



Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn
<http://www.ssk.de>

Schutzstrategien bei Nuklearwaffeneinsatz

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 334. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 10.10.2024

Vorwort

Die Zeit nach dem kalten Krieg und der Wiedervereinigung war in Deutschland geprägt von einem großen Vertrauen darauf, dass Bedrohungen durch Massenvernichtungswaffen aufgrund terroristischer Gewalt und militärischer Konflikte für unsere Bürger und Bürgerinnen unrealistisch sind. Daher wurde die Vorbereitung von staatlichen Akteuren und von privaten Haushalten auf solche Bedrohungen sehr stark reduziert. Auch nach militärischen Auseinandersetzungen in Europa, wie dem Krieg auf dem Balkan und der Annexion der Krim durch Russland, sah man in Deutschland keinen Grund zum Kurswechsel. Der „kalte Krieg“ war vorbei und selbst Demonstrationen gegen Kernwaffen fanden kaum mehr statt.

Spätestens seit 2022 sind nukleare Drohungen durch Russland (und auch durch andere Atom-mächte) wieder Teil des Alltags für unsere Bürger und Bürgerinnen. Die Bedrohung geht aber nicht allein von Staaten mit Kernwaffen aus: Auch terroristische Gruppen könnten in Besitz einer Kernwaffe gelangen und diese zum Einsatz bringen. Auch wenn wir alle hoffen, dass diese Bedrohungen nie Realität werden, ist die SSK der tiefen Überzeugung, dass eine Vorbereitung auf den Ernstfall notwendig ist. Die angemessene und optimierte Vorbereitung kann im Fall des Einsatzes einer Kernwaffe in Deutschland einen wesentlichen Beitrag zur Rettung und Gesunderhaltung von zehntausenden Menschen leisten.

Das Dokument macht Vorschläge, sich angemessen und verantwortungsvoll auf ein mögliches Eintreten solcher Szenarien vorzubereiten, mit dem Ziel die Resilienz des Landes zu stärken und aus den Erkenntnissen des Einsatzes von Kernwaffen die richtigen Lehren zu ziehen. Die Beschäftigung mit der Kernwaffenthematik ist keineswegs erfreulich, führt sie uns doch die Zerstörungskraft dieser Waffen vor Augen, die massive Folgen für das Wohl der betroffenen Menschen im Fall ihres Einsatzes haben. Dies hat uns nicht zuletzt die Aufarbeitung des furchtbaren Einsatzes der Kernwaffen gegen die Einwohner von Hiroshima und Nagasaki gelehrt.

An dieser Stelle möchten wir mit tiefer Demut den Opfern der Atombombenabwürfe über Hiroshima und Nagasaki gedenken.

Zur Erarbeitung der vorliegenden Empfehlung richtete die SSK im Jahr 2022 eine Arbeitsgruppe ein, der folgende Mitglieder angehörten:

Prof. Dr. Matthias Port, Vorsitzender der Arbeitsgruppe

Prof. Dr. Andreas Buck

PD Dr. Anna A. Friedl

Dr. Friedrich Groß-Alltag

Cornelius Hermann

Prof. Dr. Karl-Heinz Jöckel

Dipl.-Phys. Jürgen Kopp

Dr. habil. Florentin Lange

Patrick Meschenmoser M. A.

Dr. Ronald Rambousky

Dipl.-Met. Wolfgang Raskob

Prof. Dr. Christoph Reiners

Prof. Dr. Werner Rühm

Dr. Thorsten Stahl

Prof. Dr. Clemens Walther

Unterstützt wurde die Arbeitsgruppe von Herrn Dr. Florian Gering und Herrn Dr. Florian Mertes vom BfS und von Herrn Dipl.-Phys. Christian Dax vom BBK.

Inhalt

1	Einleitung.....	7
2	Beratungsauftrag	8
3	Empfehlungen	8
4	Erkenntnisse zur nationalen und internationalen Vorbereitung zu empfohlenen Maßnahmen bei Kernwaffenexplosionen	14
4.1	Nationale Maßnahmen	14
4.1.1	Zuständigkeiten im Bevölkerungsschutz	14
4.1.2	Stand der Vorbereitungen.....	16
4.2	Internationale Maßnahmen.....	18
4.2.1	USA: Leitfaden zur Planung der Reaktionen auf eine Kernwaffenexplosion (Planning Guidance for Response to a Nuclear Detonation) der Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2023)	18
4.2.2	Gesamtstaatlicher Notfallplan für Österreich bei einem Kernwaffeneinsatz in größerer Entfernung zu Österreich (2022)	21
4.2.3	Bericht der Schwedischen Strahlenschutzbehörde (SSM) zu den radiologischen Folgen von Fallout aus Kernwaffenexplosionen (2023)	22
4.2.4	Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutz-Kommission ICRP	24
5	Eigenschaften, Arten und Auswirkungen von Kernwaffen	24
5.1	Eigenschaften nuklearer Explosionen	24
5.2	Initiale und residuale Kernwaffenwirkungen	25
5.3	Funktionsweise und Typen von Kernwaffen	26
5.3.1	Kernspaltung.....	26
5.3.2	Kernfusion.....	26
5.3.3	Kernspaltungswaffen.....	27
5.3.4	Thermonukleare Waffen.....	27
5.4	Kernwaffenarsenale.....	28
5.4.1	Strategische Kernwaffen	29
5.4.2	Nicht-strategische Kernwaffen	29
5.5	Kernwaffenwirkungen	30
5.5.1	Entstehung und Eigenschaften des Feuerballs.....	30
5.5.2	Druckwelle einer Nuklearexplosion	31
5.5.3	Thermische Strahlung einer Nuklearexplosion.....	32
5.5.4	Initialstrahlung einer Nuklearexplosion.....	33

5.5.4.1	Neutronenkomponente der Initialstrahlung	33
5.5.4.2	Gammastrahlungskomponente der Initialstrahlung.....	33
5.5.5	Einfluss der Explosionsart.....	34
5.6	Gefährdungsabschätzung für initiale Kernwaffenwirkungen	36
5.6.1	Ionisierende Strahlung, thermische Strahlung und Druckwelle	36
5.6.2	Aktivierung des Erdbodens im Nahbereich einer Kernwaffenexplosion.....	38
6	Quellterm, Fallout und radiologische Konsequenzen	40
6.1	Quellterm: Menge und Zusammensetzung freigesetzter Radionuklide	40
6.2	Unterschiede zwischen Explosionsarten	41
6.2.1	Einfluss des Spaltmaterials	41
6.2.2	Einfluss des Fusionsanteils von thermonuklearen Waffen	41
6.3	Aktivitäts-Partikelgrößenverteilung	42
6.4	Ausbreitungsmodellierungen	45
6.5	Radiologische Konsequenzen	49
6.5.1	Expositionspfade und Dosisberechnung	49
6.5.1.1	Wolkenstrahlung	49
6.5.1.2	Bodenstrahlung.....	49
6.5.1.3	Inhalation	51
6.5.1.4	Ingestion	52
6.5.2	Radiologische Kriterien	53
6.5.3	Ankunftszeiten von radioaktivem Fallout.....	54
6.5.4	Entwicklung von Gebieten mit hohen Dosisleistungen in den ersten 48 h	55
6.5.5	Effektivdosis.....	57
6.5.6	Organ-Äquivalentdosis der Schilddrüse durch inhalierte Iod-Isotope	59
6.5.7	Organ-Äquivalentdosen als Indikatoren für schwerwiegende deterministische Effekte	61
6.5.8	Verbleibende Folgedosis als Indikator für die Anwendung medizinischer Maßnahmen und Dekontamination	63
6.6	Abhängigkeit der Effektdistanzen von der Explosionsstärke und der Explosionshöhe über Grund	66
6.7	Bisherige Planungen und Prozeduren für die Notfallreaktion im Falle einer Kernwaffenexplosion	69
7	Bisherige Erkenntnisse zu Gesundheitseffekten von stattgefundenen Kernwaffenexplosionen.....	71
7.1	Atombomben in Hiroshima und Nagasaki.....	71

7.1.1	Gesundheitseffekte Hiroshima und Nagasaki	71
7.1.1.1	Die Explosionen über Hiroshima und Nagasaki	71
7.1.1.2	Strahlendosen durch initiale Strahlung	72
7.1.1.3	Strahlendosen durch Fallout	73
7.1.1.4	Strahlendosen durch Bodenaktivierung	74
7.1.2	Akute Gesundheitsfolgen und Todesursachen bis Ende 1945	75
7.1.3	Gesundheitliche Langzeitfolgen	76
7.1.3.1	Solide Tumoren	77
7.1.3.2	Leukämie	77
7.1.3.3	Nicht neoplastische Erkrankungen	78
7.1.3.4	In Utero-Exposition – Mentale Retardierung und Krebsmortalität	78
7.1.3.5	Ergebnisse an Kindern von Überlebenden	79
7.1.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Atombombenabwürfen	79
7.2	Kernwaffentests	80
7.2.1	Kernwaffentests der Vereinigten Staaten und Auswirkungen auf die Bevölkerung	80
7.2.1.1	Trinity	80
7.2.1.2	Nevada Testgelände	81
7.2.1.3	Pazifik	82
7.2.2	Kernwaffentests der Vereinigten Staaten und Auswirkungen auf beteiligtes Personal	85
7.2.3	Kernwaffentests der Sowjetunion	85
7.2.4	Kernwaffentests des Vereinigten Königreichs	86
7.2.5	Weitere Kernwaffentests	87
7.2.6	Zusammenfassung Erkenntnisse aus Kernwaffentests	87
8	Gesundheitliche und psychosoziale Effekte sowie Maßnahmen zu deren Vermeidung bzw. Reduzierung	88
8.1.1	Akute Strahlenkrankheit	88
8.1.2	Stellenwert der Stammzelltransplantation	90
8.1.3	Beta-Strahlung und Hauteffekte	90
8.1.4	Gesundheitliche Effekte nach Inkorporation	91
8.1.5	Langzeiteffekte	92
8.2	Verbrennungen	92
8.3	Explosionstraumata	93
8.4	Kombination von Strahlenschäden mit Brandverletzungen und sonstigen Verletzungen	93

8.5	Psychosoziale Folgen von Nuklearkatastrophen	94
9	Allgemeine Schutzmaßnahmen	97
9.1	Schutzzoneneinteilung nach FEMA-Guide	97
9.2	Vorbereitungen der Bürger und Bürgerinnen	98
9.3	Frühe Schutzmaßnahmen (innerhalb der ersten 24h)	99
9.4	Schutzmaßnahmen für Ersthelfer und Einsatzkräfte	101
9.5	Evakuierung nach der Akutphase und ihre Limitierungen	102
10	Stand der Vorbereitungen national und international für die gesundheitliche Versorgung von Betroffenen und Einsatzpersonal	103
10.1	Allgemeine Maßnahmen	103
10.2	Medizinische Versorgung	104
10.3	Vorratsbildung und -haltung	106
10.4	Biologische Dosimetrie, Inkorporationsmessungen	107
10.5	Notfallstationen	107
10.6	Psychosoziale Notfallversorgung	108
10.7	Dokumentation und Organisation von Nachsorgeprogrammen	108
11	Stand der Vorbereitungen zur Risiko- und Krisenkommunikation	110
12	Literatur	113
	Tabelle A1 Übersicht der geschätzten Dosis der Nuklearwaffenversuche	130
	Abkürzungsverzeichnis	135

1 Einleitung

Nach dem Ende des „kalten Krieges“ und dem Fall des „eisernen Vorhangs“ Anfang der 90er Jahre nahm in Westeuropa und insbesondere in Deutschland das Bewusstsein in Politik, Gesellschaft und Wissenschaft für die Gefährdung durch Kernwaffen ab, und sowohl bei der Bevölkerung als auch öffentlichen Stellen ist seither in hohem Maße Wissen über Kernwaffen und mögliche Schutzmaßnahmen verloren gegangen. Zudem wurde im Laufe der Jahrzehnte die Sicherheitsvorsorge massiv reduziert. Mit dem Einmarsch Russlands in die Ukraine am 24. Februar 2022, und dem Misserfolg der „non proliferation policy“ repräsentiert durch den Nuklearer Nichtverbreitungsvertrag (Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons (NPT)) von 1970¹, ist die Bedrohung durch den Einsatz von Kernwaffen auch in Deutschland wieder mehr in den Vordergrund gerückt. Die Notwendigkeit, die eigene Gefahreinschätzung zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen wurde im März 2022 vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) zum Anlass genommen, die Strahlenschutzkommission (SSK) mit der Bewertung angemessener Schutzmaßnahmen bei Nuklearexplosionen zu beauftragen. Die Schutzmaßnahmen haben zum Ziel, im Falle einer Kernwaffenexplosion möglichst vielen Mitbürgerinnen und Mitbürgern ein Überleben und den Erhalt der Gesundheit zu ermöglichen und Expositionen durch ionisierende Strahlen zu minimieren. Die Empfehlung zielt auf eine angemessene Verbesserung der aktuellen Vorbereitung in Deutschland und versucht, im Sinne von Optimierung unrealistische Maximalforderungen zu vermeiden.

Im wissenschaftlichen Begründungsteil der hier vorliegenden SSK-Empfehlung wird zunächst der Stand nationaler und internationaler Vorbereitungen in Auszügen dargestellt. Es folgt ein ausführliches Kapitel über Eigenschaften und Arten von Kernwaffen sowie deren Auswirkungen in Abhängigkeit von Waffentyp und Entfernung vom Explosionsort. Die bisherigen Erkenntnisse zu den mit Kernwaffenexplosionen verbundenen Strahlendosen und den dadurch verursachten Gefahren für Leib und Leben wurden anhand der Atombombenabwürfe auf Hiroshima und Nagasaki sowie von Kernwaffentests gewonnen und hier zusammengestellt.

Für die wissenschaftlichen Grundlagen der vorliegenden Empfehlung wurden zum Teil Quellen aus der Zeit der atmosphärischen Kernwaffentests in den 1950er und Anfang der 1970er Jahre ausgewertet; zudem konnte aber auch auf neuere Quellen zurückgegriffen werden. Insbesondere in den Vereinigten Staaten von Amerika (USA) gewann der Schutz der Bevölkerung vor Kernwaffenexplosionen nach den Terroranschlägen vom 11. September 2001 noch einmal an Bedeutung.

Die vorliegende Empfehlung der SSK schließt eine systematische Darstellung akuter und chronischer Strahlenschäden durch Kernwaffen ein (auch in Kombination mit mechanischen Verletzungen oder Verbrennungen) sowie von Maßnahmen zu deren Vermeidung oder Reduzierung. Bei der Darstellung von Maßnahmen zur Vorbereitung auf Kernwaffenexplosionen wird zwischen allgemeinen Schutzmaßnahmen für die Bevölkerung und spezifischen Maßnahmen für die gesundheitliche Versorgung von Betroffenen und Einsatzkräften unterschieden.

Die SSK hat 2023 Empfehlungen zum „Medizinischen Management von Strahlennotfällen – Voraussetzungen und Organisation“ (SSK 2023a) veröffentlicht und im Jahr davor das Handbuch „Strahlennotfallmedizin – Medizinische Versorgung und Ausbildung“ (SSK 2022b) herausgeben. Darin werden Kernwaffenexplosionen zwar nicht explizit behandelt; bei dem Szenario „Terroristische oder anderweitig motivierte Freisetzung von radioaktiven Stoffen oder

¹ <https://www.iaea.org/publications/documents/treaties/npt>, zuletzt aufgerufen am 16.09.2024

Exposition durch ionisierende Strahlung“ werden jedoch Aspekte angesprochen, die auf Kernwaffenexplosionen übertragen werden können, allerdings bei Kernwaffen unter anderem eine um Größenordnungen höhere Zahl an Exponierten erwarten lassen. Neben den Schäden an der körperlichen Gesundheit spielen dabei nach aktuellen Erkenntnissen aus den Reaktorunfällen von Tschornobyl und Fukushima auch psychosoziale Effekte und eine adäquate Risiko- und Krisenkommunikation eine zentrale Rolle.

Es gilt der Grundsatz des Katastrophenschutzes, dass eine gute Planung und Vorbereitung im Ereignisfall viele Leben retten und Gesundheitsschäden mindern kann. Bezüglich der Empfehlungen der SSK ergibt sich in Deutschland aus der Verteilung der Zuständigkeiten ein gewisses Spannungsfeld.

2 Beratungsauftrag

Am 7. März 2022 bat das BMUV die SSK um eine Bewertung, inwiefern die verschiedenen für radiologische Notfälle vorgeplanten Schutzmaßnahmen auch im Falle eines Kernwaffeneinsatzes in Deutschland oder in einem Nachbarland grundsätzlich effektiv und aus radiologischer Sicht angemessen sind, und welche besonderen Anforderungen bei deren Durchführung zu beachten wären. Weiterhin wurde die SSK vorrangig gebeten, sich mit der Frage des Nutzens von Iodblockade (SSK 2022a) und der Verwendung von Atemschutzmasken (SSK 2023b) als Schutzmaßnahmen zu befassen.

3 Empfehlungen

Die SSK vertritt hinsichtlich eines möglichen Kernwaffenangriffs die Ansicht, dass bezüglich der anzuwendenden Schutzmaßnahmen ein deutlicher Optimierungsbedarf besteht. Das im Rahmen der Beauftragung betrachtete Szenario ist eine oder wenige nicht strategische Kernwaffenexplosionen in Deutschland oder im benachbarten Ausland mit unmittelbaren radiologischen Folgen für die Zivilbevölkerung. Die bestehenden Regelungen für Großschadensereignisse sind primär für Kernkraftwerksunfälle ausgelegt und daher für Angriffe mit Kernwaffen nicht ausreichend, zum Teil ergeben sich auch unterschiedliche Konsequenzen und Maßnahmen. Darüber hinaus betrachtet die SSK die Vorbereitung auf einen Ereignisfall und die Umsetzung ihrer Empfehlungen als eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe im Rahmen der zivilen Verteidigung (siehe auch Rahmenrichtlinien für die Gesamtverteidigung – Gesamtverteidigungsrichtlinien – (RRGV)².

Im Vorgriff zu dieser Empfehlung hat die SSK bereits zur Iodblockade Stellung genommen (SSK 2022a) und eine Empfehlung zur Verwendung von Atemschutzmasken (SSK 2023b) herausgegeben. Die Einnahme von Iodtabletten (Iodblockade) hält die SSK bei Nuklidfreisetzungen durch Kernwaffen wegen des geringen Risikos aus inhalierten und inkorporierten radioaktiven Iodisotopen im Verhältnis zur insgesamt freigesetzten Aktivitätsmenge und der hohen externen Exposition nicht für eine relevante Schutzmaßnahme. FFP2-/FFP3-Masken sollten im Rahmen eines Selbstschutzkonzeptes jedoch von allen Bürgerinnen und Bürgern vorgehalten werden.

² https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/themen/sicherheit/RRGV.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt aufgerufen am 16.09.2024

Die Vorgaben der Notfallplanungen für Kernwaffenexplosionen im Regelwerk werden als nicht ausreichend angesehen. Bestehende Regelungen, insbesondere aus anderen Ressorts, sollen evaluiert und optimiert werden.

Die SSK empfiehlt die vorrangige Umsetzung der folgenden Maßnahmen:

- 1) Zeitnahe Erarbeitung eines Risikokommunikationskonzeptes und die Erstellung einer Informationsplattform zu allen Aspekten eines nuklearen Angriffs mit unterschiedlichem Zugang und Aufarbeitung der Informationen für Ministerien, Behörden, Hilfs- und Rettungsdienste, Krankenhäuser, Personal in der medizinischen und psychosozialen Versorgung sowie Bürgerinnen und Bürger.
- 2) Die Schaffung aller Voraussetzungen zum medizinischen Notfallmanagement wie in der entsprechenden Empfehlung der SSK (SSK 2023a) dargelegt (Ausbildung des Personals, Logistik, Ertüchtigung von Krankenhäusern etc.).
- 3) Eine bessere Vernetzung aller beteiligten Institutionen. Die SSK sieht die Notwendigkeit, die Zuständigkeiten, Kommunikation und Zusammenarbeit aller beteiligten Stellen zu analysieren, auf strukturelle Schwachstellen hin zu prüfen und gegebenenfalls zu optimieren. Eine enge Interaktion auf Bundes- und Länderebene, stringente Planungen und regelmäßige Übungen sind für die adäquate Vorbereitung für den Fall eines Einsatzes von Kernwaffen für die SSK von essenzieller Bedeutung.
- 4) Eine Evaluierung und ggf. Ertüchtigung von Schutzmaßnahmen für die Bevölkerung, unter besonderer Berücksichtigung „schützender Räume“³ im öffentlichen Bereich.
- 5) Die Erarbeitung von Schutzkonzepten für besonders vulnerable Gruppen in Krankenhäusern, Schulen und Kindergärten etc.

Die SSK sieht im Rahmen der gesamtgesellschaftlichen Aufgabe die unbedingte Notwendigkeit, für die Umsetzung der Empfehlungen (z. B. für Ausbildung, Ausstattung, Infrastruktur und Forschung) ausreichend finanzielle Mittel bereitzustellen.

Weiterhin gibt die SSK die folgenden Empfehlungen:

I. Planungsgrundlagen:

- I-1) Im internationalen Vergleich der Vorbereitungen auf Kernwaffenexplosionen sollte der „Leitfaden zur Planung der Reaktionen auf eine Kernwaffenexplosion (Planning Guidance for Response to a Nuclear Detonation)“ der Federal Emergency Management Agency der USA (FEMA) (FEMA 2023) als fundierte Grundlage für die Planungen auch in Deutschland herangezogen werden.
- I-2) Die deutsche Strahlenschutzgesetzgebung bezieht Kernwaffenexplosionen nicht systematisch in ihr System von Richtwerten für die Bevölkerung und Einsatzkräfte ein, da das Strahlenschutzgesetz (StrlSchG 2017) für den Zivilschutzfall nicht anwendbar ist. Für die Einsatzkräfte empfiehlt die SSK ein an die Empfehlungen der FEMA (2023) angelehntes System mit der Initiierung von ersten Hilfsmaßnahmen erst unterhalb einer Dosisleistung von 100 mSv h^{-1} . Der Optimierungsgrundsatz des Strahlenschutzes sollte dabei beachtet werden.

³ Schützende Räume sind konventionelle Räume mit schützender Wirkung, wie Keller, Tiefgaragen, U-Bahnstationen etc., beinhalten aber auch Bunker und Schutzräume.

- I-3) Initiale Evakuierungen werden nur mit erheblichen Schwierigkeiten durchführbar sein und können bei fehlerhafter Durchführung zu vermeidbaren lebensgefährlichen Gesundheitsschädigungen von zehntausenden Evakuierten durch Fallout führen. Daher kann es erforderlich sein, auf eine initiale Evakuierung Betroffener – trotz Überschreitung der Richtwerte von 1 mSv h^{-1} bzw. 100 mSv kumulierte Dosis über sieben Tage (BMUV 2023) für die Strahlenexposition – zu verzichten.
- I-4) Die zuständigen Behörden sollen in die Lage versetzt werden, der Bevölkerung Empfehlungen zum Verhalten nach der Kernwaffenexplosion unter schwierigsten technischen Bedingungen zu übermitteln. Diese Informationen sollten in verschiedenen Sprachen leichtverständlich über verschiedene Kommunikationskanäle (Rundfunk, Fernsehen, Mobilfunk, soziale Medien, Lautsprecher) zu erhalten sein.
- I-5) Bei der Planung der medizinischen Versorgung ist zu berücksichtigen, dass bei Kernwaffenexplosionen in Abhängigkeit von der Bevölkerungsdichte initial mit zehntausenden Toten und Verletzten zu rechnen ist, die häufig Kombinationsverletzungen durch mechanische Traumata, Verbrennungen und Strahlung aufweisen. Nach Exposition durch Fallout kann die Zahl der zu Versorgenden um ein Vielfaches höher liegen.
- I-6) Das System der für Unfälle in Kernkraftwerken vorgesehenen Notfallstationen sollte zur Versorgung von Betroffenen von Kernwaffenexplosionen ertüchtigt, optimiert und beübt werden. Diese Einrichtungen können u. a. dazu verhelfen, den zu erwartenden Ansturm besorgter Personen abzufangen und der psychosozialen Versorgung zuzuführen. Ferner ist ein zweistufiges System an Krankenhauseinrichtungen für die umfassende und erweiterte Versorgung von Strahlennotfallpatientinnen und -patienten zu etablieren und zu ertüchtigen (SSK 2023a).
- I-7) Die Bedeutung „schützender Räume“ sollte im Wohnungsbau angemessen berücksichtigt werden (u. a. Einbeziehung und Ertüchtigung von Kellern, Tiefgaragen, etc.).
- I-8) Bei einer Kernwaffenexplosionen kann es auch in weit entfernten Gebieten durch den Fallout zu einer Kontamination von im Freien angebauten Futter- und Nahrungsmitteln kommen. Direkt nach der Explosion sollte großräumig ein vorläufiges Ernteverbot ausgesprochen werden und die Bevölkerung vor dem Verzehr von selbst angebautem Gemüse und Obst gewarnt werden. Im Folgenden ist eine großräumige und intensive Kontrolle von Futter- und Nahrungsmitteln empfehlenswert, d. h. es sollte für die betroffenen Gebiete in Deutschland der IMIS-Intensivbetrieb ausgelöst sowie die Lebensmittel-Überwachung intensiviert werden.

II. Vorbereitungsmaßnahmen:

- II-1) Zur möglichst raschen Abschätzung der Strahlenexposition bei einer Kernwaffenexplosion sollte ein geeignetes Notfallschutzsystem redundant vorgehalten werden. Dazu könnte das vorhandene RODOS-System in Hinblick auf die Ausbreitungsmodellierung erweitert werden um die Berücksichtigung der Explosionsstärke (auch für Waffen $> 30 \text{ kT}$) sowie die Höhe der Explosion über Grund, die atmosphärischen Ausbreitung in bis zu 15 km Höhe, die Freisetzung von kurzlebigen Radionukliden und die Ausbreitung unterschiedlicher Partikelgrößen.
- II-2) Das vorhandene IMIS-System zur Messung der Ortsdosisleistung sollte auf seine Widerstandsfähigkeit gegenüber elektromagnetischen Impulsen (EMP) geprüft und ggf. gehärtet werden.

- II-3) Resiliente und redundante Meldewege für kritische Informationen im Falle einer Kernwaffenexplosion sollten etabliert werden. Diese Informationen über Explosionsart, Höhe der Explosion über Grund, Explosionsstärke und Charakteristika der Wolke sollten dem Lagezentrum des Bundes so schnell wie möglich zur Verfügung stehen. Auch wenn große Unsicherheiten bestehen, muss eine automatisierte, frühzeitige Kommunikation an die betroffenen Personen ebenso sichergestellt werden wie angepasste und optimierte Strahlenschutzempfehlungen zu Evakuierungen oder Verbleiben in „schützenden Räumen“ innerhalb von Minuten bis wenigen Stunden nach Einsatz einer Kernwaffe.
- II-4) Eine strukturierte Wissensplattform sollte aufgebaut werden. Diese soll auch der Identifizierung und Vernetzung von Fachleuten aus den zuständigen Behörden und anderen Expertinnen und Experten dienen (z. B. von Universitäten, Forschungseinrichtungen, Fachorganisationen, Hilfsorganisationen, Wirtschaft) und gebündelte Informationen, Beratungen und Hilfsangebote beinhalten.
- II-5) Die SSK hat 2023 für die medizinische Versorgung von Strahlennotfallpatientinnen und -patienten empfohlen, dass ein zweistufiges Netzwerk von spezialisierten Krankenhäusern und mobilen Teams aufgebaut und unterhalten wird. Im Zentrum dieses Netzwerks soll eine zentrale Koordinierungsstelle die deutschlandweite Verteilung von Strahlennotfallpatientinnen und -patienten auf der Grundlage von tagesaktuell erfassten Daten zu freien Behandlungskapazitäten und der vorhandenen apparativen und personellen Ausstattung ermöglichen (SSK 2023a). Diese Kapazitäten werden bei Kernwaffenexplosionen nicht ausreichen, daher müssen auch Einrichtungen der medizinischen Basisversorgung zur Unterstützung befähigt werden.
- II-6) Strahlennotfälle sollen grundsätzlich Gegenstand des Medizinstudiums und der Ausbildung von Rettungspersonal, Pflegekräften, Medizintechnologinnen und -technologen und in der Krisenintervention tätigem Personal werden.
- II-7) Die Ausbildung von spezialisierten Ärztinnen und Ärzten und Fachkräften für die medizinische Versorgung von Strahlennotfallpatientinnen und -patienten soll intensiviert werden. Die von der SSK (2023a) vorgeschlagenen Qualifizierungen „Strahlennotfallärztin/-arzt“ und „Strahlennotfallmanagement“ sollen etabliert werden.
- II-8) Medikamente für die Behandlung von an akutem Strahlensyndrom erkrankten Patientinnen und Patienten sollen in im Notfall rasch zugänglichen Depots vorgehalten werden und schnell verteilt werden können.
- II-9) Einsatzpersonal sollte flächendeckend mit geeigneter Messtechnik und persönlicher Schutzausrüstung ausgestattet werden, um vor Ort so früh wie möglich Hilfe leisten zu können.
- II-10) Nachdem initial (d. h. in den ersten 24 h bis 48 h) das Aufsuchen von schützenden Räumen bzw. der Aufenthalt in Gebäuden empfohlen wird, kann die dann noch verbleibende Dosisleistung durch den Fallout in großen Gebieten immer noch so hoch sein, dass für die Bevölkerung auch in den folgenden Tagen und Wochen eine erhebliche und potenziell gesundheitsgefährdende Dosis anfallen kann. Für solche Gebiete sollte daher auch eine (nachträgliche) Evakuierung der Bevölkerung in Erwägung gezogen werden.
- II-11) Ein Konzept zur Erfassung initialer klinischer und radiologischer Daten aller Betroffenen soll entwickelt werden. Für die Nachsorge sollen Konzepte entwickelt und Einrichtungen benannt und ertüchtigt werden, die in der Lage sind, bei der großen

Zahl der exponierten Betroffenen sowohl regelmäßige „Check-ups“ der körperlichen und psychischen Gesundheit durchzuführen als auch wissenschaftliche Auswertungen der gesammelten Daten zu ermöglichen.

- II-12) Eine proaktive, kontinuierliche und mehrsprachige Risikokommunikation ist nötig und soll aufgebaut werden. Diese sollte einheitlich durch die zuständigen Bundes- und Landesbehörden erfolgen, da die Resilienz der Bevölkerung in Gefahrenlagen entscheidend davon abhängt, wie gut sie durch ausreichende Information auf die mögliche Bedrohung vorbereitet und zu Selbstschutzmaßnahmen bereit ist.
- II-13) Der Schutz vor Kernwaffenexplosionen sollte Gegenstand groß angelegter mehrsprachiger Öffentlichkeitskampagnen werden, die die Bevölkerung auf einfach durchführbare Schutzmaßnahmen und Verhaltensregeln bei Kernwaffenexplosionen vorbereiten. Schulen und vergleichbare Institutionen sollten in besonderem Maße auf die Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen und entsprechende Vorbereitungen aufmerksam gemacht werden. Dazu gehören z. B. Empfehlungen zu einfach zu bedienenden, kostengünstigen Messgeräten oder speziellen Apps für Mobiltelefone.

