

DOSISGRENZWERTE BEI KERNANLAGEN, RADIOAKTIVE STRAHLUNG UND STRAHLENSCHUTZ

-

**Y. Billarand, J.L. Chambon, A. Cordelle, D. Laurier,
N. Matahri, A. Mathieu, E. Wattelle**

Report Nr.°IRSN/DAEI/BU-DCI/2022-00044

Ce document relève du contrat commercial n° LW IRSN 2021-0195

Dieses Dokument ist Gegenstand des Vertrags Nr.

Direction des Affaires Européennes et Internationales

Business Unit – Développement commercial international

31 av. de la division Leclerc, 92260 Fontenay-aux-Roses

	Approbation (<i>Genehmigung</i>)			
	Rédacteur(s) <i>Autorin(nen) und Autor(en)</i>	Vérificateurs(s) <i>Prüferin(nen) und Prüfer</i>	Autre (le cas échéant) <i>Andere (falls zutreffend)</i>	Directeur <i>Bereichsleiter</i>
Nom <i>Name</i>	Y. Billarand, J.L. Chambon, A. Cordelle, D. Laurier, N. Matahri, A. Mathieu, E. Wattelle	Die Gruppe der Autorinnen und Autoren unter der Leitung von Y. Billarand	-	J.R. Jourdain
Datum				
Visum	Für die Gruppe der Autorinnen und Autoren			

ABSTRACT

Im Schweizer Rechtsrahmen (Strahlenschutz- und Kernenergieverordnung) sind Dosisbereiche für Störfallwahrscheinlichkeiten festgelegt, die für alle Arten von Kernanlagen oder Anlagen mit radioaktivem Material gelten. Das IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) hat die internationalen Empfehlungen und die Regelwerke verschiedener Länder in diesem Bereich einer kurzen Analyse unterzogen. Dieser macht aber nur einen kleinen Teil der gesamten Sicherheitskonzepte aus.

Zur Frage 1 des Postulats 18.4107 (Wie sieht die Schweizer Strahlenschutzgesetzgebung im Vergleich zu den internationalen Best Practices aus?) zeigt die Studie, dass die in der Schweizer Regelung festgelegten Werte im Einklang mit den Praktiken in anderen Ländern stehen. Dass eine Anlage ausser Betrieb genommen werden muss, wenn bei Störfällen mit einer Wahrscheinlichkeit von über 10^{-4} pro Jahr der Wert von 100 mSv überschritten wird, scheint aber eine Besonderheit der Schweizer Regelung zu sein. Diese strenge Bestimmung wird durch den sehr präskriptiven Ansatz in den Methoden für die Berechnung der radiologischen Folgen gestützt. Das IRSN betont, dass die für die verschiedenen Wahrscheinlichkeiten festgelegten Dosiswerte allein kein ausreichendes Kriterium sind, um die regulatorischen Vorgaben der einzelnen Länder zu beurteilen, da sich die Berechnungsmethoden (insbesondere Expositionspfade und -dauer) unterscheiden können.

Betreffend die Frage 2 (Wie lassen sich die akzeptablen Risikoniveaus eines Kernkraftwerks mit denjenigen anderer Möglichkeiten der Verbreitung von Radioaktivität und externer Bestrahlung vergleichen?) ist festzuhalten, dass in der Schweiz unabhängig von der Anlagenart dieselben Kriterien (Ereignishäufigkeiten und Folgen) angewendet werden. In der internationalen Praxis liegt der Fokus auf Kernkraftwerken oder weiter gefasst auf Anlagen der Nuklearindustrie. In Frankreich gilt für kleinere Anlagen die Praxis, dass das Störfallszenario eliminiert wird, wenn es zu einer die Dosisgrenzwerte überschreitenden beruflichen Exposition führen könnte, wobei die Ereignishäufigkeit nicht berechnet wird. Im Hinblick auf ihre nächsten allgemeinen Empfehlungen prüft die ICRP (Internationale Strahlenschutzkommission), wie die Tolerierbarkeit auf verschiedene Expositionskategorien und -situationen angewendet werden kann. Aus Sicht des IRSN sind die potenziellen Expositionen, die eng mit der Risikoakzeptanz verknüpft sind, in diese Überlegungen miteinzubeziehen.

Zur Frage 3 schliesslich (Worum geht es in den aktuellen Diskussionen in Wissenschaft und Forschung bezüglich der ionisierenden Strahlung im Niedrigdosisbereich?) ist festzuhalten, dass die jüngsten Erkenntnisgewinne zu den Auswirkungen ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich die in der Schweizer Regelung festgelegten Expositionsniveaus nicht in Frage stellen. Es ist lediglich festzustellen, dass die Dosis von 100 mSv nicht mehr als Dosiswert betrachtet werden sollte, unterhalb dessen kein wissenschaftlich belegter Zusammenhang zwischen Exposition und erhöhtem zusätzlichem Krebsrisiko besteht.

Schlüsselbegriffe: Störfallwahrscheinlichkeit; Kernkraftwerk; Dosisbereich

INHALTSVERZEICHNIS

1	KONTEXT	7
2	TECHNISCHE BESCHREIBUNG	7
2.1	ERWARTUNGEN DES AUFTRAGGEBERS	7
2.2	LEISTUNG DES IRSN	8
3	ERGÄNZENDE INFORMATIONEN ZUM TEIL DES BERICHTS DES IRSN, DER ÜBER DIE BEANTWORTUNG DER FRAGEN 1 UND 2 HINAUSGEHT	8
3.1	Allgemeine Aspekte der Regelung betreffend die für ein Kernkraftwerk zu erfüllende Sicherheitsziele	9
3.2	Stellung der Bewertung der radiologischen Folgen im Sicherheitsnachweis der französischen Kernkraftwerke	11
3.3	Vorgehen und Beispiele von Ergebnissen für die vierte Periodische Sicherheitsüberprüfung der französischen 900-MWe-Reaktorreihe	12
3.3.1	Periodische Sicherheitsüberprüfung in Frankreich	12
3.3.2	Vorgehen bei der Periodischen Sicherheitsüberprüfung	13
3.3.3	Vierte Periodische Sicherheitsüberprüfung der französischen Reaktoren der 900-MWe-Reihe	13
3.3.4	Beispiele von Massnahmen, welche die Betreiber zur Zielerreichung getroffen haben	15
4	ZUGRUNDE LIEGENDE PRINZIPIEN DER KRITERIEN FÜR GEPLANTE EXPOSITIONSSITUATIONEN	20
4.1	Freistellungsgrenzen und Befreiungsgrenzen	20
4.2	Jahresgrenzwerte für die Exposition	22
4.2.1	Berufliche Exposition	22
4.2.2	Exposition der Bevölkerung	22
4.3	Dosisrichtwerte	23
4.4	Potenzielle Exposition	23
5	EREIGNISHÄUFIGKEITEN UND ZUGEHÖRIGE STRAHLENDOSISKRITERIEN	25
5.1	Die Regelung in der Schweiz	26
5.2	Internationale Bestimmungen	27
5.2.1	ICRP	28

5.2.2	IAEA.....	30
5.2.3	Euratom	31
5.2.4	WENRA.....	32
5.3	Nationale Regelwerke	33
5.3.1	Betroffene Anlagenarten	34
5.3.2	Bestehende und neue Anlagen.....	34
5.3.3	Anlagenzustände – Kategorisierung	35
5.3.4	Ereignishäufigkeit	35
5.3.5	Dosiskriterien	36
5.3.6	Kleinere Anlagen.....	39
5.3.7	Schlussfolgerung.....	40
5.4	Methode der Dosisberechnung.....	41
5.5	Synthese	42
6	GESUNDHEITSAUSWIRKUNGEN VON NIEDRIGSTRAHLUNG	44
6.1	Analyse des Berichts über den «Kenntnisstand betreffend Risiken ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich» von 2018.....	44
6.2	Übersicht über die seit 2018 in der internationalen Fachliteratur publizierten epidemiologischen Daten zu Gesundheitsrisiken im Niedrigdosisbereich	45
6.2.1	Jüngste Ergebnisse zu den Risiken für Krebs und Leukämie bei niedrigen Dosen	45
6.2.2	Jüngste Resultate zu den Risiken für andere Leiden als Krebserkrankungen bei niedrigen Dosen.....	52
6.3	Laufende Expertenberichte und Projekte	55
6.3.1	Expertenberichte zu den Krebs- und Leukämierisiken	56
6.3.2	Expertenberichte zu den Risiken für andere Erkrankungen als Krebserkrankungen	57
6.4	Schlussfolgerungen und Perspektiven	58
6.5	Quellen	59
6.6	Glossar.....	64
ANHÄNGE.....		65

ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

Abbildungen

Abbildung 1 – EASu- und UHS-Systeme.....	17
Abbildung 2 – Stabilisierung des Coriums unter Wasser nach der trockenen Ausbreitung	18
Abbildung 3 – Mobiles Kühlsystem	19
Abbildung 4 – Zustände eines Kernkraftwerks.....	30

Tabellen

Tabelle 1. Bereich der Wahrscheinlichkeiten für ein Jahr, aus dem ein Dosisrichtwert ausgewählt werden kann (ICRP-Publikation 64 (1993))	24
Tabelle 2. Geschätzte Ereignishäufigkeiten und entsprechende Dosisgrenzen (Schweizer Regelung, StSV)	26
Tabelle 3. Geschätzte Ereignishäufigkeiten und zugehörige Dosisgrenzen (Schweizer Regelung, KEV).....	26
Tabelle 4. Berechnung der Risikoricthwerte für die Schweizer Regelung.....	29
Tabelle 5. Potenzielle Betriebsstörungen und Kategorien von Auslegungsstörfällen, die in einigen Ländern für neue Reaktoren verwendet werden	30
Tabelle 6. Möglicherweise eintretende Ereignisse und in der Auslegung berücksichtigte Folgen	33
Tabelle 7. Radiologische Akzeptanzkriterien in der deutschen Regelung.....	37
Tabelle 8. Radiologische Akzeptanzkriterien in der niederländischen Regelung.....	38
Tabelle 9. Radiologische Akzeptanzkriterien in der schwedischen Regelung	38
Tabelle 10. Radiologische Akzeptanzkriterien in der US-amerikanischen Regelung.....	39

1 KONTEXT

Das Bundesamt für Energie (BFE¹) wünscht eine Stellungnahme zur Relevanz der Revision der Kernenergieverordnung vom 10. Januar 2018 und insbesondere zur Position, welche die Schweiz damit im Vergleich zu anderen europäischen Ländern, die Kernkraftwerke betreiben, einnimmt.

Das Bundesamt beauftragte drei Experten auf diesem Gebiet – François BOCHUD (Schweiz), Didier GAVILLET (Schweiz) und Patrick MAJERUS (Luxemburg) – mit der Erstellung eines Berichts zu diesen Fragen. Da diese Experten zum Teil bereits an der Erarbeitung der Verordnung mitgewirkt hatten, verlangte das Bundesamt für Energie, dass sie sich für die Stellungnahme auf Gutachten aus anderen Ländern abstützten, um eine unabhängige Bewertung zu gewährleisten. Aus diesem Grund wurde das IRSN gebeten, diese Untersuchung zu leiten und einen externen Prüfbericht zu erstellen.

2 TECHNISCHE BESCHREIBUNG

2.1 ERWARTUNGEN DES AUFTRAGGEBERS

Die zu untersuchenden Fragen werden von den drei Experten im Dokument «Postulate 18.4107: Dose limit values for nuclear installations, radioactive radiation and radiation protection – Call for tender» (11. März 2021) in Anhang 1 erläutert. Das Pflichtenheft umfasst die folgenden drei Hauptfragen:

- 1) Wie sieht die Schweizer Strahlenschutzgesetzgebung im Vergleich zu den internationalen Best Practices aus?
- 2) Wie lassen sich die akzeptablen Risikoniveaus eines Kernkraftwerks mit denjenigen anderer Möglichkeiten der Verbreitung von Radioaktivität und externer Bestrahlung vergleichen?
- 3) Worum geht es in den aktuellen Diskussionen in Wissenschaft und Forschung bezüglich der ionisierenden Strahlung im Niedrigdosisbereich?

Zudem wird auf Basis der Antworten auf diese Fragen eine allgemeine Einschätzung des Umgangs mit dem Strahlenrisiko in der Schweiz erwartet.

An einer Sitzung² am 2. März 2021 im Rahmen der Instruktion zu diesem Angebot gaben die drei Experten Präzisierungen ab, die im vorliegenden Bericht des IRSN berücksichtigt wurden.

Zu lieferndes Ergebnis ist ein Bericht, dessen Entwurf den drei Experten vor der Erstellung der Endfassung vorgelegt wird. Der Bericht wird auf für Laien verständliche Weise die Unterschiede zwischen einem präskriptiven System wie demjenigen in der Schweiz und einem System wie in Frankreich, das mehr auf zu erreichenden Zielen basiert (leistungsbasierter Ansatz), aufzeigen.

¹ Auf Französisch OFEN for Office Fédéral de l'Energie

² Das Protokoll (in französischer Sprache) ist auf Anfrage erhältlich.

2.2 LEISTUNG DES IRSN

Das IRSN hat die zur Einhaltung der Anforderungen (siehe Kapitel 2.1) verwendeten Methoden im technischen und finanziellen Angebot IRSN 120515 – Index 2, insbesondere unter dessen Ziffer 2.2, erläutert.

Die Leistung des IRSN, einschliesslich dieses Berichts, zielt darauf ab, die Bedingungen des auf ihrem technischen und finanziellen Angebot basierenden Vertrags OFEN SI/300326-01 – IRSN LW 2021-0195 vom 3. Februar 2022 zu erfüllen.

Die folgenden Kapitel befassen sich mit den drei Ausgangsfragen und mit einem über die Fragen 1 und 2 hinausgehenden ergänzenden Punkt.

3 ERGÄNZENDE INFORMATIONEN ZUM TEIL DES BERICHTS DES IRSN, DER ÜBER DIE BEANTWORTUNG DER FRAGEN 1 UND 2 HINAUSGEHT

In Übereinstimmung mit dem technischen und finanziellen Angebot des IRSN und unter Berücksichtigung der an der Sitzung vom 2. März 2021³ im Rahmen der Instruktion zu diesem Angebot abgegebenen Präzisierungen hat das IRSN Experten für nukleare Sicherheit einbezogen, um über die Beantwortung der Fragen 1 und 2 hinaus einen Einblick in den für die Kernkraftwerke in Frankreich verwendeten Ansatz zu geben (siehe weiter unten).

Die Praktiken und Regelungen in Frankreich betreffend die Tragbarkeit des Risikos von Kernkraftwerken beruhen auf der Bewertung der adäquaten Umsetzung von Sicherheitsgrundsätzen wie der gestaffelten Sicherheitsvorsorge (Defense in Depth) und dem Nachweis, dass die vom Betreiber getroffenen Vorkehrungen es in Anbetracht des Kenntnisstands, der Praktiken und der Anfälligkeit der Umwelt unter wirtschaftlich vertretbaren Bedingungen ermöglichen, die in Artikel L. 593-1 des Umweltgesetzes erwähnten Risiken und Nachteile weitmöglichst zu reduzieren (gemäss Erlass vom 7. Februar 2012 zur Festlegung der allgemeinen Regeln für Kernanlagen zur Grundlasterzeugung). Die französischen Praktiken und Regelungen basieren somit nicht auf einem quantitativen Schwellenwert für Strahlendosen.

Das IRSN wird die in der Regelung erwähnten allgemeinen Aspekte der Sicherheitsziele, die vom Kernkraftwerksbetreiber zu erreichen sind, weiter unten zusammenfassen.

Es wird diese Aspekte anhand von drei in Frankreich verwendeten Ansätzen technisch ausführen:

1. Vorgehen und Beispiele von Ergebnissen der vierten Periodischen Sicherheitsüberprüfung der 900-MWe-Reaktorreihe:
 - a. wichtigste Sicherheitsaspekte, die berücksichtigt wurden, um den genauen Umfang der Bewertung der Periodischen Sicherheitsüberprüfung der 900-MWe-Reaktorreihe festzulegen;

³ Das Protokoll (in französischer Sprache) ist auf Anfrage erhältlich.

b. drei wichtige Beispiele für Verbesserungen und entsprechende Ergebnisse hinsichtlich radiologischer Folgen.

2. Stellung der Bewertung der radiologischen Folgen im Sicherheitsnachweis.

3.1 Allgemeine Aspekte der Regelung betreffend die für ein Kernkraftwerk zu erfüllende Sicherheitsziele

Gemäss dem französischen Umweltgesetz ist der Nachweis zu erbringen, dass die ergriffenen oder geplanten technischen oder organisatorischen Massnahmen geeignet sind, die Risiken oder Nachteile einer Anlage hinreichend zu vermeiden oder zu begrenzen.

Neben diesem sehr allgemeinen Ziel finden sich im Erlass vom 7. Februar 2012 zur Festlegung der allgemeinen Regeln für Kernanlagen zur Grundlastherzeugung detailliertere Empfehlungen zu den Sicherheitszielen, die Kernanlagenbetreiber erfüllen müssen. Die entsprechenden detaillierten Empfehlungen für Kernkraftwerksbetreiber sind in Handbuch Nr. 22 der ASN (Autorité de sûreté nucléaire) betreffend die Auslegung von Druckwasserreaktoren (DWR) festgehalten. Dieses Handbuch⁴ wurde gemeinsam mit dem IRSN erarbeitet.

Gemäss dem Erlass vom 7. Februar 2012 stellt der Betreiber sicher, dass *«die in Anbetracht des Kenntnisstands, der Praktiken und der Anfälligkeit der Umwelt getroffenen Vorkehrungen zur Ausübung der Tätigkeiten es ermöglichen, die in Artikel L. 593-1 des Umweltgesetzes erwähnten Risiken und Nachteile unter wirtschaftlich vertretbaren Bedingungen weitmöglichst zu reduzieren»*. Der Nachweis der nuklearen Sicherheit wird in diesem Zusammenhang als Ziel definiert, *«die Risiken von radiologischen oder nicht-radiologischen Störfällen und das Ausmass ihrer Folgen in Anbetracht des heutigen Kenntnisstands, der Praktiken und der Anfälligkeit der Umwelt der Anlage unter wirtschaftlich vertretbaren Bedingungen weitmöglichst zu reduzieren»*. Der Erlass vom 7. Februar 2012 zum Sicherheitsnachweis widerspiegelt die französische Praxis, wonach dieser Nachweis insbesondere auf der Anwendung von Sicherheitsgrundsätzen wie der gestaffelten Sicherheitsvorsorge (Defense in Depth), der Gewährleistung der wesentlichen Sicherheitsfunktionen oder der Aneinanderreihung von ausreichend voneinander unabhängigen Barrieren beruht.

Das Handbuch Nr. 22 der ASN enthält detailliertere Empfehlungen zu Sicherheitszielen und -grundsätzen für die DWR. Ohne alle relevanten Artikel dieses Handbuchs zu erwähnen, kann der Inhalt des Kapitels über die Sicherheitsziele allgemein wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Exposition von Personen, Abgaben über Abwasser und radioaktive Abfälle, die mit dem Normalbetrieb verbunden sind, sind so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar zu halten;

⁴ Da dieses Handbuch hauptsächlich die Auslegung von DWR der neuen Generation betrifft, können die darin enthaltenen Empfehlungen auch als Referenz für Verbesserungen von in Betrieb stehenden Reaktoren – beispielsweise während Periodischen Sicherheitsüberprüfungen – verwendet werden. Es kann auf vorsichtiger Basis auch für Kernkraftwerke mit anderen Reaktortypen eingesetzt werden.

<https://www.irsn.fr/FR/expertise/demarches-de-surete/Pages/Surete-Guide-ASN-22-Conception-des-reacteurs-a-eau-sous-pressure.aspx#.Y1jFibbP3g4>

- im Falle einer Betriebsstörung oder eines Störfalls sind die Freisetzung radioaktiver oder gefährlicher Stoffe oder die schädlichen Folgen und ihre Auswirkungen auf Mensch und Umwelt so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar zu halten;
- radiologische Störfälle sollen vermieden und die Folgen von Störfällen, die trotz der ergriffenen präventiven Massnahmen eintreten könnten, verringert werden. Zu diesem Zweck sollen bei der Auslegung Entscheidungen getroffen werden, die Folgendes ermöglichen:
 - Reduktion der Zahl der Störfälle auf ein Minimum und Begrenzung der Störfallmöglichkeiten;
 - die Häufigkeit von Störfällen, die zu einer Brennstoffschmelze führen, soll so weit wie vernünftigerweise möglich reduziert werden;
 - Verhinderung oder Begrenzung der radioaktiven Freisetzungen aus Störfällen, einschliesslich aus Störfällen mit Brennstoffschmelze; insbesondere soll eine Kontamination der Wärmesenke und des Grund- oder Oberflächenwassers durch radioaktive Stoffe verhindert werden.
- Spezifischere Zielsetzungen:
 - Bei Störfällen ohne Brennstoffschmelze (im Reaktorkern oder im Abklingbecken) sollen die radiologischen Folgen so niedrig wie vernünftigerweise möglich gehalten werden und in keinem Fall dazu führen, dass Massnahmen zum Bevölkerungsschutz (geschützter Aufenthalt, Einnahme von Jodtabletten, Evakuierung) umgesetzt werden müssen;
 - die geschätzte Häufigkeit von Brennstoffschmelzen soll so gering wie vernünftigerweise möglich sein und in jedem Fall unter 10^{-5} pro Jahr und Anlage liegen, wobei alle Arten von (durch Menschen oder Material verursachten) Ausfällen und Gefahren (ausgenommen böswillige Handlungen) berücksichtigt werden;
 - Störfallsituationen mit Brennstoffschmelze, die zu einer signifikanten Freisetzung von Radioaktivität führen könnten und sich zu schnell entwickeln, als dass die erforderlichen Bevölkerungsschutzmassnahmen rechtzeitig ergriffen werden könnten, müssen physisch verunmöglicht oder andernfalls mit hoher Verlässlichkeit äusserst unwahrscheinlich gemacht werden;
 - Umfang und Dauer der Bevölkerungsschutzmassnahmen, die bei den übrigen Störfällen mit Brennstoffschmelze notwendig wären, müssen sehr beschränkt sein (keine dauerhafte Umsiedlung, keine Evakuierung ausserhalb der unmittelbaren Umgebung des Standorts, kein Aufsuchen von Schutzräumen ausserhalb der Umgebung des Standorts, keine langfristige Einschränkung des Konsums von Lebensmitteln ausserhalb der Umgebung des Standorts). Solche Störfälle dürfen deshalb nicht zu einer weiträumigen Kontamination und dauerhaften Verschmutzung der Umweltmedien führen.

3.2 Stellung der Bewertung der radiologischen Folgen im Sicherheitsnachweis der französischen Kernkraftwerke

Gemäss Artikel 3.7 des oben erwähnten Erlasses vom 7. Februar 2012 muss der Sicherheitsnachweis eine Bewertung der radiologischen Folgen der erwarteten Störfälle umfassen.

Der Sicherheitsnachweis eines Kernkraftwerks soll zeigen, dass die vom Betreiber getroffenen Massnahmen ein ausreichendes Sicherheitsniveau gewährleisten, das hauptsächlich auf einer sachgerechten Auslegung und Bemessung der Strukturen, Systeme und Komponenten (SSC) des Kernkraftwerks und auf der Umsetzung angemessener Herstellungs-, Bau- und Betriebsanforderungen, einschliesslich organisationsbezogener Vorgaben, basiert.

Dabei ist zu beachten, dass sich die unten erwähnte Bewertung der radiologischen Folgen nur auf die Bewertung der radiologischen Folgen im Rahmen des Sicherheitsnachweises bezieht. Sie bezieht sich nicht auf andere Bewertungen der radiologischen Folgen, etwa solche, die in einer Notfallsituation oder für Notfallvorsorge- oder Sicherheitsstudien durchgeführt werden.

Die Bewertung der radiologischen Folgen trägt wesentlich dazu bei, die Angemessenheit und Hinlänglichkeit dieser Vorkehrungen abschliessend zu überprüfen. Sie soll den Sicherheitsnachweis mit Blick auf die allgemeinen Sicherheitsziele stützen. Unabhängig vom Bewertungsergebnis muss der Betreiber nachweisen, dass die Auswirkungen seines Kernkraftwerks auf Mensch und Umwelt bei einem Störfall so niedrig wie vernünftigerweise möglich bleiben. Der Betreiber kann deshalb keine vorgängig festgelegten Dosisgrenzwerte als Akzeptanzkriterien verwenden: Die relevanten Kriterien betreffen insbesondere den Zustand der Barrieren zwischen dem radioaktiven Material und der Umwelt. Für den Zustand der verschiedenen Barrieren werden «Entkopplungskriterien» festgelegt, deren Einhaltung in Störfallstudien überprüft wird. Werden diese «Entkopplungskriterien» erfüllt, ist in der Regel auch die Übereinstimmung mit den radiologischen Zielen für die verschiedenen Ereigniskategorien sichergestellt. Dennoch liefert die Bewertung der radiologischen Folgen wertvolle Beurteilungselemente, die auf Grössenordnungen der Auswirkungen dieser Situationen auf Mensch und Umwelt beruhen. In diesem Zusammenhang besteht die Beurteilung der radiologischen Folgen darin, relevante radiologische oder «dosimetrische» Indikatoren zu berechnen, anhand derer geprüft wird, ob die Ziele bezüglich der Folgen der im Sicherheitsnachweis betrachteten Störfallsituationen erfüllt werden.

Im Rahmen der ursprünglichen Auslegung einer Anlage gibt diese Bewertung Aufschluss darüber, ob die für eine Anlage vorgesehenen Sicherheitsvorkehrungen zufriedenstellend sind. Neben der Überprüfung der Störfallstudien ermöglichen diese Bewertungen zudem, dominante Beiträge (Radionuklide, Freisetzungspfade, Expositionspfade) zu identifizieren und Massnahmen zu ermitteln, um deren Auswirkungen zu verringern.

Die Bewertung der radiologischen Folgen wird auch im Rahmen der Periodischen Sicherheitsüberprüfung verwendet. Sie wird dort bei der Ausgestaltung der Überprüfung und der Verbesserungen berücksichtigt, die im Hinblick auf das Ziel, die Auswirkungen solcher Situationen so weit wie vernünftigerweise möglich zu begrenzen, an der Auslegung der Anlage vorzunehmen sind. Schliesslich dient die Bewertung der radiologischen Folgen neben anderen Elementen auch dazu, die Tragbarkeit einer Änderung an der Anlage zu beurteilen. Es ist deshalb möglich, dass eine Änderung, welche die radiologischen Folgen in bestimmten Störfallsituationen verstärken

würde, als akzeptabel betrachtet werden könnte, insbesondere wenn andere Elemente dazu beitragen, dass sie für die Sicherheit relevant ist.

Die in diesem Dokument erwähnten Bewertungen der radiologischen Folgen sind nicht absoluter Art, sondern konventioneller Natur, d. h. sie entstehen innerhalb eines vereinbarten Vorgehens: Dabei wird berücksichtigt, welches Ziel sie im Rahmen von Sicherheitsnachweisen verfolgen. Diese Bewertungen stützen sich deshalb auf die Annahmen, die für die in den Sicherheitsberichten präsentierten Studien gewählt wurden; sie sind weder dazu bestimmt, einen Rahmen für die mit einer bestimmten Anlage verbundenen Risiken bereitzustellen, noch den Umfang der internen Notfallpläne (Plans d'urgence interne, PUI), der besonderen Einsatzpläne (Plans particuliers d'intervention, PPI) oder der entsprechenden Pläne für die Zeit nach einem Störfall festzulegen, die auf unterschiedlichen Annahmen beruhen können. Ebenso unterscheiden sich die Art und Verwendung der in diesem Dokument erwähnten Bewertung der radiologischen Folgen grundlegend von den Bewertungen der radiologischen Folgen, die andernorts im Rahmen von Sicherheitsstudien durchgeführt werden; letztere dienen dazu, die zu schützenden Ziele zu identifizieren und die zu ergreifenden Schutzmassnahmen festzulegen.

