren Referenzwert von bestehenden Expositionssitutationen nach (ICRP 2007) von 1 mSv/Jahr fest, der von der Summe aller im Trinkwasser gelösten Radionuklide mit Ausnahme von Radon eingehalten werden soll. Das damit verbundene Lebenszeitrisiko von ca. 1×10^{-4} sieht die WHO als gering im Vergleich zu anderen Gesundheitsrisiken an (WHO 2006).

Als Maßstab zur Bewertung von Kontaminationen der Luft mit krebserregenden Substanzen wird in Deutschland (LAI 2004) ein Gesamtrisiko von 4×10^{-4} (1:2 500) bis 1×10^{-3} (1:1 000) herangezogen, das nach 70 Jahren konstanter Exposition nicht überschritten werden sollte. Dieses Gesamtrisiko soll durch das Gemisch aller kanzerogenen Stoffe in der Luft eingehalten werden. Zur praktischen Begrenzung der Luftkontamination werden aus dem Gesamtrisiko für die wichtigsten kanzerogenen Luftschadstoffe einzelstoffbezogene Beurteilungswerte abgeleitet (LAI 2004).

Obwohl das Krebsrisiko durch kanzerogene Schadstoffe im Wasser-, Boden- und Immissionsschutz als additives (Zusatz-)Risiko verstanden wird, welches die Grundwahrscheinlichkeit, an Krebs zu erkranken, erhöht (UBA 2007, LAI 2004), werden zur Beurteilung von realen Kontaminationssituationen die Hintergrundwerte einbezogen und nicht nur, wie im Strahlenschutz des Menschen üblich, das „Added Risk“ betrachtet.

Aufgrund der genannten konzeptionellen Unterschiede sind nach Ansicht der SSK die im medienbezogenen Umweltschutz benutzten Risikoschwellen für geringfügige (akzeptable) Konzentrationen kanzerogener Noxen in den Umweltmedien nicht geeignet, um sie mit radiologischen Risiken formal zu vergleichen.

Ökotoxikologische Maßstäbe zur Bewertung von Umweltkontaminationen

Die Ökotoxikologie untersucht und bewertet die durch Chemikalien verursachten Wirkungen auf nicht menschliche Arten, Lebensgemeinschaften und Ökosysteme. Da solche Wirkungen auf allen biologischen Ebenen, angefangen vom Molekül bis hin zu Ökosystemen, auftreten, werden die Wirkungen auf ausgewählte Vertreterorganismen mit standardisierten Methoden erfasst und interpretiert (Fent 2013). Diese zumeist im Labor ausgeführten Toxizitätstests dienen zur Beurteilung neuer Stoffe, die in der EU vor einem Inverkehrbringen aufgrund gesetzlicher Regelungen (REACH 2006) bezüglich ihrer Umweltgefährdung zu prüfen sind.

Bei der Entwicklung des Strahlenschutzes für nicht menschliche Arten haben sich sowohl die europäischen Forschungsprojekte (s. Abschnitt 5.3.1) als auch die ICRP (s. Abschnitt 5.5) an den Konzepten der chemischen Ökotoxikologie orientiert, ohne allerdings die dort genutzten Begriffe und Konzepte vollständig zu übernehmen.

Die SSK sieht es aufgrund folgender Analogien des Strahlenschutzes nicht menschlicher Arten und der ökotoxikologischen Ansätze im medienbezogenen Umweltschutz für gerechtfertigt an, bei Einhaltung der Anforderungen an den Schutz nicht menschlicher Arten im Strahlenschutz davon auszugehen, dass die im medienbezogenen Umweltschutz enthaltenen ökotoxikologischen Kriterien eingehalten sind:

- Die ökotoxikologischen Bewertungen beruhen auf der Prüfung von Wirkungen von Chemikalien auf diverse Modellorganismen (Analogie zu RAPs).
- Grundlegende Kenngrößen für die Toxizität werden aus Laboruntersuchungen abgeleitet. Gebräuchliche Kennziffern sind die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit letale Dosis (oder Konzentration) LD50[17] bzw. LC50 (für Wahrscheinlichkeiten des Todes von 50%), die „Lowest Observed-Adverse Effect Level/Concentration“ (LOAEL/LOAEC) sowie die Expositionen bzw. Konzentrationen, bei denen keine schädlichen Effekte beobachtet werden („No Observed-Adverse Effect Level/ Concentration“, NOAEL/NOAEC). Die mittlere letale Dosis (LD50) wird bei der Quantifizierung von Strahlenwirkungen ebenfalls benutzt (s. Tab. 6 bis Tab. 9). Den NOAEC entsprechen im Strahlenschutz der nicht menschlichen Arten die PNEC. Die durch die ICRP eingeführten oberen Werte der DCRL-Bereiche können, obwohl sie methodisch nicht so abgeleitet wurden, nach den in ICRP-Veröffentlichung 124 dargestellten Dosis-Wirkungsbefunden (s. Tab. 6 bis Tab. 9) als Analogie zu LOAEC interpretiert werden.
- Eine Schwierigkeit bei der Festlegung von LOAEL/NOAEL besteht in der Ökotoxikologie ähnlich wie im Strahlenschutz nicht menschlicher Arten in der Entscheidung darüber, ob eine Wirkung als substanzbedingte schädliche Wirkung anzusehen ist. Hier sind im Einzelfall Expertenbeurteilungen nötig, in die auch Kenntnisse über Zusammenhänge von Wirkungen und Sensitivitäten bestimmter Endpunkte eingehen. Von daher kann weder in der Ökotoxikologie noch im Strahlenschutz der Umwelt ein rein formalisiertes wissenschaftlich deduzierendes Vorgehen praktiziert werden.

Insgesamt ergibt sich aus den etablierten Prüf- und Bewertungsmethoden der Ökotoxikologie ein konzeptioneller Rahmen, der grundsätzlich auch auf radioökologische Bewertungen übertragen werden kann, wobei festzustellen ist, dass im Strahlenschutz der nicht menschlichen Arten sowohl durch Laboruntersuchungen als auch durch Feldbeobachtungen bei radioaktiven Kontaminationen von Ökosystemen ein wissenschaftlicher Kenntnisstand vorliegt, der weit

[17] Der LD50-Wert gibt die Menge eines Stoffs oder einer Strahlung an, bei der 50 Prozent einer Population bestimmter Lebewesen sterben.

über die stoffbezogenen Kenntnisse hinausreicht, die in den meisten Fällen bei der ökotoxikologischen Bewertung von Chemikalien vorhanden sind.

Klassifizierung von radioaktiven Umweltkontaminationen

Soweit der Schutz der Umwelt im Strahlenschutz sich auf direkte schädliche Wirkungen von ionisierender Strahlung bezieht, ist es erforderlich, dafür Maßstäbe festzulegen. Diese Maßstäbe können an der sowohl im Umweltschutz als auch im Strahlenschutz etablierten Einteilung in einen Bereich akzeptabler Kontaminationen bzw. Risiken, einen Bereich tolerabler Kontaminationen und einen Bereich gefährlicher Kontaminationen ausgerichtet werden. Im medienbezogenen Umweltschutz wird zumeist nur der Bereich konkret ausgewiesen, in dem Kontaminationen nach den in den jeweiligen Sachbereichen anzuwendenden Kriterien maximal geringfügige Wirkungen verursachen und damit grundsätzlich akzeptabel sind („Geringfügigkeitsbereich"). Die Festlegung von Gefahrenschwellen, deren geplante Überschreitung grundsätzlich nicht zulässig ist und deren Überschreitung bei früher eingetretenen Kontaminationen Maßnahmen erfordert, wird vorwiegend einzelfallbezogen umgesetzt. Bei der Entscheidungsfindung über Maßnahmen zur Verringerung bestehender Kontaminationen sind in der Regel die geeigneten Maßnahmen nach Gesichtspunkten der Verhältnismäßigkeit und Angemessenheit abzuwägen. Diese Klassifizierung sieht die SSK auch für radioaktive Umweltkontaminationen für geeignet an.

Bewertung von radioaktiven Kontaminationen der Umweltmedien

Die im Zusammenhang mit dem Schutz nicht menschlicher Arten eingeführten Methoden und Maßstäbe zur Beurteilung von radioaktiven Kontaminationen der Umweltmedien Wasser und Boden sind nach Meinung der SSK geeignet, den Schutz der Umweltmedien im Strahlenschutz um eine an die Ökotoxikologie angelehnte Komponente zu ergänzen. Die SSK empfiehlt daher:

Empfehlung 10: **Radioaktive Kontaminationen der Umweltmedien Wasser und Boden durch Radionuklide sollten in geplanten Expositionssituationen als geringfügig im Hinblick auf den Schutz nicht menschlicher Arten sowie von Ökosystemen angesehen werden, wenn die unteren Werte der DCRL-Bereiche nicht überschritten werden. Davon kann ausgegangen werden, wenn jeweils ein Zehntel der in Anlage 1 aufgeführten Werte bei Anwendung der Summenformel für Radionuklidgemische nicht überschritten wird.**

Soweit in bestehenden oder Notfall-Expositionssituationen der Schutz nicht menschlicher Arten sowie von Ökosystemen separat vom Schutz des Menschen zu beurteilen ist, sollen als Maßstab die oberen Werte der DCRL-Bereiche herangezogen werden.

Durch den Bezug auf die unteren Werte der DCRL-Bereiche sieht die SSK in Bewertung der im Abschnitt 5.5.2 dargestellten Dosis-Wirkungsbeziehungen den im medienbezogenen Umweltschutz etablierten Ansatz der geringfügigen Wirkungen auf nicht menschliche Arten und Ökosysteme als gegeben an. Radioaktive Kontaminationen, die zu Dosisraten unterhalb der unteren Werte der DCRL-Bereiche führen, sind daher als grundsätzlich akzeptabel für Ökosysteme anzusehen.

Im Unterschied zu den Umweltmedien Wasser und Boden ist die Luft kein permanenter Lebensraum von Organismen. Aus diesem Grund sind im Zusammenhang mit dem Schutz der Luft nur humantoxikologische Anforderungen im Immissionsschutz festgelegt.

Empfehlung 11: Die SSK hält es nicht für erforderlich, Werte zur Beurteilung radioaktiver Kontaminationen der Luft nach ökotoxikologischen Gesichtspunkten einzuführen.

6.3 Sonderfall: Maßstäbe zur Beurteilung radioaktiver Kontaminationen im Grundwasser

Um bundesweit einen einheitlichen Vollzug bei der Bewertung von vorhandenen oder zu erwartenden Grundwasserverunreinigungen zu gewährleisten, wurden durch die Bund/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) Kriterien erarbeitet (LAWA 2004). Einige methodische Grundlagen sowie der begriffliche und rechtliche Rahmen, in dem diese Kriterien anzuwenden sind, wurden inzwischen weiter entwickelt (Zeddel et al. 2016). Zentrales Kriterium im Konzept der LAWA zur Beurteilung von Grundwasserverunreinigungen ist die Geringfügigkeitsschwelle (GFS). Die GFS wird in (LAWA 2004) definiert als *„Konzentration, bei der trotz einer Erhöhung der Stoffgehalte gegenüber regionalen Hintergrundwerten keine relevanten ökotoxischen Wirkungen auftreten können und die Anforderungen der Trinkwasserverordnung oder entsprechend abgeleiteter Werte eingehalten werden.“* Durch diesen Maßstab soll Grundwasser, soweit es aufgrund seiner natürlichen Stoffgehalte als Trinkwasser nutzbar ist, langfristig für den menschlichen Gebrauch nutzbar bleiben und darüber hinaus als Lebensraum intakt gehalten werden.

Bei der Festlegung der Geringfügigkeitsschwellen sollen gemäß LAWA (2004) human- und ökotoxikologische Daten zusammengetragen und beurteilt werden. Vorrangig sollen breit konsentierte Daten verwendet werden, d. h. *„gesetzlich geregelte Werte werden gegenüber Werten auf der Basis einer gutachterlichen Bewertung bevorzugt.“*

Durch diesen unmittelbaren Bezug auf die Anforderungen der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001), den Vorrang gesetzlicher Werte bei der Festlegung der Geringfügigkeitsschwelle und die in Anlage 3a der TrinkwV enthaltenen Parameterwerte für Radon-222, Tritium und Richtdosis sind Maßstäbe definiert, deren formale Anwendung im Wasserrecht nach Meinung der SSK zu nicht sachgerechter Bewertung radioaktiver Kontaminationen im Grundwasser führen kann. So beziehen sich die Parameterwerte der Anlage 3a der TrinkwV auf eine im Trinkwasser messbare Konzentration von Radionukliden. Eine Anwendung dieser Maßstäbe auf eine Bewertung von Kontaminationssituationen im Grundwasser nach dem LAWA-Konzept bezieht eine im Grundwasser gemessene oder modelltechnisch erwartete Konzentration auf die Parameterwerte der Anlage 3a der TrinkwV. Eine Differenzierung von natürlich vorkommenden Radionuklidkonzentrationen und den im Strahlenschutz betrachteten anthropogenen Beiträgen zur Gesamtkonzentration ist im Konzept der LAWA nicht berücksichtigt.

Nach (Zeddel et al. 2016) ergeben sich aus dem Konzept der Geringfügigkeitsschwellenwerte Bezüge in diverse Rechtsbereiche, darunter neben dem Wasserrecht auch in das Abfallrecht und das Bodenschutzrecht.

Im weiterentwickelten Konzept der LAWA (Zeddel et al. 2016) dienen die Geringfügigkeitsschwellen, anders als noch im Dokument (LAWA 2004) nicht mehr zur unmittelbaren Abgrenzung geringfügiger Kontaminationen von schädlichen Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit. Vielmehr wird unter Verweis auf das Wasserhaushaltsgesetz (WHG 2009) zwischen nachteiligen und schädlichen Veränderungen unterschieden. Die GFS-Werte dienen demnach zur Prüfung, ob *„mit prognostizierten oder ermittelten Stoffkonzentrationen aufgrund einer beabsichtigten Handlung oder konkret beantragten Grundwasserbenutzung eine nachteilige Veränderung der (Grund-) Wasserbeschaffenheit zu besorgen ist.“* Im

Zusammenhang mit dem vorsorgenden Grundwasserschutz untersetzt die Geringfügigkeitsschwelle den Besorgnisgrundsatz des § 48 WHG, nach dem das Einbringen und Einleiten von Stoffen in das Grundwasser nur erlaubt werden darf, wenn eine nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit nicht zu besorgen ist (§ 48 Abs. 1 WHG). Eine Lagerung oder Ablagerung von Stoffen (z. B. Abfällen) darf ebenfalls nur zugelassen werden, wenn eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit nicht zu besorgen ist (§ 48 Abs. 2 WHG). Die Auslegung und Ausgestaltung dieses Besorgnisgrundsatzes eröffnet in konkreten Fällen einen weiten Raum von Standpunkten.

Im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle stellte allerdings schon der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) fest, dass *„bei einer strengen Auslegung nur der vollständige Einschluss der Abfälle im Endlager diesem Besorgnisgrundsatz gerecht wird“*. Der AkEnd empfahl daher, *„eine Regelung zu schaffen, die die Anwendung des WHG bei der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen klärt“* (AkEnd 2002).

Eine entsprechende Klarstellung, unter welchen Voraussetzungen eine Begrenzung des Eintrags von Schadstoffen als erfüllt gilt, könnte in einer nach § 48 WHG möglichen Rechtsverordnung festgelegt werden.

Da das Schutzgut Wasser auch bei anderen strahlenschutzrelevanten Themen eine wesentliche Rolle spielt, sieht die SSK einen Bedarf an entsprechenden Klarstellungen auch für andere Sachverhalte als notwendig an. Die von der LAWA und der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) entwickelten Ansätze zur Bewertung von Grundwasserkontaminationen unter Einschluss von Frachtbetrachtungen (LAWA-LABO 2006) können dabei als Grundlage dienen.

Gemäß § 3 Nr. 10 WHG ist eine schädliche Veränderung des Grundwassers erst dann gegeben, wenn das Wohl der Allgemeinheit, insbesondere die öffentliche Wasserversorgung, beeinträchtigt wird und Anforderungen des WHG, andere auf Grund des WHG erlassene Vorschriften oder sonstige wasserrechtliche Vorschriften verletzt werden. In einem solchem Fall schließt § 12 WHG eine Erlaubnis der Gewässerbenutzung aus. Da das WHG, andere aufgrund des WHG erlassene Vorschriften oder sonstige wasserrechtliche Vorschriften keine direkten Bezüge zu radioaktiven Kontaminationen enthalten, könnte der Begriff der schädlichen Gewässerveränderungen (§ 3 Nr. 10 WHG) im Zusammenhang mit radioaktiven Kontaminationen nur auf Veränderungen der Wasserbeschaffenheit bezogen werden, die das Wohl der Allgemeinheit, insbesondere die öffentliche Wasserversorgung, direkt beeinträchtigen.

