



Bundesamt für Strahlenschutz

# **Forschungsprogramm des Bundesamtes für Strahlenschutz**

## **Zeitraum 2009 - 2013**

## Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkung .....	3
I Teilbereich Strahlenschutz .....	6
I.1 Wirkung und Risiko ionisierender Strahlung .....	6
I.2 Medizinischer Strahlenschutz.....	13
I.3 Beruflicher Strahlenschutz .....	16
I.4 Wirkung und Risiko nichtionisierender Strahlung .....	19
I.5 Risikokommunikation .....	23
I.6 Natürliche Radioaktivität .....	24
I.7 Dynamisches Verhalten von Radionukliden in der Biosphäre.....	29
I.8 Emissions- und Immissionsüberwachung.....	33
I.9 Nuklearer Notfallschutz und Nuklearspezifische Gefahrenabwehr .....	35
I.10 Spurenanalytik .....	40
I.11 Vorbereitung der Gesetzgebung .....	41
II Teilbereich Entsorgung radioaktiver Abfälle .....	42
II.1 Sicherheitsnachweise und Methodenentwicklungen .....	43
II.2 Technische Einzelaspekte der Endlagerung .....	48
II.3 Sozialwissenschaftliche Aspekte.....	54
III Teilbereich Sicherheit in der Kerntechnik .....	55
III.1 Sicherheitsüberprüfung – Methoden und Datenbasis zur Analyse der Anlagensicherheit .....	56
III.2 Sicherheitsnachweis und Sicherheitskonzepte – Anforderungen an sicherheitstechnisch wesentliche Umrüstungen und den Einsatz neuer Technologien in Kernkraftwerken.....	62
III.3 Sicherheitsmanagement .....	65
III.4 Nukleare Versorgung .....	66
Abkürzungsverzeichnis .....	68

## **Vorbemerkung**

Das Konzept einer modernen Ressortforschung der Bundesregierung von 2007 definiert Ressortforschung als die „Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des Bundes, die der Vorbereitung, Unterstützung oder Umsetzung politischer Entscheidungen dienen und untrennbar mit der Wahrnehmung öffentlicher Aufgaben verbunden sind“. „Die Ressortforschung dient der Gewinnung wissenschaftlicher Erkenntnisse und Entscheidungshilfen für die unmittelbare Erfüllung von Fachaufgaben und der Politikberatung. Dort, wo ein besonderes Ressortinteresse besteht, fördert Ressortforschung auch den Erkenntnisgewinn Dritter. Die Struktur der Ressortforschung orientiert sich an den konkreten Anforderungen, die sich aus dem Aufgabenbereich des jeweiligen Ressorts ergeben; Ressortforschung wird in Einrichtungen mit Ressortforschungsaufgaben und durch Vergabe von FuE-Projekten durchgeführt.“

Die Ressortforschung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) erfolgt insbesondere im Rahmen des Umweltforschungsplans (UFOPLAN). Das BfS übernimmt hierbei zentrale Aufgaben im Hinblick auf die Aufstellung und Ausführung des UFOPLANs für die Bereiche Reaktorsicherheit, Strahlenschutz, nukleare Ver- und Entsorgung. Nach dem Ressortforschungskonzept der Bundesregierung wird die wissenschaftliche Kompetenz der Einrichtungen mit Ressortforschungsaufgaben „durch eigene Forschungs- und Entwicklungskapazitäten bzw. durch die Vergabe, Begleitung und Auswertung von externen FuE-Projekten erreicht“. Im Fall des BfS wird wissenschaftliche Kompetenz überwiegend durch die Vergabe, Begleitung und Auswertung von externen FuE-Projekten erreicht. Das Forschungsverständnis beinhaltet auch konzeptionelle Arbeiten zur umfassenden wissenschaftlichen Bearbeitung und Analyse übergeordneter Fragestellungen für die daraus zu vergebenden Vorhaben. Die Mitarbeit in nationalen und internationalen Arbeitsgruppen und Gremien und die daraus gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse fließen in die Arbeit des BfS ein. Von besonderer Bedeutung sind dabei die dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) als einer wissenschaftlich-technischen Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des BMU durch Errichtungsgesetz zugewiesenen Aufgaben. Vorrangige Aufgabe des BfS ist die Wahrnehmung von Verwaltungs- und Vollzugsaufgaben auf den Gebieten des Strahlenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge, der Genehmigung von Zwischenlagern sowie der Errichtung und des Betriebs von Endlagern radioaktiver Abfälle, der Genehmigung von Transporten radioaktiver Stoffe und der Unterstützung des BMU bei der Bundesaufsicht über Genehmigung und Betrieb der deutschen Kernkraftwerke. Eine wesentliche Aufgabe im Bereich des Strahlenschutzes ist die Überprüfung und Weiterentwicklung der in Deutschland vorhandenen Strahlenschutzkonzepte aufgrund der neuen ICRP-Empfehlungen und der zurzeit laufenden Überarbeitungen der Basic Safety Standards der IAEA.

Die Notwendigkeit von Forschung, ihr Umfang und ihre Intensität werden allein von den Sachaufgaben des Ressorts bestimmt. Forschung wird mit der Zielsetzung betrieben, Entscheidungshilfen für die Erfüllung dieser Fachaufgaben zu liefern. Insofern führt der im Errichtungsgesetz formulierte Forschungsauftrag nicht zu einer eigenständigen Funktion, die gleichrangig neben den hoheitlichen und Dienstleistungsfunktionen des Amtes steht. Vielmehr müssen die Forschungsaktivitäten des BfS einen engen aufgabenakzessorischen Bezug besitzen, der sich letztlich in einer dienenden Funktion der Forschung im Hinblick auf die gestellten Sach- und Fachaufgaben des Ressorts ausdrückt. Die wissenschaftlichen Fragestellungen, die sich auch aus der Fortentwicklung des Stands der Wissenschaft, technologischen Weiterentwicklungen und dem Einsatz neuer Technologien ergeben, sind im unten dargelegten Forschungsprogramm des BfS beschrieben. Das Forschungsprogramm des BfS zeigt für die wesentlichen Aufgabenfelder des BfS – auch im Hinblick auf die Unterstützung des BMU – den anstehenden Forschungsbedarf auf und bildet einen Leitfaden für die mittelfristig vom BfS fachlich zu begleitenden bzw. durchzuführenden konkreten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben.

Das vorliegende Forschungsprogramm des Bundesamtes für Strahlenschutz deckt einen Zeitraum von fünf Jahren ab. Es beschreibt die in den drei Arbeitsbereichen Strahlenschutz, Entsorgung radioaktiver Abfälle und Sicherheit in der Kerntechnik zur sachgerechten und effektiven Aufgabenwahrnehmung mittelfristig durch Forschungsvorhaben und wissenschaftlich-technische Untersuchungen zu lösenden Fragestellungen. Sofern es sich um sehr komplexe Fragestellungen oder noch sehr wenig erforschte Gebiete handelt, ist die Einbeziehung von externem fachspezifischen Sachverstand durch Fachsymposien, Expertenanhörungen und/oder die Einrichtung extern besetzter Begleitgremien vorgesehen.

Die Aufgaben des BfS in diesen drei Teilbereichen unterscheiden sich sehr stark einerseits hinsichtlich ihres Forschungsbedarfes und andererseits hinsichtlich ihrer Nähe zum verwaltungsmäßigen Vollzug. Diese Vielfalt und der aufgabenakzessorische Bezug spiegeln sich letztlich auch in der inhaltlichen Ausprägung und in der regulatorischen Anwendungsnähe der zur Lösung anstehenden Fragestellungen wider. Sie reichen von grundlegenden Fragen zu den biologischen Wirkungsmechanismen der ionisierenden und nichtionisierenden Strahlung über anwendungsbezogene Fragestellungen der Endlagerung radioaktiver Abfälle bis zu konzeptionellen und methodischen Vorgaben für die im Rahmen des sicheren Betriebs von Kernkraftwerken zu erbringenden Nachweise. Hinsichtlich der in den einzelnen Teilbereichen ausgewiesenen Projekte ist anzumerken, dass der weit überwiegende Teil der Fragestellungen – mangels eines BfS-eigenen Forschungsbudgets – durch Vorhaben aus dem Umweltforschungsplan (UFOPLAN) realisiert werden muss.

Das BfS stellt sich der Herausforderung, in allen drei Teilbereichen seine Kompetenz trotz zunehmend knapper bemessener Ressourcen zu erhalten und auszubauen, indem es sich in seinen Kernbereichen stringent ausrichtet und Wissenszuwachs aus eigenen wissenschaftlichen Arbeiten und den vom BfS u.a. mit Mitteln des UFOPLANs finanzierten und fachlich begleiteten Vorhaben sowie aus der Auswertung internationaler Fachliteratur und durch wissenschaftlichen Austausch gewinnt. Dabei ist es erforderlich, dass sich die im Rahmen des UFOPLANs durchgeführten Ressortforschungsvorhaben strikt an die Zweckbestimmungen der Haushaltstitel halten, d.h. sie müssen zur Klärung von Fragestellungen eingesetzt werden, die der fachlichen Unterstützung von BMU und BfS im Rahmen ihrer Aufgabenerfüllung dienen.

Bei der Aufstellung des Forschungsprogramms wurde berücksichtigt, dass im Teilbereich Strahlenschutz einschlägige Fragestellungen auch von der EU im Rahmen des 7. Forschungsrahmenprogramms-EURATOM sowie durch nationale Förderung in einigen EU-Mitgliedsstaaten (Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Italien) bearbeitet werden. In Absprache zwischen diesen Mitgliedsstaaten und der Kommission wurde im Jahr 2008 ein Mechanismus etabliert, um die Forschungsplanung in speziellen Fragestellungen wie z.B. der Erforschung der Risiken niedriger Dosen in Zukunft besser zu koordinieren. Auch die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMW) zur Endlagerung radioaktiver Abfälle und zur Reaktorsicherheit aufgelegten Förderprogramme sowie das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanzierte Programm „Grundlegende F&E Arbeiten in der nuklearen Sicherheits- und Entsorgungsforschung zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und zum Kompetenzerhalt“, die alle stärker der Grundlagenforschung zuzurechnen sind, wurden bei der Aufstellung des hier vorliegenden Forschungsprogramms berücksichtigt, um Dopplungen und Überschneidungen auszuschließen. Bei der Bewältigung der bei der Übernahme der Asse zum 01.01.2009 vorgefundenen Probleme stehen zunächst praktische Aspekte im Vordergrund. Inwieweit sich daraus Forschungsbedarf ergeben wird, wird der ersten Fortschreibung dieses BfS-Forschungsprogramms zu entnehmen sein. Das Forschungsprogramm steht im Einklang mit dem von der Bundesregierung verabschiedeten Konzept einer modernen Ressortforschung.

## **I Teilbereich Strahlenschutz**

Zur Erreichung des Zieles „Schutz des Menschen und der Umwelt vor ionisierender und nichtionisierender Strahlung“ ist neben naturwissenschaftlichen, medizinischen und technischen Forschungsfeldern die Fortschreibung des Strahlenschutzrechts auf internationaler und nationaler Ebene wissenschaftlich zu begleiten.

Auf der Grundlage fachlicher Notwendigkeiten und unter Berücksichtigung internationaler Entwicklungen im Bereich der Strahlenschutzforschung und des Strahlenschutzes werden die fachlichen Herausforderungen der nächsten fünf Jahre umrissen, offene Fachfragen zu elf Themenbereichen zusammengefasst und Prioritäten formuliert. Bei einer solchen Vorgehensweise ist es nicht zu vermeiden, dass zwischen den Themenbereichen Wechselwirkungen und Überlappungen auftreten. Im Rahmen der jährlichen Aufstellung des UFOPLANS werden den einzelnen Themenbereichen konkrete Untersuchungsvorhaben zugeordnet. Dabei spielen auf der einen Seite fachliche Prioritätensetzungen eine wesentliche Rolle. Auf der anderen Seite werden bei der Aufstellung des UFOPLANS auch Vorhaben berücksichtigt, die der Umsetzung und Weiterentwicklung der rechtlichen Regelungen im Strahlenschutz oder der unmittelbaren Unterstützung des BMU in dessen Zuständigkeitsbereich dienen.

Im Forschungsprogramm zum Teilbereich Strahlenschutz ist berücksichtigt, dass mit der Gründung des Kompetenzverbunds Strahlenforschung durch das Bundesministerium für Forschung und Bildung (BMBF) und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) fachlich einschlägige, aber eher der Grundlagenforschung zuzuordnende Themen mit dem Ziel des Kompetenzerhalts in den kommenden Jahren aus Mitteln des BMBF gefördert werden. Außerdem wurde in Absprachen zwischen BMBF und BMU festgelegt, dass die Themenbereiche „Dosimetrie“ und „Notfallschutz“ nicht Bestandteil des Kompetenzverbunds sind und entsprechende Vorhaben von Seiten des BMU zu finanzieren wären. Die Themen des Kompetenzverbunds im Bereich der nichtionisierenden Strahlung beschränken sich derzeit auf den Bereich UV-Strahlung.

Die elf Themenbereiche lassen sich wie folgt charakterisieren.

### **I.1 Wirkung und Risiko ionisierender Strahlung**

Die Abschätzung, d.h. die Quantifizierung, des Strahlenrisikos basiert vom Grundsatz her auf epidemiologischen Studien. Da die meisten Daten von hoch exponierten Populationen stammen, ist die Extrapolation der Risikoschätzer aus den vorliegenden Studien auf die strahlen-

schutzrelevanten niedrigen Expositionsbereiche ein zentraler Bestandteil der Quantifizierung. Daneben erfolgen verstärkt gepoolte Auswertungen von epidemiologischen Studien im eher niedrigen oder mittleren Expositionsbereich (u. a. Radon in Wohnungen), um durch Erhöhung der Fallzahlen die statistische Aussagekraft zu erhöhen. Aus der KiKK-Studie (Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken) und aus der Auswertung des von BfS, WHO und ICNIRP durchgeführten Leukämieworkshops sowie aus der Bewertung der KiKK-Studie durch die Strahlenschutzkommission SSK ergeben sich Fragestellungen, die über den engeren Rahmen der Strahlenschutzforschung hinausgehen. Kindliche Krebserkrankungen und insbesondere kindliche Leukämien sind multifaktorielle Erkrankungen, bei denen in der Entstehung verschiedene endogene und exogene Faktoren zusammenwirken. Die Fragestellung der Entstehung kindlicher Krebserkrankungen und insbesondere kindlicher Leukämien muss daher in einem koordinierten multidisziplinären Forschungsprogramm untersucht werden, bei dem die Strahlenforschung nur eine Disziplin repräsentiert. Ein solches multidisziplinäres Forschungsprogramm kann nicht alleine aus Mitteln des UFOPLANs finanziert werden, vielmehr sind hierzu auch Fördermittel des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und des Bundesministeriums für Gesundheit notwendig.

Zur Überprüfung der epidemiologischen Ergebnisse und für spezielle Einzelfragestellungen (u. a. zur **R**elativen **B**iologischen **W**irksamkeit (RBW), genetische Wirkungen), zu denen keine oder nicht ausreichende empirische Daten am Menschen vorliegen, sind strahlenbiologische Studien notwendig. Aus strahlenbiologischen Untersuchungen liegen Erkenntnisse über direkte und indirekte Wirkmechanismen von ionisierender Strahlung vor, die ein Abweichen der Dosiswirkungs-Beziehung vom linearen Wirkmodell ohne Schwellendosis für Krebserkrankungen oder genetische Effekte allgemein, und bei bestimmten Individuen im Besonderen, möglich erscheinen lassen. Des Weiteren gibt es vereinzelt Hinweise, dass „Non-Cancer“ Effekte (u. a. Herz-Kreislaufkrankungen, Katarakte) in Dosisbereichen auftreten könnten, die unterhalb der bisher angenommenen Dosissschwellen liegen. In den genannten Bereichen gibt es noch erhebliche wissenschaftliche Unsicherheiten über mögliche Mechanismen, über kausale Zusammenhänge und über den Verlauf der Dosis-Wirkungsbeziehung bzw. zur Höhe einer möglichen Dosissschwelle sowie zur individuellen und alters- und geschlechtsabhängigen Strahlenempfindlichkeit. Über spezifische strahleninduzierte zelluläre Veränderungen kann mit Verfahren der biologischen Dosimetrie eine erhaltene oder vermutete Strahlenexposition erkannt und quantifiziert werden.

Auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden die Strahlenschutzkonzepte weiter entwickelt. Hierbei sind auch die umwelt- und gesundheitsökonomischen sowie die gesellschaftspolitischen Auswirkungen zu bewerten. Risikokommunikation muss den Prozess der Fortentwicklung von Strahlenschutzkonzepten begleiten. Angewandte Forschung zur Wir-

kung und zum Risiko ionisierender Strahlung hat natürlicherweise viele Berührungspunkte und Überlappungen mit Fragen der Grundlagenforschung. Eine Abgrenzung ist dadurch möglich, dass dem Bereich der Grundlagenforschung Untersuchungsvorhaben zur Klärung grundlegender Mechanismen und gesundheitlicher Wirkungszusammenhänge von ionisierender und nichtionisierender Strahlung zuzuordnen sind. Die angewandte Strahlenschutzforschung befasst sich hingegen mit spezifischen Einzelfragen zu Strahlenwirkungen und Strahlenrisiken im Hinblick auf die Verbesserung der fachlichen Grundlagen für die Risikobewertung, die Ermittlung der Notwendigkeit für konkrete Maßnahmen sowie Handlungsempfehlungen im Bereich der Vorsorge.

Die offenen Fragen zur Wirkung und zum Risiko ionisierender Strahlung in den nächsten Jahren lassen sich zu folgenden Themenbereichen zusammenfassen:

#### I.1.1 Strahlenepidemiologie

Mittel- und langfristig werden Kohortenstudien an strahlenexponierten Personengruppen aus Beruf, Medizin und Umwelt bzw. Fall-Kontrollstudien mit vergleichbarem Hintergrund die Grundlage bilden für die Abschätzung des strahlenbedingten Risikos sowohl für bösartige Neubildungen als auch für andere Erkrankungen. Hier werden Erkenntnisse erwartet über Strahlenrisiken für in Deutschland existierende Expositionssituationen. Diese werden zur Absicherung der Risikobewertung im Strahlenschutz und zur Begutachtung von unfallbedingten Strahlenexpositionen benötigt.

Um gewährleisten zu können, dass diese Erwartung realisiert werden kann, ist kurzfristig sicherzustellen, dass gezielte Untersuchungen an geeigneten Personengruppen initiiert oder fortgesetzt werden. Bei den beruflich Exponierten steht insbesondere die deutsche Uranbergarbeiterkohorte im Vordergrund, für deren Fortsetzung die Mitwirkung Dritter notwendig ist und deren Datensatz auch durch Dritte ausgewertet werden soll. Um dies zu gewährleisten, wurden im BfS die technischen Voraussetzungen geschaffen und in Zusammenarbeit mit der Strahlenschutzkommission (SSK) ein Verfahren etabliert. Zusätzlich zur Fortsetzung der Arbeiten an der Uranbergarbeiterkohorte ist es erforderlich, die Kohorten der Kernkraftwerksarbeiter und des Flugpersonals weiter zu untersuchen. Aufgrund der für belastbare statistische Aussagen teilweise ungenügenden Größe der Personengruppen ist es unerlässlich, sicherzustellen, dass im Rahmen internationaler Kooperationen Daten einzelner Studien gemeinsam analysiert werden können (sog. gepoolte Analysen).

Bzgl. der medizinischen Strahlenexposition ist es aufgrund der zunehmenden Zahl von CT-Untersuchungen notwendig, langfristig angelegte Kohortenstudien durchzuführen.

Im Bereich umweltbedingter Strahlenexpositionen ist zu prüfen, inwieweit die Erkenntnisse und Daten aus der Bevölkerung, die entlang des Flusses Tеча im Südrural lebt, für weitere Untersuchungen genutzt werden können.

Aufgrund der Erkenntnisse aus epidemiologischen Studien, insbesondere aus der Life-Span Study an den Überlebenden der Atombombenabwürfe auf Hiroshima und Nagasaki, die die Grundlage bilden für die Bestimmung von Verursachungswahrscheinlichkeiten bösartiger Erkrankungen nach Strahlenexposition, ist es unabdingbar, die entsprechenden Strahlenepidemiologischen Tabellen auf der Basis der Krebshäufigkeiten in Deutschland zu aktualisieren. Mit diesen Ausarbeitungen wird 2009 begonnen werden.

#### I.1.2 Strahlenbiologie: Mechanismen

Es ist notwendig, die Mechanismen der direkten und indirekten Strahlenwirkungen unterschiedlicher Strahlenqualitäten in Abhängigkeit von Alter, Geschlecht und genetischem Hintergrund zu verstehen. In diesem Zusammenhang soll besonders die Strahlenempfindlichkeit von Kindern nach CT-Bestrahlung, aber auch nach Bestrahlung mit anderen Strahlenqualitäten, untersucht werden. Zusätzlich sollen Untersuchungen zur Strahlenempfindlichkeit an hämatopoietischen Stammzellen sowie deren Progenitorzellen im Nabelschnurblut durchgeführt werden.

Darüber hinaus bedarf es der Etablierung aussagekräftiger Marker für Strahlenempfindlichkeit im Hinblick auf Reaktionen von Normal- und Tumorgewebe sowie bzgl. der Anwendbarkeit im beruflichen Strahlenschutz. Diese Erkenntnisse werden benötigt, um real existierende Expositionssituationen in Umwelt, Beruf und Medizin zuverlässig bewerten und entsprechende Strahlenschutzmaßnahmen ergreifen zu können.

Zum Nachweis von strahleninduzierten Genveränderungen in Brusttumoren, die auf eine verbesserte Abschätzung des durch ionisierende Strahlung verursachten Brustkrebsrisiko abzielen, bietet sich besonders eine bestimmte russische Kohorte an. Vergleichbare Kohorten mit dokumentierter Strahlenexposition und teilweise etablierten Biodatenbanken sind in Deutschland nicht vorhanden. Neben Gewebeproben können von der russischen Kohorte noch Blutproben gewonnen werden. Hier ist allerdings schnelles Handeln erforderlich. Kurzfristig wurde 2008 mit einer Pilotstudie begonnen, da zurzeit noch ein Zugang zu einem Großteil der russischen Probandinnen möglich

ist. Bei einem erfolgreichen Verlauf soll die Pilotstudie in ein langfristig angelegtes Vorhaben münden.