3.3 Vorgehen und Beispiele von Ergebnissen für die vierte Periodische Sicherheitsüberprüfung der französischen 900-MWe-Reaktorreihe

3.3.1 Periodische Sicherheitsüberprüfung in Frankreich

Gemäss Artikel L. 539-18 des französischen Umweltgesetzes müssen Betreiber von Kernanlagen alle zehn Jahre eine Periodische Sicherheitsüberprüfung der Anlage durchführen. Periodische Sicherheitsüberprüfungen sind eine ideale Gelegenheit, um umfangreiche Inspektionen und Änderungen an den Anlagen vorzunehmen und so die Sicherheit unter Berücksichtigung von geänderten Anforderungen und bewährten Praktiken sowie neuen Erkenntnissen und Betriebserfahrungen zu verbessern. Bei diesen Sicherheitsüberprüfungen wird nicht nur die Konformität der Anlage, einschliesslich einer Bewertung der Beherrschung altersbedingter Degradationserscheinungen, überprüft, sondern auch die Sicherheit der Anlage neu bewertet.

Der in Frankreich für die zehnjährlichen Sicherheitsüberprüfungen der DWR verwendete allgemeine Ansatz besteht deshalb aus den folgenden beiden Teilen:

- In einer **Konformitätsprüfung** wird beurteilt, ob die Anlagen die für sie geltenden Sicherheitsvorgaben erfüllen:
 - Einerseits wird überprüft, ob die Konformität des Standard-Bau- und Betriebszustands der Anlagen der im Sicherheitsbericht beschriebenen Konformität und den geltenden allgemeinen Betriebsvorschriften entspricht. Die dafür durchgeführten Studien werden «Konformitätsstudien» genannt;
 - andererseits wird durch Inspektionen vor Ort die tatsächliche Konformität der einzelnen Kernreaktoren mit diesem Standard-Bau- und Betriebszustand überprüft.
- Eine **Neubewertung der Sicherheitsanforderungen**. Ziel ist, die Anlagensicherheit unter Berücksichtigung der Änderungen der für die neuesten oder geplanten Anlagen geltenden

Sicherheitsvorgaben zu verbessern. Ebenfalls zu berücksichtigen sind Bereiche, in denen Rückmeldungen oder geänderte technische Erkenntnisse zu Anpassungen der geltenden Sicherheitsvorgaben führen dürften. Die Studien, die unter Berücksichtigung dieser neu bewerteten Anforderungen das zufriedenstellende Verhalten der Anlagen überprüfen, werden «Sicherheitsbewertungsstudien» genannt.

Dieses System entspricht den Anforderungen der Richtlinie der Europäischen Union über die nukleare Sicherheit⁵.

3.3.2 Vorgehen bei der Periodischen Sicherheitsüberprüfung

Alle französischen Kernkraftwerke werden von einem Konzern betrieben. Der Kernkraftwerkspark ist insofern speziell, als er eine grosse Zahl von Druckwasserreaktoren umfasst, die sich drei Typen – oder Reihen – mit sehr ähnlichen allgemeinen Merkmalen zuordnen lassen.

Die Periodische Sicherheitsüberprüfung wird deshalb in zwei Phasen unterteilt, um den gemeinsamen Merkmalen der verschiedenen Reaktorreihen Rechnung zu tragen:

- eine «generische» Phase der Überprüfung, die sich mit Fragen befasst, die alle Reaktoren eines bestimmten Typs betreffen. Dieser generische Ansatz erlaubt die Bündelung der Studien und Änderungen, welche die Erfüllung der für die Überprüfung festgelegten Ziele ermöglichen. Am Ende der generischen Phase definiert der Betreiber, welche Änderungen zu integrieren sind, damit die Reaktoren dem beim Abschluss der Periodischen Sicherheitsüberprüfung erwarteten Referenzzustand entsprechen;
- eine «spezifische» Phase der Sicherheitsbewertung für jeden Reaktor in der betroffenen Reihe. In dieser Phase können die Erkenntnisse aus der generischen Phase (materielle und intellektuelle Anpassungen) integriert und die Besonderheiten des Reaktors (Umwelt, Konformität usw.) geprüft werden.

Das Sicherheits-Referenzniveau beim Abschluss der Überprüfung wird als bis zur nächsten Sicherheitsüberprüfung stabil betrachtet. Der Prozess der kontinuierlichen Sicherheitsverbesserung kann aber dazu führen, dass sich dieses Referenzniveau im Zeitraum zwischen zwei Überprüfungen verändert. Dies kann der Fall sein, wenn signifikante Sicherheitsverbesserungen berücksichtigt werden müssen, die sich insbesondere aus den Erfahrungen bei Grossereignissen wie dem Störfall in Fukushima im Jahr 2011 ergeben.

3.3.3 Vierte Periodische Sicherheitsüberprüfung der französischen Reaktoren der 900-MWe-Reihe

Die vierte Periodische Sicherheitsüberprüfung der 900-MWe-Reaktoren hat folgende Hauptzielsetzungen:

- Integration des «Hardened Safety Core» als Fukushima-Folgemaßnahme;
- Neubewertung der Betriebsbedingungen der Reaktoren und der diesen zugeordneten radiologischen Folgen von Störfällen ohne Kernschmelze. Dabei wird das Ziel angestrebt, **dass keine Massnahmen zum**

⁵ Richtlinie des Rates der Europäischen Union 2014/87/Euratom vom 8. Juli 2014, Artikel 8c Absatz b

Bevölkerungsschutz umgesetzt werden müssen (kein geschützter Aufenthalt, keine Evakuation und keine Einnahme von Jodtabletten während der so genannten «kurzfristigen» Phase des Störfalls (von ein paar Stunden bis maximal 7 Tagen));

- Neubewertung der Bewältigung schwerer Störfälle (mit Kernschmelze) **mit dem Ziel, das Risiko frühzeitiger oder grosser Freisetzungen von radioaktiven Stoffen** zu mindern (bei einem bewältigten schweren Störfall müssen Umfang und Dauer der Bevölkerungsschutzmassnahmen sehr begrenzt sein);
- Neubewertung der mit der Brennelementlagerung im Becken verbundenen Risiken (Ziel ist, **das Risiko einer Trockenlegung der unter Wasser gelagerten Brennstabündel so weit wie möglich zu verringern**);
- Verbesserung der probabilistischen Sicherheitsanalysen der Stufe 1 zur Kernschmelze sowie ihres Ziels (Erreichen eines Restrisiko-Niveaus derselben Grössenordnung wie das Ziel für Reaktoren der dritten Generation), das auf die Risiken von Bränden, internen Überflutungen, internen Explosionen und Erdbeben ausgeweitet wurde;
- Verbesserung der probabilistischen Sicherheitsstudien der Stufe 2 hinsichtlich Freisetzungen von Radioaktivität;
- Neubewertung der Risiken von internen und externen naturbedingten Gefahren (im Zusammenhang mit dem Klimawandel, Erdbeben, der Umwelt oder menschlichen Aktivitäten), Überprüfung der Angemessenheit und Wirksamkeit der Schutzmassnahmen und bei Bedarf Festlegung neuer Massnahmen;
- Bewertung des Anlagenverhaltens im Fall einer extremen Naturgefahr mit dem Ziel, grosse Freisetzungen zu verhindern und die radiologischen Folgen örtlich und zeitlich zu begrenzen;
- Bewertung des Verhaltens der 900-MWe-Reaktoren hinsichtlich der Reaktionszeiten der Betreiber und der für den EPR-Flamanville-3 berücksichtigten Anlagenzustandskategorien (PCC);
- Verbesserung der Betriebsbedingungen hinsichtlich der menschlichen und organisatorischen Faktoren (HOF);
- Verbesserung des Alterungs- und Obsoleszenzmanagements.

Nachdem das IRSN das Dossier der EDF (Électricité de France) geprüft hatte, publizierte die ASN im April 2016 eine Stellungnahme zum ursprünglich für die generischen Analysen vorgesehenen Programm. Zuvor hatte eine öffentliche Konsultation zu den Entwürfen der Ergänzungsanträge zuhanden der EDF stattgefunden, welche insbesondere die Berücksichtigung bestimmter Anforderungen für den EPR-Reaktor Flamanville 3 betrafen. Die ASN nahm Anfang 2021 Stellung zu den generischen Analysen im Rahmen dieser Periodischen Überprüfung, nachdem sie das Gutachten der Begleitgruppe (GPR), das sich auf die Bewertung der Periodischen Sicherheitsüberprüfung 2020 durch das IRSN stützte, erhalten und wiederum eine öffentliche Konsultation stattgefunden hatte.

Diese Stellungnahme betraf insbesondere die Methoden für die Überprüfung der Anlagenkonformität und des Alterungs- sowie Obsoleszenzmanagements, die mechanische Festigkeit der bis zu 50 Jahre alten Reaktordruckbehälter sowie die Analysen der Sicherheit der Abklingbecken, der Begrenzung der Folgen von

Störfällen ohne Kernschmelze, der Verbesserung der Bewältigung von Störfällen mit Kernschmelze und der Fähigkeit der Anlagen, internen und externen Gefahren zu widerstehen.

Der Reaktor Nr. 1 in Tricastin wurde 2019 als erster Reaktor der vierten Periodischen Sicherheitsüberprüfung unterzogen. Die letzte Periodische Überprüfung eines 900-MWe-Reaktors ist für 2030 geplant.

3.3.4 Beispiele von Massnahmen, welche die Betreiber zur Zielerreichung getroffen haben

Die folgenden Beispiele des in Frankreich angewendeten Ansatzes betreffen Fälle, in denen Änderungen direkt durch die Berechnung der radiologischen Folgen eingeleitet wurden. Es werden aber auch Fälle beschrieben, in denen für grössere Änderungen keine solche Berechnung durchgeführt werden muss, um zu belegen, dass ihre Umsetzung auch hinsichtlich der radiologischen Folgen wichtig ist.

3.3.4.1 Auslegungsstörfälle

Zur Erfüllung des Ziels, die radiologischen Folgen von Auslegungsstörfällen so weit wie vernünftigerweise möglich weiter zu verringern und Niveaus von radiologischen Folgen zu erreichen, bei denen keine Bevölkerungsschutzmassnahmen (geschützter Aufenthalt, Evakuierung und Einnahme von Jodtabletten) umzusetzen sind, schlug die EDF im Sicherheitsbericht für das kritischste Szenario bezüglich radiologischer Folgen (Dampferzeugerrohrbruch, SGTR – Störfall, bei welchem ein Rohr in einem Dampferzeuger bricht, als Zustand der Kategorie 4) Massnahmen vor, um die radiologischen Folgen deutlich zu verringern.

Das Ausmass der radiologischen Folgen eines SGTR-Störfalles hängt zum einen von der Grössenordnung der Freisetzungen (im Wesentlichen in der Flüssigwasserphase, wobei davon ausgegangen wird, dass die Spaltprodukte bei Freisetzungen vollständig in die Atmosphäre abgegeben werden) ab, zum anderen vom Grad der Kontamination des Primärkreislaufs (welcher den Sekundärkreislauf über den SGTR kontaminiert) durch Spalt- oder Korrosionsprodukte.

In diesem Zusammenhang schlug die EDF vor, während Leistungstransienten **den Schwellenwert für die Ausserbetriebnahme des Reaktors in ^{131}I -Äquivalent** (von 100 000 MBq/t auf 80 000 MBq/t) herabzusetzen. Diese Senkung ermöglicht eine signifikante Reduktion der radiologischen Folgen, die im Sicherheitsbericht für Störfälle bewertet wurden, die sich während des Reaktorbetriebs ereignen und nicht zu einem Bruch der Brennstoffhülle führen.

3.3.4.2 Störfälle mit Kernschmelze

Ein Störfall mit Kernschmelze kann zu kurz- oder langfristigen Freisetzungen in die Umwelt führen, wenn die Integrität des Containments nicht mehr aufrechterhalten werden kann. Die verschiedenen mit Störfällen mit Kernschmelze verbundenen Risiken werden analysiert. Gegebenenfalls werden Massnahmen umgesetzt, um entweder die Eintrittswahrscheinlichkeit der betreffenden Situationen zu verringern oder deren Eintritt zu verzögern und die Folgen zu begrenzen.

Zur Erreichung dieses Ziels hat die EDF ein **neues System** (ultimatives Containment-Sprühsystem EASu / ultimative Wärmesenke UHS) für die Wärmeableitung aus dem Containment konzipiert und Massnahmen getroffen, um **das Corium** auf dem Boden der Reaktorgrube und eines Seitenraums im Reaktorgebäude **zu stabilisieren**. Diese neuen Massnahmen ergänzen die bestehenden Vorkehrungen (Containment-Sprühsystem

(EAS), U5-Anlage zur Filterung möglicher Freisetzungen in die Umwelt, Wasserstoff-Rekombinatoren zur Verhinderung der H₂-Explosion im Containment, Belüftung des Kontrollraums, um ihn betretbar zu halten) und verstärken die Möglichkeiten für eine langfristige Bewältigung eines Störfalls mit Kernschmelze. Verhindert werden sollen insbesondere die Freisetzung von Radioaktivität durch Öffnen des Systems der gefilterten Containment-Druckentlastung (U5) oder langfristige Umweltauswirkungen im Fall eines Durchdringens der Bodenplatte. Diese neuen Vorkehrungen tragen somit dazu bei, die radiologischen Folgen von Störfällen mit Kernschmelze zu verringern.

Abführung der Restleistung ohne Öffnen der U5-Anlage

Ohne Energieabführung aus dem Containment haben die Verdampfung von Wasser auf dem Corium und die Erzeugung nicht kondensierbarer Gase während der Wechselwirkungen zwischen Corium und Beton zur Folge, dass sich im Containment langsam Druck aufbaut. Dieser Druck kann bis zum Auslegungsdruck des Containments ansteigen und die Öffnung des U5-Systems erfordern, was zu radiologischen Freisetzungen in die Umwelt führt.

Im Rahmen der vierten Periodischen Sicherheitsüberprüfung ermöglicht die Einrichtung des EASu-Systems, dass die folgenden beiden Funktionen gewährleistet sind:

- Fluten und Kühlen des Coriums inner- und ausserhalb des Druckbehälters;
- Abführung der Restleistung aus dem Containment.

Das EASu-System ermöglicht es, im Fall eines schweren Unfalls die Restleistung aus dem Containment abzuführen. Es besteht zum einen aus einer EASu-Pumpe, die durch direkte Einspeisung aus dem Reservoir des Sicherheitseinspeisesystems (PTR) oder im Rücklauf aus dem Reaktorgebäudesumpf betrieben wird, und zum anderen aus einem EASu-Tauscher, der die Kühlung des zugeführten Wassers sicherstellt und selbst mit der ultimativen Wärmesenke (UHS) verbunden ist. Die UHS besteht aus einer mobilen Pumpvorrichtung, die durch spezialisierte Teams transportiert und installiert wird (siehe Figure 1).

Das EASu-System soll Kernschmelz-Situationen vorbeugen, die zur Öffnung des Systems der gefilterten Containment-Druckentlastung (U5) führen würden. Es trägt zudem dazu bei, die radiologischen Folgen kontrollierter Containment-Situationen einzudämmen.

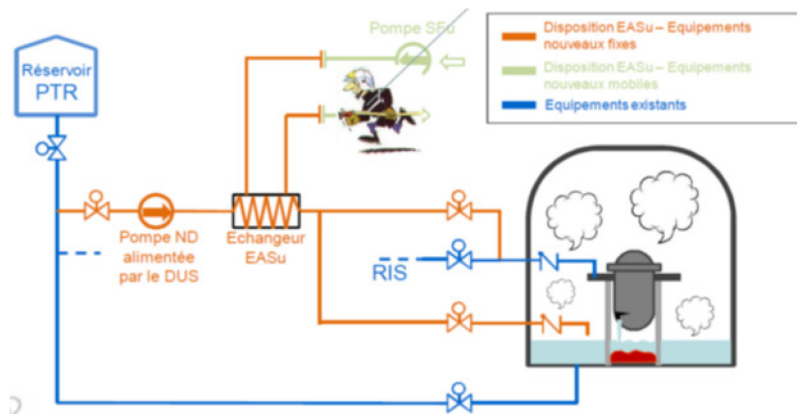


Abbildung 5 – EASu- und UHS-Systeme

Vorkehrungen gegen das Risiko eines Containment-Versagens infolge Erosion und/oder Durchdringen der Betonbodenplatte

Bei einem Störfall mit Kernschmelze kann sich ein Corium-See bilden, der den Druckbehälter schliesslich durchdringen kann. Dies kann zur Erosion der Bodenplatte führen, wodurch das Containment gefährdet ist.

Um bei einem Kernschmelzstörfall das Risiko eines Containment-Versagens durch die Erosion der Bodenplatte zu begrenzen, wird ein System eingerichtet, bei dem das Corium nach einer trockenen Ausbreitung unter Wasser stabilisiert wird (siehe Figure 2): Nach dem Bruch des Druckbehälters breitet sich das Corium in der Reaktorgrube und in einem angrenzenden Instrumentenraum (RIC-Raum) aus.

Eine trockene Ausbreitung des Coriums wird durch die vorgängige Abdichtung der Reaktorgrube und des angrenzenden RIC-Raums gewährleistet. Kurz darauf wird das Corium mit Wasser aus dem vorgängig gefüllten Sumpf im untersten Teil des Behälters passiv geflutet. Dieses Wasser wird dann durch das EASu-System gekühlt.

Das Corium wird entweder passiv mit dem Wasser aus dem Sumpf und dem untersten Teil des Reaktorbehälters – die vorgängig durch die RIS- (Sicherheitseinspeisung) oder EAS-Kreisläufe (Sprühsystem) oder die EASu-Pumpe gefüllt wurden – erneut geflutet, oder es wird nach der Ausbreitung aktiv durch Wassereinspeisung in den Behälter geflutet, wenn der Sumpf im Reaktordruckbehälter nicht gefüllt worden ist.

Die Messung zur Feststellung eines Durchdringens des Druckbehälters (Thermoelement in der Reaktorgrube) ermöglicht es, ein Durchdringen des Druckbehälters zu erkennen und damit sicherzustellen, dass das Corium zum effektivsten Zeitpunkt via Behälter mit Wasser geflutet wird. Dieser Zeitpunkt entspricht dem erneuten Fluten nach der trockenen Ausbreitung des Coriums.

Das passive Fluten des Coriums wird durch redundante Kernbohrungen in den Wänden der Reaktorgrube und des angrenzenden RIC-Raums sichergestellt. Eine Schmelzsicherung garantiert die Abdichtung zwischen dem im untersten Teil des Reaktorgebäudes angesammelten Wasser und der Ausbreitungsfläche. Dies trägt dazu bei, die trockene Ausbreitung des Coriums zu gewährleisten. Sobald sich das Corium ausgebreitet hat, brechen die Schmelzsicherungen und die Abdichtung wird entfernt.

Das EASu-System und die ultimative Wärmesenke stellen langfristig die Kühlung des Coriums und Abführung der Restleistung aus dem Druckbehälter sicher.

Im Prinzip ist diese Lösung mit der bei Reaktoren der neuen Generation umgesetzten Lösung (Corecatcher) vergleichbar.

Bei einem Störfall mit Kernschmelze würde diese Änderung die Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umwelt und damit die radiologischen Folgen erheblich verringern.

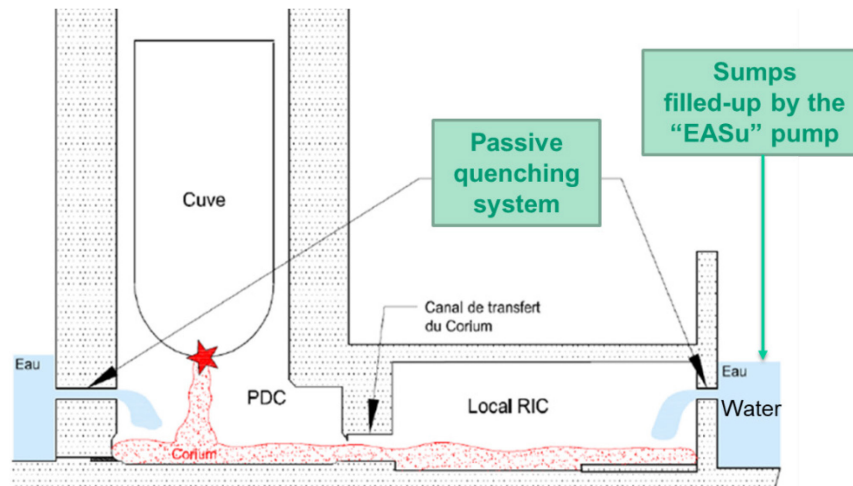


Abbildung 6 – Stabilisierung des Coriums unter Wasser nach der trockenen Ausbreitung

Abklingbecken

Neben den zur Reduktion der radiologischen Folgen von Störfällen im Reaktor umgesetzten Massnahmen hat der Betreiber auch eine Vorkehrung getroffen, um die Wahrscheinlichkeit eines Störfalls im Abklingbecken zu verringern.

Das Gebäude, in dem sich das Abklingbecken befindet, ist nicht mit einem Containment-System versehen. Deshalb wurde die Strategie gewählt, eine Störfallsituation, die zu einer Freisetzung in die Umwelt und damit zu radiologischen Folgen führen würde, unwahrscheinlich zu machen. Dazu ist mit hoher Verlässlichkeit zu garantieren, dass die Brennstabündel nicht trockengelegt werden.

Der Ausfall der ultimativen Wärmesenke führt zum Verlust der Kühlung des Beckens, in dem die abgebrannten Brennstäbe zwischengelagert werden. Zur Störfallbeherrschung ist vorgesehen, die Restleistung durch Sieden des Beckenwassers aus den Brennelementen abzuführen und wieder Wasser einzuspeisen, damit der Wasserstand im Becken ausreichend hoch, d. h. oberhalb der Brennelemente, bleibt. Bei diesem Vorgehen muss der entstehende Dampf durch Öffnung eines Ventils aus dem Brennelementgebäude entweichen können, um einen Druckanstieg zu verhindern. Die Wasserzufuhr kann entweder über den Kreislauf mit demineralisiertem Wasser oder über den Löschwasserkreislauf sichergestellt werden.

Bereits 2010 hatte die EDF eine spezifische Notfallregelung für das Abklingbecken erstellt. Der Reaktorunfall in Fukushima-Daiichi 2011 bestätigte die Relevanz der Strategie der EDF, die heute in allen Reaktoren fast vollständig umgesetzt ist. Dieser Störfall zeigte aber auch, wie wichtig es ist, eine zuverlässige Frischwasserzufuhr

zu gewährleisten, um die durch das Sieden des Beckenwassers entstehenden Verluste zu kompensieren, während auf die Kühlung des Beckens im geschlossenen Kreislauf gewartet wird. Im Rahmen der Phase 2 ihres Post-Fukushima-Aktionsplans führte die EDF eine «ultimative» Wasserversorgung für das Abklingbecken ein.

Schliesslich richtet die EDF im Rahmen der vierten zehnjährlichen Periodischen Sicherheitsüberprüfung für 900-MWe-Reaktoren ein diversifiziertes mobiles Kühlsystem ein, mit dem das Becken wieder gekühlt werden kann, wenn die Kühlung durch das ursprünglich dafür vorgesehene System dauerhaft beeinträchtigt ist. Das mobile System ermöglicht in diesem Fall, die Kühlung des Abklingbeckens im geschlossenen Kreislauf wieder aufzunehmen und damit das Ventil des Brennelementgebäudes zu schliessen. Das System besteht aus einem fixen und einem mobilen Teil (siehe Figure 3).

Es stellt einen bedeutenden Fortschritt in der Reaktorsicherheit dar. Das System wird im Rhythmus der zehnjährlichen Wartungsprogramme für 900-MWe-Reaktoren eingeführt und es ermöglichen, in den meisten für Abklingbecken möglichen Störfallsituationen – ob durch einen externen Angriff oder ein internes Ereignis – einen sicheren Zustand zu erreichen (Wiederaufnahme der Kühlung im geschlossenen Kreislauf). Dieses System ist auch für die nächsten Periodischen Überprüfungen der 1300- und 1450-MWe-Reaktoren geplant.

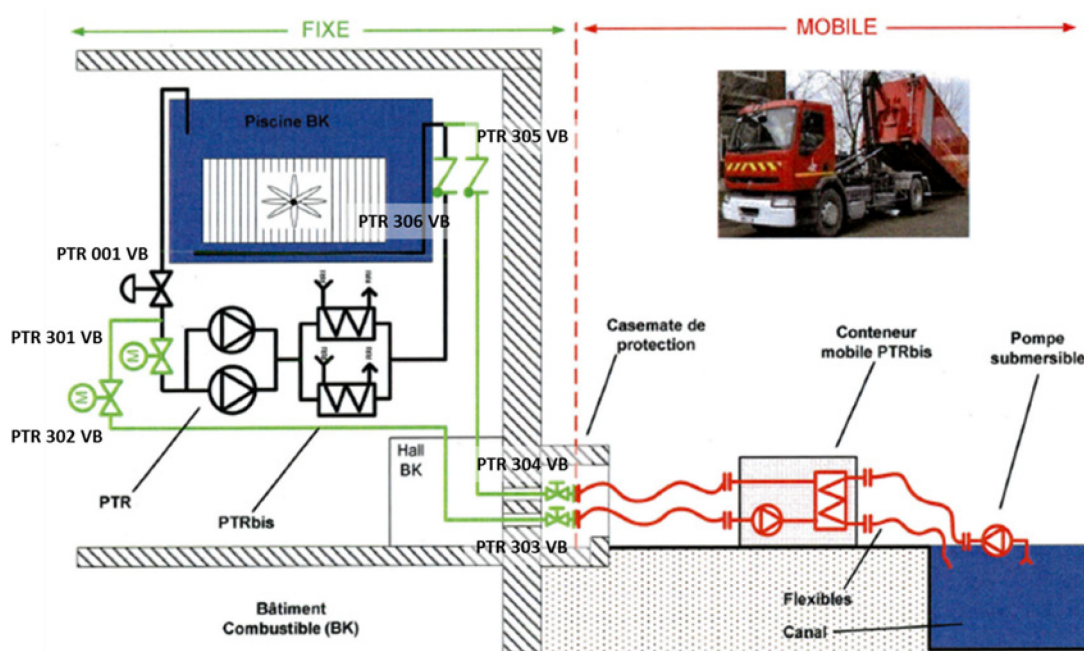


Abbildung 7 – Mobiles Kühlsystem

4 ZUGRUNDE LIEGENDE PRINZIPIEN DER KRITERIEN FÜR GEPLANTE EXPOSITIONSSITUATIONEN

Wenn eine Regelung zu erfüllende Werte oder Kriterien umfasst, werden die hinter der Festlegung dieser Werte oder Kriterien stehenden Überlegungen oder Bezugsgrößen nie präzisiert. Das bringt oft die Schwierigkeit mit sich, dass Werte oder Kriterien sehr plötzlich überschritten oder nicht eingehalten werden. Es ist verständlich, dass diese Werte oder Kriterien für bestimmte Risiken existieren. Aber es ist eher schwierig, sie im Fall einer Exposition gegenüber als krebserregend anerkannten Agenzien wie Strahlung, ionisierender Strahlung oder bestimmten chemischen Stoffen, bei der meistens ein lineares Modell ohne Schwellenwert angewendet wird, entschieden zu verteidigen.

Im Zusammenhang mit Fragen zur Entwicklung der Kriterien oder zu den Folgen ihrer Nichterfüllung in der Regelung schien uns aber wichtig, diese Argumente oder Referenzen so weit wie möglich neu zu definieren.

Um den Umfang unserer Untersuchungen zu begrenzen, haben wir uns auf den Geltungsbereich von Artikel 123 der Strahlenschutzverordnung (StSV) und des entsprechenden Artikels der Kernenergieverordnung (KEV) konzentriert. Diese Artikel gelten für zugelassene Anlagen, was sich klar auf geplante Expositionssituationen nach ICRP-Empfehlung 103 bezieht. Die folgenden Kriterien (in aufsteigender Reihenfolge) werden in der Regel für solche geplanten Expositionssituationen definiert:

- Freistellungsgrenzen und Befreiungsgrenzen;
- Expositionsgrenzwerte für die Bevölkerung und für das Personal, die während des Normalbetriebs einer Anlage gelten;
- Dosisrichtwerte für die Bevölkerung und für das Personal;
- Risikorichtwerte, die bei potenziellen Expositionen gelten. Im Strahlenschutzsystem der ICRP gehören potenzielle Expositionen zu den geplanten Expositionssituationen.

