Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Beiträge zur Weiterentwicklung der Konzepte im Strahlenschutz

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet von der Strahlenschutzkommission am 23.Mai 2003

Inhalt

Seite

1 Einleitung 3

2 Rechtfertigung und Optimierung und Begrenzung 3

3 Dosis-Wirkungsbeziehung 4

3.1 Relevanz von Endpunkten 4

3.2 Dosis- und Dosisleistungs-Effektivitätsfaktor (DDREF) 4

3.3 Individuelle Strahlenempfindlichkeit 5

4 Dosisgrößen 6

4.1 Körperdosis 6

4.2 Kollektivdosis 6

4.3 Strahlungs-Wichtungsfaktoren und Qualitätsfaktor 7

4.4 Dosis-Messgrößen 8

5 Dosisbegrenzung 8

6 Schutz der Umwelt 8

6.1 Indikatoren 9

6.2 Schutzregelungen 9

7 Literatur 10

1 Einleitung

Der Strahlenschutz in Deutschland begründet sich in vielen Bereichen auf Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP). In Hinblick auf die von der ICRP vor mehr als drei Jahren begonnene und inzwischen weit fortgeschrittene Diskussion über ein neues oder modifiziertes Konzept des Strahlenschutzes hat die Strahlenschutzkommission (SSK) im November 2002 in Goslar eine Klausurtagung unter dem Thema „Beiträge zur Weiterentwicklung des Strahlenschutzes“ veranstaltet. Die folgenden Punkte zu grundsätzlichen Fragen im Strahlenschutz sind das zusammengefasste Ergebnis dieser Diskussion.

2 Rechtfertigung und Optimierung und Begrenzung

Eine wichtige Grundlage des praktischen Strahlenschutzes bildet das in ICRP 60 [ICR 91] erläuterte Konzept der „Rechtfertigung“, „Optimierung“ und „Begrenzung“. Das Konzept hat sich bewährt. Die SSK empfiehlt deshalb bei künftigen Modifikationen, die in der Anwendung dieser Begriffe zu Veränderungen führen, sorgfältig zu prüfen, welchen Einfluss dies auf den Strahlenschutz in der Praxis hat.

Nach ICRP 60 ist generell eine Anwendung mit ionisierender Strahlung nur dann gerechtfertigt, wenn damit ein Nutzen für die exponierten Personen oder für die Gesellschaft verbunden ist. Dieses Prinzip muss unangetastet beibehalten werden. Wenn jedoch ein Nutzen der Anwendung besteht, kann die Zuordnung des jeweiligen Nutzens bzw. des möglichen Schadens im Einzelfall sehr komplex sein, und die Abschätzung eines Nutzen/Schaden-Verhältnisses ist nicht unbedingt eindeutig. Dies ist insbesondere der Fall, wenn Nutznießer und Geschädigte nicht identisch sind. Sowohl die Ermittlung als auch die Bewertung eines "Nettonutzens" ist nicht trivial und muss zum Teil qualitativ erfolgen. Hierfür sollten, zumindest exemplarisch, Vorgehensweisen und Maßstäbe entwickelt werden.

Häufig ist bei der Rechtfertigung von Tätigkeiten bzw. Interventionen ein gesellschaftlicher Nutzen gegen ein mögliches individuelles Risiko von Personen abzuwägen, oft aber auch ein individueller Nutzen gegen ein Risiko für größere Personengruppen. Dabei sollte berücksichtigt werden, ob es von Bedeutung ist, wie viele Personen bei einer Maßnahme zusätzlich exponiert werden, d. h. ob die zu erwartende zusätzliche Kollektivdosis bei der Rechtfertigung eine Rolle spielt. Darüber hinaus muss der Frage nachgegangen werden, ob allein die Betrachtung der am stärksten exponierten Person bei der Rechtfertigung ausreicht.

Wenn bei der Abschätzung Aspekte der Kollektivdosis benötigt werden, wären Aussagen zur trivialen Dosis bzw. zu einem Abschneidekriterium hilfreich. Es sollte aber auch sichergestellt sein, dass die Methode der „Verdünnung“ als Entsorgungsmöglichkeit für radioaktive Abfälle nicht durch ein verändertes Konzept der Rechtfertigung legalisiert wird.