III. Empfohlene Maßnahmen für die Bevölkerung, wenn der Notfall eintritt:

- III-1) Während der Explosion kann man sich vor herumfliegenden Trümmern und der Hitzestrahlung durch geeignete Deckung wirkungsvoll schützen. Deshalb sind das Ducken (am besten hinter Wänden oder Erdhügeln etc. als Schutzbarrieren) und das Bedecken unbedeckter Körperteile die anfänglich wichtigsten Schutzmaßnahmen.
- III-2) In den ersten 24 h bis 48 h danach bietet im Nahbereich der Explosion und in potenziell von Fallout betroffenen Gebieten der Aufenthalt in schützenden Räumen (wie z. B. Keller, Tiefgarage) den besten Schutz. Dort wird das vorsorgliche Anlegen eines Vorrats von Trinkwasser und ggf. Nahrung empfohlen. Möglichkeiten zur Dekontamination (Wasser, Wischtücher) und Ersatzkleidung sollten vorgehalten werden.
- III-3) Von Selbstevakuierungen ist dringend abzuraten; diese können mit vermeidbaren, lebensgefährlichen Strahlendosen durch Fallout verbunden sein. Fahrzeuge bieten keinen ausreichenden Strahlenschutz.
- III-4) Im Fall eines Nuklearangriffs ist von der Einnahme von stabilem Kaliumiodid abzuraten (sogenannte Iodblockade(-tabletten)).
- III-5) FFP 2-/FFP 3-Atemschutzmasken sollten vorgehalten und getragen werden, wenn schützende Räume verlassen werden müssen (z. B. bei der Besorgung lebensnotwendiger Medikamente oder bei anstehender Evakuierung).
- III-6) Jede Bürgerin bzw. jeder Bürger soll sich über die Gefahr durch Kernwaffenexplosionen und insbesondere über Schutzmaßnahmen/Verhaltensregeln zu Hause und am Arbeitsplatz informieren und sich darüber mit Kolleginnen und Kollegen, Familienangehörigen und Nachbarinnen und Nachbarn austauschen.
- III-7) Der Fallout, der sich innerhalb kurzer Zeit nach einer Kernwaffenexplosion ablagert, kann zu einer hohen Strahlenexposition führen, die zu gesundheitlichen Schäden führen kann. Daher ist es wichtig, sich vor dem Fallout zu schützen oder schnellstmöglich zu reinigen. Eine einfache Eigendekontamination durch Ablegen der Kleidung, Waschen der unbedeckten Körperflächen und Haare und anschließendem Duschen wird daher der Bevölkerung in den vom Fallout betroffenen Gebieten dringend empfohlen.

IV. Für Einsatzkräfte, wenn der Notfall eintritt:

- IV-1) Ersthelferinnen, Ersthelfer und Einsatzkräfte sollten zunächst geschützte Räume aufsuchen und insbesondere innerhalb der ersten 24 h Anweisungen der Behörden abwarten.
- IV-2) Besonders wichtig sind die Dosisbestimmung der Ersthelferinnen, Ersthelfer und Einsatzkräfte während des Einsatzes (möglichst unter Verwendung eines Alarmdosimeters) und die Vermeidung der Inkorporation radioaktiver Stoffe.
- IV-3) Vor dem Betreten der „gefährlichen“ Strahlungszone sind eine besonders gründliche Vorbereitung der Ersthelferinnen, Ersthelfer und Einsatzkräfte und schnelle Personalwechsel anhand festgelegter erreichter Dosiswerte erforderlich.

Wissenschaftliche Begründung

4 Erkenntnisse zur nationalen und internationalen Vorbereitung zu empfohlenen Maßnahmen bei Kernwaffenexplosionen

4.1 Nationale Maßnahmen

4.1.1 Zuständigkeiten im Bevölkerungsschutz

Nach § 1 des Gesetzes über den Zivilschutz und die Katastrophenhilfe des Bundes (ZSKG) in der Fassung von 1997 (ZSKG 1997) ist „Aufgabe des Zivilschutzes, durch nicht-militärische Maßnahmen die Bevölkerung, ihre Wohnungen und Arbeitsstätten, lebens- oder verteidigungs-wichtige zivile Dienststellen, Betriebe, Einrichtungen und Anlagen sowie das Kulturgut vor Kriegseinwirkungen zu schützen und deren Folgen zu beseitigen oder zu mildern. Behördliche Maßnahmen ergänzen die Selbsthilfe der Bevölkerung“. Zum Zivilschutz gehören u. a. der Selbstschutz, die Aufenthaltsregelung sowie Maßnahmen zum Gesundheitsschutz der Bevölkerung.

§ 4 Abs. 2 des ZSKG regelt, dass die Verwaltungsaufgaben nach diesem Gesetz dem im Geschäftsbereich des Bundesministeriums des Inneren und für Heimat (BMI) angesiedelten Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) übertragen werden. Der Bund entwickelt nach § 18 Absatz 3 ZSKG Standards und Rahmenkonzepte für den Zivilschutz und stellt nach § 13 ZSKG ergänzende Ausstattung (z. B. für den ABC-Schutz; heute CBRN-Schutz) zur Verfügung. Die ergänzende Ausstattung für den CBRN-Schutz umfasst Ausrüstung zur Erkundung, Dekontamination, und Kontaminationsanalyse sowie persönliche Schutzausrüstung (PSA) für Einsatzkräfte⁴. Das BBK ist auch zuständig für die Koordinierung der Analytischen Task Force CBRN (ATF) sowie die Förderung, Intensivierung und Koordinierung der zivil-militärischen Zusammenarbeit mit dem Kommando Territoriale Aufgaben der Bundeswehr. Die Bundespolizei leitet für polizeiliche Lagen den Unterstützungsverband CBRN (UVB-CBRN), dem auch das Bundeskriminalamt, das ABC-Abwehrkommando der Bundeswehr, das Robert Koch-Institut (RKI), das Wehrwissenschaftliche Institut der Bundeswehr sowie das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) angehören.

Die Zuständigkeit für das operative Krisenmanagement liegt bei den Ländern und Gemeinden. Dies betrifft die Planung und Ausstattung der Krankenhäuser durch die Gesundheitsministerien der Länder. Nach § 21 Absatz 1 ZSKG haben die nach Landesrecht zuständigen Behörden ergänzende Maßnahmen zur gesundheitlichen Versorgung der Bevölkerung im Verteidigungsfall zu planen; sie sollen mit dem Gesundheits- und Sanitätswesen der Bundeswehr eng zusammenarbeiten.

Nach § 98 Strahlenschutzgesetz von 2017 (StrlSchG 2017) bewertet das BMUV mögliche Notfallexpositionssituationen. Das BMUV hat 2023 einen „Allgemeinen Notfallplan des Bundes“ (ANoPl-Bund) erlassen; zu den dort definierten Referenzszenarien gehört neben verschiedenen Arten von Kernkraftwerksunfällen und sonstigen Unfällen mit radioaktivem Material unter Ziffer S14 auch eine Nuklearwaffenexplosion, allerdings nicht im Zusammenhang mit Spannungs- oder Verteidigungsfällen. Der ANoPl-Bund (BMUV 2023) umfasst insbesondere

⁴ https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Ergaenzende-Ausstattung/Zivilschutzfahrzeuge/ABRN/cbrn_node.html
https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/ABRN-Schutz/ABRN-Faehigkeiten/cbrn-faehigkeiten_node.html,
zuletzt aufgerufen am 16.09.2024

auf das jeweilige Referenzszenario optimal abgestimmte Strategien zum Schutz der Bevölkerung und der Einsatzkräfte, die auch besonders schutzbedürftige Personen berücksichtigen (optimierte Schutzstrategien). Für die Koordination von Hilfsmaßnahmen in Bezug auf Strahlenschutz national wie international ist das im Geschäftsbereich des BMUV angesiedelte Radiologische Lagezentrum des Bundes (RLZ-Bund) zuständig. Gemäß § 106 StrlSchG (StrlSchG 2017) hat das BMUV das RLZ-Bund eingerichtet, dass die Aufgaben nach § 106 Absatz 2 StrlSchG wahrnimmt. Das RLZ-Bund ist als Netzwerk des BMUV, des BfS und der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) aufgebaut.

Das BfS betreibt das Integrierte Mess- und Informationssystem zur Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt (IMIS) mit über 1 500 flächendeckend über die Bundesrepublik verteilten Messstellen. Bei einem radiologischen Notfall wirkt das BfS maßgeblich an der Erstellung des radiologischen Lagebildes beim RLZ-Bund mit (u. a. aufgrund der IMIS Messdaten). Weiterhin berät das BfS die am UVB-CBRN beteiligten Behörden zu den radiologischen Aspekten einer polizeilichen Lage und unterstützt auch personell und technisch bei der Bewältigung radiologischer Gefahren. Dabei nimmt das BfS u. a. die folgenden Aufgaben wahr:

- Bewertung der radiologischen Situation (u. a. auf der Grundlage von IMIS-Messdaten),
- Beratung der Einsatzleitung in Fragen des Strahlenschutzes und zur möglichen Gefährdung durch radioaktive Stoffe,
- Gewährleistung des Strahlenschutzes der Einsatzkräfte,
- Suche, Detektion mit Messgeräten und Identifikation radioaktiver Stoffe, Mengenabschätzung,
- Abschätzung der Ausbreitung radioaktiver Stoffe (z. B. bei einem Szenario mit einer schmutzigen Bombe),
- Dosisabschätzung,
- Beratung zum Transport radioaktiver Stoffe,
- Beratung bei der Durchführung von Dekontaminationsmaßnahmen,
- Planung und Organisation von Schulungen und Übungen.

Tab. 4-1: *Verflechtung der Aufgaben und Zuständigkeiten auf Bundes- und Länderebene bei der Bewältigung der Explosion von Kernwaffen.*

Aufgaben	Bundesressort	Bundesbehörde	Länderressorts
Bevölkerungsschutz	BMI: Konzeption Zivile Verteidigung. Zivilschutzplanung.	BBK: Zivilschutzplanung. Koordinierung ATF Bundespolizei: leitet UVB-CBRN	Innenressorts: Organisation des Katastrophenschutzes zusammen mit Polizei, Feuerwehren, Rettungsdiensten und THW
Schutz der Gesundheit	BMG: Gesundheitsgesetzgebung	RKI: an UVB-CBRN beteiligt	Gesundheitsressorts: Krankenhausplanung, Vorhaltung der notwendigen Infrastruktur
Spezielle Gefahrenabwehr bei RN-Lagen in Friedenszeiten	BMUV: StrlSchG, Notfallpläne des Bundes, RLZ-Bund	BfS: Betrieb des IMIS, an RLZ-Bund und UVB-CBRN beteiligt. RLZ-Bund: Erstellung des Radiologischen Lagebilds, Beteiligung der Koordinierungsstellen der Bundesoberbehörden	Teilweise Umweltressorts, teilweise Innenressorts oder andere: Notfallpläne der Länder, Abstimmung der Kopfstellen Strahlenschutz der Länder mit dem RLZ-Bund
Zivil-militärische Zusammenarbeit	BMVG: verfügt über gut entwickelte Infrastruktur	Kommando Territoriale Aufgaben. ABC-Abwehrkommando, Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien (an UVB-CBRN beteiligt)	

Die Tab. 4-1 erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit der Angaben zu den Aufgaben und Zuständigkeiten bei der Bewältigung der Folgen von Kernwaffenexplosionen. Insbesondere wird die bundeswehrinterne Aufgabenverteilung nicht adressiert; hier wird nur die zivil-militärische Zusammenarbeit angesprochen. Die Tabelle soll in erster Linie die komplexen Verflechtungen der Zuständigkeiten darstellen.

Nach § 19 des ZSKG (ZSKG 1997) sollte eine Schutzkommission den Bundesminister des Inneren in wissenschaftlichen und technischen Fragen des Zivilschutzes und der Katastrophenhilfe beraten. Diese bereits 1951 in Zusammenhang mit dem drohenden „kalten Krieg“ mit ehrenamtlichen Expertinnen und Experten der Naturwissenschaften, Technik, Medizin und Sozialwissenschaften besetzte Schutzkommission hatte u. a. die Aufgabe, in regelmäßigen Abständen Gefahrenberichte zu erstellen. In diesen hat die Schutzkommission mehrfach auf die Notwendigkeit der Entwicklung eines ressort- und länderübergreifenden Konzepts für Versorgung und Nachsorge im medizinischen, pharmazeutischen und psychosozialen Bereich der Katastrophenhilfe hingewiesen. Die Schutzkommission wurde jedoch 2015 ersatzlos aufgelöst.

4.1.2 Stand der Vorbereitungen

Am 24. November 2023 trat der ANoPI-Bund (BMUV 2023) nach § 98 StrlSchG (StrlSchG 2017) in Kraft. Regelungen dieses ANoPI-Bund und der noch zu erlassenden Besonderen Notfallpläne des Bundes (BNoPI-Bund) gelten nicht für Notfälle im Zusammenhang mit Spannungs- oder Verteidigungsfällen. Die Planung für solche radiologischen Notfälle erfolgt in der „Konzeption Zivile Verteidigung“ (KZV), veröffentlicht vom BMI (2016), und den Bezugsdokumenten, die die KZV konkretisieren und ergänzen (wie der „Rahmenkonzeption

für den CBRN-Schutz“ (BBK 2014, gedruckt 2016)). Laut ANoPI-Bund von 2023 (BMUV 2023) gilt, dass – soweit die KZV (BMI 2016) und die Rahmenkonzeption CBRN-Schutz (BBK 2014) keine speziellen Regelungen für radiologische Notfälle (wie z. B. konkret Kernwaffenexplosionen) enthalten – die Regelungen der Notfallpläne nach dem StrlSchG (StrlSchG 2017) ganz oder teilweise auf solche radiologischen Notfälle entsprechend anwendbar sein können. Die Rahmenkonzeption CBRN Schutz (BBK 2014) besagt, dass die Verantwortung für die Sicherstellung der CBRN-Schutzfähigkeit bei den für die Gefahrenabwehr zuständigen Behörden von Bund, Ländern und Kommunen liegt.

Nach der KZV soll die Bevölkerung flächendeckend über Grundkenntnisse bzw. Grundfähigkeiten in folgenden Bereichen verfügen: Sicherer Aufenthalt in Gefahrenlagen, Verhalten bei CBRN-Ereignissen, Selbstversorgung, Erste Hilfe, und Brandbekämpfung. Grundkenntnisse insbesondere bzgl. CBRN-Szenarien wurden der Bevölkerung zu Zeiten des „Kalten Krieges“ durchaus vermittelt, u. a. mit der damals vieldiskutierten Aufklärungsschrift „Jeder hat eine Chance“ (BMI 1962). Mit der Auflösung der Sowjetunion 1991 wurde die mit dem „Kalten Krieg“ verbundene Konfrontationslage als beendet betrachtet. Informationskampagnen zur Vorbereitung der Bevölkerung auf Nuklearexplosionen wurden eingestellt. Im Gegensatz zu anderen Ländern (siehe Abschnitt 4.2) wurden in Deutschland bis heute Aktivitäten von Seiten der zuständigen Behörden zur Information der Bevölkerung bzgl. Kernwaffenexplosionen nicht wieder aufgenommen.

Die KZV (BMI 2016) sieht vor, „dass für den Schutz der Bevölkerung vorhandene Bebauung im Rahmen des Selbstschutzes als physischer Schutz (Deckung) und Schutz vor Kontamination mit CBRN-Stoffen genutzt wird. Maßnahmen zur Härtung der Bausubstanz von Wohn- und Arbeitsgebäuden werden vom Bund empfohlen, gefördert oder verpflichtend vorgegeben. Die flächendeckende Bereitstellung öffentlicher Schutzräume sei hingegen nicht realisierbar und in Anbetracht von Ereignissen mit kurzer oder fehlender Vorwarnzeit nur sehr eingeschränkt geeignet, ausreichende Schutzwirkung zu entfalten.“

Dementsprechend hat das Bundesinnenministerium schon 2007 die Aufgabe der Bunker und Schutzräume in den westdeutschen Bundesländern beschlossen. 1 400 von 2 000 Schutzräumen seien „rückabgewickelt“ worden; noch vorhanden und reaktivierbar wären rund 600 Schutzräume, darunter auch große in U-Bahnhöfen oder Tiefgaragen. Eine solche Reaktivierung werde jedoch aktuell nicht geplant. In Ostdeutschland evtl. noch vorhandene Schutzräume seien gar nicht in das Schutzkonzept des Bundes aufgenommen worden.⁵

Großräumige Evakuierungen werden nach der KZV (BMI 2016) auf Grundlage der von den Ländern konsentierten „Rahmenempfehlung für die Planung und Durchführung von Evakuierungsmaßnahmen einschließlich der Evakuierung für eine erweiterte Region“ geplant und vorbereitet, am Beispiel eines Schadensereignisses in einem Kernkraftwerk.

⁵ Süddeutsche Zeitung vom 06.03.2022, abrufbar unter: <https://www.sueddeutsche.de/politik/krieg-in-der-ukraine-zivilschutz-in-deutschland-luftschutzbunker-sirenen-lebensmittellager-1.5541932>, letzter Zugriff am 18.12.2024

Die KZV (BMI 2016) gibt vor, dass zur Bewältigung chemischer (C), biologischer (B), radiologischer (R) und nuklearer (N) Schadensereignisse u. a. folgende Teilfähigkeiten sicherzustellen sind:

- CBRN-Detektion,
- CBRN-Dekontamination,
- Persönlicher Schutz,
- Sammelschutz,
- CBRN-Härtung,
- gesundheitlicher CBRN-Schutz,
- radiologischer Notfallschutz (einschließlich nuklearer Notfallschutz).

Die SSK hat zur Versorgung von Strahlennotfallpatienten und -patientinnen bei RN-Lagen in ihrer Empfehlung „Medizinisches Management von Strahlennotfällen – Voraussetzungen und Organisation“ (SSK 2023a) ausführlich Stellung genommen, Defizite der Versorgung aufgezeigt und Vorschläge zu deren Beseitigung gemacht. Die SSK betrachtet in dieser Empfehlung die Vorbereitungen zu den präklinischen eher technischen Maßnahmen wie CBRN-Detektion, -Dekontamination und PSA für kleinere und mittlere radiologische Notfälle im Allgemeinen als ausreichend, im Umfang aber voraussichtlich nicht ausreichend für die Reaktion auf einen Kernwaffeneinsatz, wobei der SSK keine vorhandenen Daten zu tatsächlicher Vorratshaltung und lokalen Verteilungen vorliegen. Der Transport von Strahlennotfallpatienten und -patientinnen mit Rettungsfahrzeugen sei prinzipiell geregelt und würde laut SSK ebenso wie die vorangehend aufgeführten Maßnahmen punktuell geübt. Demgegenüber gibt es z. T. erhebliche Defizite an der Schnittstelle der präklinischen mit der klinischen Versorgung in aufnahmebereiten Krankenhäusern. Zur Überwindung dieser Defizite empfiehlt die SSK in (SSK 2023a) u. a. den Aufbau und den Unterhalt eines zweistufigen Netzwerks von auf Strahlennotfälle spezialisierten Krankenhäusern und von mobilen Teams zur Versorgung von Strahlennotfallpatienten und -patientinnen, die vorgehalten werden müssen. Im Zentrum dieses Netzwerks soll eine zentrale Koordinierungsstelle die deutschlandweite Verteilung von Strahlennotfallpatienten und -patientinnen auf der Grundlage von tagesaktuell erfassten Daten zu freien Behandlungskapazitäten und zur vorhandenen apparativen und personellen Ausstattung ermöglichen. Außerdem schlägt die SSK in ihrer Empfehlung Inhalte für ein Curriculum für das geplante Qualifizierungsniveau „Strahlennotfallmanagement“ und „Strahlennotfallärztin/-arzt“ vor.

4.2 Internationale Maßnahmen

Aktuelle in anderen Staaten empfohlene Maßnahmen zum Schutz bei Kernwaffenexplosionen und Empfehlungen anderer Organisationen

4.2.1 USA: Leitfaden zur Planung der Reaktionen auf eine Kernwaffenexplosion (Planning Guidance for Response to a Nuclear Detonation) der Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2023)

Die Federal Emergency Management Agency (FEMA) ist eine Behörde des US Bundesministeriums für Heimatschutz (Department of Homeland Security, DHS). Das DHS wurde nach den terroristischen Anschlägen u. a. auf das World Trade Center vom 11.9.2001 gegründet. Es ist verantwortlich für die Vorbereitung auf und die Bewältigung von jeder Art von Katastrophen.

Der Leitfaden zur Planung von staatlichen Reaktionen und Maßnahmen wurde in Zusammenarbeit mit dem Department of Energy, dem Department of Health and Human Services, dem

Department of Defense und der Environmental Protection Agency entwickelt und in seiner dritten Auflage von 2022 gegenüber den vorherigen Editionen (von 2009 und 2010) erweitert (FEMA 2023). Er berücksichtigt nun nicht mehr nur kleinere nukleare Explosionen im Rahmen von Terroranschlägen, sondern nennt dezidiert auch größere nukleare Explosionen an der Erdoberfläche und in der Luft, inklusive Bedrohungen durch andere Staaten. Dieser Leitfaden wird hier ausführlich beschrieben, da er von der SSK als nützliche Grundlage für die Planungen in anderen Staaten, wie auch in Deutschland, angesehen wird. Seine klare und wenig technische Sprache und die öffentliche Verfügbarkeit machen ihn auch für mögliche Multiplikatoren wie Lehrende, in den Medien Tätige und interessierte Bürgerinnen und Bürger zugänglich. Er enthält zudem hilfreiche Verweise auf weiterführende Dokumente für die einzelnen Themenbereiche.

In Kapitel 1 des Leitfadens wird ein übersichtlicher und gut verständlicher Überblick gegeben über die relevanten gesundheitsgefährdenden Ereignisse im Falle einer Kernwaffenexplosion (Lichtblitz, initiale Strahlung, elektromagnetischer Puls, Hitzewelle, Druckwelle, residuale Strahlung⁶ durch Aktivierung und Fallout), deren zeitliche Abfolge und die zu erwartenden räumlichen Ausdehnungen der Ereignisse in Abhängigkeit von Explosionsstärke und -höhe. Dabei werden fünf Szenarien betrachtet: Oberflächennahe Explosionen mit Stärken von 0,1 kT, 1 kT, 10 kT und 100 kT, sowie Explosionen mit 100 kT in Höhen von 1 000 Fuß und 5 000 Fuß (ca. 300 m und 1 500 m) über der Erdoberfläche. Eine vergleichbare, auch für Nichtfachleute zugängliche Zusammenstellung fehlt im deutschen Sprachraum.

Kapitel 1 führt zudem ein in eine Zoneneinteilung, die als Grundlage für die zu erfolgenden Notfallmaßnahmen und deren Priorisierung dient. Diese Einteilung erfolgte anhand sichtbarer Gebäudeschäden: Die stark zerstörte Zone (Severe damage zone, SDZ) umfasst eine Region, in der nur wenige Gebäude strukturell intakt geblieben sind und in der nur sehr wenige Menschen in entsprechenden Schutzstrukturen überleben können. Die moderat zerstörte Zone (Moderate damage zone, MDZ) zeichnet sich ebenfalls durch substantiell geschädigte Gebäude aus, jedoch können stabilere Gebäude (z. B. aus verstärktem Beton) die Druckwelle überstehen. In dieser Zone ist mit einer deutlichen Anzahl von Überlebenden zu rechnen, im Falle einer oberflächennahen 10 kT Kernwaffenexplosion umfasst sie Entfernungen von ca. 0,4 km bis 1,5 km von Ground Zero (dem senkrecht unter dem Explosionsort liegenden Punkt auf der Erdoberfläche, auch Bodennullpunkt oder Hypozentrum genannt). In der gering zerstörten Zone (Light damage zone, LDZ) sind die meisten Gebäudehüllen intakt, dennoch dürfte es zu Verletzungen aufgrund Glassplitter und sonstiger umherfliegender Gegenstände kommen. Die LDZ reicht bei oberflächennaher 10 kT-Kernwaffenexplosion von ca. 1,5 km bis 5 km Entfernung. Zudem führt die Empfehlung in diesem Kapitel Zonen aufgrund der erwarteten Dosisleistung ein: In der Zone mit gefährlich hoher Dosisleistung (Dangerous radiation zone, DRZ) liegt die Dosisleistung bei über 100 mGy h^{-1} , während die Dosisleistungswerte in der „heißen“ Zone (hot zone, HZ) zwischen $0,1 \text{ mGy h}^{-1}$ und 100 mGy h^{-1} liegen. Diese Zonen lassen sich nicht anhand des Zerstörungsgrades von Gebäuden abschätzen, sondern müssen vor allem in den nur durch Fallout betroffenen Gebieten durch Dosisleistungsmessungen bestimmt werden. Aufgrund der abstandsabhängig bis zu mehrere Stunden andauernden Ablagerung und des anfangs sehr raschen Zerfalls der radioaktiven Bestandteile im Fallout verändert sich die Ausdehnung dieser Dosisleistungs-Zonen kurz nach einer Kernwaffenexplosion relativ schnell und in komplexer Weise (siehe Abb. 9.1). Als vordringlichste Maßnahme zur Rettung von Leben und Vermei-

⁶ Bei einer Kernwaffenexplosion bezeichnet man als Residualstrahlung die ionisierende Strahlung, die als Kernwaffenwirkung ab einer Minute nach der Explosion auftritt. Diese wird durch die entstehenden Spalt- und Aktivierungsprodukte, sowie das nicht umgesetzte Spaltmaterial erzeugt.

dung von Gesundheitsschäden von Personen außerhalb der SDZ betont dieses Kapitel die Notwendigkeit der Minimierung externer Exposition durch Fallout, vor allem in Form von sogenanntem Ground Shine (externe Bestrahlung durch auf dem Boden und sonstigen Oberflächen abgelagerte Radionuklide): Durch Aufsuchen von und Verbleib in Gebäuden für mindestens 12 bis 24 Stunden, sofern nicht akute andere Gefahren wie Feuer, kollabierende Gebäude oder medizinische Notfälle eine Evakuierung erforderlich machen, lässt sich die externe Exposition durch Fallout typischerweise auf weniger als 1/10 verringern.

Kapitel 2 gibt eine genauere Beschreibung nötiger Maßnahmen für die Bevölkerung und Einsatzkräfte in den verschiedenen Zonen. Es wird auf die Dosisrichtlinien für Einsatzkräfte verwiesen sowie auf die verschiedenen Möglichkeiten, die zur Verfügung stehen, um die Exposition von Einsatzkräften zu reduzieren. Zudem werden die nicht-nuklearen Gefahren für Einsatzkräfte in den zerstörten Zonen beschrieben. Aufgrund der verschiedenen relativ hohen Risiken für die Einsatzkräfte bei gleichzeitig geringer Zahl überlebender Personen in der SDZ werden Rettungsmaßnahmen in dieser Zone nicht als Priorität angesehen. In der MDZ hingegen werden viele Überlebende erwartet, welche von raschen Rettungseinsätzen profitieren können. Zudem können durch eine geordnete Evakuierung in dieser Zone viele weitere Opfer, z. B. aufgrund von Bränden und einstürzenden Gebäuden, vermieden werden. Daher wird in dem Leitfaden diese Zone als Priorität für Rettungseinsätze angesehen, wobei die möglichen Gefahren für die Einsatzkräfte immer noch erheblich sind, vor allem in DRZ-Bereichen („Dangerous Radiation Zone“, siehe Abschnitt 9.1). Des Weiteren behandelt Kapitel 2 die Notwendigkeit, Dekontamination von lebenswichtigen Infrastruktureinrichtungen zu planen und zu priorisieren sowie Konzepte für den Umgang von mit radioaktiv kontaminiertem und mit sonstigen Gefahrstoffen belastetem Abfall zu erarbeiten.

Kapitel 3 vertieft die Thematik des Schutzsuchens in Gebäuden (Sheltering) als vordringliche Frühmaßnahme, vor allem auch dann, wenn noch keine weiteren Informationen verfügbar sind. Erfolgt vorbeugendes Sheltering kann für eine sehr große Anzahl von Betroffenen lebensrettend sein, indem es vor Schäden durch die Druckwelle, die Hitzewelle und die initiale Strahlung schützt. Allerdings ist der Einsatz einer Kernwaffe auch ohne Vorwarnzeit möglich. Hier kann ein Schutzsuchen im Freien durch „Duck and Cover“ (in Deckung gehen und sich Bedecken) Gesundheitsschäden durch die frühen Wirkungen (Druck- und Hitzewelle, Initialstrahlung) verringern. Für das Sheltering nach Kernwaffenexplosion ist ein Zeitfenster auch im Nahbereich von einigen Minuten vorhanden, bevor der Fallout den Boden trifft, im Fernbereich dehnt sich der Zeitbereich bis zu mehreren Stunden aus. Diese Zeit sollte genutzt werden, ein Gebäude für einen geeigneten Schutz aufzusuchen. Im Fallout-Bereich kommt dem Sheltering eine nicht zu unterschätzende Bedeutung für die Vermeidung externer Exposition durch Fallout sowie Inhalation von Staub und Rauch zu. Insgesamt ist es für die Themen Akutschutz inklusive Sheltering im Vorfeld nötig, Kriterien für dafür geeignete Gebäudeteile bekannt zu machen, entsprechende Schlüsselbotschaften zu entwickeln (in den USA: „Get inside, stay inside and stay tuned“), sowie geeignete Massenschutzräume zu identifizieren. Da Sheltering eine vorübergehende Maßnahme ist (für die ersten 12 bis 24 Stunden), müssen auch die nachfolgenden Schritte, wie Evakuierung, Aufhebung der Sheltering-Empfehlung, etc. geplant werden.

In Kapitel 4 werden der zu erwartende Massenanfall von Verletzten und die daraus entstehenden Herausforderungen für die medizinische Akutversorgung bei gleichzeitig beeinträchtigter Infrastruktur beschrieben. Erwartet werden Verletzte mit mechanischen Traumata, Verbrennungen und akutem Strahlensyndrom sowie Kombinationen davon. Dabei ist die Gesamtprognose bei Kombinationen dieser Gesundheitseffekte schlechter als es bei Addition der Einzelprognosen zu erwarten wäre. Kapitel 4 gibt zudem eine Einführung in die verschiedenen dosisabhängig auftretenden Symptomatiken des akuten Strahlensyndroms und ihre Behandlung sowie Späteffekte akuter Strahlenexposition (delayed effects of acute radiation exposure,

DEARE). Vorbereitende Planungen sind auch nötig für die psychosoziale Versorgung, erforderliche Triage-Maßnahmen, nationale Lagerhaltung von Medikamenten und Materialien, Einbindung von medizinischen Einrichtungen sowie den respektvollen Umgang mit Verstorbenen.