4.1 Freistellungsgrenzen und Befreiungsgrenzen

In der Publikation Strahlenschutz Nr. 65 der Europäischen Gemeinschaft (Grundsätze und Methoden zur Festlegung von Konzentrationen und Größen (Freistellungswerte), bei deren Unterschreitung die Meldung nach der Europäischen Richtlinie nicht notwendig ist) wird die Freistellung wie folgt beschrieben: Der Grundsatz der Freistellung beschränkt den Anwendungsbereich der regulatorischen Vorschriften unter Berücksichtigung des Gedankens der Vernachlässigbarkeit und der Kontrolleffizienz: Unterhalb eines gewissen Risikoniveaus erweist sich die regulatorische Aufsicht als ineffizient oder sogar gesellschaftlich schädlich. Die ICRP, die IAEA und die Europäische Kommission stellen bei der Definition dieses Begriffs der Freistellung regulatorische Fragen und weniger die gesundheitlichen Auswirkungen in den Vordergrund. Am präzisesten wird der Begriff in den Sicherheitsstandards GSR Part 3 der IAEA definiert:

«Für die Freistellung einer Tätigkeit oder einer mit der Tätigkeit verbundenen Quelle von bestimmten oder allen Anforderungen der [GSR Part 3] gelten die folgenden Kriterien: (a) Die Strahlungsrisiken aus der Tätigkeit oder aus einer mit der Tätigkeit verbundenen Quelle sind so gering, dass eine regulatorische Kontrolle nicht gerechtfertigt ist, da es keine nennenswerte Wahrscheinlichkeit von Situationen gibt, die zu einer Nichteinhaltung des allgemeinen Freistellungskriteriums führen könnten; oder (b) die regulatorische Kontrolle der Tätigkeit oder der Quelle würde keinen Nettonutzen bringen, d. h. keine vernünftige Massnahme der regulatorischen Kontrolle wäre in Bezug auf eine Verringerung der Individualdosen oder der Gesundheitsrisiken lohnenswert.»

Als operative Werte für die Freistellungsgrenzen zu definieren waren (d. h. Aktivitätswerte pro Radionuklid – in Frankreich erfolgte diese Definition früher auf jeden Fall nach Radiotoxizitätsgruppen), stellte sich die Frage, welche Anforderungen in Bezug auf die Gesundheitsauswirkungen zu erfüllen sein sollten. 1993 schlug die Europäische Kommission vor, einen Wert für das zusätzliche Krebsrisiko zwischen 10^{-5} pro Jahr und 10^{-6} pro Jahr (Strahlenschutz Nr. 65) zu verwenden: Unter Berücksichtigung des damals geltenden Detrimentkoeffizienten (ICRP 60) und der LNT-Hypothese führten die Berechnungen zu einem gerundeten Wert von $100 \mu\text{Sv}$. Unter der Annahme, dass eine Person mehreren Quellen ausgesetzt sein kann, wurde schliesslich der Dosiswert $10 \mu\text{Sv}$ pro Jahr für die Schätzung der Freistellungsgrenzen verwendet. Dieser Entscheid wurde durch die Tatsache, dass es sich nur um einen kleinen Prozentsatz der Exposition gegenüber natürlicher Strahlung handelt, sowie durch den UNSCEAR-Bericht 2012 gestützt. In letzterem wird erklärt, dass das zusätzliche Krebsrisiko in einer Bevölkerung im Bereich von Individualdosen unter 100 mSv nicht eindeutig auf die Exposition zurückgeführt werden kann. Eine weitere Einschränkung besteht auch darin, dass die Kollektivdosis unter 1 Sv pro Jahr bleiben muss. Es ist klar, dass dieses Kriterium in den meisten Fällen durch die Einhaltung der Individualdosen-Kriterien erfüllt wird. In ihrer Analyse von 132 Regulierungsentscheidungen auf Bundesebene (Environ. Sci. Technol., Vol. 21, No. 5, S. 415–420, 1987) nennen US-amerikanische Autorinnen und Autoren ein erhöhtes Krebsrisiko von 10^{-6} über die gesamte Lebenszeit als Schwelle, unterhalb derer die Regelung eines krebserregenden Stoffes vernachlässigt werden kann, wenn ihm ein grosser Teil der Bevölkerung ausgesetzt ist. In ihren Trinkwasserrichtlinien (Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum, 24. April 2017) nennt die WHO einen Wert von 10^{-6} DALY (Masseinheit für ein durch ein gesundheitliches Problem verlorenes Lebensjahr) als individuelles Ziel für die Auswirkungen biologischer oder chemischer Agenzien in Trinkwasser. Unter der Annahme, dass aufgrund einer Krebserkrankung durchschnittlich zehn Lebensjahre verloren werden, entspricht dieser Wert einem zusätzlichen Risiko von rund 10^{-5} pro Jahr.

Unlängst wies die französische Vereinigung CRIIRAD darauf hin, dass die Schutzniveaus für genotoxische Stoffe bei radioaktiven Substanzen permissiver sind als bei chemischen Produkten. Die Annahme von $0,1 \text{ mSv}$ pro Jahr in den WHO-Richtlinien seien deshalb nicht angemessen und würden zu einem lebenslangen zusätzlichen Krebsrisiko von deutlich über 10^{-5} führen.

Zum Abschluss dieser sehr kurzen Analyse ist Folgendes zu erwähnen: Der für das Risikomanagement akzeptable Wertebereich wurde im Bereich der Strahlung als Referenz-Dosiskriterium von $10 \mu\text{Sv}$ pro Jahr festgesetzt, ohne dass ein klarer Bezug zu den in den 1980er- und 1990er-Jahren als akzeptabel erachteten Niveaus für zusätzliche Krebsrisiken bestand. Dieses Niveau liegt jedoch deutlich unter der natürlichen Hintergrundbelastung und es

besteht bei diesem Expositionsniveau kein klarer wissenschaftlicher Beweis für ein erhöhtes Krebsrisiko über die gesamte Lebensdauer.

4.2 Jahresgrenzwerte für die Exposition

4.2.1 Berufliche Exposition

In der 1977 publizierten ICRP-Empfehlung 26 wird ein Jahresgrenzwert für die Exposition von 50 mSv pro Jahr angegeben. Dieser Empfehlung lag die folgende Überlegung zugrunde: Für ihr hohes Schutzniveau bekannte Berufe («sichere Berufe») wiesen keine jährliche Mortalitätsrate von mehr als 10^{-4} auf. Folglich berechnete die ICRP für die berufliche Exposition einen Grenzwert in der Grössenordnung von 5 mSv pro Jahr, der zum Zeitpunkt der Publikation der Empfehlung 26 einen Detrimentkoeffizienten in der Grössenordnung von $1,6 \cdot 10^{-2}$ pro Sv in Bezug auf die Mortalität aufwies. In Anbetracht dessen, dass es sich dabei um registrierte Todesfälle handelt, schätzte die ICRP gestützt auf den UNSCEAR-Bericht von 1977 (Anhang E), dass ein Grenzwert von 50 mSv pro Jahr zu einer durchschnittlichen Exposition von 5 mSv pro Jahr führen würde. Dieses Argument mag etwas schwach erscheinen, verdeutlicht aber den Unterschied zwischen Störfällen, die eindeutig einer bekannten Ursache zuzuordnen sind, und einem angenommenen Krebsrisiko. Bei der Berechnung der Dosis über ein gesamtes Arbeitsleben (d. h. 2,4 Sv) erachtete die ICRP ein dieser Dosis entsprechendes individuelles Risiko als inakzeptabel, während sie zuvor mit dem Kollektivrisiko argumentiert hatte, insbesondere da sich der Risikoeffizient im Zeitraum zwischen den beiden Publikationen um einen Faktor 4 für die Allgemeinbevölkerung deutlich erhöht hatte (Annals of ICRP 1991 Risks associated with ionizing radiation). Unter Berücksichtigung verschiedener Merkmale der Strahlenexposition (z. B. der Strahlung anrechenbare Sterbewahrscheinlichkeit, aggregiertes Detriment (siehe Tabelle 5 von ICRP 60)) erachtete die ICRP eine gleichmässig über ein Berufsleben erhaltene Dosis von 1 Sv als Höchstwert. Bei einer Berufsdauer von 50 Jahren betrug die durchschnittliche Jahresdosis somit 20 mSv pro Jahr (100 mSv über fünf Jahre ohne Überschreitung von 50 mSv pro Jahr).

4.2.2 Exposition der Bevölkerung

Zum Zeitpunkt der Publikation der ICRP 26 wurde geltend gemacht, dass die Expositionsgrenze für die Bevölkerung aufgrund des geringeren Nutzens tiefer sein sollte als für beruflich exponierte Personen. Überraschenderweise wird derselbe Bereich akzeptabler Risikoniveaus für die Festlegung einer Obergrenze und für die Festlegung von Freistellungsgrenzen angegeben. Wahrscheinlich ist der Begriff «akzeptabel» in diesem Zusammenhang etwas unklar. Bei Freistellungsgrenzen handelt es sich um ein akzeptables Risiko, wenn keine Massnahmen zum Risikomanagement ergriffen werden. Im zweiten Fall handelt es sich um ein tolerierbares Risiko gemäss Definition der ICRP, d. h. um eine Obergrenze unbeschadet der Anwendung des Optimierungsprinzips. Im Übrigen hat die ICRP aufgrund dieses Optimierungsprinzips in ihrer Empfehlung 126 festgehalten, dass ein für eine kritische Gruppe berechneter Wert von 5 mSv pro Jahr ermöglicht, den Wert von durchschnittlich 1 mSv pro Jahr für die Allgemeinbevölkerung einzuhalten. Arithmetisch entspricht dieser Wert von 1 mSv pro Jahr einem zusätzlichen Risiko von 10^{-5} pro Jahr – dem gerundeten Wert des Detrimentkoeffizienten gemäss ICRP 26, der 10^{-2} Sv^{-1} beträgt.

In der ICRP-Empfehlung 60 wurde ein Expositionsgrenzwert für die Bevölkerung von 1 mSv pro Jahr angegeben. Aus gesundheitlicher Sicht beruht dieser Wert auf den gleichen Überlegungen, wie sie in der ICRP-Empfehlung 26 angestellt wurden. Er scheint aber nicht mehr mit einem Grenzwert für die berufliche Exposition verbunden zu sein (zudem hat sich das Verhältnis zwischen den beiden Werten verdoppelt). Vorteil dieses Werts ist auch, dass er unter der durchschnittlichen Exposition durch natürliche Strahlenquellen liegt. Er gewährleistet nach wie vor dasselbe Schutzniveau wie in der ICRP 26, wird aber nicht mehr als Mittelwert, sondern als individuelles Schutzziel dargestellt. Auch wenn der Wert von einer Person über ihre Lebensdauer aufgenommen wird, bleibt er im niedrigen Dosisbereich gemäss Definition des UNSCEAR (< 100 mGy) in UNSCEAR 2012, Anhang A, für welchen der UNSCEAR festhält, dass eine Zunahme von Krebsfällen plausibel, aber nicht belegt ist. Die Untersuchung grösserer Kohorten könnte diese Schlussfolgerung für Dosen in der Grössenordnung von einigen Dutzend mSv zunehmend in Frage stellen (siehe Kapitel 6).

4.3 Dosisrichtwerte

Das Konzept der Dosisrichtwerte wird in der ICRP-Empfehlung 60 als nützliches Instrument für die Optimierung des Strahlenschutzes vorgeschlagen. Im Wesentlichen sollen damit mögliche Ungleichheiten im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber einer bestimmten Quelle beseitigt werden. Das Konzept wurde in der Publikation 103 bekräftigt und mit geplanten Expositionssituationen verbunden. Es wird in den Regelungen der verschiedenen Länder unterschiedlich gehandhabt. In der Tendenz wird die Festlegung von Dosisrichtwerten für die Bevölkerung den Behörden überlassen. In Tabelle 6.2 der ICRP-Publikation 103 werden Werte für verschiedene Situationen vorgeschlagen. Hingegen liegt die Festlegung des Dosisrichtwerts für Beschäftigte in der Verantwortung des Arbeitgebers. Es kann auch sinnvoll sein, Dosisrichtwerte bestimmten Tätigkeiten anstatt einer Jahresdosis zuzuordnen. Dies ermöglicht eine präzisere Umsetzung des Optimierungsprinzips.

Es ist klar, dass die Festlegung von Dosisrichtwerten nicht auf gesundheitlichen Überlegungen beruht, sondern zu den Instrumenten für die Umsetzung des Optimierungsprinzips gehört. Nachdem die ASN die Frage aufgeworfen hatte, ob eine Übernahme dieses Konzepts in den Regelungen für den Bevölkerungsschutz sinnvoll wäre, wies das IRSN darauf hin, dass die Nutzung der besten verfügbaren Techniken ein besseres Instrument sei. Tatsächlich hat dies dazu geführt, dass die Exposition der Bevölkerung gegenüber Abgaben radioaktiver Stoffe aus grossen französischen Kernanlagen mehrere Grössenordnungen unter dem Grenzwert von 1 mSv pro Jahr liegt (Avis IRSN Nr. 2016-0036⁶).

4.4 Potenzielle Exposition

Mit potenziellen Expositionssituationen befasst sich die ICRP-Publikation 64. In dieser Publikation wird deutlich auf die Überlagerung von Wahrscheinlichkeiten zwischen dem Eintritt des Ereignisses einerseits und dem Eintritt des Effekts bei einer bestimmten Exposition andererseits hingewiesen, um eine Wahrscheinlichkeit für das Gesamtrisiko zu ermitteln. Zur Bewertung dieses Effekts verwendet die ICRP das Strahlendetriment. Dieses Instrument erfasst alle einer Strahlenexposition zugeordneten Krebsarten und gewichtet sie nach dem

⁶ Avis IRSN Nr. 2016-0036 vom 9. Februar 2016, «Recommandations sur l'utilisation des contraintes de dose pour la protection du public»

Schweregrad der Erkrankung. Diese Überlagerung kann als Risikorichtwert bezeichnet werden. Sie unterstreicht, dass die Bewertung der Wahrscheinlichkeit eines schädlichen Ereignisses häufig viel unsicherer ist als die Bewertung der Wahrscheinlichkeit eines schädlichen Effekts für ein bestimmtes Expositionsniveau. Weiter weist sie darauf hin, dass für die Bewertung der Wahrscheinlichkeit eines schädlichen Effekts für ein bestimmtes Expositionsniveau auch der Dosisbereich mit Vorsicht zu betrachten ist, da die Beziehungen zwischen Exposition und Effekt unterschiedlich sind. Sie können vom LNT-Modell für niedrige Dosen (< 100 mSv) bis zu einer Abschätzung der Wahrscheinlichkeit mit Überlebenskurven für deterministische Effekte bei hohen Dosen reichen. Wir fügen an, dass die Effekte hoher Dosen nicht an die Stelle der stochastischen Effekte treten, sondern zu diesen hinzu addiert werden, und dass bei der Berücksichtigung dieser Effekte bei diesen Dosiswerten kein Reduktionsfaktor mehr einbezogen werden soll, wie er gegenwärtig von der ICRP zur Bewertung des Detriments (DDREF = 2) verwendet wird. Die ICRP stellt derzeit keinen Risikorichtwert, aber eine Tabelle mit Wahrscheinlichkeitsempfehlungen (Tabelle 1) bereit.

Tabelle 11. Bereich der Wahrscheinlichkeiten für ein Jahr, aus dem ein Dosisrichtwert ausgewählt werden kann (ICRP-Publikation 64 (1993))

Sequence of events leading to doses treated as part of normal exposures	10^{-1} to 10^{-2}
Sequence of events leading to stochastic effects only but above dose limits	10^{-2} to 10^{-5}
Sequence of events leading to doses where some radiation effects are deterministic	10^{-5} to 10^{-6}
Sequence of events leading to doses where death is likely to result	$< 10^{-6}$

Dennoch wird in dieser Publikation eine grundlegende Empfehlung abgegeben: Das mit potenziellen Expositionen verbundene Risiko (das somit die beiden Wahrscheinlichkeiten beinhaltet) sollte dieselbe Größenordnung aufweisen wie das Risiko einer Exposition in einer Normalsituation. Der Begriff «normal» ist wichtig, da nicht der Grenzwert verwendet wird, sondern die nach Anwendungsbereich beobachtete Exposition. Wörtlich genommen bedeutet das insbesondere, dass Situationen, die zu deterministischen Effekten führen könnten, vom Strahlenschutz nachweis ausgeschlossen werden müssen.

1997 wurden in der ICRP-Publikation 76 einige Elemente der praktischen Anwendung des Risikorichtwerts bei potenziellen Expositionen präzisiert. In dieser Empfehlung wird ein Risikorichtwert von $2 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr vorgeschlagen. Dabei wurde zur Ermittlung der Obergrenze (50 mSv pro Jahr) der Risikokoeffizient für tödliche Krebserkrankungen ($4 \cdot 10^{-2}$ pro Sv) aus der ICRP-Empfehlung 60 und die durchschnittlich erhaltene Dosis der beruflich exponierten Personen (5 mSv pro Jahr) aus der ICRP-Publikation 26, Abschnitt 23, verwendet. Ein ähnliches Verfahren, angewendet auf die Bevölkerungsexposition, führt zu einem Risikorichtwert von $5 \cdot 10^{-6}$ pro Jahr (unter der Annahme, dass 100 µSv pro Jahr der Dosisrichtwert ist, der einer Obergrenze für die Bevölkerung von 1 mSv pro Jahr entspricht, und dass der Risikokoeffizient für tödliche Krebserkrankungen für die Bevölkerung $5 \cdot 10^{-2}$ pro Sv beträgt).

Zehn Jahre später wurde dieses Konzept der potenziellen Exposition bei geplanten Expositionssituationen in der ICRP 103 übernommen, wobei der in der ICRP 76 für beruflich strahlenexponierte Personen vorgeschlagene Wert nicht aktualisiert und der Wert für die Bevölkerung verdoppelt wurde ($4 \cdot 10^{-2}$ bzw. $1 \cdot 10^{-5}$ pro Jahr). Wir sind der Auffassung, dass diese Bewertungen im Interesse der Klarheit unter Verwendung der detrimentbereinigten Risikoeffizienten vorgenommen werden sollten, wie sie in der ICRP 103 vorgeschlagen werden, d. h. $4,2 \cdot 10^{-2}$ pro Sv und $5,7 \cdot 10^{-2}$ pro Sv. Die Werte unterscheiden sich nicht erheblich, haben aber eine unterschiedliche Bedeutung, insofern als die Koeffizienten der ICRP 103 ein Eintreten, diejenigen der ICRP 60 hingegen eine Mortalität abbilden.

5 EREIGNISHÄUFIGKEITEN UND ZUGEHÖRIGE STRAHLENDOSISKRITERIEN

Das IRSN führte eine kurze Analyse der internationalen Empfehlungen und Regelwerke verschiedener Länder in Bezug auf das Verhältnis zwischen der geschätzten Häufigkeit angenommener Ereignisse und der damit verbundenen Strahlendosiskriterien durch. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Analyse präsentiert, diskutiert und mit dem Regelwerk in der Schweiz verglichen.

Diese Frage stellt allerdings nur einen kleinen Teil des gesamten Sicherheitskonzepts dar. *«Sicherheit ist das Ergebnis einer Gesamtheit von technischen und organisatorischen Massnahmen, die in allen Phasen des Lebenszyklus einer Anlage getroffen werden, um sicherzustellen, dass die Risiken aus ihrem Betrieb und ihrer Existenz ausreichend gering sind, damit sie für das direkt betroffene Personal, die Bevölkerung und die Umwelt als akzeptabel erachtet werden können. Das Konzept des akzeptablen Risikos bezieht sich nicht auf definierte und absolute Kriterien.»*⁷ Die Gewährleistung der Sicherheit beruht insbesondere auf der sachgerechten Umsetzung grundlegender Prinzipien wie der gestaffelten Sicherheitsvorsorge (Defense in Depth), der Erfüllung von Sicherheitsfunktionen und der Wirksamkeit der relevanten Anzahl Barrieren.

Wie wichtig dieser Hinweis ist, zeigt die Tatsache, dass in den WENRA-Referenzwerten (vgl. 5.2.4), deren *«Geltungsbereiche und Themen so ausgewählt wurden, dass sie wichtige Aspekte der nuklearen Sicherheit abdecken, bei denen grundlegende Unterschiede zwischen den WENRA-Ländern erwartet werden können»* keine geschätzte Ereignishäufigkeit (ausser in einem Referenzniveau für Gefährdungen) erwähnt wird und vorgeschriebene radiologische Grenzen nur sehr selten und auf allgemeine Weise (ohne Zahlenwerte) angegeben werden.

Um eine möglichst zuverlässige Analyse zu erstellen, organisierte das IRSN virtuelle Sitzungen mit dem ENSI und dem BAG, in denen es die erarbeiteten technischen Dokumente zur Begleitung der Umsetzung des Regelwerks präsentierte. Im September 2022 fanden persönliche Treffen⁸ mit beiden Aufsichtsbehörden statt. Das IRSN

⁷ Elements of nuclear safety – Pressurized Water Reactors – Jean Couturier, EDP Sciences, 2022

⁸ Das auf Englisch verfasste Protokoll der Sitzung vom 7. September 2022 des IRSN/PSE-Santé ist auf Anfrage erhältlich.

konnte so sicherstellen, dass es das Zusammenspiel der verschiedenen Regulierungsebenen verstanden hatte, und auf die Einzelheiten der Berechnungen der radiologischen Folgen eingehen.

5.1 Die Regelung in der Schweiz

Die Schweizer Gesetzgebung im Bereich der Kernenergie beruht hauptsächlich auf der Kernenergieverordnung (KEV) und der Strahlenschutzverordnung (StSV).

In diesen beiden Erlassen wurden für Auslegungsstörfälle von Kernanlagen für verschiedene Szenarien Zusammenhänge zwischen dem Eintritt dieser Ereignisse (Wahrscheinlichkeitsintervalle) und Dosisgrenzwerten (in mSv) hergestellt.

Die KEV (Artikel 8) unterscheidet zwischen Auslegungsstörfällen mit Ursprung innerhalb oder ausserhalb der Anlage; bei Ereignissen mit Ursprung ausserhalb der Anlage wird unterschieden zwischen nicht durch Naturereignisse ausgelösten Störfällen (Flugzeugabsturz usw.) und durch Naturereignisse ausgelösten Störfällen (Erdbeben, Überflutung usw.).

In der StSV (Artikel 123) werden die Störfälle mit Ursprung innerhalb der Anlage und die nicht durch Naturereignisse ausgelösten Störfälle mit Ursprung ausserhalb der Anlage nach ihrer Häufigkeit pro Jahr sowie den entsprechenden Dosisgrenzen eingeordnet:

Tabelle 12. Geschätzte Ereignishäufigkeiten und entsprechende Dosisgrenzen (Schweizer Regelung, StSV)

Häufigkeit pro Jahr	Zugehörige Dosisgrenze für die Bevölkerung
$> 10^{-1}$	In der Bewilligung festgelegter Dosisrichtwert (pro Jahr)
Zwischen 10^{-2} und 10^{-1}	Dosisrichtwert* (für ein Ereignis)
Zwischen 10^{-4} und 10^{-2}	Höchstens 1 mSv (für ein Ereignis)
Zwischen 10^{-6} und 10^{-4}	Höchstens 100 mSv (für ein Ereignis)

* entspricht 0,3 mSv gemäss Anhang 7 StSV

Für Naturereignisse mit Ursprung ausserhalb der Anlage ist gemäss KEV jeweils von einem Naturereignis mit einer Häufigkeit von 10^{-3} pro Jahr sowie einem Ereignis mit einer Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr auszugehen. Diese beiden Häufigkeiten und die zugehörigen Dosisgrenzen sind in der KEV (Artikel 8) definiert:

Tabelle 13. Geschätzte Ereignishäufigkeiten und zugehörige Dosisgrenzen (Schweizer Regelung, KEV)

Häufigkeit pro Jahr	Zugehörige Dosisgrenze für die Bevölkerung
10^{-3}	1 mSv
10^{-4}	100 mSv

Der Wert von 1 mSv entspricht dem individuellen jährlichen Dosisgrenzwert für die Exposition der Bevölkerung aus beabsichtigten Tätigkeiten. Der Wert von 0,3 mSv entspricht dem Dosisrichtwert für die Exposition der Bevölkerung.

In der StSV kann es zu Interpretationsschwierigkeiten bei der Zuordnung der Dosisgrenzwerte zu den Grenzen der Wahrscheinlichkeitsintervalle kommen. Dies gilt vor allem für den Wert, welcher der Häufigkeit von 10^{-4} pro Jahr zuzuordnen ist. In der KEV hingegen ist für Naturereignisse mit Ursprung ausserhalb der Anlage (z. B. Erdbeben) eindeutig festgehalten, dass die Dosis für Personen aus der Bevölkerung bei einer Ereignishäufigkeit von 10^{-4} pro Jahr höchstens 100 mSv beträgt.

Der Wert von 100 mSv ist ein rein arithmetischer Wert. Er wird von den Kernkraftwerksbetreibern verwendet, um ihre Fähigkeit nachzuweisen, ein Versagen im Rahmen der Auslegungsregeln zu beherrschen, und um zu gewährleisten, dass ein solches Versagen nur geringfügige radiologische Folgen hätte. Dieser Wert ist Ergebnis einer Berechnung, die für eine der ionisierenden Strahlung am stärksten ausgesetzte fiktive Person durchgeführt wurde.

Bei Überschreitung des Werts von 100 mSv – sei es für ein internes oder ein externes Ereignis – sind Sofortmassnahmen zu ergreifen, um das Kernkraftwerk vorläufig ausser Betrieb zu nehmen und nachzurüsten (siehe Art. 44 KEV). Liegt die geschätzte Dosis beispielsweise zwischen 1 und 100 mSv für ein Naturereignis mit Ursprung ausserhalb der Anlage, das statistisch alle 1000 Jahre eintritt (mit einem zugehörigen Dosisgrenzwert von 1 mSv), wird für die Nachrüstung eine Frist eingeräumt.

Die Höhe des Dosisrichtwerts (0,3 mSv) steht im Einklang mit der ICRP-Publikation 103, obwohl die ICRP für den Dosisrichtwert keine Wahrscheinlichkeit verwendet.

Der Wert von 100 mSv entspricht dem höchsten von der ICRP für Notfallsituationen festgelegten Referenzwert⁹, obwohl die aktuelle Empfehlung anerkennt, dass unter bestimmten Umständen ein Referenzwert von unter 20 mSv am angemessensten sein kann.

Es ist schwierig, eine Verbindung zwischen Sicherheitsnachweis und radiologischer Krise herzustellen. Bei den hier genannten Werten handelt es sich um Werte für die Notfallphase, welche die Einleitung von Bevölkerungsschutzmassnahmen veranlassen. Es handelt sich somit nicht um ein Ziel für den Sicherheitsnachweis. Die für die Bewältigung von radiologischen Notfällen festgelegten Referenzwerte können aber als erste Zielwerte im Rahmen einer technischen Diskussion für eine Sicherheitsbewertung dienen.

5.2 Internationale Bestimmungen

In diesem Kapitel werden Elemente beschrieben, die sich auf die Zuordnung von Strahlendosiskriterien zum Eintritt von Auslegungstörfällen beziehen, wie sie in einigen internationalen Texten beschrieben wird.

Dieser Aspekt stellt aber nur einen Teil des Sicherheitskonzepts dar (siehe Einleitung zu diesem Kapitel).

⁹ ICRP 146 – Radiological protection of people and the environment in the event of a large nuclear accident

5.2.1 ICRP

Potenzielle Expositionen

Die ICRP definiert potenzielle Expositionen als Expositionen, die sich durch Abweichungen von normalen Verfahrensabläufen ergeben können, die voraussehbar und deshalb im Planungsstadium zu berücksichtigen sind.¹⁰

Die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Abweichungen wird abgeschätzt, zu dieser Wahrscheinlichkeit proportionale Schutzvorkehrungen werden eingeführt (um das Risiko einer potenziellen Exposition zu verringern), die resultierende Dosis wird abgeschätzt und das mit der Dosis verbundene Detriment bewertet und schliesslich werden die Ergebnisse mit einem Akzeptanzkriterium verglichen.