In Situationen, bei denen die Exposition der Bevölkerung im Bereich der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition liegt, sind Interventionen in der Regel nicht gerechtfertigt.

Das Konzept der „Optimierung“ hat eine erhebliche Bedeutung im praktischen Strahlenschutz. Es beruht auf dem ALARA-Prinzip, das seinerseits auf der Annahme beruht, dass es bei stochastischen Wirkungen keine Dosisschwelle gibt (LNT-Hypothese). Dabei ist zu fragen, ob es eine Dosis gibt, unterhalb derer die Strahlenwirkung als so gering angesehen wird, dass Optimierungsüberlegungen nicht notwendig sind und ein zusätzlicher Aufwand zur weiteren Reduzierung nicht mehr lohnt.

In diesem Zusammenhang können die Vorstellungen der ICRP gesehen werden, die unter Verwendung des Begriffes „concern“ („no concern“, „low concern“, „concern“ etc.) verschiedene Dosisbereiche definiert hat. Es stellt sich allerdings die Frage, ob der Begriff des „concern“ als Maßstab hier verwendbar ist, da er auf einer sehr subjektiven Wahrnehmung beruht.

Im Bereich der Medizin muss von einer Optimierung insbesondere der Patient profitieren, d. h. eine Reduktion der Strahlenexposition darf nicht bedeuten, dass dies mit dem Preis eines nicht mehr verwertbaren Resultates erkauft wird. Auch andere als durch Strahlung verursachte Risiken sollten mitberücksichtigt werden.

3 Dosis-Wirkungsbeziehung

Die Dosis-Wirkungsbeziehung im Bereich kleiner Dosen ist wegen der großen Unsicherheiten weiterhin ein kontrovers diskutiertes Thema. Zu einigen Punkten wird wie folgt Stellung genommen.

3.1 Relevanz von Endpunkten

Epidemiologische Studien, die sich auf das Krebsrisiko beim Menschen beziehen, haben die höchste Relevanz für die Ermittlung von Risikokoeffizienten für den Strahlenschutz. Deshalb sollten derartige Untersuchungen die größte Aufmerksamkeit erhalten, und es sollte sorgfältig geprüft werden, ob neue Studien die in früheren Empfehlungen gemachten Annahmen über das Strahlenrisiko bei niedrigen Dosen und Dosisraten bestätigen.

Die Modelle für die Dosis-Wirkungsbeziehung bei niedrigen Dosen (z. B. lineare oder linear-quadratische Dosis-Wirkungsbeziehung, „linear-non-threshold“ Hypothese (LNT) etc.) stützen sich in erheblichem Umfang auf strahlenbiologische Untersuchungen an Tieren, Zellsystemen und auf molekularbiologische Studien. Dabei ist allerdings nach wie vor ungeklärt, welchen Einfluss die Interaktion zwischen Zellen und die genomische Instabilität sowie die Wechselwirkung von Effekten untereinander auf die Dosis-Wirkungsbeziehung bei niedrigen Dosen in Organen und im Gesamtorganismus haben.

Je nach gewähltem Endpunkt findet man unterschiedliche Dosisabhängigkeiten – linear-quadratische, lineare und auch supralineare. Eine Übertragung auf den Endpunkt „Krebsinduktion beim Menschen“ ist daraus nicht eindeutig abzuleiten.

3.2 Dosis- und Dosisleistungs-Effektivitätsfaktor (DDREF)

Die ICRP hat 1991 für die Extrapolation der Risikokoeffizienten von hohen Dosen und Dosisleistungen zu niedrigen Werten einen Wert von 2 für den Dosis- und Dosisleistungs-Effektivitätsfaktor (DDREF) empfohlen, wobei dieser Wert auf die aus den epidemiologischen Daten aus Hiroshima und Nagasaki ermittelten Risikokoeffizienten angewandt und als relativ konservativ angesehen wurde. Neuere Ergebnisse aus weiteren Studien an den Atombombenüberlebenden, die auch Daten für den niedrigeren Dosisbereich enthalten, zeigen allerdings insbesondere für die Inzidenz von soliden Tumoren eher eine lineare als eine linear-quadratische Dosisabhängigkeit.