Kapitel 5 behandelt die Notwendigkeit eines zeitnahen Monitorings aller potenziell betroffenen Personen hinsichtlich erforderlicher medizinischer Behandlung, Kontamination von Kleidung und Körper (gegebenenfalls auch interner Kontamination), und erforderlicher Dekontaminationsmaßnahmen. Empfohlen wird für spätere Dosis- und Risikoabschätzungen zudem die Sammlung aller relevanten Daten soweit verfügbar. Zusätzlich sollen Instruktionen für die selbständige Durchführung von Kontaminations-verringenden Maßnahmen durch Betroffene klar kommuniziert werden.

Kapitel 6 behandelt Fragen der Kommunikation und der Vorbereitung der Öffentlichkeit auf eine Kernwaffenexplosion. Die vorbereitende Kommunikation vor einem derartigen Fall ist ein entscheidender Faktor, der viele Leben retten kann, da im Falle einer Kernwaffenexplosion viele Kommunikationswege nicht mehr funktionieren werden, instinktives (Flucht-)Verhalten zu (vermeidbaren) hohen Strahlenexpositionen führen kann und bei diesem Thema mit viel Skepsis oder Fatalismus in der Bevölkerung gerechnet werden muss, was die Informationsvermittlung weiter erschwert. In den USA wird daher die Strategie verfolgt, die vorbereitende Kommunikation für eine Kernwaffenexplosion gemeinsam mit anderen Vorbereitungsaktionen, z. B. für Tornados und andere Naturkatastrophen, oder für das Eindringen bewaffneter Personen in Schulgebäude, zu verbinden und einen sogenannten nationalen „Preparedness Month“ dafür zu nutzen. Für den Ernstfall wird im Leitfaden empfohlen, eine möglichst einheitliche und vorgefertigte Nachricht über alle verfügbaren Kommunikationskanäle zu verbreiten. In den USA ist diese bis zur Verfügbarkeit weiterer Informationen „Get inside, stay inside and stay tuned“. Vorbereitung ist auch nötig, um die Kommunikations-Infrastruktur gegen die zu erwartenden Ausfälle zu härten.

Kapitel 7 behandelt schließlich Alarm- und Warnsysteme und ist relativ spezifisch für die Situation in den USA. Es macht jedoch die Komplexität der ineinander verzahnten Meldewege und die dafür nötige Vorbereitung deutlich.

4.2.2 Gesamtstaatlicher Notfallplan für Österreich bei einem Kernwaffeneinsatz in größerer Entfernung zu Österreich (2022)

Der gesamtstaatliche Notfallplan Österreichs (BMK 2022) wurde gemäß dem österreichischen Strahlenschutzgesetz (BMK 2020) vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie unter Einbeziehung aller betroffenen Bundesministerien erstellt. Er bildet die Arbeitsgrundlage für das behördliche Notfallmanagement auf Bundesebene und stellt eine koordinierte Notfallreaktion aller beteiligten Organisationen sicher. Es werden nur Kernwaffenexplosionen in größerer Entfernung betrachtet, bei denen Österreich nicht von den direkten Auswirkungen (Primärwirkung: Druckwelle, Hitzestrahlung, NEMP (Nuklearer Elektromagnetischer Impuls), Direktstrahlung) betroffen ist, sondern durch einen möglichen atmosphärischen Transport radioaktiver Luftmassen nach Österreich. Als mögliche betroffene Gebiete werden explizit zwei Szenarien beschrieben: Einsatz taktischer Kernwaffen in der Ukraine oder bei einem NATO-Stützpunkt in Europa (inklusive genannter deutscher Standorte), an dem auch Kernwaffen gelagert werden. Es wird ein Nahbereich definiert (Entfernungen von mehreren 10 km bis etwa 100 km windabwärts vom Explosionsort, initiale Dosisleistung über 100 mSv h^{-1}) und ein Fernbereich (Entfernungen von etwa 100 km bis mehrere 1 000 km windabwärts). Ausgehend von als möglich erachteten Szenarien beschränkt sich das Dokument weitgehend auf Ereignisse, die mehrere 100 km von Österreich entfernt stattgefunden haben; diese Ereignisse werden wegen des geringeren radioaktiven Inventars in

ihren Auswirkungen auf Österreich als weniger gravierend angesehen als schwere Kernkraftwerksunfälle in ähnlicher Entfernung. Ausgehend von diesen Grundannahmen sollen auf Bundesebene geplante Abläufe bei einem Kernwaffeneinsatz in größerer Entfernung zu Österreich in Analogie zu den Abläufen bei anderen großräumigen radiologischen Ereignissen erfolgen.

Nach einer Beschreibung von Szenarien gibt der Notfallplan ein Überblick über die am Notfallmanagement beteiligten Organisationen, ihre Zuständigkeiten und Einsatzbereitschaften. Sodann werden Informations- und Meldewege beschrieben sowie Aufbau und Funktion des einzurichtenden Lagezentrums. Ferner werden die Wege zur Ermittlung der Bodenkontamination und zur Datenweitergabe beschrieben. Im Notfallplan wird davon ausgegangen, dass im Falle einer bodennahen Explosion einer taktischen Kernwaffe in größerer Entfernung (mehrere 100 km) zu Österreich die Schutzmaßnahmen „Vorbereitung und Einnahme von Kaliumiodid-Tabletten“ und „Aufenthalt in Gebäuden“ in Österreich nicht notwendig werden. Schutzmaßnahmen im Bereich der Landwirtschaft und Lebensmittel können jedoch je nach Situation notwendig sein.

An einer Stelle erwähnt das Dokument auch Schutzmaßnahmen im Nahbereich. Aufgrund der fehlenden bzw. sehr kurzen Vorwarnphase bei einem Kernwaffeneinsatz wird dringend das Aufsuchen von und ein Aufenthalt in Gebäuden (in der Regel von mindestens 24 Stunden) mit möglichst großem Abstand zu den Fenstern und, wenn möglich, in den unteren Stockwerken oder im Keller empfohlen. Die Bevölkerung soll sich über Rundfunk und Fernsehen, soweit möglich, informieren. Vor einer sofortigen Evakuierung wird abgeraten, um unnötige Expositionen zu vermeiden. Selbst im Nahbereich wird die Notwendigkeit der Einnahme von KI-Tabletten als sehr gering angesehen.

4.2.3. Bericht der Schwedischen Strahlenschutzbehörde (SSM) zu den radiologischen Folgen von Fallout aus Kernwaffenexplosionen (2023)

Die schwedische Strahlenschutzgesetzgebung findet auch in einem internationalen Spannungsfall Anwendung, wenn nicht durch spezifische Regelwerke anders geregelt. Regierung, Streitkräfte und Strahlenschutzbehörden in Schweden sind autorisiert, für Beschäftigte in der schwedischen Gesamtverteidigung⁷ (total defence) Vorschriften zu erstellen, die von der geltenden Gesetzgebung abweichen. Die schwedischen Streitkräfte arbeiten derzeit an der Entwicklung von Vorschriften für ihr eigenes Personal. Es sind jedoch keine entsprechenden Arbeiten im Gange, um Vorschriften für in der schwedischen Gesamtverteidigung tätige Personen zu entwickeln, die nicht bei den schwedischen Streitkräften beschäftigt sind.

Es ist zudem unklar, ob auf Grundlage der geltenden Gesetzgebung die schwedische Regierung oder eine andere staatliche Stelle im Spannungsfall für die allgemeine Bevölkerung oder Arbeitnehmende, die nicht in der Gesamtverteidigung tätig sind, Regelungen erlassen darf, die von den geltenden Strahlenschutzvorschriften abweichen.

⁷ In Schweden gilt die allgemeine Wehrpflicht. Das bedeutet, dass jeder, der dort lebt und zwischen 16 und 70 Jahre alt ist, im Kriegsfall auf verschiedene Weise zur Hilfe herangezogen werden kann. Es gibt drei Arten der allgemeinen Verteidigungspflicht: a) Wehrpflicht in den Streitkräften, b) ziviler Dienst bei Tätigkeiten, die die Regierung beschließt, z. B. im Rettungsdienst, in der Kinderbetreuung und im Gesundheitswesen, c) allgemeine Dienstpflicht, d. h. man dient in Organisationen, die auch im Falle eines Krieges und der Kriegsgefahr funktionieren müssen. Das kann bedeuten, dass die reguläre Tätigkeit weiter ausgeübt wird, oder dass im Rahmen einer Sondervereinbarung gedient wird, die möglicherweise durch die Mitgliedschaft in einer freiwilligen Verteidigungsorganisation entsteht, oder dass man vom Arbeitsmarktservice mit Arbeiten betraut wird, die für die Gesamtverteidigung besonders wichtig sind.

Die Referenzwerte für Notfall-Expositionssituationen sind in der schwedischen Strahlenschutzverordnung geregelt. Der Referenzwert für die Exposition der Bevölkerung in einer Notfall-Expositionssituation beträgt 100 mSv effektive Jahresdosis für Ereignisse in einem Kernkraftwerk und 20 mSv effektive Jahresdosis für alle anderen Ereignisse, einschließlich dem Fallout von Kernexplosionen. Die SSM stellt jedoch fest, dass ein Referenzwert von 20 mSv effektiver Dosis nicht als Startpunkt der Optimierung von Strahlenschutz nach Fallout von Kernwaffenexplosionen geeignet ist (SSM 2023). In ihren Ausführungen betrachten sie daher angenommene Referenzwerte von 100 mSv, 500 mSv und 1000 mSv effektiver Dosis im ersten Jahr.

Der SSM-Bericht (SSM 2023) liefert eine Analyse der möglichen radiologischen Auswirkungen von Fallout in einer Entfernung vom Explosionsort von ca. 10 km bis mehreren 100 km. Er ist als Sammlung verfügbaren Wissens gedacht, nicht als fertige Grundlage von Planungsaktivitäten. Unter Annahme einer 100 kT Waffe mit 50 % Fusionsanteil, die bodennah detoniert, werden unter Berücksichtigung von verschiedenen Wetterbedingungen (Abdeckung von 70 %, 80 % und 90 % der tatsächlich in Schweden auftretenden Wetterbedingungen) effektive Dosen für ungeschützte Personen in Abhängigkeit vom Abstand vom Explosionsort abgeschätzt. Die Abschätzung zeigt, dass in den ersten beiden Tagen ohne Schutz (d. h. ohne Verbleib in Gebäuden) potenziell tödliche effektive Dosen im Abstand von mehreren 10 km und effektive Dosen über 1 000 mSv im Abstand von 50 km bis 75 km vom Explosionsort möglich sind. Effektive Dosen über 100 mSv sind im Falloutbereich bis zu 250 km vom Explosionsort möglich. Diese Dosen werden fast vollständig von externen Dosen durch abgelagerte Radionuklide dominiert, während externe Bestrahlung durch die Wolke oder Inhalation nur höchstens wenige Prozent zur effektiven Dosis beitragen. Diese Daten verdeutlichen die Bedeutung des Aufsuchens von Räumen mit guter Schutzwirkung (Sheltering) in den beiden ersten Tagen. Aber auch ohne eine Exposition in den ersten beiden Tagen ist die verbleibende Aktivität zu beachten, die dazu führen kann, dass die effektiven Dosen von Personen in ihren normalen Wohngebäuden eine Jahresdosis von 1 000 mSv bzw. 100 mSv überschreiten (in ca. 10 km bis 20 km bzw. 100 km bis 150 km Abstand vom Explosionsort). Dies zeigt die Notwendigkeit von Planungen für Evakuierungs- und Umsiedlungsmaßnahmen.

Es findet sich zudem eine Aussage zu Schilddrüsendosen: so wird angegeben, dass Schilddrüsendosen über 500 mSv für überlebende Personen ohne Sheltering als unwahrscheinlich angesehen werden. Eine Iodblockade wird nicht empfohlen.

Die Autoren betonen, dass die relative Bedeutung der verschiedenen Expositionswege für eine ungeschützte Person durch Fallout nach Kernwaffenexplosion und Fallout durch einen Reaktorunfall unterschiedlich ist. Für Fallout nach Kernwaffenexplosion dominiert die externe Exposition durch abgelagerte Radionuklide, während die Inhalationsdosis, insbesondere durch Aufnahme von Radioiod, bei schweren Kernkraftwerksunfällen dominiert. Dieser Unterschied hat wichtige Implikationen für die Effektivität von Schutzmaßnahmen.

Wichtigste Schlussfolgerungen der Autoren für die vorbereitende Planung sind:

- Des Aufsuchens eines gut schützenden Raumes vor dem Eintreffen des Fallouts hat überragende Bedeutung. Je nach Abstand und Wetterbedingungen kann die verfügbare Zeit einige Minuten bis mehrere Stunden betragen, d. h. zumindest für einen Teil der Betroffenen sind entsprechende Warnungen und Verhaltensaufforderungen möglich. Evakuierungen sind jedoch wegen der begrenzten Zeit nicht sinnvoll.
- Ungeschützte Personen können noch im Abstand von bis zu 75 km vom Explosionsort Dosen erhalten, die zu deterministischen Effekten führen. Das mögliche Auftreten deterministischer Effekte, insbesondere von Hauteffekten, muss bei den Planungen berücksichtigt werden.

- Auch wenn die initiale Phase in einem schützenden Raum verbracht wurde, können durch den Verbleib am Wohnort im ersten Jahr effektive Dosen von über 100 mSv auch im Abstand von mehr als 100 km vom Explosionsort erreicht werden. Umsiedlungen oder andere Restriktionen infolge der Bodenkontamination können notwendig werden, um die effektive Dosis unter 100 mSv zu halten. In geringeren Entfernungen müssten Umsiedlungen möglicherweise bereits in der ersten Woche erfolgen (SSM 2023).

4.2.4. Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutz-Kommission ICRP

Die ICRP hat 2022 auf ihrer Webseite⁸ Ratschläge für die Öffentlichkeit zum Schutz im Falle einer Kernwaffenexplosion in 13 Sprachen (inklusive deutsch) veröffentlicht. Mit Zeichnungen und eingebundenen Videos werden die zentralen Schutzmaßnahmen (get inside, stay inside, stay tuned) verdeutlicht und ihre Hintergründe anschaulich erklärt. Zudem werden weitere Verhaltensmaßnahmen für verschiedene Zeitspannen nach der Explosion beschrieben, sowie mögliche Vorbereitungen auf eine derartige Explosion. Diese Empfehlungen basieren auf dem Leitfaden der USA zur Planung der Reaktionen auf eine Kernwaffenexplosion (siehe Abschnitt 4.2.1). Zusätzlich hat ICRP die Publikation 146 (ICRP 2020a) „Strahlenschutz für die Bevölkerung im Falle eines schweren Nuklearen Unfalls“ im Internet frei zugänglich gemacht. Darin ist allerdings der militärische oder terroristische Einsatz von Kernwaffen nicht abgedeckt. Deshalb wurde das Mandat der Task Group 120 erweitert um den Auftrag, auf der Grundlage umfassender Literaturanalysen Schutzempfehlungen für Behörden und die Bevölkerung für „malicious events“ und nukleare Explosionen zu erstellen.

5 Eigenschaften, Arten und Auswirkungen von Kernwaffen

5.1 Eigenschaften nuklearer Explosionen

Eine Explosion entsteht grundsätzlich durch die sehr schnelle Freisetzung einer großen Energiemenge in einem zunächst beschränkten Raumbereich. Dies trifft sowohl für konventionelle Sprengstoffe, wie beispielsweise TNT, als auch für nukleare Explosionen zu. Die Energiefreisetzung basiert jedoch in beiden Fällen auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien. Die plötzliche Freisetzung hoher Energie bei einer Explosion verursacht einen enormen Anstieg von Temperatur und Druck, so dass sich die umgebende Materie im Wesentlichen in ein heißes und komprimiertes Gas verwandelt. Bei den herrschenden hohen Temperaturen und dem hohen Druck dehnt sich das Gas umgehend aus und erzeugt eine Druckstoßwelle (hier im weiteren vereinfacht als Druckwelle bezeichnet) im umgebenden Medium (meist Luft, Erde/Gestein oder Wasser). Die Wellenfront dieser Druckwelle bewegt sich überwiegend mit einer Geschwindigkeit, die deutlich größer als die Schallgeschwindigkeit ist.

Nukleare Explosionen sind insofern den Explosionen aus konventionellen Sprengstoffen ähnlich, als dass die Hauptwirkung in der Regel durch eine Druckwelle zustande kommt. Allerdings gibt es auch grundsätzliche Unterschiede zwischen Explosionen nuklearer Sprenganordnungen und solchen von konventionellem Sprengstoff:

- Die Sprengkraft von Kernwaffen liegt üblicherweise im Bereich von wenigen Kilotonnen (kT) bis einigen Megatonnen (MT) TNT Äquivalent und ist damit um Größenordnungen stärker als konventionelle Explosionen.

⁸ <https://www.icrp.org/page.asp?id=613>, zuletzt aufgerufen am 16.09.2024

- Für eine bestimmte Explosionsstärke (Menge an freigesetzter Energie) ist die tatsächlich umgesetzte Masse an nuklearem Material um Größenordnungen geringer als die dafür (theoretisch) benötigte Masse an konventionellem Sprengstoff.
- Die Temperaturen, die bei einer nuklearen Explosion erreicht werden, sind um ein Vielfaches höher als bei üblichen konventionellen Explosionen. Dies führt dazu, dass bei nuklearen Explosionen ein deutlich höherer Anteil der freigesetzten Energie (Explosionsenergie) in Form von thermischer Strahlung freigesetzt wird. Diese wird auch als *Hitzeblitz* bezeichnet.
- Eine nukleare Explosion wird von weitreichender ionisierender Strahlung begleitet. Diese Strahlung besteht überwiegend aus Gamma- und Neutronenstrahlung und wird als *Initialstrahlung* bezeichnet.
- Die bei der Kernspaltung entstehenden Spaltprodukte sind überwiegend für einen längeren Zeitraum radioaktiv und emittieren ionisierende Strahlung. Die ebenfalls bei der Kernspaltung und bei der Kernfusion entstehende Neutronenstrahlung aktiviert umgebende Materie, die dann ebenfalls radioaktiv wird und für einen längeren Zeitraum ionisierende Strahlung aussendet. Diese über den Explosionsvorgang hinaus anhaltende ionisierende Strahlung wird *Residualstrahlung* oder *Rückstandsstrahlung* genannt.
- Eine nukleare Explosion erzeugt weiterhin impulsförmige elektromagnetische Strahlung, die elektronische Geräte temporär stören oder permanent zerstören kann. Dies wird als *Nuklearer Elektromagnetischer Impuls (NEMP)* bezeichnet, der eine breite Frequenzverteilung bis zu einigen hundert Megahertz aufweist. Aufgrund der hohen Reichweite hat der EMP vor allem bei der exo-atmosphärischen Explosion einer Kernwaffe eine hohe militärische, aber auch zivile Bedeutung.

Nukleare Explosionen in der Luft und exo-atmosphärische Explosionen führen zur Ionisation von lokalen oder größeren Bereichen der Atmosphäre. Dies führt zu einer Änderung der elektromagnetischen Eigenschaften der Atmosphäre, die sich wiederum negativ auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen beispielsweise bei Funkübertragung oder Radaranwendungen auswirken kann.

5.2 Initiale und residuale Kernwaffenwirkungen

Die Wirkungen einer Kernwaffe hängen grundsätzlich von ihrem individuellen Design, von der Explosionsstärke⁹, der Einsatzumgebung und dem betrachteten Zeitpunkt nach der Explosion ab. In der ersten Mikrosekunde nach dem Explosionszeitpunkt sind die Vorgänge, bezogen auf die Wirkung, für alle Kernwaffenexplosionen sehr ähnlich. Innerhalb dieser ersten Mikrosekunde wird die gesamte Explosionsenergie freigesetzt und in diesem Zeitintervall die gesamte prompte Kernstrahlung emittiert. Zurück bleiben die verdampften Reaktionsprodukte der Kernreaktionen und die verdampften Waffenteile. Die entstandenen Spaltprodukte sind überwiegend hochradioaktiv und senden Gamma-, Beta- und Alphastrahlung aus. Dieser Strahlungsanteil wird als sekundäre Strahlung betrachtet. Die hohen Temperaturen führen zu einem immensen inneren Druck, der das verdampfte Waffenmaterial mit sehr hohen Geschwindigkeiten radial expandieren lässt. Durch die Expansion kühlt sich das verdampfte Material schnell ab. Während der ersten Mikrosekunde werden bei den meisten Kernwaffen etwa 80 Prozent der Explosionsenergie als thermische Energie emittiert, der größte Anteil als (weiche) Röntgenstrahlung (Glasstone und Dolan 1977). Am Ende dieser ersten Mikrosekunde besteht die verbleibende Explosionsenergie im Wesentlichen aus kinetischer Energie. Nach der ersten Mikrosekunde

⁹ Die Explosionsstärke einer Nuklearwaffe wird auch als *Yield* bezeichnet.

interagiert das verdampfte Waffenmaterial mit der Umgebung, und die weiteren Wirkungen der Kernwaffenexplosion hängen stark von der Dichte, der Zusammensetzung, dem Aggregatzustand und dem Druck des umgebenden Materials ab. Bei einer bodennahen Kernwaffenexplosion entstehen als initiale Kernwaffenwirkungen zuerst der bereits oben beschriebene Initialstrahlungsimpuls, dann der thermische Strahlungsimpuls (Hitzeblitz) und schließlich die Druckwelle.

Einige Minuten nach der Explosion verbleiben im Wesentlichen die Wirkungen der Residualstrahlung verbunden mit dem Fallout und die mit der Ionisation der Atmosphäre zusammenhängenden Effekte. Daher hat man den Zeitraum beginnend mit der Explosion einer Kernwaffe bis eine Minute¹⁰ danach für die Definition der initialen Kernwaffenwirkungen festgelegt. Alle Wirkungen, die nach der ersten Minute bei der Explosion auftreten, gehören somit zu den residualen Wirkungen einer Kernwaffenexplosion.

5.3 Funktionsweise und Typen von Kernwaffen

Alle Kernwaffen basieren auf dem physikalischen Prinzip der in einer Kettenreaktion stattfindenden Kernspaltungen und je nach Kernwaffentyp zusätzlich auf dem Prinzip der nuklearen Fusionsreaktionen.

5.3.1 Kernspaltung

Bei der Spaltung von Uran- oder Plutoniumkernen durch Neutronen werden neben der freiwerdenden Spaltenergie weitere Neutronen emittiert. Dies ist Grundvoraussetzung für eine Kettenreaktion, die theoretisch durch ein einziges Neutron ausgelöst werden kann und in kürzester Zeit zu einer gewaltigen Energiefreisetzung führt. In der Praxis sind für Kernwaffen die Spaltisotope ^{235}U und ^{239}Pu relevant. Bei der Kernspaltung entstehen etwa 60 primäre Nuklide in 35 chemischen Elementen (Hoffmann 1987). Insgesamt wird pro Spaltereignis eine Energie von etwa 200 MeV frei, von der etwa 180 MeV als Explosionsenergie freigesetzt werden. Die kinetische Energie der Spaltfragmente hat den bei weitem höchsten Anteil an der Spaltenergie. Bei einer nuklearen Explosion mit einer Explosionsenergie von 1 kT werden nur 57 Gramm ^{235}U bzw. 58 Gramm ^{239}Pu durch Kernspaltung gespalten. Bei einer einfachen Spaltanordnung werden allerdings nur maximal 20 % des vorhandenen spaltbaren Materials bei der Explosion gespalten, da die Kettenreaktion in Folge der enormen Energiefreisetzung und damit der schnellen Ausdehnung des Spaltmaterials zusammenbricht (Hoffmann 1987).

5.3.2 Kernfusion

Die Energieproduktion bei thermonuklearen Waffen findet, ähnlich zu den Energieerzeugungsprozessen in der Sonne und anderen Sternen, über Kernfusion, also über die Verschmelzung von Wasserstoffkernen zu schwereren Kernen statt. Das chemische Element Wasserstoff existiert in Form der Isotope Wasserstoff (^1H), Deuterium (^2H bzw. D) und dem radioaktiven Tritium (^3H bzw. T). Alle drei Isotope besitzen ein Proton und unterscheiden sich in der Anzahl der Neutronen. Damit Fusionsprozesse ablaufen können, sind eine extrem hohe Temperatur und ein sehr hoher Druck notwendig. Daher bezeichnet man diese Prozesse auch als thermonukleare Fusionsreaktionen.

Bei Temperaturen von einigen zehn Millionen Kelvin treten im Wesentlichen zwei unterschiedliche DD- und eine DT-Fusionsreaktion auf. Diese drei Fusionsreaktionen setzen bei der Fusion

¹⁰ Nach dieser Zeit hat die Explosionswolke, die noch den Großteil der Spaltprodukte enthält, bereits solche Höhen erreicht, dass die von den Spaltprodukten emittierte Gammastrahlung im Vergleich zu der Strahlungsdosis der ersten Minute für einen Immissionsort auf der Erdoberfläche praktisch keine Relevanz mehr hat.

von fünf Deuteriumkernen eine Energie von etwa 24,8 MeV frei. Pro Kernteilchen (Nukleon) wird bei der thermonuklearen Kernfusion mit 2,48 MeV etwa dreimal so viel Energie wie bei der Kernspaltung, bei der entsprechend 0,85 MeV freigesetzt werden, frei.

Die Voraussetzung dafür, dass diese Fusionsreaktionen mit der notwendigen Reaktionsgeschwindigkeit ablaufen können, ist eine Temperatur von mehreren zehn Millionen Kelvin. Diese Temperatur kann in der Waffentechnik nur durch die Explosion einer Spaltanordnung erreicht werden. Durch die Kombination einer Spaltanordnung (primary) mit einer bestimmten Anordnung von Fusionsmaterial (secondary) in einem Gefechtskopf kann eine thermonukleare Fusionsreaktion realisiert werden.

5.3.3 Kernspaltungswaffen

Kernspaltungswaffen können nach dem Kanonenrohr-Prinzip (gun design) oder dem Implosionsprinzip hergestellt werden wobei auch geboostete Implosionsanordnungen möglich sind.

Für eine Kernwaffe nach dem Kanonenrohr-Prinzip wird üblicherweise hochangereichertes Uran (highly enriched uranium (HEU)) mit einem ^{235}U Anteil von mindestens 80 % verwendet. Bei diesem Prinzip wird in einer einem Kanonenrohr ähnlichen Anordnung eine unterkritische Masse des verwendeten Spaltstoffs in eine zweite unterkritische Masse geschossen, die sich am anderen Ende des Rohrs befindet. Die Beschleunigung der ersten Masse findet durch die Verwendung von konventionellem Sprengstoff statt. Die für den Start einer nuklearen Kettenreaktion notwendige Überkritikalität des Spaltstoffes wird also durch schnelles Zusammenführen zweier unterkritischer Massen zu einer überkritischen Masse erreicht.

Bei der Implosionsmethode erreicht man die Überkritikalität des Spaltstoffes dagegen durch Kompression einer einzigen bei normalem Umgebungsdruck unterkritischen Spaltstoffmasse. Die Kompression wird dadurch erreicht, dass eine in erster Näherung kugelförmige Spaltstoffmasse von konventionellen Sprenglinsen umgeben wird, die zeitlich so gezündet werden, dass sie den Spaltstoff symmetrisch zum Mittelpunkt komprimieren. In der Praxis wird dafür waffenfähiges Plutonium mit einem Anreicherungsgrad (^{239}Pu) von etwa 90 % verwendet.

Mittlerweile dürften vermehrt geboostete Implosionsanordnungen Verwendung finden (Gsponer 2006). Hier wird waffenfähiges Plutonium als Hohlkugel ausgelegt, in deren Hohlraum sich eine geringe Menge an den Fusionsbrennstoffen Deuterium und Tritium befindet. Wenn durch die voranschreitende Kettenreaktion ausreichender Druck und Temperatur entstanden sind, zündet der Fusionsvorgang und setzt schnelle Neutronen frei. Diese Fusionsneutronen spalten zusätzlich einen erheblichen Anteil des Plutoniums. Damit wird der vorhandene Spaltstoff effizienter genutzt und die Explosionsstärke erhöht.

5.3.4 Thermonukleare Waffen

Moderne nukleare Gefechtsköpfe dürften heute überwiegend als thermonukleare Versionen ausgeführt sein (Gsponer 2006). Thermonukleare Waffen benötigen zur Zündung des Fusionsbrennstoffs extrem hohe Temperaturen und Drücke, die durch die Explosion einer nuklearen Spaltanordnung (primary) erzeugt werden. Heutzutage dürfte die Verwendung eines geboosteten Implosionssprengkörpers (siehe Abschnitt 5.3.3) üblich sein. Die primäre Explosionsenergie wird dabei überwiegend als (weiche) Röntgenstrahlung frei und erzeugt lokal ein extrem heißes Plasma und damit Druck. Die Fusionsanordnung (secondary) kann unter diesen Bedingungen den Fusionsprozess im Fusionsmaterial zünden. Technisch kann dieser Prozess in unterschiedlichen Ausgestaltungen umgesetzt werden. Am bekanntesten dürfte das Teller-Ulam-Design sein. Dabei befinden sich in einem Bomben- bzw. Gefechtskopfgehäuse die primäre Spaltanordnung und die Fusionsanordnung (secondary) in unmittelbarer Nähe nebeneinander. Der restliche Hohlraum ist mit Schaumstoff (z. B. Polystrol) gefüllt.