Wie in Kapitel 4.2 dieses Berichts beschrieben, führt die ICRP das Konzept eines «Risikorichtwerts» für potenzielle Expositionen ein. Dieses Konzept wird von der IAEA¹¹ für die Entsorgung radioaktiver Abfälle übernommen. Gemäss der IAEA *«ist ein Endlager (als einzige Quelle betrachtet) so ausgelegt, dass die berechnete Dosis oder das berechnete Risiko für eine repräsentative Person, die in Zukunft aufgrund möglicher natürlicher Prozesse, die sich auf das Endlager auswirken, exponiert werden könnte, höchstens einem Dosisrichtwert von 0,3 mSv pro Jahr oder einem Risikorichtwert in der Grössenordnung von 10^{-5} pro Jahr entspricht»*.

Dieses Konzept wird in verschiedenen Ländern, aber ausschliesslich im Zusammenhang mit der Lagerung radioaktiver Abfälle verwendet (gemäss ICRP¹² werden *«Risikorichtwerte für die Bewertung der Sicherheit und des Strahlenschutzes eines geologischen Lagers für langlebige radioaktive Abfälle»* verwendet).

Risikorichtwert

Der Risikorichtwert für eine potenzielle Exposition ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein unerwartetes Ereignis zu einer Dosis führt, multipliziert mit dem Detriment, das sich aus dieser Dosis ergibt. Es handelt sich um einen Richtwert, der als (prospektive) Begrenzung des individuellen Risikos definiert wird. Zur Erinnerung: Das Detriment wurde auf $4,22 \cdot 10^{-2}$ pro Sv für Arbeiterinnen und Arbeiter und $5,74 \cdot 10^{-2}$ pro Sv für die Allgemeinbevölkerung festgelegt.¹⁰

Die ICRP empfiehlt einen generischen Risikorichtwert von $2 \cdot 10^{-4}$ pro Jahr für die potenzielle Exposition von Arbeiterinnen und Arbeitern (basierend auf der Wahrscheinlichkeit einer tödlichen Krebserkrankung in Verbindung mit einer durchschnittlichen beruflichen Dosis von 5 mSv pro Jahr – was sich auf «reale» Dosen bezieht, die rund zehnmal tiefer sind als der frühere Dosisgrenzwert von 50 mSv pro Jahr für beruflich exponierte Personen). Der empfohlene Risikorichtwert für die Bevölkerung beträgt 10^{-5} pro Jahr (d. h. ein zwanzigmal tieferer Wert als für beruflich exponierte Personen).

Das Produkt der Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses und der diesem Ereignis zugeordneten Dosis ist somit konstant und entspricht $4,74 \cdot 10^{-3}$ für beruflich exponierte Personen und $1,74 \cdot 10^{-4}$ für die Bevölkerung (d. h.

¹⁰ ICRP-Veröffentlichung 103 – Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) von 2007

¹¹ IAEA SSR-5 – Disposal of Radioactive Waste

¹² ICRP 122 – Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste

27-mal weniger). Je wahrscheinlicher ein Ereignis ist, desto niedriger sollte also die damit verbundene Dosis sein, und umgekehrt.

Die Berechnung für die in der Schweizer Regelung vorgesehenen Werte zeigt, dass sie weit (um einen Faktor von mindestens 10) unter dem von der ICRP für die Bevölkerung empfohlenen Risikoricthwert liegen:

Tabelle 14. Berechnung der Risikoricthwerte für die Schweizer Regelung

Häufigkeit pro Jahr	Zugehörige Dosisgrenze für die Bevölkerung	Risikoricthwert
<i>Ereignisse mit Ursprung innerhalb der Anlage und nicht durch Naturereignisse ausgelöste Ereignisse mit Ursprung ausserhalb der Anlage</i>		
Zwischen 10^{-1} und 10^{-2}	Dosisricthwert von 0,3 mSv	Zwischen $2 \cdot 10^{-6}$ und $2 \cdot 10^{-7}$
Zwischen 10^{-2} und 10^{-4}	Höchstens 1 mSv	Zwischen $6 \cdot 10^{-7}$ und $6 \cdot 10^{-9}$
Zwischen 10^{-4} und 10^{-6}	Höchstens 100 mSv	Zwischen $6 \cdot 10^{-7}$ und $6 \cdot 10^{-9}$
<i>Naturereignis mit Ursprung ausserhalb der Anlage</i>		
10^{-3}	1 mSv	$6 \cdot 10^{-8}$
10^{-4}	100 mSv	$6 \cdot 10^{-7}$

5.2.2 IAEA

Die IAEA definiert verschiedene Kategorien von Anlagenzuständen:

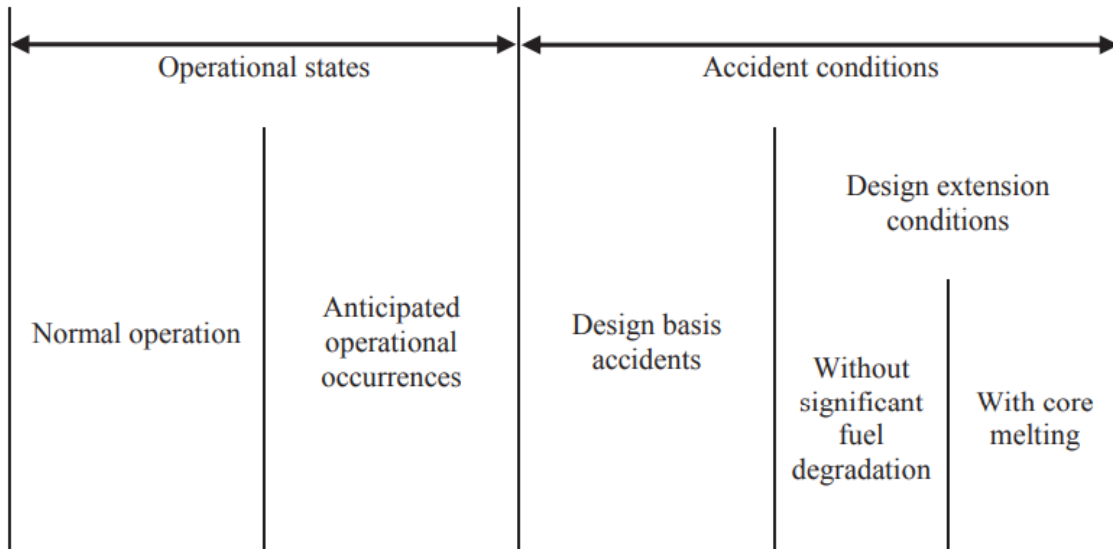


Abbildung 8 – Zustände eines Kernkraftwerks¹³

Ereignishäufigkeit

Beim Eintritt von Ereignissen gilt der Grundsatz, dass «häufig eintretende Anlagenzustände keine oder nur geringfügige radiologische Folgen haben dürfen und dass Anlagenzustände, die ernsthafte Folgen haben könnten, nur sehr selten eintreten dürfen».¹⁴

Die auf geschätzten jährlichen Häufigkeiten basierende Einordnung in der folgenden Tabelle illustriert bestimmte Praktiken der IAEA:

Tabelle 15. Potenzielle Betriebsstörungen und Kategorien von Auslegungstörfällen, die in einigen Ländern für neue Reaktoren verwendet werden¹⁵

Plant state	Alternative names used in some States	Indicative frequency range (per year)
Anticipated operational occurrences	Faults of moderate frequency: DBC-2, PC-2	$f > 10^{-2}$
Design basis accidents	Infrequent faults: DBC-3, PC-3 Limiting faults: DBC-4, PC-4	$10^{-2} > f > 10^{-4}$ $10^{-4} > f > 10^{-6}$

¹³ IAEA Safety Glossary, Terminology Used in Nuclear Safety, Nuclear Security, Radiation Protection and Emergency Preparedness and Response (2022 (Interim) Edition)

¹⁴ IAEA SSR-2/1 Rev. 1, IAEA SSR-3 und IAEA SSR-4

¹⁵ IAEA SSG-2 Rev. 1

Radiologische Akzeptanzkriterien

«Bei der Auslegung eines Kernkraftwerks ist sicherzustellen, dass die Strahlendosen für das Personal des Kernkraftwerks und für Personen aus der Bevölkerung die Dosisgrenzwerte nicht überschreiten, dass sie während der gesamten Lebensdauer des Kernkraftwerks so niedrig gehalten werden, wie es vernünftigerweise unter Betriebsbedingungen erreichbar ist, und dass sie während und nach einem Störfall unter den akzeptablen Grenzwerten und so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar bleiben.» «In Übereinstimmung mit den regulatorischen Anforderungen sollen akzeptable Grenzwerte zu Strahlenschutz Zwecken für die relevanten Anlagenzustände festgelegt werden.»¹⁶

Die IAEA nennt keine numerischen Werte, sondern empfiehlt allgemeine Ziele: «Abgaben von radioaktivem Material werden innerhalb akzeptabler Grenzwerte gehalten», «ohne inakzeptable radiologische Folgen», «ein Hauptziel ist die Beherrschung aller Auslegungsstörfälle, so dass sie keine (oder nur geringfügige) radiologische Folgen innerhalb oder ausserhalb der Anlage haben und keine anlagenexternen Schutzmassnahmen erfordern».¹⁷ In manchen Fällen werden diese allgemeinen Ziele mit qualitativen strahlenschutzbezogenen Elementen ergänzt: «Ausserhalb der unmittelbaren Umgebung des Kernkraftwerks sollten keine oder nur geringfügige radiologische Folgen durch Betriebsstörungen oder Auslegungsstörfälle auftreten und keine anlagenexternen Schutzmassnahmen notwendig sein. Der Begriff der geringfügigen radiologischen Auswirkung sollte von der Regulierungsbehörde definiert werden [...]»¹⁵

Die IAEA gibt keine Definition der «geringfügigen radiologischen Auswirkung» und erläutert lediglich den Begriff des akzeptablen Grenzwerts genauer: «[...] akzeptable Grenzwerte für die effektive Dosis für Personen aus der Bevölkerung ausserhalb der unmittelbaren Umgebung des Kernkraftwerks sind in der Regel Werte in der Grössenordnung von einigen Millisievert pro Ereignis.»¹⁵

Die IAEA gibt auch Empfehlungen zum Konzept der «radiologischen Folgen»: Die radiologischen Folgen können beispielsweise in Form der «effektiven Dosis», der freigesetzten Aktivität (in Bq) für die verschiedenen Radionuklide oder der gesundheitlichen Wirkung ausgedrückt werden.

5.2.3 Euratom

Wie bereits in der Einleitung zu diesem Kapitel beschrieben, hat die Euratom ein allgemeines Sicherheitsziel festgelegt, wonach: «kerntechnische Anlagen mit dem Ziel ausgelegt, errichtet, in Betrieb genommen, betrieben und stillgelegt werden und ihr Standort mit dem Ziel zu wählen ist, Unfälle zu vermeiden und im Fall eines Störfalls dessen Auswirkungen abzumildern und Folgendes zu vermeiden: (a) frühe Freisetzungen von radioaktivem Material, die anlagenexterne Notfallschutzmassnahmen erfordern würden, für deren Umsetzung nicht ausreichend Zeit zur Verfügung steht; (b) grosse Freisetzungen von radioaktivem Material, die Schutzmassnahmen erfordern würden, die weder örtlich noch zeitlich begrenzt werden könnten.»¹⁸

¹⁶ IAEA SSR-2/1, Anforderung 5

¹⁷ IAEA SSR-2/1 Rev. 1

¹⁸ Richtlinie 2009/71/Euratom des Rates zur nuklearen Sicherheit (geändert durch Richtlinie 2014/87/Euratom)

In Bezug auf die Umsetzung des Sicherheitsziels sind in der Richtlinie keine quantitativen Grenzen für die radiologischen Konsequenzen für einzelne geschätzte Ereignishäufigkeiten festgelegt. *«Im Hinblick auf die Verwirklichung des in Artikel 8a genannten Ziels der nuklearen Sicherheit stellen die Mitgliedstaaten sicher, dass der nationale Rahmen vorschreibt, dass das gestaffelte Sicherheitskonzept, sofern es anwendbar ist, mit dem Ziel angewandt wird, zu gewährleisten, dass: (a) die Auswirkungen extremer externer natürlicher und durch den Menschen verursachter unbeabsichtigter Gefahren auf ein Mindestmass beschränkt werden; (b) anomaler Betrieb und Fehlfunktionen vermieden werden; (c) anomaler Betrieb beherrscht wird und Fehlfunktionen entdeckt werden; (d) Auslegungsstörfälle beherrscht werden; (e) schwere Unfälle unter Kontrolle gebracht werden, einschliesslich der Verhinderung des Fortschreitens des Störfallablaufs und der Abmilderung der Auswirkungen schwerer Unfälle; (f) Organisationsstrukturen gemäss Artikel 8d Absatz 1 bestehen.»*

5.2.4 WENRA

Die Westeuropäische Vereinigung der Kernenergie-Aufsichtsbehörden (Western European Nuclear Regulators Association – WENRA)¹⁹ hat eine Tabelle mit den verschiedenen Stufen der gestaffelten Sicherheitsvorsorge (Defense in Depth) mit den jeweiligen funktionalen Zielen und Angaben zu qualitativ akzeptablen radiologischen Folgen erstellt.

¹⁹ Report Safety of new NPP designs (2013)

Tabelle 16. Möglicherweise eintretende Ereignisse und in der Auslegung berücksichtigte Folgen¹⁹

Levels of defence in depth	Objective	Essential means	Radiological consequences	Associated plant condition categories
Level 1	Prevention of abnormal operation and failures	Conservative design and high quality in construction and operation, control of main plant parameters inside defined limits	No off-site radiological impact (bounded by regulatory operating limits for discharge)	Normal operation
Level 2	Control of abnormal operation and failures	Control and limiting systems and other surveillance features		Anticipated operational occurrences
Level 3 ⁽¹⁾	3.a Control of accident to limit radiological releases and prevent escalation to core melt conditions ⁽²⁾	Reactor protection system, safety systems, accident procedures	No off-site radiological impact or only minor radiological impact ⁽⁴⁾	Postulated single initiating events
	3.b	Additional safety features ⁽³⁾ , accident procedures		Postulated multiple failure events
Level 4	Control of accidents with core melt to limit off-site releases	Complementary safety features ⁽³⁾ to mitigate core melt, Management of accidents with core melt (severe accidents)	Off-site radiological impact may imply limited protective measures in area and time	Postulated core melt accidents (short and long term)
Level 5	Mitigation of radiological consequences of significant releases of radioactive material	Off-site emergency response Intervention levels	Off site radiological impact necessitating protective measures ⁽⁵⁾	-

Die Ziele bezüglich der radiologischen Folgen für bestehende Reaktoren werden wie oben erwähnt sehr allgemein und qualitativ beschrieben, obwohl dieser Aspekt natürlich nur einen Teil der Ziele darstellt: «Die Auslegungsbasis soll zum Ziel haben, Folgen aus Betriebsstörungen und Auslegungstörfällen zu verhindern oder zu mindern. Bei der Auslegung ist sicherzustellen, dass mögliche Strahlendosen für die Bevölkerung und das Anlagenpersonal die vorgeschriebenen Grenzwerte nicht überschreiten und so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar gehalten werden.»²⁰

5.3 Nationale Regelwerke

Die Regelwerke mehrerer anderer Länder (Deutschland, Belgien, Kanada, Finnland, Niederlande, Vereinigtes Königreich, Schweden und USA) wurden untersucht, um festzustellen, welche Leitlinien für die Zuordnung von Grenzwerten (in Verbindung mit dem Konzept des akzeptablen Grenzwerts für radiologische Folgen) zum Eintritt von Auslegungstörfällen gelten.

Auch hier ist darauf hinzuweisen, dass dieses Kapitel **nicht** alle Sicherheitskonzepte **abschliessend** behandelt. Im Vordergrund stehen die quantitativen Aspekte der radiologischen Folgen, die in den verschiedenen Erlassen –

²⁰ Report WENRA Safety Reference Levels for Existing Reactors (2020)

nicht zwingend in Leitfäden oder anderen Vollzugshilfen – enthalten sind. Zudem liefert diese Literaturrecherche wenig Erkenntnisse über die Verwendung der Strahlendosenkriterien in der Praxis.

5.3.1 Betroffene Anlagenarten

Bei der Durchsicht der internationalen Dokumente hat sich gezeigt, dass bestimmte IAEA-Dokumente¹⁴ nur für die Auslegung von Kernkraftwerken gelten. Andere Dokumente der IAEA betreffen Forschungsreaktoren²¹ oder Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs²².

Die Euratom-Richtlinie 2014/87 gilt allgemeiner für alle Kernanlagen (Kernkraftwerke, Anreicherungsanlagen, Anlagen zur Kernbrennstoffherstellung, Wiederaufbereitungsanlagen, Forschungsreaktoren, Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente, Lager für radioaktive Abfälle).

Die Schweizer Regelung bezieht sich auf alle Arten von Kernanlagen (obwohl die Verordnungen des UVEK für Kernkraftwerke zusätzliche technische Kriterien vorsehen).

In den meisten anderen hier betrachteten Ländern (mit Ausnahme weniger Staaten wie Finnland und Belgien) gelten die erwähnten regulatorischen Vorgaben nur für Kernkraftwerke.

5.3.2 Bestehende und neue Anlagen

Die Begriffe «neu» und «bestehend» werden häufig zur Kategorisierung von Kernanlagen verwendet. Dies dient dazu, einen Pfeiler der Sicherheit – die kontinuierliche Verbesserung – zu verstärken. Es ist verständlich, dass für Kernanlagen immer ambitioniertere Ziele oder Anforderungen gelten müssen, dass aber die Art und Weise der Anwendung dieser Ziele und Anforderungen je nach Lebensphase der Anlage zum Zeitpunkt ihrer Festlegung unterschiedlich sein kann.

Dennoch gilt die Regelung für jede Anlage, die in Betrieb ist (eine «neue» wird zu einer «bestehenden» Anlage, wenn sie in Betrieb ist und ihre Anforderungen nicht verändert werden). Die Begriffe «neu» und «bestehend» werden normalerweise nicht in höherrangigen Regelungen (die Schweizer Regelung beispielsweise unterscheidet nicht zwischen bestehenden und neuen Anlagen), sondern eher in Leitlinien und ähnlichen Dokumenten verwendet. Dies zeigt, dass das Ziel (bzw. die Anforderung, das Kriterium oder ...) für Anlagen gilt, die in Zukunft in Betrieb sein werden, und als Bezugsgrösse für die zeitgerechte Umsetzung von vernünftigerweise durchführbaren Sicherheitsverbesserungen für bestehende Anlagen verwendet wird.

Die Euratom²³ beispielsweise hält fest, dass das Ziel «für kerntechnische Anlagen gilt, für die erstmals nach dem 14. August 2014 eine Genehmigung zur Errichtung erteilt wird, und als Bezugsgrösse für die zeitgerechte Umsetzung von vernünftigerweise durchführbaren Sicherheitsverbesserungen für bestehende kerntechnische Anlagen verwendet wird». Das Wort «neu» wird nicht benutzt.

Die IAEA weist darauf hin, dass die neuen Anforderungen aus praktischen Gründen hauptsächlich für neue Anlagen gelten. Sie anerkennt, dass die Anwendung neuer Anforderungen auf bestehende Anlagen oder eine

²¹ IAEA SSR-3

²² IAEA SSR-4

²³ Euratom-Richtlinie 2014/87

bereits genehmigte Auslegung schwierig ist. Aus ihrer Sicht wird *«erwartet, dass ein Vergleich mit den geltenden Normen angestellt wird, beispielsweise im Rahmen der Periodischen Sicherheitsüberprüfung des Kernkraftwerks, um festzustellen, ob der sichere Betrieb des Kernkraftwerks durch vernünftigerweise durchführbare Massnahmen noch weiter verbessert werden könnte.»*¹⁴ ... Das Gesamtziel, die Folgen bei einem Störfall so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar und unterhalb der vorgeschriebenen Grenzwerte zu halten, gilt aber auf jeden Fall sowohl für bestehende als auch für künftige Anlagen.

Die WENRA hat Sicherheitsziele für neue Kernkraftwerke festgelegt. Sie weist aber darauf hin, dass *«diese Ziele als Bezugsgrösse verwendet werden sollen, um vernünftigerweise durchführbare Sicherheitsverbesserungen für <deferred plants> (Kernkraftwerke mit Bauverzögerungen) und bestehende Kernkraftwerke während der Periodischen Sicherheitsüberprüfungen zu identifizieren»*. Im Übrigen wies die Arbeitsgruppe der WENRA zur Reaktorharmonisierung (RHWG, Reactor Harmonization Working Group) bei der Frage, ob die Sicherheitsziele oder die Broschüre weiter angepasst werden sollen, darauf hin, dass auch die Terminologie überarbeitet werden müsste: *«Es sollte präzisiert werden, was mit <bestehenden Reaktoren> und mit <neuen Reaktoren> gemeint ist oder eine andere Terminologie verwendet werden.»*²⁴

Bei den meisten in diesem Bericht genannten Werten werden die Begriffe «neu» und «bestehend» so wie oben beschrieben verwendet.

5.3.3 Anlagenzustände – Kategorisierung

Die hier untersuchten Länder beginnen in der Regel damit, die verschiedenen Anlagenzustände zu kategorisieren. Dabei folgen sie meistens einem ähnlichen allgemeinen Ansatz, wobei sich die Terminologie für die Anlagenzustände unterscheiden kann:

- Normalbetrieb
- Betriebsstörung
- Auslegungsstörfall
- Auslegungsüberschreitender Störfall ohne schweren Kernschaden
- Auslegungsüberschreitender Störfall mit schwerem Kernschaden

In den meisten hier untersuchten Ländern gilt dieselbe Praxis für die Kategorisierung von Anlagenzuständen, da diese Kategorien in den internationalen Normen klar definiert sind.

5.3.4 Ereignishäufigkeit

Jeder definierte Zustand ist einem Intervall zugeordnet, das der Häufigkeit der betrachteten Ereignisse pro Jahr entspricht.

Für Kanada gelten folgende Intervalle:

²⁴ WENRA Safety Objectives for New Nuclear Power Plants and WENRA Report on Safety of new NPP designs – RHWG position on need for revision
September 2020

- $> 10^{-2}$ für Betriebsstörungen
- $[10^{-5}; 10^{-2}]$ für Auslegungsstörfälle
- $< 10^{-5}$ für auslegungsüberschreitende Störfälle

Für Finnland:

- $> 10^{-2}$ für Betriebsstörungen
- $[10^{-3}; 10^{-2}]$ für hypothetische Störfälle der Klasse 1
- $< 10^{-3}$ für hypothetische Störfälle der Klasse 2

Für Deutschland existieren «Richtwerte» zur Einordnung von Ereignissen:

- $> 10^{-2}$ für Betriebsstörungen
- $[10^{-5}; 10^{-2}]$ für Auslegungsstörfälle
- $< 10^{-5}$ für auslegungsüberschreitende Störfälle

Für die Niederlande werden die folgenden Intervalle angegeben:

- $> 10^{-1}$
- $[10^{-2}; 10^{-1}]$
- $[10^{-4}; 10^{-2}]$
- $< 10^{-4}$

Zum Teil wenden die verschiedenen Länder dieselben Praktiken an – die Zuordnung von Ereignishäufigkeiten zu den einzelnen Anlagenzuständen –, wobei aber jeweils andere Werte gelten. Der Wert 10^{-2} scheint in allen Ländern als Obergrenze für das den Auslegungsstörfällen zugeordnete Intervall zu gelten. Der Wert der anderen Grenze des Intervalls (in manchen Fällen gibt es zwei) ist variabel (gleich 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} oder weniger als 10^{-3} oder 10^{-4}).

Zur Erinnerung: In der Schweizer Regelung²⁵ gelten für Auslegungsstörfälle im Einklang mit den IAEA-Empfehlungen die Intervalle $[10^{-4}; 10^{-2}]$ und $[10^{-6}; 10^{-4}]$.

5.3.5 Dosiskriterien

Für jeden der vorgegebenen Anlagenzustände werden radiologische Akzeptanzkriterien für die Bevölkerung festgelegt (unbeschadet anderer anlagenbezogener Kriterien): Häufige Ereignisse haben keine (oder geringe) radiologischen Folgen, während Ereignisse, die schwere Folgen haben könnten, mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit eintreten.

Für Kanada werden die radiologischen Akzeptanzkriterien als Ganzkörperdosis ausgedrückt, die von einer durchschnittlichen Person in einer der kritischsten Risikogruppen in der Umgebung oder weiter entfernt von der

²⁵ StSV Art. 123

Anlage innerhalb von 30 Tagen nach einem Störfall aufgenommen werden könnte. Für diese Kriterien werden die folgenden Grenzwerte definiert:

- 0,5 mSv für Betriebsstörungen
- 20 mSv für Auslegungsstörfälle

In Finnland werden die radiologischen Akzeptanzkriterien als effektive jährliche Dosis für die Bevölkerung ausgedrückt. Für diese Kriterien werden die folgenden Grenzwerte definiert:

- 0,1 mSv pro Jahr für Betriebsstörungen
- 1 mSv pro Jahr für hypothetische Störfälle der Klasse 1
- 5 mSv pro Jahr für hypothetische Störfälle der Klasse 2
- 20 mSv pro Jahr für auslegungsüberschreitende Störfälle ohne schweren Kernschaden

In Belgien gelten die folgenden Grenzwerte für die beiden postulierten Ereignisse der Stufen C3a (postulierte einzelne auslösende Ereignisse) und C3b (postulierte Ereignisse mit Mehrfachversagen): Die effektive Dosis muss unter 5 mSv pro Ereignis und die Schilddrüsendosis für Kleinkinder, Kinder und Jugendliche unter 10 mSv pro Ereignis liegen. In anderen europäischen Ländern (beispielsweise Ungarn) wird die Schilddrüsendosis zusätzlich zur effektiven Dosis in die radiologischen Akzeptanzkriterien aufgenommen.

Für Deutschland werden die radiologischen Akzeptanzkriterien für Auslegungsstörfälle als effektive Dosis (50 mSv pro Ereignis) und Äquivalentdosis für verschiedene Organe oder Gewebe (siehe Tabelle unten) ausgedrückt. Der Dosisrichtwert in der deutschen Regelung, der für den Normalbetrieb und für Betriebsstörungen gilt, entspricht dem Dosisrichtwert in der Schweiz (0,3 mSv pro Jahr).

Tabelle 17. Radiologische Akzeptanzkriterien in der deutschen Regelung

§	Scope of applicability	Time period	Dose [mSv]
§ 104 StrlSchV	Accident planning levels for nuclear installations		
	Effective dose	Event	50
	Organ equivalent dose: thyroid	Event	150
	Organ equivalent dose: skin, hands, forearms, feet and ankles	Event	500
	Organ equivalent dose: eye lens, gonads, uterus, red bone marrow	Event	50
	Organ equivalent dose: bone surface	Event	300
	Organ equivalent dose: great gut, lung, stomach, bladder, breast, liver, gullet, other organs or tissues unless specified above	Event	150

In den Niederlanden werden die radiologischen Akzeptanzkriterien als effektive Dosis für die Bevölkerung (für ein Einzelereignis) ausgedrückt und für die beiden Altersgruppen «ab 16 Jahren» und «unter 16 Jahren» (bei welcher die Werte durch 2,5 geteilt werden) unterschieden.

Tabelle 18. Radiologische Akzeptanzkriterien in der niederländischen Regelung

Probability of event (per year)	Maximum allowed effective dose	
	Age ≥16	Age under 16
≥ 10 ⁻¹	0.1 mSv	0.04 mSv
≥ 10 ⁻² & < 10 ⁻¹	1 mSv	0.4 mSv
≥ 10 ⁻⁴ & < 10 ⁻²	10 mSv	4 mSv
< 10 ⁻⁴	100 mSv	40 mSv

In Schweden werden die radiologischen Akzeptanzkriterien als effektive jährliche Dosis für alle Kernanlagen eines Standorts ausgedrückt (siehe Tabelle unten). Für einen Auslegungsstörfall gilt der Wert 100 mSv.