Auch Untersuchungen an den Arbeitern in kerntechnischen Anlagen in den USA haben keine statistisch signifikante Abweichung von einer linearen Abhängigkeit von der Dosis ergeben , sondern zeigen eher einen linearen Effekt, allerdings mit großer Unsicherheit.

Auch bei Untersuchungen an Zellsystemen findet man Effekte, die mit dem Konzept eines DDREF nicht in Einklang stehen. Nach Photonenexposition mit Dosen ≤ 0,5 Gy ergab sich für einige biologische Endpunkte eine größere Wirksamkeit je Einheitsdosis als für höhere Dosen. So wurde in MRC5-CV1-Zellen nach Bestrahlung mit 200 kV - Röntgenstrahlen für eine Dosis von 0,5 Gy eine höhere *HPRT* - Mutationsrate gefunden als für eine Dosis von 1,0 Gy [Fra 02]. Es zeigte sich auch, dass für viele Zelllinien bei Dosen < 0,5 Gy, bezogen auf die Dosiseinheit, die Anzahl derjenigen Zellen erhöht ist, die *in vitro* nicht mehr proliferieren [Joi 01]. Dieser Effekt wurde auch *in vivo* für Rhabdomyosarcoma R1H in Ratten [Bec 89] und für gesunde Hautzellen in strahlentherapierten Prostatakrebspatienten [Tur 01] gefunden.

Die erhöhte Sensitivität bei niedrigen Dosen führt zu einer verstärkten Inaktivierung von Krebsvorläuferzellen und von gesunden Zellen, was eine Verringerung der Proliferationsunterdrückung der Krebsvorläuferzellen durch gesunde benachbarte Zellen bewirken kann [Tro83]. Die Berücksichtigung einer derartigen promovierenden Wirkung von Strahlung in einem Krebsentstehungsmodell führte z. B. zu einer besseren Beschreibung des Lungenkrebsrisikos unter den Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki [Jac 02].

Für höhere Dosen von niedrig-LET-Strahlung mit Dosisraten unterhalb von 0,1 Gy h^{-1} wurde in verschiedenen Experimenten ein inverser Dosisrateneffekt für die Induktion von *HPRT* - Mutationen gefunden [Vil 00]. Dieser Effekt ist nicht im Einklang mit direkten Dosisrateneffekten in Tierversuchen (z.B. Lungenkrebs in BALB/c Mäusen nach niedrig-LET-Bestrahlung [Ull 78] wie sie für die Ableitung des DDREF - Wertes benutzt wurden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die neueren epidemiologischen und strahlenbiologischen Daten für den niedrigen Dosis- bzw. Dosisratenbereich keine eindeutigen Hinweise auf einen DDREF > 1 ergeben. Es wird deshalb empfohlen, auf einen Faktor DDREF ≠ 1 zu verzichten und die Risikokoeffizienten aus einer neuen Evaluierung der Daten von Hiroshima und Nagasaki unter Einbeziehung der Neutronenstrahlung und anderer epidemiologischer Studien zu bestimmen.

3.3 Individuelle Strahlenempfindlichkeit

Man muss heute davon ausgehen, dass es eine nicht unerhebliche Variation in der menschlichen Strahlenempfindlichkeit im Hinblick auf strahleninduzierten Krebs gibt. Es wird z.B. abgeschätzt, dass einige Prozent der Bevölkerung eine erheblich erhöhte Strahlenempfindlichkeit besitzen, wobei eine genetische Prädisposition und Unterschiede in der genomischen Instabilität eine wesentliche Rolle spielen.

Die Berücksichtigung der voraussichtlich in absehbarer Zeit im Prinzip feststellbaren individuellen Strahlenempfindlichkeit kann erheblichen Einfluss auf den Strahlenschutz haben, mit sehr weitreichenden sozialen und gesellschaftlichen Auswirkungen. Die sich aus diesem Diskussionsfeld ergebenden äußerst sensiblen Konsequenzen sollten in künftigen Empfehlungen Berücksichtigung finden.

4 Dosisgrößen

Das Konzept der Dosisgrößen nach ICRP 60 ist in den letzten 10 Jahren in das internationale Normenwerk eingegangen und inzwischen in vielen Ländern der Erde in den praktischen Strahlenschutz eingeführt worden. Eine generelle Änderung des Systems wird nicht empfohlen, da es sich bewährt hat und eine langfristige Stabilität des Systems der Strahlenschutzgrößen für den praktischen Strahlenschutz von erheblicher Bedeutung ist. Trotzdem werden innerhalb des Systems einige Klarstellungen und Änderungen für sinnvoll gehalten, um die Erfahrungen der letzten 10 Jahre zu berücksichtigen.