Trotz langjähriger Bemühungen sind die strahlenbedingten Risiken von Auger-Elektronen bei medizinischen Anwendungen immer noch nicht hinreichend bekannt. Für den Strahlenschutz in diesem Bereich wäre es wünschenswert, diese Kenntnislücke zu schließen und entsprechende Strahlenschutzkonzepte unter Berücksichtigung der Abhängigkeit des Strahlenrisikos von der Dosisleistung zu entwickeln. Hier wurde gemeinsam mit der PTB und der TU München ein Konzept entwickelt, das realisiert werden sollte.

Die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen genetischen und biochemischen Faktoren der Strahlenempfindlichkeit bei eineiigen Zwillingen kann mittelfristig durch eine kombinierte Auswertung der laufenden Forschungsvorhaben erfolgen. Es wird erwartet, dass aus den laufenden Vorhaben heraus ein Proteinchip zur Identifikation von strahlenempfindlichen Personen entwickelt werden kann. Ein solches Vorhaben ist allerdings eher langfristig anzulegen. Ebenso ist es langfristig wichtig, für die Etablierung weiterer Biomarker für die Dosimetrie und die Strahlenempfindlichkeit metabolische Veränderungen nach Strahlenexposition zu untersuchen. Ein Projekt zur Bedeutung biologischer Mechanismen mit nicht-linearer Dosiswirkungsbeziehung für das Strahlenrisiko und den Strahlenschutz könnte aufgrund der zu erwartenden Erkenntnisse etwa ab 2010 begonnen werden.

### I.1.3 Strahlenbiologie: Biologische Dosimetrie

Verfahren der biologischen Dosimetrie sind für die nuklearspezifische Gefahrenabwehr bei Strahlenunfällen und zur retrospektiv-forensischen Absicherung von Strahlenexpositionen notwendig. Sie dienen als fachliche Grundlage zur Sicherung und Quantifizierung von stattgefundenen oder vermuteten Strahlenexpositionen bei Strahlenunfällen bzw. ggf. sozialgesetzlichen Entschädigungsverfahren. In diesem Bereich sind Vorhaben zur Etablierung weiterer Indikatoren und zur sicheren Quantifizierung in Abhängigkeit von Alter, Geschlecht, genetischem Hintergrund, Strahlenqualität und Expositionsbedingungen notwendig.

Zur Vorbereitung auf einen Strahlenunfall mit einer großen Anzahl Exponierter ist die Initiierung, Etablierung und Weiterentwicklung sowohl eines nationalen als auch eines internationalen Biodosimetrie-Netzwerks notwendig. Das BfS beteiligt sich intensiv an entsprechenden Aktivitäten im internationalen Rahmen.

In einem internationalen Rahmen soll ein Vorhaben für neue molekularbiologische Indikatoren in der Biodosimetrie zum Nachweis ionisierender Strahlung gestartet werden, da für den Notfallschutz eine Optimierung und schnelle Verfügbarkeit von biologischen Indikatoren im Hinblick auf einen großen Strahlenunfall dringend notwendig ist.

Die Untersuchung epigenetischer Marker für die biologische Dosimetrie nach Strahleneinwirkung ist von der Verfügbarkeit von Bioprobenbanken abhängig, die in laufenden Projekten etabliert werden. Das Projekt kann dementsprechend erst 2009 beginnen.

#### I.1.4 Strahlenepidemiologie und -biologie: Etablierung von Bioprobenbanken „hoch“-exponierter Populationen und ihrer Nachkommen

Die Fortschritte des modernen Strahlenschutzes haben zur Folge, dass hoch exponierte Personengruppen aus Beruf und Umwelt zunehmend der Vergangenheit angehören. Zur Sicherung dieses einmaligen Probenmaterials sind Bioprobenbanken zu etablieren, um das vorhandene Material zu gegebener Zeit mit den dann verfügbaren neuen und sensitiveren Methoden untersuchen zu können.

2009 wird mit dem Aufbau einer Lymphozyten- und DNA-Bank von Personen, die bei der Wismut-AG beschäftigt waren, begonnen werden. Die Etablierung von Bioprobenbanken für Bioproben anderer strahlenexponierter Personen (Medizin, Beruf, natürliche Strahlenexpositionen oder Strahlenunfall) sind grundlegende Voraussetzung für die Beantwortung wichtiger Fragen im Strahlenschutz. Ein solches Projekt sollte langfristig verfolgt werden.

Sichergestellt werden muss die Fortführung und Datenpflege bestehender Biobanken (LUCY-Familien, klinisch strahlenempfindliche/resistente Patienten und Kontrollen), da die Pflege dieser hochwertigen Kollektive für die langfristige Nutzung für wissenschaftliche Fragestellungen erforderlich ist.

#### I.1.5 Strahlenepidemiologie und -biologie: Molekular-epidemiologische Studien zur Verringerung der Abschätzunsicherheiten der Risikoschätzer für das Strahlenrisiko

Durch die Erfassung von Expositions- und Wirkungsmarkern auf zellulärer sowie Gewebeebene sowie von Erkrankungs- und Empfindlichkeitsmarkern auf systemischer Ebene lassen sich die Unsicherheiten der Risikoabschätzung epidemiologischer Studien weiter verringern.

Derzeit werden im Bereich der Biologie Untersuchungen zu molekularen Signaturen von kombinierten Schadstoffwirkungen bei Lungenkrebs, eine Machbarkeitsstudie zur Untersuchung von Blutproben ehemaliger Wismut-Beschäftigter hinsichtlich potentieller Biomarker für Arsen- und/oder Strahlenexposition mit der Hilfe von Proteomics- und cDNA Microarraytechnologien durchgeführt. In 2007 ist ein Vorhaben angelaufen, das der Abschätzung des Krebsrisikos nach akuter Strahlenexposition durch Analyse der Daten für die Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki dient.

Ergänzende molekular-epidemiologische Studien zur Verringerung von Unsicherheiten in der Risikoabschätzung strahlenexponierter Kollektive, insbesondere bei gleichzeitiger Exposition gegenüber anderen Noxen, sind zwingend notwendig.

#### I.1.6 Strahlenepidemiologie und -biologie: Studien zu Non-Cancer Effekten, insbesondere Herzkreislauferkrankungen und Katarakten

Herzkreislauferkrankungen und Katarakte werden derzeit als klassisch deterministische Wirkungen beschrieben. Hier ist dringend eine Überprüfung des Wirkmodells notwendig. Sowohl epidemiologische als auch biologische Studien sind zwingend erforderlich, um Erkenntnisse über einen möglichen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang von ionisierender Strahlung und Non-Cancer Effekten (Herzkreislauferkrankungen, Autoimmunerkrankungen, Katarakte, etc.) zu gewinnen. Diese Fragen müssen – auch unter Berücksichtigung von Vorhaben, die derzeit von der EU gefördert werden – langfristig verfolgt werden.

#### I.1.7 (Weiter-)Entwicklung von Strahlenschutzkonzepten

Eine Überprüfung und Weiterentwicklung der in Deutschland vorhandenen Strahlenschutzkonzepte aufgrund der neuen ICRP-Empfehlungen, der derzeit laufenden Überarbeitungen der Basic Safety Standards der IAEA sowie der Erkenntnisse aus oben genannten Forschungsvorhaben ist notwendig.

#### I.1.8 (Weiter-)Entwicklung von Konzepten zur Kommunikation von Risiken unter Berücksichtigung umwelt- und gesundheitsökonomischer sowie sozialpolitischer Gesichtspunkte

Die Entwicklung von Konzepten zur Kommunikation von Risiken unter Berücksichtigung umwelt- und gesundheitsökonomischer sowie gesellschaftspolitischer Gesichtspunkte muss zum einen themenspezifisch erfolgen, zum anderen aber grundsätzliche

Rahmenbedingungen der Risikokommunikation in Deutschland berücksichtigen. Ein detailliertes Konzept hierfür wird derzeit im BfS entwickelt. Risikokommunikation ist ein unverzichtbarer Teil der Aufgabenerfüllung des BfS. Erkenntnisse hierzu wurden in den vergangenen Jahren insbesondere im Bereich NIR erarbeitet. Entsprechende Vorhaben auch für ionisierende Strahlung werden ab 2009 verstärkt in den UFOPLAN eingebracht werden. Ergebnisse aus abgeschlossenen Vorhaben zur Risikokommunikation werden dabei berücksichtigt. Sicher gestellt ist ebenfalls eine Verknüpfung mit den entsprechenden Aufgaben aus dem Bereich NIR.

## **I.2 Medizinischer Strahlenschutz**

Die zivilisatorische Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland ist zu einem sehr hohen Anteil auf medizinische Anwendungen ionisierender Strahlung bzw. radioaktiver Stoffe zurückzuführen. Aus diesem Grund kommt der Erfassung und Bewertung der Strahlenexposition der Patienten und der Optimierung der Untersuchungsverfahren unter strahlenhygienischen Gesichtspunkten ein hoher Stellenwert zu. Zwei wesentliche Amtsaufgaben des BfS betreffen die Erhebung von detaillierten Daten zu Häufigkeit und Dosis spezifischer diagnostischer Strahlenanwendungen im Hinblick auf die Abschätzung der Kollektivdosis in Deutschland und die Festlegung von Diagnostischen Referenzwerten. Hierzu werden im Rahmen der Ressortforschung gezielt Forschungsvorhaben konzipiert und vergeben. Sie dienen dazu, aktuelle Daten zu Teilaspekten zu erheben, Konzepte zur Optimierung medizinischer Strahlenanwendungen zu erarbeiten und Erkenntnislücken zu schließen.

Die offenen Fragen im Bereich des medizinischen Strahlenschutzes der nächsten Jahre lassen sich zu folgenden Themenbereichen zusammenfassen:

### **I.2.1 Erhebung von detaillierten Daten zu Häufigkeit und Dosis spezifischer diagnostischer Strahlenanwendungen im Hinblick auf die Abschätzung der Kollektivdosis in Deutschland und die Festlegung von Diagnostischen Referenzwerten**

Die regelmäßige Erhebung der medizinischen Strahlenexpositionen in Deutschland sowie die Festlegung und Aktualisierung von Diagnostischen Referenzwerten sind Amtsaufgaben des BfS. Sie sind auch eine zentrale Voraussetzung für die nationale und internationale Berichterstattung an das Parlament und an UNSCEAR. Die Ergebnisse von diesbezüglichen Ressortforschungsvorhaben sind für die Erfüllung dieser Amtsaufgaben unverzichtbar, wobei eine kurzfristige Umsetzung dringend erforderlich

ist, da nur so die jährliche Berichterstattung sowie eine zeitnahe Aktualisierung der Diagnostischen Referenzwerte möglich ist. Das BfS beteiligt sich derzeit an einer EU Initiative, die zum Ziel hat, für die hier einschlägigen Fragen auf europäischer Ebene harmonisierte Verfahren zu entwickeln.

#### I.2.2 Interne und äußere Dosimetrie bei medizinischen Expositionen einschließlich deren Überwachung

Im Bereich der digitalen Röntgendiagnostik (sowohl konventionell als auch mit Hilfe von Schnittbild-Verfahren) war in den letzten Jahren eine zum Teil stürmische technische Entwicklung zu verzeichnen, die zunehmend Eingang in die medizinische Heilkunde gefunden hat. Insbesondere im Bereich der digitalen Röntgenmammographie, die im derzeit anlaufenden Mammographie-Screeningprogramm in Deutschland die analoge Röntgenmammographie bereits zu einem großen Teil verdrängt hat, sind Ansätze zur Dosisreduktion von zentraler Bedeutung. Die kurzfristige Umsetzung eines diesbezüglichen Ressortforschungsvorhabens ist somit unverzichtbar. Analog stellt sich die Situation hinsichtlich der Entwicklung von Berechnungsverfahren zur Verbesserung der externen Dosimetrie – insbesondere für die Computertomographie – dar.

Ressortforschungsvorhaben zur internen Dosimetrie bei neuartigen Radiopharmaka sind in Anbetracht der abzusehenden technischen Entwicklung ebenfalls sehr wichtig. Arbeiten zur internen Dosimetrie werden teilweise durch die ICRP durchgeführt, wobei oft kaum biokinetische Informationen vorliegen. Deshalb sind Forschungsarbeiten zur Biokinetik notwendige Grundlage für die interne Dosimetrie.

#### I.2.3 Klinische und strahlenhygienische Bewertung und Optimierung diagnostischer, interventioneller und therapeutischer Verfahren

Aufgrund ihres großen Anteils an der medizinischen Strahlenexposition in Deutschland kommt der kardiologischen Diagnostik und Intervention aus Sicht des Strahlenschutzes eine besondere Bedeutung zu. Dabei sind nicht nur die konventionellen Verfahren der Koronarangiographie zu berücksichtigen, sondern auch die neuen Schnittbildverfahren CT, PET und MRT, bei denen abzusehen ist, dass sie insbesondere im Bereich der Früherkennung der koronaren Herzkrankheit (KHK) zunehmend häufig zum Einsatz kommen werden. Die kurzfristige Umsetzung von diesbezüglichen Ressortforschungsvorhaben ist somit von besonderer Bedeutung.

Einen strahlenhygienisch ebenfalls bedeutsamen Bereich stellt das Mammographie-Screening-Programm in Deutschland dar, dessen flächendeckende Einführung derzeit anläuft. Damit kommt der Evaluation des Screening-Programms hinsichtlich der langfristigen Wirkung auf die Brustkrebsmortalität eine zunehmende Bedeutung zu. Die Mortalitätsevaluation stellt eine unabdingbare Voraussetzung für die Nutzen-Risiko-Bewertung des gesamten Programms dar. Eine vergleichende Bewertung vor und nach Einführung des Programms ist jedoch nur bei einem frühzeitigen Beginn der Evaluation – noch während der laufenden Implementierungsphase – möglich. Die kurzfristige Umsetzung eines diesbezüglich konzipierten Ressortforschungsvorhabens wurde eingeleitet.

Weiterhin haben sowohl die SSK als auch die betroffenen Fachgesellschaften in mehreren Stellungnahmen auf den Mangel an Ausbildungsstätten für Medizinphysik-Experten (MPE) sowie auf die sich daraus ergebenden negativen Konsequenzen für die Krankenversorgung und die klinische Forschung in Deutschland hingewiesen. Um diesem Mangel entgegenzuwirken ist es erforderlich, neben der Weiterentwicklung des medizinischen Strahlenschutzes gleichzeitig die Schaffung von Ausbildungskapazitäten für MPE zu initiieren. Ein Teilaspekt dieser Frage wird derzeit durch ein Vorhaben der Universität Mannheim im Rahmen des Kompetenzverbunds aktiv verfolgt.

#### I.2.4 Weiterentwicklung der technischen Qualitätssicherung, insbesondere bei digitalen röntgendiagnostischen Untersuchungen

Es ist absehbar, dass in der Röntgendiagnostik analoge Verfahren in immer größerem Umfang durch digitale Verfahren ersetzt werden. Aufgrund der rasanten technischen Entwicklung im Bereich der digitalen Röntgenverfahren besteht jedoch in zunehmendem Maße die Notwendigkeit, auch die technische Qualitätssicherung an die neuen Gegebenheiten anzupassen. Dabei ist wegen des entsprechenden Bundestagsbeschlusses darauf zu achten, dass zumindest im Mammographie-Screening die europäischen Vorgaben des „European protocol for the quality control of the physical and technical aspects of mammography screening“ (EPQC) Eingang in die nationalen Richtlinien und Normen zur Qualitätssicherung finden. Gleichzeitig müssen auch die in der Qualitätssicherung verwendeten Prüfkörper einer Qualitätskontrolle unterzogen werden. So liegen dem BMU sowie den Aufsichtsbehörden der Länder derzeit keine gesicherten Informationen über die Einhaltung der Anforderungen an die Beschaffenheit der bei Abnahmeprüfungen (AP) und Konstanzprüfungen (KP) in der digitalen Röntgendiagnostik zu verwendenden Prüfkörper vor. Dies gilt insbesondere auch für

die bei der digitalen Mammographie zu verwendenden Prüfkörper. Die kurzfristige Umsetzung in ein diesbezügliches Ressortforschungsvorhaben ist somit dringend erforderlich, damit die Planungen und Maßnahmen des Strahlenschutzes in diesem technisch hochinnovativen Bereich nicht hinter den technischen Entwicklungen zurück bleiben. Für die Entwicklung und Erprobung von Prüfkörpern sollte – soweit möglich – eine Zusammenarbeit mit den Herstellern erfolgen.

Die im Rahmen der Ressortforschung vorgesehenen Forschungsvorhaben sind konkret auf die Umsetzung der o.g. Amtsaufgabe des BfS ausgerichtet bzw. legen im Bereich der Dosimetrie die wissenschaftliche Basis dafür. Sie grenzen sich damit deutlich vom Kompetenzverbund Strahlenforschung (Förderung durch BMBF und BMU) ab, dessen Schwerpunkt insbesondere die Förderung von grundlagenorientierten Vorhaben auf der präklinischen Ebene ist.

### **I.3 Beruflicher Strahlenschutz**

Im Bereich des beruflichen Strahlenschutzes besteht Forschungsbedarf bezüglich der Präzisierung von Dosisabschätzungen für das fliegende und das medizinische Personal, der Eignung elektronischer Personendosimeter für die amtliche Personendosimetrie, der Entwicklung eines elektronischen Strahlenpasses sowie der Verbesserung von Methoden zur Inkorporationsüberwachung. Dazu zählen vor allem die Anwendung der Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle hinsichtlich der Anforderungen und der Qualitätssicherung im Falle der Raumluftüberwachungen zur Inkorporationskontrolle sowie der Schutz des Ungeborenen durch adäquate Überwachungsmethoden der beruflich strahlenexponierten Frauen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen und Entwicklungen haben unmittelbare Bedeutung für die Erfüllung und Optimierung der Amtsaufgaben des BfS, z.B. den Betrieb und die Fortentwicklung des Strahlenschutzregisters sowie der Leitstelle Inkorporationsüberwachung.

Dazu sollte auch für die Themen „Entwicklung empfindlicherer Messmethoden“, „Organisation der beruflichen Überwachung“ und „Training des Strahlenschutzpersonals“ ein Netzwerk für einen EU-weiten Informations- und Erfahrungsaustausch aufgebaut bzw. weiter ausgebaut werden.

Offene Fragen zum Forschungsbedarf im beruflichen Strahlenschutz lassen sich zu folgenden Themenbereichen zusammenfassen:

### I.3.1 Erhebung tätigkeitsbezogener Expositionen in kerntechnischen Anlagen

Derzeit wird eine Studie zur Untersuchung und Bewertung der tätigkeitsbezogenen externen Strahlenexposition in Einrichtungen und Anlagen nach AtG, StrlSchV und RöV unter dem Gesichtspunkt der Optimierung durchgeführt. Die Fortschreibung dieser Studie ist ab dem II. Quartal 2009 erforderlich.

Im Zusammenhang mit Rückbau und Stilllegungen ist in jüngster Zeit wiederholt die Frage nach dem Inkorporationsrisiko, dem Fremdarbeiter in Kontrollbereichen fremder Anlagen ausgesetzt sind, gestellt worden. Derzeit gibt es keine Übersicht über tätigkeitsspezifische Inkorporationen des §-15-Personals in fremden Anlagen nach AtG und StrlSchV. Um die Dimension dieses möglichen Problems abzuschätzen, ist kurzfristig eine Erhebung bei den behördlich bestimmten Inkorporationsmessstellen durchzuführen.

### I.3.2 Untersuchungen zur Ortsdosisleistung in Flugzeugen

Die gegenwärtige Dosisberechnung des fliegenden Personals soll durch eine verbesserte Berücksichtigung der Einflüsse von Sonnenzyklus, Ortsveränderung der magnetischen Pole und solar particle events verbessert werden. Die hierfür erforderlichen Untersuchungen zur Ortsdosisleistung in Flugzeugen sollen den Verlauf eines halben Sonnenzyklus vom solaren Minimum zum solaren Maximum umfassen. Sie müssen in 2008 begonnen werden, da sich die Sonne 2007/2008 im solaren Minimum befindet. Verzögerungen des Beginns der Untersuchungen hätten zur Folge, dass die derzeit einsetzende Phase der größten Höhenstrahlung nicht mehr ausreichend vollständig erfasst werden kann.

### I.3.3 Äußere Dosimetrie bei beruflichen Expositionen einschließlich ihrer Überwachung

Elektronische Personendosimeter (EPD):

Mit der Prüfung der Eignung elektronischer Personendosimeter (EPD) für gepulste Strahlungsfelder im medizinischen Bereich muss kurzfristig begonnen werden, da der Einsatz elektronischer Personendosimeter als amtliche Dosimeter im medizinischen Bereich angestrebt wird. Hierfür sind die Prüfkriterien für eine amtliche Zulassung und für regelmäßige Vergleichsmessungen durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) mit ausreichendem zeitlichen Vorlauf zu entwickeln.

Beta-Ortsdosimeter:

Die Entwicklung eines Ortsdosimeters für Beta-/Photonen-Mischstrahlungsfelder muss kurzfristig beginnen, weil die zunehmende Anwendung von Beta-Strahlern in der Medizin die Entwicklung von Beta-Ortsdosimetern erforderlich macht. Hierbei müssen die Bedürfnisse des praktischen Strahlenschutzes an den entsprechenden Arbeitsplätzen baldmöglichst berücksichtigt werden. In Abhängigkeit von den Ergebnissen messmethodischer Forschungsarbeiten ist zu prüfen, inwieweit die Entwicklung von Beta-Ortsdosimetern unter Einbeziehung der Industrie durchgeführt werden kann.

Elektronischer Strahlenpass (ESP):

Gegenwärtig besteht beim §-15-Personal eine Koexistenz von Dosiswerten aus der amtlichen Personendosimetrie, die in das Strahlenschutzregister eingetragen werden, und nichtamtlichen Dosiswerten aus der operationellen Dosimetrie, die in den Strahlenpass eingetragen werden. Dies führt zu Diskrepanzen, die mit einem elektronischen Strahlenpass beseitigt werden können. Die Einführung eines ESP ist sinnvoll, wenn die elektronische Personendosimetrie im Bereich der Kerntechnik amtlich anerkannt und einheitlich eingeführt ist. Die Entwicklung des elektronischen Strahlenpasses ist zum jetzigen Zeitpunkt erforderlich, damit bei Einführung von elektronischen Personendosimetern als amtliche Dosimeter der elektronische Strahlenpass bereits zur Verfügung steht. Die Entwicklung eines Konzeptes und eines Prototyps ist heute bereits möglich und ist daher als kurzfristiges Ziel anzusehen.