Soweit es durch frühere Prozesse oder Ereignisse zu einer schädlichen Veränderung des Grundwassers gekommen ist, resultiert daraus nicht unmittelbar ein Sanierungsbedarf. Vielmehr ist ein solcher Bedarf anhand konkreter Standortbedingungen im Einzelfall zu bewerten (LAWA 2004). Bei einer solchen Bewertung sollten wie bereits von LAWA und LABO entwickelt, Frachtbetrachtungen und Aspekte der Nutzbarkeit als Trinkwasser einbezogen werden. Radioaktive Kontaminationen von Salzwässern, von Wasser in Grundwassergeringleitern (Geschiebemergel, Schluffe, Feinsand) oder Grundwasserstauern, wie z. B. Ton, stellen nach Meinung der SSK in der Regel keine unmittelbare Gefahr für nutzbare Grundwasserleiter dar.

Die SSK empfiehlt daher:

Empfehlung 12: **Zur Beurteilung geplanter oder bestehender Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit durch Radionuklide soll in geeigneter Weise klargestellt werden, unter welchen Voraussetzungen ein Eintrag von Radionukliden in das Grundwasser als geringfügig bewertet werden kann. In Bezug auf die ökotoxikologischen Anforderungen an eine wasserrechtliche Geringfügigkeit verweist die SSK auf die Empfehlung 10.**

Schädliche Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit durch Radionuklide sollen nur nach Maßstäben des Strahlenschutzes beurteilt werden.

Da das bisherige Konzept der LAWA (LAWA 2004) auf den Werten der TrinkwV als Bezug für humantoxische Wirkungen aufbaut, weist die SSK in diesem Zusammenhang auf folgende Sachverhalte bezüglich radioaktiver Kontaminationen hin:

Die in der TrinkwV enthaltenen Parameterwerte für radioaktive Stoffe sind keine Grenzwerte, sondern Werte, bei deren Überschreitung (im Trinkwasser) die zuständige Behörde prüft, ob das Vorhandensein radioaktiver Stoffe im Trinkwasser ein Risiko für die menschliche Gesundheit darstellt, das ein Handeln erfordert (vgl. § 3 Nr. 9 TrinkwV). Eine formale Verwendung dieser Werte im Sinne des LAWA-Konzeptes der Geringfügigkeitsschwellen ist daher nach Ansicht der SSK nicht sachgerecht.

Durch den Parameter Richtdosis wird die Ingestionsdosis durch den Trinkwasserverzehr begrenzt. Der Parameterwert von 0,1 mSv/Jahr schließt alle im Wasser vorkommenden natürlichen und künstlichen Radionuklide ein, mit Ausnahme von Tritium (H-3), Kalium-40 sowie Radon-222 mit seinen kurzlebigen Tochternukliden. In Anlage 7 der TrinkwV sind für alle dosisrelevanten natürlichen Radionuklide sowie für einige künstliche Radionuklide Referenzwerte aufgeführt, bei deren Unterschreitung bei Anwendung der Summenformel von einer Einhaltung des Parameters Richtdosis auszugehen ist.

Angelehnt an Empfehlungen der WHO (2006) und wie in der europäischen Richtlinie 2013/51/Euratom (Euratom 2013) vorgegeben, bezieht sich der Parameterwert für die Richtdosis auf die Ingestionsdosis eines Erwachsenen. Bei Betrachtung aller derzeit im Strahlenschutz zu berücksichtigenden 6 Altersgruppen werden damit formal Ingestionsdosen bis zu über 1 mSv/Jahr für die besonders dosisrelevante Altersgruppe der Säuglinge toleriert.

Nach Meinung der SSK bedarf eine Anwendung des Parameters Richtdosis im Wasserrecht einer fachlich fundierten Klärung. Eine schädliche Veränderung des Grundwassers durch anthropogene Einträge von Radionukliden in das Grundwasser sollte aber auf Grundlage der deutlich detaillierteren radiologischen Bewertungen durchgeführt werden.

Der Parameterwert der TrinkwV für Radon-222 beruht auf der Empfehlung SSK 2003b. Dieser Empfehlung liegen modelltechnische Untersuchungen zugrunde, mit denen gezeigt wurde, dass bei einer Rn-222-Konzentration im Trinkwasser von 100 Bq/l *„für alle Altersgruppen der Bevölkerung mit einer mittleren Strahlenexposition von ca. 0,4 mSv/a zu rechnen* [ist]*, die aus ca. 0,05 mSv/a infolge der Ingestion von Trinkwasser sowie aus ca. 0,35 mSv/a infolge der Inhalation kurzlebiger Radonfolgenuklide durch die Freisetzung von Rn-222 in die Luft bei einer typischen häuslichen Wassernutzung resultieren“*.

Die Radonkonzentration des Grundwassers wird durch den Grundwasserleiter bestimmt. Die Grundwasserleiter, die uranreiche Minerale enthalten, weisen in der Regel höhere Radon-222-Konzentrationen im Grundwasser auf als uranärmere Gesteine (Skleppström und Olofson 2007,

Ayotte et al. 2011, LfU 2011). Nach einer Untersuchung von Radionukliden in Roh- und Trinkwässern (BfS 2009) kann davon ausgegangen werden, dass in Grundwässern Radon-222-Konzentrationen größer als 100 Bq/l auftreten können. Radon kann allerdings bei der Trinkwasseraufbereitung effektiv aus dem Grundwasser entfernt werden, so dass Radon-222-Konzentrationen von mehr als 100 Bq/l im Grundwasser nicht zu einer Beeinträchtigung der öffentlichen Wasserversorgung führen.

Da Radon-222 aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit von 3,8 Tagen relativ schnell zerfällt, breitet es sich im Grundwasser bei üblichen Fließgeschwindigkeiten von größenordnungsmäßig weniger als 1 m pro Tag kaum aus. Einleitungen von Wasser mit mehr als 100 Bq/l Radon-222 oder andere Einträge von Radon-222 führen daher nach Ansicht der SSK nicht zu einer nachteiligen Veränderung des Grundwassers. Allerdings können lokal erhöhte Konzentrationen von Radon-222 im Zusammenhang mit anthropogenen radioaktiven Bodenkontaminationen einen Indikator für eine Altlast darstellen.

Der Parameterwert von 100 Bq/l für Radon-222 ist daher nach Meinung der SSK nicht ohne fachliche Differenzierung als Geringfügigkeitsschwelle im Sinne des LAWA-Konzeptes verwendbar.

Der Parameterwert für Tritium von 100 Bq/l wird in der TrinkwV separat neben dem Parameter Richtdosis eingeführt. Er geht zurück auf eine Ausweisung dieser Konzentration als Indikatorparameter in der Richtlinie 98/83/EG (EG 1998). Eine explizite Begründung zur Festlegung dieses Wertes wurde nicht veröffentlicht, allerdings zeigt die mit einer Tritiumkonzentration von 100 Bq/l abzuleitende Ingestionsdosis für Erwachsene bei Verzehr von 730 l Trinkwasser von nur 0,0013 mSv im Jahr, dass dieser Parameter nicht auf der Grundlage von radiologischen Maßstäben festgelegt wurde. Auch die WHO gibt als Richtwert für die Beurteilung von Tritium im Trinkwasser nicht den Wert von 100 Bq/l, sondern eine Konzentration von 10 000 Bq/l an (WHO 2006). Maßstab zur Ableitung dieses Wertes ist eine Ingestionsdosis durch Trinkwasser von 0,1 mSv/Jahr. Die nach TrinkwV einzuhaltende Tritiumkonzentration von 100 Bq/l ist folglich als Parameterwert aufzufassen, der ggf. dazu beiträgt, radiologisch relevante Kontaminationen des Trinkwassers auch mit anderen Radionukliden rechtzeitig zu erkennen (Risica und Grande 2000, CNSC 2008).

Bei einem Wertebereich von Tritium im Niederschlag, der im Jahresmittel bei ca. 1 Bq/l liegt, und einer mit einfachen Messmethoden erreichbaren Nachweisgrenze von ca. 10 Bq/l Tritium im Wasser, ist der Parameterwert nach TrinkwV als Geringfügigkeitsschwelle im Sinne eines Indikatorwertes geeignet und angemessen. Schädliche Konzentrationen von Tritium im Grundwasser sollten aber nach strahlenschutzfachlichen Kriterien beurteilt werden.

Empfehlung 13: **Im Zusammenhang mit der Klarstellung nach Empfehlung 12 soll auch spezifiziert werden, wie die Parameter der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) für Radioaktivität im Hinblick auf die Bewertung einer nachteiligen Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit anzuwenden sind.**

Die SSK hält solche Klarstellungen für erforderlich, um grundsätzliche Widersprüche im Umweltrecht zu vermeiden.

7 Radioaktive Kontaminationen von Sachgütern

7.1 Sachgüter als Teil von Umweltprüfungen

Im Zusammenhang mit der Prüfung und Bewertung von Umweltfragen bei Genehmigungsverfahren oder im Zusammenhang mit Planungen sind grundsätzlich Auswirkungen von Vorhaben auf Kulturgüter und sonstige Sachgüter als Schutzgüter im Sinne des UVPG zu beschreiben, zu ermitteln und zu bewerten. Da Kulturgüter in ihrem kulturellen Wert durch radioaktive Kontaminationen nicht verändert werden, sieht die SSK den in dieser Empfehlung verwendeten Begriff des Sachgutes als Oberbegriff für Kultur- und Sachgüter an.

Sachgüter sind gemäß § 90 BGB (BGB 2002) körperliche Gegenstände. Auf (Nutz-)Tiere sind Vorschriften für Sachgüter nur soweit anwendbar, wie nichts anderes gesetzlich bestimmt ist (z. B. im Tierschutzgesetz). Im Rahmen von Umweltbewertungen sind üblicherweise nur Sachgüter wie Gebäude, landwirtschaftlich genutzte Flächen und Wald zu betrachten, die mit der natürlichen Umwelt in einem engen Zusammenhang stehen (Erbgut und Schink 1996). Von (Gassner et al. 2010) wurde allerdings darauf hingewiesen, dass abhängig vom Einzelfall auch andere Sachgüter in eine Umwelt(verträglichkeits-)prüfung einbezogen werden können.

Eine Zusammenstellung von in der Literatur beschriebenen Auswirkungen radioaktiver Kontaminationen auf Sachgüter wurde in (Gellermann und Löbner 2016) vorgelegt. In der genannten Arbeit wird anhand historischer Beispiele gezeigt, dass Freisetzungen von Radionukliden bei Störfällen, Ableitungen von Radionukliden vor allem mit dem Wasser oder die Umlagerungen fester Abfälle mit radioaktiver Kontamination Ursache für Kontaminationen von Sachgütern sein können. Im Ergebnis kann die funktionale Brauchbarkeit von Sachgütern beeinträchtigt sein oder es können (auch aus Gründen gesellschaftlicher Akzeptanz) erhebliche Nachteile bei der wirtschaftlichen Nutzung entstehen. Ein besonders relevanter Nachteil ergibt sich, wenn aufgrund radioaktiver Kontamination Nahrungsmittel unabhängig von radiologischen Risiken in ihrem wirtschaftlichen Wert beeinträchtigt werden (Gassner et al. 2010).

7.2 Sachgüter als Teil des Schutzes der Umwelt im Strahlenschutz

a) Geplante Expositionssituationen

Die Genehmigung von Tätigkeiten oder zukünftige Zulassungen von geplanten Expositionssituationen schließt Prüfungen der Umweltauswirkungen ein. Soweit dabei Sachgüter von radioaktiven Kontaminationen betroffen sein können, sind unabhängig von verfahrensrechtlichem Status Prüfungen und Bewertungen vorzunehmen. Durch die Benennung der Sachgüter im UVPG ist dieser Aspekt im formalen UVU/UVP-Verfahren verbindlich vorgegeben. Auch die (IAEA 2014c) benennt als zu prüfende Umweltauswirkungen in einer UVP von kerntechnischen Anlagen neben Boden, Wasser und Luft sowie Flora und Fauna auch sozioökonomische Faktoren und das Abfallmanagement.

Sowohl die Fachliteratur als auch einige veröffentlichte Beispiele von Umweltverträglichkeitsuntersuchungen (UVU) zeigen ein sehr unterschiedliches Herangehen an diese Prüfung. In Leitfäden zur UVP (z. B. EBA 2002, Gassner et al. 2010) werden anlagenbedingte, baubedingte und betriebsbedingte Wirkfaktoren[18] unterschieden. Soweit diese Wirkfaktoren eine Beeinträchtigung bei der Nutzbarkeit von Sachgütern hervorrufen können, sind sie im

[18] Wirkfaktoren sind nach (Gassner et al. 2010) Eigenschaften eines Plans oder Vorhabens, die Ursache für eine Auswirkung auf die Umwelt bzw. ihre Bestandteile sind.

Zusammenhang mit der Prüfung der Umweltauswirkungen auf Sachgüter zu beschreiben und zu bewerten.

Als betriebsbedingte Wirkfaktoren sind z. B. Ableitungen zu betrachten, die zu radioaktiven Umweltkontaminationen führen können. Solche Kontaminationen sind nicht auf strahlenschutzrechtlich oder atomrechtlich genehmigte Anlagen begrenzt. Neben radioaktiven Kontaminationen landwirtschaftlicher Flächen und von Privatgrundstücken durch Ableitungen des Uranerzbergbaus (z. B. Ritzel 2008, Bister 2012) haben in Deutschland z. B. auch Ableitungen des Steinkohlenbergbaus zu radioaktiven Kontaminationen geführt.

Obwohl genehmigte Ableitungen von Radionukliden aus Anlagen durch Dosisgrenzwerte für Menschen begrenzt sind, folgt daraus nicht, dass Kontaminationen von Sachgütern durch derartige Ableitungen ausgeschlossen sind. So ist z. B die Kr-85-Konzentration in der Atmosphäre nach dem Ende der (meisten) Kernwaffentests zwischen 1973 und 2002 vor allem durch Ableitungen aus der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen um mehr als das Doppelte angestiegen (Steinkopff et al. 2002). Aus der Atmosphäre gewonnenes Krypton ist damit als Zählgas für kernphysikalische Detektoren (schon seit langem) ungeeignet. Für die Verwendung von Kryptongas in Konsumgütern musste im § 106 StrlSchV eine Ausnahmeregelung eingefügt werden. Es handelt sich bei diesem Beispiel um einen Effekt, der durch globale Freisetzungen verursacht wurde. Es kommt aber im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfungen darauf an, einzelfallbezogene Auswirkungen auch im Hinblick auf ihre Folgen im Großen mitzubewerten (s. auch Kapitel 8).

Andere betriebsbedingte Wirkfaktoren sind z. B. Kontaminationen in den Anlagen oder auf dem Betriebsgelände durch die Verwendung radioaktiver Stoffe, durch Aktivierung oder auch durch die prozessbedingte Anreicherung natürlich vorkommender Radionuklide. Als Folge solcher Kontamination sind Abfälle hinsichtlich ihrer Radioaktivität zu überwachen und können ggf. erst nach einer Freigabe oder Entlassung aus der strahlenschutzrechtlichen Überwachung entsorgt werden.

Werden bei der Errichtung von Anlagen Baustoffe verwendet (vor allem zirkonhaltige Feuerfestmaterialien), deren mineralische Komponenten erhöhte Uran- oder Thoriumgehalte aufweisen, so ist in einer zunehmend die Radioaktivität überwachenden Abfallwirtschaft bei Reparaturen und Rückbau die Entsorgung der Abfälle nur dann reibungslos abzuwickeln, wenn vom Abfallerzeuger die nötigen Informationen zur Verfügung gestellt werden können. Dies ist am effektivsten möglich, wenn der baubedingte Wirkfaktor Radioaktivität bereits in der Planungsphase berücksichtigt wurde. Neben Anlagen der NORM-Industrien nach Anhang VI der Richtlinie 2013/59/Euratom (z. B. Klinkeröfen der Zementproduktion und Kessel von Kohlekraftwerken) betrifft dies auch Anlagen, die nicht aufgrund zulassungspflichtiger Tätigkeiten einer strahlenschutzrechtlichen Überwachung unterliegen (z. B. Glashütten).

Durch die Benennung von Freigrenzen und Freigabewerten (Anlage III StrlSchV) sowie Überwachungsgrenzen (Anlage XII Teil B StrlSchV) sind im bestehenden Strahlenschutz-Regelwerk bereits Grundlagen enthalten, mit denen die Strahlenbelastung des Menschen in Folge der Radioaktivität in Sachgütern grundsätzlich beurteilt werden kann. Für die im Zusammenhang mit Sachgütern ebenfalls zu betrachtenden Aspekte „technische Nutzbarkeit“, „wirtschaftliche Nachteile“ und „gesellschaftliche Akzeptanz“ gibt es im Strahlenschutz-Regelwerk bisher keine spezifischen Vorgaben.

Um nachteilige wirtschaftliche Auswirkungen von radioaktiv kontaminierten Sachgütern, einschließlich Abfällen und Rückständen, gering zu halten, ist ein bewusstes Einbeziehen dieses Sachverhaltes bereits in Planungsphasen von Anlagen angezeigt. Aus diesem Grund, sollten bereits im Rahmen von Umweltbewertungen die von einem Vorhaben (oder Plan) möglicherweise ausgehenden Auswirkungen radioaktiver Kontaminationen oder ionisierender

Strahlung auf Sachgüter als Teil der systematischen Prüfung betrachtet werden. Sowohl die methodischen Grundlagen als auch die resultierenden Konsequenzen im Hinblick auf zu erstellende UVP oder SUP sind bisher im Strahlenschutz nicht ausgearbeitet und bedürfen einer Klarstellung.