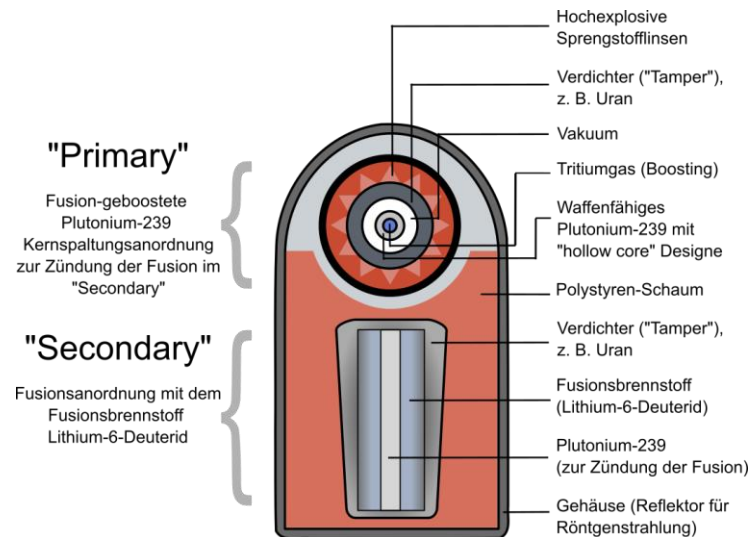


Abb. 5-1: Prinzipskizze des Aufbaus eines thermonuklearen Gefechtskopfs nach dem Teller-Ulam Design, bestehend aus einem direkt nebeneinander liegenden Primary (geboostete Spaltanordnung) und einem Secondary (Fusionsbrennstoff). (Quelle: Rambousky nach Wikimedia Commons)

Daneben gibt es zwei besondere Ausführungen eines thermonuklearen Gefechtskopfes, die hier nur kurz erwähnt werden sollen. Die Fusionsanordnung kann zum einen mit einer Umman-
telung aus natürlichem oder angereichertem Uran (^{235}U Anteil von 0,7 % oder geringer) versehen werden. Man spricht dann von einer 3-Phasen-Waffe¹¹. Die Spaltung des Urans durch die vorhandenen schnellen Fusionsneutronen kann die Explosionsstärke signifikant erhöhen. Der Nachteil dabei ist allerdings, dass eine große Menge Spaltprodukte – und damit auch Fallout – entsteht und somit eine solche Bombe als sehr *schmutzig*¹² gilt. Durch eine andere geschickte Konstruktion kann jedoch versucht werden, die Menge an Spaltprodukten möglichst gering zu halten und gleichzeitig die Emission der initialen Neutronenstrahlung zu maximieren. Man erhält dann die sogenannte *Neutronenbombe*. Sowohl die 3-Phasen-Waffe als auch die Neutronenbombe dürften heute, wenn überhaupt, nur noch eine untergeordnete Bedeutung haben.

5.4 Kernwaffenarsenale

Informationen über die Arsenale und Konstruktionsdetails von Kernwaffen der etablierten Kernwaffenstaaten werden grundsätzlich geheim gehalten und sind damit nicht frei zugänglich. Trotzdem lassen sich in der offenen Literatur¹³ Daten und Fakten finden, die eine einigermaßen realistische Zuordnung und Abschätzung der Arsenale erlauben (Kristensen und Korda 2022a, Kristensen und Korda 2022b).

Bei den Arsenalen unterscheidet man in erster Linie zwischen den strategischen und den nicht-strategischen Kernwaffen. Hauptkriterium dieser Unterteilung ist nicht die Explosionsstärke (kT-Wert) eines Nuklearsprengkopfes, sondern deren vorgesehener Einsatzzweck. Strategische

¹¹ Man spricht von einer 3-Phasen-Waffe, da die Energiefreisetzung in den Phasen 1. Spaltung (primary), 2. Fusion (secondary) und 3. Spaltung (secondary, ^{238}U) stattfindet.

¹² Dies hat nichts mit einer sogenannten „Dirty Bomb (schmutzige Bombe)“ zu tun. Bei einer (konventionellen) schmutzigen Bombe wird versucht, die in dem Sprengsatz beigemengten radioaktiven Stoffe durch eine Explosion von konventionellem Sprengstoff in der Umgebung zu verteilen.

¹³ Hier werden hauptsächlich die Arsenale der Nuklearwaffenstaaten USA und Russland betrachtet.

Kernwaffen sollen Ziele im gegnerischen Hinterland zerstören und dienen vorrangig der nuklearen Abschreckung. Nicht-strategische (taktische) Atomwaffen sind für den Einsatz in einem Kampfgebiet konzipiert und werden daher oft auch als "Gefechtsfeldwaffen" bezeichnet.

5.4.1 Strategische Kernwaffen

Die strategische Abschreckung eines Kernwaffenstaates stützt sich in der Regel auf drei Säulen. Die erste Säule stellen seegestützte strategische Kernwaffen dar. Diese Säule gilt als Säule mit der höchsten „Zweitschlagfähigkeit“ (Fähigkeit nach einem Nuklearschlag einen Vergeltungsschlag gegen den Angreifer mit dem Ziel der „gesicherten Zerstörung“ zu führen). Die zweite Säule bilden landgestützte strategische Kernwaffen. Diese Säule ermöglicht die größte Reaktionsfähigkeit. Die dritte Säule bilden schließlich luftgestützte strategische Kernwaffen. Diese Säule gilt als am flexibelsten und auch sichtbarsten. Obwohl es keine strikte Zuordnung nach der Explosionsstärke gibt, lässt sich dennoch feststellen, dass strategische Nuklearsprengköpfe eher im oberen kT-Bereich (meist dreistellig) liegen. Bezogen auf die drei Säulen lassen sich pro Nuklearsprengkopf grob die folgenden kT-Bereiche angeben:

- Säule „seegestützt“: 100 kT – 500 kT
- Säule „landgestützt“: 300 kT – 800 kT
- Säule „luftgestützt“: 5 kT – 1 200 kT

Zu beachten ist, dass vor allem see- und landgestützte interkontinentale ballistische Raketen mehrere Nuklearsprengköpfe (Multiple independantly targetable re-entry vehicle, MIRV) gleichzeitig tragen können, die im Endanflug unabhängig unterschiedliche Ziele ansteuern können. Aufgrund der MIRV-Technologie und der in den letzten Jahrzehnten zugenommenen Zielgenauigkeit von ballistischen (Interkontinental-)Raketen spielen Nuklearsprengköpfe mit Explosionsstärken von mehreren Megatonnen vermutlich, wenn überhaupt, in den Arsenalen der Kernwaffenstaaten nur noch eine untergeordnete Bedeutung.

Strategische Kernwaffen werden zur nuklearen Abschreckung bereitgehalten und sollen im Ernstfall eine Erst- bzw. Zweitschlagfähigkeit garantieren. Die potenziellen strategischen Ziele liegen dabei in der Regel im unter Umständen weit entfernten, Territorium des nuklearen Gegners.

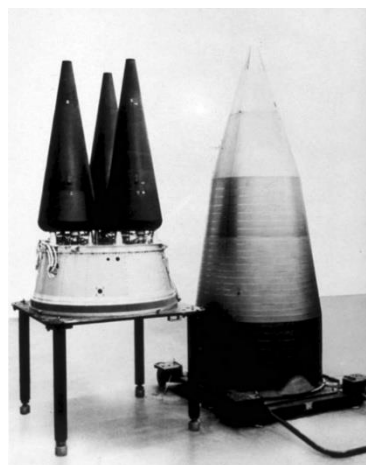


Abb. 5-2: Drei nukleare Gefechtsköpfe vom Typ W78 als MIRV MK12-A für eine ballistische Rakete LGM-30G Minuteman III, (Hansen 1945).

5.4.2 Nicht-strategische Kernwaffen

Der potenzielle Einsatz von nicht-strategischen Kernwaffen ist in einem militärischen Einsatzgebiet bzw. auf dem Gefechtsfeld vorgesehen. Nicht-strategische Kernwaffen haben eher eine Explosionsstärke im unteren kT-Bereich (ein- oder zweistellig). Technisch sind auch nukleare

Sprenksätze im sub-kT-Bereich möglich (Stichwort „Nukleare Rucksackbombe“). Es ist aber davon auszugehen, dass deren Relevanz in den heutigen Arsenalen eher gering ist. Es ist allerdings nicht auszuschließen, dass auch Kernwaffen höherer Explosionsstärken als nicht-strategische Waffe eingesetzt werden. Einen realistischen Bereich der Explosionsstärke für nicht-strategische Kernwaffen lässt sich grob mit 0,03 kT – 50 kT angeben.

5.5 Kernwaffenwirkungen

Bei den Kernwaffenwirkungen unterscheidet man die direkten und indirekten Wirkungen. Zu den direkten Wirkungen gehören Wirkungen durch (in zeitlicher Reihenfolge)

- die Initialstrahlung aus Neutronen- und Gammastrahlung,
- die thermische Strahlung (Hitzeblitz) und
- die Druckwelle (Druckstoß)

Zu den indirekten Wirkungen zählen

- Wirkungen durch radioaktiven Fallout aus der Explosionswolke und die damit verbundene, durch die Spaltprodukte ausgesandte ionisierende Strahlung (Residualstrahlung)
- Wirkungen durch einen nuklearen elektromagnetischen Impuls (NEMP), der aufgrund der Wechselwirkung der initialen Gammastrahlung sowohl bei einer Nuklearexplosion außerhalb als auch – mit deutlich geringerer Wirkreichweite – innerhalb der Erdatmosphäre entsteht,
- Transient Radiation Effects on Electronics (TREE), als Wirkung der Neutronen und Photonen aus der Initialstrahlung auf elektronische Bauteile, insbesondere Halbleiterbauelemente und
- die zeitlich beschränkte Veränderung der elektromagnetischen Eigenschaften der Atmosphäre, die sich negativ auf die Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung bei der Funkübertragung oder bei Radaranwendungen auswirken kann.

Jede nukleare Explosion¹⁴ innerhalb der Erdatmosphäre führt zur Ausbildung eines Feuerballs. Dieser wird üblicherweise nicht explizit den Wirkungen zugeordnet, ist aber essenziell für die Entstehung des Hitzeblitzes und der Druckwelle. Bei Nuklearexplosionen ist ein Überleben von Menschen und Material im Bereich des Feuerballs unmöglich.

5.5.1 Entstehung und Eigenschaften des Feuerballs

Aufgrund der sehr hohen Energiedichte und der Tatsache, dass der wesentliche Teil der Explosionsenergie unmittelbar in Form von Strahlung auftritt, verdampft die Kernwaffe bei der Explosion fast augenblicklich, wobei die gasförmigen Explosionsprodukte anfänglich das vorherige Waffenvolumen kaum überschreiten. Dadurch werden die gasförmigen Explosionsprodukte in ihrer Gesamtheit zu einer intensiven Röntgenstrahlungsquelle. Die relativ weiche Röntgenstrahlung, die von dieser Quelle ausgestrahlt wird, wird bei Explosionen in dichteren Schichten der Atmosphäre schnell absorbiert und trägt somit wesentlich zur Entstehung eines Feuerballes bei. Bei Höhenexplosionen unter den faktischen Bedingungen eines Vakuums tritt die Röntgenstrahlung als selbständige Kernwaffenwirkung in Erscheinung. Bei Erd- und unterirdischen Explosionen enthält der Feuerball zusätzlich große Mengen verdampfter und geschmolzener Erd- und Gesteinsmassen (siehe auch Kapitel 6).

¹⁴ Erläuterungen zu den verschiedenen Explosionsarten siehe Abschnitt 5.5.5

Der Feuerball einer Kernwaffenexplosion stellt ein grell leuchtendes, mehr oder weniger kugelförmiges Gebilde dar, in welchem sich alle Stoffe im Plasmazustand befinden. Durch die hohe Energiedichte in der Anfangsphase seiner Entwicklung ist der Feuerball die Ursache für die Entstehung einer Druckwelle sowie während seiner gesamten Existenz die Quelle einer sehr intensiven thermischen Strahlung.

Zu Beginn stellt der Feuerball eine isotherme Sphäre dar, also eine Kugel, in der die Temperatur überall gleich hoch ist. Die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Feuerballs und die Geschwindigkeit der Druckwelle sind gleich groß. Dadurch fallen die Oberfläche des Feuerballs und die der Druckwelle zusammen. Mit Anwachsen des Feuerballs sinkt die Temperatur der isothermen Sphäre. Beginnend bei dem Zeitpunkt nach der Explosion, bei dem sich die Temperatur auf etwa 300 000 Kelvin verringert hat, bewegt sich die Druckwellenfront schneller als die Front der isothermen Sphäre. Die Druckwellenfront löst sich dann vom Feuerball ab. Durch das große Druckgefälle und die dadurch bedingte hohe Geschwindigkeit der Druckwellenfront wird die Luft in dieser Front so stark komprimiert, dass sie in Folge der auftretenden Reibung auf außerordentlich hohe Temperaturen erhitzt und dadurch zum Glühen gebracht wird. Der Feuerball besteht jetzt aus zwei voneinander getrennten konzentrischen Bereichen, der inneren isothermen Sphäre und der glühenden äußeren Druckwellenfront, die für die thermische Strahlung, die von der inneren isothermen Sphäre erzeugt wird, undurchlässig ist. Daher erscheint die Druckwellenfront als abstrahlende Oberfläche des Feuerballs. Im Verlauf der weiteren Ausbreitung der Druckwelle nimmt der Überdruck in der Wellenfront und damit auch die Temperatur schnell ab. Dadurch wird die Druckwellenfront wieder durchsichtig für die heißere thermische Strahlung der inneren isothermen Sphäre, die nun wieder zur abstrahlenden Oberfläche wird. Folglich steigt die Temperatur wieder bis zum zweiten Temperaturmaximum an. Der weitere Verlauf des Feuerballs ist gekennzeichnet durch einen nun wieder einsetzenden Abfall der Oberflächentemperatur, der aufgrund der weiteren Ausdehnung und Energieabstrahlung den Feuerball schließlich zum Erlöschen bringt.

5.5.2 Druckwelle einer Nuklearexplosion

Der Zerstörungseffekt einer Druckwelle wird hauptsächlich durch den in ihr herrschenden statischen Überdruck verursacht. Weitere Eigenschaften der Druckwelle sind der dynamische Druck, die Dauer des Druckeffektes und die Ankunftszeit. Der unterschiedliche statische Druck auf verschiedene Oberflächen einer mechanischen Struktur verursacht dabei destruktive mechanische Kräfte, welche auf das Objekt wirken. Der maximale statische Überdruck an der Stoßwellenfront wird als *Spitzenüberdruck* bezeichnet. Die extrem heißen und unter sehr hohem Druck stehenden Gase im Feuerball verursachen eine Druckwelle, deren Wellenfront sich mit hoher Geschwindigkeit radial nach außen bewegt. Das Hauptmerkmal dieser Druckwelle ist der extrem steil ansteigende Überdruck an der Wellenfront, der dahinter (in Richtung Explosionsort) wieder deutlich langsamer abfällt.

Besonders für Gebäude oder ähnliche Infrastruktur gibt es mit dem *dynamischen Druck* allerdings noch eine weitere relevante Größe für destruktive Wirkungen. Der dynamische Druck resultiert aus den hohen Windgeschwindigkeiten hinter der Wellenfront, die für eine gewisse Zeitdauer auf die Objekte destruktiv einwirken. Der dynamische Druck ist proportional zum Quadrat der Windgeschwindigkeit und zur Luftdichte hinter der Stoßfront. Diese Größen hängen beide vom Spitzenüberdruck ab. In der Frühphase beträgt die Geschwindigkeit der Wellenfront das Vielfache der Schallgeschwindigkeit in der Luft. In größeren Entfernungen zum Explosionsort, wenn der Überdruck auf weniger als etwa 10 kPa gefallen ist, erreicht die Druckwelle etwa Schallgeschwindigkeit. Bei Eintreffen der Stoßfront am Beobachtungsort steigt der statische Überdruck von Null sprunghaft auf den Spitzenüberdruck an, um dann wieder deutlich langsamer abzufallen. Die positive Phase (Kompressionsphase) ist beendet,

wenn der Überdruck wieder Null erreicht. Die Dauer der Kompressionsphase erhöht sich bei größerer Explosionsstärke und größerer Entfernung zum Explosionsort. Bei ausreichend großen Entfernungen zum Explosionsort fällt der Überdruck auf negative Werte und führt zur sogenannten negativen Phase (Sogphase). Die Sogphase dauert in der Regel länger als die Kompressionsphase, besitzt aber eine deutlich geringere Amplitude. Die Änderungen im Überdruck verursachen entsprechend Veränderungen im dynamischen Druck und damit in den Windverhältnissen am Beobachtungsort. Die Kompressionsphase ist mit einem starken, aber abnehmenden Wind aus Richtung vom Explosionsort verbunden. Im ersten Teil der Sogphase weht ein schwächerer Wind in Richtung Explosionsort.

Bei einer (bodennahen) Luftexplosion einer Kernwaffe wird der nach unten abgehende Teil der Druckwelle an der Erdoberfläche reflektiert. Für eine ebene und glatte Erdoberfläche¹⁵ wird in einem Bereich nahe des Ground Zeros¹⁶ der gesamte statische Überdruck doppelt so hoch sein, wie der Spitzenüberdruck der einlaufenden Druckwelle. Allerdings bewegt sich die reflektierte Welle im weiteren Verlauf stets in Bereichen, die durch die einlaufende Druckwelle bereits komprimiert und aufgeheizt wurden. Dadurch bewegt sich die reflektierte Druckwelle auch bald mit höherer Geschwindigkeit als die einfallende Welle und holt diese ein, so dass sich eine gemeinsame Wellenfront bilden kann. Dieses Verhalten wird als *Mach-Reflexion* bezeichnet. Der Bereich, in dem beide Druckwellen vereinigt sind bezeichnet man als *Mach-Region*.

5.5.3 Thermische Strahlung einer Nuklearexplosion

Die thermische Strahlung einer Nuklearexplosion (innerhalb der Atmosphäre) hat ihren Ursprung in der Ausbildung des Feuerballs. Dieser emittiert elektromagnetische Strahlung ähnlich wie Sonnenlicht. Die auftretenden Wellenlängen liegen überwiegend im Bereich der ultravioletten, sichtbaren und infraroten Strahlung. Spricht man im Kontext der Kernwaffenwirkungen von der Wirkungskomponente der thermischen Strahlung, ist die thermische Strahlung gemeint, die von der Oberfläche des Feuerballs abgestrahlt wird. Diese wird auch synonym als Licht-, Wärme- oder Hitzestrahlung bezeichnet. Da es sich um eine impulsförmige Aussendung handelt, ist auch der Begriff *Hitzeblitz* verbreitet.

Der Anteil der Explosionsenergie, der bei einer nuklearen Explosion innerhalb der Atmosphäre als Hitzeblitz abstrahlt, wird als *thermischer Anteil* bezeichnet. Bei einer Luftexplosion beträgt der thermische Anteil etwa 35 %. Bei erdnahen Explosionen ist der thermische Anteil deutlich kleiner als bei Luftexplosionen. Dies hat seinen Grund in der geringeren Durchlässigkeit (Transmittanz) der beteiligten bodennahen Luftschichten aufgrund der höheren Staub- und Wasserdampfanteile, die durch die Explosion verursacht werden. Bei Kontaktexplosionen mit einer Explosionshöhe von Null liegt der thermische Anteil bei etwa 18 %.

Beim Durchgang durch die Atmosphäre wird die thermische Strahlung durch Absorption und Streuung geschwächt. Die Absorption erfolgt durch die Stickstoff- und Sauerstoffmoleküle der Luft sowie durch Verunreinigungen und Beimengungen, wie z. B. Staub und Wasserdampf. Unter dem Begriff der Streuung versteht man die Ablenkung von Strahlung aus ihrer ursprünglichen Ausbreitungsrichtung. Der Streuquerschnitt ist abhängig von der Wellenlänge der Strahlung. Die Streuung erfolgt an Gasmolekülen sowie an Staub- und Rauchteilchen sowie an kleinen Wassertröpfchen. Für die Schwächung des Hitzeblitzes in der Atmosphäre ist vor allem die Streuung an Aerosolen in der Luft von Bedeutung. Der Streuquerschnitt ist dabei besonders groß, wenn die Wellenlänge der Strahlung in der Größenordnung der Aerosoldurchmesser liegt.

¹⁵ Eine ideale Oberfläche wirkt für die Druckwelle als perfekter Reflektor.

¹⁶ Als Ground Zero (GZ) oder Hypozentrum wird die senkrechte Projektion des Explosionsortes auf die Erdoberfläche bezeichnet.

Unter der Einbeziehung von Schwächungskoeffizienten bzw. Transmissionsfaktoren kann bei Kenntnis der Wetterlage die thermische Fluenz des Hitzeblitzes auf dem Boden für eine bestimmte Entfernung zum Ground Zero abgeschätzt werden. Zur Abschätzung der Wetterlage wird meist die Sichtweite in Kilometern verwendet. Gegenüber großen Sichtweiten (außerordentlich reine Luft, ca. 100 km) ist die thermische Fluenz des Hitzeblitzes bei geringen Sichtweiten (leichter Nebel, ca. 2 km) signifikant kleiner.

Bei Menschen im Freien kann der Hitzeblitz Verbrennungen der Haut verursachen, bei Infrastruktur und in der Umwelt können großflächig Feuer ausgelöst werden.

5.5.4 Initialstrahlung einer Nuklearexplosion

Bei einer nuklearen Explosion führen Prozesse der Kernspaltung und Kernfusion zur Emission ionisierender Strahlung. Diese besteht grundsätzlich aus Neutronen-, Gamma-, Beta- und Alphastrahlung, wobei für die Betrachtung der Initialstrahlung nur die Neutronen- und Gammastrahlung dosisrelevant sind.

Auch bei geringen Explosionsstärken hat die (radioaktive) Explosionswolke nach einer Minute bereits solche Höhen erreicht, dass die von ihr ausgehende ionisierende Strahlung auf dem Erdboden nicht mehr signifikant wirksam ist. Die Initialstrahlung einer Kernwaffenexplosion besteht in dichter Atmosphäre im Wesentlichen aus der Gamma- und Neutronenstrahlung. Als Wirkungsdauer der Initialstrahlung wird der Zeitraum bis zu einer Minute nach der Explosion definiert. Praktisch liegt ihre Wirkungsdauer jedoch in den meisten Fällen bei weniger als 10 Sekunden. Ionisierende Strahlung, die nach einer Minute nach der Explosion freigesetzt wird, gehört definitionsgemäß zur Residual- bzw. Rückstandsstrahlung.

Die Wirkung der bei Nuklearexplosionen entstehenden Initialstrahlung kann sich je nach Situation deutlich unterscheiden. Neben der Explosionsstärke, der Explosionsart und der Explosionshöhe spielen vor allem die Art der Energiefreisetzung (Der jeweilige Anteil von Kernspaltung und der Kernfusion an der Explosionsenergie), die Konstruktion und das Design des nuklearen Sprengkörpers eine entscheidende Rolle. (Glasstone und Dolan 1977)

5.5.4.1 Neutronenkomponente der Initialstrahlung

Die Art der Energiefreisetzung und der konstruktive Aufbau der Kernwaffe wirken sich auf die Eigenschaften der austretenden Neutronenstrahlung noch stärker aus als auf die der Gammastrahlung. Die Neutronenkomponente der Initialstrahlung entsteht als *prompte Neutronenstrahlung* unmittelbar in den Prozessen der Kernspaltung und der Kernfusion. Bei der Umwandlung der radioaktiven Spaltprodukte entsteht ebenfalls Neutronenstrahlung, deren Anteil aber von untergeordneter Bedeutung bleibt (Glasstone und Dolan 1977).

Die im Prozess der Kernspaltung entstehenden Neutronen werden als *prompte Neutronen* bezeichnet, da sie in einem Zeitintervall von weniger als einer Mikrosekunde emittiert werden. Der größte Teil dieser prompten Neutronen mit einer mittleren Energie von etwa 1 MeV bis 2 MeV wird durch den Mantel der Kernwaffe stark geschwächt. Dadurch wird das primäre Spaltspektrum der Neutronen zu niedrigeren Energien hin verschoben.

Bei thermonuklearen Sprengkörpern stellt die Kernfusion die bedeutendste Neutronenquelle dar. Je Kilotonne Kernfusionsenergie (kT) werden etwa $1,5 \cdot 10^{24}$ Neutronen freigesetzt, die eine Anfangsenergie von etwa 14 MeV besitzen. Wie bei den Spaltneutronen wird auch hier das Austrittsspektrum durch die Wechselwirkungsprozesse der Fusionsneutronen mit dem (verdampfenden) Waffenmaterial bestimmt.

5.5.4.2 Gammastrahlungskomponente der Initialstrahlung

Die Gammastrahlungskomponente der Initialstrahlung entsteht erstens als *prompte Gammastrahlung* unmittelbar beim Prozess der Kernspaltung, zweitens als Gammastrahlung, die bei

radioaktiven Umwandlungen der entstandenen Spaltprodukte frei wird und schließlich als Gammastrahlung, die als Folge der Wechselwirkungsprozesse der Neutronen mit dem Material des Waffenmantels und der Umgebung (Luft, Boden, Abschirmungen) erzeugt wird. Das Gammastrahlungsfeld wird charakterisiert durch die in der jeweiligen Entfernung vom Explosionszentrum vorhandene Anzahl von Photonen, ihr Energiespektrum sowie ihre Winkelverteilung.

Der Anteil der Gammastrahlungsdosis, den die Kernspaltung als *prompte Gammastrahlung* liefert, ist selbst bei reinen Kernspaltungswaffen nur gering. Diese prompte Gammastrahlung wird während eines Zeitraums emittiert, zu dem sich die Kernwaffe noch nicht zerlegt hat und somit eine starke Schwächung durch den Mantel wirksam ist. Daher ist auch das Energiespektrum der aus dem Explosionszentrum austretenden prompten Gammastrahlung nicht mit dem ursprünglichen Spaltspektrum identisch. Die Dauer der prompten Gammastrahlung liegt in der Größenordnung von Bruchteilen einer Mikrosekunde (Glasstone und Dolan 1977).

Die Spaltprodukte als *Gammastrahlungsquelle* befinden sich im Feuerball bzw. in der Explosionswolke und steigen mit dieser empor. Das Gammastrahlungsspektrum wird durch die Zusammensetzung des Spaltproduktgemisches bestimmt, das sich mit der Zeit ändert. Der Anteil der Gammastrahlung aus den Spaltprodukten wird im letzten Stadium der Explosion wirksam, also zu einem Zeitpunkt, zu dem die ursprüngliche Kernwaffe bereits verdampft ist. Daher ist das Energiespektrum der von der radioaktiven Wolke ausgehenden Gammastrahlung faktisch dem Ausgangsspektrum der Spaltprodukte identisch. Dabei werden im Zeitraum der ersten 20 Sekunden nach der Explosion etwa 50 % der gesamten Gammastrahlung der Spaltprodukte wirksam. Für das Zeitintervall der Initialstrahlung kann das Energiespektrum der durch die Spaltprodukte verursachten Gammastrahlung mit einer mittleren Energie von etwa 2 MeV als quasi konstant angenommen werden (Hoffmann 1987).

Neben den Spaltprodukten liefern die *Wechselwirkungsprozesse der Spalt- und Fusionsneutronen* mit den Atomkernen der umgebenden Atmosphäre den zweiten wesentlichen Beitrag zur Gammastrahlung der Initialstrahlung. Die Zeitspanne dieser Gammastrahlung ist von der Wirkungszeit der prompten Neutronen abhängig. Insbesondere beim Neutroneneinfang wird hochenergetische Gammastrahlung frei, deren Energie umso größer ist, je schwerer die Atomkerne sind. Für thermische Neutronen spielt in Luft der Neutroneneinfang durch Stickstoffkerne die wichtigste Rolle, bei der Gammastrahlung mit einer mittleren Energie von etwa 4 MeV emittiert wird. Das Energiespektrum der neutroneninduzierten bzw. sekundären Gammastrahlung ist somit wesentlich härter als das der Spaltprodukte.

5.5.5 Einfluss der Explosionsart

Ob eine bestimmte initiale Kernwaffenwirkung bei bestimmten Entfernungen zum Ground Zero eine akute Gefährdung für Mensch, Material und Infrastruktur darstellt, hängt neben der Explosionsstärke auch von der Explosionsart ab. Bei einer Kernwaffenexplosion außerhalb der Erdatmosphäre gibt es auf der Erdoberfläche keine direkten Wirkungen¹⁷ (Druckwelle, thermische und ionisierende Strahlung). Je nach Explosionshöhe bzw. umgebendem Medium spricht man von den folgenden unterschiedlichen Explosionsarten: unterirdische Explosion, Bodenexplosion (auf oder nahe der Erdbodenoberfläche), Luftexplosion und exo-atmosphärische Explosion. Bei der Luftexplosion unterscheidet man noch die hohe Luftexplosion und die bodennahe Luftexplosion. Für das Medium Wasser gibt es die Wasserexplosion (auf oder nahe der Wasseroberfläche) und die Unterwasserexplosion.

¹⁷ Bei einer exo-atmosphärischen Nuklearwaffenexplosion entsteht allerdings ein nuklearer elektromagnetischer Impuls (NEMP), der große Gebiete auf der Erdoberfläche erreichen kann.

Im Folgenden werden nur die bodennahe Luftexplosion und die Luftexplosion betrachtet. Die militärisch bedeutendste dabei entstehende Kernwaffenwirkung ist die Druckwelle und die damit verbundene Zerstörung. Aufgrund der oben beschriebenen Ausbildung einer Mach-Front oberhalb des Erdbodens existiert für jede Explosionsstärke eine bestimmte Explosionshöhe, um für einen bestimmten Spitzenüberdruck eine maximale Wirkreichweite zu erzielen. Abb. 5-3 zeigt für feste Werte des Spitzenüberdrucks (in Bodennähe) die Abhängigkeit der Wirkreichweite von der Explosionshöhe einer Kernwaffenexplosion mit der Explosionsstärke von 1 kT. Für einen Spitzenüberdruck von 7 kPa beträgt die bestimmte Explosionshöhe etwa 500 m mit einer Wirkreichweite von etwa 2 100 m. Bei einer Explosionshöhe von 200 m verringert sich die Wirkreichweite für einen Spitzenüberdruck von 7 kPa dagegen auf etwa 1 700 m.