#### I.3.4 Interne Dosimetrie bei beruflichen Expositionen einschließlich ihrer Überwachung

Die International Commission on Radiological Protection (ICRP) überarbeitet zurzeit die biokinetischen Modelle zur Bestimmung der Parameter für die Berechnung der inneren Dosis bei beruflich strahlenexponierten Personen. Ein Teil der dafür notwendigen Daten sind die experimentell ermittelten Übergangsraten zwischen den Kompartimenten, die auch aus Untersuchungen mit stabilen Isotopen gewonnen werden können. Um die bestehenden Lücken bei diesem Datensatz rechtzeitig verringern zu können, müssen die entsprechenden Untersuchungen kurzfristig begonnen werden. Untersuchungen mit stabilen Isotopen, mit denen verlässliche biokinetische Parameter gewonnen werden können und deren Ergebnisse in die ICRP-Modellentwicklungen einfließen, wurden bisher nur in Italien und Deutschland durchgeführt.

Andere Vorhaben beziehen sich auf die Verbesserung der Analysen- und Messverfahren bei der Inkorporationsüberwachung (sowohl im Bereich der In-vitro- als auch

der In-vivo-Verfahren), die zwar in Hinblick auch auf die Notfallvorsorge kurzfristig begonnen werden sollten, aber aus Kapazitätsgründen nur mittelfristig realisiert werden können.

Dies trifft auch auf die Entwicklung eines QS-Konzeptes für die Ermittlung der inneren Dosis aus Raumlufmessungen zu, die nach Teil 2 der Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle in einem Bereich bis 6 mSv auf betrieblichen Messungen beruhen.

#### **I.4 Wirkung und Risiko nichtionisierender Strahlung**

Vorliegende Befunde über mögliche langfristige Wirkungen chronischer Exposition mit niederfrequenten und hochfrequenten Feldern sowie optischer Strahlung (UV, Infrarot) – vor allem auch im Hinblick auf möglicherweise empfindliche Bevölkerungsgruppen wie z.B. Kinder und Jugendliche – werfen eine Reihe von Fragen auf, die nur durch weitere Untersuchungen abgeklärt werden können. Im Bereich Niederfrequenz sind z. B. Hinweise aus epidemiologischen Studien auf mögliche Zusammenhänge zwischen einer Exposition mit magnetischen Feldern und der Entstehung kindlicher Leukämie aufzuklären. Im Bereich der optischen Strahlung – und hier vor allem im Bereich der UV-Strahlung – sind biopositive Effekte gegenüber den bekannten gesundheitlichen Risiken von UV-Strahlung abzuwägen.

Neue Technologien führen erfahrungsgemäß zu immer komplexeren Expositionsszenarien. Zudem sind die Konsequenzen von bereits vorhersehbaren Veränderungen von Expositionsparametern, die möglicherweise für den Strahlenschutz relevant sind, nicht hinreichend durch den derzeitigen Kenntnisstand über biologische Wirkkaskaden abgedeckt. Für die Zukunft bedeutet dies eine möglichst frühzeitige Einbindung des Strahlenschutzes bereits in der Entwicklungsphase.

Die offenen Fragen im Bereich Wirkung und Risiko nichtionisierender Strahlung in den kommenden Jahren lassen sich zu folgenden Themenbereichen zusammenfassen:

##### **I.4.1 Langfristige Wirkungen hochfrequenter elektromagnetischer und niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder**

Die Fragen, inwieweit chronische Wirkungen durch elektromagnetische Felder verursacht oder im Verlauf beeinflusst werden, sind derzeit nicht abschließend geklärt.

Im Bereich der Niederfrequenz werden Hinweise auf eine Assoziation mit der kindlichen Leukämie auch durch neuere epidemiologische Studien unterstützt. Tierstudien haben jedoch die epidemiologischen Beobachtungen bis dato nicht bestätigt, ebenso

fehlen Hinweise zum zugrundeliegenden Wirkmechanismus. Dies gilt auch für einen möglichen Zusammenhang zwischen niederfrequenten Feldern und neurodegenerativen Erkrankungen, wofür ebenfalls aktuelle epidemiologische Hinweise vorliegen. Aus experimentellen Studien liegen Hinweise vor, dass die Wirkung von Medikamenten für die Brustkrebstherapie durch niederfrequente Magnetfelder beeinträchtigt werden könnte.

Die Forschung zur Klärung der Langzeitwirkungen im Bereich der Niederfrequenz muss intensiviert werden, da in Deutschland wieder verstärkt Infrastrukturmaßnahmen in diesem Bereich geplant sind und damit die Zahl der Exponierten möglicherweise zunehmen wird. Zudem liegen in diesem Bereich konsistente epidemiologische Hinweise auf einen möglichen Zusammenhang zwischen der Exposition durch magnetische Felder der Energieversorgung und kindlichen Leukämien vor. Diese Projekte werden deshalb auch von der WHO als dringlich eingestuft und sind somit auch Gegenstand der Kooperation mit der WHO.

Auch im hochfrequenten Bereich können die Fragen zu möglichen Langzeitwirkungen nicht abschließend beantwortet werden. Die vorliegenden epidemiologischen Studien und die Laboruntersuchungen sprechen eher gegen die Annahme von gesundheitlichen Risiken infolge von Langzeitwirkungen. Die bisher publizierten epidemiologischen Studien z.B. über einen möglichen Zusammenhang von Krebserkrankungen im Kopfbereich infolge einer langjährigen Nutzung von Mobiltelefonen, decken allerdings nur Zeiträume von etwa 10 Jahren ab. Mögliche gesundheitliche Folgen langjähriger intensiver Nutzung von Mobiltelefonen vor allem hinsichtlich der zunehmenden Nutzung durch Kinder und Jugendliche bleiben offene Fragen, die vorrangig beantwortet werden müssen. Hier besteht dringender Klärungsbedarf. Die abschließende Bewertung der Ergebnisse des DMF unter Einbeziehung des internationalen Kenntnisstandes im Juni 2008 bestätigte nochmals als die Schwerpunkte zukünftiger Forschung im Bereich der hochfrequenten elektromagnetischen Felder das Risiko nach Langzeitnutzung und die besondere Situation von Kindern und Jugendlichen.

#### I.4.2 Strahlenschutz bei neuen Technologien mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (bis in den Terahertz-Bereich)

Eines der wesentlichen Probleme für den Strahlenschutz im Bereich der nichtionisierenden Strahlen ist die rasante technologische Entwicklung. Dadurch ändert sich permanent die Expositionssituation der Bevölkerung oder der jeweiligen Anwender. Zudem könnten relevante Expositionsparameter derart verändert werden, dass eine Übertragung des bestehenden Kenntnisstandes nicht oder nur sehr eingeschränkt

möglich ist. Es ist deshalb erforderlich, alle relevanten Daten zu neuen Technologien möglichst frühzeitig zu erfassen und ggf. Studien zur Aufklärung möglicher gesundheitlicher Wirkungen zu initiieren. Daneben sind Daten zu neuen Technologien erforderlich, um sowohl gegenüber dem BMU als auch gegenüber der allgemeinen Bevölkerung auskunftsfähig zu bleiben.

- Die gesundheitlichen Risiken im Bereich hochfrequenter elektromagnetischer Felder wurden in den letzten Jahren im Rahmen des DMF umfassend untersucht. Mit dem Abschluss des DMF und unter Berücksichtigung der derzeit im internationalen Rahmen vorliegenden Erkenntnisse wurde der Frequenzbereich des Mobilfunks intensiv beforscht. Dabei wurde Wert darauf gelegt, dass die gewonnenen Erkenntnisse nach Möglichkeit auch auf andere Frequenzbereiche weitgehend übertragbar sind. Neue Technologien wie die Terahertz Technologie, für die in den nächsten Jahren in unterschiedlichen Bereichen Anwendungen vorgesehen sind, nutzen neue, bisher nicht oder wenig erforschte Frequenzbereiche. Eine Übertragung der Kenntnisse aus dem Frequenzbereich des Mobilfunks ist nicht oder nur eingeschränkt möglich.
- Die Ablösung der analogen Funkanwendung der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS-Funk) durch digitale Systeme wird für die Beschäftigten der Sicherheitsbehörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben zu einer Veränderung der Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern führen. Insbesondere der körpernahe Betrieb leistungsstarker Endgeräte stellt in dem vorgesehenen Frequenzbereich um 400 MHz eine neue und bislang noch vergleichsweise wenig untersuchte Expositionssituation dar, deren gesundheitliche Konsequenzen abzuklären sind.

#### I.4.3 Strahlenschutz bei neuen Technologien mit niederfrequenten oder statischen magnetischen Feldern

Auch beim Strahlenschutz magnetischer Felder stellt sich die Situation ähnlich zu der bei der Entwicklung neuer Technologien bei hochfrequenten elektromagnetischen Feldern dar. Eines der wesentlichen Probleme ist hier neben der rasanten technologischen Entwicklung, dass durch neue Technologien weitaus höhere magnetische Feldstärken erzielt werden bzw. dass durch die Erschließung neuer Energieversorgungssysteme (dezentrale Windkraftanlagen, Off-shore Windkraftanlagen etc.) und zur Erhöhung der Versorgungssicherheiten die Stromversorgungsnetze überprüft und ggf. erneuert und erweitert werden. Auch die Exposition durch niederfrequente mag-

netische Felder im häuslichen Bereich ist in diesem Zusammenhang erneut zu betrachten.

- Die diesbezüglichen Projekte im Bereich niederfrequenter Magnetfelder müssen 2008 beginnen. Niederfrequente Magnetfelder wurden von der WHO als mögliches humanes Karzinogen eingestuft. Hier besteht die Möglichkeit eines Zusammenhangs mit kindlichen Leukämien. Eine Erweiterung des Hochspannungsübertragungsnetzes in größerem Umfang ist geplant. Dies könnte zu einer Zunahme der Exposition der Bevölkerung führen.
- Eine weitere Aufklärung gesundheitlicher Risiken starker statischer Magnetfelder ist notwendig. Hier wird ab einer Schwelle von etwa 2-4 Tesla über transiente Effekte berichtet, die zu einer Gefährdung an bestimmten Arbeitsplätzen oder bei bestimmten Tätigkeiten führen können. Betroffen sind im Wesentlichen kognitive Fähigkeiten. Dieses Thema ist von hoher Priorität, da zunehmend z.B. Arbeitnehmer solchen und weitaus höheren Feldern ausgesetzt werden. Die Feldstärkewerte neuer Technologien (vor allem im medizinischen Bereich) erreichen bereits jetzt Werte im Bereich 10 Tesla, ohne dass verlässliche Daten über das Ausmaß der gesundheitlichen Risiken vorliegen.

#### I.4.4 Optische Strahlung

Zur Risikoabschätzung im Bereich der optischen Strahlung ist die individuelle UV-Exposition bei Nutzung künstlicher und natürlicher Quellen zu erheben. Hierbei spielen auch der Lebensstil und das persönliche Verhalten eine Rolle. Entsprechende Daten sind vor allem für den Wellness-Bereich erforderlich, da hier die unterschiedlichsten Quellen, mit zum Teil komplexer spektraler Verteilung zur Anwendung kommen. Die bei Anwendung auftretenden Expositionen sind oft selbst den Herstellern unbekannt. Zur Erhebung von Expositionsdaten im UV-Bereich haben sich Personendosimeter bewährt.

Die Wirksamkeit der verschiedenen Spektralbereiche der optischen Strahlung ist nicht durchgängig bekannt. Gut untersucht sind die akuten Wirkungen im UV-Bereich (u. a. Sonnenbrand). Bereits im sichtbaren, aber auch im infraroten Bereich wird die Datenlage hierzu spärlich. Zur Bewertung möglicher gesundheitlicher Risiken in diesen Bereichen müssen gezielte Untersuchungsvorhaben konzipiert werden.

Die Zunahme an Hautkrebserkrankungen weltweit vor allem bei der hellhäutigen Bevölkerung ist besorgniserregend. Dem kann nur durch eine Verringerung der Exposition vor allem im UV-Bereich entgegengewirkt werden. Eine dem entsprechende For-

derung nach einem Verzicht auf Sonnenbaden oder ein generelles Nutzungsverbot künstlicher optischer Strahlenquellen, wie etwa Solarien, ist nicht realistisch. Daher muss vordringlich versucht werden, die Bevölkerung zu Veränderungen des individuellen Verhaltens (vor allem beim Sonnenbaden und der Nutzung von Solarien) zu motivieren. Bei Solarien sind die Eigenschaften der Geräte so zu modifizieren, dass die gesundheitlichen Risiken möglichst gering sind und Fehlbedienungen ausgeschlossen werden. Als Grundlage dafür dient eine verlässliche Risikoabschätzung hinsichtlich der gesundheitlichen Schäden durch optische Strahlung, wobei neben der UV-Strahlung auch das sichtbare Licht bei sehr hohen Intensitäten und die Infrarotstrahlung berücksichtigt werden müssen. Andererseits gibt es Hinweise, dass eine Exposition durch UV-Strahlung neben den bekannten Risiken auch einen Nutzen (Vermeidung bestimmter Erkrankungen) haben könnte. Verlässliche Daten liegen aber derzeit nicht vor. Da sich die Diskussion zum Nutzen der UV-Strahlung derzeit vor allem auf den Zusammenhang von UV-Exposition und Vitamin D konzentriert, sind weitere Untersuchungen dazu erforderlich.

## **I.5 Risikokommunikation**

In diesem Themenbereich soll vor allem eine adressatengerechte Risikokommunikation als wichtiger Bestandteil des Strahlenschutzes weiterentwickelt werden. Dabei spielen Aspekte der Risikowahrnehmung, Gestaltung von Information und Kommunikation eine Rolle. Verbesserungen sind durch die Erfassung beeinflussender Faktoren auf die Risikowahrnehmung, der Möglichkeiten der Kommunikation wissenschaftlicher Unsicherheiten sowie die Ermittlung der Wirkung bereits ergriffener Maßnahmen zu erzielen.

Risikokommunikation bezieht sich auf die zentralen Themen der nichtionisierenden Strahlung wie UV-Strahlung, NF-Bereich und HF-Bereich sowie auf die Themen der ionisierenden Strahlung und auf Themenbereiche wie Kinderkrebs um Kernkraftwerke und Radon in Wohnungen.

Bei der UV-Strahlung gilt es, die Öffentlichkeit mit geeigneten Informationsmaßnahmen noch stärker für einen sinnvollen Umgang mit natürlicher und künstlicher UV-Strahlung zu sensibilisieren. Ziel sollten möglichst Änderungen im Sonnenexpositionsverhalten (z.B. Solariennutzung, aber auch gezieltes Sonnenbaden) und Sonnenschutzverhalten der Bevölkerung sein.

Im Bereich NF ist zu berücksichtigen, dass sich die Risikowahrnehmung in der Bevölkerung durch die aktualisierte Risikobewertung der WHO im Jahr 2007, ebenso wie durch die verstärkten Infrastrukturmaßnahmen, die zur Anbindung der Offshore-Windanlagen notwendig

sind, verändern kann. In der Risikokommunikation ist dies zeitnah und proaktiv zu berücksichtigen, in dem die Risikowahrnehmung in der Bevölkerung erfasst, und der Stand der Erkenntnisse dementsprechend verständlich und nachvollziehbar aufbereitet wird. Auch Fragestellungen der gesundheitlichen Beeinträchtigung durch die Wahrnehmung der Existenz von Sendeanlagen, unabhängig von deren Betrieb, bedürfen der weiteren interdisziplinären Bearbeitung. Hier ist eine enge Kooperation zwischen medizinischen und gesellschaftswissenschaftlichen Fachdisziplinen anzustreben.

Im HF-Bereich steht der Umgang mit der vergleichsweise hohen Risikowahrnehmung – sowohl bezogen auf bereits bestehende Anwendungen, als auch in Anbetracht der absehbaren Weiterentwicklung neuer Technologien – im Vordergrund. Personengruppen, die gesundheitliche Beschwerden auf das Vorhandensein elektromagnetischer Felder zurückführen, müssen auch in Zukunft in der Forschung berücksichtigt werden.

Zur Kommunikation über Fragen möglicher gesundheitlicher Wirkungen für die Bevölkerung aus der Nutzung der Kernenergie ist klar zu trennen zwischen Normalbetrieb und der Situation während und nach Störfällen. In beiden Fällen ist zeitnah und aktiv über den aktuellen Wissensstand bzw. zur aktuellen Situation zu berichten. Die jeweiligen Instrumente und Wege der Kommunikation sind der jeweiligen Situation angepasst zu entwickeln und zielgerichtet einzusetzen.

Die Risikokommunikation im Bereich der natürlichen Radioaktivität wie im Bereich des Radon in Wohnungen gestaltet sich häufig schwierig. Einerseits ist die Erkenntnislage auf der Seite der Wissenschaft klar und z. T. könnten einfache Maßnahmen zu einer Risikominderung beitragen. Zu diesen Maßnahmen ist z.B. auch eine klare rechtliche Normierung insbesondere für Neubauten und öffentlich zugängliche Gebäude zu zählen. Andererseits ist die Wahrnehmung dieser Risiken in Bevölkerung und Politik wenig ausgeprägt.

Die daraus abzuleitenden konkreten Ressortforschungsvorhaben zur Entwicklung und Verbesserung adressatengerechter und situationsangepasster Risikokommunikation sind im Verlauf des Forschungsprogramms jeweils an den Fortschritt der wissenschaftlichen Erkenntnisse und die sich daraus entwickelnden methodischen Möglichkeiten anzupassen.

## **I.6 Natürliche Radioaktivität**

Einen hohen Stellenwert hat im Bereich des Schutzes vor erhöhter natürlicher Radioaktivität im Lichte der neueren Erkenntnisse aus epidemiologischen Untersuchungen weiterhin der Bereich Radon in Gebäuden. Hier werden einheitliche, wissenschaftlich abgesicherte Verfah-

ren zur Prognose, Erfassung und Bewertung der Expositionen benötigt. Zur repräsentativen Ermittlung natürlicher radioaktiver Stoffe und der daraus resultierenden Strahlenexposition existiert aber auch im NORM-Bereich (NORM: **N**aturally **O**ccurring **R**adioactive **M**aterial) und bei radioaktiven Altlasten eine Reihe offener Fragen. Auf diesen Gebieten besteht zudem Bedarf an der Weiterentwicklung bzw. Anpassung bestehender Modelle zur Freisetzung und zum Transport natürlicher Radionuklide, vor allem im Sicker-/Grundwasser, einschließlich der Ermittlung dafür benötigter Parameter. Dabei sind wegen der Überschneidungen mit anderen Rechtsbereichen (Bodenschutz, Abfallrecht) die entsprechenden Randbedingungen und aktuellen Entwicklungen zu berücksichtigen. Bei der zu erwartenden Umsetzung der Regelungen zur natürlichen Radioaktivität in Trinkwässern ergeben sich Fragen hinsichtlich vereinfachter (Screening-) Messmethoden als auch zur radiologischen Relevanz vermehrt zu erwartender Rückstände mit erhöhten Gehalten natürlicher radioaktiver Stoffe.

#### I.6.1 NORM und radioaktive Altlasten

Die Praxis zeigt, dass – unabhängig vom Vorliegen rechtlicher Regelungen – erheblicher Bedarf an der Weiterentwicklung der jeweiligen Schutzkonzepte und an Hilfestellung für die Praxis des Strahlenschutzes besteht.

Die Schwerpunkte künftiger Forschungsarbeiten aus Sicht des BfS lassen sich wie folgt definieren:

- Ermittlung und Bewertung der Freisetzung und des Transportes natürlicher Radionuklide aus radioaktiven Altlasten und NORM über den Wasserpfad: Der Wasserpfad ist bei NORM-Rückständen und radioaktiven Altlasten ein bedeutender Pfad. Für die Prognose der Expositionen sind Untersuchungsmethoden, Modelle und Parameter erforderlich, die die Besonderheiten der betreffenden Medien und der jeweiligen Radionuklide ebenso berücksichtigen wie Entwicklungen in fachlich angrenzenden Rechtsbereichen wie dem Bodenschutz- und dem Abfallrecht.
- Natürliche Radioaktivität wird in unterschiedlichsten Probenmaterialien ermittelt. Es ist die Aufgabe der Leitstelle für Fragen der Radioaktivitätsüberwachung bei erhöhter natürlicher Radioaktivität, diese Methoden vorzuhalten, deren Qualität zu sichern und dabei neue technische Entwicklungen zu berücksichtigen. Die bestehenden analytischen Verfahren zur Ermittlung der Konzentrationen natürlicher Radionuklide in unterschiedlichen Matrices werden weiterentwickelt; neue Verfahren werden entwickelt bzw. für die Anwendung im Bereich natürliche Umweltradioaktivität erschlossen.