4.1 Körperdosis

Die mittlere Energiedosis in einem Organ D_T ist nicht in allen Situationen des Strahlenschutzes eine angemessene Größe zur Beurteilung eines Schadens oder Abschätzung eines Strahlenrisikos, z.B. bei einer sehr inhomogenen Exposition eines Organs (bei starkem Dosisgradienten oder einem „hot spot“).

Die effektive Dosis, *E,* ist die zentrale Strahlenschutzgröße. Ihre Gewebe-Wichtungsfaktoren sind über die Bevölkerung (alle Altersstufen, alle Länder) und beide Geschlechter gemittelte Werte. *E* spiegelt nicht die Altersabhängigkeit des Strahlenrisikos wider - auch nicht genetische, geschlechtsspezifische oder andere personenbezogene Faktoren, die das individuelle Strahlenrisiko beeinflussen. Sie ist deshalb zur Abschätzung des Strahlenrisikos einzelner Personen kaum geeignet. Darauf sollte deutlich hingewiesen werden.

Eine wesentlich geringere als die jetzige Differenzierung der w_T-Werte der verschiedenen Organe und Gewebe wird nicht für sinnvoll gehalten. Die Definition der „anderen Organe“ (remainder) sollte vereinfacht werden. Das betrifft einerseits die Fußnoten und andererseits die unterschiedliche Anwendung in der externen und internen Dosimetrie.

Es sollten anthropomorphe Referenzphantome (am besten Voxelphantome) für die Berechnung von Konversionskoeffizienten (Feldgrößen – Dosisgrößen) definiert werden.

4.2 Kollektivdosis

Die Kollektivdosis ist definiert als die Summe aller effektiven Dosen einer betrachteten Personengruppe. Zur Risikoabschätzung bei großen Kollektiven mit sehr kleinen individuellen Dosisbeiträgen ist die Kollektivdosis wegen der unbekannten Dosis-Wirkungsbeziehung bei kleinen Dosen jedoch nicht gut geeignet.

Es wird empfohlen, den Begriff der Kollektivdosis zwar nicht zu eliminieren, aber sehr deutlich zu machen, für welche Anwendungen diese Größe gedacht ist. Dabei handelt es sich z. B. bei der beruflichen Strahlenexposition um Fälle der Optimierung von Arbeitsabläufen und Personaleinsätzen, um den Vergleich von Strahlenexpositionen bei verschiedenen Arbeitsmethoden oder um Fragen der Begrenzung der Exposition bei bestimmten Tätigkeiten („practices“).

Im Rahmen von Nutzen- und Risikoabschätzungen in der Medizin sollte von einer Anwendung der Kollektivdosis abgesehen werden, da sich die Altersverteilung von Patienten sowohl in der Strahlendiagnostik als auch in der Strahlentherapie stark von der Altersverteilung der allgemeinen Bevölkerung unterscheidet. Deshalb sollten auch Angaben zur mittleren Dosisbe-

lastungen der Bevölkerung durch die Strahlendiagnostik immer auf bestimmte Altersgruppen bezogen werden.

4.3 Strahlungs-Wichtungsfaktoren und Qualitätsfaktor

Obgleich die beiden Bewertungskonzepte in ihrem Anwendungsbereich streng voneinander getrennt sind (Körperdosisgrößen: w_R; Messgrößen: $Q(L)$), ist es sowohl in Fachkreisen als auch in der Öffentlichkeit nur schwer vermittelbar, warum man zwei unterschiedliche Konzepte bei der Definition von Dosisgrößen für den Strahlenschutz benötigt. Eine Vereinfachung, wie man sie mit der Einführung von Strahlungs-Wichtungsfaktoren beabsichtigte, hat man mit der derzeitigen Situation nicht wirklich erreicht. Es bleibt die Frage, ob zwei verschiedene Konzepte notwendig sind oder ob die Inkonsistenz in der Beschreibung der relativen Bewertung verschiedener Strahlenarten durch ein Konzept beseitigt werden kann, möglicherweise unter Beibehaltung von w_R und Q.