Die SSK empfiehlt daher:

Empfehlung 14 : **Radionuklide in bzw. an Sachgütern, die zur Beeinträchtigung der technischen Nutzbarkeit führen oder erhebliche Nachteile bei der wirtschaftlichen Nutzung bis hin zur Entsorgung verursachen können, sollen bereits in der Phase von Umweltprüfungen anlagenspezifisch identifiziert und berücksichtigt werden.**

Da auch bei Anlagen, in denen keine zulassungspflichtigen Tätigkeiten stattfinden, Radionuklide in bzw. an Sachgütern, insbesondere in Abfällen, ökonomisch nachteilig sein können, sollen betreffende Anlagentypen, z. B. durch Auswertung von Meldeberichten zu Strahlenalarmen bei Entsorgungsunternehmen, ermittelt werden.

Soweit im Rahmen von Umweltbewertungen radioaktive Kontaminationen von Sachgütern nicht durch Bezug auf strahlenschutzrechtlich vereinbarte Werte, wie z. B. Freigrenzen oder Freigabewerte, beurteilt werden können, müssen verbal-argumentative Bewertungsansätze zur Anwendung kommen. Dies betrifft vor allem Einschränkungen der Gebrauchstauglichkeit von Sachgütern durch radioaktive Kontaminationen. Da solche Einschränkungen auch durch Kontaminationen resultieren können, die der allgemeinen Umweltradioaktivität zuzuordnen sind, muss klar herausgestellt werden, ob umweltrelevante Bezüge überhaupt gegeben sind.

Befürchtungen über mögliche Wertminderungen von Sachgütern, die im Zuge von Planungen als Teil der Umweltbewertung geäußert werden und die nicht auf naturwissenschaftlichen Prognosen beruhen, sollten nach Ansicht der SSK bei einer auf naturwissenschaftlicher Basis beruhenden Umweltprüfung nicht berücksichtigt werden. Dies gilt zugespitzt auch für Kontaminationen, die weit unterhalb von radiologisch relevanten Schwellenwerten allein aus persönlicher oder gesellschaftlicher Sicht als Makel angesehen werden und deshalb zur Wertminderung von Sachgütern führen.

Da der im Umweltrecht neben der „Beeinträchtigung“ ebenfalls enthaltene Begriff der „Belästigung“ in seiner Intention auf vom Menschen wahrnehmbare Wirkungen beschränkt ist, trifft er für die der sinnlichen Wahrnehmung nicht zugängliche ionisierende Strahlung grundsätzlich nicht zu. Es handelt sich bei solchen Fällen nicht um technisch-naturwissenschaftlich zu beurteilende Phänomene. Daher sollten nach Meinung der SSK derartige Konstrukte in eine strahlenschutzfachliche Umweltbewertung nicht einbezogen werden.

b) Bestehende und Notfall-Expositionssituationen

Nach der Richtlinie 2013/59/Euratom sind radiologische Altlasten, Radon in Gebäuden und Radioaktivität in Waren[19], soweit sie aus Strahlenschutzgründen nicht außer Acht gelassen werden können, als bestehende Expositionssituationen zu behandeln.

Darüber hinaus haben allerdings Kontaminationen von Sachgütern, die eine Folge von Notfall-Expositionssituationen, wie z. B. der Reaktorunfälle in Tschernobyl und Fukushima sind, zu erheblichen wirtschaftlichen Nachteilen geführt. Durch den Reaktorunfall in Tschernobyl und

[19] gemäß Anlage XVII der Richtlinie 2013/59/Euratom

die damit verbundenen Notfallmaßnahmen mussten vor allem im Umfeld des havarierten Reaktors Siedlungen dauerhaft verlassen, Landwirtschaft eingestellt und Industrieanlagen stillgelegt werden. Das führte zu erheblichen volkswirtschaftlichen Schäden in der ehemaligen Sowjetunion bzw. in deren Nachfolgestaaten.

Die inzwischen vorliegenden Erfahrungen mit den Folgen des Reaktorunfalls in Fukushima zeigen, dass nichtradiologische Auswirkungen dieses Unfalls von hoher gesellschaftlicher Relevanz sind. Neben Traumata und anderen psychologischen Erkrankungen bei evakuierten Anwohnern traten sozioökonomische Effekte auf, die die regionale und lokale Wirtschaft und damit Beschäftigung und Einkommen von Personen betrafen (Weiss 2016). Der volkswirtschaftliche Gesamtschaden für Japan durch den Tsunami und den Reaktorunfall wird mit insgesamt 335 Mrd. US$ geschätzt, davon 109 bis 162 Mrd. US$ als Folge des Reaktorunfalls (KIT 2016).

Schäden durch Radioaktivität in Sachgütern sind in Notfall-Expositionssituationen aber nicht nur aus den unmittelbar betroffenen Gebieten bekannt. Vielmehr zeigen diverse Berichte, dass auch in anderen Ländern wirtschaftliche Schäden entstanden sind. In Europa waren durch den Reaktorunfall in Tschernobyl neben den unmittelbar betroffenen Gebieten in der Ukraine und Weißrussland die skandinavischen Staaten besonders betroffen. Dort wurden regional produzierte Nahrungsmittel durch den Fallout unbrauchbar (Liland et al. 2009). Die radioaktive Kontamination der Wälder führte zu Kontaminationen von Holzaschen und Abfällen der Papierproduktion (Ravila und Holm 1994). In Schweden sind deshalb seit 2005 spezielle Vorgaben zum Umgang mit kontaminierten Aschen von Heizkraftwerken, bei denen mehr als 30 Tonnen Asche pro Jahr anfallen, in Kraft (SSI 2005). Die mit der Umsetzung dieser Vorschriften verbundenen Aufwendungen belasten letztlich ebenfalls die Verwendung des Wirtschaftsgutes (Sachgutes) Holz.

In Deutschland haben radioaktive Kontaminationen von Sachgütern bisher vor allem im Zusammenhang mit dem Reaktorunfall in Tschernobyl zu nachteiligen Auswirkungen in Form teilweise erheblicher finanzieller Aufwendungen geführt. Beispielsweise fielen nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl bei der Produktion von Käse in Bayern ca. 6 900 Tonnen Molkepulver an, die nicht vermarktet werden konnten, obwohl die spezifischen Aktivitäten von Cs-137+Cs-134 nach damals geltender EU-Verordnung 3954/87 (Euratom 1987) zumindest für „sonstige Tiere“ als Futtermittel zugelassen waren. Das Molkepulver musste dekontaminiert und entsorgt werden, wobei die Kosten dieser Entsorgung sich für eine Teilmenge von 5 000 Tonnen auf 66,7 Mio. DM beliefen (Deutscher Bundestag 1996).

Bis in die Gegenwart werden Wildschweinfleisch und Waldpilze in Deutschland vor einer Vermarktung auf Cs-137-Kontamination kontrolliert. Für die aufgrund dieser Kontrollen ausgesonderten und vernichteten Lebensmittel wurden von 1986 bis März 2011 insgesamt 238 Mio. Euro an Entschädigungen ausgezahlt (Deutscher Bundestag 2011).

Diese Beispiele machen deutlich, dass Sachgüter als ein potenziell betroffenes Schutzgut bei der Vorbereitung auf Notfallsituationen unbedingt einbezogen werden müssen (siehe hierzu IAEA 2015b).

Soweit bei atom- oder strahlenschutzrechtlich genehmigten Anlagen in Deutschland einklagbare Sachschäden eintreten, sind durch die Deckungsvorsorge nach § 9 Abs. 1 Nr. 7 StrlSchV bzw. § 6 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 StrlSchV, § 9 Abs. 2 Satz 1 Nr. 4 des AtG (1985) Schadensersatzansprüche gesetzlich geregelt.

Die Maßnahmen des Strahlenschutzvorsorgegesetzes (StrVG 1986) sollen bei Ereignissen mit möglichen nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen die radioaktive Kontamination der Umwelt unter Beachtung des Standes der Wissenschaft und unter Berücksichtigung aller

Umstände so gering wie möglich halten. Allerdings zeigte eine Studie des Öko-Instituts (Küppers et al. 2010), dass es Probleme verursachen kann, wenn im Rahmen des bestehenden abfallrechtlichen Regelwerkes große Mengen an radioaktiv kontaminierten Nahrungs- oder Futtermitteln umweltverträglich entsorgt werden sollen.

Da bei Notfall-Expositionssituationen Sachgüter in der Regel nicht geschützt werden können, empfiehlt die SSK:

Empfehlung 15: **Für Sachgüter, deren Radionuklidgehalt durch bestehende oder Notfall-Expositionssituationen erhöht wurde, sollen geeignete Regelungen zur Handhabung, Dekontamination, Wiederverwendung oder Entsorgung getroffen werden, die im Bedarfsfall angewendet werden können.**

8 Anwendung des Prinzips der Nachhaltigkeit

8.1 Konzeptionelle Rahmenbedingungen für eine Anwendung des Prinzips der Nachhaltigkeit im Strahlenschutz

Nachhaltigkeit als Leitbild zielt auf eine gesellschaftliche Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre Bedürfnisse nicht mehr befriedigen können (UN 1997). Mit dem Begriff der Nachhaltigkeit wird somit der Aspekt langfristiger Entwicklungen thematisiert, wobei diese Entwicklungen sowohl soziale als auch ökonomische und ökologische Aspekte einschließen. Damit ist das Konzept der Nachhaltigkeit wesentlich weiter gefasst als der Umweltschutz.

Für einen Schutz der Umwelt im Strahlenschutz ergibt sich die Frage, welche Konsequenzen bei einer Anwendung des Prinzips der Nachhaltigkeit abzuleiten sind.

Die SSK hat sich im Jahr 2008 mit dem Thema Nachhaltigkeit befasst (SSK 2010). Grundlagen des Prinzips der Nachhaltigkeit und die daraus abzuleitenden Konsequenzen für den Strahlenschutz wurden dabei insbesondere im Beitrag (Michel 2010) dargestellt. Von Ott (Ott 2010) wurden der SSK die unterschiedlichen Konzepte der Nachhaltigkeit aus einer umweltethischen Perspektive vorgestellt und unter Bezug auf ein Gutachten des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU) dafür plädiert, dass die Menge *„der Naturgüter im Verlauf der Zeit nicht reduziert bzw. geschmälert, sondern insgesamt konstant gehalten werden soll*.“ (Konzept einer „starken Nachhaltigkeit“).

Die praktische Ausgestaltung eines auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Strahlenschutzes erfordert es nach Meinung der SSK, zukünftige Auswirkungen eines heutigen Handelns zu beurteilen und in Entscheidungsfindungen einzubeziehen. In Anbetracht der damit verbundenen Unsicherheiten ist Vorsorge ein Element nachhaltigen Handelns. Aus diesem Grund ist sowohl im Umweltschutz als auch im Strahlenschutz seit langem das Vorsorgeprinzip etabliert. Das Vorsorgeprinzip zielt darauf ab, trotz fehlender Gewissheit bezüglich Art, Ausmaß oder Eintrittswahrscheinlichkeit von möglichen Schadensfällen der Entstehung von Schäden von vornherein vorzubeugen (Michel 2010). Es ist stark auf die Prüfung und Bewertung von Konsequenzen konkreter Tätigkeiten bzw. Vorhaben ausgerichtet.

Eine besondere Ausprägung erfährt das Vorsorgeprinzip im Besorgnisgrundsatz, wie er explizit im Wasserhaushaltsgesetz verankert ist. Dabei genügen plausible Anhaltspunkte, um ein Umweltrisiko zu begründen, und es ist ggf. Aufgabe des Risikoverursachers, die Anhaltspunkte anhand von Ursache-Wirkungsbeziehungen zu widerlegen und die der Besorgnis unterliegenden Annahmen zu entkräften (UBA 2015).

Der Aspekt Nachhaltigkeit findet sich auch in der Präambel Nr. 27 zur Richtlinie 2013/59/Euratom (Euratom 2014), in der festgestellt wird, dass der Zustand der Umwelt langfristige Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben kann und dies eine Politik erforderlich macht, mit der die Umwelt vor den schädlichen Auswirkungen ionisierender Strahlung geschützt wird. Für die Zwecke des langfristigen Schutzes der menschlichen Gesundheit sollten international anerkannte wissenschaftliche Daten und darauf gestützte Umweltkriterien berücksichtigt werden.

Eine Anwendung des Prinzips der Nachhaltigkeit im Strahlenschutz muss jedoch nach Meinung der SSK breiter als das Vorsorgeprinzip angelegt sein und auch langfristige Auswirkungen gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Entwicklungen einschließen, die nicht nur am Grundsatz der Vorsorge beurteilt werden können.

Vom Stockholm Resilience Centre wurde vorgeschlagen, im Hinblick auf globale Umweltveränderungen und Ressourcennutzungen auf wissenschaftlicher Grundlage „planetarische Grenzen“ zu ermitteln, bis zu denen die Menschheit die Freiheit haben sollte, ihre langfristigen sozialen und ökonomischen Entwicklungen zu verfolgen (z. B. Rockström et al. 2009). Radioaktivität und andere Quellen ionisierender Strahlung können in dieses Konzept (ähnlich wie chemisch toxische Stoffe) einbezogen werden, indem dafür Sorge getragen wird, dass geplante Expositionssituationen in ihren langfristigen und/oder großräumigen Auswirkungen soweit beschränkt werden, dass

1. für kommende Generationen keine zusätzlichen Gefahren durch die schädliche Wirkung ionisierender Strahlung entstehen (*Risikovorsorge/-vermeidung*) und
2. die zukünftige Nutzbarkeit von Ressourcen nicht durch zusätzliche Radioaktivität beeinträchtigt wird (*Ressourcenvorsorge*).

Dies gilt auch für Expositionen und Radionuklidkonzentrationen unterhalb zulässiger Grenzwerte.

Zur Umsetzung dieser Anforderungen ist es nötig:

- die Veränderungen von Radionuklidkonzentrationen in Umweltmedien abzustecken, die für eine dauerhafte Entwicklung nach dem Stand der Wissenschaft akzeptierbar sind,
- anthropogen ansteigende Trends von Radionukliden in Umweltmedien rechtzeitig zu identifizieren, zu verfolgen und nach Möglichkeit entgegenzuwirken, wenn diese Trends aus dem Bereich akzeptabler Veränderungen herausführen können.

Außerdem wäre es sinnvoll „planetarische Grenzen“ (Steffen et al. 2015) für radioaktive Belastungen auf der Basis der Risikovorsorge und Ressorcenvorsorge abzustecken und bei Entscheidungen ggf. zu berücksichtigen.

Soweit Trends der Konzentration langlebiger Radionuklide im Zusammenhang mit Nachhaltigkeitsüberlegungen betrachtet werden, weist die SSK darauf hin, dass neben der primordialen und kosmogenen Radioaktivität sowie Radionukliden aus der Spontanspaltung auch viele künstliche Radionuklide aus früheren menschlichen Handlungen in der Natur vorliegen und es für diese Radionuklide in den Umweltmedien einen natürlichen und anthropogenen Hintergrund gibt. Dieser Hintergrund stellt für Trendbetrachtungen das Bezugsniveau dar.

Bei bestehenden oder Notfall-Expositionssituationen, die aus Strahlenschutzgründen ein Eingreifen des Menschen erfordern, kann Nachhaltigkeit nur darauf abzielen, vorliegende Strahlenexpositionen auf ein gesellschaftlich akzeptiertes und vertretbares Maß zu reduzieren und nach Erreichen dieses Ziels durch geeignete Nachsorge dafür zu sorgen, dass das Niveau der Belastungen weiter gesenkt wird oder zumindest nicht erneut unakzeptable Strahlenexpositionen auftreten.

Wichtige Instrumente, mit denen der Aspekt der Nachhaltigkeit im Strahlenschutz ermittelt und beeinflusst werden kann, sind:

- Nationale Berichtssysteme. Durch Zusammenfassen von geeigneten Kenngrößen sollten Indikatoren erstellt werden, die eine zusammenfassende Erfolgskontrolle radiologischer Einflüsse auf die Umwelt ermöglichen. Weiterhin bedarf es in Anbetracht der konzeptionellen Vereinheitlichung des Strahlenschutzsystems in Bezug auf künstliche und natürliche vorkommende Radionuklide nach Auffassung der SSK einer stärkeren Berücksichtigung anthropogener Veränderungen natürlich vorkommender Radionuklide.
- Förderung von Prozessen in der Wirtschaft, in denen Tätigkeiten erfolgen, die nach umfassender Analyse von Kosten-Nutzen-Dosis-Relationen geringere Strahlenexpositionen und/oder Umweltkontaminationen zur Folge haben als eine Ausführung dieser Tätigkeiten im Ausland, insbesondere außerhalb der Europäischen Union. Hierzu gehört z. B. die Verarbeitung von Rohstoffen und Zwischenprodukten in Deutschland, deren Radioaktivität aus Gründen des Strahlenschutzes nicht außer Acht gelassen werden kann.
- Weiterentwicklung von Regelwerken, mit denen Standards gesetzt werden, die zielgerichtet nachhaltige Entwicklungen fördern.