Tabelle 19. Radiologische Akzeptanzkriterien in der schwedischen Regelung

Event categories (H1-H5) according to Swedish regulations	Design criteria (mSv) for existing reactors (with respect to the general public)	Defence-in depth- level (DiD)	Associated plant condition categories (according to WENRA)
H1	0,1*	1	NO
H2	1	2/3	AOO
H3	10	3	AOO
H4A	100	3	DBA
H4B	100	3	DEC A
H5	**	4	DEC B

*) Per year and for all nuclear facilities at the site

**) No dose criterion is specified. Instead, here is a maximum permissible emission of Cesium-137, which corresponds to 100 TBq.

Auch für das Vereinigte Königreich werden die Kriterien als effektive Dosis ausgedrückt. Für Auslegungsstörfälle beträgt der Grenzwert 100 mSv für eine Häufigkeit zwischen 10⁻⁵ und 10⁻⁴, 10 mSv zwischen 10⁻⁴ und 10⁻³ und 1 mSv über 10⁻³.

In den USA schliesslich werden die radiologischen Akzeptanzkriterien sowohl als effektive Dosis (TEDE = Total Effective Dose Equivalent, gesamte effektive Äquivalentdosis) und als Schilddrüsen-Äquivalentdosis ausgedrückt:

- 0,25 mSv pro Jahr für die effektive Dosis und 0,75 mSv pro Jahr für die Schilddrüsen-Äquivalentdosis bei Normalbetrieb;
- 250 mSv für die effektive Dosis und 3 Sv für die Schilddrüsen-Äquivalentdosis während der Ereignisdauer im Falle eines Auslegungsstörfalls. Je nach Ereignishäufigkeit gilt ein Bruchteil dieser Werte: Für «moderat häufige» Ereignisse beträgt dieser Bruchteil 10 Prozent (d. h. 250 x 10 % = 25 mSv effektive Dosis). Für Ereignisse vom Typ «BWR Rod Drop Accident» (Steuerstabfall im Siedewasserreaktor) beträgt der Bruchteil 25 Prozent (d. h. 63 mSv effektive Dosis) (siehe Tabelle unten).

Tabelle 20. Radiologische Akzeptanzkriterien in der US-amerikanischen Regelung

Table 1 Accident Dose Criteria		
<u>Accident or Case</u>	<u>EAB and LPZ Dose Criteria</u>	<u>Analysis Release Duration</u>
LOCA	25 rem TEDE	30 days for all leakage pathways
BWR Main Steam Line Break		Instantaneous puff, until MSIV isolation
Fuel Damage or Pre-incident Spike	25 rem TEDE	
Equilibrium Iodine Activity	2.5 rem TEDE	
BWR Rod Drop Accident	6.3 rem TEDE	24 hours
Small Line Break Accident	2.5 rem TEDE	Until isolation, if capable, or until cold shutdown is established
PWR Steam Generator Tube Rupture		Affected SG: time to isolate; Unaffected SG(s): until cold shutdown is established
Fuel Damage or Pre-incident Spike	25 rem TEDE	
Coincident Iodine Spike	2.5 rem TEDE	
PWR Main Steam Line Break		Until cold shutdown is established
Fuel Damage or Pre-incident Spike	25 rem TEDE	
Coincident Iodine Spike	2.5 rem TEDE	
PWR Locked Rotor Accident	2.5 rem TEDE	Until cold shutdown is established
PWR Rod Ejection Accident	6.3 rem TEDE	30 days for containment leakage pathway; Until cold shutdown is established for secondary pathway
Fuel Handling Accident or Cask Drop	6.3 rem TEDE	2 hours

Interessant ist die Feststellung, dass in einigen Ländern für schwere Unfälle ein anderer Ansatz gewählt wird.

Kanada beispielsweise verwendet keine Dosiskriterien für seine Sicherheitsziele. Diese berücksichtigen (für neue Anlagen) die Häufigkeit grosser Freisetzungen von radioaktiven Stoffen (maximal 10^{-6} pro Jahr) und die Häufigkeit geringer Freisetzungen von radioaktiven Stoffen (maximal 10^{-5} pro Jahr). Eine Freisetzung gilt als gross (oder signifikant), wenn sie zu einer langfristigen Umsiedlung der Bevölkerung (oder kurzfristigen Evakuierung, aber eines grossen Gebiets oder mit einem längeren Evakuierungszeitraum) führt. Als gering gilt sie, wenn ein geschützter Aufenthalt oder eine Evakuierung nur vorübergehend erforderlich ist. Diese Freisetzungen sind durch die freigesetzte Aktivität (in Bq) gekennzeichnet: über 10^{15} Bq von I131 bei geringen Freisetzungen und über 100 TBq von ^{137}Cs bei grossen Freisetzungen.

In Finnland berücksichtigen die Sicherheitsziele für neue Anlagen die Häufigkeit signifikanter Freisetzungen von radioaktiven Stoffen (maximal $5 \cdot 10^{-7}$ pro Jahr). Diese «signifikanten» Freisetzungen sind wie in der kanadischen Regelung durch die freigesetzte Aktivität gekennzeichnet. Diese ist auf 100 TBq von Cs137 begrenzt.

In Schweden ist das Kriterium für «H5»-Ereignisse die maximale Freisetzung von ^{137}Cs in die Umwelt (100 TBq).

5.3.6 Kleinere Anlagen

Wie am Anfang von Kapitel 5 erwähnt, beziehen sich internationale Dokumente und nationale Regelungen bei der Definition von Störfallarten, Häufigkeiten und radiologischen Folgen hauptsächlich auf Kernkraftwerke und eventuell auf Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs.

Die Schweizer StSV ist für kleinere Anlagen in Spitälern oder in der Industrie, die umschlossenes oder offenes radioaktives Material verwenden, uneingeschränkt anwendbar. Die vom Bundesamt für Gesundheit (BAG) in den virtuellen und persönlichen Sitzungen geteilten Erfahrungen zeigen, dass Bewertungen radiologischer Folgen von über 1 mSv oder 0,3 mSv selten erreicht werden. Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit von möglicherweise eintretenden anomalen Situationen ist deshalb nicht zentral. Bisher ist die Bewertung der radiologischen Folgen nur für Anlagen erforderlich, in denen mit offenen Quellen gearbeitet wird.

Die Anforderung, eine Analyse potenzieller Unfälle selbst in kleineren Anlagen durchzuführen, ist eine gute Praxis. Allerdings kann die Anlage so spezifisch ausgelegt sein, dass es für den Gesuchsteller schwierig ist, eine Statistik potenzieller Unfälle zu erstellen. Wir haben zur Kenntnis genommen, dass das BAG gegenwärtig ein Handbuch als Hilfe in diesem Bereich erarbeitet.

Es ist deshalb schwierig, bei allen Anlagenarten denselben Sicherheitsansatz anzuwenden. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass in den nationalen Regelungen klar zwischen den verschiedenen Anlagengruppen unterschieden und das jeweils anwendbare Regelwerk bezeichnet wird. Ein Erlass in Frankreich enthält klare Grenzwerte für die Aktivität von Radionukliden oder die Leistung von ionisierende Strahlung erzeugenden Elektrogeräten, bei deren Überschreitung die restriktivsten Vorschriften gelten. Kleinere Anlagen sind im französischen Gesundheitsgesetz geregelt. Vor Kurzem erst haben die Betreiber Studien zu den radiologischen Folgen eines Störfalls durchgeführt. Das ist bei den Zyklotronen der Fall. In Frankreich betrifft die Erfahrung mit Störfällen in kleineren Anlagen vor allem das Personal. Der Ansatz besteht im Wesentlichen darin, dass Ingenieurinnen oder Ingenieure beurteilen, wie plausibel eine Situation ist, welche die Arbeitskräfte über den vorgeschriebenen Grenzwert hinaus exponieren könnte. Der Betreiber ist dann verpflichtet, Massnahmen zur Eliminierung dieser Situation zu treffen. Dabei handelt es sich um einen deterministischen Ansatz, bei dem nicht mehrere Störfallkategorien definiert werden müssen.

Es wäre jedoch interessant, die Tolerierbarkeit von Störfallsituationen in der Bevölkerung je nach Anlagenart zu untersuchen. Mit der Tolerierbarkeit und Verhältnismässigkeit im Strahlenschutzsystem befasst sich die Arbeitsgruppe 114 der ICRP. Die Frage des Verhältnisses zwischen Grenzwerten oder Folgen bei einem Störfall und dem mit der Verwendung von ionisierender Strahlung beabsichtigten Zweck kann dieser technischen Arbeitsgruppe anvertraut werden.

5.3.7 Schlussfolgerung

Es ist übliche Praxis der verschiedenen Länder, die Dosiskriterien für die Bevölkerung einzelnen Anlagenzuständen zuzuordnen, um damit eine einheitliche Störfallkategorisierung zu erreichen.

Diese Kriterien werden aber auf unterschiedliche Weise ausgedrückt: In allen Ländern wird eine effektive Dosis entweder für ein Jahr oder für ein Ereignis verwendet, in einigen Ländern aber auch eine Äquivalentdosis für die Schilddrüse oder andere Organe oder Gewebe. Beim Dosiskriterium wird abgesehen von den Niederlanden nicht nach Altersgruppen unterschieden.

In der Regel umfassen die Dosiskriterien keine Angaben zu den Integrationszeiten. Ausnahme sind einige Länder, in denen verschiedene Werte für unterschiedliche Störfallphasen gelten. In Belgien beispielsweise wird der Ansatz mit kurz-, mittel- und langfristigen Folgen angewendet.

Insgesamt unterscheiden sich die numerischen Werte von Land zu Land. Je nach Land gelten für die effektive Dosis bei Auslegungsstörfällen Dosiskriterien von 1, 5, 10, 20, 40, 50 oder 100 mSv (Schweden, Vereinigtes Königreich, Niederlande) oder sogar 250 mSv (USA).

Zur Erinnerung: In der Schweizer Regelung sind die folgenden Grenzwerte festgelegt: 0,3 mSv für Ereignisse mit einer Häufigkeit von über 10^{-2} pro Jahr, 1 mSv für das Intervall $[10^{-2}; 10^{-4}]$ und 100 mSv für das Intervall $[10^{-4}; 10^{-6}]$ – ohne Berücksichtigung der Schilddrüsendosen. Das Kriterium von 1 mSv gehört zu den niedrigsten Werten im Vergleich aller untersuchten Länder. Das Kriterium von 100 mSv liegt am oberen Ende der Dosiskriterien, wird aber häufig verwendet. Der Wert von 100 mSv gilt für eine über ein Jahr aufgenommene Dosis, während die niedrigeren Werte häufig für kürzere Integrationszeiten angewendet werden, was den Vergleich erschwert.

Andererseits scheint die Schweiz das einzige Land mit einer strikten Anwendung von Dosiskriterien zu sein, deren Nichteinhaltung zu einer temporären Ausserbetriebnahme einer Anlage führen könnte. In anderen Ländern scheint die Nichteinhaltung der Dosiskriterien weniger strikt gehandhabt zu werden, obwohl derselbe logische Ansatz («je grösser die Häufigkeit, desto niedriger die damit verbundene Dosis») mit den auf internationaler Ebene üblichen Ansätzen übereinstimmt. Schliesslich hat die Schweiz den von internationalen Strahlenschutzorganisationen (ICRP und IAEA) empfohlenen Ansatz übernommen, dem viele Länder, vor allem in Europa, folgen. Die im Schweizer Regelwerk verwendeten Eintrittsintervalle entsprechen den Empfehlungen der internationalen Organisationen und insgesamt auch den in anderen Ländern geltenden Intervallen. Die Dosisrichtwerte, die aus den Intervallgrenzen abgeleitet werden können, folgen den im Dokument ICRP 103 zur potenziellen Exposition festgehaltenen Empfehlungen.

5.4 Methode der Dosisberechnung

Ebenfalls untersucht wurde die Methode, mit der in der Schweiz die Einhaltung der Dosiskriterien überprüft wird, da sie das Resultat erheblich beeinflussen kann. Diesem Thema war ein grosser Teil eines Treffens zwischen IRSN und ENSI am 7. September 2022 in Brugg gewidmet.

Die Regelwerke verschiedene Länder, darunter der Schweiz, sind sehr präskriptiv: Die für die Dosisberechnung für den Sicherheitsbericht zu verwendenden Annahmen und Formeln sind in der ENSI-Richtlinie G14 festgelegt. Die Methode der Dosisberechnung ist somit «in Stein gemeisselt» und für alle identisch. Die Richtlinie G14 wird in nächster Zeit unter Berücksichtigung der ICRP-Empfehlungen und der IAEA-Normen aktualisiert werden. In anderen Ländern wie Frankreich ist die Wahl der Methode dem Betreiber überlassen, solange die regulatorischen Erwartungen erfüllt werden.

In Bezug auf die Dosisberechnung selbst wurde auf verschiedene Unterschiede zwischen den in der Schweiz und in Frankreich verwendeten Methoden hingewiesen:

- Als **Aufenthaltort der exponierten Person**, für welche die Berechnung durchgeführt wird, wird in der Schweiz die Grenze zum Standort angenommen. In Frankreich hingegen wird eine «repräsentative Person» betrachtet (repräsentativ für die am stärksten exponierten Personen in der Bevölkerung, mit Ausnahme von Personen mit extremen oder aussergewöhnlichen Lebensgewohnheiten), die sich nicht

zwingend (selten) an der Standortgrenze befindet. Das IRSN stellt fest, dass die in der Schweiz verwendete Annahme sehr strikt sein kann.

- Die Berücksichtigung des **Expositionspfads über die Nahrung (Ingestion)** in den verschiedenen Störfallphasen unterscheidet sich in den beiden Ländern: nur in den ersten 48 Stunden der Freisetzung in der Schweiz, nach der Freisetzungsperiode in Frankreich. Offen bleibt die Frage, wie sich die Bevölkerung bei einem Störfall in Bezug auf Selbstschutzmassnahmen tatsächlich verhält, da dies zu sehr unterschiedlichen Annahmen für die Bewertung der radiologischen Folgen führen könnte, insbesondere hinsichtlich des Expositionspfads über die Nahrung (Ingestion).
- **In Frankreich werden kurz-, mittel- und langfristige Berechnungen** verwendet. «Kurzfristig» betrifft in der Regel den Zeitraum der Freisetzung, «mittelfristig» den Zeitpunkt rund ein Jahr nach dem Ende der Freisetzung und «langfristig» die Zeit, die benötigt wird, bis wieder ein Wert von 1 mSv pro Jahr erreicht wird. Diese Konzepte der Berechnungen für unterschiedliche Phasen wurden in den Regelungen eingeführt, da die radiologischen Folgen nicht nur zum Zeitpunkt der Freisetzung (Exposition gegenüber der radioaktiven Wolke und Inhalation), sondern aufgrund der Deposition von Radionukliden (Ingestion) auch lange nach diesem Zeitraum spürbar sind. Je nach freigesetzten Radionukliden können die mit den «mittel-» oder «langfristigen» Phasen verbundenen Dosen höher sein als die Dosen für die «kurzfristige» Phase.

5.5 Synthese

Um die Erwartungen des Auftraggebers betreffend den Vergleich zwischen der Schweizer Strahlenschutzgesetzgebung und den internationalen Best Practices insbesondere im Hinblick auf Störfallsituationen zu erfüllen, setzt sich die Studie mit der Diskussion auseinander, welche Werte in Bezug auf radiologische Folgen und geschätzte Eintrittshäufigkeiten solcher Störfallsituationen als akzeptabel gelten sollen. Trotz der Relevanz der Informationen, welche die untenstehende Schlussfolgerung stützen, sollten diese Angaben und Daten mit Vorsicht verwendet und dürfen nicht ausserhalb des vorliegenden Kontextes bewertet werden.

Die Verbesserung dieser Informationen und Daten könnte fälschlicherweise so interpretiert werden, dass sie den grundlegenden Teil des Sicherheitsansatzes bilden. Sicherheit beruht in erster Linie auf der korrekten Anwendung von Sicherheitsgrundsätzen wie der gestaffelten Sicherheitsvorsorge (Defense in Depth), der Gewährleistung der wesentlichen Sicherheitsfunktionen oder der Aneinanderreihung von ausreichend voneinander unabhängigen Barrieren. Der Sicherheitsnachweis beschränkt sich deshalb nicht auf die Verwendung vorgegebener Dosisgrenzwerte, deren Gewichtung je nach Praxis oder Regelungen der einzelnen Länder unterschiedlich sein kann. Vielmehr bleiben die oben genannten Prinzipien grundlegend.

Zudem hat die internationale Harmonisierung in der Regel zum Ziel, allgemeine Grundsätze oder Praktiken zu vereinbaren, kann aber vernünftigerweise nicht auf methodische Einzelheiten angewendet werden. Bei Vergleichen sollten präzise Begriffe oder Zahlen deshalb mit Vorsicht verwendet werden. Das IRSN betont insbesondere, dass die den Wahrscheinlichkeiten zugeordneten Dosiswerte allein kein ausreichendes Kriterium

sind, um die regulatorischen Vorgaben der einzelnen Länder zu beurteilen, da sich die Berechnungsmethoden (insbesondere Expositionspfade und -dauer) unterscheiden können.

Deshalb sollte die Bewertung, die zur untenstehenden Schlussfolgerung führt, beispielsweise nicht durch eine Vergleichstabelle der geschätzten Ereignishäufigkeiten und Dosisgrenzwerte verschiedener Länder zusammengefasst werden: Eine solche Zusammenfassung könnte sowohl in Bezug auf den Sicherheitsansatz als auch die effektive Praxis in den einzelnen Ländern irreführend sein.

Die in den beiden Schweizer Verordnungen KEV und StSV verwendeten Dosiskriterien stimmen überein mit internen Referenzen und mit der Bandbreite an Werten in den verschiedenen Ländern, die das IRSN in Bezug auf die Regelungen dieser spezifischen Frage untersucht hat. Der für die Untergrenze des Bereichs von $[10^{-4} : 10^{-6}]$ geltende Wert von 100 mSv ist einer der höchsten von den anderen Ländern verwendeten Werte. Allerdings gilt der Wert von 100 mSv für einen Expositionszeitraum von einem Jahr, der länger ist als die für die Dosisberechnung in anderen Ländern verwendeten Expositionszeiträume. Im Rahmen unserer Analyse ist die Schweiz das einzige Land mit Kernanlagen, das die strikte Einhaltung eines Dosiskriteriums durchsetzt: Dieser Wert gilt als Schwellenwert für eine Ausserbetriebnahme (Reaktorabschaltung). Aus Sicht des IRSN stimmt die Festlegung eines präskriptiven Ansatzes mit der sehr strengen Anwendung eines Schwellenwerts überein. Bei den Diskussionen im Rahmen der Erarbeitung dieses Berichts wurde darauf hingewiesen, dass der Wert abrupt von 1 mSv auf 100 mSv ansteigt, sobald die Wahrscheinlichkeit des betreffenden Störfalls 10^{-4} pro Jahr erreicht. An dieser Stelle ist daran zu erinnern, dass der Sicherheitsansatz nicht auf der Einhaltung eines dosimetrischen Kriteriums beruht, sondern Teil eines kontinuierlichen Prozesses der Sicherheitsverbesserung und Optimierung des Strahlenschutzes ist. Der Vergleich mit einem im Regelwerk aufgeführten dosimetrischen Kriterium dient nur zu Kontrollzwecken und ist nicht a priori ein Ziel.

6 GESUNDHEITSAUSWIRKUNGEN VON NIEDRIGSTRAHLUNG

Der Schweizerische Bundesrat publizierte am 2. März 2018 in Erfüllung des Postulats 08.3475 des Parlaments einen ausführlichen Bericht (in deutscher und französischer Sprache) über die Wirkung von Strahlung im Niedrigdosisbereich auf Menschen und über die Beurteilung des Risikos. In diesem Bericht wurde der Kenntnisstand betreffend Risiken ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich für Krebs und andere Erkrankungen dargelegt (Bundesrat 2018). Die im vorliegenden Bericht zu beantwortende Frage 3 betrifft Kenntnisse, die sich seit der Publikation des Berichts des Bundesrats möglicherweise weiterentwickelt haben, sowie den Bedarf an zusätzlichen Daten oder weiterer Forschung, um Unsicherheiten im Niedrigdosisbereich zu verringern.

Im vorliegenden Kapitel werden die seit 2018 veröffentlichten Forschungsergebnisse zu den Risiken von Strahlung im Niedrigdosisbereich zusammengefasst. Mit diesen Ausführungen wird Frage 3 des Auftraggebers dieses Berichts (siehe Kapitel 2.1) beantwortet. Ziel ist nicht eine abschliessende Übersicht, sondern eine Zusammenfassung der wichtigsten epidemiologischen Erkenntnisse. Im Fokus stehen die für den Niedrigdosisbereich relevanten Informationen. In diesen Bereich fallen gemäss Definition des UNSCEAR Dosen unter 100 mSv (UNSCEAR 2015).

Das vorliegende Kapitel umfasst die folgenden Inhalte:

- Analyse des Berichts über den «Kenntnisstand betreffend Risiken ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich», den der Bundesrat 2018 in Erfüllung eines Postulats des Parlaments veröffentlicht hat;
- Übersicht über die seit 2018 in der internationalen Fachliteratur publizierten epidemiologischen Daten zu Gesundheitsrisiken im Niedrigdosisbereich;
- Synthese der wichtigsten Ergebnisse und Ermittlung von kurzfristigen Entwicklungsperspektiven auf Basis laufender Forschungsprojekte und Arbeitsgruppen.

6.1 Analyse des Berichts über den «Kenntnisstand betreffend Risiken ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich» von 2018

Der 28-seitige Bericht liefert eine Bestandesaufnahme zu den 2018 vorhandenen Kenntnissen über die Risiken der Exposition gegenüber ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich (Bundesrat 2018). Er enthält eine Zusammenfassung der epidemiologischen Erkenntnisse mit besonderem Fokus auf in der Schweiz durchgeführte Studien. Der grösste Teil des Berichts ist epidemiologischen Studien zu den Risiken für Krebserkrankungen und Leukämie im Niedrigdosisbereich gewidmet. Daneben werden aber auch die Risiken für andere Leiden als Krebserkrankungen und die Kenntnisse betreffend Mechanismen der Wirkung von Strahlen auf biologischer Ebene behandelt.

Auf Basis dieser Synthese kommt der Bericht zum Schluss, dass «aktuelle Studien die Anwendung des linearen Modells ohne Schwellenwert als vorsichtige Basis für den Strahlenschutz in der Schweiz bestätigen». Es wird aber darauf hingewiesen, dass «die Wirkung ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich auf das Herz-Kreislauf-

System [...]» ungenügend geklärt» ist und «besondere Aufmerksamkeit» verdient. Auch die «Mechanismen der strahlenbedingten Auslösung von Krebserkrankungen» seien noch besser zu verstehen. Zudem wird festgehalten: «Die Berücksichtigung der kürzlich beobachteten Effekte, wie die genomische Instabilität und der Bystander-Effekt bei der Krebsauslösung, wie auch die Wirkung der Strahlung bei Herz-Kreislauf-Erkrankungen stellen für die Abschätzung des Strahlenrisikos eine Herausforderung für die kommenden Jahre dar.» Die kritische Analyse dieses Berichts durch das IRSN zeigt Folgendes:

- Die im Bericht vorgenommene Bestandesaufnahme ist qualitativ hochwertig, nicht abschliessend, aber umfassend und ausgewogen. Der Stand der epidemiologischen Erkenntnisse betreffend die Wirkung niedriger Dosen im Jahr 2018 wird gut zusammengefasst;
- im Bericht werden die wichtigsten kontextuellen Elemente bereitgestellt, die für das Verständnis der Synthese benötigt werden (Definition von Niedrigdosen, Definition von stochastischen Effekten, Zusammenfassung der wichtigsten biologischen Mechanismen im Prozess der Krebsentstehung, internationaler Kontext des Strahlenschutzes usw.);
- die Schlussfolgerungen stimmen mit der Zusammenfassung des Kenntnisstands überein und ihre Bedeutung für das Strahlenschutzsystem wird klar erläutert.

6.2 Übersicht über die seit 2018 in der internationalen Fachliteratur publizierten epidemiologischen Daten zu Gesundheitsrisiken im Niedrigdosisbereich

In diesem Kapitel findet sich eine nicht abschliessende Zusammenfassung der wissenschaftlichen Literatur im Zeitraum 2018–2022 zu den Gesundheitseffekten der Belastung mit ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich. Die epidemiologischen Ergebnisse zu den Risiken für Krebs und Leukämie werden im Detail erläutert. Teilweise behandelt werden die Resultate betreffend die biologischen Mechanismen und die anderen Leiden als Krebserkrankungen.

6.2.1 Jüngste Ergebnisse zu den Risiken für Krebs und Leukämie bei niedrigen Dosen

Epidemiologische Studie zu den Überlebenden der Atombombenexplosionen von Hiroshima und Nagasaki

In den letzten Jahren wurden neue Analysen des Mortalitätsrisikos und der Krebsinzidenz für die Kohorte der japanischen Überlebenden der Atombombenabwürfe von 1945 (Life Span Study, LSS) mit einer verlängerten Beobachtungsdauer und einer revidierten Dosimetrie publiziert. Insbesondere die Risikoanalyse für spezifische anatomische Krebslokalisationen wurde seit 2018 weitergeführt mit der Untersuchung von Tumoren in der Brust (Brenner et al. 2018), dem Verdauungstrakt (Sakata et al. 2019; Sugiyama et al. 2020), Gebärmutter und Eierstöcken (Utada et al. 2019; Utada et al. 2021), im Hirn (Brenner et al. 2020), in der Leber (French et al. 2020), sowie in Prostata, Nieren und Blase (Mabuchi et al. 2021; Grant et al. 2021).

Analysen aller soliden Krebsarten zeigten Unterschiede in der Abschätzung der Form der Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen Mortalitäts- und Inzidenzdaten oder zwischen Männern und Frauen. Um diese Unterschiede zu erklären, untersuchten Brenner et al. (2022) die Parameter, welche die Abschätzung der Dosis-Wirkungs-

Beziehung beeinflussen könnten, im Detail. Werden für die Modellierung der Mortalitäts- und Inzidenzdaten identische Methoden verwendet, erscheint die beobachtete Dosis-Wirkungs-Beziehung bei Männern linear-quadratisch – sowohl bei den Mortalitäts- als auch bei den Inzidenzdaten. Bei den Frauen sind die Ergebnisse komplexer: Die Mortalitätsdaten weisen eine linear-quadratische Beziehung auf, bei den Inzidenzdaten scheint die Beziehung linear zu sein. Diese Unterschiede könnten durch einen unterschiedlichen Beitrag der Krebsarten je nach Zeit seit der Exposition sowie zwischen Männern und Frauen erklärt werden. Analysen nach Alter zum Expositionszeitpunkt zeigen zudem, dass die Krümmung der Kurve der Dosis-Wirkungs-Beziehung hauptsächlich bei Überlebenden beobachtet wird, die vor dem Alter von 20 Jahren exponiert wurden (Brenner et al. 2022). Diese Ergebnisse legen nahe, dass die gruppierte Analyse aller soliden Krebsarten keine optimale Methode für die Bewertung des Risikos für strahleninduzierte Krebserkrankungen ist und dass heute eine Analyse nach Lokalisation oder Gruppe von Krebslokalisationen geeigneter scheint (Cologne et al. 2019). Little et al. beobachteten auch Beweise für eine Krümmung bei den Mortalitätsdaten bei soliden Krebsarten (insbesondere der Gruppe solider Krebsarten mit Ausnahme von Lungen-, Brust- und Magenkrebs) sowie Leukämie, so dass sich die Schätzungen des zusätzlichen Risikos pro Doseinheit bei soliden Krebsarten und Leukämie fast verdoppelten, wenn die Dosis von 0,01 auf 1,0 Gy erhöht wurde, wobei der grösste Teil der Zunahme im Bereich zwischen 0,1 und 1,0 Gy erfolgte (Little et al. 2020). In einer neuen ergänzenden Analyse kommen die Autoren zum Schluss, dass basierend auf Mortalitäts- und Inzidenzdaten für alle soliden Krebsarten eine signifikante, aber leichte Krümmung der Dosis-Wirkungs-Beziehung vorliegt, weisen aber auf die Existenz signifikanter Unterschiede zwischen den Krebslokalisationen hin (Little und Hamada 2022).