- Entwicklung und Weiterentwicklung von Konzepten und Verfahren zur repräsentativen Ermittlung natürlicher Radionuklide und der daraus resultierenden Strahlenexposition: Offen sind hier Aspekte der Entwicklung spezieller Probenahmeverfahren im NORM- und im Altlastenbereich sowie spezielle Fragen zum Umgang mit statistischen Unsicherheiten.
- Untersuchung der Langzeitwirksamkeit von Sanierungsmaßnahmen bergbaulicher Altlasten und des Langzeittransportverhaltens natürlicher Radionuklide in bestimmten Ökosystemen: Bei Entscheidungen über die Sanierung bergbaulicher Hinterlassenschaften spielt die Prognose der Freisetzung und des Transportes natürlicher Radionuklide eine wichtige Rolle. Die Verfolgung der langfristigen Entwicklungen nach deren Abschluss gestattet es, die Zuverlässigkeit der dabei verwendeten Modelle und Parameter zu überprüfen, ggf. zu verbessern und damit einen Beitrag zur Optimierung solcher Maßnahmen, zum Beispiel im Bereich der NORM-Altlasten, zu leisten. Die Verfolgung der zeitlichen Entwicklung der Radionuklidgehalte z.B. in Fluss-Sedimentsystemen der Elbe verspricht überdies vertiefte Einsichten in die dort stattfindenden radioökologischen Prozesse.
- Untersuchungen zur Radioökologie des Urans aus Düngemitteln im System Boden – Pflanze – Grundwasser: Seit einiger Zeit wird verstärkt die Frage diskutiert, ob und in welchem Umfang es infolge des Jahrzehnte währenden Einsatzes mineralischer uranhaltiger Phosphatdünger im Boden zu einer im Vergleich zum natürlichen Bodengehalt beachtenswerten Uranakkumulation kommt, wie das Uran in Pflanzen aufgenommen bzw. in Grund- oder auch Oberflächenwässern transportiert wird. Die Untersuchung dieser Fragen ist insbesondere unter radioökologischen Gesichtspunkten von Interesse.
- Untersuchungen zum Ausbreitungsverhalten des Radons in der freien Atmosphäre: Bei Modellierungen wird insbesondere in Bergbaufolgelandschaften von konstanten Radonfreisetzungen ausgegangen. Durch die Kopplung zeitabhängiger Quellstärken mit den entsprechenden meteorologischen Ausbreitungsbedingungen können die Anwendungsbereiche der Modellierungen präzisiert und ergänzt werden. Von Interesse ist hierbei auch das vertikale Profil der Radonkonzentration im für die Exposition relevanten bodennahen Bereich bis ca. 2 m. Die dort stattfindenden Prozesse, einschließlich der Ablagerung langlebiger Radon-Folgeprodukte auf oberirdischen Pflanzenteilen, sind derzeit nur unzureichend verstanden. Letzteres ist unter anderem für die korrekte

Differenzierung zwischen natürlicher und anthropogen erhöhter Exposition von Bedeutung.

## I.6.2 Radon in Gebäuden

Hinsichtlich der Ermittlung der Radonexposition in Gebäuden, deren Prognose und Bewertung werden für die nächsten Jahre folgende Schwerpunkte gesehen:

- Radon in Baustoffen: In der europäischen Bauproduktrichtlinie von 1989 wird in Artikel 7 gefordert, harmonisierte Normen für den ungehinderten Warenverkehr zu erarbeiten. Im Anhang I „Wesentliche Anforderungen“, Punkt 3 „Hygiene, Gesundheits- und Umweltschutz“ wird der Schutz vor „Emissionen gefährlicher Strahlen“ gefordert. Dies beinhaltet nach einhelliger Meinung auch die Exhalation von Radon aus den Baustoffen. Zur Festlegung solcher Normen ist es notwendig, aussagekräftige, reproduzierbare und untereinander vergleichbare Messmethoden zur Radonexhalation zu erarbeiten. Neben der Radonexhalation besteht auch für die Radondiffusion Bedarf an einheitlichen Mess- und Bewertungsmethoden. Auch hier fehlt es noch an methodischen und systematischen Untersuchungen zur Qualitätssicherung.

Mit der Entwicklung einer Thoronfolgeproduktkalibrierkammer an der PTB im Rahmen eines UFOPLAN-Vorhabens (Abschluss 2007) besteht nun erstmals die Möglichkeit, Thoronfolgeproduktmessgeräte zu testen und zu kalibrieren. Die Weiterentwicklung der Messverfahren, die Untersuchung des Einflusses von Thoron und Thoronfolgeprodukten auf Radon(folgeprodukt)messgeräte und die Bestimmung der Exposition der Bevölkerung durch Thoron sind Themen darauf aufbauender künftiger Arbeiten.

- Radonausbreitung in Gebäuden: Das Verständnis der Radonausbreitung in Gebäuden ist der Schlüssel für die Entwicklung zeit- und kosteneffektiver Verfahren zur Bestimmung von Strahlenexpositionen durch Radon in Wohnungen. Insbesondere geht es um die Möglichkeit der Extrapolation von Ergebnissen von Kurzzeitmessungen auf Langzeitexpositionen. Hierzu werden bereits Forschungsarbeiten sowohl im Rahmen des UFOPLANs als auch im BfS selbst durchgeführt. Die Arbeiten des BfS konzentrieren sich dabei auf die Prüfung der Möglichkeit zur Ermittlung des wichtigen Parameters ‚Luftwechselrate‘, auf der Basis von Radonfolgeproduktmessungen. Mittlerweile auf dem Markt sind kostengünstige aktive Radonmessgeräte, die es ermöglichen, die Radonkonzentration parallel in mehreren Räumen eines Hauses zeitaufgelöst zu messen. Dadurch ist die Dynamik der Radonausbreitung innerhalb ei-

nes Hauses praktikabel messbar geworden. Die Möglichkeiten, Radon und die Folgeprodukte als natürliches Tracergas zur Bestimmung der Luftströmungen innerhalb eines Hauses zu verwenden, sollten deshalb weiter untersucht werden. Das betrifft unter anderem den Einfluss verschiedener meteorologischer Bedingungen.

- Radon-Bodenluftmessungen: Auch für die Bodenluftmessungen zur Charakterisierung eines Baugrundes oder zur regionalen Kartierung des Radonpotentials stellt sich die Frage nach praktikablen und vergleichbaren Messmethoden, um aus Kurzzeitmessungen auf den langjährigen Mittelwert der Aktivitätskonzentration schließen zu können. Der Einfluss klimatischer Randbedingungen und der Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf verschiedene Messmethoden sind in der Literatur beschrieben worden, es fehlt aber an einer wissenschaftlich fundierten Methode zur Berücksichtigung dieser Parameter. Ziel sollte es sein, aus vergleichenden Kurz- und Langzeitmessungen herauszufinden, unter welchen Randbedingungen diese Messungen zu vergleichbaren Ergebnissen führen bzw. wie relevante Parameter zu berücksichtigen sind. Diese Untersuchungen sollen durch eine Ausschreibung im UFOPLAN nach außen gegeben werden.
- Radonprognose: Mit der geplanten Übergabe der Bundeseinheitlichen Datei Radon in Gebäuden (BuRG) an die Länder sind die Aufgaben des Bundes im Bereich der großflächigen Ermittlung der Innenraumkonzentration und Aktualisierung der Daten im Wesentlichen abgeschlossen. Prognosen der Radonbelastung der Bevölkerung sollten aber auch in den nicht durch Messungen erfassten Gebieten bundeseinheitlich durchgeführt werden. Die Schaffung entsprechender methodischer Voraussetzungen ist eine wichtige Aufgabe auf dem Gebiet des Schutzes vor Expositionen durch Radon in Gebäuden.

### I.6.3 Natürliche Radioaktivität in Trinkwässern und Trinkwasseraufbereitungsrückständen

Das BfS hat die bisher umfangreichste, für das Gesamtgebiet der Bundesrepublik repräsentative Studie zum Gehalt natürlicher Radioaktivität in Trinkwässern und der daraus resultierenden Strahlenexposition durchgeführt. Sie stellt eine wesentliche Grundlage für die noch zu treffenden Regelungen zur Trinkwasser-Problematik im Zusammenhang mit natürlicher Radioaktivität dar. Im Zusammenhang mit deren Einführung stellen sich einige weitere Fragen, die einer vertieften Untersuchung bedürfen:

- **Summenparameter Gesamt-Beta-Aktivität:** Für die zukünftige Überwachungsstrategie von Trinkwässern sind neben detaillierten nuklidspezifischen Labormessmethoden auch Screening-Verfahren wünschenswert, die die Überwachung effektiv und kostengünstig gestalten können. Die Methode der Gesamt-Beta-Aktivitätsmessung erscheint dazu als geeignet, da das dosisbestimmende Radionuklid, Ra-228, ein Beta-Strahler ist. Die Methode findet bisher in Deutschland keine Anwendung infolge fehlender methodischer Vorarbeiten, im Gegensatz zur routinemäßigen Anwendung in anderen europäischen Ländern (Frankreich, Großbritannien). Es sind deshalb methodische Untersuchungen geplant, um auch für Deutschland geeignete Verfahren für den Nachweis von maximalen Beta-Aktivitätskonzentrationen zu erschließen bzw. zu qualifizieren.
- **Ermittlung und Bewertung der Strahlenexposition natürlicher Radionuklide aus Rückständen der Wasserwirtschaft:** Im Rahmen der anstehenden Regulierung der natürlichen Radioaktivität in Trinkwässern ist zu erwarten, dass Wasserwerke in Regionen mit erhöhter natürlicher Radioaktivität die Radionuklidkonzentrationen durch den Einsatz entsprechender (zum Teil neuer) Wasseraufbereitungstechnologien reduzieren. Sowohl Art als auch Umfang der anfallenden Rückstände können sich dabei verändern. Um die radiologischen Konsequenzen abschätzen zu können, sind repräsentative Untersuchungen hierzu sowie zu den resultierenden Strahlenexpositionen erforderlich.

## **I.7 Dynamisches Verhalten von Radionukliden in der Biosphäre**

Radioaktive Stoffe können unter anderem durch Ableitungen mit Luft und Wasser, die langfristige Freisetzung aus Endlagern oder durch die Freigabe schwach radioaktiven Materials in die Umwelt gelangen. Bei allen Fragestellungen, bei denen die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Biosphäre oder die Akkumulation in Umweltmedien relevant sind, ist die Kenntnis von Transport- und Anreicherungsprozessen von Radionukliden in der Umwelt eine wesentliche Grundlage, um die Strahlenexposition des Menschen und der belebten Umwelt ermitteln und die Einhaltung gesetzlicher Dosisgrenzwerte sicherstellen zu können. Entscheidend ist, dass sowohl die Einträge in die Biosphäre als auch die dynamischen Prozesse in den Umweltmedien zuverlässig bekannt sind.

Die Datengrundlage und der Kenntnisstand über relevante Prozesse sind je nach dem chemischen Element hinsichtlich Umfang und Qualität äußerst heterogen. Selbst für die Radionuklide, die infolge des globalen Fallouts und des Reaktorunfalls von Tschernobyl in die

Umwelt gelangten, liegen nicht für alle Ökosysteme hinreichende Kenntnisse vor. Größere Lücken wurden auch bei langlebigen Radionukliden, die aus Endlagern freigesetzt werden können, identifiziert. Die Erweiterung des Kenntnisstandes auf diesem Gebiet ist ein Beitrag zu realistischeren anstelle von konservativen Prognosen.

Modelle für die Simulation des Verhaltens von Radionukliden in der Biosphäre nach einer potentiellen Freisetzung aus einem geologischen Endlager für radioaktive Abfälle und dadurch bedingter potentieller Strahlenexpositionen basieren auf dem heutigen Kenntnisstand der Radioökologie. Für diese sind zusätzlich geeignete Herangehensweisen zu entwickeln, um den Unsicherheiten insbesondere der Klimaentwicklungen und der menschlichen Verhaltensweisen, die durch die mit den Prognosen verknüpften langen Zeiträume unausweichlich sind, gerecht zu werden.

#### I.7.1 Transport- und Transferprozesse in der Biosphäre (klassische Radioökologie)

Künftige Schwerpunkte der Forschung bilden auf diesem Gebiet

- die Identifizierung von Schlüsselprozessen bei der Migration von Radionukliden in Böden unter Berücksichtigung der Speziation (u. a. von natürlichen Radionukliden sowie von langlebigen Radionukliden, die im Bereich Endlagerung von Bedeutung sind).
- Quantifizierung des Transfers Boden-Pflanze durch Boden- und Pflanzencharakteristika, u. a. mittels stabiler Isotope oder chemisch analoger Elemente. Der Transfer vom Boden in die Pflanze und die Translokation innerhalb der Pflanze wird meist durch empirische Parameter quantifiziert. Diese Parameter überdecken beispielsweise für Radiocäsium mehrere Größenordnungen. Bisher gelang es bei vielen Radionukliden nicht, aus den Bodeneigenschaften oder durch Laborexperimente die Aufnahme des Radionuklids durch Wurzeln zu bestimmen. Für einige Radionuklide konnte gezeigt werden, dass ihre Wurzelaufnahme durch Konkurrenzprozesse mit Nährstoffen reguliert wurde. Diese Beobachtungen sollen für eine Quantifizierung weiterentwickelt werden.
- Wassergebundene Transportprozesse in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone spielen u. a. bei der Freigabe radioaktiver Stoffe, der Entlassung überwachungsbedürftiger Rückstände, der Bewertung radiologischer Altlasten und bei Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle eine Rolle. Hier stehen nur stark vereinfachende und möglicherweise extrem konservative Modelle zur Verfügung, die für realistische Prognosen weiterentwickelt werden müssen.

- Transport radioaktiver Stoffe in Oberflächengewässern: Hier sind die Kenntnisse hinsichtlich der Anlagerung von Radionukliden an Schwebstoffe und der Mobilisierung aus dem Sediment bei vielen Radionukliden noch lückenhaft und sollten daher weiterentwickelt werden.
- Untersuchung und Modellierung der Größen „Unsicherheit/Variabilität“ anhand exemplarischer Datensätze, z.B. zu Hirschtrüffeln/Wildschweinen. Ziel dieser Arbeiten ist, die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen statistischen Methoden zur Trennung beider Größen in radioökologischen Datensätzen zu untersuchen.
- Erarbeitung eines Konzeptes für den Schutz der Umwelt, das kompatibel ist mit den Schutzziele und -konzepten, die für konventionelle Schadstoffe für den Schutz der Umwelt national und international Anwendung finden. Ein solches Konzept muss auch in der Lage sein, die integralen Wirkungen vieler einzelner Radionuklideinträge unter Berücksichtigung akkumulierender Langzeiteffekte adäquat zu erfassen.

#### I.7.2 Freigabe

Ziel ist die Weiterentwicklung radioökologischer Modelle bei der Freigabe und sich daraus ergebende neue Freigabekriterien, beispielsweise Untersuchung der Dynamik aus Bauschutt freigesetzter künstlicher Radionuklide unter Berücksichtigung ihrer Speziation. Bisherigen Freigabewerten liegen u. a. Szenarien zugrunde, bei denen Radionuklide aus zur Beseitigung oder Wiederverwertung freigegebenen Stoffen in das Grundwasser ausgetragen werden. Die Sickerwasserkonzentrationen wurden bislang anhand von Parametern errechnet, die im Wesentlichen für Böden bestimmt wurden und mehrere Größenordnungen überdecken.

Bei der Festlegung neuer Freigabekriterien stellt sich weiterhin die Frage nach der Harmonisierung und Vereinfachung des Tabellenwerks zur Freigabe. Dabei sind internationale Entwicklungen im Bereich der Freigabe- und Freigrenzenregelungen (EU, IAEA) ebenso wie künftige denkbare Expositionen durch Nachbetriebsszenarien unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit zu berücksichtigen.

Zum bundeseinheitlichen Vollzug der Freigabe werden Anforderungen an die Qualitätssicherung bei Freigabemessungen benötigt. Darüber hinaus existieren noch keine Anforderungen an die Durchführung von Einzelfallnachweisen für die Freigabe zur Beseitigung nach § 29 StrlSchV. Diese Instrumentarien dienen Behörden, Betreibern und Gutachtern bei der Durchführung der Freigabeverfahren.

Forschungsschwerpunkte werden gesehen in:

- Der Weiterentwicklung von Modellen des Sickerwasserpfades unter Berücksichtigung international anerkannter Modelle (RESRAD, Hydrus) / Vergleich mit existierenden Ansätzen (IAEA, EU), u. a. unter dem Aspekt einer möglichen Harmonisierung und Vereinfachung des deutschen Regelwerks;
- Der Durchführung von Untersuchungen zu den abdeckenden Eigenschaften der derzeitigen Modelle zur Herleitung der Freigabewerte für künftige denkbare Expositionen durch Nachbetriebsszenarien (Nutzung, Erosion, Änderungen der Integrität der Abdichtungen);
- Der Entwicklung von Verfahren zur Identifizierung von Radionukliden in freizumessenden Abfallgebinden mit hinsichtlich Höhe und Lokalisierung extrem inhomogener Aktivitätsverteilung.

### I.7.3 Radioökologische Modelle für Langzeit-Konsequenzenanalysen der Endlagerung

Der Langzeitsicherheitsnachweis für Endlager für radioaktive Abfälle erfordert Modellrechnungen zum Radionuklidtransport und zur Ermittlung potentieller Strahlenexpositionen, wenn die Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlagerbereich nicht ausgeschlossen werden kann.

Dem international fortgeschriebenen Stand von Wissenschaft und Technik folgend, beabsichtigt das BMU neue „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ zu veröffentlichen. Für den Langzeitsicherheitsnachweis sind dann „für alle Entwicklungen, die nicht ausgeschlossen werden können, ... auf der Basis von Referenzbiosphärenmodellen für den Nachweiszeitraum Berechnungen zur Einhaltung der ... genannten Schutzkriterien für die Beurteilung des Schutzes von Mensch und Umwelt durchzuführen“. Die heutigen oberflächennahen Verhältnisse können jedoch allenfalls für Zeiträume in der Größenordnung von 10.000 Jahren als stabil angenommen werden. „Insofern müssen angelehnt an die heute vorkommenden Lebensweisen des Menschen und die möglichen Verhältnisse an der Oberfläche Modellvorstellungen zum Ökosystem entwickelt werden. Für die Ermittlung von Strahlenexpositionen zum Nachweis der Langzeitsicherheit sind stilisierte Ökosysteme zugrunde zu legen, die die aus heutiger Sicht wesentlichen potentiellen Expositionspfade und möglichen Klimaveränderungen berücksichtigen („reference biosphere“) und die zu einer möglichst wirklichkeitsnahen Einschätzung der Strahlenexposition führen.“ (Anm.: Hinsichtlich der Berücksichtigung von Szenarien

der Klimaveränderungen für die Führung des Langzeitsicherheitsnachweises siehe auch Kap. II.1.3)

In den bisher in Deutschland durchgeführten Sicherheitsanalysen wurden potentielle Dosisbeiträge für Referenzpersonen durch kontaminiertes Grundwasser weitestgehend analog zur Berechnung der potentiellen Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe während des Betriebes von kerntechnischen Anlagen ermittelt. Dies ist zumindest in Teilen sachlich nicht gerechtfertigt. Daher sollte eine Weiterentwicklung bzw. Anpassung an die spezifischen Bedingungen bei der Endlagerung erfolgen.

## **I.8 Emissions- und Immissionsüberwachung**

### **I.8.1 Emissionsüberwachung**

Die Entwicklung, Verbesserung und Beurteilung von Probeentnahmeverfahren für luftgetragene radioaktive Stoffe ist eine originäre Aufgabe der Leitstelle Fortluft. Von der Leitstelle Fortluft wurden bereits eine Reihe von Verfahren zur Probeentnahme gasförmiger radioaktiver Stoffe wie Edelgasen, Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf und Iodverbindungen entwickelt. Zudem wurden umfangreiche Untersuchungen über eine repräsentative Probeentnahme von radioaktiven Schwebstoffen durchgeführt und Verfahren zur Bestimmung von Rohrfaktoren und Gesamtverlustfaktoren entwickelt.

Die Schwerpunkte in diesem Aufgabenbereich stellen die einheitliche und repräsentative Bestimmung der Aktivitätskonzentrationen und Aktivitätsableitungen, die Überprüfung und Weiterentwicklung der Güte der Probeentnahmesonden beim Normal- bzw. Störfallbetrieb und beim Rückbau, die Ermittlung der Nuklidvektoren bei den unterschiedlichen Betriebszuständen und die Aktualisierung und Weiterentwicklung der Normen zur Probeentnahme luftgetragener radioaktiver Stoffe dar.

Des Weiteren ist es essentiell, die Berechnung der Strahlenexposition anhand der abgeleiteten Radionuklide im Umfeld von kerntechnischen Anlagen und nuklearmedizinischen Einrichtungen auf dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik durchzuführen. Seit dem Jahr 2007 kann das Lagrange-Modell ARTM (**A**tmosphärisches **R**adionuklid **T**ransport **M**odell) zur Berechnung der Ausbreitung von Radionukliden in der Atmosphäre beim bestimmungsgemäßen Betrieb von Kernkraftwerken eingesetzt werden. Es basiert auf dem in der TA Luft festgelegten Programm AUSTAL2000, was eine Umsetzung der VDI-Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 darstellt. Dieses Modell kann auch ungleichmäßige Ableitungen im Rahmen der zur Verfügung stehenden Emissionsdaten (zeitliche Auflösung), nasse Deposition, sowie Gebäude

und Orografie in physikalisch „realistischerer“ Form berücksichtigen. Bisher wurden diese Bereiche unter Anwendung des Gaußmodells vorwiegend einfach parametrisiert.

Für die Anwendung des Programms ARTM stehen jedoch keine Erfahrungswerte zur Verfügung, insbesondere für die Pfade Gammasubmersion, Gammabodenstrahlung, die nasse Deposition und den Gebäude- und Orografieeinfluss. Hier sind umfangreiche Vergleiche mit bisher verwendeten Modellen erforderlich und Betrachtungen zum Einfluss ungleichmäßiger Ableitungen (z. B. von Edelgasen). Da das Modell ARTM mittelfristig die nicht mehr zeitgemäßen Berechnungsverfahren (Gaußmodell) in den Genehmigungsberechnungsgrundlagen der StrlSchV ersetzen soll, bzw. alternativ verwendet werden kann, ist eine Sensitivitätsstudie der einzelnen Parameter für die realistische Berechnung der Strahlenexposition mit dem Modell ARTM notwendig. Das Programm bedarf ferner der Weiterentwicklung (z. B. Einbeziehung von Kühltürmen, Einbindung prognostischer Wetterstatistiken), der Entwicklung eines Dosismoduls und der Validierung durch Vergleich der Modellierungsergebnisse mit Messungen von Edelgasen (z. B.  $^{85}\text{Kr}$ ) bzw.  $^{14}\text{C}$  in verschiedenen Entfernungen von ausgewählten kerntechnischen Anlagen bzw. Wiederaufbereitungsanlagen bei unterschiedlichen meteorologischen Gegebenheiten.