8.2 Zum Aspekt der Risikovorsorge

Im Zusammenhang mit dem vorsorgenden Gesundheitsschutz des Menschen ist im gegenwärtigen System des Strahlenschutzes als praktischer Maßstab ein Grenzwert der effektiven Dosis von 1 mSv im Kalenderjahr für zusätzliche Expositionen von Personen der Bevölkerung in Folge von Tätigkeiten festgelegt. Dieser Dosiswert, der im Schwankungsbereich der natürlichen Strahlenexposition liegt, wird allgemein als ausreichend betrachtet, um Strahlenrisiken für den Menschen auf ein gesellschaftlich akzeptables Maß zu begrenzen. Artikel 5 der Richtlinie 2013/59/Euratom fordert darüber hinaus, die Exposition von Personen der Bevölkerung *„mit dem Ziel zu optimieren, die Höhe der Individualdosen, die Wahrscheinlichkeit einer Exposition sowie die Anzahl der exponierten Personen unter Berücksichtigung des jeweils gegenwärtigen technischen Erkenntnisstandes sowie wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Faktoren so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar zu halten“*. Damit ist ein wesentlicher Aspekt der Risikovorsorge bereits im Strahlenschutzsystem enthalten. Weiterhin wird durch Artikel 12 der Richtlinie 2013/59/Euratom eine quellenübergreifende Betrachtung eingeführt, nach der der Grenzwert der effektiven Dosis einer Einzelperson der Bevölkerung für die Summe aller Tätigkeiten gilt, welche der behördlichen Zulassung durch ein Genehmigungs- oder Anzeigeverfahren unterliegen.

Nicht abgedeckt durch geltende Strahlenschutzregelungen sind jedoch Veränderungen der Umweltradioaktivität durch Anlagen oder Einrichtungen,

- die zu einer Exposition nicht menschlicher Arten in Lebensräumen führen, die durch die Dosisbegrenzung für Menschen nicht hinreichend abgedeckt sind,
- die nicht der behördlichen Zulassung durch ein Genehmigungs- oder Anzeigeverfahren unterliegen oder
- die sich im Ausland befinden und deren Ableitungen über die Staatsgrenzen zu Kontaminationen führen.

Im Zusammenhang mit dem Schutz nicht menschlicher Arten ist die Vermeidung anthropogen verursachter Veränderungen der biologischen Vielfalt ein Vorsorgeziel. Dies ist nach Meinung der SSK für den Wirkfaktor „Ionisierende Strahlung“ nach derzeitigen wissenschaftlichen

Kriterien eingehalten, wenn radioaktive Kontaminationen die in Empfehlung 10 genannten Anforderungen einhalten.

Risikovorsorge im weiter gefassten Sinne erfordert allerdings, dem Erreichen oder Überschreiten von Dosisschwellen durch langfristig wirkende Prozesse aus ggf. vielen Einzelquellen rechtzeitig entgegenzuwirken. Als Basis für entsprechende Entscheidungen und Maßnahmen sind geeignete Beobachtungsdaten nötig, mit denen wissenschaftliche Prognosen zu erwartbaren Trends radioaktiver Kontaminationen in Umweltmedien geprüft werden können.

Von UNSCEAR wurden bereits im Jahr 1972 (UN 1972) erste Abschätzungen zu den durch Ableitungen von H-3 und Kr-85 aus der Erzeugung von Kernenergie verursachten Strahlenexpositionen der globalen Bevölkerung vorgenommen. Für eine erzeugte Menge von 20 GWa an elektrischer Energie wurden für die globale Bevölkerung Gonadenfolgedosen von 9×10^{-4} mrad im Jahr (9×10^{-6} mSv/a) abgeschätzt (UN 1972, Annex A). Mit einer für das Jahr 2000 angenommenen Produktion von 4 300 GW(e) aus Kernkraftwerken wurden Hochrechnungen von daraus zu erwartenden Expositionen ausgeführt. Unter Berücksichtigung technischer Entwicklungen wurden Werte von 0,2 mrad im Jahr (0,002 mSv/a) für die effektive Dosis berechnet.

In seinem Bericht des Jahres 1977 stellte UNSCEAR (UN 1977) weitere wissenschaftliche Daten zur Abschätzung von Expositionen zusammen und schätzte Strahlenexpositionen der globalen Bevölkerung durch das aus Kernkraftwerken freigesetzte H-3, C-14, Kr-85 und I-129 ab. Für eine installierte elektrische Leistung von 80 GW aus Kernenergie wird unter Anrechnung einer Auslastung von 70% eine jährliche globale Kollektivdosis von $1{,}3 \times 10^{5}$ man rad (1 300 Mann-Sievert) angegeben, was nach den in (UN 1977) benutzten Dosismodellen einer zusätzlichen Expositionsdauer von 3,5 h durch natürliche Strahlenquellen entspricht.

Modellhafte Untersuchungen von Trends der Freisetzung und globalen Verteilung von Radionukliden aus der Nutzung der Kernenergie, die prognostizierten Veränderungen des Energieverbrauchs und der Energieproduktion, insbesondere des Anteils der Kernenergie an der Energieproduktion, eingeschlossen, dienten in den 1970er Jahren in den USA als Grundlage zur Ableitung von Schutzstrategien (z. B. EPA 1976, McMahon et al. 2010). In Europa wurden ebenfalls diverse Studien zur Analyse der Strahlenexposition der Bevölkerung durch Freisetzungen von Radionukliden aus Kernkraftwerken durchgeführt (z. B. Kelly et al. 1975, FS 1981, Schwibach et al. 1978, Bonka und Horn 1980). In diesen Arbeiten wurde festgestellt, dass die im Normalbetrieb von Kernkraftwerken und anderen kerntechnischen Anlagen freigesetzten Radionuklide nur in einem Maße zur Dosis der Bevölkerung beitragen, welche im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition sehr klein ist.

Großräumige Kontaminationen durch Freisetzungen von Radionukliden in Wasser sind aus dem Nordatlantik und seinen angrenzenden Schelfmeeren (Nord- und Ostsee) bekannt. Sowohl durch Einleitungen der Wiederaufarbeitungsanlagen für Kernbrennstoffe in La Hague (Frankreich) und Sellafield (Großbritannien) (Dahlgaard et al. 1995, Herrmann et al. 1998, Nies et al. 1999, Livingston und Povinec 2000) als auch durch den Reaktorunfall in Tschernobyl und den folgenden Fallout (HELCOM 2013, BMUB 2016) kommt es zu gut messbaren Kontaminationen des Meerwassers, des Meeressediments und von Meeresbiota. Aus der Quelle Sellafield sind Transporte von sich im Meeresbereich konservativ verhaltenden Radionukliden wie Cs-137 bis Spitzbergen und zurück an die Südspitze Grönlands über Entfernungen von ca. 6 000 km nachgewiesen worden (Dahlgaard et al. 1995).

Andere langlebige, im Meer messbare künstliche Radionuklide sind H-3, Sr-90, Tc-99, I-129 und Transurane (Pu-238, Pu-(239+240), Pu-241, Am-241) (BMUB 2016). Durch die Anlage Sellafield wurden in den 1970er Jahren erhebliche Mengen an Radionukliden legal eingeleitet.

Vor allem Cs-137 und Transurane wurden großenteils im Sediment der Irischen See abgelagert. Durch Resuspension wirkt dieses Sediment seitdem als Sekundärquelle für den Nordatlantik (Hunt und Kershaw 1990).

Die Kontamination der Ostsee mit Cs-137 und Cs-134 durch den Reaktorunfall in Tschernobyl im Jahre 1986 verblieb aufgrund der hydrografischen Bedingungen langfristig in diesem Randmeer. Der Wasseraustausch mit dem Nordatlantik bzw. der Nordsee ist durch die dänischen Meerengen stark limitiert, so dass die Ostsee auch heute noch zu den am stärksten durch Cs-137 kontaminierten Teilen des Weltozeans zählt (HELCOM 2013). Als ökologisches Qualitätsziel für die Ostsee ist von der Expertengruppe HELCOM MORS-EG (Monitoring of Radioactive Substances Expert Group) der Vor-Tschernobyl-Zustand definiert worden. Die Aktivitätskonzentration von Cs-137 im Meerwasser betrug damals ca. 15 Bq/m³ und wird voraussichtlich, je nach Meeresgebiet, in den Jahren 2017 bis 2023 wieder erreicht werden (HELCOM 2013).

Die aus den Konzentrationen der genannten Radionuklide durch den Verzehr von Fischen, Muscheln und Krustentieren resultierende Dosis für Menschen ist derzeit so gering, dass aus Strahlenschutzsicht kein Bedarf an Beschränkungsmaßnahmen zum Schutz der menschlichen Gesundheit gesehen wird (IAEA 1995, HELCOM 2013). Trotzdem ist in der OSPAR-Strategie bezüglich radioaktiver Stoffe (OSPAR 2010) das Ziel benannt, Konzentrationen radioaktiver Stoffe in der marinen Umwelt zu erreichen, die bei *„natürlich vorkommenden Stoffen den Hintergrundwerten nahe kommen und bei künstlichen radioaktiven Stoffen nahe Null sind*.“ Bei aller Schwierigkeit, den fachlichen Teil dieser politischen Forderung messtechnisch überprüfbar zu gestalten, hat dennoch ein Prozess der Trendumkehr eingesetzt, der vom Radioactive Substance Committee (RSC) als Fortschritt im Hinblick auf diese Zielsetzungen bewertet wird (OSPAR 2009). Wichtigste Radionuklide für die Untersuchung langfristiger globaler Trends waren bisher vor allem die durch Emissionen der Kerntechnik freigesetzten Radionuklide H-3, C-14, K-85 und I-129. Für diese Radionuklide hat UNSCEAR den Stand der Wissenschaft bezüglich globaler Verteilungsmodelle in den Berichten (UN 2001, Annex A, ohne Kr-85) zusammengefasst.

Für natürlich vorkommende Radionuklide gibt es bisher keine solchen großräumigen und komplexen Studien mit Prognosen möglicher Entwicklungen. Zwar ist bekannt, dass auch Bergbau und NORM-Industrien zu Emissionen von Radionukliden in die Umwelt führen, die daraus resultierenden Konsequenzen wurden bisher aber vor allem als lokale, ggf. regionale Effekte untersucht (Michel et al. 2005, Bister et al. 2015, Jia 2013, Zpire und IAF 2013, OSPAR 2014).

In Deutschland sind derzeit sowohl die Umgebungsüberwachung von kerntechnischen Anlagen (BMU 1997) als auch die sonstigen Monitoring-Programme für Umweltradioaktivität (BfS 2012) stark auf künstliche Radionuklide ausgerichtet. Messdaten des Landesamtes für Umwelt NRW an Flusssedimenten und Auenböden in den 1990er Jahren haben allerdings gezeigt, dass auch aus nicht strahlenschutzrechtlich überwachten Industrien wie dem Steinkohlenbergbau und der Hüttenindustrie radiologisch relevante Veränderungen in der Umwelt resultieren können (Klös 2004). Vor dem Hintergrund eines konzeptionell vereinheitlichten Strahlenschutzes, in dem die grundsätzliche Trennung von künstlicher und natürlicher Radioaktivität aufgehoben wurde, ist es daher für eine Beurteilung langfristiger Entwicklungen nach Aspekten der Nachhaltigkeit erforderlich, auch natürliche Radionuklide und diffuse Quellen in Monitoringprogramme aufzunehmen.

Um diese Aufgabe umzusetzen, ist es nach Meinung der SSK nötig,

– die in der Wirtschaft genutzten Techniken zu identifizieren, die Radionuklide in einem Maße in die Umwelt freisetzen, dass die natürliche Umweltradioaktivität regional oder großräumig erhöht wird oder erhöht werden kann und

– bestehende Monitoringprogramme und Daten aus wissenschaftlichen Untersuchungen regelmäßig daraufhin auszuwerten, ob Langzeittrends zu erkennen sind, die auf Entwicklungen hinweisen, die unter dem Aspekt der Risikovorsorge ein Gegensteuern erfordern.

Um Trends in Richtung risikorelevanter Kontaminationen zu vermeiden und ggf. entgegenzuwirken, sind im Umweltschutz im Hinblick auf toxische Stoffe Vermeidungsstrategien und Vorsorgewerte implementiert. So sind im (deutschen) Bodenschutzrecht z. B. Vorsorgewerte etabliert, die bei guter fachlicher Praxis einen ausreichenden Abstand zu den gefahrenbezogenen Prüfwerten gewährleisten. Im Wasserrecht sind steigende Trends schädlicher oder gefährlicher Stoffe im Grundwasser bereits vor Erreichen von Grenzwerten umzukehren (EG 2000). Bei Oberflächengewässern ist ein „Guter Zustand“ anzustreben, bei dem Umweltqualitätsnormen (UQN) eingehalten sind. Auch im Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG 2013) und den untergeordneten Regelwerken werden Depositionen von (einigen) chemisch-toxischen Schadstoffen und ihre Wirkung auf das Schutzgut Boden unter Vorsorgeaspekten betrachtet.

Um adäquate Vorsorgestrategien im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung im gesamten Strahlenschutz zu etablieren, bedarf es nach Meinung der SSK

- einer Umgestaltung der Umweltüberwachung, die derzeit noch stark auf Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen ausgerichtet ist, hin zu einer zielgerichteten Prüfung von Veränderungen der Radionuklidkonzentrationen in Regionen, die aus naturräumlichen oder nutzungsspezifischen Gründen von solchen Veränderungen betroffen sein können. Dabei sind auch nicht strahlenschutzrechtlich zugelassene Tätigkeiten in die Gesamtbetrachtung einzubeziehen, z. B. in Form von Forschungsvorhaben,
- einer Klärung, wie Vorbelastungen, die z. B. aus früheren Bergbau- und Industrieaktivitäten resultieren, in Trendermittlungen einbezogen werden sollen und
- einer Methodik, wie Trends ermittelt, sowie
- einer Strategie, wie auf erkennbare steigende Trends reagiert werden soll.

Von diesen Prinzipien ausgehend empfiehlt die SSK:

Empfehlung 16: **Regionale oder lokale Trends radioaktiver Umweltkontaminationen, die ohne geeignete Maßnahmen zu radiologisch relevanten Kontaminationen führen können, sollen unter dem Aspekt der Vorsorge bewertet und es soll einer unerwünschten Entwicklung entgegen gewirkt werden. Bei einer solchen Bewertung ist die in der Regel begrenzte Dauer von geplanten Ableitungen zu berücksichtigen.**

8.3 Zum Aspekt der Ressourcenvorsorge

Eine nachhaltige Entwicklung muss nicht nur Gesundheitsrisiken für Menschen (und ggf. Risiken für Populationen nicht menschlicher Arten) als Folge kontaminierter Umweltmedien vermeiden, sondern auch sicherstellen, dass zukünftigen Generationen ausreichend nutzbare Ressourcen zur Verfügung stehen. Für den Strahlenschutz bedeutet diese Forderung, dass eine

aktuelle Entwicklung die Nutzbarkeit von Ressourcen durch künftige Generationen nicht verhindern oder erheblich beeinträchtigen darf.

Bereits derzeit sind weltweit einige Ressourcen durch radioaktive Kontaminationen in ihrer Nutzbarkeit eingeschränkt oder es sind Maßnahmen des Strahlenschutzes bei der Nutzung dieser Ressourcen nötig. Ein typisches Beispiel einer Ressourcenkontamination ist das atmosphärische Krypton. Dieses Edelgas wird zur Füllung von Glühlampen und als Isoliergas in Verbundglasscheiben verwendet. Die Kontamination des aus der Atmosphäre gewonnenen Kryptongases mit Kr-85 ist inzwischen mit ca. 1,4 MBq/m³ so groß, dass die StrlSchV im § 106 eine Ausnahmeregelung für die Verwendung von atmosphärischem Krypton in Konsumgütern vorsieht. Die in der Luft vorkommende Aktivitätskonzentration von 1 Bq/m³ Kr-85 führt zu einer Hautdosis von 4×10^{-4} mSv/Jahr und einer effektiven Dosis von 8×10^{-6} mSv/Jahr, also vernachlässigbar geringen Werten.

Ein anderes Beispiel ist I-129. Auch dieses Radionuklid stammt hauptsächlich aus der Kerntechnik und wird bei der Wiederaufarbeitung freigesetzt. Das Isotopenverhältnis I-129/I-127 im Niederschlag liegt derzeit bei ca. 10^{-8} und ergibt eine Organdosis für die Schilddrüse von ca. 6×10^{-6} mSv/Jahr für Erwachsene (Michel et al. 2010, Schmidt et al. 1998). Meerwasser stellt allerdings eine wirtschaftlich nutzbare Ressource für die Gewinnung von Jod dar. Ergebnisse einer aktuellen Untersuchung (Daraoui et al. 2016) geben für die Nordsee einen Wertebereich der I-129/I-127-Isotopenverhältnisse von ca. 10^{-8} bis 3×10^{-6} an, verweisen aber bezüglich der direkten Einleitstellen bei La Hague auf Werte bis 10^{-3}.