Eine Analyse der durch solide Tumore verursachten Todesfälle bei japanischen Überlebenden, die bei den Atombombenabwürfen in Hiroshima oder Nagasaki in utero exponiert waren, wurde mit einem Follow-up bis 2012 durchgeführt. Bei Frauen, nicht aber bei Männern wurde eine Dosis-Wirkungs-Beziehung beobachtet. Allerdings waren am Ende des Follow-ups erst 14 Prozent der in utero exponierten Überlebenden gestorben. Die meisten Daten über diese Überlebenden werden also noch folgen (Sugiyama et al. 2021).

Epidemiologische Studien zu Patientinnen und Patienten im Rahmen der medizinischen Bildgebung

Seit 2018 sind zwei neue Analysen zum Krebsrisiko nach einer CT-Untersuchung im Kindesalter publiziert worden:

- Meulepas et al. analysierten Daten einer grossen niederländischen Kohorte von fast 170 000 Personen, die vor dem Alter von 18 Jahren mit CT untersucht worden waren. Die Studie stellte ein signifikantes zusätzliches relatives Risiko (Excess Relative Risk, ERR) pro Gy für Hirntumore (mittlere kumulative Gehirndosis von 38 mGy), aber nicht für Leukämie fest (Meulepas et al. 2019).
- Eine neue Analyse der französischen Kohorte wurde publiziert, nachdem neue Patientinnen und Patienten aufgenommen, der Beobachtungszeitraum verlängert und Informationen über prädisponierende Faktoren für Krebs im Kindesalter gesammelt worden waren. Die Untersuchung umfasste über 103 000 Patientinnen und Patienten, von denen 3 Prozent prädisponierende Faktoren für Krebs aufwiesen. Die mittleren kumulativen Dosen betragen 28 bzw. 10 mGy für Gehirn und rotes Knochenmark. Die Ergebnisse zeigen statistisch signifikante Dosis-Wirkungs-Beziehungen für Tumore des Zentralnervensystems und Leukämie, auch nach Ausschluss von Patientinnen und Patienten mit prädisponierenden Faktoren für Krebs (Foucault et al. 2022).

Ein Artikel enthält eine Auswertung der Literatur zu den Krebsrisiken, die mit der Exposition gegenüber ionisierender Strahlung bei medizinischen Diagnosen im Kindesalter verbunden sind (Abalo et al. 2020). Von den im Zeitraum 2000 bis 2019 veröffentlichten relevanten epidemiologischen Studien dienten sechs Studien zu pädiatrischen CT-Untersuchungen als Grundlage für eine Meta-Analyse des Leukämie- und Hirntumorrisikos. Insgesamt umfasste die Meta-Analyse über 11 Millionen Patientinnen und Patienten. Die Ergebnisse zeigten ein deutlich erhöhtes Risiko für Leukämie und Hirntumore. Die Studie kam zum Schluss, dass «eine Exposition bei CT-Untersuchungen während der Kindheit mit einem erhöhten Krebsrisiko verbunden zu sein scheint» (Abalo et al. 2020).

Die Ergebnisse der Studien zum Krebsrisiko nach pädiatrischen CT-Untersuchungen sind stets starker Kritik ausgesetzt, insbesondere weil die Möglichkeit einer umgekehrten Kausalität und eines «Indication Bias» besteht. Die Möglichkeit einer umgekehrten Kausalität ist bei Leukämien jedoch gering (da die meisten Leukämien bei jungen Menschen akute Leukämien sind). Eine jüngere Simulationsstudie zeigt zudem, dass bei Hirntumoren die Möglichkeit eines Bias durch umgekehrte Kausalität durch eine angepasste Ausschlussperiode stark verringert wurde (Little et al. 2022a). Die Erfassung der Informationen zu medizinischen Indikationen und zum Vorliegen von prädisponierenden Faktoren für Krebs oder Leukämie in bestimmten Studien sollte es ermöglichen, Fragen zu einem möglichen «Indication Bias» zu beantworten (Foucault et al. 2022; Bernier et al. 2019).

In einer Meta-Analyse wurde das langfristige Krebsrisiko bei Kindern/Jugendlichen mit Skoliose, bei denen zwischen 1912 und 1990 mehrfach radiologische Untersuchungen durchgeführt wurden, analysiert. Insgesamt wurden neun Studien mit rund 19 000 Patientinnen und Patienten mit Skoliose berücksichtigt. Die mittlere Anzahl Röntgenbilder der gesamten Wirbelsäule lag bei 23 (Bereich 0 – 618) und die mittlere kumulative Brustdosis betrug 110 mGy. Die Inzidenzraten für Brustkrebs und für alle Krebsarten waren bei Patientinnen und Patienten mit Skoliose im Vergleich zur Kontrolle statistisch höher (Luan et al. 2020).

Die ersten Hinweise darauf, dass niedrige Strahlendosen in utero das Risiko für eine Krebserkrankung im späteren Leben erhöhen könnten, wurden Mitte der 1950er-Jahre publiziert. Grundlage war eine Fall-Kontroll-Studie zur Mortalität von Krebs bei Kindern nach Röntgenuntersuchungen des Abdomens der schwangeren Mutter (Oxford Survey of Childhood Cancers, OSCC). Seither ist das Krebsrisiko nach einer Exposition in utero ein viel diskutiertes Thema, vor allem weil es ausserhalb der OSCC-Studie kaum Unterstützung gab. 2021 wurde eine Analyse aller verfügbaren Daten durchgeführt. Die Autoren verglichen die Ergebnisse aller kombinierten Studien (mit Ausnahme der OSCC) mit denjenigen der OSCC-Studie. Insgesamt entsprachen die geschätzten relativen Risiken der OSCC denjenigen aller anderen Studien zusammengenommen. Diese Analyse bestätigt somit die Beobachtung eines signifikanten zusätzlichen Risikos nach einer Exposition in utero sowohl für Leukämie als auch für alle anderen Krebserkrankungen im Kindesalter zusammengenommen (Wakeford und Bithell 2021). Eine weitere jüngere Literaturanalyse bestätigt die Existenz eines zusätzlichen Risikos für eine Krebserkrankung im Kindesalter nach einer Exposition in utero gegenüber Strahlung für die medizinische Diagnostik (Little et al. 2022b).

Epidemiologische Studien zu beruflich ionisierender Strahlung ausgesetzten Personen

Der Nutzen der Studien zu beruflich ionisierender Strahlung ausgesetzten Personen besteht darin, dass die Dosen in Form zahlreicher niedriger Strahlendosen über einen längeren Zeitraum, häufig über viele Jahre, akkumuliert

wurden. Trotz offener Fragen zur Qualität der während der ersten Betriebsjahre von Kernanlagen registrierten erhaltenen Dosen liefern diese Studien heute wichtige ergänzende Informationen zu den Ergebnissen der Studie bei Überlebenden der Atombombenabwürfe in Japan, auf welcher das heutige Strahlenschutzsystem weitgehend beruht (Wakeford 2018, 2021, 2022a; Rühm et al. 2022).

Die von Frankreich, dem Vereinigten Königreich und den USA gemeinsam durchgeführte INWORKS-Studie umfasst über 300 000 Arbeiterinnen und Arbeiter in Kernkraftwerken dieser drei Länder. Für die Personen mit einer kumulativen Dosis über Null lag die durchschnittliche Berufslebensdosis bei etwa 20 mGy. Insgesamt deckte das Monitoring mehr als 8 Millionen Personenjahre ab. Die meisten Ergebnisse wurden vor 2018 publiziert und zeigten eine signifikante Dosis-Wirkungs-Beziehung für Leukämie und alle soliden Tumore. Das geschätzte strahlungsbedingte Risiko blieb selbst dann statistisch signifikant, wenn der Bereich der kumulativen Dosen auf unter 150 mGy begrenzt wurde. Seit 2018 wurden ergänzende Analysen durchgeführt, um die Risikoabschätzungen der INWORKS-Studie so genau wie möglich mit denjenigen der LSS-Studie zu vergleichen. Das geschätzte Risiko pro Strahlendosiseinheit für Krebs bei den Beschäftigten der Nuklearindustrie war vergleichbar mit Schätzungen aus den Studien zu den Überlebenden der Atombombenabwürfe in Japan (Leuraud et al. 2021), was darauf hinweist, dass die Dosisleistung keinen oder nur einen geringen Einfluss hat.

Die Analyse des Krebsrisikos wurde mit einer Kohorte von über 170 000 Beschäftigten der Nuklearindustrie im Vereinigten Königreich aktualisiert. Damit konnten die Mortalität und Inzidenz für insgesamt über 5 Millionen Personenjahre beobachtet werden. Die durchschnittliche kumulative externe Dosis betrug gestützt auf Personendosimeter-Aufzeichnungen 25 mSv. Die Resultate zeigten eine signifikante Beziehung zwischen der kumulativen Dosis und dem Risiko für solide Krebsarten. Diese Beziehung blieb auch dann signifikant, wenn der Dosisbereich auf unter 100 mSv begrenzt wurde. Die Autorinnen und Autoren zogen den Schluss, dass ihre Studie das Krebsrisiko bei beruflicher Exposition gegenüber externer Strahlung mit einer niedrigen Dosis und einer niedrigen Dosisleistung direkt nachweist, wobei ihre Ergebnisse weitgehend mit den in der LSS-Studie und in den aktuellen ICRP-Leitlinien enthaltenen Risikoabschätzungen übereinstimmen (Haylock et al. 2018). In jüngeren ergänzenden Analysen konnte die Schätzung der Form der Dosis-Wirkungs-Beziehung für solide Tumore präzisiert und bestimmte spezifische Krebslokalisationen berücksichtigt werden (Hunter et al. 2022a). Die Studie bestätigt einen Zusammenhang zwischen Dosis und dem Risiko für Leukämie, aber auch für chronische myeloische Leukämie (Gillies et al. 2019). Eine statistisch signifikante Dosis-Wirkungs-Beziehung wurde auch für die Inzidenz von Non-Hodgkin-Lymphomen und Multiplen Myelomen festgestellt (Hunter et al. 2022b).

Die ersten Resultate der laufenden «Million Person Study» in den USA wurden veröffentlicht (Boice et al. 2022a; 2022b; 2022c; 2022d; 2022e). In deren Rahmen wurde bei 135 000 Beschäftigten in US-amerikanischen Kernkraftwerken das Leukämie- und Krebsrisiko untersucht. Die mittlere kumulative externe Dosis betrug 49 mSv. Die Untersuchungen zeigten eine signifikante, aber schwache Dosis-Wirkungs-Beziehung für Leukämien mit Ausnahme von chronischer lymphoblastischer Leukämie, aber keine Beziehung für alle soliden Krebsarten (Boice et al. 2021c).

2020 wurde eine Literaturlauswertung zu Studien mit medizinischem Personal, das ionisierender Strahlung ausgesetzt war, publiziert (Chartier et al. 2020). In den USA wurde eine Analyse der Mortalität durch Lungenkrebs und Leukämie mit einer Kohorte von über 109 000 Beschäftigten durchgeführt. Die durchschnittliche kumulative Dosis wurde auf 63 mSv geschätzt. Eine schwache, aber signifikante Dosis-Wirkungs-Beziehung wurde für

Lungenkrebs, aber nicht für Leukämie, Brustkrebs und Hirntumore beobachtet (Boice et al. 2022e). Allerdings ist zu beachten, dass sich bei diesen Studien die Frage nach der Qualität der Rekonstruktion der Personendosis stellt.

Krebsinzidenz und -mortalität in einer Kohorte russischer Liquidatoren wurden untersucht, die 1986–1987 an den Aufräumarbeiten in der Sperrzone von Tschernobyl teilnahmen. Die Studie umfasst über 69 000 Personen mit einer durchschnittlichen externen Dosis von 133 mGy. Die Ergebnisse zeigen eine signifikante positive Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen kumulativer Dosis und Risiko für solide Tumore sowohl in Bezug auf die Inzidenz als auch die Mortalität. Diese Beziehungen bleiben statistisch signifikant, wenn die Dosisbereiche auf 0–200 mGy begrenzt werden (Ivanov et al. 2020).

Epidemiologische Studien von Umweltexpositionen

In zwei ökologischen Studien in Frankreich wurden die potenziellen Risiken für Krebs im Kindesalter im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber ionisierender Strahlung aus natürlichen Quellen untersucht. Die erste Studie prüfte die Inzidenz von Tumoren des Zentralnervensystems in fast 5500 Fällen. Für Tumore des Zentralnervensystems bei Kindern wurde insgesamt kein Zusammenhang festgestellt. Hingegen wurde auf eine Beziehung zwischen pilozytischen Astrozytomen und Gamma-Strahlung hingewiesen (Berlivet et al. 2020). In der zweiten Studie wurde das Risiko akuter Leukämie bei Kindern untersucht, wobei die Exposition zum Zeitpunkt der Geburt betrachtet wurde (als Ergänzung zu einer früheren Studie, bei der die Exposition zum Diagnosezeitpunkt berücksichtigt wurde). Obwohl die Studie auf einer Population von 6000 Fällen akuter Leukämie basierte, zeigte sie keinen Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber natürlicher Strahlung und der Inzidenz von akuter Leukämie bei Kindern (Berlivet et al. 2021).

Eine Studie in der Schweiz analysierte den Zusammenhang zwischen natürlicher terrestrischer Gamma-Strahlung, Exposition gegenüber kosmischer Strahlung und Exposition gegenüber ¹³⁷Cs-Ablagerungen aus dem Unfall von Tschernobyl sowie der Inzidenz von Krebs im Kindesalter. Die Studie betrachtete knapp 3,5 Millionen Kinder unter 16 Jahren, einschliesslich über 3000 Krebsfälle, für die georeferenzierte Daten zum Wohnort vorlagen. Die mittlere kumulative Dosis seit Geburt betrug 8 mSv (Bereich 0 bis 31 mSv). Die Autorinnen und Autoren beobachteten eine signifikante positive Beziehung für Krebserkrankungen und Leukämie im Kindesalter. Aus ihrer Sicht stützen diese Ergebnisse die Annahme, dass «eine externe Exposition gegenüber natürlicher Strahlung zu den beobachteten Krebsraten bei Kindern, insbesondere zu Leukämie und Tumoren des Zentralnervensystems, beitragen kann» (Mazzei-Abba et al. 2021).

In zwei Übersichtsartikeln wurden alle verfügbaren Ergebnisse zu einer Beziehung zwischen dem Risiko für Krebs im Kindesalter und der Exposition gegenüber natürlicher Gamma-Strahlung betrachtet. Die Autorinnen und Autoren hielten fest, dass es mit den gegenwärtig verfügbaren Ergebnissen schwierig ist, gesicherte Schlussfolgerungen zu ziehen, insbesondere aufgrund der Schwierigkeit, präzise Schätzungen der Individualdosen zu erlangen, oder aufgrund der geringen Grösse bestimmter Studien (Mazzei-Abba et al. 2020; Kendall et al. 2021).

Fast zehn Jahre lang waren keine Ergebnisse mehr zur Kohorte im indischen Kerala, einer Region mit einer hohen natürlichen Strahlung, publiziert worden. Nun wurde eine neue Analyse der Krebsinzidenz für eine Kohorte von über 149 000 erwachsenen Bewohnerinnen und Bewohnern veröffentlicht, die durchschnittlich 19 Jahre lang beobachtet wurden. Ergebnis der Studie war eine negative, aber nicht signifikante Dosis-Wirkungs-Beziehung

nach Bereinigung um Alkohol- und Tabakkonsum sowie Bildungsniveau. Für Leukämie wurden keine quantitativen Resultate bereitgestellt (Jayalekshmy et al. 2021).

2021 wurden verschiedene Artikel zu den gesundheitlichen Folgen 35 Jahre bzw. 10 Jahre nach den Nuklearunfällen in Tschernobyl bzw. Fukushima publiziert. Ein Syntheseartikel wurde veröffentlicht, der einen Überblick über den Kenntnisstand bei den strahleninduzierten und potenziellen Effekten bietet. Diese Zusammenfassung weist auf die Wichtigkeit einer epidemiologischen Überwachung der von nuklearen Störfällen betroffenen Bevölkerung hin, beschreibt aber auch ausführlich die Grenzen der Interpretation beispielsweise im Zusammenhang mit der Qualität der Dosisrekonstruktion, der Schwierigkeit der langfristigen Nachverfolgung oder den Auswirkungen des Screenings auf das Schilddrüsenkrebsrisiko (Cléro et al. 2021).

Synthesen und Meta-Analysen

Neben den Arbeiten zu den in den vorangehenden Kapiteln beschriebenen Expositionssituationen wurden in den vergangenen Jahren mehrere allgemeine Syntheseberichte (Reviews, Meta-Analysen, gemeinsame Analysen) zum Krebsrisiko bei niedrigen Dosen für alle Krebserkrankungen oder für spezifische Krebslokalisationen veröffentlicht. Die wichtigsten davon werden unten zusammengefasst.

Bei der PIRATES-Studie handelt es sich um eine gemeinsame Analyse des Risikos für Schilddrüsenkrebs im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber niedrigen Strahlendosen (< 200 mGy) im Kindesalter (Alter zum Expositionszeitpunkt < 19 Jahre). Die Daten von acht medizinisch exponierten Kohorten wurden mit denjenigen von Überlebenden der Atombombenabwürfe in Japan kombiniert. Insgesamt wurden so mehr als 107 000 Personen über durchschnittlich 41 Jahre beobachtet. Die Analyse bestätigte eine lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung für Schilddrüsenkrebs, wobei mit einem jüngeren Alter bei der Exposition und einem jüngeren erreichten Lebensalter ein grösseres Risiko verbunden war (Lubin et al. 2017).

Weiter wurde eine gemeinsame Studie zum Leukämierisiko im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber Strahlung im Niedrigdosisbereich (< 100 mSv) im Kindesalter (Expositionsalter < 21 Jahre) durchgeführt. Die Studie kombinierte die Daten von acht medizinisch exponierten Kohorten und die Daten von Überlebenden der Atombombenabwürfe in Japan. Insgesamt wurden über 262 000 Personen über durchschnittlich 20 Jahre beobachtet. Die Ergebnisse bestätigten eine positive Dosis-Wirkungs-Beziehung unter 100 mSv und für akute lymphoblastische Leukämie sogar unter 20 mSv. Die Autorinnen und Autoren kamen zum Schluss, dass ihre Resultate «erkennen lassen, dass das gegenwärtige Strahlenschutzsystem konservativ ist und keinen übermässigen Schutz bietet» (Little et al. 2018).

In einer Meta-Analyse wurde das strahleninduzierte Risiko für solide Tumore mit Kohorten untersucht, die niedrigen Dosisleistungen ausgesetzt waren (Shore et al. 2017). Die Analyse umfasste 22 epidemiologische Studien mit Daten von über 900 000 Personen. Für jede Niedrigdosisbereich-Studie wurden die geschätzten Risiken mit den Daten der Kohorte der Überlebenden der Atombombenabwürfe in Japan verglichen, um die Wirkung der Dosisleistung auf das strahlenbedingte Krebsrisiko zu bewerten. Die kombinierte Analyse der 22 Studien zu niedrigen Dosisleistungen zeigte eine ähnliche Risikoabschätzung wie diejenige der LSS (im Bereich von 1 bis 2), wobei die Kohorte der Mayak-Beschäftigten das Gesamtergebnis dominierte. In einer auf Studien mit mittleren Dosen von < 100 mGy beschränkten Sensitivitätsanalyse (Analyse von 16 Mortalitätsstudien, unter Ausschluss insbesondere der Studie zu den Mayak-Beschäftigten) war das geschätzte zusätzliche relative Risiko

(ERR) immer noch statistisch signifikant und das geschätzte Risikoverhältnis zwischen den Studien zu niedrigen Dosisleistungen und der LSS lag nahe bei 1, ohne Evidenz für ein unterschiedliches Risiko zwischen den verschiedenen Niedrigdosisbereich-Studien. Gemäss den Autorinnen und Autoren liefern ihre Daten «eine wichtige Ergänzung zu den Risikoabschätzungen aus der LSS, die zu Strahlenschutz Zwecken verwendet werden» (Shore et al. 2017).

Der US-amerikanische National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) hat die Gültigkeit des linearen Modells ohne Schwellenwert (LNT) überprüft. Zu diesem Zweck führten die Autorinnen und Autoren eine kritische Überprüfung von 29 Studien oder Gruppen von epidemiologischen Studien zu beruflichen, medizinischen und Umweltexpositionen durch, die seit 2000 publiziert worden sind. Bewertet wurden zum einen die Qualität der einzelnen Studien und zum anderen, inwieweit sie das LNT-Modell stützen. Insgesamt stützten nur fünf Arbeiten das LNT-Modell nicht, vier Studien wurden als nicht schlüssig betrachtet. Im Bericht wurde festgestellt, dass die meisten der gesichteten Studien, einschliesslich der qualitativ hochwertigsten Arbeiten, für solide Tumore und Leukämie gut mit dem LNT-Modell übereinstimmen, und dass «das LNT-Modell, vielleicht mit einem Dosisleistungs-Effektivitätsfaktor (DREF) > 1, konservativ und im Strahlenschutz praktisch ist» (NCRP 2018; Shore et al. 2018).

2020 publizierte das US-amerikanische National Cancer Institute (NCI) eine Monographie der epidemiologischen Studien zum Krebsrisiko nach Expositionen gegenüber geringen Dosen ionisierender Strahlung mit niedrigem LET (Berrington de Gonzales et al. 2020). Die Analyse konzentrierte sich auf insgesamt 22 seit 2006 publizierte Studien mit durchschnittlichen Dosen unter 100 mSv. Das erste Ziel bestand in einer Bewertung des potenziellen Einflusses von verfälschenden Faktoren und Verzerrungen bei niedrigen Dosen, beispielsweise Selektionsverzerrungen, Quellen von Dosisfehlern, Aussagekraft der Studie, Verlust der Nachverfolgung und Ergebnisunsicherheit oder Fehlspezifikation des Modells (Schubauer-Berigan et al. 2020; Gilbert et al. 2020). Diese systematische Analyse möglicher Verzerrungen zeigte, dass die jüngsten epidemiologischen Studien mehrere Einschränkungen aufweisen, aber dass nur einige positive Studien potenziell zu einer Überbewertung des Risikos neigen. Nach Ausschluss dieser Studien zeigen nach wie vor die meisten Studien positive Risikoabschätzungen (Hauptmann et al. 2020). Das zweite Ziel war die Erstellung einer Meta-Analyse. Die Autorinnen und Autoren stellten fest, dass «jüngere epidemiologische Studien die Existenz zusätzlicher Krebsrisiken aufgrund ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich direkt bestätigen. Zudem stimmten die mit Expositionen im Niedrigdosisbereich verbundenen Krebsrisiken statistisch mit den geschätzten strahleninduzierten Krebsrisiken bei Überlebenden der Atombombenabwürfe in Japan überein» (Hauptmann et al. 2020).

Der UNSCEAR hat eine Bewertung der Unsicherheiten durchgeführt, die mit Risikoprojektionen für verschiedene Effekte im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber ionisierender Strahlung verbunden sind, insbesondere für die Risiken für Leukämie, solide Tumore und Schilddrüsenkrebs, wobei realistische Expositionsszenarien als Basis dienten (UNSCEAR 2020). Für die Berechnung der Glaubwürdigkeitsintervalle wurde eine Monte-Carlo-Methode der Unsicherheitsfortpflanzung angewandt, wodurch sowohl statistische Unsicherheit als auch die potenziellen Auswirkungen zusätzlicher Unsicherheitsquellen (ausgewählte Populationen, Expositionsbewertung, Bewertung der Gesundheitsfolgen, Studiendesign, verfälschende Faktoren, statistische Methoden und Modellunsicherheiten, weitere Unsicherheitsquellen) abgebildet wurden. Die Ergebnisse zeigten,

dass die geschätzten Unsicherheiten insgesamt gering (weniger als ein Faktor 1,5) und selten grösser als der Faktor 2 waren (UNSCEAR 2020).

Vor Kurzem hat der UNSCEAR eine umfassende Studie zu den für die Inferenz des Krebsrisikos aus Strahlung niedriger Dosis und niedriger Dosisleistung relevanten biologischen Mechanismen publiziert (UNSCEAR 2021). In diesem Bericht wurden die heutigen Kenntnisse über biologische Mechanismen der Strahlenwirkung bei Dosen vorwiegend im niedrigen bis moderaten Dosisbereich, die für den Prozess der Krebsentstehung relevant sind, zusammengefasst. Im Bericht wurden die mutagenen Mechanismen (die mit DNA-Modifikationen zusammenhängen), aber auch andere relevante biologische Mechanismen (Stimulation der DNA-Reparatur, Modifikationen der Genexpression, adaptive Antwort, Bystander-Effekte usw.) betrachtet. Er zeigt, dass mutagene Mechanismen heute gut bekannt sind und ihr Einfluss auf die Karzinogenese mit einem linearen Modell vereinbar ist. Hingegen wird die Existenz nicht-mutagener Mechanismen heute zwar anerkannt, doch ihr Beitrag zum Prozess der strahlenbedingten Krebsentstehung bleibt unklar. Gestützt auf ihre Auswertung weisen die Autorinnen und Autoren darauf hin, dass «das Wissen über die Mechanismen, die das Krebsrisiko bei niedrigen Dosen beeinflussen [...], darauf hinweist, dass ein globaler Schwellenwert für die Krebsinduktion unwahrscheinlich ist, und es Hinweise dafür gibt, dass einige bekannte Mechanismen bereits bei einem Dosiswert von 10 mGy wirken». Sie stellen fest, dass «in Anbetracht der soliden Kenntnis der Rolle von Mutationen und chromosomalen Abweichungen bei der Krebsentstehung die Verwendung eines Modells ohne Schwellenwert für die Inferenz des Risikos gerechtfertigt bleibt» (UNSCEAR 2021).

Rühm et al. haben eine Synthese der jüngsten epidemiologischen Daten zu den Krebsrisiken im Zusammenhang mit niedrigen Strahlendosen erstellt. Sie weisen darauf hin, dass die heute verfügbaren Resultate insgesamt auf Studien mit mehreren Millionen Personen basieren, von denen viele über ein halbes Jahrhundert lang nachverfolgt wurden. Sie stellen fest, dass die epidemiologischen Erkenntnisse substantielle Evidenz liefern, dass ionisierende Strahlung bei Dosen über 100 mGy Krebs hervorruft, und dass die Beweise für diese Wirkung bei Dosen unter 100 mGy zunehmen. Die Ergebnisse bei längerer Exposition (d. h. unter Beschäftigten im Nuklearbereich) zeigen, dass über viele Jahre akkumulierte geringe Dosen bei niedrigen Dosisleistungen stochastische Gesundheitseffekte haben (Rühm et al. 2022).

6.2.2 Jüngste Resultate zu den Risiken für andere Leiden als Krebserkrankungen bei niedrigen Dosen

Herz-Kreislauf-Erkrankungen

Herz-Kreislauf-Erkrankungen stellen in vielen Ländern eine grosse Gesundheitsbelastung und häufige Todesursache dar. Es ist heute umfassend belegt, dass hohe Strahlendosen das Herz und die Blutgefässe schädigen und ein bis zwei Jahrzehnte nach der Exposition zu einer erhöhten Inzidenz von Herz-Kreislauf-Erkrankungen bei Menschen führen. In der ICRP-Publikation 118 wurden Herz-Kreislauf-Erkrankungen als Gewebereaktionen mit einer Dosischwelle von 0,5 Gy zu Strahlenschutz Zwecken klassifiziert (ICRP 2012).