#### I.8.2 Immissionsüberwachung mit mobilen Messsystemen

Zukünftiger Schwerpunkt der Arbeiten im Bereich mobiler Messsysteme ist die Prüfung der Möglichkeiten zur Qualifizierung der vorhandenen Methoden für komplexere messtechnische Fragestellungen. Dazu zählen Bestimmung von Geometriefaktoren für verschiedene Quellgeometrien (Überflug von Kuppen, Flug entlang von Hanglagen, Flug durch Taleinschnitte) anhand realer topographischer Daten (automatisch Geländedaten einlesen und Geometriefaktoren berechnen), die Berücksichtigung von Einflüssen der Bodennutzung auf die Messresultate (Wiese, Acker, Wald – wie sensitiv beeinflussen diese Faktoren das Messergebnis?) oder von störenden Beiträgen anderer Radionuklide aus dem Luftvolumen – hauptsächlich für die Radon-Tochternuklide und der in die Luft abgeleiteten Radionuklide nach einem kerntechnischen Unfall. Ferner ist es für das schnelle Auffinden radioaktiver Quellen sinnvoll, Möglichkeiten und Grenzen der Ermittlung von Lage und Geometrie radioaktiver Quellen zu prüfen. Einen weiteren Schwerpunkt künftiger Entwicklungsarbeiten wird die Interpolation der Messergebnisse in bestimmten Flächenbereichen zur Verbesserung der Aussagegenauigkeit darstellen.

## **I.9 Nuklearer Notfallschutz und Nuklearspezifische Gefahrenabwehr**

Aufgabe des Notfallschutzes ist es, bei unfallbedingten Kontaminationen der Umwelt die Lage schnell und zuverlässig zu erfassen, die notwendigen fachlichen Empfehlungen zu erarbeiten und die gebotenen Maßnahmen zu ergreifen. Im Bereich der Nuklearspezifischen Gefahrenabwehr stellt sich die zusätzliche Aufgabe der Prävention vor einer Freisetzung radioaktiver Stoffe, insbesondere durch die Detektion und nuklidspezifische Analyse von Strahlenquellen.

Aufgrund dieser Anforderungen muss die mittel- und langfristige Weiterentwicklung von Notfallschutzsystemen darauf zielen, die Datenermittlung und -auswertung schneller, genauer und zuverlässiger zu gestalten, auch auf dem Gebiet der möglichen Inkorporation von radioaktiven Stoffen. Wegen der durch den Reaktorunfall von Tschernobyl 1986 verdeutlichten internationalen Dimension kerntechnischer Unfälle führt dieses Ziel z.B. zu der Notwendigkeit, das national in Deutschland entwickelte und betriebene Integrierte Mess- und Informationssystem IMIS sowie Teile davon international zu vernetzen. Über diesen Aspekt hinaus sind die Methoden zur Bewältigung von radiologischen Notfallsituationen fortzuentwickeln und einheitliche Konzepte für die Aus- bzw. Weiterbildung des ärztlichen sowie nicht-ärztlichen Personals für die frühe Phase nach einem Strahlenunfall zu entwickeln und zu erproben.

Für die Nuklearspezifische Gefahrenabwehr hat die Auswertung der Erkenntnisse aus dem  $^{210}\text{Po}$ -Einsatz des BfS im Dezember 2006 ergeben, dass in Deutschland für eine Reihe von Radionukliden Schwachstellen bzgl. der Detektion von speziellen Kontaminationen, der Dosisermittlung, der Erstbehandlung und der definitiven medizinischen Versorgung bestehen, die dringend beseitigt werden müssen.

Aus dieser Zielstellung lassen sich folgende wesentliche mittel- bis langfristige Felder bestimmen, auf denen Weiterentwicklungen erforderlich sind:

- Entwicklung und Nutzung neuer Technologien,
- Kommunikationsstrategien zur Information der Öffentlichkeit,
- Verbesserung der radiologischen Modellaussagen,
- Bewältigung eines Notfalls,
- Nuklearspezifische Gefahrenabwehr,
- Radiologische Notfallvorsorge bei innerer Exposition,
- Medizinisches Strahlenunfallmanagement im Rahmen der Erstversorgung.

Die offenen Fragen im Bereich Nuklearer Notfallschutz in den kommenden Jahren lassen sich zu folgenden Themenbereichen zusammenfassen:

### I.9.1 Entwicklung und Nutzung neuer Technologien

Dem BfS stehen verschiedene analytische Verfahren zur Verfügung, um im Falle einer massiven Freisetzung radioaktiver Stoffe Ortsdosisleistung, Nuklidspektrum und Konzentrationen der abgelagerten Stoffe zeitnah zu ermitteln. Diese Messungen sind derzeit zeit- und personalintensiv. Daher ist es erforderlich, die Entwicklung neuer Materialien für Halbleiterdetektoren auf ihr Potential zum Einsatz für diese Messaufgaben zu evaluieren. Zurzeit wird im Rahmen eines Forschungsvorhabens ein spektroskopischer Raumtemperatur-Halbleiterdetektor auf Cadmium-Zink-Tellurid-Basis entwickelt, der langfristig unter den Bedingungen des Routinebetriebs im ODL-Messnetz des BfS einsetzbar sein sollte. Parallel wird ein kommerzieller Lantan-Bromid-Szintillationsdetektor getestet. Auf der Basis der Resultate beider Projekte wird über die weitere Notwendigkeit zusätzlicher Entwicklungsarbeiten zu entscheiden sein.

Analog ist es für die Nuklearspezifische Gefahrenabwehr erforderlich, die existierenden analytischen Verfahren zur Detektion spezieller Radionuklide unter spezifischen Fragestellungen – insbesondere der potentiellen Verwendung gezielter Abschirmungen – weiterzuentwickeln.

### I.9.2 Kommunikationsstrategien zur Information der Öffentlichkeit

- Die Bewältigung eines Notfalls, insbesondere die Entscheidung über Maßnahmen, hängt entscheidend von den verfügbaren Informationen ab. Widersprüchlichkeiten müssen vermieden werden. Um dies zu erreichen, müssen Informationen zusammengeführt und die Entscheidungsfindung harmonisiert werden. Derzeit wird bei der EU das Informationssystem „Web-ECURIE“, der Nachfolger des ECURIE-Systems zur Schnellinformation europäischer Staaten bei unfallbedingter Freisetzung von Radionukliden, entwickelt. Eine besondere Rolle spielt hier der erstmalige Einsatz von Web-Services. Das deutsche Informationssystem ELAN, das als eine nationale Schnittstelle zu ECURIE dienen soll, muss daher weiterentwickelt werden, um diese Technik ebenfalls einsetzen zu können.
- In einem Ereignisfall ist das Vertrauen der Öffentlichkeit in die behördlichen Informationen von großer Bedeutung. Die Erfahrungen der Vergangenheit haben gezeigt, dass dazu neben der fachlichen Prägnanz der Informationen Aspekte wie das Kommunikationsverhalten oder die Erwartungen der Öffentlichkeit von hoher Bedeutung sind. Solche Faktoren sollen in einer zu entwickeln-

den Kommunikationsstrategie Berücksichtigung finden. Diese muss gleichermaßen und fachlich konsistent auf Ereignisse im Bereich der Nuklearspezifischen Gefahrenabwehr anwendbar sein.

### I.9.3 Verbesserung der radiologischen Modellaussagen

Die radiologischen Modellaussagen sind insbesondere in der Frühphase mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Um diese zu reduzieren, müssen im Wesentlichen drei Ziele verfolgt werden:

- Es sind Computermodelle (weiter) zu entwickeln, mit denen die Quellstärke zuverlässiger abgeschätzt werden kann.
- Im Rahmen des EU-Forschungsprojekts EURANOS werden derzeit Verfahren entwickelt, um die radiologischen Modellaussagen durch die Assimilation an Messergebnisse zu verbessern. Nach Abschluss dieses Projekts Mitte 2009 wird zu prüfen sein, welcher Entwicklungsbedarf national und international noch besteht.
- Die atmosphärischen Ausbreitungsberechnungen sind durch Weiterentwicklung der Simulationsmodelle und durch genauere Kenntnis der erforderlichen Parameterwerte zu verbessern. Die in den letzten Jahren neu entwickelten fortgeschrittenen Ausbreitungsmodelle sind zu validieren. Vergleichende Analysen der Modelle sind erforderlich um festzulegen, welches der Modelle zur Simulation der atmosphärischen Ausbreitung in den Entscheidungshilfesystemen zukünftig eingesetzt werden soll.

### I.9.4 Bewältigung eines Notfalls

Im Falle einer nuklearen Notfallsituation stehen die verantwortlichen Behörden vor einer Vielzahl von Aufgaben und Entscheidungsnotwendigkeiten. In folgenden Bereichen sind dabei Hilfen zur weiteren Unterstützung zu entwickeln:

- Deutschland ist internationale Verpflichtungen zur schnellen Meldung nuklearer Notfallsituationen eingegangen. Die dazu erforderlichen Detailinformationen sollen auf elektronischem Wege schnellstmöglich und vollständig zusammengestellt und national und international weitergeleitet werden. Ein entsprechendes Ressortforschungsvorhaben wird derzeit bearbeitet. Einbindung in das IMIS-Informationssystem (ELAN) und Überführung der Entwicklung in die Praxis stellen zukünftige Aufgaben dar.

- Maßnahmen oder Empfehlungen, die in einem Ereignisfall ergriffen bzw. ausgesprochen werden, haben meist unmittelbare Konsequenzen auf andere Aktivitäten des Alltags. Es ist Aufgabe, solche sekundären Auswirkungen (beispielsweise die Behandlung radioaktiv kontaminierter Abfälle im landwirtschaftlichen Bereich) systematisch zu analysieren und Vorschläge für gegebenenfalls erforderliche gesetzliche Regelungen zu erarbeiten.
- Schon der Reaktorunfall von Tschernobyl hat die Notwendigkeit der Entwicklung eines Konzepts für ein grenzüberschreitendes Notfallschutzmanagement erstmals aufgezeigt, ohne dass dies bisher verwirklicht worden wäre. Ein solches Konzept muss Vorschläge für eine Vereinheitlichung der unterschiedlichen Eingreifrichtwerte, der Verfahren zur Ermittlung der radiologischen Lage sowie der Kataloge der jeweils lagebedingt zu ergreifenden Maßnahmen als wesentliche Bestandteile enthalten.

#### I.9.5 Nuklearspezifische Gefahrenabwehr

Die unter I.8.1 bis I.8.4 aufgeführten Fragestellungen sind auch in Situationen der Nuklearspezifischen Gefahrenabwehr bedeutsam. Die zu findenden Antworten müssen auf diesem Feld aber zusätzlich den Besonderheiten der Situation Rechnung tragen, die sich aus der stark erhöhten Eilbedürftigkeit von Gegenmaßnahmen ergeben. Es ist daher eine Vielzahl von Fragestellungen des allgemeinen Notfallschutzes im Hinblick auf diesen Umstand zu beleuchten.

#### I.9.6 Radiologische Notfallvorsorge bei innerer Exposition

Für radiologische Notfälle, in denen eine Inkorporation nicht auszuschließen ist, sind in der Leitstelle Inkorporationsüberwachung des BfS und in den behördlich bestimmten Messstellen geeignete Schnellmethoden vorzuhalten bzw. zu entwickeln, da das Augenmerk bei der beruflichen Inkorporationsüberwachung auf den Nachweis sehr geringer Inkorporationen gelegt wird. Vor allem bei den Ganz- und Teilkörpermessverfahren ergeben sich Probleme bei hohen oder sehr hohen Körperaktivitäten (etwa ab 0,5 MBq), da die Detektoren sowie die zugehörige Elektronik dafür nicht ausgelegt sind. Daher müssen kurzfristig geeignete Alternativverfahren (z.B. die Nutzung von Gammakameras) oder Schnellmethoden ermittelt und bereit gestellt werden, um auf einen radiologischen Notfall mit Inkorporationsrisiko vorbereitet zu sein. Zusätzlich sollte im Rahmen eines Netzwerkes die Unterstützung durch Messstellen im benach-

barten Ausland gefördert werden, um in einem radiologischen Notfall auf höhere Messkapazitäten zurückgreifen zu können.

Zur Bewertung von Inkorporationsmessergebnissen bei Notfallsituationen ist die Kenntnis von Referenz- bzw. Normalwerten wie zum Beispiel der natürlich bedingte Gehalt von  $^{210}\text{Po}$  Voraussetzung. Dies trifft für eine Reihe von Radionukliden zu. Diesbezügliche Forschungsvorhaben müssen kurzfristig begonnen werden. Die Erarbeitung von Empfehlungen oder von Leitfäden zum Themenkreis notfallbedingter Inkorporationen ist dagegen als langfristige Aufgabe zu betrachten.

#### I.9.7 Medizinisches Strahlenunfallmanagement im Rahmen der Erstversorgung

In einem Ereignisfall kommt dem medizinischen Strahlenunfallmanagement im Rahmen der Erstversorgung eine zentrale Bedeutung zu, da hier die zentralen Weichenstellungen für die weitere Versorgung der betroffenen Teile der Bevölkerung sowie der Einsatzkräfte erfolgen. Ziel ist es, für die Erstversorgung in der frühen Phase nach einem Strahlenunfall (auch größeren Ausmaßes) einheitliche Konzepte für die Aus- bzw. Weiterbildung des ärztlichen sowie nicht-ärztlichen Personals zu entwickeln, entsprechende Kursunterlagen zu erarbeiten und in Form von Trainingskursen praktisch zu erproben. Die Kursunterlagen müssen insbesondere auch auf Fragen der Dekontamination und Dekorporation eingehen. In Anbetracht der Möglichkeit von Ereignissen mit radiologisch relevanten Auswirkungen und der erheblichen Unterschiede bzw. Defizite in den Strahlenschutzkenntnissen von Einsatzkräften ist eine kurzfristige Umsetzung der diesbezüglichen Ressortforschungsvorhaben unverzichtbar.

Im Rahmen eines Technical Meetings der Working-Group „*Radiological and Nuclear Threat*“ bei dem *Global Health Security Initiative* (GHSI)-Treffen in Washington (vom 29. bis 31.10.2007) fand dieses Konzept breite Zustimmung und wurde als ein zentraler Punkt in das Kommunique übernommen, wobei Deutschland als federführend für die Umsetzung dieses Punktes benannt wurde.

Hinsichtlich der im Rahmen der Ressortforschung vorgesehenen Forschungsvorhaben sind Überschneidungen mit dem Kompetenzverbund Strahlenforschung (Förderung durch BMBF und BMU) nicht zu erwarten, da im gegenseitigen Einvernehmen festgelegt wurde, dass Vorhaben im Rahmen des „Nuklearen Notfallschutzes“ nicht durch den Kompetenzverbund Strahlenforschung, sondern im Rahmen der Ressortforschung finanziert werden sollen.

## **I.10 Spurenanalytik**

Die atmosphärische Spurenanalytik, die das Bundesamt für Strahlenschutz in seiner Messstation am Schauinsland konzentriert hat, dient zwei wesentlichen Aufgabenstellungen. Zum einen bietet sie die Möglichkeit, bei erhöhten Freisetzungen im Ausland sehr früh schon geringe Aktivitäten, die mit entsprechenden Luftströmungen nach Süddeutschland verfrachtet werden, zu detektieren und ermöglicht dadurch, erforderlichenfalls schon frühzeitig Maßnahmen des Notfallschutzes vorzubereiten. Zum anderen ist sie in das globale Messnetz zur Überwachung des Atomwaffen-Teststoppabkommens CTBT eingebunden.

Aus dieser Einbindung in das Verifikationsregime des Atomwaffen-Teststoppabkommens resultieren die in den nächsten Jahren zu bearbeitenden Forschungsfragen:

### **I.10.1 Kr-85 Messungen**

Seit 2006 scheint die atmosphärische Aktivitätskonzentration von Kr-85 nicht mehr zuzunehmen, sondern konstant zu bleiben. Durch kontinuierliche Messungen sollen Langzeittrends weiter untersucht und mit Hilfe von Emissionsdaten bekannter Wiederaufarbeitungsanlagen erklärt werden.

In Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Naturwissenschaften und Friedensforschung der Universität Hamburg und dem Meteorologischen Institut des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, Hamburg, soll der globale Kr-85 Untergrundpegel anhand bekannter Emissionsdaten simuliert werden, um Kr-85 aus der militärischen Wiederaufarbeitung besser verifizieren zu können. Neben der Nutzung dieser Ergebnisse für Verifikationszwecke (IAEA, safe guards, environmental monitoring) sollen mit diesem Modell Studien zur Optimierung eines globalen Messnetzes durchgeführt werden.

### **I.10.2 Messung von Ar-37 und Radioxenon**

Der gleichzeitige Nachweis erhöhter Radioxenonwerte und erhöhter Ar-37 Aktivitätskonzentrationen in der gleichen Luftprobe wäre der ideale Nachweis für einen Kernwaffentest. Allerdings ist Ar-37 nur mit sehr großem Messaufwand nachzuweisen, was von den automatischen Messstationen der CTBTO und der Spurenanalytik des BfS nicht geleistet werden kann. Es wird daher gemeinsam mit der Universität Bern die Möglichkeit untersucht, Ar-37 in den Kr-85 Proben der Sammelstationen des BfS nachzuweisen.

### I.10.3 Quellenidentifizierung von Radioxenon

Zum besseren Nachweis der Nuklid-Zusammensetzung des Xenons in Luftproben soll in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Naturwissenschaften und Friedensforschung der Universität Hamburg und Health Canada ein beta-gamma Koinzidenzsystem aufgebaut werden. Dieses System wird die Durchführung verbesserter Studien über die Emissionen und Ausbreitung von Xenon-Isotopen erlauben. Ergänzt werden sollen die Untersuchungen durch Simulationen der Xenon-Isotopenvektoren verschiedener potentieller Emittenten, die mit Hilfe neutronenphysikalischer Abbrandberechnungen durchgeführt werden. Die Ergebnisse werden zu einem präziseren Kategorisierungsschema zur Unterscheidung ziviler Xenonquellen von Kernwaffenversuchen beitragen.

### **I.11 Vorbereitung der Gesetzgebung**

Die Ergebnisse der in den Kapiteln I.1 bis I.10 dargelegten naturwissenschaftlichen, medizinischen und technischen Forschungsfelder sind im Rahmen der Aufgabenerfüllung des BMU in der Weiterentwicklung der Rechtssetzung sowie der Gewährleistung des bundeseinheitlichen Vollzuges umzusetzen. Im Rahmen der Gesetzesvorbereitung sind neben rechtswissenschaftlichen Fragen gemäß der Gemeinsamen Geschäftsordnung (GGO) eine Abschätzung der Technikfolgen, eine Genderprüfung sowie die Prüfung von Kostenwirkungen einschließlich einer Prüfung nach dem Standardkostenmodell erforderlich. Es ist geboten, die in der GGO enthaltenen Vorgaben wissenschaftlich fundierten Lösungen zuzuführen.

## **II Teilbereich Entsorgung radioaktiver Abfälle**

Das BfS erteilt für die Beförderung radioaktiver Stoffe nach Prüfung des Vorliegens der nach Stand von Wissenschaft und Technik erforderlichen Voraussetzungen die Transportgenehmigungen und ist Genehmigungsbehörde für die Errichtung von Zwischenlagern für abgebrannte Brennelemente. Auf dem Gebiet der Entsorgung radioaktiver Abfälle sind dem BfS die Errichtung und der Betrieb von Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle gesetzlich übertragen. Die Wahrnehmung der Aufgaben erfordert den Einsatz von Forschung zur Lösung offener wissenschaftlicher Fragestellungen, um die atomrechtlich geforderte Schadensvorsorge nach Stand von Wissenschaft und Technik zu gewährleisten. Dabei werden die auftretenden wissenschaftlichen Fragestellungen identifiziert und in den zu untersuchenden Aspekten und bestehenden Schnittstellen beschrieben, damit sie im Rahmen von einzelnen Forschungsvorhaben extern von Dritten untersucht und einer Lösung zugeführt werden können. Die auf diese Weise erzielten Forschungsergebnisse finden Berücksichtigung bei der konkreten Aufgabenwahrnehmung.

Für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wird seit Mai 2007 das Endlager Konrad errichtet. Zur Endlagerung dieser Abfälle besteht kein grundlegender Forschungs- und Entwicklungsbedarf mehr. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass im Rahmen der Endlagerung dieser Abfälle noch Einzelfragen zu untersuchen sind. Der diesbezügliche Forschungs- und Entwicklungsbedarf ist dann anlagenspezifisch zu ermitteln und durch Einzelprojekte zu präzisieren.

Vor diesem Hintergrund ist das Forschungsprogramm des BfS im Teilbereich der Entsorgung radioaktiver Abfälle schwerpunktmäßig auf die Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen ausgerichtet. Generische Fragestellungen zur Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle treten gegenüber anlagen- und standortspezifischen Fragestellungen in den Hintergrund. Konkrete standortspezifische Fragestellungen können grundsätzlich erst mit Beginn einer Standortauswahl definiert werden. Daher konzentrieren sich nachfolgend genannte FuE-Vorhaben auf die Bereitstellung und Ergänzung des sicherheitsanalytischen Instrumentariums zum Nachweis der Sicherheit eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sowie auf die wirtsgesteinsunabhängige Untersuchung von wissenschaftlich-technischen Einzelaspekten.

Nachfolgend sind die Themenstellungen für FuE-Vorhaben für diesen Bereich zusammengestellt. In Abgrenzung zum Forschungsprogramm ist das Förderkonzept des BMWi „Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2007-2010) zu sehen, das auf die Förderung grundlagenbezogener Forschung ausgerichtet ist.

## II.1 Sicherheitsnachweise und Methodenentwicklungen

### II.1.1 Entwicklung von Methoden zur vergleichenden Bewertung von Sicherheitsanalysen für Endlagersysteme (VerSi)

Für den Vergleich von Endlagerstandorten ist eine Bewertung der Sicherheitsfunktionen für Standorte in unterschiedlichen geologischen Formationen von zentraler Bedeutung. Hierzu sind die Methoden für den Vergleich von Langzeitsicherheitsanalysen zu schaffen. Am Beispiel möglichst realitätsnaher Endlagersituationen soll versucht werden, eine Methodik für den Vergleich von Langzeitsicherheitsanalysen zu entwickeln. Ziel der Untersuchungen ist die Bereitstellung einer Vergleichsmethodik, nicht die Erarbeitung eines safety case, oder sogar der Vergleich von Standorten. Ein sicherheitstechnischer Vergleich kann nicht alleine aufgrund berechneter Dosis- oder Risikowerte als Folge einer Freisetzung von Schadstoffen aus dem Endlager vorgenommen werden, sondern wird immer ein Abwägungsprozess über ein umfangreiches System von Bewertungsgrößen sein. Zu betrachten ist das jeweilige Endlager-system, d.h. die Gesamtheit der technischen und natürlichen Barrieren in und um das Endlager bis zur Biosphäre. Dabei sind nicht nur die geowissenschaftlichen Eigenschaften der Endlagerstandorte einzubeziehen, sondern auch das Anlagenkonzept des Endlagers und die Möglichkeiten zur Realisierung eines zuverlässigen Verfüll- und Verschlusskonzeptes nach Einlagerung der radioaktiven Abfälle.