Bei Gewinnung von Jod aus Nordseetang, der in einer Region mit einem Isotopenverhältnis I-129/I-127 von $1,0 \times 10^{-6}$ stammt, ist mit I-129-Konzentrationen von ca. 6,6 Bq/g im elementaren Jod zu rechnen. Die Freigrenze der StrlSchV für I-129 liegt bei 100 Bq/g, der Wert für eine uneingeschränkte Freigabe nach Anlage III Tab. 1 Sp. 5 StrlSchV bei 0,4 Bq/g, nach der Richtlinie 2013/59/Euratom bei nur noch 0,01 Bq/g. Eine I-129-Konzentration in der Nordsee mit einem Isotopenverhältnis von I-129/I-127 = $1,5 \times 10^{-5}$ würde dazu führen, dass marines Jod zu einem radioaktiven Stoff wird, eine Entwicklung, die nach dem Leitbild nachhaltiger Entwicklung vermieden werden muss.

Die Beispiele zeigen, dass radioaktive Kontaminationen der Umwelt die Nutzbarkeit von natürlichen Ressourcen beeinträchtigen können, auch wenn damit keine radiologisch relevanten Expositionen verbunden sind.

Im Unterschied zu den vorgenannten Beispielen sind andere Ressourcen (z. B. Eisenlagerstätten) in ihrer wirtschaftlich nutzbaren Form vor Umweltkontaminationen geschützt oder hinreichend robust, um keine spezielle Beachtung im Rahmen einer auf Radioaktivität ausgerichteten Ressourcenvorsorge zu benötigen.

Es ist aber auch festzustellen, dass bereits die natürliche Radioaktivität die Ressourcennutzung beeinträchtigen kann. So sind die Radioaktivität und der Urangehalt von Grundwasser durch die TrinkwV limitiert. Auch können bestimmte Gesteine nicht uneingeschränkt als Baustoffe verwendet werden. Derartige natürliche Belastungen von Ressourcen mit Radionukliden sind aber kein Gegenstand der Ressourcenvorsorge. Das gilt auch für den Bergbau und die industrielle Verarbeitung von Rohstoffen mit erhöhter Radioaktivität (NORM).

Eine Klärung, an welchen Stellen ein Vorsorgeanspruch zur Ressourcenvorsorge abzuleiten ist, wird daher benötigt.

Ausgehend von diesen und den im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Sachverhalten empfiehlt die SSK:

Empfehlung 17: Auf langfristige Veränderungen der großräumigen bis globalen Konzentrationen von Radionukliden, die einer nationalen

Regelsetzung nicht zugänglich sind, sollte international Einfluss genommen werden, wenn diese Veränderungen absehbar zu radiologisch relevanten Kontaminationen von Sachgütern und Rohstoffen oder zu nicht vernachlässigbaren Expositionen für den Menschen führen können. Um dieses Ziel umzusetzen, sollte die Entwicklung der Konzentration langlebiger Radionuklide in Umweltmedien beobachtet werden. Dazu sollten Daten aus bereits durchgeführten Monitoring-Programmen gezielt auf diesen Aspekt hin ausgewertet werden.

Empfehlung 18: **Losgelöst von Monitoring-Programmen und realen Kontaminationsentwicklungen soll bei geänderter oder neuer Genehmigung existierender Anlagen, die einer strahlenschutzrechtlichen Überwachung unterliegen und die Radionuklide in die Umweltmedien ableiten, geprüft werden, ob durch Umsetzung von Maßnahmen zur Emissionsminderung eine Reduzierung der Freisetzungen im Sinne des ALARA-Prinzips mit vertretbarem Aufwand erreichbar ist.**

Empfehlung 19: **Um auf zeitliche Veränderungen von Umweltkontaminationen reagieren zu können, sollen die existierenden Monitoring-Programme der Umweltmedien Wasser, Boden und Luft in angemessenen zeitlichen Abständen daraufhin überprüft werden, ob sie nach Stand der Wissenschaft hinreichend umfassend und geeignet sind, um langfristig wirkende ansteigende Trends zu erkennen. Sind solche langfristigen Trends nachgewiesen, so sollen die Monitoring-Programme so ausgerichtet werden, dass sie geeignet sind, Ursachen zu identifizieren und Maßnahmen, die eine Trendumkehr zum Ziel haben, zu begründen.**

8.4 Endlagerung

Eine besondere, weit in die Zukunft reichende Problemstellung ist die Lagerung und die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Bei dieser, den Strahlenschutz unmittelbar betreffenden gesellschaftlichen Aufgabe, betonte die Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfälle (KLHA 2016), dass sie sich an der Leitidee der nachhaltigen Entwicklung orientiert und mit ihren Empfehlungen Bedürfnisse und Interesse sowohl heutiger wie künftiger Generationen berücksichtigen will. Sie stellt aber auch fest, dass Klärungsbedarf besteht, *„was unter Nachhaltigkeit konkret zu verstehen ist“*.

Aus Sicht des Strahlenschutzes sieht es die SSK für geboten an, die aus der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle resultierende Strahlenexposition von Beschäftigten und Personen der Bevölkerung dauerhaft zu reduzieren. Sie sieht genau wie die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle eine Verbringung in ein Endlagerbergwerk in einer tiefen geologischen Formation als geeignete Lösung an. Soweit sich allerdings im Zusammenhang mit der tiefen geologischen Endlagerung radioaktiver Abfälle geplante Expositionssituationen über Zeiträume erstrecken, die eine Steuerung durch den Menschen nicht mehr zulassen, kann nach Meinung der SSK der Vorsorgegedanke als Teil der Nachhaltigkeit nicht ohne weiteres übertragen werden.

Die SSK empfiehlt daher:

Empfehlung 20: **Bei geplanten Expositionssituationen, die sich über Zeiträume erstrecken, die eine Steuerung durch den Menschen nicht mehr zulassen (z. B. im Zusammenhang mit der tiefen geologischen Endlagerung radioaktiver Abfälle), soll der Vorsorgegedanke nicht im Sinne eines Besorgnisgrundsatzes ausgestaltet und Nachhaltigkeit nicht anhand wenig wahrscheinlicher Entwicklungen beurteilt werden.**

Bei Betrachtungen, die im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle dem Schutz der Umwelt und des Menschen in ferner Zukunft dienen, darf eine mögliche Strahlenexposition der mit den Abfällen umgehenden Beschäftigten jetzt und in naher Zukunft nicht vernachlässigt werden.

Daher sollten Zeiten der Zwischenlagerung und der Einlagerung minimiert werden. Eine ggf. in Betracht zu ziehende Rückholung radioaktiver Abfälle sollte nur möglich sein, wenn sie nach den Grundprinzipien des Strahlenschutzes gerechtfertigt ist.

Literatur

AEUV 2009 — Europäische Union. Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union (AEUV). Fassung aufgrund des am 1.12.2009 in Kraft getretenen Vertrages von Lissabon (Konsolidierte Fassung bekanntgemacht im Abl. EG Nr. C 115 vom 9.5.2008, S. 47), zuletzt geändert durch die Akte über die Bedingungen des Beitritts der Republik Kroatien und die Anpassungen des Vertrags über die Europäische Union, des Vertrags über die Arbeitsweise der Europäischen Union und des Vertrags zur Gründung der Europäischen Atomgemeinschaft (Amtsblatt der Europäischen Union EU L 112/21 vom 24.4.2012) m.W.v. 01.07.2013

AkEnd 2002 — Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Abschlussbericht, Dezember 2002. urn:nbn:de:0221-201111176633

Alonzo et al. 2008 — Alonzo F, Hertel-Aas T, Gilek M, Gilbin R, Oughton DH, Garnier-Laplace J. Modelling the propagation of effects of chronic exposure to ionising radiation from individuals to populations. J Environ Radioact. 2008;99(9):1464-1473, doi:10.1016/j.jenvrad.2007.11.021

Alonzo et al. 2012 — Alonzo F, Garnier-Laplace J, Real A, Oughton D (eds.). Deliverable (D-N°5.2): Life history traits, radiosensitivity and population modeling: methods to extrapolate from individual endpoints to population dynamics, European Commission, Community Research, 2012 https://www.researchgate.net/profile/Frederic_Alonzo/publication/277277881_Life_history_traits_radiosensitivity_and_population_modeling_methods_to_extrapolate_from_individual_endpoints_to_population_dynamics/links/55659d5b08ae89e758fdabfe.pdf

Alonzo et al.2008 — Alonzo F, Hertel-Aas T, Gilek M, Gilbin R, Oughton DH, Garnier-Laplace J. Modelling the propagation of effects of chronic exposure to ionising radiation from individuals to populations. J Environ Radioact. 2008;99(9):1464-1473, doi:10.1016/j.jenvrad.2007.11.021

Andersson et al. 2009 — Andersson P, Garnier-Laplace J, Beresford NA, Copplestone D, Howard BJ, Howe P, Oughton D, Whitehouse P. Protection of the environment from ionising radiation in a regulatory context (protect): proposed numerical benchmark values. J Environ Radioact. 2009 Dec;100(12):1100-8, doi:10.1016/j.jenvrad.2009.05.010

AtG 1985	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 26. Juli 2016 (BGBl. I S. 1843) geändert worden ist
Ayotte et al. 2011	Ayotte JD, Gronberg JM, Apodaca LE. Trace Elements and Radon in Groundwater Across the United States, 1992–2003. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011-5059:115, 2011, http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5059, zuletzt aufgerufen am 26.10.2016
Baker et al. 1996	Baker RJ, Van Den Bussche RA, Wright AJ, Wiggins LE, Hamilton MJ, Reat EP, Smith MH, Lomakin MD, Chesser RK. High levels of genetic change in rodents of Chernobyl. Nature. 1996 Apr 25;380(6576):707-8, doi:10.1038/380707a0. Retraction in: Baker RJ, Van Den Bussche RA, Wright AJ, Wiggins LE, Hamilton MJ, Reat EP, Smith MH, Lomakin MD, Chesser RK. Nature. 1997 Nov 6;390(6655):100
Baker et al. 1997	Baker RJ, Van Den Bussche RA, Wright AJ, Wiggins LE, Hamilton MJ, Reat EP, Smith MH, Lomakin MD, Chesser RK. High levels of genetic change in rodents of Chernobyl. Nature. 1997 Nov 6;390(6655):100, doi:10.1038/36384
BauGB 2004	Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. September 2004 (BGBl. I S. 2414), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1722) geändert worden ist
BBodSchG 1998	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG) vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 101 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist
BBodSchV 2012	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 31 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist
Beresford et al. 2007	Beresford N, Brown J, Copplestone D, Garnier-Laplace J, Howard B, Larsson CM, Oughton D, Pröhl G, Zinger I. (eds,). D-ERICA: An integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation, Description of purpose, methodology and application, European Commission, Community Research, 2007, https://wiki.ceh.ac.uk/download/attachments/115017395/D-Erica.pdf

BfS 2009	Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide im Trinkwasser in der Bundesrepublik Deutschland. 2009, urn:nbn:de:0221-20100319945
BfS 2010a	Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Schutz der belebten Natur vor ionisierender Strahlung – Internationale Ansätze und das Stufenkonzept des Bundesamtes für Strahlenschutz. In: „Natürliche und künstliche Radionuklide in unserer Umwelt“ – 42. Jahrestagung des Fachverbands für Strahlenschutz e. V., Borkum, TÜV Media GmbH, TÜV Rheinland Group, Köln, 2010, Seite 338-343, ISSN 1013-4506
BfS 2010b	Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen – Bergbau). BfS-SW-07/10, urn:nbn:de:0221-20100329966
BfS 2012	Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Integriertes Mess- und Informationssystem zur Überwachung der Radioaktivität – IMIS. Broschüre Strahlenthemen. Bundesamt für Strahlenschutz. Öffentlichkeitsarbeit. Stand 01. Mai 2015 http://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/ion/stth-imis.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.08.2016
BGB 2002	Bürgerliches Gesetzbuch (BGB) in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. Januar 2002 (BGBl. I S. 42, 2909; 2003 I S.738), das durch Artikel 3 des Gesetzes vom 24. Mai 2016 (BGBl. I S. 1190) geändert worden ist
BImSchG 2013	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das durch Artikel 3 des Gesetzes vom 26. Juli 2016 (BGBl. I S. 1839) geändert worden ist
Bister 2012	Bister S. Radioökologische Untersuchungen landwirtschaftlich genutzter Auen der Mulde zu den Folgen des ehemaligen Uranbergbaus. Dissertation, Universität Hannover 2012, https://www.irs.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/drbister.pdf, zuletzt aufgerufen am 26.10.2016
Bister et al. 2015	Bister S, Birkhan J, Lüllau T, Bunka M, Solle A, Stieghorst C, Riebe B, Michel R, Walther C. Impact of former uranium mining activities on the floodplains of the Mulde River, Saxony, Germany. J Environ Radioact. 2015 Jun;144:21-31, doi: 10.1016/j.jenvrad.2015.02.024. Epub 2015 Mar 17

BMU 1986	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Leitlinien der Bundesregierung zur Umweltvorsorge durch Vermeidung und stufenweise Verminderung von Schadstoffen (Leitlinien Umweltvorsorge), Bundestagsdrucksache Drucksache 10/6028 vom 19.09.1986
BMU 1997	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung bei bergbaulichen Tätigkeiten (REI-Bergbau) vom 11.08.1997, https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/fachinfo/ion-altlasten/rei-bergbau.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.08.2016
BMU 2012a	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung (Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen) vom 28.08.2012. BAnz AT 05.09.2012 B1
BMU 2012b	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2010, Unterrichtung durch die Bundesregierung, 2012, https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-201205118217/3/Parlamentsbericht_2010.pdf, zuletzt aufgerufen am 15.03.2016
BMUB 2016	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung: Jahresbericht 2014, 2016, urn:nbn:de:0221-2016091514109
BNatSchG 2009	Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz – BNatSchG) vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das durch Artikel 2 des Gesetzes vom 4. August 2016 (BGBl. I S. 1972) geändert worden ist
Bonka und Horn 1980	Bonka H, Horn H-G. Collective doses due to radioactive emissions from nuclear plants. International Congress of the International Radiation Protection Association, 5 Jerusalem, Israel, 9-14 March 1980, (pp. v129-32). Israel 1980 http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/11/548/11548777.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.08.2016
Britton 2005	Britton NF. Essential Mathematical Biology, Springer, London, 2005, ISBN 1-85233-536-X
Caratero et al. 1998	Caratero A, Courtade M, Bonnet L, Planel H, Caratero C. Effect of a continuous gamma irradiation at a very low dose on the life span of mice. Gerontology, 1998;44(5):272-6

Caswell 2001	Caswell H. Matrix Population Models: Construction, Analysis, and Interpretation. Second Edition. Sinauer Associates, Sunderland Massachusetts, 2001, ISBN 978-0878930968
ChemG 1980	Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Chemikaliengesetz) in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. August 2013 (BGBl. I S. 3498, 3991), das durch Artikel 4 Absatz 97 des Gesetzes vom 18. Juli 2016 (BGBl. I S. 1666) geändert worden ist
Chesser und Baker 2006	Chesser RK, Baker RJ. Growing Up with Chernobyl, Am Scientist. 2006;94:542–549, doi:10.1511/2006.62.1011
CNSC 2008	Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC). Standards and Guidelines for Tritium in Drinking Water, INFO-0766. 2008, ISBN 978-0-662-47497-5
Copplestone et al. 2001	Copplestone D, Bielby S, Jones SR, Patton D, Daniel P, Gize I. Impact Assessment of Ionising Radiation on Wildlife. Environment Agency, R&D Publication 128. 2001, ISBN 1 85705590 X
Copplestone et al. 2003	Copplestone D, Zinger I. Jackson D. The challenge of protecting non-human biota from exposure to ionizing radiation. In: The Society for Radiological Protection 40th Anniversary Meeting: ALARP: Principles and Practices, St. Catherine's College, Oxford 2003
Dahlgaard et al. 1995	Dahlgaard H, Chen QJ, Herrmann J, Nies H, Ibbett RD, Kershaw PJ. On the background level of ^{99}TC, ^{90}Sr and ^{137}Cs in the North Atlantic. J Mar Syst. 1995;6:571-578, doi:10.1016/0924-7963(95)00025-K
Daraoui et al. 2016	Daraoui A, Tosch L, Gorny M, Michel R, Goroncy I, Herrmann J, Nies H, Synal HA, Alfimov V, Walther C. Iodine-129, Iodine-127 and Cesium-137 in seawater from the North Sea and the Baltic Sea. J Environ Radioact. 2016 Jun 16;162-163:289-299, doi:10.1016/j.jenvrad.2016.06.006
Deutscher Bundestag 1996	Deutscher Bundestag. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Halo Saibold und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN - Verbrennung von radioaktiv verseuchtem Molkepulver bei der Gesellschaft für Sondermüllbeseitigung. 17. Wahlperiode, Drucksache 13/4650 vom 17.05.1996
Deutscher Bundestag 2011	Deutscher Bundestag. Schriftliche Fragen mit den in der Woche vom 4. April 2011 eingegangenen Antworten der Bundesregierung. 17. Wahlperiode, Drucksache 17/5422, 26.08.2011