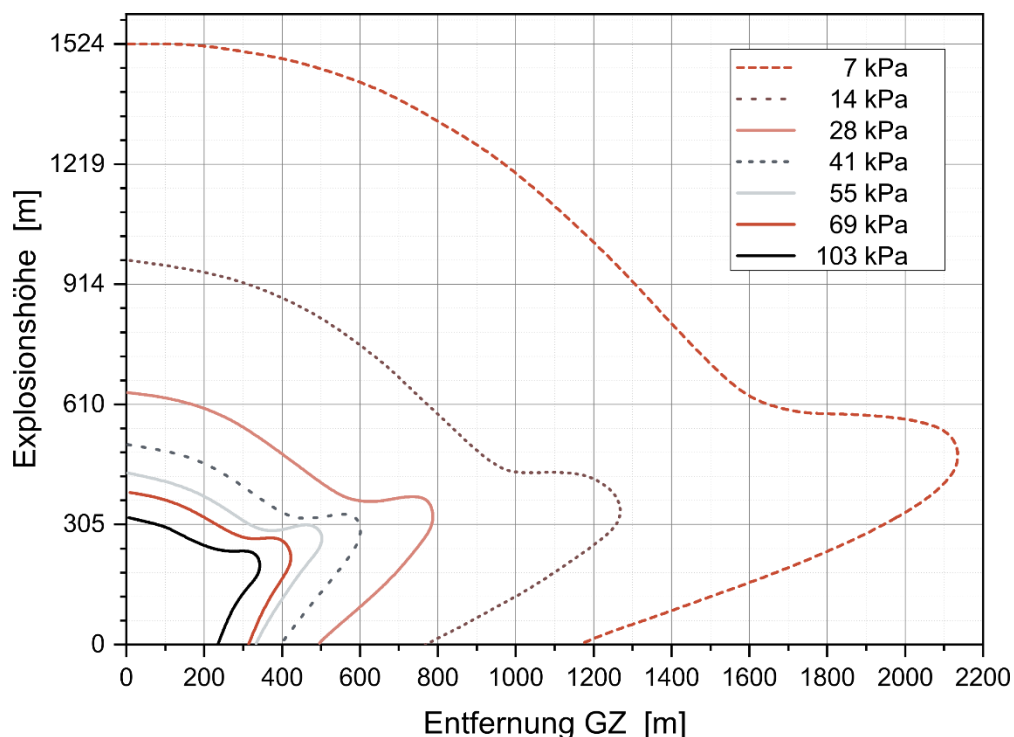


Abb. 5-3: Abhängigkeit der Wirkreichweite ausgewählter Spitzenüberdrücke von der Explosionshöhe für eine Explosionsstärke (Yield) von 1 kT (Quelle: Rambousky, Daten nach (Glasstone und Dolan 1977))

Die Explosionshöhe ist auch dafür verantwortlich, ob bei einer Nuklearexplosion eine große Menge lokalen Fallouts entsteht, oder nur Fallout in geringen Mengen mit überwiegend kleinen Partikelgrößen, der in höheren Luftschichten stark verdünnt und verteilt wird. Ist die Explosionshöhe so niedrig, dass der Feuerball den Erdboden erreicht, wird eine signifikante Menge an Staub- und Erdmaterial mit der Explosionswolke nach oben gerissen. Dabei verbinden sich die verdampften Spaltprodukte mit den Erd- und Staubpartikeln und werden in der Folge als Fallout freigesetzt. In diesem Fall entsteht eine relativ große Menge an lokalem Fallout, der sich aufgrund der überwiegend großen Partikelgrößen der Fallout-Teilchen lokal absetzt und in der Regel zu einer relevanten Strahlenexposition im Fallout-Gebiet führt. Signifikanter lokaler Fallout kann je nach Explosionsstärke, Einsatz- und Wetterbedingungen bis zu einer Entfernung von wenigen hundert Kilometern vom Explosionsort auftreten.

5.6 Gefährdungsabschätzung für initiale Kernwaffenwirkungen

5.6.1 Ionisierende Strahlung, thermische Strahlung und Druckwelle

Die initialen Wirkungen einer Kernwaffe hängen, wie bereits beschrieben, von einer Reihe von technischen Gegebenheiten und Einsatzbedingungen ab. Im Folgenden werden Bandbreiten für Gefährdungen angegeben, die auf einer gewissen antizipierten Variation der technischen Gegebenheiten und Einsatzbedingungen beruhen. Es werden Explosionsstärken von 0,01 kT (10 Tonnen TNT) bis 1 000 kT (eine Megatonne TNT) betrachtet. Weiterhin wird als konservative Betrachtung angenommen, dass bei Explosionsstärken kleiner 10 kT nur Kernspaltung stattfindet, ab 10 kT dagegen eine thermonukleare Reaktion vorliegt, also eine Kombination aus Kernspaltung und Kernfusion.

Beim Aufenthalt im Nahbereich der initialen Kernwaffenwirkungen eines Kernwaffeneinsatzes ist es am wichtigsten, die Explosion an sich zu überleben. Daher wird hier der Grenzbereich einer akuten Gefährdung von Leib und Leben betrachtet; mögliche gesundheitliche Spätschäden werden hier nicht berücksichtigt (Pennington et al. 2022). Betrachtet werden Personen, die sich in einem urbanen Umfeld im Freien aufhalten. Für die drei initialen Kernwaffenwirkungen (Druckwelle, Hitzeblitz und Initialstrahlung) wurden für die folgenden Betrachtungen die nachstehenden Gefährdungsparameter festgelegt.

- Für den Spitzenüberdruck wird ein Wert von 35 kPa verwendet. Bei diesem Spitzenüberdruck werden urbane Gebiete stark beschädigt, teils zerstört. Leichte Gebäude stürzen ein, und lebensbedrohliche Verletzungen bei der Bevölkerung sind weit verbreitet. Die überwiegende Gefährdung für Menschen in urbanen Gebieten ergibt sich durch umherfliegende Gegenstände und einstürzende Infrastruktur. Ein Spitzenüberdruck von 35 kPa an sich ist für einen Menschen noch nicht lebensbedrohlich.
- Als thermische Gefährdung wird angenommen, dass 50 % der Personen, die sich im Freien aufhalten, an Teilen der Hautoberfläche Verbrennungen 3. Grades erhalten. Die Angabe eines festen Wertes für die Strahlungsfluenz (J cm^{-2}) ist hier nicht möglich, da diese aufgrund der unterschiedlichen Dauer des thermischen Strahlungsimpulses von der Explosionsstärke abhängt. Es wird von guten Wetterbedingungen und klarer Sicht ausgegangen.
- Als Strahlungsdosis für die Initialstrahlung (Zeitraum bis eine Minute nach der Explosion) wird 1 Gy gewählt¹⁸. Bei einer Dosis von 1 Gy zeigen sich die ersten Anzeichen der Strahlenkrankheit, die akuten Symptome sind allerdings meist reversibel.

¹⁸ Als Dosisgröße wird hier die Energiedosis für Weichteilgewebe (soft tissue, free in air) verwendet.

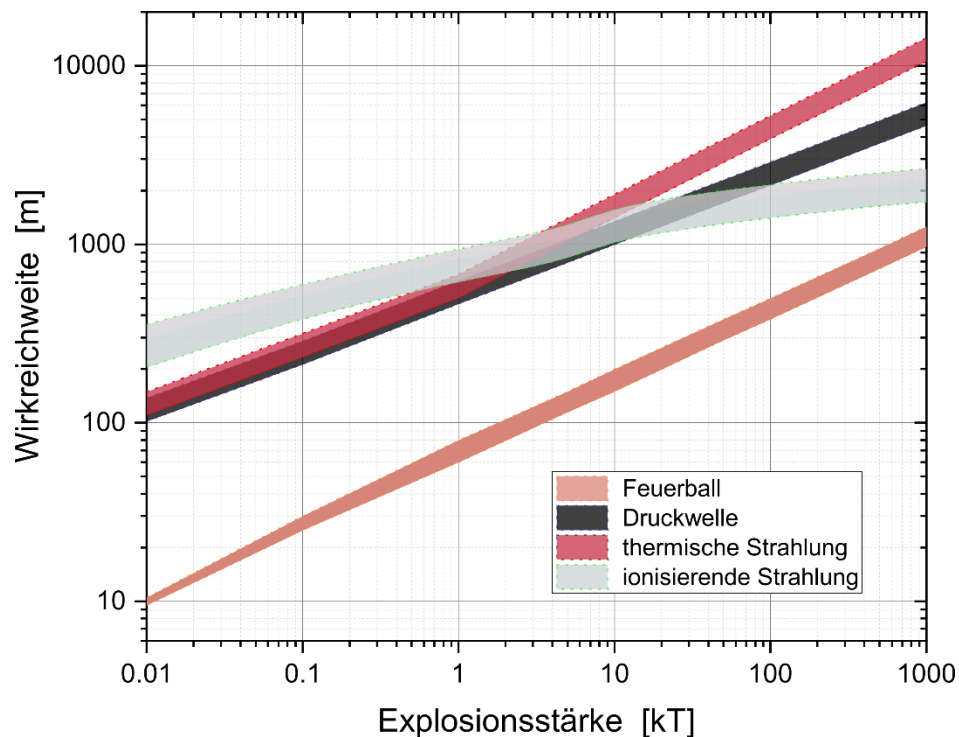


Abb. 5-4: Bandbreiten der Wirkreichweite einer akuten Gefährdung von Personen, die sich im Freien aufhalten, durch die initialen Kernwaffenwirkungen in Abhängigkeit der Explosionsstärke (Quelle: Rambousky, Daten nach (Dolan 1972), (Wellerstein 2024))

Aus Abb. 5-4 erkennt man, dass für Explosionsstärken kleiner etwa 2 kT die Wirkreichweite für Initialstrahlung (Auftreten einer Strahlungsdosis von 1 Gy) dominiert. Für Explosionsstärken größer etwa 2 kT dominiert bei Aufenthalt im Freien die Wirkreichweite der thermischen Strahlung (50 % der Betroffenen erhalten auf Teilen der Hautoberfläche Verbrennungen 3. Grades).

Für Personen, die sich bei einer Nuklearexplosion hinter einer geeigneten Deckung, einer Schutzwand oder in einer Umbauung aufhalten, spielt die thermische Strahlung in der Regel keine Rolle. In diesem Fall wäre die Wirkreichweite der Initialstrahlung bis zu einer Explosionsstärke von etwa 20 kT dominierend. Danach bestimmt die Wirkreichweite für einen Spitzenüberdruck von 35 kPa die akute Gefährdung.

Für Personen, die sich in einer einigermaßen stabilen Umbauung aufhalten (z. B. massives Wohnhaus, Industriegebäude) liegen die Wirkreichweiten für eine akute Gefährdung, verursacht durch die Druckwelle oder die thermische Strahlung, bei deutlich kleineren Werten. Da die Initialstrahlung im Wesentlichen aus Neutronen und Gammastrahlung besteht, und besonders Neutronen ein hohes Durchdringungsvermögen für die meisten Materialien besitzen, ist die abschirmende Wirkung der vorhandenen Umbauung in der Regel nicht bedeutend. In derartigen Fällen wird für den gesamten betrachteten kT-Bereich die Initialstrahlung (Dosis von 1 Gy) zur dominierenden Wirkreichweite.

Wie bereits erwähnt, ergeben sich die tatsächlichen Wirkreichweiten aus den Einsatzparametern der Kernwaffe und den Umgebungsbedingungen. Diesen Aspekt versucht die Bandbreitendarstellung zu berücksichtigen. Die Vorhersage der tatsächlichen Schadenswirkung auf Menschen bei einer bestimmten physikalischen Kernwaffenwirkung ist je nach Verhalten der Personen (z. B. sich auf den Boden legen) oder der Nutzung von unmittelbar vorhandenen Schutzmöglichkeiten (z. B. Deckungen) mit noch größerer Unsicherheit behaftet. Die physikalischen Wirkreichweiten zwischen der in Abb. 5-4 dargestellten „akuten Gefährdung“ und

einer hohen Wahrscheinlichkeit für einen tatsächlich tödlichen Ausgang, unterscheiden sich nur mäßig. In Abb. 5-5 wird dies anhand der Initialstrahlungsdosis dargestellt. Die Bandbreiten sind für die Strahlungsdosen von 1 Gy (Einsetzen der Strahlenkrankheit), 4,5 Gy (etwa 50 % der bestrahlten Personen sterben ohne intensive medizinische Behandlung) und 10 Gy (ein Überleben ist nahezu ausgeschlossen) dargestellt. Die gestrichelten Linien zeigen den Verlauf für einen ausgewählten Satz an Parameterwerten, so dass die Unterschiede für die betrachteten Strahlungsdosen besser verglichen werden können.

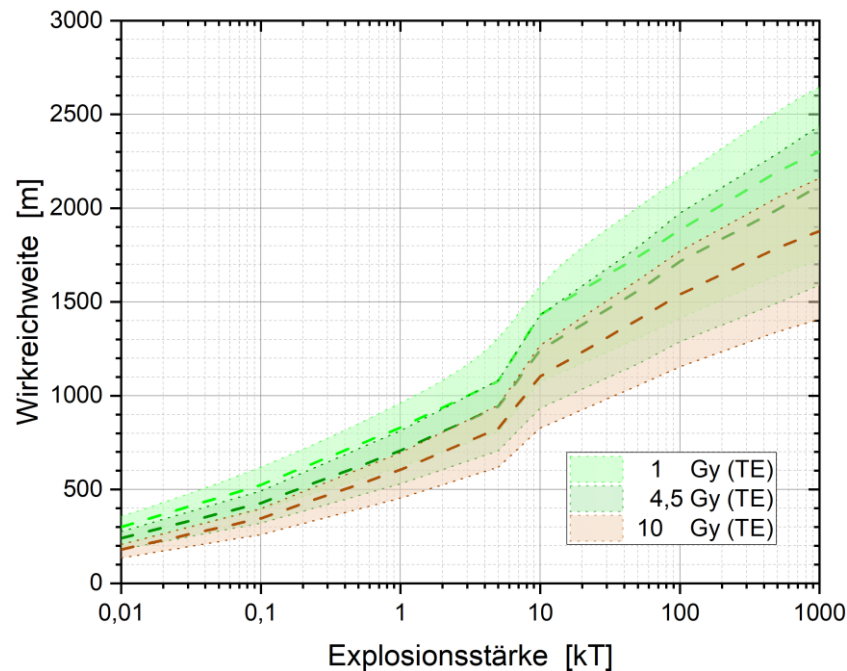


Abb. 5-5: Bandbreiten der Wirkreichweite für die Initialstrahlungsdosen 1 Gy, 4,5 Gy und 10 Gy in Abhängigkeit von der Explosionsstärke einer Kernwaffe (Quelle: Rambousky, Daten nach (Dolan 1972))

Für eine 1 kT Kernwaffe verringern sich die Wirkreichweiten zwischen 1 Gy und 4,5 Gy und zwischen 4,5 Gy und 10 Gy um jeweils etwa 15 %. Bei einer Kernwaffe mit 100 kT Explosionsstärke fallen die prozentualen Werte mit jeweils etwa 10 % geringer aus.

Zusammenfassend kann man aus den vorgehenden Abschätzungen der Wirkreichweiten für potenziell tödliche Folgen schließen, dass sie für die drei initialen Effekte der Kernwaffenexplosion (thermische Effekte, Druck und Strahlenexposition) vergleichbar groß sind. Wichtig ist zu betonen, dass selbst bei einer Explosionsstärke von 1 MT die maximalen Wirkreichweiten im Bereich von ca. 10 km sind.

5.6.2 Aktivierung des Erdbodens im Nahbereich einer Kernwaffenexplosion

Neutronenstrahlung kann nicht-radioaktive Materie durch den Einfang von Neutronen in die Atomkerne aktivieren. Diese Atomkerne sind dann radioaktiv und senden ihrerseits wieder ionisierende Strahlung aus. Dies ist besonders relevant, wenn bei Nuklearexplosionen Neutronen in den Erdboden eindringen. Einen besonders hohen Wirkungsquerschnitt für derartige Neutronen-Einfang-Reaktionen haben dabei die Elemente Natrium, Mangan und Aluminium. Praktische Relevanz hat hier vor allem die davon ausgehende Gammastrahlung. Die Aktivierung des Erdbodens hängt stark von der Bodenzusammensetzung ab. Verglichen mit der Dosisleistung durch lokalen Fallout ist die Dosisleistung durch Bodenaktivierung jedoch geringer. Daher wird die Gefährdung durch Strahlung aus Bodenaktivierung nur für Explosionshöhen bedeutsam, die groß genug sind, dass kaum lokaler Fallout auftritt, und die zugleich niedrig genug sind, dass noch eine ausreichende Neutronenfluenz den Boden erreichen und den

Boden aktivieren kann. Eine Kernwaffe mit einer Explosionsstärke von 10 kT erzeugt einen Feuerball mit einem Radius von etwa 200 m. Eine Explosionshöhe von etwa 400 m ist so groß, dass kein nennenswerter lokaler Fallout erzeugt wird, so dass im Nahbereich des Ground Zeros die Bodenaktivierung nach der Explosion die dominierende Gefährdung darstellt. Eine Stunde nach der Explosion herrscht am Ground Zero, also direkt unterhalb des Explosionsortes, eine Gammadosisleistung von etwa 100 mGy h^{-1} , und in einer Entfernung vom Ground Zero von 1 000 m etwa 2 mGy h^{-1} (Dolan 1972). Aufgrund der Vielfältigkeit des Kernwaffendesigns und der vorliegenden Bodenzusammensetzung kann die tatsächliche Dosisleistung um den Faktor zwei bis drei von den oben angegebenen Werten abweichen. Nach zwei Tagen sind diese Dosisleistungen etwa um einen Faktor sieben auf die Werte von 14 mGy h^{-1} bzw. $0,14 \text{ mGy h}^{-1} = 140 \text{ } \mu\text{Gy h}^{-1}$ gefallen. Bei einer niedrigeren Explosionshöhe von beispielsweise 100 m entsteht relevanter lokaler Fallout. Die Gammadosisleistung des lokalen Fallouts (Spaltprodukte) in einer Entfernung von 1 000 m zum Ground Zero in Windzugrichtung beträgt eine Stunde nach der Explosion etwa $10\,000 \text{ mGy h}^{-1}$ (Wellerstein 2024) und ist damit um den Faktor 100 höher als die Gammadosisleistung für die maximale Bodenaktivierung bei der Explosionshöhe von 400 m.

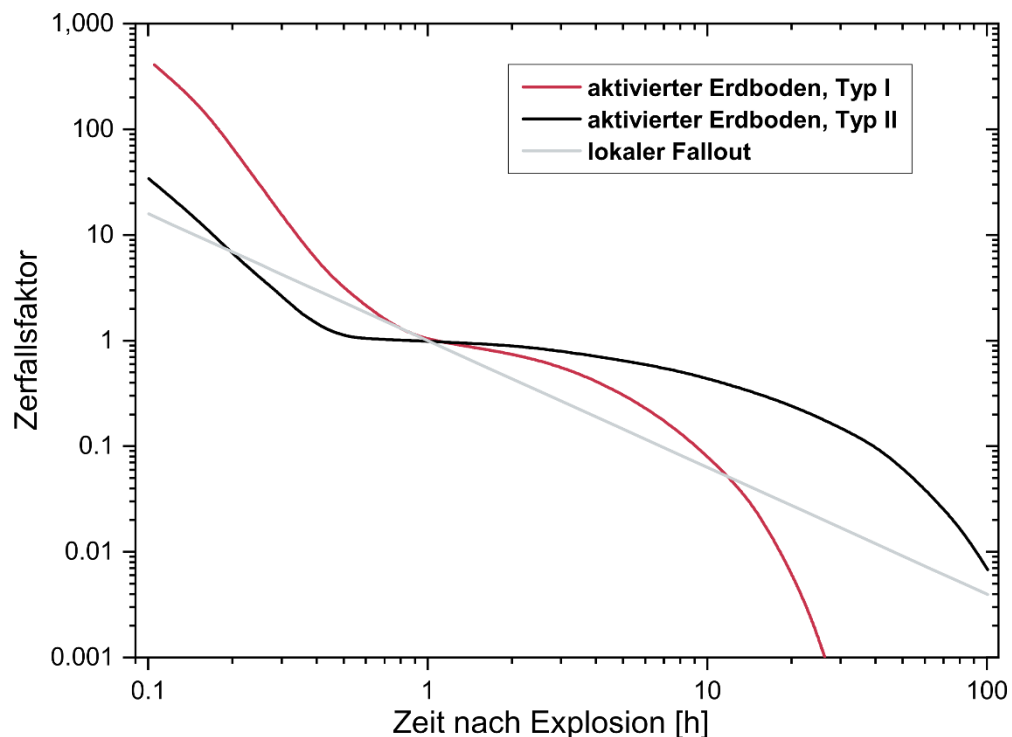


Abb. 5-6: Darstellung des Zerfall-Verhaltens von durch Neutronenstrahlung aktiviertem Erdboden (für zwei verschiedene Bodenzusammensetzungen) und dem angenäherten $t^{1,2}$ Zerfall von lokalem Fallout (Quelle: Rambousky, Daten nach (Dolan 1972))

Abb. 5-6 zeigt den Zerfall von durch Neutronenstrahlung einer Nuklearexplosion aktiviertem Erdboden, normiert auf den Zeitpunkt von einer Stunde nach der Explosion. Der Zerfallsfaktor für eine Stunde beträgt daher Eins. Die Daten (Dolan 1972) beziehen sich auf zwei Erdbodenzusammensetzungen. Typ I beschreibt typischen sandigen Boden in der afrikanischen Wüste und Typ II typischen Erdboden im Nevada Testgelände.

Für die ersten Wochen nach einer Nuklearexplosion kann der Zerfall des lokalen Fallouts mit dem $t^{-1,2}$ Verlauf angenähert werden. Dabei bedeutet t die Zeit nach der Explosion in Stunden. Zum Vergleich ist der Verlauf der Zerfallsfaktoren von lokalem Fallout ebenfalls in die Abb. 5-6 eingetragen. Dieser ist wiederum auf den Zeitpunkt von einer Stunde nach der Explosion normiert. Man erkennt die erheblichen Unterschiede im zeitlichen Verlauf der Zerfallsfaktoren bei unterschiedlichen Materialzusammensetzungen.

6 Quellterm, Fallout und radiologische Konsequenzen

6.1 Quellterm: Menge und Zusammensetzung freigesetzter Radionuklide

Bei einer Kernwaffenexplosion werden durch die Prozesse der Kernspaltung oder -fusion eine Reihe Radionuklide in die Umgebung freigesetzt. Im Falle einer Kernwaffe machen die Spaltprodukte des eingesetzten Spaltmaterials mit Abstand den größten Anteil an der Gesamtaktivität aus. Für Kernwaffen eignen sich ^{235}U und ^{239}Pu , da sie neben ihrer großen Masse eine hohe Spaltwahrscheinlichkeit aufweisen. Weiterhin kann durch die bei der Kernspaltung und insbesondere bei der Kernfusion freigesetzten Neutronen umgebendes Material aktiviert werden, beispielsweise die Ummantelung der Waffe. Oftmals befindet sich in Kernwaffen auch ^{238}U , beispielsweise wird es Neutronenreflektor genutzt. Auch dieses kann durch schnelle Neutronen gespalten werden und trägt somit zur Erzeugung von Spaltprodukten bei. Bei bodennahen Explosionen ist durch Aktivierung des Bodens mit deutlich mehr Aktivierungsprodukten zu rechnen als bei hohen Luftexplosionen, bei denen der Feuerball mit den Spaltprodukten den Boden nicht erreicht und auch die Neutronenkomponente in Bodennähe deutlich schwächer ist. Der Anteil der Aktivierungsprodukte ist allerdings im Vergleich zur Gesamtmenge der entstehenden Radionuklide gering (Dolan 1972). Je nach Effizienz der Kernwaffe wird ein gewisser Anteil des Spaltmaterials nicht gespalten und ist daher ebenso Bestandteil des Nuklidvektors. Einen weiteren, wenn auch geringen Anteil an den entstandenen Radionukliden machen Transurane wie ^{239}Np , ^{240}Pu oder ^{241}Am aus, die durch den Einfang freigesetzter Neutronen durch das Spaltmaterial erzeugt werden.

Die Menge und die Zusammensetzung der freigesetzten Radionuklide wird als Quellterm bezeichnet, der aus mehreren hundert Einzelradionukliden besteht. Der Quellterm bei Kernwaffenexplosionen hängt von vielen Faktoren ab, wobei die freigesetzte Gesamtaktivität primär linear mit der Explosionsstärke skaliert. Die Explosionsstärke ist damit ein entscheidender Faktor zur Abschätzung der radiologischen Konsequenzen einer Kernwaffenexplosion sowie der damit verbundenen Dosisleistungen und Strahlendosen. Weiterhin bestimmen das verwendete Spaltmaterial (^{235}U oder ^{239}Pu), die Explosionshöhe (bodennah oder -fern; auch als height of burst bzw. HOB bezeichnet), der Untergrund (Wasser oder Erdboden je nach Beschaffenheit) sowie die Art (Kernspaltung oder Fusion) und der Aufbau der Waffe (Design) den Quellterm.

Die bei einer Kernwaffenexplosion entstandenen Radionuklide, die auf dem Boden sedimentieren, werden als Fallout bezeichnet und können Kontaminationen in mehreren zehn bis hundert Kilometern Entfernung verursachen. Die Komplexität des Quellterms erschwert eine radiologische Bewertung des Fallouts. Für die Abschätzung des Quellterms werden in der Regel Softwaretools genutzt, beispielsweise der sogenannte Lawrence Livermore Weapons Activation Code (Spriggs und Egbert 2020, Kraus und Foster 2013). Dabei werden umfangreiche Daten zu Spaltausbeuten, Kernstruktur- und Zerfallseigenschaften genutzt, beispielsweise aus der ENDF-B- (Brown et al. 2018) oder der JENDL-Datenbank (Shibata et al. 2012), die ihrerseits auf experimentellen Ergebnissen basieren und mit theoretischen Modellen ergänzt wurden.

Umfangreiche Informationen zum Quellterm für eine uranbasierte Waffe mit einer Sprengkraft von 10 kT wurden vom Lawrence Livermore National Laboratory veröffentlicht (Kraus und Foster 2013). Dabei wurden diejenigen Radionuklide identifiziert, die in Entfernungen von mehr als zehn Kilometern vom Ground Zero den größten Dosisbeitrag liefern. Es wurde angenommen, dass alle Nuklide mit einer Halbwertszeit von weniger als 2,5 Minuten in ihre Tochternuklide umgewandelt wurden. Diese Annahme ist gerechtfertigt, weil die Entwicklung und die thermische Stabilisierung der anfänglichen Wolke etwa zehn Minuten dauern, und die Modellierungen des atmosphärischen Transports erst nach dieser Zeitspanne starten. Zu diesem Zeitpunkt sind diese Mutternuklide bereits größtenteils zerfallen und liefern selbst somit nur

einen geringen Dosisbeitrag. Es wurden 44 Radionuklide identifiziert, die zusammen bereits mehr als 92 % der effektiven Dosis aus dem gesamten Quellterm ausmachen, die in zehn Kilometer Entfernung windabwärts erhalten werden würde.

Grundsätzlich dominieren bei Kernwaffenexplosionen Radionuklide mit kurzen Halbwertszeiten, was zu einer schnellen Abnahme der Aktivität und damit der Dosisleistung führt. Zum Beispiel beträgt die Dosisleistung der Spaltprodukte etwa 7 Stunden nach der Explosion nur noch ein Zehntel des Wertes, der sich nach einer Stunde ergäbe. Nach etwa 2 Tagen beträgt sie nur noch ca. 1 %. Es wird angegeben, dass die Dosisleistung des Fallouts typischerweise proportional zu einer Potenzfunktion der Zeit mit einem Exponenten zwischen -1,2 und -1,35 abnimmt (Glasstone und Dolan 1977, Kraus und Foster 2013) (siehe auch Abb. 6-6).

In einer weiteren Studie wurden zehn Radionuklide im Fallout und deren relativer Anteil an der Gesamtaktivität nach 100 Tagen, 1 Jahr und 10 Jahren diskutiert (Buddemeier 2018). Dabei zeigte sich, dass 100 Tage nach einer nuklearen Explosion die Aktivität von den Nukliden ^{91}Y , ^{95}Zr und ^{103}Ru dominiert wird. Nach 1 Jahr dominieren die Nuklide ^{106}Ru sowie ^{144}Ce die verbliebene Aktivität. In der späten Phase, 10 Jahre nach Explosion, machen ^{90}Sr und ^{137}Cs und deren Tochternuklide zusammen etwa 82 % der verbliebenen Aktivität aus. Eine ausführliche Angabe über die Zeiträume, in denen verschiedene Radionuklide und deren Tochternuklide dosisrelevant sind, können unter anderem (Kraus und Foster 2013) und (Izrael 2002) entnommen werden.

6.2 Unterschiede zwischen Explosionsarten

6.2.1 Einfluss des Spaltmaterials

Die Art der Explosion hat einen direkten Einfluss auf den Quellterm. Bei den bisherigen Betrachtungen, insbesondere in (Kraus und Foster 2013) und (Spriggs und Egbert 2020) wurde von einer uranbasierten Explosion ausgegangen. Plutoniumbasierte Explosionen zeigen, insbesondere für das leichtere Spaltfragment, entsprechend eine Tendenz zu Nukliden mit größeren Massenzahlen.

Für die in (Buddemeier 2018) und (Kraus und Foster 2013) angegebenen Radionuklide ergeben sich im Mittel allerdings nur geringe Abweichungen bezüglich der Spaltausbeute, so dass im Sinne der Bewertung der radiologischen Auswirkungen einer ^{239}Pu -basierten Spaltwaffe in guter Näherung eine uranbasierte herangezogen werden kann. Der Unterschied in der Ortsdosisleistung aus Bodenstrahlung beträgt in den Zeiträumen im ersten Jahr nach der Explosion in etwa 10 %. Ein Vergleich der normierten Ortsdosisleistung der Bodenstrahlung aus dem Fallout einer ^{239}Pu -Kernwaffe (rot) im Vergleich zu einer ^{235}U -Kernwaffe (schwarz) ist Abb. 6-5 gezeigt, berechnet aus nuklidspezifischen Spaltquerschnitten und Dosisleistungsfaktoren (Brown et al. 2018, ICRP 2020b).

6.2.2 Einfluss des Fusionsanteils von thermonuklearen Waffen

Eine thermonukleare Waffe, nutzt sowohl die Kernfusion als auch die Kernspaltung zur Energiefreisetzung. Für die Kernfusion sind höhere Temperaturen und eine größere Dichte erforderlich, als sie mit chemischen Sprengstoffen erreicht werden können, weshalb als primärer „Zünder“ ein Kernspaltungssprengsatz zum Einsatz kommt.

Als Fusionsmaterialien werden in der Regel Deuterium und Tritium verwendet, die unter Ausstrahlung eines Neutrons zu einem Heliumkern fusionieren. Die Kernfusion erzeugt im Vergleich zur Kernspaltung viel weniger und kurzlebige Radionuklide. Insgesamt verbleiben nach der Explosion einer thermonuklearen Waffe Helium, nicht reagiertes Deuterium und Neutronen. Tritium wird fast vollständig umgesetzt.

In einer typischen Konfiguration einer thermonuklearen Waffe tragen Kernspaltung und Kernfusion jeweils etwa zur Hälfte zum Gesamtenergieertrag bei. Radiologisch relevant sind jedoch nur die freigesetzten Radionuklide aus dem Spaltungsprozess der thermonuklearen Waffe. Daher wird ungefähr die Hälfte an Aktivität des Quellterms einer reinen Kernspaltungswaffe gleicher Explosionsstärke erwartet.

Bei gleicher Explosionsstärke werden bei einer thermonuklearen Waffe mehr und höherenergetischere Neutronen erzeugt als bei der Spaltung. Hierdurch ist mit mehr Aktivierungsprodukten zu rechnen.

6.3 Aktivitäts-Partikelgrößenverteilung

Relevant für die atmosphärische Ausbreitung sowie für die Bewertung der radiologischen Auswirkungen eines Fallouts sind neben dem Nuklidvektor der Wolke auch die Verteilung der Radioaktivität auf Partikel verschiedener Größe (die Aktivitäts-Partikelgrößenverteilung, nachfolgend vereinfachend als Partikelgrößenverteilung bezeichnet), sowie die räumliche Ausdehnung der Wolke und die lokale Verteilung der radioaktiven Partikel in der Wolke selbst. Durch die bei der Explosion entstehende Hitze werden die erzeugten Radionuklide in hohe atmosphärische Schichten verfrachtet und in der Folge großräumig verteilt. Ein Teil der entstandenen Partikel sedimentiert, wobei die Absinkgeschwindigkeit nicht linear mit der Partikelgröße korreliert. Die Partikelgröße ist abhängig von der Explosionshöhe, der Beschaffenheit des Bodens sowie den physikalisch-chemischen Eigenschaften während der anfänglichen Kondensation des verdampften Materials nach der Explosion. Bei einer bodennahen Explosion werden deutlich größere Partikel erwartet als bei einer hohen Luftexplosion.