Ausgangspunkt für die Entwicklung einer Methodik zum Vergleich von Langzeitsicherheitsanalysen muss ein Bewertungskonzept mit entsprechend definierten Bewertungsgrößen und Bewertungsmaßstäben sein (z. B. für Langzeitstabilität von Barrieren oder Schutz von Mensch und Umwelt). Weitere wesentliche Elemente sind die Ermittlung von standortspezifischen Szenarien unter Berücksichtigung des Verschlusskonzeptes auf der Basis internationaler Arbeiten, die Definition bzw. Ermittlung der Auslegungsparameter, die Festlegung des Umgangs mit Unsicherheiten und die Festlegung des Umgangs mit den Bewertungsgrößen bei einem Vergleich von Endlagerstandorten.

Das Projekt „Vergleichende Sicherheitsanalysen“ (VerSi) mit einer Laufzeit bis 2010 deckt die ablaufenden Prozesse nach dem Verschluss des Endlagers ab. Für das Langzeitverhalten des Endlagers in der jeweiligen geologischen Formation sind Modellvorstellungen (konzeptionelle Modelle) zu entwickeln und zugehörige Rechenmodelle zu validieren. Unter der Berücksichtigung von Modellunsicherheiten und Unsicherheiten der Datensätze werden Berechnungen zum Langzeitverhalten des Endlagers durchgeführt. Nach Abschluss dieser Phase erfolgt eine Bewertung der Ergebnisse. Sollte es sich dabei zeigen, dass das entwickelte Instrumentarium im Prinzip

geeignet ist, unter den gegebenen Randbedingungen die Ergebnisse von Langzeitsicherheitsanalysen vergleichend zu bewerten, muss konsequenterweise die Methodenentwicklung erweitert werden. Hierzu ist zunächst ergänzend die Betriebsphase eines Endlagers zu berücksichtigen. Zusätzlich ist das Optimierungsgebot sowohl für die Betriebsphase als auch die Phase nach Verschluss des Endlagers zu betrachten.

#### II.1.2 Nachweisführung zum Isolationskonzept

Die Sicherheitskriterien für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in einem Bergwerk sind im Jahr 1983 festgelegt worden. Sie müssen dem Stand von Wissenschaft und Technik angepasst werden, wobei insbesondere internationalen Entwicklungen und Empfehlungen Rechnung zu tragen ist. Hierzu wurde ein Vorschlag zu Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen erarbeitet. Der Vorschlag legt den Schwerpunkt der Sicherheitsanforderungen auf den Nachweis der Isolation der hochradioaktiven (wärmeentwickelnden) Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich und argumentiert, dass dadurch die Schutzziele und Sicherheitsprinzipien inhärent eingehalten werden.

Der Vorschlag basiert auf dem neuen Ansatz, die Isolation der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle am Rande des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nachzuweisen. Hierfür wird eine Reihe von Indikatoren vorgeschlagen, über die der Nachweis geführt werden soll. Um mit dieser Vorgehensweise den Nachweis des sicheren Einschlusses der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle erbringen zu können, ist im Rahmen von FuE-Vorhaben zu klären, inwieweit mit den genannten oder weiteren Indikatoren der Nachweis der Isolation am Rande des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches tatsächlich geführt werden kann.

#### II.1.3 Klimaentwicklungen und deren Auswirkungen

Ein wesentlicher Bestandteil einer Sicherheitsanalyse für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle ist der Nachweis der Langzeitsicherheit. Für die Einschätzung der langfristigen Sicherheit eines Endlagers sind u. a. verschiedene Szenarien zur Klimaentwicklung von zentraler Bedeutung. Auch das Szenario einer Kaltzeit mit glazigener Beeinflussung eines Standortes gehört zu den wahrscheinlichen Prozessen. Szenarien für Kaltzeiten und deren Auswirkungen, z. B. periglaziale Bedingungen und Eisüberdeckung, müssen hierfür definiert und beurteilt werden. Es sind die Intensität von Klimaveränderungen, von normaler bis zu extremer Entwick-

lung, abzuschätzen sowie Angaben über Prognosezeiträume und Prognosesicherheiten zu erarbeiten.

So sind Untersuchungen zu den kaltzeitlichen Auswirkungen im Einflussbereich quartärzeitlicher Vergletscherungen erforderlich, die sich unter anderem mit dem Einfluss von Permafrost, dem tiefen Eindringen von glazialen Schmelzwässern, subglazialer Erosion oder auch neotektonischen Prozessen in Folge von isostatischen Veränderungen auf Endlager in den Wirtsgesteinen Salz und Tonstein befassen. Weiterhin ist die Relevanz verschiedener Klimabedingungen einschließlich ihrer Auswirkungen zu betrachten. (Anm.: Zur Berücksichtigung von Klimaveränderungen siehe auch Kap. I.7.3)

Die klimatischen Auswirkungen sind für die in Deutschland in Frage kommenden Wirtsgesteinstypen (Salz, Ton, Kristallin) und Regionen zu beschreiben und vergleichend zu bewerten. Hierbei ist ein Maß an Quantifizierung anzustreben, das Abschätzungen hinsichtlich der Tiefenauswirkung klimatischer und neotektonischer Einflüsse zulässt, um Einwirkungen auf die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wirtsgesteinsabhängig ableiten zu können.

#### II.1.4 Optimierung von Standorterkundungen

Unterschiedliche geologische und physikalische Eigenschaften deutscher Wirtsgesteine bedingen eine auf die Formation zugeschnittene Standorterkundung. Erkundungsprogramme für potenziell geeignete Standorte müssen so konzipiert sein, dass sie bei der Untersuchung von Wirtsgesteinsformationen in kürzestmöglicher Zeit für optimalen Informationsgewinn sorgen. Dies wurde in der Vergangenheit nicht immer eingehalten. Daher sind Suchstrategien und -formalisten – ggf. aus der Lagerstättenuche – bezüglich der Maximierung des Informationsgewinns und der Kostenüberwachung für die Barrieren-/Wirtsgesteinsformationserkundung für einen Standort zur Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle aufzustellen.

Insbesondere soll folgende Zielstellung verfolgt werden: Die Erkundungsstrategie soll sich auf den Nachweis der hydraulischen Integrität/Undurchlässigkeit des untersuchten Barriere-/ Wirtsgesteinsabschnitts beschränken. Anfallende Felddaten aus der geophysikalischen Oberflächen- und Bohrlochvermessung, aus der geologisch-geotechnischen Erkundung von über- und untertage sowie aus hydraulischen Analysen sollen nach einem Formalismus und objektivierbar in eine Konsequenzenbewertung eingehen. Auf neue in situ Befunde soll unmittelbar reagiert werden können, indem die Erkundung bei Bedarf begründbar und nachvollziehbar unter Berücksichtigung neuer Erkenntnisse angepasst und fortgeführt wird. Dies erfordert Vorarbeiten

theoretischer Art, evtl. das Nachempfinden einer bereits durchgeführten Erkundung und zu einem späteren Zeitpunkt die Zusammenarbeit mit Prospektionsfirmen.

#### II.1.5 Monitoring (Überwachung) eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen während der Betriebs- und frühen Nachbetriebsphase

Monitoring in der Betriebs- und frühen Nachbetriebsphase eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen wird als vertrauensbildende Maßnahme erachtet und international diskutiert. Aufgrund der mit der Endlagerung verbundenen Wartungsfreiheit und einer selbst im Störfall extrem verzögerten potenziellen Radionuklidfreisetzung sind direkte Messungen/Nachweise nicht möglich. Aus diesem Grunde sind strategische Überlegungen hinsichtlich möglicher Beobachtungsgrößen und damit verbundener Nachweis- und Messverfahren anzustellen.

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens besteht darin, geeignete Methoden zu benennen und zu entwickeln, mit denen sich allmähliche Änderungen des Grundwasserspiegels (welche nicht auf natürliche Vorgänge wie saisonale Schwankungen oder Klimaänderung zurückzuführen sind) im obersten Deckgebirge des Endlagerbergwerks nachweisen lassen.

Es soll u. a. geprüft werden, ob lagerstättengeophysikalische Erfahrungen mit engmaschigen gravimetrischen Meßmethoden auf die Überwachung des oberflächennahen Endlagerdeckgebirges übertragen werden können. Das Ziel besteht in der Aufstellung und Ortung zeitlicher Änderungen in der Grundwassermassenbilanz dieses Gebirgsbereichs durch hinreichend oft wiederholte gravimetrische Messungen.

#### II.1.6 Weiterentwicklung des Safety-Case-Gedankens

Ein Safety Case ist gemäß der OECD/NEA-Safety-Case-Broschüre „the synthesis of evidence, analyses and arguments that quantify and substantiate a claim that the repository will be safe after closure and beyond the time when active control of the facility can be relied on“. Im Deutschen wird dafür der Begriff Langzeitsicherheitsnachweis verwendet. Ein solcher Sicherheitsnachweis fasst also alle Hinweise, Analysen und Argumente zusammen, die belegen, dass ein Endlager nach seinem Verschluss und nach Beendigung der aktiven Kontrolle sicher ist. Der Langzeitsicherheitsnachweis entwickelt sich mit dem Projektfortschritt und wird zunehmend umfassender und detaillierter. Er liefert einen wichtigen Beitrag zur Entscheidungsfindung über den Fortgang des Projekts.

Vor dem Hintergrund des internationalen Standes zeigt sich, dass Aspekte der Sicherheitsstrategie, des Zusammenhangs zwischen Endlagerauslegung, Endlagererrichtung, Betriebsphase und Phase nach Verschluss des Endlagers sowie der Vertrauensbildung weiterer intensiver Untersuchungen bedürfen. Daher ist der Forschungsschwerpunkt auf die folgenden Zielstellungen ausgerichtet:

- Weiterentwicklung des Safety-Case-Gedankens z.B. bezüglich der Einführung und Verwendung von Sicherheitsfunktionen im Nachweiskonzept, der konsequenten Anwendung von Qualitätssicherungsverfahren und der Behandlung von Unsicherheiten bei der Beschreibung der Geosphäre.
- Intensivierung der Behandlung des Zusammenhangs zwischen Endlagerauslegung, Endlagererrichtung, Betriebsphase und Phase nach Verschluss des Endlagers z.B. durch die Entwicklung von Verfahren zur Verfolgung der Herleitung von Anforderungen an die Komponenten des Endlagersystems (Requirements Management Systeme) und von Verfahren zum Wissenserhalt (Knowledge Management Systeme).

Ein zweites Ziel der Forschungsaktivitäten zum Safety Case ist es, herauszuarbeiten, wie der Gedanke des Safety Case für deutsche Verhältnisse umgesetzt werden kann und welche Anforderungen aus dem Safety-Case-Gedanken an den Langzeitsicherheitsnachweis resultieren. Es soll für deutsche Verhältnisse klargestellt werden, welche Aspekte des Safety-Case-Gedankens in einem Langzeitsicherheitsnachweis enthalten sein müssen. Insbesondere sollen für deutsche Verhältnisse Inhalt und Umfang eines Safety Case definiert und der Frage nachgegangen werden, welche Stellung bzw. welchen Stellenwert der Safety Case im Planfeststellungsverfahren hat und was er leisten kann.

Das BfS-Qualitätsmanagementsystem stellt einen Rahmen für die Qualitätssicherung dar. Im Rahmen der Erstellung eines Safety Cases bedarf es jedoch tiefer greifender Qualitätssicherungsmaßnahmen. Es muss sichergestellt sein,

- dass alle Daten systematisch und mit Hilfe gut definierter Verfahren gewonnen und korrekt weiterverwendet werden,
- dass das wissenschaftlich-technische Verständnis in den Analysen korrekt und mit Hilfe klarer Vorgaben angewendet wird,
- dass unabhängige und ggf. auch externe Reviews der verwendeten Daten und der benutzten Argumente erfolgen und

- dass ein Prozess der systematischen Behandlung von Unsicherheiten bzgl. der verwendeten Daten und bezüglich des zugrunde gelegten Verständnisses des Endlagersystems eingehalten wird.

Ziel der Forschungsaktivitäten ist es, spezifische Qualitätsanforderungen sowie Prozesse und Vorgehensweisen, mit denen diese Anforderungen erfüllt werden können, zu entwickeln, zu testen, zu dokumentieren und zu implementieren

## **II.2 Technische Einzelaspekte der Endlagerung**

### **II.2.1 Untersuchungen zum Behälterkonzept**

Im Hinblick auf die aktuellen Diskussionen zu den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen kommt der vertieften Betrachtung von Behälterkonzepten eine zentrale Bedeutung zu.

Die bisher betrachteten Konzepte zu Abfallbehältern/Verpackungen sind in diesem Zusammenhang auf ihre Eigenschaften und Funktion als technische Barriere zu überprüfen. Hierbei sind insbesondere Untersuchungen zu Behälterstandzeiten in der Größenordnung von 500 Jahren und zur technischen Auslegung der Abfallbehälter/Verpackungen unter dem Gesichtspunkt der Integrität und/oder Stabilität (z.B. Korrosionsprozesse, Radiolysegasbildung, Gebirgsdruck) durchzuführen. Die Frage der technischen Behälterbarriere ist auch bezüglich des unbeabsichtigten und/oder beabsichtigten Eindringens in ein Endlager nach seinem Verschluss zu untersuchen und zu bewerten.

Es ist nicht auszuschließen, dass neben den bisher zur Verfügung stehenden Behältertypen zukünftig auch weitere Behältertypen bzw. Behälterkonzepte für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in die Untersuchungen mit einzubeziehen sind. Dabei sind auch die Handhabung und Beförderung unter- und übertage (einschließlich Schachttransport) und die jeweilige Einlagerungstechnik mit zu untersuchen.

Mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen werden behälter-/verpackungsspezifische Eingangsdaten für zukünftige standortspezifische Sicherheitsanalysen bereitgestellt, aus denen endgültige Anforderungen an die Behälter/Verpackungen für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle resultieren.

## II.2.2 Auswirkungen der Gasbildung im Endlager

In der Nachbetriebsphase eines Endlagers wird es insbesondere über die chemischen Reaktionen zwischen Feuchtigkeit und metallischen Komponenten sowie durch Radiolyse zur Gasentwicklung kommen. Diese kann nach Ausweis internationaler Studien im zeitlichen Verlauf zu einem Gasdruckanstieg führen, wobei mutmaßlich durch ein Gasfracereignis die Barrierenintegrität gefährdet sein könnte. Die RSK stellte hierzu 2005 einen dringenden Forschungsbedarf für Salzgestein hinsichtlich der experimentellen und modellmäßigen Absicherung fest, um belastbare Aussagen über Ablauf und Ausmaß der druckreduzierenden Mechanismen treffen zu können. Dies gilt in ähnlicher, wenngleich weniger dringlicher Weise, auch für Tonstein.

Im Laboratorium und in Bohrungen untertage wurde nachgewiesen, dass bei Druckaufbauten, wie sie im Endlager zu erwarten sind, ein induzierter Riss im Gebirge (frac) weder im Wirtsgesteinstyp Ton noch Salz zu besorgen ist. Die Abhängigkeit der im Salz relevanten Gastransportprozesse vom wirkenden Gasdruck wurde durch Laboratoriumsuntersuchungen und im Rahmen kleinmaßstäblicher Felduntersuchungen experimentell bestätigt, wobei die relevanten Phänomene dokumentiert und quantifiziert werden konnten. Mit Blick auf eine Modellbildung der dabei stattfindenden Gas-migrationsprozesse sind die erzielten Ergebnisse aber noch weiter zu unterlegen, wobei einerseits eine bessere Maßstäblichkeit zur realen Endlagersituation gegeben sein muss und andererseits die stattfindenden Gastransportprozesse physikalisch genauer aufgeklärt werden müssen. Aufgabe von künftigen Forschungsvorhaben muss außerdem sein, die Reichweite dieser Gasausbreitungsprozesse zur Bestimmung des zeitabhängigen Schadstoffaustrages für eine Bandbreite möglicher Quellterme prognostizieren zu können. Dafür sind weiterführende experimentelle Arbeiten erforderlich.

Ausgehend von den Erkenntnissen aus Forschungsvorhaben ergeben sich zur Absicherung der vorliegenden Ergebnisse drei mögliche Vorhabenschwerpunkte:

- Großversuch zu der sich zeitlich entwickelnden Gasdruckbelastung eines repräsentativen Hohlraumes im Salzgebirge
- Bestimmung der minimalen Gebirgsspannung im unverritzten Salzgebirge in der steilen Lagerung
- Pneumatische Gasfractests unter definierten Spannungsrandbedingungen in Bohrlöchern sowie modelltechnische Simulation von Barrierenintegrität unter statischen und dynamischen Belastungen (z. B. Erdbeben).

In Labor- und Felduntersuchungen sollen die Rahmenbedingungen für das Eintreten eines Gasfracs im Steinsalz untersucht werden. Dabei soll in den in situ Tests die Abhängigkeit der Frac-Entstehung von folgenden Faktoren abgeklärt werden:

- der Druckaufbaurrate,
- dem druckbeaufschlagten Gasvolumen,
- dem Einfluss eines anisotropen Spannungszustandes,
- dynamischen Belastungsbedingungen, wie sie bei einem Erdbeben eintreten können.

### II.2.3 Graphit im Endlager

Für die Endlagerung in einem HAW-Endlager sind u. a. rund 460 Castor-Behälter mit THTR/AVR-Brennelementen vorgesehen. Langfristig ist die direkte Endlagerung der Brennelemente geplant.

Das Verhalten von Graphit im Endlager beeinflusst die Langzeitsicherheit und sollte für unterschiedliche Wirtsgesteine detaillierter untersucht werden.

Detaillierte Kenntnisse über das Verhalten von Graphit unter Endlagerbedingungen bei direkter Endlagerung und besonders Kenntnisse über die Mobilisation von langlebigen Radionukliden ( $^{14}\text{C}$ ;  $^{36}\text{Cl}$ ) ist für die Betrachtung der Langzeitsicherheit erforderlich. Die Mobilität von Radionukliden in der Graphit-Matrix unter Endlagerbedingungen ist ebenso ein wichtiger Faktor wie die Wirkung von Graphit-Porenwasser. So ist das Vorhandensein von Graphit-Porenwasser zumeist der erste Schritt für Radionuklidfreisetzungen und sollte genau wie Korrosionsverhalten und Diffusion von Radionukliden in der Graphit-Matrix untersucht werden. Wichtige Parameter sind weiterhin die Auflösungsraten der Graphit-Matrix oder die Diffusions-/ Retentionseigenschaften der Radionuklide in porösem Graphit.

Um das Verhalten von Graphit unter Endlagerbedingungen umfassend zu betrachten, sind drei Themenbereiche zu berücksichtigen:

- Korrosion der Graphit-Matrix,
- Leaching (Auslaugungsverhalten),
- Konversion zu Gas.

### II.2.4 Aufbau einer dauerhaften endlagerbezogenen Datenbank

Bei fehlender oder verlorengegangener Kenntnis über die Existenz eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle besteht die Gefahr eines unbeabsichtigten

menschlichen Eindringens in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich eines geologischen Endlagersystems. Solange die Kenntnis über die Existenz des Endlagers vorhanden ist, werden Erkundungs- bzw. Auffahrungsmaßnahmen im Bereich des Endlagerstandortes behördlich nur dann zugelassen, wenn sie die Sicherheit eines abgeworfenen Endlagers nicht verletzen. In der Fachwelt besteht die Auffassung, dass das Wissen über Endlager mindestens 500 Jahre erhalten bleiben muss. Dies setzt allerdings den dauerhaften Erhalt des Wissens über die Existenz, über die genaue Lage und Ausmaße des Endlagers sowie über die für eine Sicherheitsbewertung des Endlagers relevanten Daten voraus.

Hierzu ist der Wissenserhalt über das verschlossene Endlager durch noch zu entwickelnde Maßnahmen zu gewährleisten und sicherzustellen, dass dieses Wissen um das Endlager einschließlich der für eine Gefährdungseinschätzung erforderlichen Endlagerdaten über einen hinreichend langen Zeitraum bei zukünftigen Aktivitäten am Standort verfügbar ist und berücksichtigt wird. Die Arbeiten sollen unter organisatorischen und technischen Gesichtspunkten Methoden und Möglichkeiten einer Langzeitdokumentation der sicherheitsrelevanten Endlagerdaten darstellen und bewerten.

Wenn eine solche Datenbank als institutionelles Gedächtnis angesehen wird, muss es – wie von der Arbeitsgruppe „Modernisierung des Bundesamtes für Strahlenschutz“ empfohlen – dort eingerichtet und gepflegt werden (d.h. mit ständigem Input versehen), wo die Informationen benötigt und abgerufen werden. Für das BfS bedeutet dies, dass insbesondere alle wesentlichen Ergebnisse und Entwicklungen zur Entsorgung/Endlagerung von radioaktiven Abfällen zentral im BfS gebündelt werden.

#### II.2.5 Methodikentwicklung zur Ermittlung der transportrelevanten Eigenschaften des Tonsteins im Dekameterbereich

Der AkEnd und die weiterentwickelten Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen gehen beim Langzeitsicherheitsnachweis von der Zielvorgabe von einer Million Jahre für die Wirksamkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aus. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist der Teil der geologischen Barriere, der bei wahrscheinlicher Entwicklung des Endlagersystems für den Isolationszeitraum den Einschluss der Abfälle sicherstellen muss. Im Rahmen des Forschungsvorhabens "Charakterisierung von Barrierenwirksamkeiten im Mehrbarrierensystem für Endlager" ist dargelegt worden, wie kleinräumige Heterogenitäten im Tonstein die räumlich gemittelte Permeabilität und Diffusivität beeinflussen und welche der kleinräumigen Charakteristiken (z.B. Bandbreiten innerhalb der mineralogischen Fraktionen, Korrelationslängen, relative

Anteile von mineralogischen Fraktionen und von Lithofazies, Anisotropien) von besonderem Einfluss sind. Für größermaßstäbliche Skalen fehlen entsprechende Untersuchungen.

Zur Charakterisierung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Ton/Tonstein soll untersucht werden, inwieweit die für den kleinskaligen Bereich geeigneten Methoden und Aussagen auf größere Skalen übertragen werden können und welche weiteren Methoden für eine Anwendung in diesem Bereich geeignet sind.