EBA 2002	Eisenbahn-Bundesamt (EBA). Umwelt-Leitfaden zur eisenbahnrechtlichen Planfeststellung und Plangenehmigung sowie für Magnetschwebebahnen, 3. Fassung, Stand Juli 2002, Anhang XIII, www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_01072002_23Pau.htm
EC 1994	Rat der Europäischen Gemeinschaften. Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission vom 28. Juni 1994 zur Festlegung von Grundsätzen für die Bewertung der von Altstoffen ausgehenden Risiken für Mensch und Umwelt gemäß der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union, L 161 /4, 29.06.1994
EG 1998	Rat der Europäischen Union. Richtlinie 98/83/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 3. November 1998 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. Amtsblatt der Europäischen Union, L 330/32, 05.12.1998
EG 2008	Rat und Parlament der Europäischen Union. Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21.05.2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Amtsblatt der Europäischen Union, Amtsblatt der Europäischen Union, L 152/1, 11.06.2008
EG 2000	Rat und Parlament der Europäischen Union. Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt der Europäischen Union, L 327/1, 22.12.2000
EPA 1976	Environmental Protection Agency (EPA). 40 CFR 190 Environmental Radiation Protection Requirements for Normal Operation of Activities in the Uranium Fuel Cycle, Final Environmental Statement, EPA 520/4-76-016, two volumes, Washington, DC, 1976
Erbgut und Schink 1996	Erbgut W, Schink A. Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung, Kommentar, 2. überarbeitete Auflage. Verl. C.H. Beck, 1996, ISBN 978-3406394911
EU 2010	Rat und Parlament der Europäischen Union. Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung) (Text von Bedeutung für den EWR). Amtsblatt der Europäischen Union, L 334/17, 17.12.2010

Euratom 1987	Rat der Europäischen Gemeinschaften. Verordnung (Euratom) Nr. 3954/87 des Rates vom 22.12.1987 zur Festlegung von Höchstwerten an Radioaktivität in Nahrungsmitteln und Futtermitteln im Falle eines nuklearen Unfalls oder einer anderen radiologischen Notstandssituation. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 371/11-13, 30.12.1987
Euratom 2013	Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2013/51/EURATOM des Rates vom 22. Oktober 2013 zur Festlegung von Anforderungen an den Schutz der Gesundheit der Bevölkerung hinsichtlich radioaktiver Stoffe in Wasser für den menschlichen Gebrauch. Amtsblatt der Europäischen Union, L 296/12, 07.11.2013
Euratom 2014	Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2013/59/Euratom des Rates vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom. Amtsblatt der Europäischen Union, L 13/1, 17.01.2014
Fendrik und Bors 1991	Fendrik I, Bors JS. Handbuch der Pflanzenkrankheiten. Erster Band. Die nichtparasitären Krankheiten. 6. Teil/Lieferung. Strahlenschäden an Pflanzen. Verlag Paul Parey. Berlin, 1991, ISBN 978-3489769262
Fent 2013	Fent, K. Ökotoxikologie: Umweltchemie – Toxikologie – Ökologie. 4., vollständig überarbeitete Auflage. Thieme Verlag, 2013, ISBN 978-3131099945
FS 1981	Fachverband für Strahlenschutz. Radiologische Auswirkungen von Kernkraftwerken und anderen Kerntechnischen Anlagen auf den Menschen und seine Umwelt: gemeinsame Strahlenschutztagung, 15. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V., Jahrestagung der Société française de radioprotection an der École polytechnique, Lausanne/Schweiz 30. September – 2. Oktober 1981, FS-82-27-T
Fuller et al. 2015	Fuller N, Lerebours A, Smith JT, Ford AT. The biological effects of ionising radiation on Crustaceans: A review, Aquat Toxicol. 2015 Oct;167:55-67, doi:10.1016/j.aquatox.2015.07.013
Garnier-Laplace et al. 2006	Garnier-Laplace J, Della-Vedova C, Gilbin R, Copplestone D, Hingston JL & Ciffroy P. First derivation of predicted-no-effect values for freshwater and terrestrial ecosystems exposed to radioactive substances, Environ Sci Technol. 2006 Oct 15;40(20):6498-505

Garnier-Laplace et al. 2008	Garnier-Laplace J, Copplestone D, Gilbin R, Alonzo F, Ciffroy P, Gilek M, Aguero A, Bjork M, Oughton D, Jaworska A, Larsson C & Hingston JL. Issues and practices in the use of effects data from FREDERICA in the ERICA Integrated Approach, J Environ Radioact. 2008;99(9):1474-1483, doi:10.1016/j.jenvrad.2008.04.012
Garnier-Laplace et al. 2013	Garnier-Laplace J, Geras'kin S, Della-Vedova C, Beaugelin-Seiller K, Hinton TG, Real A, Oudalova A. Are radiosensitivity data derived from natural field conditions consistent with data from controlled exposures? A case study of Chernobyl wildlife chronically exposed to low dose rates. J Environ Radioact. 2013 Jul;121:12-21; doi: 10.1016/j.jenvrad.2012.01.013
Garnier-Laplace und Gilbin 2006	Garnier-Laplace J, Gilbin R (eds.). Deliverable 5: Derivation of Predicted-No-Effect-Dose-Rate values for ecosystems (and their sub-organisational levels) exposed to radioactive substances, European Commission, Community Research, 2006
Gassner et al. 2010	Gassner E, Winkelbrandt A, Bernotat D. UVP und strategische Umweltprüfung: Rechtliche und fachliche Anleitung für die Umweltverträglichkeitsprüfung (Praxis Umweltrecht, Band 12); 5: Auflage, 2010, Müller CF in Hüthig Jehle Rehm, ISBN 978-3811432482
Gellermann et al. 2010	Gellermann R, Günther P,·Evers B. Beurteilung von Bodenkontaminationen mit Radioaktivität im Gebiet Hannover-List nach Maßstäben und Ansätzen der BBodSchV Teil 1: Ableitung von Prüfwerten. Umweltwiss Schadst Forsch. 2010;22:694–701, doi 10.1007/s12302-010-0155-0
Gellermann und Löbner 2016	Gellermann R, Löbner W. Umweltauswirkungen von Vorhaben auf Sachgüter – der Aspekt Radioaktivität. UVP-report 30 2016;1:15-22
GenTG 1993	Gesetz zur Regelung der Gentechnik (Gentechnikgesetz – GenTG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 16. Dezember 1993 (BGBl. I S. 2066), das durch Artikel 4 Absatz 13 des Gesetzes vom 18. Juli 2016 (BGBl. I S. 1666) geändert worden ist
Geras'kin et al. 2005	Geras'kin S, Kim J, Oudalova A, Vasiliyev D, Dikareva N, Zimin V, Dikarev V. Biomonitoring the genotoxicity of populations of Scots pine in the vicinity of radioactive waste storage facility. Mutat Res. 2005 May 2;583(1):55-66
Geras'kin et al. 2008	Geras'kin SA, Fesenko SV, Alexakhin RM. Effects of non-human species irradiation after the Chernobyl NPP accident. Environ Int. 2008 Aug;34(6):880-97, doi:10.1016/j.envint.2007.12.012

Geras'kin et al. 2010	Geras'kin S, Oudalova A, Dikareva N, Mozolin E, Prytkova J, Dikarev V, Chernonog E, Novikova T. Effects of radioactive contamination on plant populations and radiation protection of biota. Third European IRPA Congress 2010, Helsinki, Finland, 1467-1475
HELCOM 2013	Helsinki Commission (HELCOM) – Baltic Marine Environment Protection Commission. Thematic assessment of long-term changes in radioactivity in the Baltic Sea, 2007-2010, Baltic Sea Environment Proceedings No. 135, 2013, ISSN 0357-2994
Herrmann et al. 1998	Herrmann J, Nies H, Goroncy I. Plutonium in the Deep Layers of the Norwegian and Greenland Seas, Radiat Prot Dosimetry 1998;75(1-4):237-245
Hines 1966	Hines NO. Atoms, Nature, and Man. US Atomic Energy Commission – Division on of Technical Information, 1966, ISBN 978-1508453727
Hinton et al. 2004	Hinton TG, Bedford JS, Congdon JC, Whicker FW. Effects of radiation on the environment: a need to question old paradigms and enhance collaboration among radiation biologists and radiation ecologists. Radiat Res. 2004 Sep;162(3):332-8
Hunt und Kershaw 1990	Hunt GJ, Kershaw PJ. Remobilisation of artificial radionuclides from the sediment of the Irish Sea. J Radiol Prot. 1990;10(2):147-151
Hyodo-Taguchi 1980	Hyodo-Taguchi Y. Effects of chronic gamma-irradiation on spermatogenesis in the fish, Oryzias latipes, with special reference to regeneration of testicular stem cells. Radiation Effects on Aquatic Organisms. Japan Scientific Societies Press 1980:91-104
IAEA 1995	International Atomic Energy Agency (IAEA). Sources of radioactivity in the marine environment and their relative contributions to overall dose assessment from marine radioactivity (MARDOS), Final report of a co-ordinated research programme, IAEA-TECDOC-838, 1995, ISSN 1011-4289,
IAEA 2001	International Atomic Energy Agency (IAEA). Present and future environmental impact of the Chernobyl accident. Study monitored by an International Advisory Committee under the project management of the Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN), France, IAEA-Tec-Doc 1240, 2001, ISSN 1011–4289
IAEA 2014a	International Atomic Energy Agency (IAEA). Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. IBSS General Safety Requ. Part3. GSR Part3. Vienna, 2014, ISBN 978-92-0-135310-8

IAEA 2014b	International Atomic Energy Agency (IAEA). Technical Reports Series No. 479. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer to Wildlife. Vienna, 2014, ISBN:978-92-0-100714-8
IAEA 2014c	International Atomic Energy Agency (IAEA). Managing Environmental Impact Assessment for Construction and Operation in New Nuclear Power Programmes. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3.11, 2014, ISSN 1995–7807
IAEA 2015a	International Atomic Energy Agency (IAEA). The Fukushima Daiichi Accident. Report by the Director General. Vienna 2015, ISBN 978–92–0–107015–9 (set)
IAEA 2015b	International Atomic Energy Agency (IAEA). Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. IAEA Safety Standards, General Safety Requirements No. GSR Part 7, Vienna 2015, ISBN 978-92–0–105715–0,
ICRP 1959	International Commission on Radiological Protection (ICRP). Report of Committee 2 on Permissible dose for internal radiation. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 2. Pergamon Press, 1959. Superseded by ICRP Publication 30
ICRP 1977	International Commission on Radiological Protection (ICRP). Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1 (3). 1977. Superseded by ICRP Publication 103
ICRP 1991	International Commission on Radiological Protection (ICRP). 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21(1-3), Pergamon Press, 1991, ISBN 0080411444
ICRP 2007	International Commission on Radiological Protection (ICRP). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37(2-4), Elsevier, 2007, ISBN 978-0702030482
ICRP 2008	International Commission on Radiological Protection (ICRP). Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108. Ann, ICRP 38(4-6), Elsevier, 2008, ISBN 978-0444529343
ICRP 2009	International Commission on Radiological Protection (ICRP). Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants, ICRP Publication 114, Ann ICRP 39 (6), Elsevier, 2009, ISBN 978-1-4557 2708-7

ICRP 2014	International Commission on Radiological Protection (ICRP). Protection of the Environment under Different Exposure Situations. ICRP Publication 124. Ann. ICRP 43(1), SAGE Publications Ltd; 2014; ISBN 978-144629614
IRSN 2016	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). Radiation protection of the environment, State of the art and IRSN recommendations. Report IRSN 2016-03, http://www.irsn.fr/EN/newsroom/News/Documents/Radiation-protection-environment-recommendations_201603.pdf (zuletzt aufgerufen am 29.11.2016)
Jacob et al. 1997	Jacob P, Pröhl G, Schneider K, Voß J-U. Machbarkeitsstudie zur Verknüpfung der Bewertung radiologischer und chemisch-toxischer Wirkungen von Altlasten. Forschungsbericht 203 40 814/01 und 02. UBA-FB 97-070. UBA Texte 43/97, Umweltbundesamt Berlin (Hrsg.) 1997
Jia 2013	Jia G. The Radiological Impact of ^{210}Pb and ^{210}Po Released from the Iron- and Steel-Making Plant ILVA in Taranto (Italy) on the Environment and the Public. J Chem. 2013;2013, doi: 10.1155/2013/964310
Kelly et al. 1975	Kelly GN, Jones JA, Bryant PM, Morley F. The predicted radiation exposure of the population of the European Community resulting from discharges of ^{85}Kr, ^{3}H, ^{14}C and ^{129}I from the nuclear power industry to the year 2000. The Commission of the European Communities Doc. No. V/2676/75,1975
KIT 2016	Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Bilanz von Naturkatastrophen seit 1900: acht Millionen Tote, sieben Billionen Dollar Schaden. Presseinformation 058/2016, http://www.kit.edu/kit/pi_2016_058_bilanz-von-naturkatastrophen-seit-1900-acht-millionen-tote-sieben-billionen-dollar-schaden.php, zuletzt aufgerufen am 01.12.2016
KLHA 2016	Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe (KLHA). Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Verantwortung für die Zukunft – Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Deutscher Bundestag, Drucksache 18/9100 vom 05.07.2016, http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/091/1809100.pdf
Klös 2004	Klös H. Messdaten der Radioaktivität und chemische Gifte in Sedimenten in NRW. Stand: 03/2004, http://www.bibaxx.homepage.t-online.de/pdf/radiologie_2000.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.08.2016

Knowles 1999	Knowles JF. Long-term irradiation of a marine fish, the plaice Pleuronectes platessa: an assessment of the effects on size and composition of the testes and of possible genotoxic changes in peripheral erythrocytes. Int J Radiat Biol. 1999 Jun;75(6):773-82
KrWG 2012	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 4. April 2016 (BGBl. I S. 569) geändert worden ist
Küppers et al. 2010	Küppers C, Steinhoff M, Schulze F, Ustohalova V, Gellermann R, Müller A. Klärung technischer und rechtlicher Fragestellungen bei der Beseitigung radioaktiv kontaminierter Abfälle landwirtschaftlicher Produkte nach Ereignissen mit nicht unerheblichen radiologischen Konsequenzen. Abschlussbericht zum Vorhaben 3608S04572, Öko-Institut e. V. Darmstadt, 2010
Küppers et al. 2012	Küppers C, Ustohalova V, Ulanovsky A. Systematische Untersuchung der Exposition von Flora und Fauna bei Einhaltung der Grenzwerte der StrlSchV für den Menschen – Vorhaben 3609S70006. Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz, BfS-RESFOR-62/12, Salzgitter, März 2012, http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-201203227814
LAI 2004	Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI): Bewertung von Schadstoffen, für die keine Immissionswerte festgelegt sind – Orientierungswerte für die Sonderfallprüfung und für die Anlagenüberwachung sowie Zielwerte für die langfristige Luftreinhalteplanung unter besonderer Berücksichtigung der Beurteilung krebserzeugender Luftschadstoffe. Bericht des Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI) vom 21. September 2004, www.lanuv.nrw.de/gesundheit/pdf/LAI2004.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.08.2016
Larsson 2004	Larsson CM. The FASSET framework for assessment of environmental impact of ionizing radiation in European ecosystems – an overview. J Radiol Prot. 2004 Dec;24(4A):A1-12
Larsson 2008	Larsson CM. An overview of the ERICA Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionizing contaminants. J Environ Radioact. 2008 Sep;99(9):1364-70, doi: 10.1016/j.jenvrad.2007.11.019

Larsson et al. 2004	Larsson CM, Jones C, Konsult K, Gomez-Ros JM, Zinger I (eds.). Deliverable 6: Framework for assessment of environmental impact of ionising radiation in major European ecosystems, European Commission, Community Research, 2004, https://wiki.ceh.ac.uk/download/attachments/115802176/FASSET_D6.pdf
Laskey et al. 1973	Laskey JW, Parrish JL, Cahill DF. Some effects of lifetime parental exposure to low levels of tritium on the F2 generation. Radiat Res. 1973 Oct;56(1):171-9
LAWA 2004	Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. Düsseldorf, im Dezember 2004, http://www.lawa.de/documents/GFS-Bericht-DE_a8c.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.08.2016
LAWA-LABO 2006	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Länderarbeitsgemeinschaft Boden (LABO). Grundsätze des nachsorgenden Grundwasserschutzes bei punktuellen Schadstoffquellen. Mainz 2006, http://www.lawa.de/documents/Grundsaetze_Nachsorge__fa0.pdf
LfU 2011	Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). Radon und Radonfolgeprodukte im Trinkwasser in Bayern Mai 2011, urn:nbn:de:bvb:12-babs-0000018399
Liland et al. 2009	Liland A, Lochard J, Skuterud L. How long is long-term? Reflections based on over 20 years of post-Chernobyl management in Norway. J Environ Radioact. 2009;100:581-584, doi:10.1016/j.jenvrad.2009.04.006
Livingston und Povinec 2000	Livingston HD, Povinec PP. Anthropogenic marine radioactivity. Ocean & Coastal Management 2000;43:689-712
McMahon et al. 2010	McMahon KA, Bixler NE, Kelly JE, Siegel MD, Weiner RF, Klein KA. Review of the Technical Bases of 40 CFR Part 190, SANDIA REPORT. SAND2010-3757. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, July 2010, http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2010/103757.pdf
Michel 2010	Michel R. Frage der Nachhaltigkeit im Zusammenhang mit langlebigen Radionukliden. In Interventionen und Nachhaltigkeit im Strahlenschutz. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission. Bd. 65. Hoffmann Verlag – Fachverlag, Berlin 2010, S. 17-29
Michel et al. 2005	Michel R, Feuerborn J, Knöchel A, Miller F, Ritzel S, Treutler HC, von Tümpling W, Wanke C. Radionuclides in the Mulde River System after the August-2002 Flood. Acta hydrochim hydrobiol. 2005;33(5):492−506, doi:10.1002/aheh.200400593