Gestützt auf die jüngsten Daten von japanischen Atombombenüberlebenden wurde eine Analyse des Lebenszeitriskos für Tod durch Herz-Kreislauf-Erkrankungen durchgeführt (revidierte Dosimetrie von 2022, Follow-up bis 2003). Die Autoren verwendeten verschiedene linear-quadratische Risikomodelle und

Bayesianische Techniken zur Fehlerbereinigung in den Dosisabschätzungen. Die Berechnungen wurden für eine Dosis von 0,1 Gy unter Verwendung von Hintergrunddaten aus der Bevölkerung des Vereinigten Königreichs durchgeführt. Derselbe Ansatz wurde zu Vergleichszwecken auf solide Tumore angewandt. Nach diesen Berechnungen läge das Lebenszeitrisiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen bei rund 40 bis 60 Prozent des für solide Tumore geschätzten Risikos, allerdings in Verbindung mit grösseren Glaubwürdigkeitsintervallen (Little et al. 2020).

Little et al. führten eine Analyse der verfügbaren Daten zum Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen bei niedrigen bis moderaten Dosen durch. Die Autoren bestätigen die Ergebnisse ihrer früheren Analysen weitgehend und zeigen ein statistisch signifikantes zusätzliches Risiko für die wichtigsten Arten von Herz-Kreislauf-Erkrankungen, insbesondere ischämische Herzerkrankungen und Schlaganfall, auf. Hingegen betonen die Autoren, dass die Interpretation der Ergebnisse insbesondere aufgrund der Heterogenität und Inkonsistenzen der Resultate und der Hinweise auf eine Nicht-Linearität der Dosis-Wirkungs-Beziehung für zerebrovaskuläre Unfälle schwierig ist (Little et al. 2021).

Im Rahmen der europäischen Plattform MELODI wurde ein Review über die Evidenz zu den mit ionisierender Strahlung verbundenen Risiken für Herz-Kreislauf-Erkrankungen erstellt. Der Review betrachtete die verschiedenen Situationen von klinischen, beruflichen oder Umweltexpositionen und befasste sich mit epidemiologischen, biologischen und systembiologischen Aspekten sowie der Risikomodellierung. Während der letzten zehn Jahre wurde Evidenz gesammelt, die auf ein erhöhtes Risiko bei niedrigen Dosen und niedrigen Dosisleistungen hinweist. Die Unsicherheiten betreffend die Form der Dosis-Wirkungs-Beziehung, die Dosischwelle (falls vorhanden) und den Beitrag anderer Risikofaktoren für Herz-Kreislauf-Erkrankungen sind bei niedrigen Dosen beträchtlich. Die Autorinnen und Autoren wiesen auf die Lücken im verfügbaren Wissen hin und schlugen künftige Forschungsrichtungen vor (Tapio et al. 2021). Zudem sind die heute vorhandenen epidemiologischen Daten mit grosser Vorsicht zu betrachten (Wakeford 2022b).

Erkrankungen des Zentralnervensystems

In den vergangenen Jahren wurden zunehmend Fragen nach den möglichen Auswirkungen von niedrigen bis moderaten Dosen ionisierender Strahlung auf die kognitiven Funktionen aufgeworfen. Eine im Rahmen der europäischen Plattform MELODI gebildete Expertengruppe hat den Kenntnisstand zu dieser Frage zusammengefasst. Moderate und hohe Dosen (über 0,5 Gy) ionisierender Strahlung sind ein belegter Risikofaktor für kognitive Störungen. Die Resultate zu den Wirkungen niedriger bis moderater Dosen bleiben aber lückenhaft. Benötigt wird eine bessere Charakterisierung der betrachteten Effekte. Zudem sollten die menschliche Lebenserwartung und das je nach Alter unterschiedliche Risiko besser berücksichtigt werden. Weiter ist unklar, welche Mechanismen strahleninduzierten kognitiven Effekten zugrunde liegen. Sie dürften zahlreiche biologische Pfade und verschiedene Zelltypen betreffen. Die Autorinnen und Autoren stellen fest, dass solide Forschungsarbeiten in grossen epidemiologischen Kohorten und experimentelle Studien an geeigneten Tiermodellen benötigt werden, um das Verständnis der strahleninduzierten kognitiven Effekte zu verbessern (Pasqual et al. 2021).

Lopez et al. führten eine systematische Analyse der zwischen 2000 und 2022 publizierten relevanten epidemiologischen Fachliteratur durch. 45 Publikationen zu verschiedenen Expositionssituationen (Atombombe,

berufliche, medizinische und Umweltexposition) wurden identifiziert. Die Meta-Analyse zeigte signifikante Dosis-Wirkungs-Beziehungen für die Inzidenz und Mortalität von zerebrovaskulären Erkrankungen und Parkinson. Die Autorinnen und Autoren stellten fest, dass ihre Ergebnisse «darauf hinweisen, dass eine niedrige bis moderate Exposition gegenüber ionisierender Strahlung bei Erwachsenen Auswirkungen auf Nicht-Krebs-Erkrankungen des zentralen Nervensystems haben kann» (Lopes et al. 2022).

Linsentrübungen

2012 revidierte die Internationale Strahlenschutzkommission (ICRP) die Klassifizierung von Linsentrübungen als Gewebereaktion und setzte den Schwellenwert auf 0,5 Gy herab. Die ICRP gab an, dass diese Anpassung hauptsächlich auf epidemiologischen Erkenntnissen beruhte (ICRP 2012).

Eine im Rahmen der europäischen Plattform MELODI gebildete Expertengruppe erstellte vor Kurzem eine Synthese des Wissens zu strahleninduzierten Linsentrübungen. Ziel dieser Arbeit war die Diskussion neuer epidemiologischer und klinischer Studien, ophthalmologischer Untersuchungstechniken und biologischer und mechanistischer Kenntnisse sowie die Ermittlung von Forschungslücken. Insbesondere empfahlen die Autorinnen und Autoren, die Wirkung ionisierender Strahlung auf die Augenlinsen im Zusammenhang mit umfassenderen systemischen Wirkungen, einschliesslich auf die Netzhaut, das Gehirn und andere Organe, zu untersuchen (Ainsbury et al. 2021).

Little et al. führten eine Analyse der jüngsten epidemiologischen Daten zum Risiko für strahleninduzierte Katarakte durch (Little et al. 2021). Ihre Untersuchung fand Evidenz für ein erhöhtes Risiko für kortikale und posteriore subkapsuläre Katarakte bei niedrigen bis moderaten Dosen. Die übrigen bekannten Risikofaktoren für Linsentrübungen, beispielsweise solare UV-Strahlung, Diabetes, Übergewicht, Rauchen, Kortikosterioide und okuläres Trauma, scheinen keine wahrscheinlichen Störfaktoren in der Dosis-Wirkungs-Beziehung zu sein. Gemäss der Analyse ist «die Einstufung von Katarakten als Gewebereaktion mit einer Schwellendosis von 0,5 Gy» angesichts bestimmter heute verfügbarer Daten «an der Grenze zur Inkonsistenz» (Little et al. 2021).

Vor Kurzem wurden die Ergebnisse des europäischen Projekts LDLensRad zu strahleninduzierten Katarakten publiziert (Ainsbury et al. 2022). Dieses Projekt lieferte Ergebnisse zu den Mechanismen der Induktion von Katarakten durch Strahlung und zu den Effekten von Alter und Dosisleistung. Die Resultate weisen auch darauf hin, dass die durch ionisierende Strahlung induzierten frühen Läsionen besser durch ein deterministisches Modell beschrieben werden und für späte Manifestationen ein stochastisches Modell besser geeignet ist. Diese Ergebnisse können für die Berücksichtigung des Risikos für Linsentrübungen im Strahlenschutzsystem von Bedeutung sein (Ainsbury et al. 2022).

Vererbare Wirkungen

Eine Forschergruppe hat die zwischen 1948 und 1954 erhobene Daten zu Schwangerschaftsverläufen von Frauen, welche die Atombombenabwürfe in Japan überlebt hatten, neu analysiert (Yamada et al. 2021). In früheren Berichten (1956, 1981 und 1990) war kein signifikanter Zusammenhang mit der Dosis festgestellt worden. Die Autorinnen und Autoren untersuchten erneut das Risiko für erhebliche angeborene Fehlbildungen und perinatale Todesfälle in einer Population von über 71 000 Kindern. Dabei verwendeten sie neu validierte Diagnosedaten, Schätzungen der Gonadendosis der Eltern aus dem Dosimetriesystem von 2022 sowie

verbesserte statistische Analysemethoden. Die Analysen zeigen einen positiven, aber nicht signifikanten Zusammenhang zwischen der Strahlenexposition der Eltern und einem erhöhten Risiko für erhebliche angeborene Fehlbildungen und perinatale Todesfälle. Die Autorinnen und Autoren unterstreichen die beträchtlichen Unsicherheiten bei ihren Ergebnissen und empfehlen, sie mit grosser Vorsicht zu interpretieren (Yamada et al. 2021).

Eine «Trio»-Familienstudie wurde in der Ukraine bei Tschernobyl-Liquidatoren durchgeführt. Die Autorinnen und Autoren untersuchten, ob Kinder, deren Eltern ionisierender Strahlung ausgesetzt waren, mit mehr de novo erworbenen Keimbahnmutationen geboren wurden (Bazyka et al. 2020). Die Studie umfasste 130 zwischen 1987 und 2002 geborene Kinder und ihre Eltern. Die mittleren Gonadendosen vor der Empfängnis betragen 365 mGy (Bereich 0–4080 mGy) bzw. 19 mGy (Bereich 0–550 mGy) bei den Vätern bzw. Müttern. In jeder Familie wurde eine vollständige Genomsequenzierung auf Basis von Blutproben beider Elternteile und eines Kindes vorgenommen. Die Analyse ergab keine dosisabhängige Erhöhung der Raten, Verteilungen oder Arten von de novo erworbenen Keimbahnmutationen. Die Autorinnen und Autoren stellten fest, dass «innerhalb dieses Expositionsbereichs keine Evidenz für einen wesentlichen Effekt auf de novo erworbene Keimbahnmutationen bei Menschen vorliegt, was auf eine minimale Auswirkung auf die Gesundheit nachfolgender Generationen hinweist (Yeager et al. 2021).

Eine zweite «Trio»-Familienstudie wurde im Vereinigten Königreich bei Veteranen durchgeführt, die während der britischen Nukleartests in Australien und im Südpazifik im Einsatz waren, um einen möglichen generationsübergreifenden Effekt ionisierender Strahlung zu untersuchen. Keimbahnmutationen wurden in 60 Familien (30 Kontrollfamilien mit Militärangehörigen, die nicht an den Tests beteiligt gewesen waren, und 30 Familien mit Veteranen der Nukleartests) analysiert. Die Studie zeigte keinen Anstieg der Gesamtanzahl der de novo erworbenen einzelnen Mutationen, kleinen Insertionen und Deletionen, strukturellen Varianten oder Cluster-Mutationen bei den Kindern der Veteranen. Die Autorinnen und Autoren stellen fest, dass ihre Ergebnisse «keine Evidenz für eine Zunahme von Keimbahnmutationen in einer Gruppe britischer Veteranen von Nukleartests liefern» (Rake et al. 2022; Moorhouse et al. 2022). Das Fehlen verlässlicher Dosimetriedaten für die Veteranen stellt aber eine wesentliche Einschränkung der Studie dar.

6.3 Laufende Expertenberichte und Projekte

Mehrere grosse epidemiologische Studien sind im Gange und dürften in den kommenden Jahren neue Resultate zu den Risiken niedriger Dosen für Krebs und andere Erkrankungen bringen. Zu erwähnen ist insbesondere das europäische Forschungsprojekt EPI-CT zum Krebsrisiko nach pädiatrischen CT-Untersuchungen. Dieses Projekt führt Daten aus Kohorten in Belgien, Dänemark, Deutschland, Frankreich, den Niederlanden, Norwegen, Schweden, Spanien und im Vereinigten Königreich zusammen. Es umfasst insgesamt über eine Million Kinder, bei denen vor dem Alter von 22 Jahren CT-Untersuchungen durchgeführt wurden, und verwendet einen verbesserten und standardisierten dosimetrischen Ansatz. Das Projekt wird eine hohe statistische Aussagekraft aufweisen und sollte auch den potenziellen Einfluss der umgekehrten Kausalität und von «Indication Biases» bewerten (Bernier et al. 2019; Thierry-Chef et al. 2021). Mehrere Projekte zu Beschäftigten im Nuklearbereich sind im Gange. Beim Projekt INWORKS zu Arbeiterinnen und Arbeitern in Kernkraftwerken wird gegenwärtig das

Follow-up erweitert. Es dürfte in naher Zukunft ergänzende Ergebnisse zu den Krebsrisiken bei niedrigen Dosen bereitstellen. Ein weiteres gross angelegtes Projekt ist die heute in den Vereinigten Staaten laufende «Million Person Study», die durch Zusammenführung verschiedener US-amerikanischer Studien ermöglichen dürfte, das Strahlenrisiko anhand einer sehr grossen Datenbasis zu quantifizieren (Boice et al. 2022d).

Ein von der US-amerikanischen «Academy of Sciences» eingesetzter Expertenausschuss hat vor Kurzem einen Bericht publiziert, der Forschungsprioritäten für die gesundheitlichen Auswirkungen von Strahlung im Niedrigdosisbereich in den USA identifiziert. Die Empfehlungen betreffen unter anderem die Entwicklung von Forschung im Bereich der Epidemiologie und Strahlenbiologie und die Notwendigkeit, entsprechende Forschungsinfrastrukturen zu unterhalten (NASEM 2022).

6.3.1 Expertenberichte zu den Krebs- und Leukämierisiken

Der UNSCEAR startete 2019 zur Aktualisierung des Berichts von 2006 eine Bewertung der im Bereich Strahlung und Krebs durchgeführten epidemiologischen Studien. Ziel ist eine systematische Überprüfung der Literatur für die einzelnen Krebslokalisationen, die Identifizierung der relevantesten Risikomodelle und die Abschätzung des Lebenszeitriskos mit verschiedenen methodischen Annahmen (Basisrate, additiver oder multiplikativer Transfer, modifizierende Faktoren wie Alter oder Geschlecht). Der Bericht wird für 2025 erwartet (UNSCEAR 2022).

Die Tätigkeit mehrerer Arbeitsgruppen (TG, Task Group) des ICRP Committee 1 weist einen direkten Zusammenhang mit der Bewertung von Krebsrisiken bei niedrigen Dosen auf (<https://www.icrp.org/>):

- Die TG 91 «Radiation Risk Inference at Low Dose and Low Dose Rate Exposure for Radiological Protection Purposes» hat zum Ziel, den Erkenntnisstand zu den Effekten ionisierender Strahlung bei niedrigen Dosen und niedrigen Dosisleistungen auf molekularer, zellulärer und experimenteller Ebene sowie auf der Ebene des Menschen zu überprüfen. Durch diese Arbeiten soll eine Grundlage bereitgestellt werden, um die Gültigkeit des 1991 in die Detriment-Berechnung eingeführten Reduktionsfaktors der Effekte bei niedrigen Dosen und Dosisleistungen (DDREF) zu überprüfen. Der Schlussbericht wird 2023 erwartet.
- Die TG 111 «Factors Governing the Individual Response of Humans to Ionizing Radiation» untersucht die wissenschaftliche Literatur zu interindividuellen Variationen bei der Reaktion auf Strahlung anhand eines systematischen Ansatzes. Zu den betrachteten Faktoren gehören unter anderem das Geschlecht, das Alter oder genetische Merkmale. Die Arbeitsgruppe befasst sich hauptsächlich mit dem Krebsrisiko, aber auch mit Gewebereaktionen und anderen Leiden als Krebserkrankungen. Der Bericht wird 2023 erwartet.
- Die TG 118 «Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q) und Radiation Weighting Factor (wR)» sichtet die wissenschaftliche Literatur zur relativen biologischen Wirksamkeit (RBE) und berät zu den potenziellen Auswirkungen auf die ICRP-Empfehlungen. Der Bericht soll 2025 erscheinen.
- Die TG 122 «Update of Detriment Calculation for Cancer» bewertet das heutige Wissen zu allen Aspekten der Detriment-Berechnung für Krebs, beurteilt deren potenzielle Wirkung und zieht bei Bedarf Anpassungen der Detriment-Berechnung in Erwägung. Die Arbeitsgruppe befasst sich mit zwei Hauptthemen: 1) Krebsrisiko (Form der Dosis-Wirkungs-Beziehung, Veränderung je nach Alter und Geschlecht, Transfer zwischen Populationen, Projektion über die Lebensdauer) und 2) Schweregrad der

Krebserkrankungen (Sterblichkeit, Lebensqualität, verlorene Lebensjahre, durch eine Krankheit beeinträchtigte Lebensjahre (DALYs)). Der Bericht wird voraussichtlich 2028 publiziert.

6.3.2 Expertenberichte zu den Risiken für andere Erkrankungen als Krebserkrankungen

2021 setzte der UNSCEAR eine Expertengruppe zur Bewertung der durch Strahlenexposition verursachten Herz-Kreislauf-Erkrankungen ein. Sie sollte eine systematische Auswertung der wissenschaftlichen Literatur zur Epidemiologie, Strahlenbiologie und Strahlenpathologie vornehmen. Dieser Review wird sich mit den Risiken für Herz-Kreislauf-Erkrankungen bei hohen Dosen (nach Strahlentherapie) und bei niedrigen Dosen befassen. Der Bericht wird für 2025 erwartet (UNSCEAR 2022).

In Fortsetzung des UNSCEAR-Arbeitsprogramms für den Zeitraum 2020–2024 sollte 2022 eine Bewertung der Auswirkungen einer Strahlenexposition auf das Nervensystem lanciert werden. Weitere Expertisen sind bis 2024 vorgesehen, insbesondere zur Bewertung des Wissens zu den Risiken für Linsentrübungen, den Auswirkungen ionisierender Strahlung auf das Immunsystem und anderen Nicht-Krebs-Erkrankungen (einschliesslich vererbbarer Effekte). Diese verschiedenen Berichte sollten nach 2025 veröffentlicht werden (UNSCEAR 2022).

Die Tätigkeit verschiedener Arbeitsgruppen (TG) des ICRP Committee 1 weist einen direkten Zusammenhang mit der Bewertung der Risiken für Nicht-Krebs-Erkrankungen bei niedrigen Dosen auf (<https://www.icrp.org/>):

- Die TG 119 «Effects of Ionizing Radiation on Diseases of the Circulatory System and their Consideration in the System of Radiological Protection» hat zum Ziel, eine kritische Auswertung der jüngsten wissenschaftlichen Literatur zu epidemiologischen und strahlenbiologischen Studien zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen durchzuführen und Empfehlungen zur Berücksichtigung dieses Wissens im Strahlenschutzsystem abzugeben. Der Schlussbericht wird 2026 erwartet.
- Die TG 121 «Effects of Ionizing Radiation Exposure on Offspring and Next Generations» bezweckt eine Sichtung des Kenntnisstands zu den Auswirkungen einer Strahlenexposition in utero sowie zu den vererbaren Effekten einer Strahlenexposition. Aufgrund der Arbeiten der TG soll es letztlich möglich sein, Empfehlungen abzugeben, wie diese Auswirkungen im Strahlenschutzsystem für Menschen und nichtmenschliche Biota berücksichtigt werden sollen. Der Schlussbericht wird 2026 erwartet.
- Die TG 123 «Classification of Harmful Radiation-Induced Effects on Human Health for Radiological Protection Purposes» hat zum Ziel, die Begründung für die gegenwärtige Einstufung der Strahlenwirkungen (stochastische Effekte versus Gewebereaktionen) zu klären, die Beweggründe für eine Weiterentwicklung dieser Einstufung zu bewerten und, falls eine Anpassung aus wissenschaftlicher Sicht als wünschenswert erachtet wird, die Auswirkungen für den praktischen Umgang mit dem Strahlenrisiko zu bewerten, um Gewebereaktionen zu vermeiden und die stochastischen Wirkungen zu begrenzen. Es stellt sich insbesondere die Frage, ob bestimmte Nicht-Krebs-Erkrankungen in die Detriment-Berechnung aufgenommen werden sollen. Der Schlussbericht wird 2027 erwartet.

6.4 Schlussfolgerungen und Perspektiven

Die vorliegende Synthese stützt und untermauert die Schlussfolgerungen des Berichts über die Wirkung von Strahlung im Niedrigdosisbereich auf Menschen, den der Bundesrat 2018 publiziert hat (Bundesrat 2018).

Die in den letzten Jahren gewonnenen epidemiologischen Erkenntnisse erweitern den wissenschaftlichen Kenntnisstand betreffend die Auswirkungen niedriger Strahlendosen auf das Krebsrisiko erheblich. Sie zeigen, dass bei Dosiswerten in der Grössenordnung von 100 mGy oder weniger zumindest für alle Krebsarten zusammengenommen und auch für bestimmte spezifische Krebsarten ein zusätzliches Krebsrisiko besteht. Verschiedene internationale Konsortien (ICRP, NCRP, UNSCEAR, NCI) stellen in Synthesen oder gemeinsamen Analysen fest, dass die Evidenz für die krebserregenden Effekte ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich zunimmt und die Annahme, dass es für den Strahlenschutz keinen Schwellenwert gibt, sinnvoll und vernünftig scheint.

Diese Ergebnisse belegen, wie wichtig die Weiterführung der laufenden epidemiologischen Studien ist, um das Follow-up zu erweitern und die Effekte zu berücksichtigen, die möglicherweise erst Jahrzehnte nach der Exposition auftreten. Sie zeigen auch die Bedeutung gemeinsamer internationaler Studien, welche die Vergleichbarkeit der Resultate und die Fähigkeit, Studien zu geringen bis sehr geringen Risiken zu identifizieren, verbessern. Die Erweiterung der betrachteten Expositionssituationen durch die verschiedenen durchgeführten Studien hat es schliesslich ermöglicht, unser Wissen über die Auswirkungen einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung deutlich zu verbessern.

Die Überprüfung der strahlenbiologischen Resultate stand nicht im Fokus dieser Synthese. Dennoch ist interessant, den UNSCEAR-Bericht zu den biologischen Mechanismen von Krebs bei niedrigen Dosen und niedrigen Dosisleistungen zu zitieren. Zwar steht fest, dass bestimmte Mechanismen nicht linearen Beziehungen folgen. Der Gesamtprozess der strahleninduzierten Karzinogenese beinhaltet aber eine starke mutagene Komponente, die linear erscheint und Auswirkungen bei Dosen in der Grössenordnung von 10 mGy zeigt. Die Autorinnen und Autoren stellen fest, dass die Existenz eines Gesamtschwellenwerts für die Krebsinduktion unwahrscheinlich ist und die Verwendung eines Modells ohne Schwellenwert für die Risikoermittlung zu Strahlenschutz Zwecken gerechtfertigt bleibt (UNSCEAR 2021).

In den letzten Jahren wurden auch für Nicht-Krebs-Erkrankungen zahlreiche neue Erkenntnisse erlangt. Obwohl eine wachsende Zahl von epidemiologischen Resultaten auf ein zusätzliches Risiko bei niedrigen Dosen hinzuweisen scheint, bleibt die Unsicherheit sehr gross und die Heterogenität der Resultate schränkt die Möglichkeit zur Beschreibung der Risiken bei niedrigen Dosen stark ein. Im Rahmen der Arbeiten des UNSCEAR befassen sich mehrere Expertengruppen mit den Krebsrisiken und den nicht-kanzerogenen Auswirkungen. Dank dieser Arbeiten sollte unser Wissen über Auswirkungen niedriger Dosen in den kommenden Jahren konsolidiert werden.

Des Weiteren hat die ICRP vor Kurzem einen Prozess für eine Überarbeitung des Strahlenschutzsystems eingeleitet (Clement et al. 2022). Mehrere Arbeitsgruppen wurden eingesetzt, die sich beispielsweise mit der Verbesserung der Klassifizierung der gesundheitlichen Auswirkungen von Strahlung, den Faktoren für die unterschiedliche individuelle Reaktion auf Strahlenexposition oder den Risiken für Herz-Kreislauf-Erkrankungen befassen. In den kommenden Jahren dürften sie auch neue Synthesen zu den Auswirkungen niedriger Dosen

bereitstellen. Es braucht weitere Forschungsanstrengungen in der Strahlenbiologie, um das Wissen über biologischen Mechanismen zu stärken, und in der Epidemiologie, um die Quantifizierung der Dosis-Wirkungs-Beziehungen bei niedrigen Dosen zu verbessern (Laurier 2021). Durch die Entwicklung multidisziplinärer Ansätze mit Berücksichtigung der Strahlenbiologie, Epidemiologie und Modellierung – wie beispielsweise des «Adverse Outcome Pathway (AOP)» (Chauhan 2022) – oder die Erarbeitung mechanistischer Modelle sollte es möglich sein, die Abweichungen zwischen experimentellen Ergebnissen bei Tieren und Beobachtungsdaten bei Menschen besser zu verstehen (NCRP 2020; UNSCEAR 2021). Diese Forschungsarbeiten sollten schliesslich die Bewertung des Risikos im Niedrigdosisbereich verbessern.

6.5 Quellen

- Abalo KD, Rage E, Leuraud K, Richardson D, Ducou Le Pointe H, Laurier D, Bernier MO. Early life ionizing radiation exposure and cancer risks: systematic review and meta-analysis. *Pediatr Radiol*. 2021; 51(1): 45-56. Correction in: *Pediatr Radiol*. 2021; 51(1): 157-8.
- Ainsbury EA, Dalke C, Hamada N, Benadjaoud MA, Chumak V, Ginjaume M, Kok JL, Mancuso M, Sabatier L, Struelens L, Thariat J, Jourdain JR. Radiation-induced lens opacities: Epidemiological, clinical and experimental evidence, methodological issues, research gaps and strategy. *Environ Int*. 2021; 146: 106213.
- Ainsbury EA, Dalke C, Mancuso M, Kadhim M, Quinlan RA, Azizova T, Dauer LT, Dynlacht JR, Tanner R, Hamada N. Introduction to the Special LDLensRad Focus Issue. *Radiat Res*. 2022; 197(1): 1-6.
- Bazyka D, Hatch M, Gudzenko N, Cahoon EK, Drozdovitch V, Little MP, Chumak V, Bakhanova E, Belyi D, Kryuchkov V, Golovanov I, Mabuchi K, Illienko I, Belayev Y, Bodelon C, Machiela MJ, Hutchinson A, Yeager M, Berrington de González A, Chanock SJ. Field Study of the Possible Effect of Parental Irradiation on the Germline of Children Born to Cleanup Workers and Evacuees of the Chernobyl Nuclear Accident. *Am J Epidemiol*. 2020; 189(12): 1451-1460.
- Berlivet J, Hémon D, Cléro E, Ielsch G, Laurier D, Faure L, Clavel J, Goujon S. Residential exposure to natural background radiation at birth and risk of childhood acute leukemia in France 1990-2009. *J Environ Radioact*. 2021; 233: 106613.
- Berlivet J, Hémon D, Cléro E, Ielsch G, Laurier D, Guissou S, Lacour B, Clavel J, Goujon S. Ecological association between residential natural background radiation exposure and the incidence rate of childhood central nervous system tumors in France, 2000-2012. *J Environ Radioact*. 2020; 211:106071.
- Bernier MO, Baysson H, Pearce MS, Moissonnier M, Berrington de Gonzalez A, Blettner M, Cardis E, Dabin J, Gradowska P, Harbron RW, Hauptmann M, Istad T, Journy N, Johansen C, Kaijser M, Kjaerheim K, Laurier D, Lecornet L, Meulepas JM, Nordenskjöld A, Olerud H, Pokora R, Sovik A, Struelens L, Thierry-Chef I, Kesminiene A. Cohort Profile: The EPI-CT study: a European pooled epidemiological study to quantify the potential radiation-induced risks associated to pediatric CT-scans. *Int J Epidemiol*. 2019; 48(2): 379-81.
- Berrington de Gonzalez A, Daniels RD, Cardis E, Cullings H, Gilbert E, Hauptmann M, Kendall G, Laurier D, Linet M, Little M, Lubin JH, Preston D, Richardson DB, Stram D, Thierrychef I, Schubauer-Berigan MK. Epidemiological Studies of the Low-dose Ionizing Radiation and Cancer: Rationale and Framework for the Monograph and Overview of Eligible Studies. *JNCI Monographs* 2020; 2020(56): 97-113.
- Boice JD Jr, Bouville A, Dauer LT, Golden AP, Wakeford R. Introduction to the special issue on the US Million Person Study of health effects from low-level exposure to radiation. *Int J Radiat Biol*. 2022a; 98(4): 529-532.
- Boice JD Jr, Cohen SS, Mumma MT, Golden AP, Howard SC, Girardi DJ, Ellis ED, Bellamy MB, Dauer LT, Samuels C, Eckerman KF, Leggett RW. Mortality among workers at the Los Alamos National Laboratory, 1943-2017. *Int J Radiat Biol*. 2022b; 98(4): 722-749.
- Boice JD Jr, Cohen SS, Mumma MT, Hagemeyer DA, Chen H, Golden AP, Yoder RC, Dauer LT. Mortality from leukemia, cancer and heart disease among U.S. nuclear power plant workers, 1957-2011. *Int J Radiat Biol*. 2022c; 98(4): 657-678.
- Boice JD Jr, Quinn B, Al-Nabulsi I, Ansari A, Blake PK, Blattnig SR, Caffrey EA, Cohen SS, Golden AP, Held KD, Jokisch DW, Leggett RW, Mumma MT, Samuels C, Till JE, Tolmachev SY, Yoder RC, Zhou JY, Dauer LT. A million persons, a million dreams: a vision for a national center of radiation epidemiology and biology. *Int J Radiat Biol*. 2022d; 98(4):795-821.
- Boice JD Jr, Cohen SS, Mumma MT, Howard SC, Yoder RC, Dauer LT. Mortality among medical radiation workers in the United States, 1965-2016. *Int J Radiat Biol*. 2022e: 1-25.