Insbesondere sollen zwei Zielstellungen verfolgt werden:

- (1) Ausdehnung der Erkenntnisse aus kleinräumigen Untersuchungen auf Transporteigenschaften (Transportzeiten, Channeling, Schadstoffdiffusion in stagnierende Porenwässer, etc.) im Dekameterbereich.
- (2) Entwicklung bzw. Prüfung von Untersuchungsmethoden für die dominierenden Charakteristiken.

In der Zielstellung (1) ist z.B. die Frage zu klären, wie gut die advective Transportzeit durch die räumlich gemittelte Permeabilität berechnet werden kann, wie genau entsprechende theoretische Beziehungen sind und welche Dispersion die Heterogenitäten bewirken. In der Zielstellung (2) ist u. a. die besonders schwierige Ermittlung von Permeabilitäten in vertikaler Richtung und ohne untertägige Aufschlüsse von Korrelationslängen in horizontaler Richtung zu bearbeiten.

#### II.2.6 Experimentalprogramm zur Untersuchung der Freisetzung und Aerosolausbreitung bei Abfallgebindeabstürzen in Bohrlöchern

Eine wichtige Option bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen ist die Einlagerung in Bohrlöchern von verglasten Spaltproduktkonzentrationen in Form von Kokillen und von abgebrannten Brennelementen in Form von Brennstabkokillen. Bohrlochlagerung kommt für verschiedene Wirtsgesteine in Frage, u. a. für Steinsalz aufgrund seines plastischen Verhaltens, das eine anschließende Verfüllung nicht erfordert.

Für den grundlegenden Nachweis der Machbarkeit dieser Einlagerungsvariante sind aufeinander abgestimmte vorlaufende Forschungsarbeiten erforderlich. Dazu zählt insbesondere auch die Fragestellung, ob beim Einbringen von Glaskokillen oder Brennstabköchern in ein Bohrloch der zu unterstellende Störfall eines Gebindeabsturzes beherrschbar ist.

Im Rahmen der Eignungsuntersuchung dieser wichtigen Einlagerungsvariante sind folgende experimentelle und analytische Untersuchungen durchzuführen:

- Bestimmung der Freisetzung partikelförmiger radioaktiver Stoffe im Bohrloch nach Aufprall einer Glaskokille als Funktion der Fallhöhe.
- Modellierung der Ausbreitung im Bohrloch freigesetzter Aerosolpartikel zum Bohrlochmund und dabei auftretender Abscheideprozesse.

## II.2.7 Geochemische Nahfeldmodellierung in einem Endlager, Fortführung der Arbeiten zu einer thermodynamischen Datenbank

Ein wesentlicher Punkt in einem Sicherheitsnachweis für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle ist die Beschreibung der ablaufenden geochemischen Prozesse. Dies betrifft die Ermittlung eines Quellterms für Radionuklide, Sorptionsprozesse sowie zu unterstellende Korrosionsprozesse.

Ein wichtiges Werkzeug hierbei ist die thermodynamische Modellierung geochemischer Prozesse. Zur Prognose von Radionuklidkonzentrationen im Nahfeld eines Endlagers wie auch entlang des potentiellen Migrationspfades auf Basis thermodynamischer Modellierung wird eine qualitativ hochwertige, belastbare und in sich konsistente thermodynamische Datenbasis benötigt. Die hierfür benötigten grundlegenden Daten werden derzeit im Rahmen des Verbundprojektes THEREDA in Form einer Datenbank zusammengestellt und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Zum jetzigen Zeitpunkt können einzelne Teilbereiche eines Endlagers erfolgreich modelliert werden.

Das Projekt soll nach dem Auslaufen der ersten Phase im Frühjahr 2009 weitergeführt werden. Hierbei sollen Lücken im Datenbestand geschlossen und die Modellierung weiterer Teilsysteme eines Endlagers ermöglicht werden. Dabei werden weitere Daten zu weiteren Nukliden und den in einem Endlager zu erwartenden Phasen qualitätsgesichert zusammengetragen. Die Arbeiten werden es voraussichtlich ermöglichen, im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle von Rückhalteprozessen Kredit zu nehmen und belastbare Quellterme zu generieren.

## **II.3 Sozialwissenschaftliche Aspekte**

### **II.3.1 Soziologische Untersuchungen zum Umgang mit Betroffenen zur Schaffung von Vertrauen und Erhöhung von Akzeptanz an einem bestehenden Endlagerprojekt und im Zuge des Einengungsprozesses im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens**

Für die Standortfindung und Errichtung eines Endlagers bedarf es immer der generellen Akzeptanz in der Bevölkerung. Wie das Beispiel Schweden zeigt, kann durch intensive Öffentlichkeits- und Informationsarbeit die Mehrheit der Bevölkerung am Standort für ein Endlagerprojekt gewonnen werden. Aufbauend auf Arbeiten zur Gestaltung der Öffentlichkeitsbeteiligung im Endlagerauswahlverfahren sind Untersuchungen zur Verbindung von wissenschaftlich-technischer und sozial-politischer Ebene erforderlich. Dies betrifft Aspekte wie Wissenstransfer, grundsätzliche Definitionen wie z. B. Abgrenzung von Betroffenen und Nicht-Betroffenen, Umgang mit Ausgleichszahlungen, Wahrnehmung der Glaubwürdigkeit von Informationsquellen durch Betroffene, Voraussetzungen für eine Kooperationsbereitschaft von Endlagergegnern, geeignete Wege der Kommunikation (auch in festgefahrenen Situationen), Risikowahrnehmung und -kommunikation, und Möglichkeiten der Aufweichung von Verhärtungen bezüglich der Haltung gegen ein Endlagerprojekt.

Eine auch für die Öffentlichkeit nachvollziehbare und verständliche Gestaltung des wissenschaftlich technischen Standortauswahlverfahrens ist Voraussetzung dafür, dass die darauf beruhenden Entscheidungen für einen Endlagerstandort in der Öffentlichkeit akzeptiert werden können. Hierzu sind eine frühzeitige, umfassende Information und ein offener Dialog mit der Öffentlichkeit wesentliche Voraussetzung. Sowohl für die erweiterte Fachwelt als auch für eine interessierte Öffentlichkeit müssen deshalb die einzelnen Schritte des Prozesses aufbereitet und die Gelegenheit zur Diskussion der wesentlichen Grundlagen und methodischen Entscheidungen gegeben werden. Sämtliche Arbeiten im Zusammenhang mit dem Standortauswahlverfahren sollen deshalb durch einen Kommunikationsprozess begleitet werden, um hieraus Rückschlüsse für die aktuellen Arbeiten und für zukünftige Arbeiten bei der Durchführung von Endlagerprojekten zu gewinnen. Das Vorhaben soll alle Phasen der Endlagerung beginnend von der Standortauswahl bis zum Verschluss des Endlagers umfassen.

### III Teilbereich Sicherheit in der Kerntechnik

Das BfS unterstützt im Bereich Sicherheit in der Kerntechnik das BMU beim Vollzug der atomrechtlichen Bundesaufsicht und gewährleistet die wissenschaftlich-technische Unterstützung für die Aufgaben des BMU. Derzeit befindet sich der zuständige Fachbereich in einer Phase des personellen Wiederaufbaus. Es werden wesentliche Themenfelder der kerntechnischen Sicherheit bearbeitet; wobei die Umsetzung erarbeiteter wissenschaftlicher Erkenntnisse in die Praxis von Genehmigung und Aufsicht mit dem Ziel eines bundeseinheitlichen Vollzugs im Vordergrund steht.

Die Forschungsaktivitäten des BfS, die sich in diesem Teilbereich insbesondere auf die Initiierung, Fachbegleitung und Auswertung von Vorhaben erstrecken, haben vorwiegend bundesaufsichtliche Fragestellungen im Zusammenhang mit der Genehmigung und dem Betrieb von Kernkraftwerken und anderen kerntechnischen Anlagen zum Gegenstand und decken insofern nicht den Gesamtbereich des Forschungsbedarfs der Kerntechnik ab.

Die Schwerpunktthemen für die Begleitung von Ressortforschungsvorhaben im Rahmen des UFOPLANs des BMU auf dem Gebiet der kerntechnischen Sicherheit lassen sich wie folgt aus dem Atomgesetz ableiten:

- Nach §19a AtG ist vom Betreiber einer Anlage zur Spaltung von Kernbrennstoffen eine Sicherheitsüberprüfung durchzuführen und die Ergebnisse bis zu den in der Anlage 4 des AtG vorgegebenen Zeitpunkten zur Überprüfung durch die Aufsichtsbehörde vorzulegen. Die Sicherheitsüberprüfung umfasst eine deterministische Sicherheitsstatusanalyse, eine Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) und eine Sicherheitsanalyse. Für die Durchführung dieser Sicherheitsanalysen sind bundeseinheitliche, behördliche Leitfäden sowie Fachbände erforderlich, in denen die einzuhaltenden Anforderungen und einzusetzenden Methoden beschrieben sind. Der sich fortentwickelnde Stand von Wissenschaft und Technik erfordert die mit Stand vom Oktober 2005 vorliegenden umfangreichen technischen Dokumente zur Durchführung einer PSA in angemessenen Zeiträumen anzupassen und zu ergänzen.
- Nach §7 AtG dürfen Genehmigungen nur erteilt werden, wenn die Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist. Dies betrifft insbesondere wesentliche Änderungen an bereits bestehenden Anlagen. Forschungsbedarf besteht insbesondere dann, wenn neue oder bisher nur außerhalb der Kerntechnik verwendete Technologien zum Einsatz gelangen sollen und die Anforderungen an den Sicherheitsnachweis für die auf diesen Technologien beruhenden Systeme festgelegt werden müssen. Ein Paradebeispiel hierfür ist der zurzeit ablaufende Prozess des Er-

satzes der analogen Leittechnik durch digitale Leittechnikssysteme in allen Bereichen eines Kernkraftwerkes, von der betrieblichen Leittechnik bis zum Reaktorschutz.

- Die nach §7 AtG erforderliche Schadensvorsorge bedingt nicht nur entsprechende technische Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit der kerntechnischen Anlagen, sondern in zunehmendem Maße auch adäquate administrative und organisatorische Maßnahmen. Ein Ansatz dazu ist die Einführung und Beachtung eines umfassenden Sicherheitsmanagementsystems in den Kernkraftwerken, das zur Förderung einer hohen Sicherheitskultur die wesentlichen Bereiche des Mensch-Technik-Organisations-Systems umfasst. Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich eines methodischen Ansatzes zur Beschreibung und Bewertung der Wechselwirkung zwischen Mensch und Organisation.

Die Forschungsaktivitäten des BfS auf dem Gebiet der kerntechnischen Sicherheit erstrecken sich somit von der sicherheitstechnischen Bewertung neuer Analysemethoden, sowie neuer Technologien und Managementmaßnahmen, die in Kernkraftwerken eingesetzt werden, über die Identifizierung spezifischer Anforderungen und Kriterien, die zu erfüllen sind, damit diese Methoden, technischen Neuerungen und Maßnahmen sicherheitstechnisch wirksam werden, bis hin zur Mitwirkung bei der Umsetzung dieser Erkenntnisse zur Weiterentwicklung des kerntechnischen Regelwerks.

Die oben genannten Schwerpunkte lassen sich in vier Themenbereiche einordnen.

### **III.1 Sicherheitsüberprüfung – Methoden und Datenbasis zur Analyse der Anlagensicherheit**

Die Sicherheitsüberprüfung in Betrieb befindlicher Kernkraftwerke umfasst deterministische und probabilistische Sicherheitsanalysen sowie ingenieurtechnische Betrachtungen. Im Rahmen der deterministischen und probabilistischen Sicherheitsanalysen werden z. T. sehr aufwändige Rechenprogramme benötigt, um die Wechselwirkung unterschiedlicher physikalischer und verfahrenstechnischer Prozesse sowie das Funktionsverhalten der technischen Einrichtungen und die Auswirkungen von Personalhandlungen zu erfassen. Entwicklungsbedarf für die in den Rechenprogrammen implementierten Modelle besteht einerseits aufgrund von neueren experimentellen Ergebnissen und andererseits für bisher noch wenig erforschte Bereiche, wie z.B. die Sicherheitsbewertung passiver Komponenten wie Rohrleitungen, insbesondere im Hinblick auf probabilistische bruchmechanische Berechnungen, und Brandsimulationsrechnungen, die sowohl für deterministische Brandgefahrenanalysen als auch für probabilistische Brandanalysen benötigt werden.

Probabilistische Sicherheitsanalysen werden weltweit als ergänzendes Instrument zu deterministischen Analysen für die Bewertung des Sicherheitsniveaus industrieller Anlagen, insbesondere von Kernkraftwerken, eingesetzt, wenn auch mit unterschiedlicher Gewichtung im Hinblick auf deterministische Festlegungen.

Diese Entwicklung hat dazu geführt, dass auf der Ebene internationaler Organisationen wie der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) oder der OECD/NEA die Anwendung probabilistischer Sicherheitsanalysen in Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren umfassend behandelt und fortentwickelt wird. Das betrifft z.B. die derzeit entwickelten Leitfäden (Safety Guides) zur PSA der Stufe 1 bzw. zur PSA der Stufe 2 bei der IAEA in Wien oder technische Papiere und Statusberichte der CSNI-Arbeitsgruppe der OECD/NEA zu verschiedenen Anwendungsfeldern der PSA, insbesondere auch jenseits umfassender Sicherheitsüberprüfungen.

Darüber hinaus hat WENRA (Western European Nuclear Regulators Association) für 18 verschiedene sicherheitsrelevante Themen sogenannte Reference Level (insgesamt rund 300) definiert, die in den EU-Ländern bis 2010 umgesetzt werden sollen. Zu diesen 18 sicherheitsrelevanten Themen gehören u. a. auch die PSA, (periodische) Sicherheitsüberprüfungen und der Schutz gegen Brand und dessen Nachweis durch deterministische und probabilistische Analysen.

Durch die Novelle des Atomgesetzes (AtG) vom 22. April 2002 wurde die Ausstiegsvereinbarung in geltendes Recht umgesetzt. Das Erfordernis einer Sicherheitsüberprüfung ist in §19a festgelegt. Damit die Sicherheitsüberprüfung (SÜ) bundeseinheitlich durchgeführt werden kann, sind entsprechende Dokumente für die SÜ zu erarbeiten, die auf dem Stand von Wissenschaft und Technik basieren. Als Ausgangspunkt stehen die behördlichen Leitfäden für die periodische Sicherheitsüberprüfung zur Verfügung, die vor der AtG-Novelle von den Betreibern auf freiwilliger Basis durchgeführt wurde. Diese Unterlagen sind hierarchisch aufgebaut. An der Spitze dieser Hierarchie steht der Leitfaden "Grundlagen der Periodischen Sicherheitsüberprüfung". Die nächste Hierarchieebene besteht im sicherheitstechnischen Teil aus zwei Leitfäden, die die deterministischen – im Leitfaden Sicherheitsstatusanalyse – und die probabilistischen Analysen – im Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) – beschreiben.

Unterhalb der Ebene dieser behördlichen Leitfäden, welche die wesentlichen Vorgaben bezüglich Analyseumfang, Ergebnisdarstellung und -bewertung umfassen, werden Einzelheiten der Analysendurchführung in drei technischen Dokumenten, die von Expertengruppen aus Herstellern, Gutachtern, Betreibern und beratenden Firmen erarbeitet wurden, dargestellt.

Für den Bereich der PSA sind dies Methoden- und Datenband PSA, die zuletzt mit Stand von Oktober 2005 vom BfS veröffentlicht wurden.

Eine Aktualisierung wird bis zum Jahr 2010 angestrebt. Ein Hintergrund sind die von WENRA für die PSA definierten insgesamt 16 Reference Level, die in den EU-Ländern bis 2010 umgesetzt werden sollen und die zurzeit von Deutschland noch nicht erfüllt werden, insbesondere nicht im Hinblick auf die Durchführung von PSA der Stufe 2 und die Verwendung der PSA im Rahmen der Aufsicht und Genehmigung außerhalb von umfassenden Sicherheitsüberprüfungen.

Für eine bundesweit einheitliche Durchführung der probabilistischen Sicherheitsanalyse im Rahmen der nach AtG erforderlichen Sicherheitsüberprüfung der Kernkraftwerke steht die Fortschreibung der Fachbände zu Methoden und Daten der PSA im Vordergrund, auf die im behördlichen PSA-Leitfaden als Konkretisierung des Standes von Wissenschaft und Technik verwiesen wird. Hierfür besteht in Teilbereichen noch Forschungsbedarf, z. B. hinsichtlich der Modellierung von gemeinsam verursachten Ausfällen und von Personalhandlungen, aber auch in der Weiterentwicklung existierender Rechenprogramme, in der Generierung und Validierung von Zuverlässigkeitsdaten sowie zur Berücksichtigung von Ergebnisunsicherheiten bei der Simulation von Ereignisabläufen in den entsprechenden Unsicherheitsanalysen der PSA.

### III.1.1 Methodenentwicklung der PSA zur Behandlung übergreifender Einwirkungen (EVI; EVA)

Die in Deutschland noch in Betrieb befindlichen Anlagen sind in unterschiedlicher Weise gegen übergreifende Einwirkungen von innen (EVI – insbesondere Brand) oder Einwirkungen von außen (EVA – externe Überflutung, Erdbeben, Flugzeugabsturz und Explosionsdruckwelle) ausgelegt. Insofern ergeben sich Fragen angesichts eines sich verändernden Standes von Wissenschaft und Technik und die Notwendigkeit der Prüfung neu gewonnener Erkenntnisse.

So hat es in den zurückliegenden Jahren zu zahlreichen Ereignissen neue Erkenntnisse gegeben, bei den EVA-Ereignissen z.B. bei der externen Überflutung durch geänderte Hochwasserstatistiken und moderne Analysemethoden, die Extrapolationen ausgehend von den vorliegenden Daten eines hundertjährigen Hochwasser bis hin zum hunderttausendjährigen Hochwasser ermöglichen sollen. Solche Rechnungen erfordern angemessene Unsicherheitsanalysen, die zurzeit noch nicht vorliegen.

Im Bereich der probabilistischen Bewertung von Erdbeben gibt es weltweit nur zwei Ansätze, einer davon ist im Methodenband zur PSA beschrieben. International wird daher die Notwendigkeit entweder einer Erweiterung der bestehenden Methoden oder die Entwicklung eines komplett neuen methodischen Ansatzes diskutiert, bisher gibt es noch keine konkreten Schritte zur Lösung.

Bei den EVI-Ereignissen hat sich der Kenntnisstand zu Bränden verbessert, insbesondere durch eine verbesserte Ereigniserfassung, aber auch durch Verbesserungen bei den Brandausbreitungsrechnungen. Auch zukünftig ist eine sorgfältige und kontinuierliche Bearbeitung dieser Fragen für die Sicherheitsbeurteilung unverzichtbar, sowohl für die Phase des Leistungsbetriebs als auch für die Phase des Nicht-Leistungsbetriebs.

Brandsimulationsrechnungen sollen in Zukunft sowohl für deterministische Brandgefahrenanalysen als auch für probabilistische Brandanalysen eingesetzt werden. Entsprechende Modelle müssen dazu aufgrund der Ergebnisse bereits vorliegender Benchmarks, wie sie im Rahmen des internationalen Projekts ICFMP durchgeführt wurden, verbessert und ergänzt werden. In diesen Benchmarks hat sich z. B. gezeigt, dass kein Rechenprogramm zurzeit die Brandausbreitung entlang Kabeltrassen, insbesondere in vertikaler Anordnung, adäquat beschreiben kann. Darüber hinaus bedarf es einer Weiterentwicklung der Brandsimulationsprogramme zur Rauch- und Wärmeausbreitung von einem Quellraum zu einem benachbarten Raum, die empfindlich von der Modellierung der Wechselwirkung zwischen Brandherd, Belüftungssystem und der durch die Raumgeometrie gegebenen Ventilationssituation abhängen. Hierzu laufende und geplante Experimente sollen zur Validierung der Rechencodes eingesetzt werden. Außerdem sind auch für Brandsimulationsrechnungen Unsicherheitsanalysen zur Einordnung der Ergebnisse erforderlich. Auch dazu liegen zurzeit noch keine Untersuchungen vor.

### III.1.2 Entwicklungen zur Anwendung der PSA zur Bewertung von Anlagenkonzepten und Anlagenänderungen

Die PSA-Fachbände sind im Wesentlichen auf die Durchführung von probabilistischen Analysen im Rahmen von umfassenden Sicherheitsüberprüfungen ausgerichtet. Darin besteht ebenfalls ein Unterschied zu internationalen Regelungen und der Praxis in anderen Ländern, die die PSA in viel größerem Umfang für die tägliche Arbeit in den kerntechnischen Anlagen selbst, aber auch auf behördlicher Seite in Genehmigungs- und Aufsichtsfragen nutzen. Dies erfolgt in Deutschland nur punktuell und wird auch in den Bundesländern unterschiedlich gehandhabt. Deshalb ist wie bei

den SÜ eine Empfehlung zur Vorgehensweise bei der Anwendung der PSA jenseits umfassender Sicherheitsüberprüfungen notwendig. Die Anwendung der PSA nicht nur im Rahmen von SÜ wird auch explizit in den WENRA reference levels gefordert.

Anwendungsfelder können dabei vertiefte Ereignisauswertungen, die Bewertung technischer Spezifikationen (z. B. die Optimierung von Intervallen wiederkehrender Prüfungen/Tests, eine Bewertung von Reparaturen während des Leistungsbetriebes und die Beurteilung bau- und systemtechnischer Änderungen), die Verwendung der PSA für die Einstufung von Anlagenteilen, Systemen und Komponenten im Qualitätsmanagementsystem, die Bewertung der Effektivität und Effizienz von Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes und die Verwendung von Risikomonitoring (als Instrument für Entscheidungen über einzelne Instandhaltungsaktivitäten, Vermeidung von gleichzeitigen Unverfügbarkeiten verschiedener Systeme, systematische, risikoorientierte Instandhaltungsplanungen) sein.

Eine weitere Anwendung der PSA mit entsprechenden methodischen Ansätzen wird zurzeit in Skandinavien verfolgt: Die Bewertung der Ebenen des in der Tiefe gestaffelten Sicherheitskonzepts; auch hier wird eine Adaption auf deutsche Verhältnisse zu überprüfen sein.