Für die nachfolgend beschriebenen Ausbreitungsrechnungen wird die Wolke in Anlehnung an das Vorgehen in (Rolph et al. 2014) in sechs Schichten eingeteilt, in denen die Radioaktivität wie in Abb. 6-1 gezeigt verteilt ist. Dabei sind die Höhe des Stamms und der Kappe sowie der Durchmesser des Stamms wie in (Rolph et al. 2014) bzw. (NATO 2020) beschrieben bzgl. der Explosionsstärke parametrisiert.

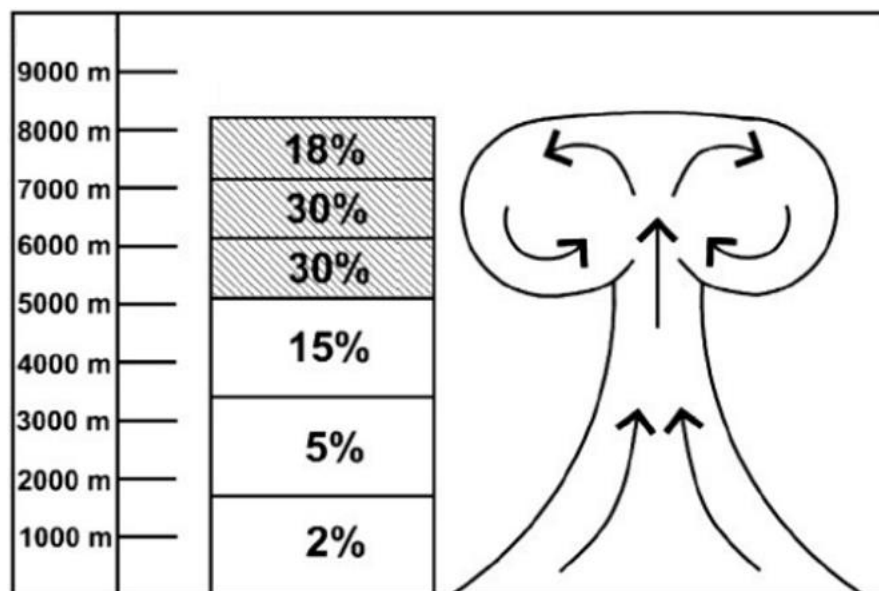


Abb. 6-1: Modelldarstellung der Wolke mit Aktivitätsanteilen für eine bodennahe Explosion von 10 kT (Rolph et al. 2014)

Partikelgrößenverteilungen innerhalb dieser sechs Schichten wurden in (Glasstone und Dolan 1977) für eine bodennahe Explosion abgeschätzt und die Partikel dabei in dem Bereich (20 μm – 500 μm) in 13 Größenkategorien unterteilt. Mit einem Anteil von etwa 80 % liegt der Großteil

der Gesamtaktivität für bodennahe Explosionen in den oberen drei Schichten, der sogenannten Kappe der Pilzwolke.

Aus den Informationen zur Radionuklidzusammensetzung, Partikelgrößenverteilung und Wolkengeometrie lässt sich eine Quellgeometrie definieren, mit der weitere Ausbreitungsrechnungen und Dosisberechnungen durchgeführt wurden, wie in Abschnitt 6.4 weiter erläutert wird.

Die Partikelgrößenverteilung beeinflusst wesentlich die atmosphärische Verbreitung des Fallouts, und es bestehen komplexe Zusammenhänge zwischen prognostizierten Falloutgebieten, den Unsicherheiten der Aktivitäts-Partikelgrößen-Höhen-Verteilung und den Unsicherheiten meteorologischer Daten. Als Beispiel sei hier der Einfluss einer möglichen Windscherung mit der Höhe über Grund und den Unsicherheiten in der Höhenverteilung genannt. Die tatsächlich auftretende Partikelgrößenverteilung hängt entscheidend von der Explosionshöhe ab, siehe unter anderem (Spriggs et al. 2020). Bei Explosionen, in denen der Feuerball den Boden nicht berührt, herrscht in erster Näherung über die gesamte produzierte Radioaktivität die gleiche Partikelgrößenverteilung mit einem Fokus auf sehr kleinen, besonders sphärischen Partikeln im Bereich weniger μm Durchmesser, die durch die Kondensation ursprünglich flüssiger oder gasförmiger Spalt- und Aktivierungsprodukte entstehen. Diese sedimentieren nur sehr langsam, weshalb die Radioaktivität des Fallouts in solchen Fällen zum einen lange abklingt, bevor er den Boden erreicht aber zum anderen auch einem stärkeren Verdünnungseffekt unterliegt. In solchen Fällen spielt die lokale Exposition durch Fallout deshalb eine vergleichsweise geringe Rolle.

Ereignet sich die Explosion hingegen nahe der Erdoberfläche, werden – je nach Sprengkraft der Waffe – tausende Tonnen Boden bzw. Trümmer aufgewirbelt und in die entstehende Wolke eingesogen. Dieses Material vermischt sich mit den radioaktiven Spalt- und Aktivierungsprodukten in der Wolke. Dies hat zur Folge, dass ein erheblicher Anteil der Radioaktivität an relativ großen Partikeln anhaftet mit einem Durchmesser von im Mittel $50\ \mu\text{m}$ - $150\ \mu\text{m}$. Solche Partikel sedimentieren schnell. Dies führt dazu, dass lokal, d. h. in bis zu einigen hundert Kilometern Entfernung vom Ground Zero, ein erheblicher Anteil der freigesetzten Radioaktivität den Boden erreicht. Hinzu kommt, dass Niederschlagsereignisse, die oft örtlich lokal auftreten und in ihrer Intensität stark variieren können, zum Auswaschen größerer Mengen der luftgetragenen Radioaktivität führen. Damit kommt es zu sogenannten „Hot-Spots“, in denen lokal deutlich erhöhte Dosisleistungen beobachtet werden können. Solche Niederschlagsereignisse können auch bei Detonationen, in denen der Feuerball den Boden nicht berührt, zu radiologisch relevanten Depositionen führen. Unter gewissen meteorologischen Bedingungen kann dies auch in erheblicher Entfernung zum Explosionsort noch der Fall sein, so wurden beispielsweise im Rahmen des oberirdischen Kernwaffentests „Simon“ (43 kT, ca. 90 m über Grund) bei der Operation „Upshot Knothole“ im mehr als 3500 km entfernten US-Bundesstaat New York noch lokale Dosisleistungen über $10\ \mu\text{Sv h}^{-1}$ 36 h nach der Explosion gemessen, die durch starken Regenfall und damit verbundener nasser Deposition bewirkt worden sind.

In der Realität lassen sich oft auch Mischformen der zwei genannten Grenzfälle, eine Detonation am Erdboden und eine Detonation ohne Bodenkontakt des Feuerballs, beobachten, wie näher in (Spriggs et al. 2020) ausgeführt ist. Die verschiedenen Regime von möglichen Wolken- bzw. Partikelgrößenkonstellationen sind beispielhaft in Abb. 6-2 gezeigt. Diese treten dann auf, wenn der Feuerball zwar Bodenkontakt hat, aber die Explosion trotzdem in einigen 100 m Höhe – abhängig von der Explosionsstärke – über Grund stattfindet. In diesen Fällen kann eine Art Spalt – ein sogenannter „air-gap“ – zwischen Stamm und Kappe auftreten (Spalte b in Abb. 6-2). Es kommt dann zwar zum Einsaugen von Staub, Boden bzw. Trümmern in den Stamm, aber nicht zur Durchmischung dieses Materials mit den radioaktiven Spaltprodukten aus der Kernwaffe, die sich überwiegend in der Kappe befinden. Für dies Fälle ist nicht von lokal

auf tretendem, starkem Fallout auszugehen. Auch ohne einen „air-gap“ kann es zur Ausbildung unterschiedlicher Partikelgrößenverteilungen im Stamm und in der Kappe kommen, mit dem Unterschied, dass es in diesen Fällen zu lokal auftretenden Fallout der Spaltprodukte kommen kann (Spalten c und d in Abb. 6-2).

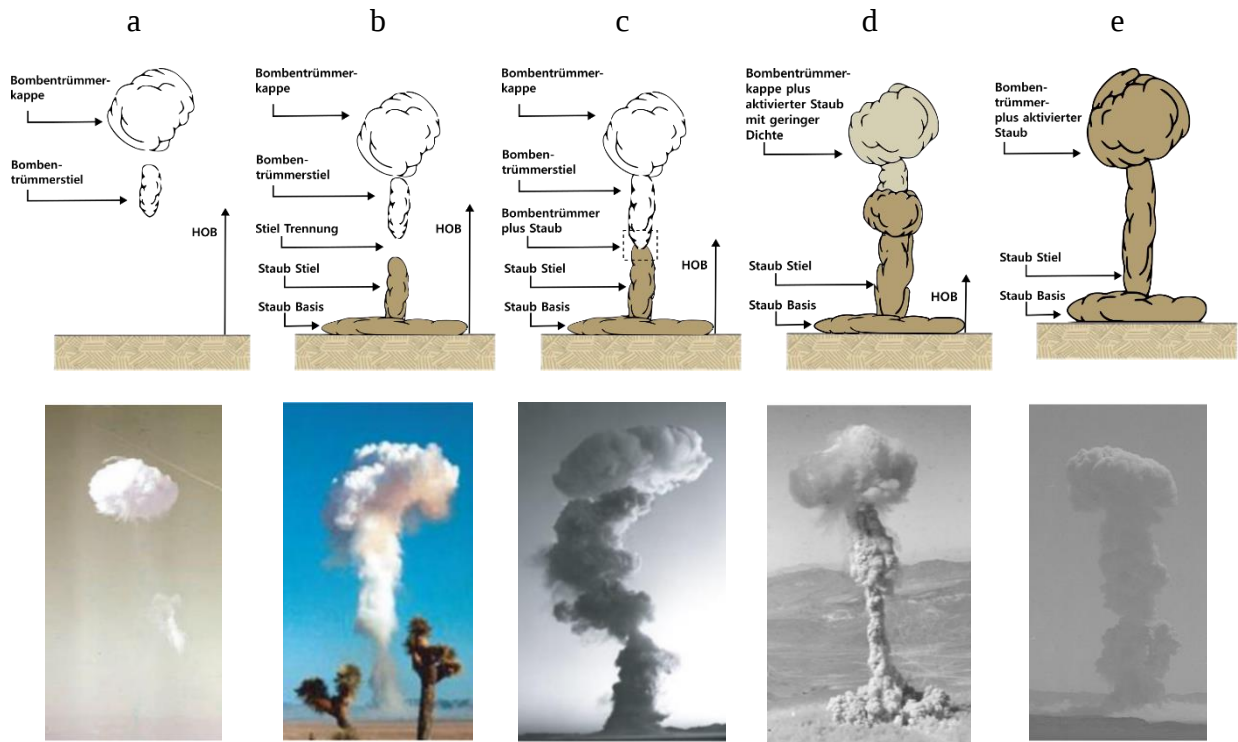


Abb. 6-2: Darstellung verschiedener Regime stabilisierter Pilzwolken in Abhängigkeit von der Explosionshöhe über Grund (HOB) oben, mit Beispielbildern aus den Kernwaffentests in Nevada für die jeweiligen Regime (unten). Von links nach rechts sinkt der HOB und die radiologische Bedeutung lokal auftretenden Fallouts steigt. Reproduziert aus (Spriggs et al. 2020). Die vorherrschenden Partikelgrößen werden durch die Farben beschrieben, wobei eine dunklere Färbung für größere durchschnittliche Partikelgrößen steht.

Darüber hinaus tritt in der Realität ein Effekt auf, der als Fraktionierung bekannt ist. Damit ist gemeint, dass die Partikelgrößenverteilung abhängig vom chemischen Element bzw. sogar vom jeweiligen Isotop ist. Zunächst liegen alle Spaltprodukte kurz nach der Explosion gasförmig vor. Während der Abkühlung des Feuerballs kondensieren die verschiedenen Elemente zu unterschiedlichen Zeiten, abhängig von ihren individuellen Schmelz- bzw. Siedetemperaturen, und auf jeweils zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Partikeln. Tendenziell ergibt sich dadurch, dass größere Partikel mehr refraktäre Elemente und kleinere Partikel überproportional volatile Elemente enthalten – ähnlich dem Zusammenhang zwischen Partikelvolumen bzw. -oberfläche und Partikeldurchmesser. Besonders klein sind die Partikel für Isotope, die aus dem Zerfall (kurzlebiger) Edelgase entstehen, wie z. B. beim Zerfall von ^{138}Xe in das dosisrelevante ^{138}Cs .

Verschiedene Veröffentlichungen beinhalten verschiedene Parametrisierungen bzgl. der Partikelgrößenverteilungen, die sowohl auf theoretischen Modellierungen als auch auf dem Vergleich mit Messdaten aus den oberirdischen Kernwaffentests beruhen. Für bodennahe Explosionen wird typischerweise eine log-normale Verteilung mit einem Median-Durchmesser von 80 μm bis 150 μm angenommen. Abb. 6-3 zeigt verschiedene solcher Aktivitäts-Partikelgrößenverteilungen aus den Veröffentlichungen von Glasstone und Dolan (1977), Izrael (2002) und Jodoin (1994) im Vergleich. Die gezeigte Partikelgrößenverteilung nach „Magee“ (Magee

1953, Freiling 1961) in dieser Grafik beschreibt abweichend eine solche, die bei einer Explosion ohne Bodenkontakt zu erwarten wäre, und nicht log-normal ist. Verschiedene Autoren erwähnen, dass in solchen Fällen praktisch keine Aktivität auf Partikeln größer als 20 μm bis 30 μm zu erwarten ist (Izrael 2002, Magee 1953, Magee 1953, Freiling 1961)

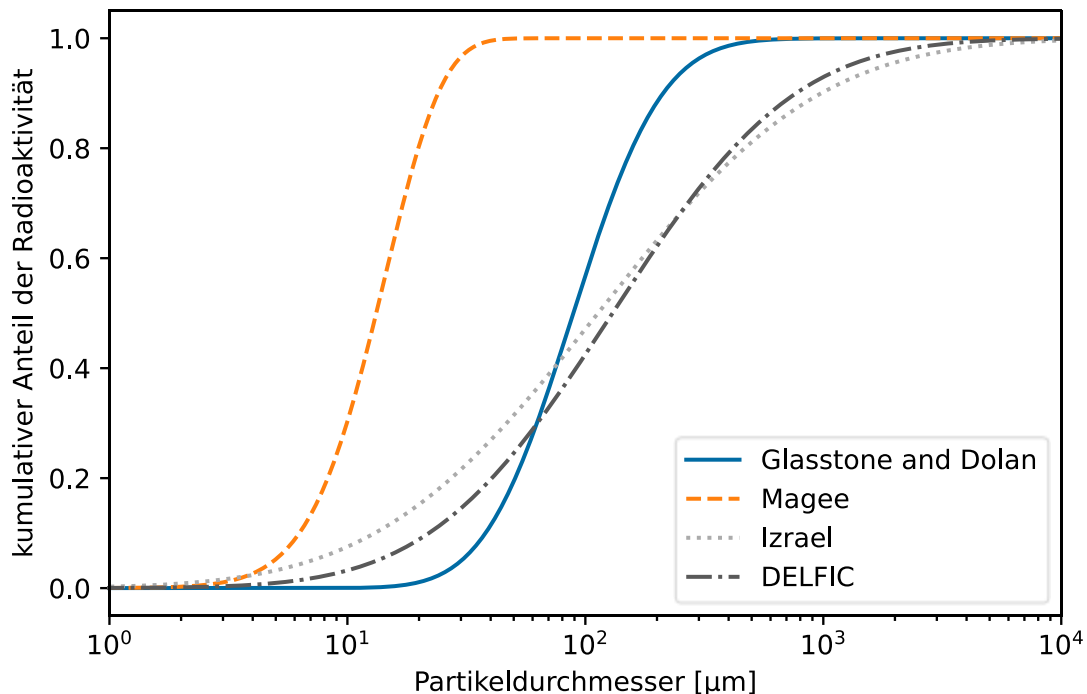


Abb. 6-3: Kumulative Aktivitäts-Partikelgrößenverteilungen aus der wissenschaftlichen Literatur. Die Verteilungen „Glasstone and Dolan“ (1977), „Izrael“ (2002) und „DELFIC“ (Jodoin 1994) beziehen sich auf bodennahe Explosionen und sind log-normal. Die Verteilung „Magee“ beschreibt eine Explosion in Luft mit freier Kondensation von Waffenmaterial (Magee 1953, Freiling 1961). Die Häufigkeitsverteilung in „Magee“ verhält sich exponentiell mit dem Partikelradius. Bei Annahme einer Einlagerung der Radioaktivität proportional zum Partikelvolumen ergibt sich die gezeigte kumulierte Aktivitäts-Partikelgrößenverteilung.

6.4 Ausbreitungsmodellierungen

Ausgehend von den vorherigen Darstellungen wurden Ausbreitungsrechnungen mit dem Lagrange-Partikelmodell „LASAT“ durchgeführt, das in das Entscheidungshilfesystem RODOS integriert ist. Diese Rechnungen wurden durch das Bundesamt für Strahlenschutz durchgeführt.

Dabei wurde die Explosion einer 10 kT starken Kernwaffe in Bodennähe angenommen. Wie zuvor erwähnt, resultiert eine bodennahe Detonation für eine gegebene Explosionsstärke in den stärksten radiologischen Auswirkungen durch den Fallout. Bezüglich der Detonationsstärke wird der Fall einer 10 kT starken Detonation für die vorliegenden Analysen als Referenzszenario gewählt. Dies liegt darin begründet, dass die derzeitigen Modellierungskapazitäten, wie unten näher erläutert wird, auf Fälle unter 30 kT begrenzt sind. Ferner ist anzunehmen, dass ein Bereich um 10 kT noch durch sogenannte „improvised nuclear devices“, also im Rahmen einer nicht-militärischen Nutzung, erreicht werden kann und somit im Geltungsbereich des ANoPl-Bund (BMUV 2023) liegt, wie in Abschnitt 4.1.2 erläutert. Außerdem ist der Fall einer bodennahen Detonation mit einer Stärke von 10 kT auch im zuvor erwähnten FEMA Guide

(FEMA 2023) zu Grunde gelegt, wodurch eine direkte Vergleichbarkeit der vorliegenden Analysen ermöglicht wird.

Die Partikelgrößenverteilung wurde in der Simulation als konstant und unabhängig von der Höhe angenommen. Die Höhenverteilung der Aktivität ist bzgl. der Explosionsstärke parametrisiert und wird für den angenommenen Fall einer 10 kT starken Explosion in Abb. 6-1 gezeigt.

Die in (Glasstone und Dolan 1977) gegebene Partikelgrößenverteilung („Glasstone and Dolan“ in Abb. 6-3) wurde näherungsweise in fünf Abschnitte unterteilt, wie in Tab. 6-1 dargestellt. Bezüglich der Partikelgrößenverteilung wird innerhalb des Ausbreitungsmodells nicht nach chemischem Element bzw. Isotop unterschieden; für jedes berücksichtigte Radionuklid wird die selbe Partikelgrößenverteilung angenommen.

Tab. 6-1: Diskretisierte Partikelgrößenverteilung und jeweiliger Aktivitätsanteil nach einer bodennahen Explosion

mittlerer Partikeldurchmesser [μm]	Aktivitätsanteil [%]
10	12
50	28
100	30
150	18
250	12

Zusätzlich wurden Rechnungen mit einer Partikelgrößenverteilung ähnlich der „Magee“-Verteilung aus Abb. 6-3 durchgeführt, um die Folgen einer nicht bodennahen Explosion zu untersuchen.

Tab. 6-2: Diskretisierte Partikelgrößenverteilung und jeweiliger Aktivitätsanteil nach einer nicht-bodennahen Explosion

mittlerer Partikeldurchmesser [μm]	Aktivitätsanteil [%]
10	65
18	15
22	10
26	5
33	5

Für die Ausbreitungsrechnungen wurde als Ereignisort ein willkürlicher, nicht näher spezifizierter Ort in Osteuropa angenommen, nachfolgend als Beispielort bezeichnet. Dabei wurden 365 Rechnungen für eine bodennahe Explosion durchgeführt, jeweils zu einem gleichverteilt zufällig gewählten Zeitpunkt an jedem Tag des Kalenderjahres 2021 und jeweils mit einem Prognosezeitraum von 100 h. Zusätzlich wurden weitere 36 Rechnungen, von denen jeweils 3 auf jeden Monat des Jahres 2021 zufällig verteilt wurden, für einen Ort in Deutschland (Frankfurt) durchgeführt, um eine Ortsabhängigkeit weitgehend auszuschließen, und weitere 36 solcher Rechnungen mit der „nicht-bodennahen“ Partikelgrößenverteilung. Es wurden numerische Wettervorhersagedaten des Deutschen Wetterdienstes des Modells ICON-EU in den Höhen-

schichten 0 m bis 2 000 m genutzt. Windgeschwindigkeiten und -richtungen in darüber liegenden Höhenschichten wurden durch kontinuierliche Extrapolation abgeschätzt. Das Rechengitter des Ausbreitungsmodells in RODOS umfasst eine Höhe bis ca. 10 km über Grund, die nicht durch Nutzereingaben veränderbar ist. Darüber liegende Radioaktivität wird bei der Ausbreitungsrechnung und deshalb auch bei nachfolgenden Dosisberechnungen nicht berücksichtigt, weshalb das Modell nur für Nuklearwaffen mit einer Explosionsstärke bis ca. 30 kT eingesetzt werden kann. Alle Zerfallsreihen der betrachteten Radionuklide wurden während der Ausbreitungsrechnung mit dem Modell LASAT berücksichtigt.

Anschließende Dosisberechnungen und die Kontamination von Umwelt und landwirtschaftlichen Produkten erfolgt mit dem in RODOS eingebundenen „Food and Dose Model terrestrial“ (FDMT), wie in Abschnitt 6.5.1 näher erläutert. Abb. 6-4 zeigt Beispiele solcher Ausbreitungsrechnungen bezüglich des (zeitlichen) Maximums der prognostizierten Gesamt-Beta-Oberflächenkontamination für den Fall einer Explosion in Frankfurt am Main.

Aus den Ergebnissen der Ausbreitungsrechnungen lassen sich abstandsabhängige radiologische Auswirkungen bestimmen. Dazu wird für jede Zelle des Rechengitters der Abstand zum Ereignisort bestimmt. Für jede der durchgeführten Ausbreitungsrechnungen wird in festgelegten Abstandsintervallen das jeweilige Maximum der betrachteten Effekte, z. B. eines Dosiswerts, in diesem Abstandsintervall bestimmt. Daraus ergibt sich für jedes Abstandsintervall ein Ensemble der jeweiligen Maximalwerte, z. B. ein Ensemble aus maximalen Werten für die Ortsdosisleistung im Abstand von 9 km bis 10 km vom Detonationsort. Für jedes dieser Ensemble, also für jedes Abstandsintervall, werden der Median, das 10. und das 90. Perzentil bestimmt. Dies erlaubt es, entsprechende Größen gegen den Abstand aufzutragen, wie in den nachfolgenden Unterabschnitten bzw. deren Abbildungen gezeigt wird.

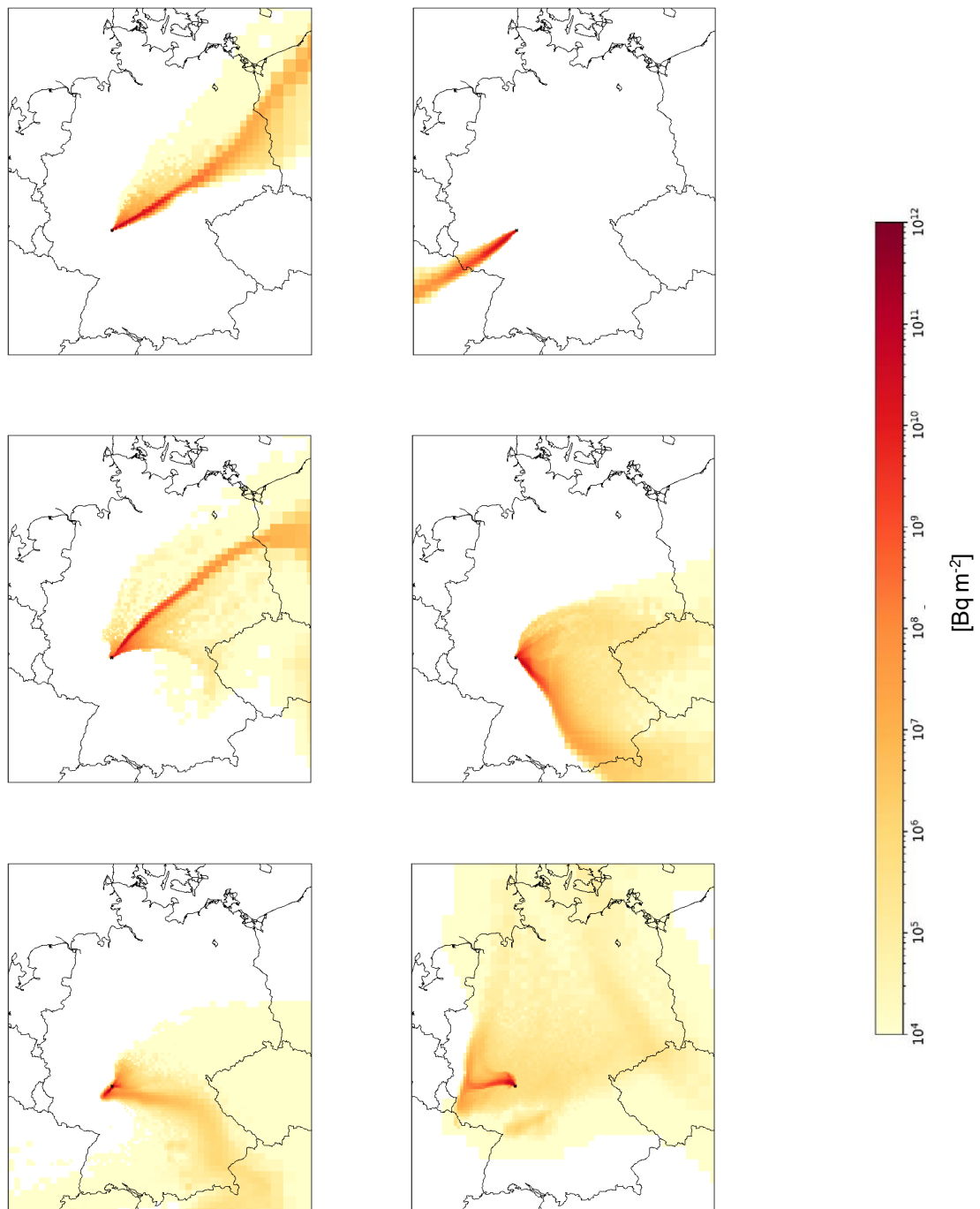


Abb. 6-4: Beispiele von Ausbreitungsszenarien mit unterschiedlichen Wetterdaten einer 10 kT bodennahen Explosion. Gezeigt ist das zeitliche Maximum der Gesamt-Beta-Oberflächenkontamination in logarithmischer Farbskalierung. Von oben nach unten zunehmende Komplexität der vorherrschenden Wetter- bzw. Windsituation.

6.5 Radiologische Konsequenzen

6.5.1 Expositionspfade und Dosisberechnung

Ausgehend von den Ergebnissen einer Ausbreitungsmodellierung können die verschiedenen Expositionspfade hinsichtlich der daraus resultierenden Dosen bewertet werden. Typischerweise spielen für Szenarien mit atmosphärischer Verbreitung von Radioaktivität sowohl die Expositionspfade der externen Strahlung und als auch der Inkorporation eine Rolle. Der externe Expositionspfad ist weiter unterteilbar in die Exposition durch eine vorüberziehende radioaktive Wolke (sog. „Wolkenstrahlung“) und die Exposition durch die externe Strahlung ausgehend von bodendeponiertem radioaktivem Material (sog. „Bodenstrahlung“). Der Expositionspfad der Inkorporation setzt sich im Wesentlichen aus der Inhalation radioaktiver Stoffe aus der vorüberziehenden radioaktiven Wolke und der Ingestion kontaminierter Erzeugnisse zusammen. Darüber hinaus gibt es in beiden Kategorien weitere nachrangige Effekte bzw. Pfade, wie beispielsweise die Kontamination von Haut und Kleidung oder die Resuspension und anschließende Inhalation bodendeponierten Materials.

Nachfolgend wird ein Überblick über die relevantesten Expositionspfade im Falle einer Kernwaffenexplosion gegeben sowie über deren Berechnungsmethoden, die für die Bewertungen der radiologischen Auswirkungen angewandt wurden.

6.5.1.1 Wolkenstrahlung

Die Wolkenstrahlung ergibt sich überwiegend aus den Gammaquanten die beim radioaktiven Zerfall einer Falloutwolke emittiert werden, den Boden erreichen und dort die Exposition eines Individuums bewirken können. Für eine Person am Boden gilt, dass sich die Wolkenstrahlung aus allen Beiträgen aus einer komplexen Wolkengeometrie ergibt, die über dieses Individuum hinwegzieht. Für die Berechnung sind komplexe Algorithmen verfügbar, beispielsweise dargestellt in SSK (1992), die hier nicht näher diskutiert werden. Für diese Berechnungen dient das Unterprogramm LOPGAM des Ausbreitungsmodells LASAT, dass die notwendige Integration über die dreidimensionale Konzentrationsverteilung für jede Gitterzelle des Rechengitters am Boden durchführt. Dadurch wird berechnet, welche Flussdichte an Gammaquanten sich, resultierend aus der vorbeiziehenden radioaktiven Wolke, zeitabhängig an jedem Punkt bzw. jeder Zelle eines Rechengitters am Boden ergibt. Als Eingangsparameter dafür dient die zeitabhängige Konzentration radioaktiver Stoffe im dreidimensionalen Raum, wie sie aus der Ausbreitungsrechnung erhalten wird, sowie Faktoren für die Absorption der Strahlung beim Durchtritt der Atmosphäre. Durch Multiplikation dieser orts- und zeitabhängigen Flussdichte (Einheit Bq m^{-2} bzw. $\text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$) mit den Dosisleistungskoeffizienten aus Beilage 160a und b zum Bundesanzeiger (BMU 2001) und weiteren Korrekturfaktoren (z. B. für die Reflektion der Strahlung am Boden) wird die organspezifische Äquivalentdosisleistung bzw. die effektive Dosisleistung altersgruppenspezifisch berechnet und im Anschluss über bestimmte Intervalle (z. B. über 7 Tage) zeitlich integriert.