- Brenner AV, Preston DL, Sakata R, Cologne J, Sugiyama H, Utada M, Cahoon EK, Grant E, Mabuchi K, Ozasa K. Comparison of All Solid Cancer Mortality and Incidence Dose-Response in the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors, 1958-2009. *Radiat Res.* 2022; 197(5): 491-508.
- Brenner AV, Preston DL, Sakata R, Sugiyama H, De Gonzalez AB, French B, Utada M, Cahoon EK, Sadakane A, Ozasa K, Grant EJ, Mabuchi K. Incidence of breast cancer in the life span study of atomic bomb survivors: 1958-2009. *Radiat Res.* 2018; 190(4):433-444.
- Brenner AV, Sugiyama H, Preston DL, Sakata R, French B, Sadakane A, Cahoon EK, Utada M, Mabuchi K, Ozasa K. Radiation risk of central nervous system tumors in the Life Span Study of atomic bomb survivors, 1958–2009. *Eur J Epidemiol.* 2020; 35(6):591-600.
- Chartier H, Fassier P, Leuraud K, Jacob S, Roy L, Baudin C, Laurier D, Bernier MO. Occupational low-dose irradiation and cancer risk among medical radiation workers. *Occup Med. (Lond).* 2020; 70(7):476-44.
- Chauhan V, Beaton D, Hamada N, Wilkins R, Burt J, Leblanc J, Cool D, Garnier-Laplace J, Laurier D, Le Y, Yamada Y, Tollefsen KE. Adverse outcome pathway: a path toward better data consolidation and global co-ordination of radiation research. *Int J Radiat Biol.* 2022: 1-10.
- Clement C, Rühm W, Harrison J, Applegate K, Cool D, Larsson CM, Cousins C, Lochard J, Bouffler S, Cho K, Kai M, Laurier D, Liu S, Romanov S. Maintenir les recommandations de la CIPR adaptées aux besoins. Traduction française de «Clement C, et al. Keeping the ICRP Recommendations Fit for Purpose. *J Radiol Prot.* 2021; 41(2):1390–1409». *Radioprotection* 2022; 57(2): 93–106.
- Cléro E, Leuraud K, Laurier D, Tsubokura M. Conséquences sanitaires 35 ans et 10 ans après les accidents nucléaires de Tchernobyl et de Fukushima. *Environ Risque Santé* 2021; 20: 525-534.
- Cologne J, Kim J, Sugiyama H, French B, Cullings H, Preston D, Mabuchi K, Ozasa K. Effect of heterogeneity in background incidence on inference about the solid-cancer radiation dose response in atomic bomb survivors. *Radiat Res.* 2019; 192: 388-398.
- Bundesrat. Kenntnisstand betreffend Risiken ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich. Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats 08.3475, Fehr Hans-Jürg, vom 17. September 2008. Bundesrat der Schweizerischen Eidgenossenschaft, Bern, 2. März 2018.
- Foucault A, Ancelet S, Dreuil S, Caër-Lorho S, Ducou Le Pointe H, Brisse H, Chateil JF, Lee C, Leuraud K, Bernier MO. Childhood cancer risks estimates following CT scans: an update of the French CT cohort study. *Eur Radiol.* 2022; 32(8): 5491-5498.
- French B, Sadakane A, Cologne J, Mabuchi K, Ozasa K, Preston DL. Misclassification of primary liver cancer in the Life Span Study of atomic bomb survivors. *Int J Cancer* 2020; 147(5): 1294-1299.
- Gilbert ES, Little MP, Preston DL, Stram DO. Issues in Interpreting Epidemiologic Studies of Populations Exposed to Low-Dose, High-Energy Photon Radiation. *JNCI Monographs* 2020; 2020(56): 176-187.
- Gillies M, Haylock R, Hunter N, Zhang W. Risk of Leukemia Associated with Protracted Low-Dose Radiation Exposure: Updated Results from the National Registry for Radiation Workers Study. *Radiat Res.* 2019; 192(5):527-537.
- Grant EJ, Yamamura M, Brenner AV, Preston DL, Utada M, Sugiyama H, Sakata R, Mabuchi K, Ozasa K. Radiation risks for the incidence of kidney, bladder and other urinary tract cancers: 1958-2009. *Radiat Res.* 2021; 195(2):140-148.
- Hauptmann M, Daniels RD, Cardis E, Cullings H, Kendall G, Laurier D, Linet M, Little M, Lubin JH, Preston D, Richardson DB, Stram D, Thierrychef I, Schubauer-Berigan MK, Gilbert E, Berrington de Gonzalez A. Epidemiological Studies of Low-dose Ionizing Radiation and Cancer: Summary Bias Assessment and Meta-Analysis. *JNCI Monographs* 2020; 2020(56):188-200.
- Haylock RGE, Gillies M, Hunter N, Zhang W, Phillipson M. Cancer mortality and incidence following external occupational radiation exposure: an update of the 3rd analysis of the UK national registry for radiation workers. *Br J Cancer* 2018; 119(5): 631-637.
- Hunter N, Haylock RGE, Gillies M, Zhang W. Extended analysis of solid cancer incidence among the Nuclear Industry Workers in the UK: 1955-2011. *Radiat Res.* 2022a; 198(1): 1-17.
- Hunter N, Haylock R. Radiation risks of lymphoma and multiple myeloma incidence in the updated NRRW-3 cohort in the UK: 1955-2011. *J Radiol Prot.* 2022b; 42(1).
- International Commission on Radiological Protection (ICRP). ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. ICRP Publication 118. *Ann ICRP* 2012; 41(1/2).
- Ivanov VK, Karpenko SV, Kashcheev VV, Lovachev SS, Kashcheeva PV, Shchukina NV, Tumanov KA, Kochergina EV, Maksioutov MA. Relationship between follow-up periods and the low-dose ranges with statistically significant radiation-induced risk of all solid cancers in the Russian cohort of Chernobyl emergency workers. *Radiat Environ Biophys.* 2020; 59(3):415-421.
- Jayalekshmi PA, Nair RA, Nair RRR, Hoel DG, Akiba S, Nakamura S, Endo K. Background Radiation and Cancer Excluding Leukemia in Kerala, India –Karunagappally Cohort Study. *Radiat Environ Med.* 2021; 10(2): 74–81.
- Kendall GM, Little MP, Wakeford R. A review of studies of childhood cancer and natural background radiation. *Int J Radiat Biol.* 2021; 97(6): 769-781.

- Laurier D, Rühm W, Paquet F, Applegate K, Cool D, Clement C; International Commission on Radiological Protection (ICRP). Areas of research to support the system of radiological protection. *Radiat Environ Biophys.* 2021; 60(4):519-530.
- Leuraud K, Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, Gillies M, Haylock R, Moissonnier M, Schubauer-Berigan M, Thierry-Chef I, Kesminiene A, Laurier D. Risk of Cancer Associated with Low Dose Radiation Exposure: Comparison of Results between the INWORKS nuclear workers study and the A-bomb Survivors Study. *Radiat Environ Biophys.* 2021; 60(1):23-39.
- Little MP, Wakeford R, Borrego D, French B, Zablotska LB, Adams MJ, Allodji R, de Vathaire F, Lee C, Brenner AV, Miller JS, Campbell D, Pearce MS, Doody MM, Holmberg E, Lundell M, Sadetzki S, Linet MS, Berrington de González A. Leukaemia and myeloid malignancy among people exposed to low doses (<100 mSv) of ionising radiation during childhood: a pooled analysis of nine historical cohort studies. *Lancet Haematol.* 2018; 5(8):e346-e358.
- Little MP, Pawel D, Misumi M, Hamada N, Cullings HM, Wakeford R, Ozasa K. Lifetime Mortality Risk from Cancer and Circulatory Disease Predicted from the Japanese Atomic Bomb Survivor Life Span Study Data Taking Account of Dose Measurement Error. *Radiat Res.* 2020; 194(3):259-276. Erratum in: *Radiat Res.* 2020; 194(5):566.
- Little MP, Azizova TV, Hamada N. Low- and moderate-dose non-cancer effects of ionizing radiation in directly exposed individuals, especially circulatory and ocular diseases: a review of the epidemiology. *Int J Radiat Biol.* 2021; 97(6): 782-803.
- Little MP, Patel A, Lee C, Hauptmann M, Berrington de Gonzalez A, Albert P. Impact of reverse causation on estimates of cancer risk associated with radiation exposure from computerized tomography: a simulation study modeled on brain cancer. *Am J Epidemiol.* 2022a; 191(1): 173-181.
- Little MP, Wakeford R, Bouffler SD, Abalo K, Hauptmann M, Hamada N, Kendall GM. Review of the risk of cancer following low and moderate doses of sparsely ionising radiation received in early life in groups with individually estimated doses. *Environ Int.* 2022b; 159: 106983.
- Little MP, Hamada N. Low-Dose Extrapolation Factors Implied by Mortality and Incidence Data from the Japanese Atomic Bomb Survivor Life Span Study Data. *Radiat Res.* 2022.
- Lopes J, Leuraud K, Klovov D, Durand C, Bernier MO, Baudin C. Risk of Developing Non-Cancerous Central Nervous System Diseases Due to Ionizing Radiation Exposure during Adulthood: Systematic Review and Meta-Analyses. *Brain Sci.* 2022; 12(8): 984.
- Luan FJ, Wan Y, Mak KC, Ma CJ, Wang HQ. Cancer and mortality risks of patients with scoliosis from radiation exposure: a systematic review and meta-analysis. *Eur Spine J.* 2020; 29(12): 3123-3134.
- Lubin JH, Adams MJ, Shore R, Holmberg E, Schneider AB, Hawkins MM, Robison LL, Inskip PD, Lundell M, Johansson R, Kleinerman RA, de Vathaire F, Damber L, Sadetzki S, Tucker M, Sakata R, Veiga LHS. Thyroid cancer following childhood low-dose radiation exposure: a pooled analysis of nine cohorts. *J Clin Endocrinol Metab.* 2017; 102(7): 2575-2583.
- Mabuchi K, Preston DL, Brenner AV, Sugiyama H, Utada M, Sakata R, Sadakane A, Grant EJ, French B, Cahoon EK, Ozasa K. Risk of prostate cancer incidence among atomic bomb survivors: 1958-2009. *Radiat Res.* 2021; 195(1):66-76.
- Mazzei-Abba A, Folly CL, Coste A, Wakeford R, Little MP, Raaschou-Nielsen O, Kendall G, Hémon D, Nikkilä A, Spix C, Auvinen A, Spycher BD. Epidemiological studies of natural sources of radiation and childhood cancer: current challenges and future perspectives. *J Radiol Prot.* 2020; 40(1):R1-R23.
- Mazzei-Abba A, Folly CL, Kreis C, Ammann RA, Adam C, Brack E, Egger M, Kuehni CE, Spycher BD. External background ionizing radiation and childhood cancer: Update of a nationwide cohort analysis. *J Environ Radioact.* 2021; 238-239: 106734.
- Meulepas JM, Ronckers CM, Smets AMJB, Nievelstein RAJ, Gradowska P, Lee C, Jahnen A, van Straten M, de Wit MY, Zonnenberg B, Klein WM, Merks JH, Visser O, van Leeuwen FE, Hauptmann M. Radiation Exposure From Pediatric CT Scans and Subsequent Cancer Risk in the Netherlands. *J Natl Cancer Inst.* 2019; 111(3):256-263.
- Moorhouse AJ, Scholze M, Sylvius N, Gillham C, Rake C, Peto J, Anderson R, Dubrova YE. No evidence of increased mutations in the germline of a group of British nuclear test veterans. *Sci Rep.* 2022; 12(1): 10830.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2022. Leveraging Advances in Modern Science to Revitalize Low-Dose Radiation Research in the United States. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26434>.
- National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Implications of recent epidemiologic studies for the linear-nonthreshold model and radiation protection. NCRP Commentary No. 27. NCRP, Bethesda MD, 2018.
- National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Approaches for integrating information from radiation biology and epidemiology to enhance low-dose health risk assessment. NCRP Report No. 186. NCRP, Bethesda, MD: 2020.
- Pasqual E, Boussin F, Bazyka D, Nordenskjold A, Yamada M, Ozasa K, Pazzaglia S, Roy L, Thierry-Chef I, de Vathaire F, Benotmane MA, Cardis E. Cognitive effects of low dose of ionizing radiation - Lessons learned and research gaps from epidemiological and biological studies. *Environ Int.* 2021; 147: 106295.

- Rake C, Gilham C, Scholze M, Bukasa L, Stephens J, Simpson J, Peto J, Anderson R. British nuclear test veteran family trios for the study of genetic risk. *J Radiol Prot.* 2022; 42(2).
- Rühm W, Laurier D, Wakeford R. Cancer risk following low doses of ionizing radiation - Current epidemiological evidence and implications for radiological protection. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen.* 2022; 873: 503436.
- Sakata R, Preston DL, Brenner AV, Sugiyama H, Grant EJ, Rajaraman P, Sadakane A, Utada M, French B, Cahoon EK, Mabuchi K, Ozasa K. Radiation-Related Risk of Cancers of the Upper Digestive Tract among Japanese Atomic Bomb Survivors. *Radiat Res.* 2019; 192(3): 331-344.
- Schubauer-Berigan MK, Berrington de Gonzalez A, Cardis E, Laurier D, Lubin JH, Hauptmann M, Richardson DB. Evaluation of confounding and selection bias in epidemiologic studies of populations exposed to low-dose, high-energy photon radiation. *JNCI Monographs* 2020; 2020(56): 133-53.
- Shore R, Walsh L, Azizova T, Rühm W. Risk of solid cancer in low dose-rate radiation epidemiological studies and the dose-rate effectiveness factor. *Int J Radiat Biol.* 2017; 93: 1064-1078.
- Shore RE, Beck HL, Boice JD, Caffrey EA, Davis S, Grogan HA, Mettler FA, Preston RJ, Till JE, Wakeford R, Walsh L, Dauer LT. Implications of recent epidemiologic studies for the linear nonthreshold model and radiation protection. *J Radiol Prot.* 2018; 38(3): 1217-1233.
- Sugiyama H, Misumi M, Brenner A, Grant EJ, Sakata R, Sadakane A, Utada M, Preston DL, Mabuchi K, Ozasa K. Radiation risk of incident colorectal cancer by anatomical site among atomic bomb survivors: 1958–2009. *Int J Cancer* 2020; 146(3): 635-645.
- Sugiyama H, Misumi M, Sakata R, Brenner AV, Utada M, Ozasa K. Mortality among individuals exposed to atomic bomb radiation in utero: 1950-2012. *Eur J Epidemiol.* 2021; 36(4): 415-428.
- Tapio S, Little MP, Kaiser JC, Impens N, Hamada N, Georgakilas AG, Simar D, Salomaa S. Ionizing radiation-induced circulatory and metabolic diseases. *Environ Int.* 2021; 146: 106235.
- Thierry-Chef I, Ferro G, Le Cornet L, Dabin J, Istad TS, Jahnen A, Lee C, Maccia C, Malchair F, Olerud HM, Harbron RW, Figuerola J, Hermen J, Moissonnier M, Bernier MO, Bosch de Basea MB, Byrnes G, Cardis E, Hauptmann M, Journy N, Kesminiene A, Meulepas JM, Pokora R, Simon SL. Dose Estimation for the European Epidemiological Study on Pediatric Computed Tomography (EPI-CT). *Radiat Res.* 2021; 196(1): 74-99.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 2012 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex A: Attributing health effects to ionizing radiation exposure and inferring risks. United Nations, New York, 2015.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2019 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex 1: Evaluation of Selected Health Effects and Inference of Risk due to Radiation Exposure, United Nations, New York, 2020.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume III. Scientific Annex C. Biological mechanisms relevant for the inference of cancer risks from low-dose and low-dose-rate radiation. United Nations, New York, 2021.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sixty-ninth session (9–13 May 2022). United Nations, New York, 2022. <https://www.unscear.org/unscear/en/ga/general-assembly.html>
- Utada M, Brenner AV, Preston DL, Cologne JB, Sakata R, Sugiyama H, Kato N, Grant EJ, Cahoon EK, Mabuchi K, Ozasa K. Radiation risk of ovarian cancer in atomic bomb survivors: 1958-2009. *Radiat Res.* 2021; 195(1): 60-65.
- Utada M, Chernyavskiy P, Lee WJ, Franceschi S, Sauvaget C, de Gonzalez AB, Withrow DR. Increasing risk of uterine cervical cancer among young Japanese women: Comparison of incidence trends in Japan, South Korea and Japanese-Americans between 1985 and 2012. *Int J Cancer* 2019; 144(9): 2144-2152.
- Wakeford R, Bithell JF. A review of the types of childhood cancer associated with a medical X-ray examination of the pregnant mother. *Int J Radiat Biol.* 2021;97(5):571-592.
- Wakeford R. Overview of epidemiological studies of nuclear workers: opportunities, expectations, and limitations. *J Radiol Prot.* 2021; 41(4).
- Wakeford R. Radiation in the workplace - an opportunity for substantial epidemiological evidence. *Int J Radiat Biol.* 2022a; 98(4): 533-536.
- Wakeford R. Risk of diseases of the circulatory system after low-level radiation exposure-an assessment of evidence from occupational exposures. *J Radiol Prot.* 2022b; 42(2).
- Wakeford R. The growing importance of radiation worker studies. *Br J Cancer* 2018; 119(5): 527-529.

Yamada M, Furukawa K, Tatsukawa Y, Marumo K, Funamoto S, Sakata R, Ozasa K, Cullings HM, Preston DL, Kurtzio P. Congenital Malformations and Perinatal Deaths Among the Children of Atomic Bomb Survivors: A Reappraisal. *Am J Epidemiol.* 2021; 190(11): 2323-2333.

Yeager M, Machiela MJ, Kothiyal P, Dean M, Bodelon C, Suman S, Wang M, Mirabello L, Nelson CW, Zhou W, Palmer C, Ballew B, Colli LM, Freedman ND, Dagnall C, Hutchinson A, Vij V, Maruvka Y, Hatch M, Illienko I, Belayev Y, Nakamura N, Chumak V, Bakhanova E, Belyi D, Kryuchkov V, Golovanov I, Gudzenko N, Cahoon EK, Albert P, Drozdovitch V, Little MP, Mabuchi K, Stewart C, Getz G, Bazyka D, Berrington de Gonzalez A, Chanock SJ. Lack of transgenerational effects of ionizing radiation exposure from the Chernobyl accident. *Science* 2021; 372(6543): 725-729.

6.6 Glossar

AOP: Adverse Outcome Pathway (Konzept, das biologische Vorgänge mit nachteiligen Effekten verknüpft)

ASN: Autorité de sûreté nucléaire (französische Nuklearaufsichtsbehörde)

EASu: Enceinte Aspersion de Secours Ultime (Ultimatives Containment-Sprühsystem)

ENSI: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat

HOF: (Human and Organizational Factors) Menschliche und organisatorische Faktoren

BAG: Bundesamt für Gesundheit

GPR: Groupe Permanent Réacteurs (Begleitgruppe Reaktoren)

IAEA: International Atomic Energy Agency (Internationale Atomenergieagentur)

ICRP: International Commission on Radiological Protection (Internationale Strahlenschutzkommission)

LNT: Linear no Threshold (Lineares Modell ohne Schwellenwert)

LSS: Life Span Study (Lebensspanne-Studie)

NCI: National Cancer Institute (US-amerikanisches nationales Krebsinstitut)

NCRP: National Council on Radiation Protection and Measurements (Nationaler Rat für Strahlenschutz und Strahlenmessung der USA)

KEV: Kernenergieverordnung

PSÜ: Periodische Sicherheitsüberprüfung

PTR: Safety Injection System Tank (Reservoir des Sicherheitseinspeisesystems)

DWR: Druckwasserreaktor

UHS: Ultimative Wärmesenke

StSV: Strahlenschutzverordnung

SGTR: Steam Generator Tube Rupture (Dampferzeugerheizrohrbruch)

U5: Störfallvorschriften für Reaktoren der französischen Kernkraftwerke

UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (Wissenschaftlicher Ausschuss der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Wirkung von Strahlung)

WENRA: Western European Nuclear Regulators Association (Westeuropäische Vereinigung der Kernenergie-Aufsichtsbehörden)

WHO: Weltgesundheitsorganisation

ANHÄNGE

Annexe 1. Ausschreibung

Page 1 of 3

	Postulate 18.4107: Dose limit values for nuclear installations, radioactive radiation and radiation protection – Call for tender	
Version :	11.03.2021	Authors : François BOCHUD Didier GAVILLET Patrick MAJERUS

1. Introduction

On March 3, 2019, the Council of States of the Swiss Parliament (Upper House) accepted a postulate asking the Federal Council (Government) to entrust independent experts specialized in the fields of radiological protection and medicine with the mission to prepare a report on the consequences of the revision of January 10, 2018 of the Swiss [Nuclear Energy Ordinance](#). More precisely, an expertise is required on the criteria for provisional taking out of service of nuclear power plants (Art. 44), as well as on risk/hazard assumptions made in that ordinance (Art. 8).

The report will include presenting the relationship between the limit values proposed for the provisional taking out of service of nuclear power plants and the values appearing in the [Swiss legislation on radiological protection](#) (Art. 123), as well as the strategies of Switzerland in the field of radiation protection and the emergency measures that are associated with it. A comparison with the recommendations and limits in force at the international level, as well as with the scientific knowledge concerning the management of ionizing radiation at low doses, are also expected.

The report should also address the various contributions of radiation sources to the population. It will have to show whether the measures to protect the population against the harm of ionizing radiation are proportionate to the usefulness for society of the technologies in which they come into play.

The following experts have been designated to pilot an external expertise to perform this task:

1. **Dr François BOCHUD**,
Director of the Institute of Radiation Physics, Lausanne University Hospital
 - Chair of the Swiss Federal Commission for Radiological Protection.
 - Professor in medical physics at Lausanne University.
 - Member of Committee 4 of the International Commission on Radiological Protection (ICRP).
 - Member of the International Commission on Radiation Units & Measurements (ICRU, since 01.01.2021)
2. **Dr Didier GAVILLET**,
Deputy Head of the Nuclear Energy and Safety Division of the Paul Scherrer Institut
 - Member of the Swiss Federal Commission for Nuclear Safety.
 - Member of the "groupe permanent usine" of the French Safety Authority (ASN)
3. **Dr Patrick MAJERUS**,
Head of the Division of Radiation Protection, Health Ministry, Luxembourg
 - Vice-Chair of the European Nuclear Safety Regulators Group (ENSREG) and Chair of its Working Group on Transparency
 - Vice-Chair of the Working Group on Emergencies of the Heads of the European Radiological Protection Competent Authorities (HERCA)
 - Member and national contact point of several other international groups – e.g. EURATOM Art. 37 Group of Experts, Decommissioning Founding Group, Nuclear Decommissioning Assistance Program Committee, Safeguards National Expert Group, Convention on Nuclear Safety (CNS), and the bilateral Commissions on nuclear safety with Belgium and France.

The goal of this document is to define the specific questions necessary to be answered in the report in order to respond to the postulate.

2. Questions

2.1. How does Swiss legislation on radiological protection compare with international best practices?

- The general radiation protection strategy adopted by Switzerland will be put into perspective with international recommendations (e.g. ICRP, EU-BSS).
- The dose criteria used internationally (e.g. dose limits, reference level, numerical protection criteria) will be presented and a critical analysis of how they are applied in Switzerland will be performed.
- The distinction between risk assessment and risk management will be explained and discussed.
- The risk management strategy in at least one country of economic level comparable with Switzerland will be presented; for illustration a selection of accident scenarios for running plants with frequencies of occurrence between 10^{-3} and 10^{-6} will be presented with the resulting estimated emergency exposure situations. A comparison will be made with what is done in Switzerland, with focus on, but not limited to, prescriptive criteria used in decision taking. The implementation of the concept of potential exposure should also be discussed. The discussion should focus on the [Radiological Protection Ordinance](#) (in particular Art. 123 on safety analysis of the design) and its transposition for nuclear facilities into the [Nuclear Energy Ordinance](#) (in particular Art. 8 on the requirements concerning measures to prevent accidents)¹.

2.2. How can we compare the levels of acceptable risk of a nuclear power plant with other sources of radioactivity dissemination and external irradiations?

- The level of risk, if possible expressed in terms of harm and frequency of occurrence should be compared with different practices and exposure situations. Examples of other sources of radionuclides are hot lab in research facilities, industry in general, inhalation of radon and hospitals.
- The report will also compare the possible doses in the event of a nuclear accident with those delivered annually to the population. This point will be approached from the somatic and psychological point of view.

2.3. What are the current discussions in science and research regarding low dose of ionizing radiations?

- A detailed report ([in French](#) and [in German](#)) on the effects of low doses on humans and risk assessment was published on March 2, 2018 in response to the Parliament's [postulate 08.3475](#). The question posed in the context of this call for tender should only address information that may have evolved during the last three years that followed the publication of that report, and the need of data or research, for the reduction of uncertainties.

2.4. General opinion

Based on the answers to the present questions, the report will give a general opinion on how the radiological risk is managed in Switzerland.

¹ The practical application can be found in a directive from the Swiss Federal Safety Inspectorate ([ENSI-A01](#)). In addition, ENSI also published the seismic evidence in a [specific statement](#). If further documents or explanations are required, ENSI is ready to help.

3. Organization and schedule

The submission is expected to contain the following points:

1. Justification of the tenderer's competence in terms of radiological protection and medicine.
2. References to self publications in the present area of competences.
3. Short presentation of the methodology to Majerus/Gavillet/Bochud and representatives of the federal offices of energy and public health, including clarification of open questions and if necessary adjustment of the assignment.
4. Presentation of the progress at mid-term (approx. 4 months after the start) to Majerus/Gavillet/Bochud.
5. Presentation of the final draft report.
6. Delivery of the final report.
7. Costs.

The final report is expected to be between 50 to 70 pages. It should be written in English.

Date	Milestone
15.04.2021	Financial and technical proposition
30.04.2021	Acceptance of the offer by the Federal Office of Energy
30.04.2021	Start of the project
to be defined	Progress at mid-term
to be defined	Final draft report
to be defined	Feedback from Majerus/Gavillet/Bochud
to be defined	Final report

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

MEMBRE DE
ETSON

31 av. de la division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
RCS Nanterre B 440 546 018

COURRIER

B.P 17 - 92260 Fontenay-aux-Roses

TÉLÉPHONE

+33 (0)1 58 35 88 88

SITE INTERNET

www.irsn.fr