Dieses wäre z. B. für die externe Exposition möglich, wenn man w_R als eine aus Gründen der Vereinfachung über den menschlichen Körper gemittelte Größe betrachtet, die dem Wert nach angenähert mit dem mittleren Q übereinstimmt, das sich aus Rechnungen in einem anthropomorphen Phantom mit der *Q(L)*-Relation ergibt.

Bewertung von Photonen

Es ist seit langem bekannt, dass es auch innerhalb der locker-ionisierenden Strahlung Unterschiede in der biologischen Wirksamkeit gibt, die man nicht vernachlässigen sollte, wenn es um die genauere Ermittlung von Strahlenrisiken geht. Niederenergetische Photonen und Röntgenstrahlung haben eine höhere biologische Wirksamkeit als hochenergetische Gammastrahlung. Für den Strahlenschutz, bei dem es überwiegend um die Begrenzung der Strahlenexposition geht, wird allerdings empfohlen, weiterhin einen einheitlichen Strahlungs-Wichtungsfaktor für diese Strahlungsarten zu verwenden.

Bewertung von Neutronen

Es ist $w_R(E_n)$ als Stufenfunktion definiert, eine stetige Funktion nur als eine Näherung für Rechnungen. Die letzten 10 Jahre haben jedoch gezeigt, dass die Stufenfunktion praktisch nicht verwendet wird, da man es in der Regel mit Neutronenfeldern mit breiter Energieverteilung zu tun hat. Bei allen Konversionskoeffizienten für Neutronen, die in den letzten Jahren berechnet wurden, wurde die stetige Funktion verwendet. Es wird empfohlen, nur eine stetige Funktion zu definieren und Stufenwerte höchstens als Näherung für einfache Abschätzungen anzugeben. Im Neutronenenergiebereich < 100 keV wird unter Berücksichtigung der sekundären Photonen eine Absenkung des Wichtungsfaktors empfohlen.

Bewertung von Protonen

In der Dosimetrie in Flughöhen und in der Raumfahrt spielt der Dosisanteil der Protonen aus der kosmischen Strahlung eine erhebliche Rolle. Strahlenbiologische Erkenntnissen zeigen, dass der derzeitige Wert von w_R zu hoch und für Protonen > 5 MeV ein Wert ≤ 2 wesentlich angemessener ist. Niederenergetische Protonen < 5 MeV spielen bei externem Strahleneinfall wegen ihrer geringen Reichweite praktisch keine Rolle, da sie die Haut kaum durchdringen. Für alle Protonen wird deshalb ein w_R-Wert von 2 empfohlen.

4.4 Dosis-Messgrößen

Die Definition der Dosis-Messgrößen im Strahlenschutz ist relativ komplex und begrifflich nicht leicht zu vermitteln. Das System der Dosis-Messgrößen ist inzwischen in die internationalen Normen (ISO und IEC) übernommen worden und wird in vielen Ländern der Erde als legales System verwendet. Die komplizierte Definition der Äquivalentdosis-Messgrößen kann vereinfacht werden, ohne das gesamte Konzept in Frage zu stellen (s. Alberts und Dietze, ICRU News, Dezember 2000, www.icru.org). In Deutschland sind einige der vorgeschlagenen Änderungen in den Normen berücksichtigt worden [DIN 6814]. Es wird empfohlen,

1. das System der Dosis-Messgrößen auf 4 Größen (2 Ortsdosisgrößen, 2 Personendosisgrößen) zu beschränken, die sich an den Überwachungsaufgaben orientieren,
2. auf die Messgrößen $H'(3, \Omega)$ und $H_p(3)$ zu verzichten, da der Schutz der Augenlinse auch mit den anderen Größen gewährleistet ist,
3. die Messgröße $H'(0{,}07)$ als der Maximalwert von $H'(0{,}07, \Omega)$ am betrachteten Ort zu definieren.