### III.1.3 Methodische Aspekte der Modellierung von Personalhandlungen in der PSA

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Bewertung der Sicherheit von Kernkraftwerken ist die Bestimmung der menschlichen Zuverlässigkeit. Hier sind in den gegenwärtigen probabilistischen Sicherheitsanalysen noch Lücken zu verzeichnen. Dies betrifft insbesondere die Einflüsse aus kognitiven Entscheidungen und organisatorische Einflüsse. Auch die weiterentwickelten sogenannten Methoden der zweiten Generation haben nur begrenzt Einzug in die PSA gefunden. Das liegt nicht zuletzt auch daran, dass diese Methoden konzeptionell mit großem Engagement entwickelt wurden, aber die breite Anwendung in der Praxis fehlt. Aber auch im methodischen Bereich gibt es noch Entwicklungsbedarf. So fehlt es an Modellierungsansätzen zu Faktoren wie Kommunikation und Hierarchie, Organisation (Führung, Ressourcen) oder Interaktion mit der Behörde. Darüber hinaus müssen aber auch dynamische Prozesse wie individuelles Lernen und Diagnose als kognitiver Prozess einzelner Personen oder eines Teams noch expliziter modelliert werden. Aufgrund jüngerer Studien wird ggf. auch eine Revision des Diagnosemodells notwendig sein. Insofern wird eine Aufarbeitung des aktuellen internationalen Standes von Wissenschaft und Technik – zurzeit ist eine internationale empirische Studie in der Auswertung – und daraus abgeleitet ein konkretes Forschungsprogramm für diese Fragestellungen unabdingbar sein. Neben den beschrie-

benen offenen methodischen Aspekten bleibt die Generierung von Daten zur menschlichen Zuverlässigkeit und deren Validierung eine weitere wichtige Aufgabe in der Zukunft.

#### III.1.4 Methoden der PSA zur Modellierung der digitalen Sicherheitsleittechnik

Durch Um- und Nachrüstungen im Bereich der Leit- und Wartentechnik werden in nahezu allen Funktionsbereichen von KKW software-basierte Einrichtungen eingesetzt. Die Methoden zur Bestimmung der Zuverlässigkeit von Leit- und Warteneinrichtungen sind hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf neue Technologien zu überprüfen. Ggf. sind diese Methoden anzupassen und damit entsprechende Zuverlässigkeitsdaten für PSA zu generieren. Dies gilt insbesondere für Einrichtungen des Sicherheitssystems. Über entsprechende methodische Vorarbeiten wird international seit ca. 15 Jahren berichtet. Der Einsatz derartiger Methoden zur Berücksichtigung komplexer software-basierter Leit- und Wartensysteme in PSA ist allerdings noch nicht Stand der Technik. Auch fehlen entsprechende Zuverlässigkeitsdaten. Im Rahmen der Vorhaben sind die bisherige Methodenentwicklung im Hinblick auf Anwendbarkeit für PSA für KKW zu bewerten und in einem zweiten Schritt versuchsweise und partiell ausgewählte Methoden anzuwenden. Dabei sind die Methoden zur Bewertung der Zuverlässigkeit software-basierter Automatisierungseinrichtungen von den Methoden zur Bewertung der Zuverlässigkeit von Personalhandlungen bei Nutzung software-basierter Warteneinrichtungen zu unterscheiden.

Weiterhin sind Methoden zu entwickeln, mit denen der Einfluss übergreifender Einwirkungen durch Fremdspannungseinträge in die Leittechnik ermittelt werden kann, eventuell auch mit Hilfe der PSA.

#### III.1.5 Auflistung der anstehenden Forschungsaktivitäten zur PSA

Für die Entwicklung und Weiterentwicklung von methodischen Ansätzen in der PSA und deren Bewertung sind insbesondere folgende thematische Bereiche über Vorhaben abzudecken:

- Bewertung des Standes von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der Modellierung von Personalhandlungen,
- Ansätze zur Behandlung kognitiver Personalhandlungen,
- Umsetzung und ggf. Erweiterung methodischer Ansätze einer PSA der Stufe 2 für den Nicht-Leistungsbetrieb,

- Bewertung neuerer Erfahrungen mit der Analyse der Einwirkungen von Außen und methodische Weiterentwicklung,
- Methodischer Ausbau der Unsicherheitsanalyse,
- Einbeziehung neuerer Erkenntnisse und Erfahrungen in die Anforderungen für den Nichtleistungsbetrieb,
- Auswertung nationaler und internationaler Betriebserfahrungen zu gemeinsam verursachten Ausfällen, Bewertung der Modelle und Daten aus der PSA-Praxis vor diesem Hintergrund und ggf. Weiterentwicklung entsprechender Modelle,
- Weitere methodische Entwicklungen bei Brandsimulationsprogrammen im Hinblick auf die Modellierung von Kabelbränden und eine Berücksichtigung der Rauchausbreitung,
- Weitere methodische und datenmäßige Konsolidierung der Brand-PSA,
- Die Erschließung weiterer PSA-Anwendungen für betriebliche und sicherheitstechnische Optimierung und aufsichtliche Bewertungen von beantragten technischen und administrativen Änderungsmaßnahmen.

### **III.2 Sicherheitsnachweis und Sicherheitskonzepte – Anforderungen an sicherheitstechnisch wesentliche Umrüstungen und den Einsatz neuer Technologien in Kernkraftwerken**

Für eine sicherheitstechnisch wesentliche Um- oder Nachrüstung im KKW ist nach AtG eine atomrechtliche Genehmigung oder Zustimmung erforderlich, die auf einem Sicherheitsnachweis basiert, bei dem die spezifischen Eigenschaften der jeweils neu eingesetzten Technologie zu berücksichtigen sind. Der Sicherheitsnachweis wird grundsätzlich anhand des kerntechnischen Regelwerks nach einem bundeseinheitlichen Verfahren geführt. BMU wird durch das BfS bei der Entwicklung solcher Verfahren sowie bei der Aktualisierung und Ergänzung des kerntechnischen Regelwerks unterstützt.

Beispiele für den Einsatz neuer Technologien mit Sicherheitsbedeutung in KKW sind die software-basierte Leit- und Wartentechnik sowie eine Brennelementauslegung zur Erhöhung der thermischen Reaktorleistung und der Brennstoffausnutzung. Entsprechende Forschungsthemen sind nachstehend aufgeführt.

### III.2.1 Sicherheitsleittechnik

In Ermangelung von Ersatzteilen werden in allen Anlagenbereichen fest verdrahtete Leiteinrichtungen sukzessive gegen software-basierte Leiteinrichtungen ausgetauscht bzw. nachgerüstet. Das betrifft insbesondere auch die Leiteinrichtungen des Sicherheitssystems, beginnend bei peripheren Komponenten der Mess- und Stelltechnik bis hin zum Reaktorschutz.

Da bereits Genehmigungsanträge für die Umrüstung der Leittechnik mit höchster Sicherheitsbedeutung (Reaktorschutzsysteme) von zwei Druckwasserreaktoren vorliegen, besteht Handlungsbedarf, die notwendigen Anforderungen an und Bewertungsmaßstäbe für den Sicherheitsnachweis im kerntechnischen Regelwerk bereitzustellen. Weiterhin ist die Technologie software-basierter Leittechnik einem kurzen Innovationszyklus unterworfen, so dass es während der verbleibenden Laufzeit der Anlagen erforderlich ist, mit Hilfe von Vorhaben den technologischen Entwicklungsstand auf das Regelwerk abzubilden. Bei der Entwicklung bundeseinheitlicher Verfahrensweisen für den Sicherheitsnachweis sowie für Leitlinien zur Instandhaltung dieser Einrichtungen sind auch die bei der Um- und Nachrüstung software-basierter Leit- und Wartentechnik in anderen Ländern gesammelten Erfahrungen zu berücksichtigen.

Schwerpunkte einschlägiger Vorhaben sind deshalb

- die Anforderungen an software-basierte Leittechnik unter Berücksichtigung der technologischen Innovation auf dem Gebiet der Automatisierungstechnik zu identifizieren und für die Weiterentwicklung des Regelwerks zu bewerten,
- eine strukturierte Verfahrensweise für den Sicherheitsnachweis unter Einbeziehung der DIN IEC Fachnormen zu entwickeln,
- bestehende Qualifizierungsverfahren und -kriterien für Leittechnikserienprodukte zu bewerten sowie
- die Betriebserfahrungen, insbesondere im Hinblick auf die Wirksamkeit sicherheitstechnischer Geräteeigenschaften, detailliert auszuwerten.

Der Forschungsbedarf besteht in der Bewertung der sicherheitstechnischen Eigenschaften neuer Leiteinrichtungen, die Sicherheitsfunktionen in KKW unterstützen oder ausführen sollen. Beispiele sind der Einsatz verteilter Rechnernetze für die nahezu komplette Ausführung der Leittechnikssicherheitsfunktionen, der Daten- und Informationsaustausch innerhalb des Rechnernetzes und zur Warte über Busverbindungen sowie der Einsatz von intelligenten (software-basierten) Feldgeräten zur Messdatenerfassung und Ausführung von Steuerungsfunktionen. Diese Geräte unterscheiden sich von fest verdrahteter Technologie sowohl in ihrem Aufbau als auch in den gerä-

teinternen Funktionen. Neuartige Geräte werden kaum noch speziell für den Einsatz in der Kerntechnik entwickelt, vielmehr werden sie oft nach allgemeinen Industriestandards qualifiziert. Demnach besteht der Forschungsbedarf auch in der Bewertung der Qualifizierungsnachweise nach Industriestandards bzw. in der Identifizierung von Anforderungen zur Nachqualifizierung von Standardprodukten.

### III.2.2 Brennelementsicherheit

Die Betreiber der Kernkraftwerke haben das Ziel, den Einsatz von Kernbrennstoff durch höhere Brennstoffabbrände effektiver zu machen und die Reaktorleistung zu erhöhen. Entsprechende Sicherheitsnachweise müssen von Sachverständigen nach vorgegebenen Kriterien geprüft werden. Dabei sind Phänomene zu berücksichtigen, die während des ungestörten Betriebs beim Hochabbrandeinsatz entsprechender Brennelemente, aber auch im Verlauf von Störungen (Reaktivitätstransienten) und Störfällen (Kühlmittelverlust) auftreten können. Z. B. sind Pelletschwellung und Hüllrohrverformung bei Reaktivitätstransienten zu berücksichtigen. Um die Ursachen der Phänomene zu ermitteln und mögliche Schadenseffekte zu quantifizieren, wurden im Rahmen der Grundlagenforschung Simulationsmodelle entwickelt, die anhand von geplanten international veranstalteten Großexperimenten validiert werden müssen. So werden 2009/2010 die Ergebnisse von Experimenten an der Versuchsanlage CABRI (Frankreich) mit Hochabbrand-Brennelementen im Hinblick auf deren Verhalten bei Reaktivitätstransienten erwartet. Bei der Aufstellung der derzeit gültigen Kriterien für den Sicherheitsnachweis von Brennelementen im Hochabbrandeinsatz wurde vereinbart, diese Kriterien nach Vorlage der Versuchsergebnisse erneut zu bewerten. Für 2009 ist deshalb die Initiierung eines entsprechenden Vorhabens vorgesehen.

### III.2.3 Weiterentwicklung von Sicherheitskonzepten

Nach §7 AtG ist bei Anlagenänderungen die Vorsorge gegen Schäden nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zu beurteilen. Falls bei einer Anlagenänderung ein modifiziertes Sicherheitskonzept zugrunde gelegt wird, sind die bisherigen Bewertungsmaßstäbe hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zu überprüfen.

Fallabhängig ist davon auszugehen, dass die derzeit stattfindende Entwicklung neuer Reaktorkonzepte auch Auswirkungen auf Um- und Nachrüstprogramme für deutsche Anlagen während der Restlaufzeit haben wird.

Eine Verfolgung der im Ausland stattfindenden Entwicklung von Reaktorprojekten im Hinblick auf modifizierte Sicherheitskonzepte und Bewertungsmaßstäbe ist erforder-

lich. Modifizierte Sicherheitskonzepte werden zumeist für den Einsatz neuer Technologien entwickelt.

Bei einigen Neuanlagen werden z.B. die Anlagensicherheitsfunktionen unterschieden, je nachdem ob die jeweilige Funktion für Sofortmaßnahmen nach Störfalleintritt oder zur längerfristigen Überführung der Anlage in einen sicheren abgeschalteten Zustand benötigt wird. Dieser Ansatz hat weitreichende Folgen z.B. für die technische Auslegung des Sicherheitssystems der Anlage, das Automatisierungskonzept und die Organisation der Schnittstellen zwischen Anlage und Operator.

Derartige Konzepte lassen sich zwar nur bedingt auf Altanlagen anwenden, eine Bewertung ist dennoch für bundesaufsichtliche Stellungnahmen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik und für die Weiterentwicklung des Kerntechnischen Regelwerkes unerlässlich. Entsprechende Untersuchungsvorhaben werden ad hoc initiiert.

### **III.3 Sicherheitsmanagement**

Sicherheitsmanagement ist die Gesamtheit der Tätigkeiten zur Planung, Organisation, Leitung und Kontrolle von Personen und Arbeitsaktivitäten im Hinblick auf die effiziente Erreichung einer hohen Sicherheitsleistung, d.h. zur Erreichung einer hohen Qualität aller für die Sicherheit bedeutsamen Tätigkeiten und zur Förderung einer hohen Sicherheitskultur. Ein hochwertiges Sicherheitsmanagement ist insbesondere Voraussetzung dafür, dass der Betrieb eines Kernkraftwerkes der nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderlichen Schadensvorsorge entspricht, und ist ein weiteres wesentliches Element zur Erhaltung eines hohen Sicherheitsstandards.

Das BMU hat mit den „Grundlagen für Sicherheitsmanagementsysteme in Kernkraftwerken“ den Rahmen für die Anforderungen geschaffen, die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik an die Systematik und Vollständigkeit von Sicherheitsmanagementsystemen für Kernkraftwerke in Deutschland zu stellen sind. Entsprechend sind die Betreiber gefordert, ein wirksames Sicherheitsmanagementsystem einzuführen, das dem internationalen Stand solcher Managementsysteme und den aktuellen Regelwerksanforderungen genügt. Diese Einführung soll 2009 abgeschlossen werden. Die Effizienz und Effektivität dieser Systeme wird in der Folgezeit zu überprüfen sein (z. B. im Rahmen der umfangreichen Sicherheitsüberprüfungen). In diesem Zusammenhang ist auch die Einführung von Sicherheitsindikatoren bei den Betreibern und den Behörden weiterzuverfolgen bzw. deren Effizienz zu prüfen und mit dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik zu vergleichen.

Zum Sicherheitsmanagement gehört insbesondere auch das Alterungsmanagement und damit auch die Bewertung des Werkstoffverhaltens aus Alterungsgesichtspunkten. Hierzu sind Werkstoffprüfverfahren nach dem Stand von Wissenschaft und Technik anzuwenden.

Zum Sicherheitsmanagement werden folgende Zielstellungen verfolgt:

- Der erreichte internationale Stand bei der Entwicklung und Einführung von Sicherheitsmanagementsystemen in der Kerntechnik ist zu ermitteln; daraus sind Bewertungskriterien für Sicherheitsmanagementsysteme abzuleiten. Dabei sind ggf. erforderliche Veränderungen in den Vorgaben, Abläufen und Prozessen zu ermitteln und die geeignete Zusammenführung mit bereits vorhandenen Managementsystemen, z.B. Qualitätsmanagement und Alterungsmanagement, zu prüfen und zu bewerten (z.B. integriertes Managementsystem).
- Weiterhin soll der Stand der Einführung von Sicherheitsindikatoren ermittelt und deren potentieller Beitrag für das Sicherheitsmanagement bewertet werden.
- Ferner sollen Verfahren und Bewertungskriterien zur Funktionalität von Sicherheitsmanagementsystemen entwickelt und dadurch die aufsichtliche Bewertung unterstützt werden.

Da die probabilistische Sicherheitsanalyse ein wichtiges Instrument zur Beurteilung von sicherheitsrelevanten Systemen und Komponenten ist, wird in Zukunft auch die Frage zu klären sein, inwieweit Sicherheitsmanagement und probabilistische Sicherheitsanalyse zwei von einander völlig unabhängige Instrumente bleiben sollen bzw. inwieweit in sinnvoller Weise eine Verbindung zwischen beiden Instrumenten hergestellt werden kann.

### **III.4 Nukleare Versorgung**

Der Bereich Sicherheit in der Kerntechnik umfasst neben Reaktoren auch den Bereich der nuklearen Versorgung. Zur Versorgung der Kernkraftwerke mit Kernbrennstoffen werden in Deutschland eine Anreicherungs- und eine Brennelementfabrikationsanlage betrieben. Die stetige technische Weiterentwicklung der Produktions- und Überwachungstechnik sowie der technischen Verfahren beim Rückbau von Anlagen erfordert auch eine stetige Anpassung bzw. Weiterentwicklung der Methoden der Störfallanalyse und der Grundlagen zur Überprüfung der ausreichend getroffenen Schadensvorsorge entsprechend dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Tech-

nik. Die durchzuführenden Vorhaben im Bereich der nuklearen Versorgung gewährleisten die Aktualität der Methoden und Kenntnisse auf dem Gebiet der Sicherheitstechnik und Sicherheitsanalyse unter Berücksichtigung des nationalen und internationalen Entwicklungsstandes.

Im Bereich der nuklearen Versorgung erfordern weiterentwickelte Sicherheitskonzepte, technische Veränderungen wie z. B. Anreicherungerhöhungen und reduzierte Strahlenschutzgrenzwerte erfordern auch die Weiterentwicklung der Rechenverfahren für den rechnerischen Sicherheitsnachweis und der Methoden für die Störfall- und Sicherheitsanalyse. So werden z.B. zurzeit auch für Anlagen der nuklearen Versorgung die Grundlagen für probabilistische Sicherheitsanalysen erarbeitet und begründen entsprechenden Forschungsbedarf. Die durchzuführenden Vorhaben dienen der Weiterentwicklung und dem Erhalt der Kenntnis des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik. Durch die Vorhaben wird das Grundlagenwissen für die sicherheitstechnischen Beurteilungen im Rahmen der Rechts- und Zweckmäßigkeitssicht des BMU über die kerntechnischen Einrichtungen auf aktuellem Stand gehalten. Darüber hinaus gewährleisten sie den internationalen Wissenstransfer auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheit und der Störfallvorsorge in Anlagen der nuklearen Versorgung.

## Abkürzungsverzeichnis

AP	Abnahmeprüfung
Ar	chemisches Zeichen: Argon
ARTM	Atmosphärisches Radionuklid Transport Modell
AtG	Atomgesetz ( <i>Kurzform</i> )
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMBF	Bundesministerium für Forschung und Bildung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
Bq	Becquerel (Maßeinheit der Aktivität)
BuRG	<u>B</u> undeseinheitliche Datei ' <u>R</u> adon in <u>G</u> ebäuden'
C	chemisches Zeichen: Kohlenstoff
CABRI	Französischer Versuchsreaktor der französischen Atomenergiebehörde
cDnA	complementary DNA
Cl	chemisches Zeichen: Chlor
CSNI	Committee on the Safety of Nuclear Installations
CT	Computer-Tomographie
CTBT	Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty (Atomwaffenteststopabkommen)
CTBTO	Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organization
DMF	Deutsches Mobilfunk Forschungsprogramm
DNA	deoxyribonucleic acid <engl.> (dt. DNS: Träger des Erbguts)
ECURIE	European Community Urgent Radiological Information Exchange (Schnellinformationssystem der Europäischen Gemeinschaft zur Alarmierung der Mitgliedsstaaten in Fällen von kerntechnischen Ereignissen mit möglichen grenzüberschreitenden radiologischen Auswirkungen)
ELAN	ELAN-Informationssystem (ELAN: Elektronische Lagedarstellung für den Notfallschutz)
ENETRAP	European Network on Education and Training in Radiation Protection
EPD	Elektronisches Personendosimeter

EPQC	European Protocol for the Quality Control of the Physical and Technical Aspects of Mammography Screening
ESP	Elektronischer Strahlenpass
EU	Europäische Union
EURANOS	European Approach to Nuclear and Radiological Emergency Management and Rehabilitation Strategies (EU-Project)
EURATOM	European Atomic Energy Community
EVA	Einwirkungen von außen
EVI	Einwirkungen von innen
FuE	Forschung und Entwicklung
GGO	Gemeinsame Geschäftordnung (der Bundesministerien)
GHSI	Global Health Security Initiative
GHz	Giga Hertz = $10^9$ Hertz
HAW	High Active Waste
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICFMP	International Collaborative Fire Modelling Project (der OECD/NEA)
ICNIRP	International Commission on Non-Ionising Radiation Protection
ICRP	International Commission on Radiological Protection
IMIS	Integriertes Mess- und Informationssystem (zur Überwachung der Umweltradioaktivität)
KHK	Koronare Herzkrankheit
KiKK	Studie: Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken
KKW	Kernkraftwerk
KP	Konstanzprüfung
Kr	chemisches Zeichen: Krypton
MPE	Medizinphysik-Experte
MRT	Magnet-Resonanz-Tomographie
NIR	Non-Ionising Radiation
NORM	Naturally Occurring Radioactive Material
ODL-Messnetz	Ortsdosisleistungs-Messnetz
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
OECD/NEA	Nuclear Energy Agency (of OECD)
PET	Positronen-Emissions-Tomographie

Po	chemisches Zeichen: Polonium
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
QS	Qualitätssicherung
Ra	chemisches Zeichen: Radium
RBW	Relative Biologische Wirksamkeit
RESRAD	Computermodell zur Dosis- und Risikoabschätzung von „RESidual RADioactive“ Stoffen
RöV	Röntgenverordnung
RSK	Reaktor-Sicherheitskommission
SSK	Strahlenschutzkommission
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SÜ	Sicherheitsüberprüfung
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
THEREDA	<u>Th</u> ermodynamische <u>Re</u> ferenz <u>da</u> tenbasis
THTR / AVR	Thorium Hochtemperaturreaktor / Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (Jülich)
UFOPLAN	Umweltforschungsplan des BMU
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
UV	ultraviolett (in <i>UV-Strahlung</i> )
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VerSi	Vergleichende Sicherheitsanalysen
WENRA	Western European Nuclear Regulator Association
WHO	World Health Organization