Michel et al. 2010	Michel R, Tosch L, Daraoui A, Gorny M, Jakob D, Nies H, Goroncy I, Herrmann J, Nielsen SP, Dawdall M, Rudjord AL, Gäfvert T, Synal H-A, Stocker M, Alfimov V. Langlebige Radionuklide in der Hydrosphäre am Beispiel des I-129. In Interventionen und Nachhaltigkeit im Strahlenschutz. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission. Bd. 65. Hoffmann Verlag – Fachverlag, Berlin 2010, S. 283-316
Møller und Mousseau 2007	Møller AP, Mousseau TA. Species richness and abundance of forest birds in relation to radiation at Chernobyl. Biol Lett. 2007;3:483–486, doi:10.1098/rsbl.2007.0226
Møller und Mousseau 2008	Møller AP, Mousseau TA. Reduced abundance of insects and spiders linked to radiation at Chernobyl 20 years after the accident. Biol Lett. 2009;5:356-359, doi:10.1098/rsbl.2008.0778
Møller und Mousseau 2009	Møller AP, Mousseau TA. Reduced abundance of raptors in radioactively contaminated areas near Chernobyl, J Ornithol. 2009;150:239-246, doi: 10.1007/s10336-008-0343-5
Monte 2013	Monte L. Predicting the effect of ionizing radiation on biological populations: testing of a non-linear Leslie model applied to a small mammal population. J Environ Radioact. 2013 Aug;122:63-9, doi: 10.1016/j.jenvrad.2013.03.003
NCRP 1991	National Council on Radiation Protection and Measurements (NRCP). Effects of Ionizing Radiation on Aquatic Organisms. NCRP Report No 140, 1991
Nies et al. 1999	Nies H, Harms IH, Karcher MJ, Dethleff D, Bahe C. Anthropogenic radioactivity in the Arctic Ocean. Sci Total Environ. 1999 Sep 30;237-238:181-91
Norse Decom AS 2003	Norse Decom AS. Naturally occurring radionuclides in the marine environment – an overview of current knowledge with emphasis the North Sea area. Editor Varskog P, 2003. ISBN 82-92538-01-1
OSPAR 1992	Oslo-Paris-Kommission zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (OSPAR). Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks vom 22. September 1992 (BGBl. 1994 II S. 1360)
OSPAR 2009	Oslo-Paris-Kommission zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (OSPAR). Radioactive Substances Series. Towards the Radioactive Substances Strategy Objectives. Third Periodic Evaluation, 2009, ISBN 978-1-906840-95-2

OSPAR 2010	Oslo-Paris-Kommission zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (OSPAR). The North-East Atlantic Environment Strategy. Strategy of the OSPAR Commission for the Protection of the Marine. Environment of the North-East Atlantic 2010–2020. (OSPAR Agreement 2010-3), http://www.ospar.org/site/assets/files/1413/10-03e_nea_environment_strategy.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.08.2016
OSPAR 2014	OSPAR-Commission. Produced Water Discharges from Offshore Oil and Gas Installations 2007-2012, OIC14/AS01, http://www.ospar.org/site/assets/files/7413/ospar_assessment_sheet_produced_water_2014.pdf, zuletzt aufgerufen am 30.08.2016
Ott 2010	Ott K. Zur Begründung der Konzeption starker Nachhaltigkeit. In Interventionen und Nachhaltigkeit im Strahlenschutz. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission. Bd. 65. Hoffmann Verlag – Fachverlag, Berlin 2010
Pentreath 1998	Pentreath RJ. Radiological Protection Criteria for the Natural Environment. Radiat Prot Dosimetry 1998;75(1-4):175-179
Pentreath 1999	Pentreath RJ. A system for radiological protection of the environment: some initial thoughts and ideas. J Radiol Prot. 1999;19(2):117-128
Pentreath 2002a	Pentreath RJ. Radiation protection of people and the environment: developing a common approach. J Radiol Prot. 2002;22:45–56
Pentreath 2002b	Pentreath RJ. Concepts, methods and models to assess environmental impact. In: Radiological Protection of the Environment. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, pp. 121–130, 2002
Pentreath 2003	Pentreath RJ. Evaluating the effects of ionising radiation upon the environment. In: Third International Symposium on the Protection of the Environment from Ionising Radiation (Darwin Symposium). Proceedings of the Third International Symposium on the Protection of the Environment from Ionising Radiation, 22–26 July 2002, Darwin. International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 204–212.
Pentreath 2004	Pentreath RJ. Ethics, genetics and dynamics: An emerging systematic approach to radiation protection of the environment. J Environ Radioact. 2004;74:19–30
Pentreath 2005	Pentreath RJ. Concept and use of reference animals and plants. In: Protection of the Environment from the Effects of Ionizing Radiation. IAEA-CN-10

Pinon-Lataillade et al. 1988	Pinon-Lataillade G, Vélez de la Calle JF, Viguier-Martinez MC, Garnier DH, Folliot R, Maas J, Jégou B. Influence of germ cells upon Sertoli cells during continuous low-dose rate gamma-irradiation of adult rats. Mol Cell Endocrinol. 1988 Jul;58(1):51-63
Pröhl 2012	Pröhl G. IAEA Safety Standards and Radiological Environmental Impact Assessment. International Working Forum on Regulatory Supervision of Legacy Sites. 9 October 2012, IAEA , Vienna, https://gnssn.iaea.org/RTWS/rsls-public/Shared%20Documents/Meetings/3rd%20TM,%202012,%20Austria/Presentations/Environmental%20Impact%20Assessments,%20Proehl.pdf, zuletzt aufgerufen am 19.10.2016
PROTECT 2009	Protection of the Environment from Ionising Radiation in a Regulatory Context (PROTECT). Executive Summary, 12.09.2009, https://wiki.ceh.ac.uk/download/attachments/113869684/PROTECT_Executive_Summary.pdf, zuletzt aufgerufen am 24.10.2016
PTBT 1963	Partial Test Ban Treaty (PTBT). Treaty Banning Nuclear Weapon Tests in the Atmosphere, in Outer Space and under Water. 5. August 1963, https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%20480/volume-480-I-6964-English.pdf**,** zuletzt aufgerufen am 17.08.2016
Ravila und Holm 1994	Ravila A, Holm E. Radioactive elements in the forest industry. Sci Total Environ. 1994 December;157:339-356, doi:10.1016/0048-9697(94)90598-3
REACH 2006	Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission
Real 2016	Real A. RBE weight absorbed dose. Joint IES-ICRP Symposium on Environmental Protection within the ICRP System of Radiological Protection, Rokkasho, Aomori, Japan, October 4, 2016 http://www.icrp.org/docs/2016aomori/7%20Real.pdf

Real et al. 2004	Real A, Sundell-Bergman S, Knowles JF, Woodhead DS, Zinger I. Effects of ionising radiation exposure on plants, fish and mammals: relevant data for environmental radiation protection. J Radiol Prot. 2004 Dec;24(4A):A123-37
Risica und Grande 2000	Risica S, Grande S (Istituto Superiore di Sanità). Council Directive 98/83/EC on the quality of water intended for human consumption: calculation of derived activity concentrations, Rapporti ISTISAN 00/16. Roma, 2000
Ritzel 2008	Ritzel St. Natürliche Radionuklide in der Umwelt – Vorkommen, anthropogene Einflüsse und radiologische Relevanz in ausgewählten Bergbaugebieten Deutschlands. Dissertation. Universität Hannover, Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, 2008, ISBN 978-3838106090
Rockström et al. 2009	Johan Rockström, Will Steffen, Kevin Noone, Åsa Persson, F. Stuart Chapin, III, Eric F. Lambin, Timothy M. Lenton, Marten Scheffer, Carl Folke, Hans Joachim Schellnhuber, Björn Nykvist, Cynthia A. de Wit, Terry Hughes, Sander van der Leeuw, Henning Rodhe, Sverker Sörlin, Peter K. Snyder Robert Costanza, Uno Svedin, Malin Falkenmark, Louise Karlberg, Robert W. Corell, Victoria J. Fabry, James Hansen, Brian Walker, Diana Liverman, Katherine Richardson, Paul Crutzen & Jonathan A. Foley. A safe operating space for humanity. Nature. 2009 Sep 24;461(7263):472-5, doi:10.1038/461472a
ROG 2008	Raumordnungsgesetz (ROG) vom 22. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2986), das zuletzt durch Artikel 124 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist
Schmidt et al. 1998	Schmidt A, Schnabel C, Handl J, Jakob D, Michel R, Synal HA, Lopez JM, Suter M. On the analysis of iodine-129 and iodine-127 in environmental materials by accelerator mass spectrometry and ion chromatography. Sci Total Environ. 1998 Nov 10;223(2-3):131-56. Review
Schwibach et al. 1978	Schwibach J, Riedel H und Bretschneider J. Investigations Into the Emission of Carbon-14 Compounds from Nuclear Facilities, Its Measurement and the Radiation Exposure Resulting from the Emission: Report Prepared Under the Terms of Study Contract 1114-77-10 L/V. Commission of the European Communities, 1978
Skleppström und Olofson 2007	Skleppström K, Olofson B. Uranium and radon in groundwater. European Water 2007;17/18:51-62

SSI 2005	Swedisch Standard Institut (SSI). The Swedish Radiation Protection Authority's Regulations and General Advice on the handling of Ashes Contaminated by Caesium-137. SSI FS 2005:1, issued on February10th, 2005, https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/Forfattning/Stralskydd/2005/ssifs-2005-1e.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.08.2016
SSK 2003a	Strahlenschutzkommission (SSK). Beiträge zur Weiterentwicklung der Konzepte im Strahlenschutz. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet von der SSK am 23.05.2003. BAnz Nr. 218 vom 21.11.2003
SSK 2003b	Strahlenschutzkommission (SSK). Strahlenexposition durch Radon-222 im Trinkwasser. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 188. Sitzung der SSK am 02./03.12.2003
SSK 2006	Strahlenschutzkommission (SSK). Kriterien für die Beurteilung von Tätigkeiten und Verfahren im Hinblick auf eine Rechtfertigung. Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit Begründung und Erläuterung der Empfehlung, verabschiedet in der 205. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 16./17. Februar 2006
SSK 2010	Strahlenschutzkommission (SSK). Interventionen und Nachhaltigkeit im Strahlenschutz. Klausurtagung der Strahlenschutzkommission am 13./14. November 2008. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission. Band 65, Hoffmann Verlag – Fachverlag, Berlin 2010, ISBN 978-3-87344-159-0
SSK 2012	Strahlenschutzkommission (SSK). Zur Umsetzbarkeit der Vorschläge der Europäischen Kommission zu Kapitel IX der neuen europäischen Grundnormen des Strahlenschutzes. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 257. Sitzung der SSK am 05./06. Juli 2012. urn:nbn:de:101:1-201310215783
SSK 2013	Strahlenschutzkommission (SSK). Umsetzung von Artikel 65 Abs. 2 der neuen europäischen Grundnormen des Strahlenschutzes zum Schutz der Umwelt. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 267. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 12.12.2013. BAnz AT 04.11.2014 B3. urn:nbn:de:101:1-201404076720

SSK 2015	Strahlenschutzkommission (SSK). Umsetzung des Dosisgrenzwertes für Einzelpersonen der Bevölkerung für die Summe der Expositionen aus allen zugelassenen Tätigkeiten. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 274. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 19./20.02.2015. BAnz AT 23.11.2015 B6. urn:nbn:de:101:1-201512213366
SSK 1996	Strahlenschutzkommission (SSK). Konzepte und Handlungsziele für eine nachhaltige, umweltgerechte Entwicklung im Strahlenschutz in Deutschland. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 140. Sitzung der SSK am 19./20.09.1996. BAnz Nr. 17 vom 25.01.1997, auch publiziert als: Berichte der Strahlenschutzkommission, Heft 6
Steffen et al. 2015	Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell SE, Fetzer I, Bennett EM, Biggs R, Carpenter SR, de Vries W, de Wit CA, Folke C, Gerten D, Heinke J, Mace GM, Persson LM, RamanathanV, Reyers B, Sörlin S. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science 2015;347:6223, doi:10.1126/science.1259855
Steinkopff et al. 2002	Steinkopff T, Dyck W, Frank G, Frenzel S, Sartorius H, Schmid S, Salvamoser J. Messung von Krypton-85 in der Atmosphäre, Global Atmosphere Watch (GAW) Brief des Deutschen Wetterdienstes Nr. 10, Mai 2002, https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/hohenpeissenberg/download/gaw_briefe/gaw_brief_010_de_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2
StrlSchV 2001	Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt durch Artikel 5 der Verordnung vom 11. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2010) geändert worden ist
StrVG 1986	Gesetz zum vorsorgenden Schutz der Bevölkerung gegen Strahlenbelastung (Strahlenschutzvorsorgegesetz – StrVG) vom 19. Dezember 1986 (BGBl. I S. 2610), das zuletzt durch Artikel 91 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist
Torudd und Saetre 2013	Torudd J, Saetre P. Assessment of long-term radiological effects on plants and animals from a deep geological repository: no discernible impact detected. Ambio. 2013 May;42(4):506-16, doi:10.1007/s13280-013-0403-9

TRGS 910	Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 910. Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen. GMBl 2014 S. 258-270 vom 02.04.2014 [Nr. 12] zuletzt geändert und ergänzt: GMBl 2016 S. 606-609 [Nr. 31] vom 29.07.2016
TrinkwV 2001	Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV 2001) in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), die durch Artikel 4 Absatz 21 des Gesetzes vom 18. Juli 2016 (BGBl. I S. 1666) geändert worden ist
UBA 2007	Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.). Loseblattwerk: Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Ableitung und Berechnung von Prüfwerten der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung für den Wirkungspfad Boden-Mensch aufgrund der Bekanntmachung der Ableitungsmethoden und -maßstäbe im Bundesanzeiger Nr. 161a vom 28. August 1999, Bearbeiter: G. Bachmann, J. Oltmanns, R. Konietzka, K. Schneider, F. Rück, E. Albrecht. Erich-Schmidt-Verlag 2007, ISBN 978-3-503-05825-9
UBA 2015	Umweltbundesamt (UBA). Prinzipien des Umweltrechtes. Vorsorgeprinzip. Webseite Umweltbundesamt, Stand: 23.11.2015 http://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/umweltrecht/umweltverfassungsrecht/vorsorgeprinzip.; zuletzt aufgerufen am 17.08.2016
Ulanowski et al. 2008	Ulanowski A, Pröhl G, Gómez-Ros JM. Methods for calculating dose conversion coefficients for terrestrial and aquatic biota, J Environ Radioact. 2008 Sep;99(9):1440-8, doi:10.1016/j.jenvrad.2008.01.010
Ulanowski und Pröhl 2006	Ulanowski A, Pröhl G. A practical method for assessment of dose conversion coefficients for aquatic biota. Radiat Environ Biophys. 2006;45:203–214, doi:10.1007/s00411-006-0061-4
UN 1972	United Nations (UN). UNSCEAR 1972 Report, Ionizing radiation: Levels and effects. A report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly, with annexes. New York, 1972, http://www.unscear.org/unscear/en/publications/1972.html, zuletzt aufgerufen am 17.08.2016

UN 1977	United Nations (UN). UNSCEAR 1977 Report, Sources and effects of Ionizing Radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly with annexes. New York, 1977, http://www.unscear.org/unscear/en/publications/1977.html, zuletzt aufgerufen am 17.08.2016
UN 1996	United Nations (UN). UNSCEAR 1998 Report, Sources and effects of Ionizing Radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly with Scientific Annex, New York, 1996, http://www.unscear.org/unscear/en/publications/1996.html, zuletzt aufgerufen am 29.10.2015
UN 1997	United Nations (UN). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, Brundtland Report, A/42/427, 4.8.1997, http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf
UN 2001	United Nations (UN). UNSCEAR 2000 Report, Sources and Effects of Ionizing Radiation, Volume I: Sources. A report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly, with annexes. New York, 2001, http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html, zuletzt aufgerufen am 06.07.2016
UN 2010	United Nations (UN). UNSCEAR 2008 Report “Sources and effects of ionizing radiation”, Vol. I: Sources of Ionizing Radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly with Scientific Annexes A and B, New York, 2010, http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html, zuletzt aufgerufen am 18.08.2016
UN 2011	United Nations (UN). UNSCEAR 2008 Report, Sources and effects of ionizing radiation, Volume II: Effect of Ionizing Radiation. Scientific Annexes C, D and E to the Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. New York, 2011, ISBN 978-92-1-142280-1
UN 2014	United Nations (UN). UNSCEAR 2013 Report, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Volume I: Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly with Scientific Annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami. New York, 2014, ISBN: 978-92-1-142291-7