5 Dosisbegrenzung

Die SSK sieht als Grundlage von Grenzwertfestlegungen die Notwendigkeit, explizite Risikobetrachtungen durchzuführen. Sie unterstützt dabei das Konzept einer sukzessiven Abfolge, die durch eine (quantitative) "Risikoabschätzung", eine "Risikobewertung" und ein "Risikomanagement" gekennzeichnet ist. Risikoabschätzungen resultieren im Wesentlichen in der Angabe von Risikokoeffizienten, d.h. quantitativen Angaben über das Risiko pro Dosiseinheit. Risikobewertungen stützen sich wesentlich auf Risikovergleiche. Die SSK hält es für wünschenswert, möglichst quantitative Vergleiche mit Risiken aufgrund der Expositionen durch chemische Noxen (kanzerogene Stoffe) im Umwelt- und Arbeitsbereich heranzuziehen. Auch das Spontanrisiko sollte als Grundlage von Risikovergleichen dienen. Demgegenüber hält die SSK Risikovergleiche mit anderen Berufsgruppen für problematisch. Ebenso lehnt die SSK Grenzwertfestlegungen ab, die sich an epidemiologischen Nachweisbarkeitsgrenzen orientieren. Obschon die Existenz einer natürlichen Umgebungsstrahlung eine zusätzliche anthropogene Exposition nicht per se legitimiert, empfiehlt die SSK, Dosisvergleiche mit der natürlichen Strahlenexposition aus Konsistenzgründen aufrechtzuerhalten.

Zusätzliche Richtwerte und Dosisschranken ("constraints") in Ergänzung zu bestehenden Grenzwerten werden von der SSK als wichtige Hilfsmittel im Hinblick auf Optimierung und Vorsorge gesehen. Durch Angabe von quellen- und anlagenbezogenen Richtwerten soll sichergestellt werden, dass durch Summation der Abgaben einzelner Quellen Grenzwerte nicht überschritten werden bzw. dass Grenzwerte nicht durch eine einzelne Anlage ausgeschöpft werden. Die SSK sieht dabei die potenziell lenkende Wirkung solcher Richtwerte in Situationen, in denen verschiedene Immissionskomponenten die Gesamtdosis bestimmen und einzelne davon in bestimmter Weise kontrolliert werden sollen. Richtwerte oder Dosisschranken stellen somit eine sinnvolle Ergänzung zur Umsetzung des ALARA-Prinzips dar.

6 Schutz der Umwelt

In einer künftigen Konzeption des Strahlenschutzes für die Umwelt würde die Beschränkung auf die lebende Umwelt lediglich eine a posteriori Rechtfertigung der früheren Statements aus ICRP 60 bedeuten, nämlich, dass die Natur geschützt sei, wenn der Mensch geschützt ist. Ein

solcher Ansatz berücksichtigt die Entwicklungen in anderen Bereichen des Umweltschutzes nicht genügend. Eine zukunftsorientierte Behandlung des Schutzes der Umwelt vor ionisierender Strahlung und radioaktiven Stoffen, muss das System Umwelt als Ganzes betrachten und neben der lebenden Umwelt auch die unbelebte Natur, also die Kompartimente Atmosphäre, Hydrosphäre und Geo- oder zumindest Pedosphäre zum Gegenstand haben.

Wenn für die belebte nicht-menschliche Umwelt der Ansatz aus ICRP 60, dass die Umwelt geschützt sei, wenn der Mensch geschützt ist, weiterhin gerechtfertigt sein soll, ist eine wissenschaftlich nachvollziehbare, dokumentierte Begründung erforderlich. Diese Begründung sollte - wenn möglich - generischen Charakter haben und kann auf der Grundlage existierender Erkenntnis bzw. von Ergebnissen derzeit laufende Forschungsvorhaben über strahleninduzierte Effekte bei nicht-menschlichen Spezies erfolgen.

6.1 Indikatoren

Mit Blick auf eine umfassendere Konzeption des Strahlenschutzes für die Umwelt empfiehlt die SSK die Entwicklung eines Satzes von Indikatoren, mit Hilfe dessen die Einwirkungen von ionisierender Strahlung und die Einträge von radioaktiven Stoffen in die Umwelt angemessen bewertet werden kann. Das betrifft insbesondere folgende Bereiche:

- Emission von Kr-85 in die Atmosphäre und von langlebigen Radionukliden (C-14, Cl-36, Mn-53, Tc-99, I-129, Cs-135, Transurane) in Atmosphäre und Hydrosphäre,
- Bilanzierung von Immissionen in die Meere,
- Unterscheidbarkeit anthropogener Einleitungen natürlicher Radionuklide in die Hydrosphäre und natürlicher Transportvorgänge als Ergebnis von Verwitterung,
- Nachhaltigkeit der Freigabe langlebiger radioaktiver Stoffe aus Tätigkeiten und der Entlassung von Rückständen mit langlebigen natürlichen Radionukliden,
- Vergleichbarkeit der Handlungsoptionen und der Risiken bei der Deponierung und Endlagerung konventioneller und radioaktiver Abfälle.