Der Beitrag der Wolkenstrahlung an der effektiven Dosis beträgt in den ersten 24 Stunden rund 2,6 % (Kraus und Foster 2013). Der geringe Beitrag ergibt sich unter anderem durch die Verbreitung der Radioaktivität in extreme Höhen, sodass für eine Person am Boden zu einem Großteil der freigesetzten Radioaktivität ein enormer Abstand besteht. Es gilt näherungsweise das Abstandsquadratgesetz.

6.5.1.2 Bodenstrahlung

Am Boden deponiertes radioaktives Material zerfällt und emittiert dabei Strahlung, die eine Exposition von Personen bewirkt, die sich in der Nähe aufhalten. Über die Dosisleistungskoeff-

fizienten für Bodenstrahlung aus ICRP-Publikation 144 (ICRP 2020b) ist die daraus resultierende Ortsdosisleistung ($H^*(10)$) durch Multiplikation mit der Oberflächenkontamination am Boden (Bq m^{-2}) direkt nuklidspezifisch berechenbar.

Für die Berechnung von integrierten Dosen (z. B. über 7 Tage) werden jedoch innerhalb des Modells FDMT in RODOS zeitintegrierte Versionen der Dosisleistungskoeffizienten aus ICRP-Publikation 144 (ICRP 2020b) verwendet, die den Aufbau (Einwachsen von Tochter-nukliden) bzw. die Abnahme (radioaktiver Zerfall, vertikale Migration im Boden) der Dosisleistung mit der Zeit berücksichtigen. Darüber hinaus werden dadurch Radionuklide in Zerfallsreihen berücksichtigt, die sich zwar nicht selbst im Quellterm befinden, wohl aber deren Mutternuklide.

Überwiegend wird diese Dosisleistung durch emittierte Gammastrahlung verursacht, aber auch durch Bremsstrahlung sowie charakteristische Röntgenstrahlung in Folge von Betazerfällen.

Der Beitrag der Bodenstrahlung an der effektiven Dosis ist für bodennahe Kernwaffenexplosion der mit großem Abstand dominierende Expositionspfad. Der Anteil der Bodenstrahlung an der externen Dosis beträgt in den ersten 24 h ca. 96 % (Kraus und Foster 2013).

Ausgehend von den Daten aus (Kraus und Foster 2013) und (Spriggs und Egbert 2020) sowie von tabellierten Daten zu Zerfallsdaten aus (Brown et al. 2018) wurden, wie in Abschnitt 6.1 erwähnt, sowohl die dosisrelevantesten Radionuklide sowie deren initiale Mengen bestimmt.

Dabei wurden die initialen Mengen der Nuklide jeweils so bestimmt, dass deren projizierte Aktivität für den Zeitraum nach 10 Minuten bestmöglich mit der zeitlichen Projektion der Aktivität eines vollständigen initialen Nuklidvektors, bestimmt aus den Daten aus (Spriggs und Egbert 2020) und (Brown et al. 2018), übereinstimmt. Abb. 6-5 zeigt den zeitlichen Verlauf der potenziellen Gammastrahlungsdosisleistung aus Bodenstrahlung (berechnet mit Daten aus ICRP 2020b) eines vollständigen Aktivitätsvektors, ausgehend von den Spaltquerschnitten aus (Brown et al. 2018) für ^{235}U (schwarz) bzw. ^{239}Pu (rot). Zusätzlich gezeigt wird der zeitliche Verlauf der Dosisleistung, berechnet aus dem Aktivitätsvektor bezüglich jener 44 Radionuklide (blau), die für die Ausbreitungsrechnungen berücksichtigt worden sind.

Ersichtlich ist, dass für Zeiträume von mehr als einer Stunde nach Explosion die Dosisleistung gut abgebildet werden kann, während im Nahbereich gegebenenfalls die Dosisleistung unterschätzt wird. Es bleibt aber anzumerken, dass der Berechnung in Abb. 6-5 die Annahme zugrunde liegt, dass der Fallout zu jeder Zeit bereits (vollständig) deponiert wurde, was für die kurzen Zeiträume nicht zutrifft. Darüber hinaus wird angenommen, dass die effektive Dosis über den externen Expositionspfad im Nahbereich, z. B. nach 10 min, von den prompten Effekten (Sofortstrahlung) dominiert wird. Deshalb wird eine Betrachtung dieser 44 ausgewählten Radionuklide als hinreichend angesehen, insbesondere für die Bestimmung von Bereichen, in denen effektive Dosen von einigen 100 mSv erhalten werden (im Gegensatz zu solchen, in denen mehrere Gy^{19} erhalten werden).

Bei der Bewertung der nachfolgenden Graphik bezüglich resultierender Dosen bzw. Abstände sollte dennoch berücksichtigt werden, dass die Dosis innerhalb eines Radius von ca. 10 km potenziell unterschätzt wird, insbesondere was die Sofortstrahlung betrifft. Dies beeinflusst besonders die berechneten Dosisleistungen in den ersten 1 h bis 2 h nach der Explosion. Die Dosisleistung von bodendeponiertem Material wird in RODOS, ausgehend von den ausgewählten Radionukliden, durch Multiplikation der prognostizierten Oberflächenkontamination

¹⁹ Stochastische Effekte werden in Sv und Deterministische in Gy angegeben

mit den Dosisleistungsfaktoren aus ICRP-Publikation 144 (ICRP 2020b) berechnet. Dabei werden keine weiteren Umwandlungen von Mutter- und Tochternukliden berücksichtigt. Dadurch und durch die Auswahl der zuvor erwähnten 44 berücksichtigten Radionuklide kommt es zu einer deutlichen Unterschätzung der Ortsdosisleistung durch RODOS innerhalb der ersten ca. 2 Stunden. Dies betrifft hinsichtlich der unberücksichtigten Mutter-Tochter-Beziehungen aber nicht die Berechnung der integrierten Dosen wie der effektiven Dosis oder Äquivalentdosis, sondern nur die Prognose der Ortsdosisleistung. Aus diesem Grund wurde die Dosisleistung, abweichend von RODOS, durch Multiplikation des Verhältnisses der orts- und zeitabhängig berechneten Oberflächenkontamination eines Nuklids und dessen initialer Freisetzung mit einem über einen vollständigen Nuklidvektor summierten, zeitabhängigen Dosisleistungsfaktor berechnet. Dieser entspricht einer nicht-normierten Version der in Abb. 6-5 gezeigten schwarzen Kurve. Die blaue Kurve in dieser Grafik zeigt hingegen die Dosisleistung, wie sie mit Hilfe der zuvor beschriebenen 44 Nuklide berechnet werden würde.

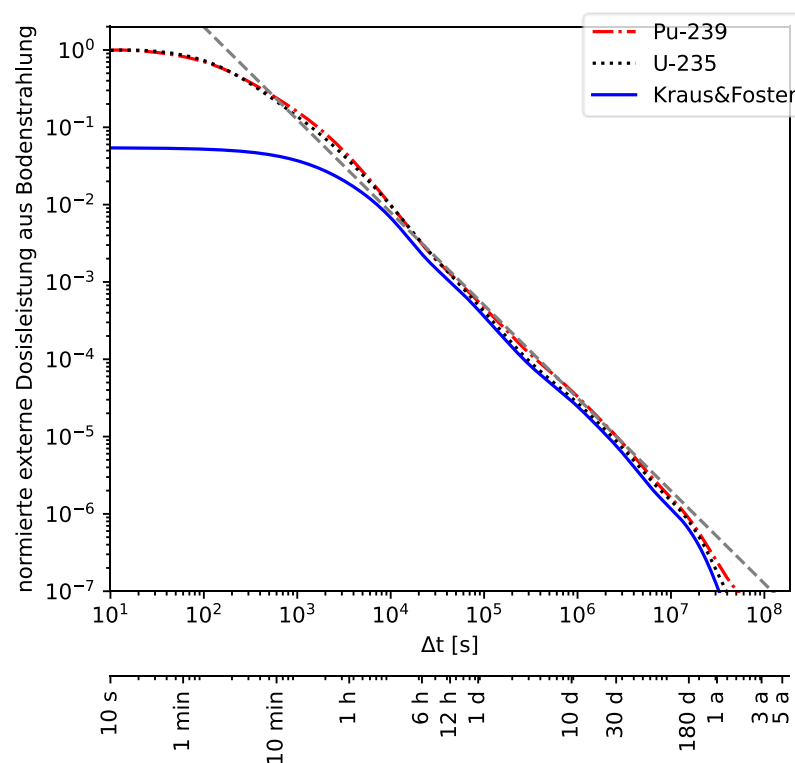


Abb. 6-5: Normierte potenzielle Gamma-Dosisrate aus Bodenstrahlung mit der Zeit Δt nach der Explosion. In schwarz gezeigt ist die zeitliche Entwicklung bestimmt mit einem vollständigen Aktivitätsvektor, der aus den Spaltquerschnitten aus (Brown et al. 2018) abgeleitet ist. In blau gezeigt ist die zeitliche Entwicklung für einen optimierten und für die Ausbreitungsrechnungen herangezogenen Aktivitätsvektor aus 44 Nukliden. Die graue, gestrichelte Linie zeigt den postulierten Verlauf $\alpha t^{-1,2}$, ähnlich zu (Glasstone und Dolan 1977)

6.5.1.3 Inhalation

Durch die Inhalation kommt es zur Aufnahme von Radionukliden in den Körper. Zusätzlich zu den physikalischen Eigenschaften der Radionuklide spielen hier auch biochemische Prozesse eine Rolle. Durch Modellierung der biochemischen Prozesse im Körper sowie des radioaktiven Zerfalls und der dabei emittierten Strahlung im Körper können nuklidspezifische Dosiskoeffizienten bestimmt werden, typischerweise in der Einheit Sv Bq^{-1} , die ein Verhältnis zwischen

der inhalierten bzw. inkorporierten Aktivität und der erhaltenen effektiven bzw. Äquivalentdosis herstellen. Diese Dosis wird durch Multiplikation dieser Dosiskoeffizienten mit einer altersgruppenspezifischen Atemrate ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) und der zeitintegrierten Aktivitätskonzentration in Bodennähe (Bq s m^{-3}) berechnet.

Die ICRP empfiehlt dafür Dosiskoeffizienten für den Bereich bis $10 \mu\text{m}$ aktivitätsgewichtetem aerodynamischen Mediandurchmesser (activity median aerodynamic diameter, AMAD). Zusätzlich spielt für die Inhalationsdosis auch die chemische Speziation bzw. Verbindung des Radionuklids eine Rolle, da sie die Aufnahme in den Körper beeinflusst. Die ICRP Dosiskoeffizienten sind hinsichtlich dessen in drei Kategorien bzgl. schneller (F), moderater (M) oder langsamer (S) Aufnahme klassifiziert. Darüber hinaus werden die Dosiskoeffizienten für verschiedene Integrationszeiträume der Folgedosis angegeben. Es wird die Lebenszeitfolgedosis (bis zu einem Alter von 70 Jahren) berechnet und jeweils die Absorptionsklasse angenommen, die in ICRP-Publikation 119 (ICRP 2012) für das jeweilige chemische Element empfohlen wird. Dabei wird angenommen, dass Metalle als Oxide vorliegen.

Für die Berechnung der Inhalationsdosis wird die lokal auftretende Aktivitäts-Partikelgrößenverteilung in Folge der unterschiedlichen Ausbreitung verschiedener Partikel nicht berücksichtigt. Stattdessen wird vereinfachend angenommen, dass alle Partikel gleichermaßen zur Inkorporationsdosis, mit dem gleichen Dosiskonversionsfaktor für $1 \mu\text{m}$ AMAD, beitragen. Für Partikel größer als $20 \mu\text{m}$ empfiehlt die ICRP keine Dosiskoeffizienten für die Inhalation, da für diesen Bereich das verwendete biokinetische Modell der ICRP keine Gültigkeit hat. Anspaugh et al. (2022) beschreiben jedoch detailliert, dass auch Partikel in diesem Größenbereich zur Gesamtdosis beitragen, da sie zwar nicht in den tiefen Lungenregionen verbleiben, aber über die oberen Atemwege und schlussendlich über den gastrointestinalen Trakt in den Körper aufgenommen werden können. Auch hier spielen biochemische Prozesse eine Rolle, die sich für diese Fälle nur schwer modellieren lassen, denn die Resorption ist gleichfalls maßgeblich von der chemischen Speziation abhängig, welche für den Fall einer Kernwaffenexplosion kaum erforscht ist. Anspaugh et al. (2022) schlagen vor, für diesen Größenbereich und für alle Organe, die nicht Teil der Atemwege sind, eine gewichtete Form der Ingestions-Dosiskonfaktoren der ICRP heranzuziehen. Vergleicht man die Berechnung der Effektiv- bzw. der Äquivalentdosen der nachfolgend betrachteten Organe (rotes Knochenmark, Schilddrüse und Uterus) gemäß Anspaugh et al. (2022) mit einer Berechnung der Inhalationsdosis, bei der die Partikelgröße unberücksichtigt bleibt, ergibt sich, dass dies eine einfache Annäherung an die Methode nach Anspaugh et al. (2022) darstellt. Die angewandte Berechnungsmethode ist als konservativ anzusehen.

Eine weitere Form der Inhalation ergibt sich durch das mögliche Aufwirbeln bereits bodendeponierten radioaktiven Materials, durch die sogenannte Resuspension, die in FDMT ebenfalls berücksichtigt wird.

Kraus und Foster (2013) geben sowohl für die direkten Inhalations- als auch die Resuspensionsbeiträge an der effektiven Dosis unter 1 % an, nämlich 0,3 % bzw. 0,6 % in den ersten 24 h.

6.5.1.4 Ingestion

Kommt es zur atmosphärischen Verbreitung von Radionukliden, können diese durch verschiedene Prozesse in der Umwelt in den verschiedensten Produkten direkt oder indirekt im Nachgang auftreten, beispielsweise durch direkte Deposition auf der Oberfläche von im freien kultivierten Lebensmitteln (z. B. Blattgemüse), aber auch durch die Aufnahme über Wurzeln von pflanzlichen Lebensmitteln. Darüber hinaus kann es zur Anreicherung in anderen Lebensmitteln und Produkten kommen, wie z. B. in der Kuhmilch, in die die Radionuklide über die Futteraufnahme des Tieres gelangen können. Im Programmsystem RODOS stehen innerhalb des Moduls FDMT radioökologische Modellierungen aller relevanten Prozesse zur Verfügung,

mit der sich die resultierenden Aktivitätskonzentrationen (Bq kg^{-1}) in landwirtschaftlichen Produkten prognostizieren lassen. Es sollte dabei erwähnt werden, dass diese Modellierungen im Wesentlichen auf der Anwendung von Transferfaktoren beruhen, die zum Großteil aus experimentellen Beobachtungen nach den Reaktorkatastrophen von Tschornobyl und Fukushima abgeleitet wurden. Auch die radioökologischen Prozesse sind abhängig von der physikalisch-chemischen Beschaffenheit des radioaktiven Materials. Wegen der extremen Bedingungen einer Kernwaffenexplosion kann es dazu kommen, dass deutlich andere physikalisch-chemische Eigenschaften des radioaktiven Materials auftreten als bei Kernkraftwerksunfällen. Unter Anderem hängen die radioökologischen Prozesse z. B. mit der Wasserlöslichkeit der radioaktiven Aerosolpartikel zusammen. Insofern sind diese Modellierungsergebnisse mit noch größeren Unsicherheiten behaftet, als dies bei der Modellierung von Kernkraftwerksunfällen der Fall ist.

Langfristig ergibt sich durch den Ingestionspfad eine Strahlenexposition des Menschen, die neben der Radioökologie maßgeblich von den individuellen Lebens- bzw. Konsumgewohnheiten abhängt. Die damit verbundene Dosis lässt sich in der ersten Zeit nach einem Ereignis durch entsprechende Verhaltensempfehlungen bzw. -regeln sehr gut verringern. Verschiedenen Autoren zu Folge, unter anderem Glasstone und Dolan (1977), spielt der Ingestionspfad bei Kernwaffenexplosionen nur eine untergeordnete Rolle, und eine direkte Dosisberechnung wird im Folgenden auch nicht durchgeführt.

Besonders auch im Fernbereich bzw. längerfristig kann der Expositionspfad der Ingestion für die stochastischen Effekte allerdings eine Rolle spielen. Die potenziellen radiologischen Konsequenzen für die Umwelt, die zu einer längerfristigen Exposition über den Nahrungspfad führen können, werden deshalb in Form oben beschrieben modellierter Überschreitungen der Kontaminationswerte für das Vermarktungsverbot aus EURATOM 2016/52 (EU 2016 bzw. ANoPI-Bund, BMUV 2023) für die Beispielprodukte „Blattgemüse“ und „Kuhmilch“ dargestellt.

6.5.2 Radiologische Kriterien

Je nach Entfernung zum Explosionsort variiert die Intensität der radiologischen Folgen durch den Fallout. Im näheren Bereich ist das Auftreten deterministischer Effekte die maßgebliche radiologische Konsequenz, die es durch eine Schutzstrategie so gut wie möglich zu vermeiden gilt. Als radiologische Kriterien dafür können sowohl die effektive Dosis, mit einem Schwellenwert von 1 000 mSv, sowie verschiedene Organäquivalentdosen herangezogen werden. Dazu zählt die Dosis des roten Knochenmarks, mit einem Schwellenwert von 1 000 mGy, und auch eine effektive Dosis des Fötus von 100 mSv, wie in (SSK 2014) näher erläutert ist. Die höchsten Dosen ergeben sich bei der prognostischen Dosisberechnung bei einem unterstellten Daueraufenthalt im Freien, der aus Gründen der Konservativität nachfolgend, sofern nicht anders erwähnt wird, angenommen wird, um die Obergrenzen der radiologischen Effekte zu erfassen.

Im Mittel- bis Fernbereich vom Explosionsort sind zwar in der Regel durch den Fallout keine deterministischen Effekte mehr zu erwarten, dennoch können hier stochastische Effekte auftreten, deren Begrenzung ein weiteres Schutzziel darstellt. Als Kriterium dient hier generell die effektive Dosis, mit Schutzniveaus von 10 mSv bzw. 100 mSv, die als radiologisches Kriterium für die Maßnahmen „Aufenthalt in Gebäuden“ und „Evakuierung“ in der Notfalldosiswertverordnung (NDWV 2018) festgelegt sind. Der ANoPI-Bund (BMUV 2023) sieht darüber hinaus verschiedene weitere Dosiswerte, z. B. für die Angemessenheit bestimmter medizinischer Maßnahmen vor und liefert darüber hinaus sogenannte abgeleitete Richtwerte. Diese sind einfach zu merkende, messbare Werte, z. B. in Form einer Oberflächenkontamination oder einer Ortsdosisleistung, die das potenzielle Überschreiten o. g. Dosiswerte grob anzeigen. Prinzipiell sieht der ANoPI-Bund (BMUV 2023) zwar als eines der darin genannten Referenzszenarien das Szenario einer Kernwaffenexplosion vor, dennoch sind die darin genannten

Dosis- bzw. abgeleiteten Richtwerte nicht unbedingt für diesen Fall geeignet, da die primären darin behandelten Szenarien andere sind.

Nachfolgend berechnete Dosis- bzw. Kontaminationsgrößen werden mit den im ANoPl-Bund (BMUV 2023) festgelegten Werten verglichen, wobei dennoch für dieses Szenario die vorgeschlagenen Kriterien bzw. Maßnahmen in ihrer Eignung differenziert betrachtet werden müssen, insbesondere für den Nahbereich. Dies lässt sich bereits daran erkennen, dass die im ANoPl-Bund genannten Dosiswerte in der Einheit „Sv“ veranschlagt sind, da vor allem stochastische Effekte betrachtet werden (BMUV 2023). Es existieren darin keine differenzierten Werte zur Bewertung potenzieller deterministischer Konsequenzen, die in der Dosis Einheit „Gy“ (i.d.R. RBE-weighted: gewichtet nach „relative biological effectiveness“) angegeben werden sollten (Ferrari et al. 2023). International sind als sogenannte „generic criteria“ für die Vermeidung deterministischer Effekte über den externen Expositionspfad eine Dosis des roten Knochenmarks von 1 Gy (RBE-weighted), eine Fötusdosis von 0,1 Gy, eine Gewebedosis von 25 Gy in einer Tiefe von 0,5 cm und eine Hautdosis von 10 Gy über 100 cm² von der IAEA in GSR Part 7 festgelegt (IAEA 2015), jeweils über einen Zeitraum von 10 h.

Es wird im Anwendungsbereich des ANoPl-Bund (BMUV 2023) generell davon ausgegangen, dass deterministische Effekte bei konventionellen Szenarien wie KKW-Unfällen durch präventive Maßnahmen, z. B. zuvor festgelegter, unverzüglich bzw. präventiv zu evakuierender Planungszonen vermieden werden können, wie auch von der IAEA in GSR Part 7 (IAEA 2015) festgelegt wird. Darüber hinaus können solche deterministischen Effekte mit den vorhandenen Prognose- und Bewertungsmöglichkeiten (RODOS) nur bedingt abgeschätzt werden, was unter anderem an den verwendeten Dosiskoeffizienten der ICRP bzgl. des Sieverts liegt. Es können keine abweichenden RBE-weights für deterministische Effekte bzgl. Strahlungs- und Gewebeabhängigkeiten bzw. Dosisleistungseffekte berücksichtigt werden.

6.5.3 Ankunftszeiten von radioaktivem Fallout

Je nach Entfernung vom Ground Zero ergeben sich unterschiedliche Ankunftszeiten des Fallouts, in etwa in linearer Abhängigkeit. Zur Abschätzung dieser Zeit lässt sich eine effektive Windgeschwindigkeit definieren, die die Steigung der Beziehung zwischen Entfernung und Ankunftszeit beschreibt. Physikalisch ergibt diese effektive Windgeschwindigkeit sich aus der Verteilung der radioaktiven Stoffe mit der Höhe über Grund und den dort herrschenden Windgeschwindigkeiten und -richtungen. Eine Möglichkeit sie zu bestimmen, besteht darin, diese Windgeschwindigkeiten aktivitätsgewichtet zu mitteln.

Abb. 6-6 zeigt das Ensemble beobachteter Zusammenhänge zwischen der Distanz zum Ground Zero und der Ankunftszeit radioaktiver Luftmassen sowie ein Histogramm über die daraus durch Regression abgeleiteten effektiven Windgeschwindigkeiten, wie sie innerhalb der betrachteten Wettersituationen für eine bodennahe 10 kT Explosion auftreten würden. Im Median beträgt die so bestimmte effektive Zuggeschwindigkeit ca. 40 km h⁻¹, im 90. Perzentil 65 km h⁻¹. In Einzelfällen können sogar Windsituationen mit effektiven Zuggeschwindigkeiten über 80 km h⁻¹ auftreten. Diese effektiven Zuggeschwindigkeiten gelten nur für eine 10 kT Explosion. Für größere Explosionsstärken sind aufgrund der Ausdehnung in höhere atmosphärische Schichten und der dort typischerweise auftretenden höheren Windgeschwindigkeiten auch größere effektive Zuggeschwindigkeiten zu erwarten. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass auch für die 10 kT Explosion die effektive Zuggeschwindigkeit aufgrund der meteorologischen Eingangsdaten (bis 2 km Höhe) tendenziell unterschätzt wird.

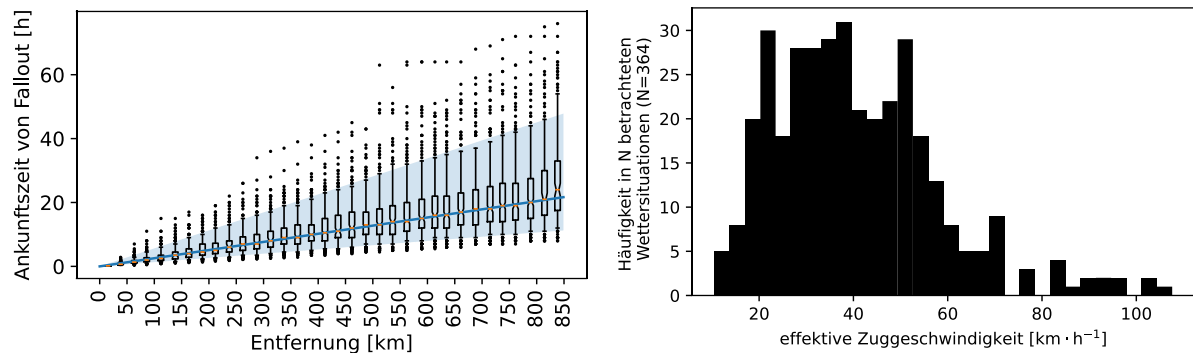


Abb. 6-6: Links: Box-Plot über auftretende Ankunftszeiten von Fallout nach Entfernung von Ground Zero. Die Ausdehnung der Box umfasst 75 % der Daten, die Ausdehnung der Balken 90 % der Daten, die Einkerbung der Box (rot) zeigt den Median an. Datenpunkte, die nicht innerhalb des 90 % Intervalls liegen, sind als Punkte dargestellt. Die blaue Linie beschreibt eine lineare Regressionsfunktion mit der Steigung der effektiven Zuggeschwindigkeit im Median, der blaue Bereich kennzeichnet das zugehörige 90 % Vorhersageintervall. Rechts: Histogramm über die beobachteten, durch lineare Regression bestimmten, effektiven Zuggeschwindigkeiten in N = 364 verschiedenen Wettersituationen.

6.5.4 Entwicklung von Gebieten mit hohen Dosisleistungen in den ersten 48 h

Die Abb. 6-7 zeigt die typische zeitliche Entwicklung der Ortsdosisleistung durch Fallout nach einer bodennahen 10 kT Explosion für die Dosisleistungen 0,1 mSv h⁻¹, 1 mSv h⁻¹, 10 mSv h⁻¹ und 100 mSv h⁻¹. Typischerweise wächst der Bereich in dem eine Ortsdosisleistung 0,1 mSv h⁻¹ überschritten wird in den ersten 24 h an und schrumpft anschließend, während der Bereich, in dem die Ortsdosisleistung Werte von 100 mSv h⁻¹ überschreitet, bereits nach wenigen Stunden zu schrumpfen beginnt. Typischerweise werden im Bereich einiger 10 km von Ground Zero 100 mSv h⁻¹ in den ersten drei Stunden überschritten, 100 μ Sv h⁻¹ im Bereich über 100 km von Ground Zero in den ersten 12 h bis 24 h.

Der ANoPI-Bund (BMUV 2023) definiert die abgeleiteten Richtwerte von 1 mSv h⁻¹ (Evakuierung), 100 μ Sv h⁻¹ (Aufenthalt in Gebäuden) und 1 μ Sv h⁻¹ (generelle Verhaltensempfehlungen) für die Ortsdosisleistung. Ein abgeleiteter Richtwert dient im Allgemeinen dazu, schnell anhand einer messbaren Größe wie der Ortsdosisleistung abzuschätzen, ob Schutzziele in der Form erhaltener (effektiver) Dosen überschritten werden könnten. Deshalb handelt es sich bei den numerischen Werten abgeleiteter Richtwerte allgemein um konservativ gerundete, einfach zu merkende Zahlen. Im bisherigen Anwendungsbereich des ANoPI-Bund (BMUV 2023) ist davon auszugehen, dass ab 1 mSv h⁻¹ bzw. 100 μ Sv h⁻¹ die ferner definierten Dosis-kriterien von 100 mSv Effektivdosis bzw. 10 mSv Effektivdosis überschritten werden würden, ab denen eine Evakuierung bzw. der Aufenthalt in Gebäuden als radiologisch angemessen gilt. Aufgrund der zeitlich sehr schnell absinkenden Dosisleistung, sowie einer möglichen lebensbedrohlichen Gefährdung durch fehlerhafte Evakuierung im Falle einer Kernwaffenexplosion sind diese abgeleiteten Richtwerte jedoch nicht sinnvoll anwendbar.

Aufgrund der fehlenden räumlichen und zeitlichen Vorhersagbarkeit (fehlende oder stark eingeschränkte Vorwarnzeit) sowie der ausgeprägten Dynamik von sowohl ansteigender als auch rasch abfallender Dosisleistung sind die Dosiskriterien für Entscheidungen wie „Sheltering“ und Evakuierung bei einer Kernwaffenexplosion nur bedingt anwendbar. Zunächst geht es darum, möglichst viel Dosis von Personen fernzuhalten, um lebensbedrohliche Expositionen, bzw. Expositionen, die deterministische Effekte hervorrufen können, zu verhindern. Darüber

hinaus bieten die genannten abgeleiteten Richtwerte keine weitere Differenzierung zwischen solchen Zonen, in denen typischerweise deterministische Effekte auftreten, und solchen Zonen, in denen die stochastischen Wirkungen relevanter sind.

Im FEMA-Guide der USA wird ein Richtwert einer Dosisleistung von ca. 100 mSv h^{-1} festgelegt, dessen Überschreitung die Zone definiert, in der es ohne Schutzmaßnahmen kurzfristig zu deterministischen Strahlenwirkungen kommen kann (FEMA 2023). Innerhalb dieser Zone müssen schnellstmöglich Schutzmaßnahmen ergriffen werden, um deterministische Effekte zu vermeiden. Darüber hinaus müssen Maßnahmen durch Einsatzkräfte in dieser Zone gerechtfertigt, geplant und optimiert sein. Idealerweise sollte sogar von Maßnahmen zunächst abgesehen werden, bis die Ortsdosisleistung entsprechend abgesunken ist, und Bereiche nach und nach durch Einsatzkräfte betretbar werden. In Deutschland sind als Anhaltspunkt für die mögliche effektive Dosis von Einsatzkräften die §§ 113 ff. StrlSchG (StrlSchG 2017) zu nennen, die sich auch in der Feuerwehrdienstvorschrift 500 (AFKzV 2022) wiederfinden. Dort ist eine Abstufung je nach Einsatzzweck geregelt und für Ausnahmefälle eine Dosis von 500 mSv als Obergrenze festgelegt. Dieser Wert ist auch international festgelegt (IAEA 2015). Insofern erscheint ein abgeleiteter Richtwert von 100 mSv h^{-1} als sinnvoll, da innerhalb einer solchen Zone diese Dosis schnell erreicht wird. Außerhalb der Zone bietet es sich an, einen zweiten abgeleiteten Richtwert für die generelle Angemessenheit der Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ festzulegen. Durch den zeitlichen Verlauf der Ortsdosisleistung der externen Strahlung des Fallouts aus Abb. 6-5 ergibt sich, dass eine effektive Dosis von 10 mSv innerhalb einer Zeit von 7 Tagen nach der Explosion bei einer initialen Ortsdosisleistung (bei Ankunft des Fallouts) von $100 \mu\text{Sv h}^{-1}$ in jedem Fall deutlich unterschritten wird. Dennoch sollte dieser Wert auch für das Szenario einer Kernwaffenexplosion nicht angepasst werden – aus Gründen der Konservativität, der einfachen Handhabbarkeit dieser Zahl und der Konsistenz mit der übrigen Notfallschutzplanung in Deutschland.