UN 2015	United Nations (UN). Developments since the 2013 UNSCEAR Report on the levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident following the great east-Japan earthquake and tsunami. A 2015 White Paper to guide the Scientific Committee's future programme of work, New York, 2015, http://www.unscear.org/docs/publications/2015/UNSCEAR_WP_2015.pdf, zuletzt aufgerufen am 18.08.2016
Upton et al. 1967	Upton AC, Randolph ML, Conklin JW. Late effects of fast neutrons and gamma rays in mice as influenced by the dose rate of irradiation: life shortening. Radiat Res. 1967 Nov;32(3):493-509
USDOE 2002	U.S. Department of Energy. A graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota. Technical standard DOE-STD-1153-2002, Washington DC. 2002. http://energy.gov/ehss/downloads/doe-std-1153-2002, zuletzt abgerufen am 18.08.2016
USDOE 2004	U.S. Department of Energy. ISCORS (Interagency Steering Committee on Radiation Standards) - RESRAD-BIOTA User's Guide. Version 1. A Tool for Implementing a Graded Approach to Biota Dose Evaluation. Technical Report 2004-02, US DOE/EH-0676, 2004. http://www.iscors.org/doc/RESRADBIOTA.pdf zuletzt abgerufen am 18.08.2016
UVPG 2010	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 24. Februar 2010 (BGBl. I S. 94), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 21. Dezember 2015 (BGBl. I S. 2490) geändert worden ist
UVP-V Bergbau 1990	Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau) vom 13. Juli 1990 (BGBl. I S. 1420), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 4. August 2016 (BGBl. I S. 1957) geändert worden ist
Weiss 2016	Weiss W. The radiological and non-radiological impact of the Fukushima accident. Proceedingsbeitrag. 47. Jahrestagung Kerntechnik / 47th Annual Meeting on Nuclear Technology, Hamburg, 10.-12.Mai 2016. CD-ROM
WHG 2009	Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 4. August 2016 (BGBl. I S. 1972) geändert worden ist

WHO 2006	World Health Organization (WHO). Guidelines for drinking-water quality [electronic resource]: incorporating first addendum. Vol. 1, Recommendations. – 3rd ed. Electronic version for the Web. 1.Potable water – standards. 2.Water – standards. 3.Water quality –standards. 4.Guidelines. I. Title. ISBN 92 4 154696 4 (NLM classification: WA 675)
Woodhead 2003	Woodhead DS. A possible approach for the assessment of radiation effects on populations of wild organisms in radionuclide-contaminated environments? J Environ Radioact. 2003;66(1 2):181-213
Woodwell und Miller 1963	Woodwell GM, Miller LN. Chronic Gamma Radiation Affects the Distribution of Radial Increment in Pinus rigida Stems. Science 1963 Jan 18;139(3551):222-3
Yamamoto et al. 1998	Yamamoto O, Seyama T, Itoh H, Fujimoto N. Oral administration of tritiated water (HTO) in mouse. III: Low dose-rate irradiation and threshold dose-rate for radiation risk. Int J Radiat Biol. 1998 May;73(5):535-41
Zeddel et al. 2016	Zeddel A, Quadflieg A, Utermann J. Geringfügigkeits-schwellen für das Grundwasser 2015 – Ableitung sowie Anwendungsgrundsätze für den nachsorgenden Bodenschutz. In Altlastensymposium 2016 & XXIV. Sächsisches Altlastenkolloquium, 10-11.03.2016. Dresden. Tagungsband, http://www.itv-altlasten.de/fileadmin/user_upload/programm/Tagungsband_2016_Versand.pdf**,** zuletzt aufgerufen am 11.08.2016
Zpire und IAF 2013	Zpire Ltd., IAF - Radioökologie GmbH. Radioactive non-equilibrium in Produced Water. Zpire Report 03-12, 2013, https://www.norskoljeoggass.no/Global/2013%20Dokumenter/Publikasjoner/ZR-03-12%20Radioactive%20non-equilibrium%20in%20produced%20water.pdf

Abkürzungsverzeichnis

AEUV	Arbeitsweise der Europäischen Union
AVV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BSS	Basic Safety Standards
DCC	dose conversion coefficient
DCRL	derived consideration reference level
DOE	Department of Energy
EMRAS	Environmental Modelling for Radiation Safety
EPIC	Environment Protection from Ionizing Contaminants
ERA	Ecological Risk Assessment
ERICA	Environmental Risk from Ionising Contaminants: Assessment and Management
FAO	Food and Agriculture Organization
FASSET	Framework for Assessment of Environmental Impact
FRED	FASSET Radiation Effects Database
GFS	Geringfügigkeitsschwellen
HDR	Hazard Dose Rate
HELCOM	Helsinki Commission
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
IUR	International Union of Radioecology
LABO	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LET	linearer Energietransfer
LNT	linear-non-threshold
LOAEC	lowest observed-adverse effect concentration
LOAEL	lowest observed-adverse effect level
MODARIA	Modelling and Data for Radiological Impact Assessment
MORS.EG	Monitoring of Radioactive Substances Expert Group
NIR	nichtionisierende Strahlung
NOAEC	no observed-adverse effect concentration
NOAEL	no observed-adverse effect level

NORM	Natural Occurring Radioactive Material
OSPAR	Oslo-Paris-Kommission zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks
PNEC	predicted no-effect concentration
PNED	predicted no-effect dose
PNEDR	predicted no-effect dose rates
PROTECT	Protection of the Environment from Ionising Radiation in a Regulatory Context
RAP	Reference animals and plants
RBE	relative biological effectiveness
RSC	Radioactive Substance Committee
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
SSD	Species Sensitivity Distribution
SSK	Strahlenschutzkommission
STAR	Strategy for Allied Radioecology
SUP	Strategische Umweltprüfung
UBA	Umweltbundesamt
UN	United Nations
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
UQN	Umweltqualitätsnormen
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UV-Strahlung	Ultraviolette Strahlung
UVU	Umweltvertäglichkeitsuntersuchung

Anlage 1 Werte zur Beurteilung radioaktiver Kontaminationen von Boden und Gewässern im Hinblick auf den Schutz nicht menschlicher Arten

Tab. A-1: Werte der spezifischen Aktivität im Boden („terrestrisch"), der Aktivitätskonzentration in Binnengewässern („limnisch") und der Aktivitätskonzentration in Küstengewässern oder dem Meer („marin"), für die die Strahlenexposition von (den nuklidspezifisch sensitivsten) RAPs den oberen Werten der DCRL-Bereiche nach (ICRP 2008) entspricht

Nuklid	terrestrisch Bq/kg	limnisch Bq/l	marin Bq/l
H-3	$3{,}4 \times 10^{4}$	$1{,}7 \times 10^{7}$	$5{,}1 \times 10^{7}$
C-14	$1{,}1 \times 10^{3}$	$3{,}4 \times 10^{2}$	$1{,}2 \times 10^{3}$
P-32	$8{,}0 \times 10^{1}$	1,5	$1{,}2 \times 10^{1}$
P-33	$6{,}9 \times 10^{2}$	$1{,}3 \times 10^{1}$	$9{,}4 \times 10^{1}$
S-35	$9{,}4 \times 10^{3}$	$5{,}9 \times 10^{3}$	$6{,}0 \times 10^{6}$
Cl-36	$3{,}8 \times 10^{4}$	$1{,}1 \times 10^{4}$	$3{,}5 \times 10^{6}$
K-40	$5{,}6 \times 10^{5}$	$1{,}7 \times 10^{6}$	$2{,}8 \times 10^{6}$
Ca-45	$1{,}8 \times 10^{5}$	$7{,}6 \times 10^{3}$	$2{,}3 \times 10^{6}$
Cr-51	$2{,}9 \times 10^{6}$	$2{,}8 \times 10^{5}$	$1{,}5 \times 10^{5}$
Mn-54	$1{,}0 \times 10^{5}$	$2{,}1 \times 10^{3}$	$1{,}9 \times 10^{3}$
Co-57	$9{,}3 \times 10^{5}$	$7{,}2 \times 10^{3}$	$2{,}0 \times 10^{4}$
Co-58	$8{,}1 \times 10^{4}$	$2{,}7 \times 10^{3}$	$9{,}7 \times 10^{3}$
Co-60	$3{,}4 \times 10^{4}$	$1{,}2 \times 10^{3}$	$4{,}2 \times 10^{3}$
Ni-59	$2{,}1 \times 10^{7}$	$1{,}6 \times 10^{4}$	$2{,}3 \times 10^{4}$
Ni-63	$1{,}5 \times 10^{7}$	$1{,}2 \times 10^{4}$	$1{,}7 \times 10^{4}$
Zn-65	$1{,}4 \times 10^{5}$	$2{,}1 \times 10^{2}$	$3{,}0 \times 10^{2}$
Se-75	$1{,}7 \times 10^{5}$	$1{,}4 \times 10^{3}$	$1{,}1 \times 10^{3}$
Se-79	$1{,}2 \times 10^{6}$	$2{,}2 \times 10^{3}$	$1{,}3 \times 10^{3}$
Sr-89	$5{,}8 \times 10^{4}$	$1{,}0 \times 10^{2}$	$3{,}7 \times 10^{4}$
Sr-90+	$3{,}0 \times 10^{4}$	$5{,}4 \times 10^{1}$	$2{,}1 \times 10^{4}$
Zr-95	$1{,}1 \times 10^{5}$	$8{,}9 \times 10^{2}$	$8{,}7 \times 10^{3}$
Nb-94	$5{,}1 \times 10^{4}$	$2{,}7 \times 10^{3}$	$4{,}0 \times 10^{4}$
Nb-95	$1{,}0 \times 10^{5}$	$6{,}6 \times 10^{3}$	$1{,}2 \times 10^{5}$
Tc-99	$1{,}9 \times 10^{6}$	$6{,}0 \times 10^{4}$	$1{,}9 \times 10^{2}$
Ru-103+	$1{,}7 \times 10^{5}$	$5{,}8 \times 10^{4}$	$1{,}9 \times 10^{4}$
Ru-106+	$1{,}3 \times 10^{5}$	$8{,}7 \times 10^{3}$	$2{,}9 \times 10^{3}$
Ag-110m+	$2{,}9 \times 10^{4}$	$5{,}0 \times 10^{3}$	$8{,}9 \times 10^{1}$
Cd-109+	$8{,}9 \times 10^{4}$	$1{,}6 \times 10^{3}$	$5{,}3 \times 10^{2}$
Sb-124	$1{,}6 \times 10^{4}$	$1{,}7 \times 10^{2}$	$1{,}4 \times 10^{3}$
Sb-125	$5{,}7 \times 10^{4}$	$5{,}9 \times 10^{2}$	$4{,}0 \times 10^{3}$
Te-129m+	$3{,}8 \times 10^{5}$	$5{,}4 \times 10^{2}$	$1{,}4 \times 10^{2}$
Te-132	$3{,}1 \times 10^{4}$	$3{,}7 \times 10^{2}$	$1{,}2 \times 10^{2}$
I-125	$2{,}2 \times 10^{6}$	$1{,}7 \times 10^{4}$	$1{,}1 \times 10^{4}$
I-129	$1{,}7 \times 10^{6}$	$1{,}1 \times 10^{4}$	$6{,}2 \times 10^{3}$
I-131	$1{,}8 \times 10^{5}$	$4{,}4 \times 10^{3}$	$2{,}6 \times 10^{3}$
I-132	$3{,}3 \times 10^{4}$	$1{,}4 \times 10^{3}$	$1{,}1 \times 10^{3}$
I-133+	$1{,}0 \times 10^{5}$	$2{,}2 \times 10^{3}$	$1{,}4 \times 10^{3}$

Nuklid	terrestrisch Bq/kg	limnisch Bq/l	marin Bq/l
Cs-134	$3{,}6 \times 10^{4}$	$1{,}2 \times 10^{3}$	$7{,}9 \times 10^{4}$
Cs-135	$6{,}6 \times 10^{5}$	$6{,}2 \times 10^{3}$	$4{,}0 \times 10^{5}$
Cs-136	$2{,}7 \times 10^{4}$	$1{,}1 \times 10^{3}$	$7{,}0 \times 10^{4}$
Cs-137+	$6{,}9 \times 10^{4}$	$1{,}3 \times 10^{3}$	$8{,}8 \times 10^{4}$
Ba-140+	$3{,}0 \times 10^{4}$	$4{,}6 \times 10^{2}$	$5{,}1 \times 10^{2}$
La-140	$3{,}7 \times 10^{4}$	$1{,}2 \times 10^{3}$	$2{,}6 \times 10^{2}$
Ce-141	$1{,}6 \times 10^{6}$	$2{,}1 \times 10^{3}$	$4{,}5 \times 10^{3}$
Ce-144+	$1{,}9 \times 10^{6}$	$3{,}1 \times 10^{2}$	$8{,}8 \times 10^{2}$
Eu-152	$7{,}7 \times 10^{4}$	$1{,}6 \times 10^{4}$	$1{,}1 \times 10^{3}$
Eu-154	$7{,}1 \times 10^{4}$	$9{,}9 \times 10^{3}$	$6{,}9 \times 10^{2}$
Eu-155	$2{,}8 \times 10^{6}$	$5{,}9 \times 10^{4}$	$3{,}7 \times 10^{3}$
Ir-192	$1{,}0 \times 10^{5}$	$3{,}2 \times 10^{4}$	$3{,}0 \times 10^{3}$
Pb-210+	$3{,}0 \times 10^{6}$	$1{,}8 \times 10^{4}$	$5{,}0 \times 10^{2}$
Po-210	$3{,}4 \times 10^{4}$	$3{,}0 \times 10^{1}$	1,1
Ra-226	$5{,}9 \times 10^{3}$	2,7	$4{,}7 \times 10^{1}$
Ra-228	$8{,}8 \times 10^{4}$	$9{,}8 \times 10^{2}$	$1{,}9 \times 10^{4}$
Th-227	$1{,}3 \times 10^{5}$	1,5	5,1
Th-228	$2{,}3 \times 10^{4}$	$2{,}7 \times 10^{-1}$	$9{,}4 \times 10^{-1}$
Th-229+	$1{,}5 \times 10^{5}$	1,8	6,1
Th-230	$1{,}6 \times 10^{5}$	1,8	6,4
Th-231	$1{,}1 \times 10^{7}$	$4{,}0 \times 10^{2}$	$1{,}5 \times 10^{3}$
Th-232	$1{,}9 \times 10^{5}$	2,1	7,6
Th-234+	$3{,}8 \times 10^{6}$	$9{,}9 \times 10^{1}$	$4{,}7 \times 10^{2}$
Pa-231	$3{,}4 \times 10^{4}$	$1{,}9 \times 10^{1}$	$1{,}4 \times 10^{2}$
U-233	$2{,}8 \times 10^{4}$	$3{,}8 \times 10^{2}$	$5{,}1 \times 10^{2}$
U-234	$2{,}8 \times 10^{4}$	$3{,}9 \times 10^{2}$	$5{,}2 \times 10^{2}$
U-235+	$3{,}0 \times 10^{4}$	$4{,}2 \times 10^{2}$	$5{,}6 \times 10^{2}$
U-238	$3{,}2 \times 10^{4}$	$4{,}4 \times 10^{2}$	$5{,}9 \times 10^{2}$
Np-237+	$3{,}5 \times 10^{4}$	$2{,}0 \times 10^{1}$	$2{,}8 \times 10^{2}$
Pu-238	$3{,}1 \times 10^{4}$	$1{,}8 \times 10^{1}$	5,5
Pu-239	$3{,}3 \times 10^{4}$	$1{,}9 \times 10^{1}$	5,9
Pu-240	$3{,}2 \times 10^{4}$	$1{,}9 \times 10^{1}$	5,8
Pu-241	$1{,}2 \times 10^{8}$	$6{,}9 \times 10^{4}$	$2{,}2 \times 10^{4}$
Am-241	$6{,}7 \times 10^{4}$	$1{,}6 \times 10^{1}$	$6{,}9 \times 10^{1}$
Cm-242	$6{,}0 \times 10^{4}$	$1{,}5 \times 10^{1}$	1,4
Cm-243	$6{,}2 \times 10^{4}$	$1{,}5 \times 10^{1}$	1,5
Cm-244	$6{,}4 \times 10^{4}$	$1{,}5 \times 10^{1}$	1,5
Cf-252	$2{,}8 \times 10^{4}$	$1{,}6 \times 10^{1}$	$6{,}3 \times 10^{1}$