6.2 Schutzregelungen

Spezielle Schutzregelungen für nicht-menschliche Spezies sind nicht erforderlich für Situationen, in denen der Mensch geschützt ist. Auch in Interventionssituationen, in denen der Mensch noch tätig werden kann, sind spezielle Standards zum Schutz der Umwelt nicht erforderlich. In derartigen Situationen können zwar Individuen nicht-menschlicher Spezies gefährdet sein, eine Gefährdung von Pflanzen- oder Tierpopulationen ist aber nicht anzunehmen.

Die SSK sieht keine Notwendigkeit zur Entwicklung spezieller Schutzregelungen in Gebieten und Situationen, in denen die Umwelt dadurch genügend geschützt ist, dass der Mensch geschützt ist. Allerdings sind nach Auffassung der SSK besondere Regelungen für Gebiete und Bereiche auf der Erde zu treffen, in die Menschen nicht gelangen bzw. in denen Expositionspfade, die für den Menschen nicht relevant sind, für nicht-menschliche Spezies existieren. Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung sollte die Umwelt unabhängig vom Schadenspotenzial für den Menschen auch in solchen Situationen vor ionisierender Strahlung oder radioaktiven Stoffen ausreichend geschützt sein. Auf der Grundlage von Indikatoren für den radiologischen Zustand in der unbelebten Umwelt können derartige Schutzkonzepte entwickelt werden.

7 Literatur

[Bec 89] Beck-Bornholdt, H.P., Maurer, T., Becker, S., Omniczynski, M., Vogler, H., Würschmidt, F. (1989)
Radiotherapy of the rhabdomyosarcoma R1H of the rat: hyperfractionation - 126 fractions applied within 6 weeks. Int. J. Radiation Oncology **16**, 701-705.

[Fra 02] Frankenberg, D., Frankenberg-Schwager, M., Garg, I., Pralle, E., Uthe, D., Greve, B., Severin, E., Göhde, W. (2002)
Mutation induction and neoplastic transformation in human and human-hamster hybrid cells: dependence on photon energy and modulation in the low-dose range. J. Radiol. Prot. **22**, A17-A20.

[ICR 91] ICRP (1991)
1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Annals of the ICRP **21**, No. 1-3.

[Jac 02] Jacob, P., Prokic´, V. (2002)
Increased radioresistance, modelling of carcinogenesis and low-dose risk estimation. J. Radiol. Prot. **22**, A51-A55.

[Joi 01] Joiner, M.C., Marples, B., Lambin, Ph., Short, S., Turesson, I. (2002)
Low-dose hypersensitivity: current status and possible mechanisms. Int. J. Rad. Oncol. Biol. Phys. **49**, 379-389.

[Tro 83] Trosko, J.E., Chan, C.C., Medcalf, A. (1983)
Mechanisms of tumor potential role of intercellular communication. Cancer Invest. **1**, 511-526.

[Tur 01] Turesson, I., Bernefors, R., Book, M., Flogegård, M., Hermansson, I., Johansson, K.A., Lindh, A., Sigurdardottir, S., Thunberg, U., Nyman, J. (2001)
Normal tissue response to low doses of radiotherapy assessed by molecular markers - a study of skin in patients treated for prostate cancer. Acta Oncologica (Stockholm, Sweden) **40**, Issue 8, 941-951.

[Ull 78] Ullrich, R.L., Storer, J.B. (1978)
Influence of dose, dose rate and radiation quality on radiation carcinogenesis and life shortening in RFM and BALB/c mice. p. 95-113 in: Late Effects of Ionizing Radiation, Volume II. IAEA, Vienna.

[Vil 00] Vilenchik, M.M., Knudson, A.G. (2000)
Inverse radiation dose-rate effects on somatic and germ-line mutations and DNA damage rates. PNAS **97**, 5381-5386.