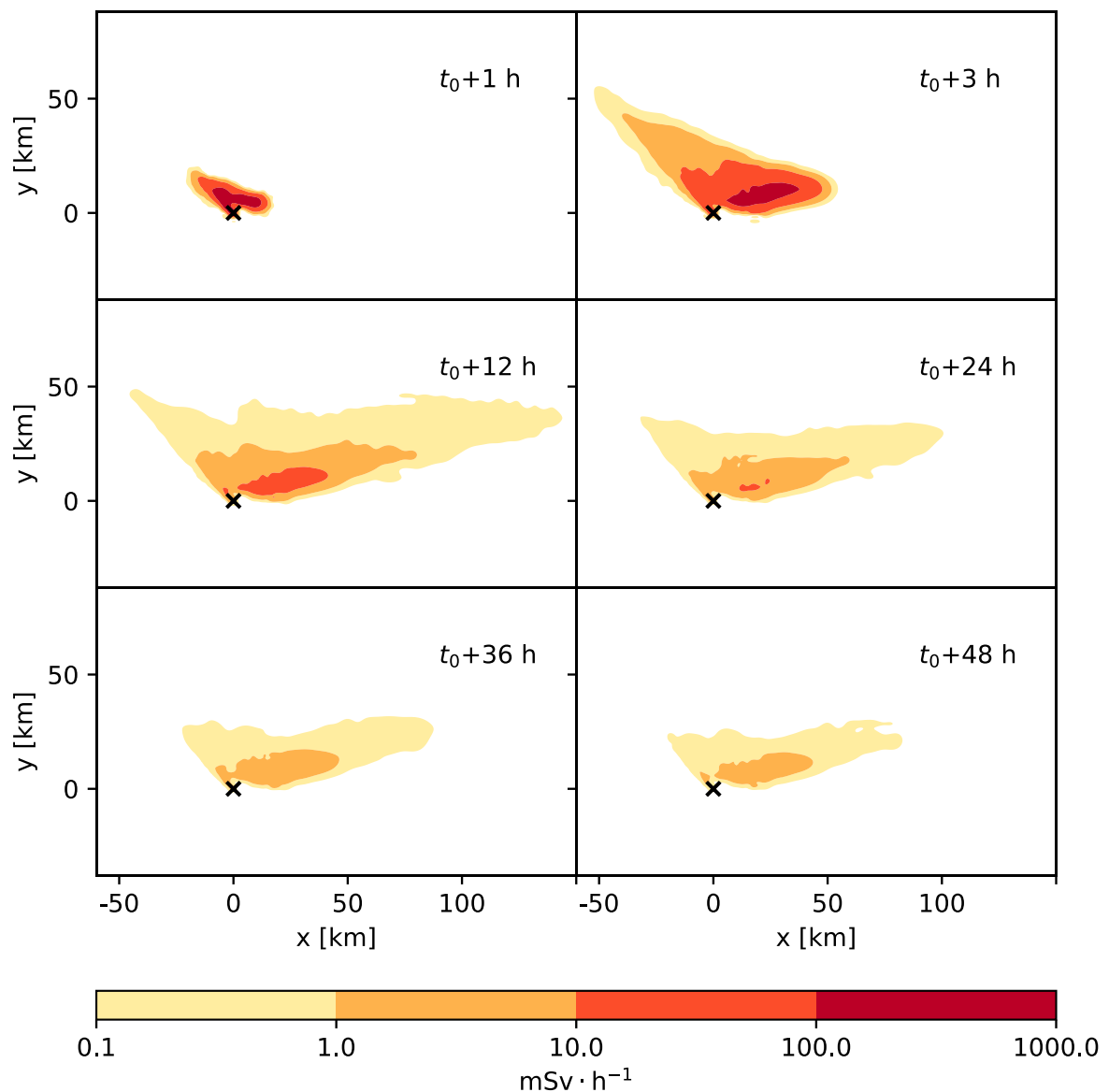


Abb. 6-7: Aus einer Ausbreitungsrechnungen als Beispiel abgeleitete Konturen für die Ortsdosisleistungen $0,1 \text{ mSv h}^{-1}$, 1 mSv h^{-1} , 10 mSv h^{-1} und 100 mSv h^{-1} für verschiedene Zeiten nach einer bodennahen 10 kT Explosion. Der Ursprung bezeichnet Ground Zero. Die Konturen wurden durch Interpolation aus prognostizierten Ortsdosisleistungen auf dem geschachtelten Rechengitter von RODOS (Auflösung 2 km) berechnet.

6.5.5 Effektivdosis

Gemäß Abb. 6-8 kann für den Beispielort die durch den Fallout resultierende effektive Dosis bei einem unterstellten Daueraufenthalt im Freien in einer Entfernung bis zu 170 km für Erwachsene bzw. bis zu 180 km für Kinder einen Wert von 100 mSv überschreiten (90. Perzentil) und in einer Entfernung von 270 km (Erwachsene) bzw. 280 km (Kinder) einen Wert von 10 mSv überschreiten. Eine Gegenüberstellung dieser Distanzen für den Beispielort, für den Standort „Deutschland“ und für die Luftexplosion ist in Tab. 6-3 gezeigt.

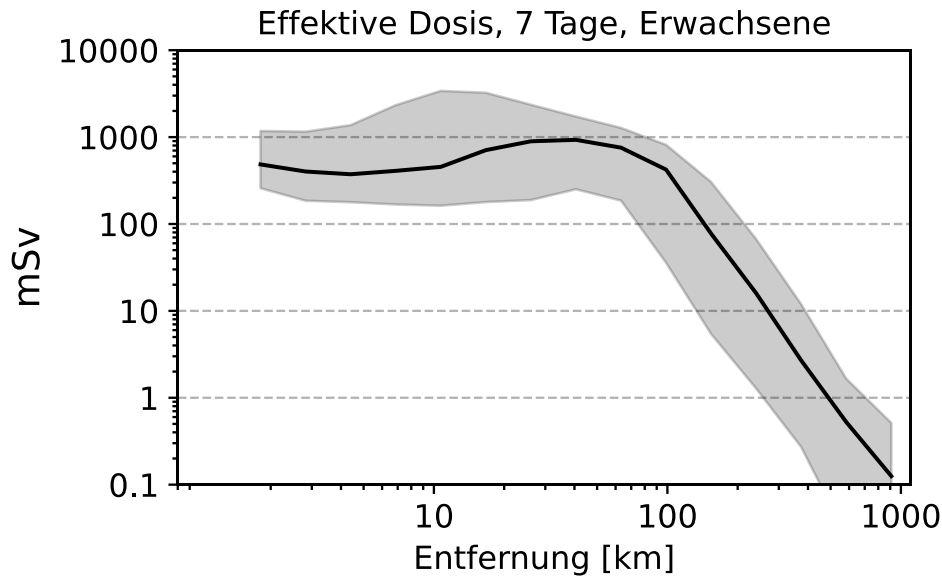


Abb. 6-8: Effektivdosis über 7 Tage für Erwachsene in Abhängigkeit von der Entfernung nach einer 10 kT bodennahen Kernwaffenexplosion bei einem unterstellten Daueraufenthalt im Freien. Die durchgezogene Linie gibt den Median über 365 betrachtete Wetterszenarien an, der graue Bereich das 80 % Überdeckungsintervall (vom 10. bis zum 90. Perzentil).

Dies entspricht den Dosiskriterien für die Schutzmaßnahmen „Evakuierung“ und „Aufenthalt in Gebäuden“ gemäß NDWV (NDWV 2018) bzw. ANoPI-Bund (BMUV 2023) und (SSK 2019). Aufgrund der kurzen Ankunftszeiten bis zum Auftreten des radioaktiven Fallouts, der zu erwartenden nicht möglichen Koordinierung von Evakuierung, des fehlenden Schutzes vor Fallout in Fahrzeugen und der nur kurzzeitig massiv erhöhten Dosisrate wird zum Schutz der Bevölkerung vor hohen Dosen im entsprechenden Bereich das Verbleiben in schützenden Räumen (wie z. B. innenliegende Räume oder Kellerräume, „Sheltering“) empfohlen. Dies betrifft insbesondere die Zeiten, in denen die Ortsdosisleistung sehr hoch ist, also ca. die ersten 48 h. Für das Beispielszenario in Deutschland mit einem Explosionsort Frankfurt betragen die 90. Perzentile der Zahlen betroffener Personen ca. 800 000 Personen im Dosisbereich > 100 mSv bzw. 1,9 Millionen Personen im Dosisbereich > 10 mSv.

Tab. 6-3: Statistische Größen (50., 80., 90. Perzentil P50, P80, P90) der Entfernungen für die Dosiskriterien 10 mSv bzw. 100 mSv für Erwachsene und Kleinkinder über die betrachteten Szenarien bei unterstelltem Daueraufenthalt im Freien über 7 Tage

Effektivdosis		Beispielort			Deutschland			Luftexplosion		
		P50 [km]	P80 [km]	P90 [km]	P50 [km]	P80 [km]	P90 [km]	P50 [km]	P80 [km]	P90 [km]
Erwachsene	> 10 mSv	210	268	316	201	294	326	42	145	170
	> 100 mSv	110	142	169	103	156	170	5	57	79
Kleinkinder	> 10 mSv	217	280	331	212	313	332	51	145	170
	> 100 mSv	121	156	179	108	181	195	7	71	89

Beim Vergleich der Distanzen, in denen typischerweise die Dosiskriterien überschritten werden, wird deutlich, dass zwischen den gewählten Standorten „Beispielstandort“ (Osteuropa,

bodennah) und „Deutschland“ (Frankfurt, bodennah), besonders im 90. Perzentil, keine wesentlichen Unterschiede zu erwarten sind. Kleinere Abweichungen sind darauf zurückzuführen, dass innerhalb der 36 Rechnungen für den deutschen Standort die vorherrschenden Wettersituationen weniger umfassend abgebildet werden. Im Falle der Luftexplosion werden die Dosiskriterien nur in wesentlich geringeren Distanzen überschritten. Insbesondere im Median ergibt sich beispielsweise für das Dosiskriterium von 100 mSv eine Distanz, die nur geringfügig größer ist als die typische Reichweite der prompten Waffeneffekte. Für die höheren Perzentile fallen die Distanzen höher aus, was auf nasse Deposition (*washout*) zurückzuführen ist.

Für den Fall, dass die Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“/„Sheltering“ in allen Bereichen, in denen die prognostizierte effektive Dosis in 7 Tagen den Wert von 10 mSv überschreitet, für die ersten 2 Tage bzw. die ersten 7 Tage nach der Explosion umgesetzt werden würde, ergeben sich aufgrund des hohen Anteils externer Strahlungsbeiträge deutlich geringere Dosen. Abb. 6-9 zeigt die prognostizierte effektive Dosis bei Umsetzung dieser Maßnahmen für verschiedene Schutzfaktoren. Die Dosisreduktion hängt vom Schutzfaktor des während dieser Zeit eingenommenen Schutzraums ab. Typische Werte für Schutzfaktoren (SF) liegen zwischen 3 und 100 bzw. einer Dosisreduktion durch externe Strahlung auf zwischen 0,33 und 0,01 des im Freien erhaltenen Werts. Bemerkenswert ist, dass der Unterschied zwischen einem SF von 50 und von 100 bei einer Shelteringdauer von 2 Tagen nur noch marginal ist, denn die verbleibende Dosis würde dann im Wesentlichen in der Zeit zwischen 2 und 7 Tagen aufgenommen (für die hier normale Lebensgewohnheiten unterstellt wurden). An dieser Stelle sei erneut auf die deutliche Unterschätzung der Dosis im Bereich kleiner einiger 10 km hingewiesen, sodass trotz dieser Ergebnisse davon ausgegangen werden muss, dass in diesem Bereich Dosen bis hin zu deterministischen Effekten erhalten werden könnten.

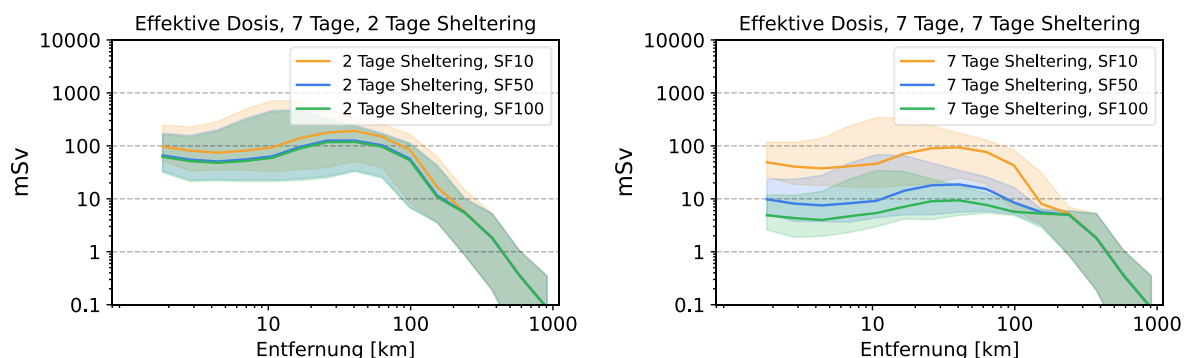


Abb. 6-9: Effektivdosis über 7 Tage für Erwachsene in Abhängigkeit von der Entfernung nach einer 10 kT bodennahen Kernwaffenexplosion unter Berücksichtigung der Maßnahme „Aufenthalt in Gebäuden“ für die ersten 2 Tage (links) bzw. die ersten 7 Tage (rechts) nach der Explosion für verschiedene Schutzfaktoren (Farben). Die durchgezogenen Linien geben den Median über 365 betrachtete Wetterszenarien an, der gefärbte Bereich das 80 % Überdeckungsintervall (vom 10. bis zum 90. Perzentil).

6.5.6 Organ-Äquivalentdosis der Schilddrüse durch inhalierte Iod-Isotope

Bezüglich der Organ-Äquivalentdosis der Schilddrüse durch inhalierte Iod-Isotope (in den ersten 7 Tagen) sind in Deutschland als radiologische Kriterien die Dosiswerte 250 mSv (Erwachsene) bzw. 50 mSv (Kinder) festgelegt (NDWV 2018), bei deren Überschreitung die Einnahme von stabilem Kaliumiodid als radiologisch angemessen angesehen wird. Für Erwachsene wird dieses Kriterium im Falle einer bodennahen 10 kT Explosion nicht überschritten, wie auch in Abb. 6-10 ersichtlich ist.

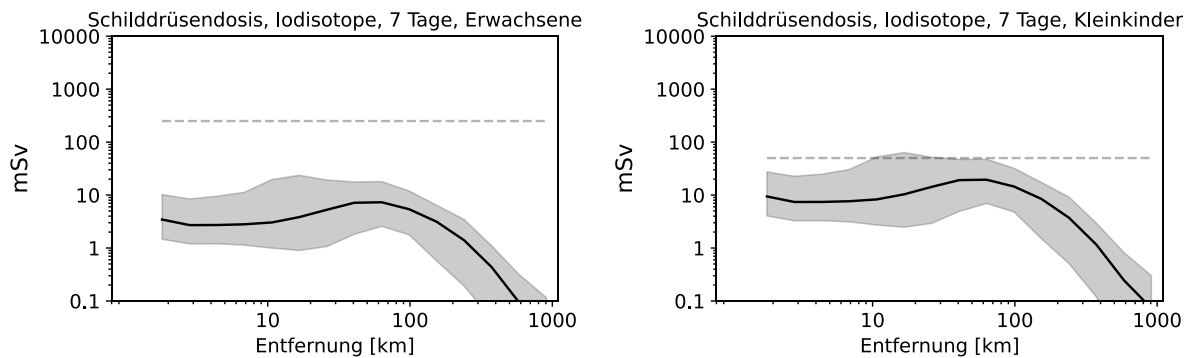


Abb. 6-10: Organäquivalentdosis der Schilddrüse durch in 7 Tagen inhalierte Iodisotope in Abhängigkeit von der Entfernung für Erwachsene (links) bzw. Kleinkinder (rechts) nach einer 10 kT bodennahen Kernwaffenexplosion bei unterstelltem Daueraufenthalt im Freien über 7 Tage. Die durchgezogene Linie gibt den Median über 365 betrachtete Wetterszenarien an, der graue Bereich das 80 % Überdeckungsintervall (vom 10. bis zum 90. Perzentil). Die gestrichelten grauen Linien stehen für die jeweiligen Dosiskriterien für die Iod-blockade von 250 mSv (Erwachsene) bzw. 50 mSv (Kleinkinder).

In seltenen Fällen kann das Kriterium für Kleinkinder prognostisch überschritten werden. Dabei bleibt aber anzumerken, dass diese Prognose tendenziell die Inhalationsdosis überschätzt (aufgrund der konservativen Berücksichtigung des Beitrags der Partikel größer als 10 μm , s. o.). Ferner ist sowohl der Anteil inhalierter Iodisotope an der Organdosis der Schilddrüse (die Organdosis der Schilddrüse wird vorrangig durch externe Exposition verursacht) sowie der Anteil der Inhalationsdosis an der gesamten Effektivdosis sehr gering, weshalb trotz möglicher Überschreitung des Dosiskriteriums von der Einnahme von stabilem Kaliumiodid abgesehen werden sollte, weil Kaliumiodid nicht gegen externe Strahlung schützt.

Die Aktivität radioaktiver Iodisotope (^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I und ^{135}I) macht nach einer Stunde bereits ca. 8 % der Gesamtaktivität des radioaktiven Fallouts aus. Der Anteil steigt bis ca. 60 h nach der Explosion sogar auf ca. 17 %. Allerdings beträgt der Anteil an der effektiven Dosis, der durch den Inhalationspfad aus der radioaktiven Wolke hervorgerufen wird, in den ersten 24 Stunden nach Explosion nur um 0,30 % (Kraus und Foster 2013). Dies liegt auch daran, dass bei ca. 88 % der radioaktiven Partikel ein Durchmesser $> 20 \mu\text{m}$ angenommen wurde. Modellierungen für eine 10 kT-Explosion zeigen, dass insgesamt die Inhalation von aerosolgebundenem Iod nur geringfügig zur effektiven Dosis sowie zur Schilddrüsendosis beiträgt und die Eingreifrichtwerte für eine Iodblockade voraussichtlich nicht erreicht werden. Für höhere Explosionsstärken kann der Eingreifrichtwert für die Iodblockade theoretisch überschritten werden, jedoch ist der relative Anteil der Schilddrüsendosis durch inhalierte Iodisotope im Vergleich zur Gesamtdosis der Schilddrüse aus allen Expositionspfaden so gering, dass eine Iodblockade nicht empfohlen wird.

6.5.7 Organ-Äquivalentdosen als Indikatoren für schwerwiegende deterministische Effekte

In (SSK 2014) wurde abgeleitet, dass als konservativer Schwellenwert einer Dosis für das Auftreten schwerwiegender deterministischer Effekte eine Äquivalentdosis von 1 000 mGy²⁰ für das rote Knochenmark sowohl für Kinder als auch Erwachsene angenommen werden kann. Aus den Berechnungen kann abgeleitet werden, dass diese Schwelle im 90. Perzentil für eine 10 kT Explosion innerhalb einer Entfernung von 95 km bei einem unterstellten Daueraufenthalt im Freien überschritten werden kann. Für das Szenario in Deutschland beträgt das 90. Perzentil der Personenzahlen, die eine solche Äquivalentdosis des roten Knochenmarks erreichen können ca. 225 000. Für die Luftexplosion wird diese Dosis hingegen nur dann in wenigen seltenen Fällen überschritten, wenn es in einer Distanz von einigen 10 km vom Explosionsort zu örtlich auftretenden Niederschlägen und dadurch zu *washout* kommt. Deshalb sind die diesbezüglichen Distanzen der Perzentile nicht in Tab. 6-4 angegeben, da das überwiegende Vorkommen vom nicht-Überschreiten des Dosiswerts keine verlässliche Berechnung zugehöriger Distanzperzentile erlaubt. Im betrachteten Extremfall für eine Luftexplosion betrug die Distanz, in der eine Äquivalentdosis von 1 000 mSv für das rote Knochenmark für Erwachsene überschritten wurde, noch 45 km.

Die Äquivalentdosis des Uterus wird als Ersatzdosis für den Fötus angesehen. Für deterministische Effekte am Fötus wurde in (SSK 2014) eine Schwelle von 100 mSv angenommen. Diese kann im 90. Perzentil bei einer bodennahen Explosion bis ca. 160 km Entfernung überschritten werden (bei einem unterstellten Daueraufenthalt im Freien), bei einer Luftexplosion bis ca. 75 km. Aufgrund wenig differenzierter Zahlen zur Bevölkerungsdichte und -struktur ist die Angabe potenziell betroffener Personen hier nicht verlässlich und wird somit nicht ermittelt.

²⁰ Durch die verwendete Berechnungsart kann die Dosis aufgrund der verfügbaren und verwendeten Dosis-konversionsfaktoren (ICRP) nur in mSv bestimmt werden. Aufgrund des überwiegenden Anteils externer Strahlung kann davon ausgegangen werden, dass die prognostizierten Dosen numerisch äquivalent zur Organ-Energiedosis bzw. zur Organ-Energiedosis gewichtet mit der relativen biologischen Effektivität (RBE-weighted) in der Einheit „Gray“ [Gy] sind.

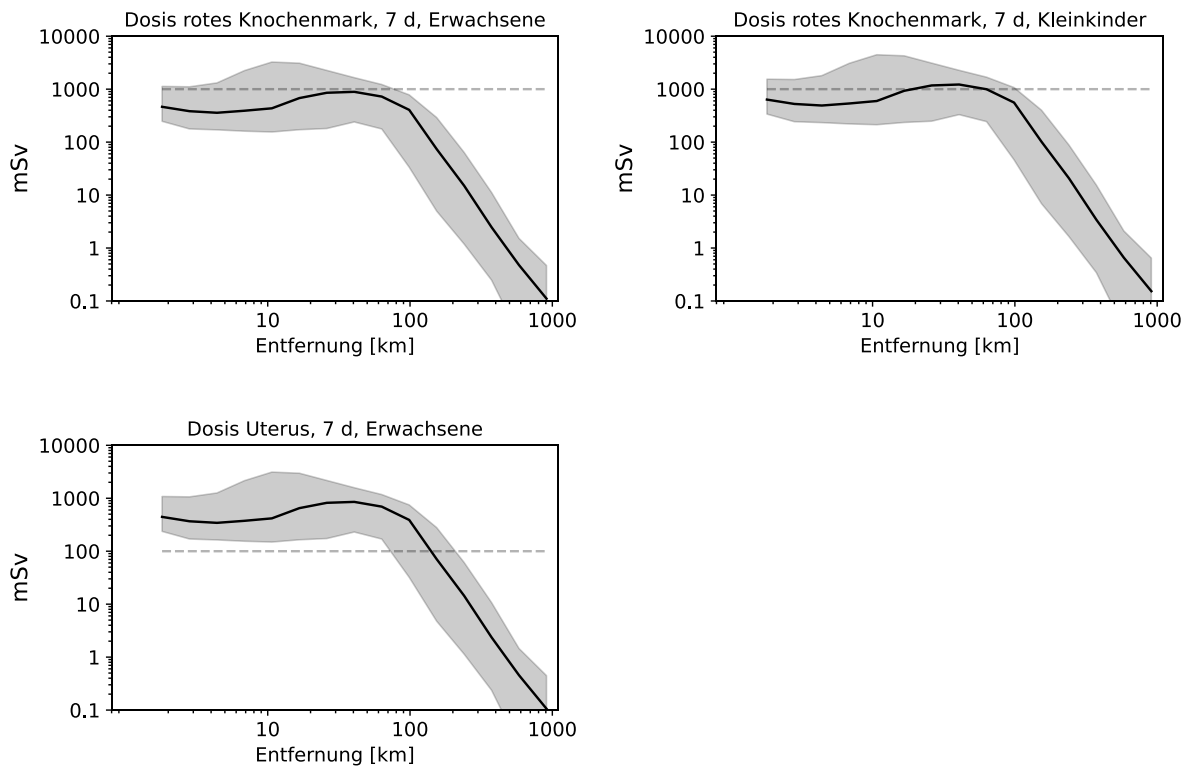


Abb. 6-11: Organäquivalentdosen des roten Knochenmarks (oben) und des Uterus (unten) innerhalb von 7 Tagen nach Entfernung für Erwachsene (links) bzw. Kleinkinder (rechts) nach einer 10 kT bodennahen Kernwaffenexplosion bei unterstelltem Daueraufenthalt im Freien über 7 Tage. Die durchgezogene Linie gibt den Median über 365 betrachtete Wetterszenarien an, der graue Bereich das 80 % Überdeckungsintervall (vom 10. bis zum 90. Perzentil). Die gestrichelten grauen Linien stehen für die jeweiligen Dosiskriterien für deterministische Effekte (1 000 mGy Dosis rotes Knochenmark, 100 mSv Dosis Uterus).

Tab. 6-4: Statistische Größen (50., 80., 90. Perzentil P50, P80, P90) der Entfernungen für Dosiskriterien für deterministische Effekte (1 000 mGy Äquivalentdosis des roten Knochenmarks, 100 mSv Äquivalentdosis des Uterus als Ersatzdosis für den Fötus) bei unterstelltem Daueraufenthalt im Freien über 7 Tage.

Organäquivalentdosis rotes Knochenmark		Beispielort			Deutschland			Luftexplosion		
		P50 [km]	P80 [km]	P90 [km]	P50 [km]	P80 [km]	P90 [km]	P50 [km]	P80 [km]	P90 [km]
Erwachsene	> 1 000 mGy	44	58	65	37	58	65	-	-	-
Kleinkinder	> 1 000 mGy	58	75	81	62	73	81	-	-	-
Organäquivalentdosis Uterus										
Erwachsene	> 100 mGy	106	141	162	100	153	161	3.7	53	75

6.5.8 Verbleibende Folgedosis als Indikator für die Anwendung medizinischer Maßnahmen und Dekontamination

Im ANoPI-Bund (BMUV 2023) ist festgelegt, dass im Falle von Erwachsenen bei einer abgeschätzten effektiven Folgedosis über 100 mSv eine strahlenmedizinische Behandlung in speziell vorgesehenen Krankenhäusern geprüft werden sollte. Ob dies nach einer Kernwaffenexplosion in den ersten Tagen geleistet werden kann, ist mehr als fraglich. Vorrang in jeglicher Versorgung haben Patientinnen und Patienten mit deterministischen Schäden und konventionellen lebensbedrohlichen Verletzungen. Über 200 mSv besteht nach ANoPI-Bund (BMUV 2023) die Indikation für eine Dekorporationstherapie, zwischen 20 mSv und 200 mSv soll eine individuelle Fallentscheidung getroffen werden. Es bleibt jedoch anzumerken, dass trotz dieser festgelegten Dosiswerte für Dekorporationstherapien aufgrund eines nicht existierenden universellen Dekorporationsmittels bei Aufnahme verschiedener Radionuklide und des überwiegenden Anteils externer Strahlung in den meisten Fällen in Folge einer Kernwaffenexplosion keine Indikation besteht.

Die verbleibende Folgedosis wird in Abb. 6-12 gezeigt. Dabei wird der Aufenthalt in Gebäuden in den betroffenen Gebieten innerhalb der ersten zwei Tage durch einen Reduktionsfaktor (0,33 bzw. Schutzfaktor 3) für die Inhalationsdosis und die externe Dosis sowie normale Lebensgewohnheiten mit (gegenüber Daueraufenthalt) reduziertem Aufenthalt im Freien angenommen.

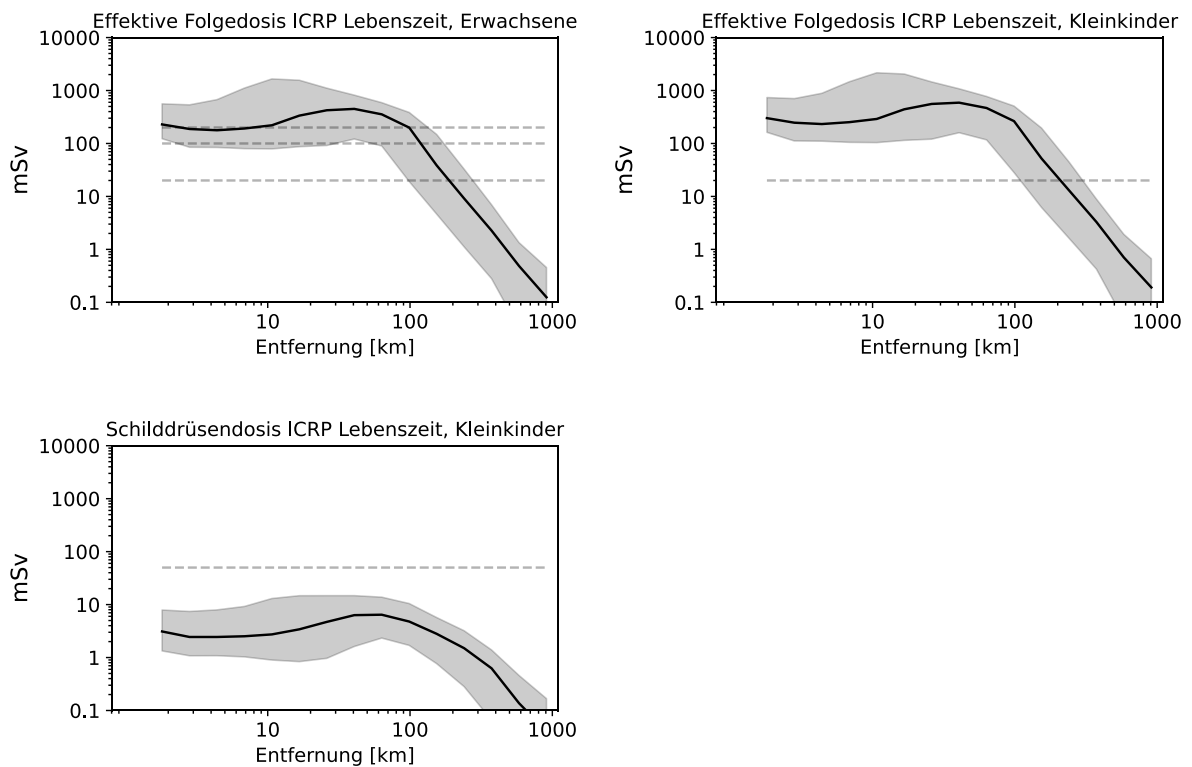


Abb. 6-12: Effektive Lebenszeitfolgedosis nach Berechnungsgrundlage der ICRP (oben: Erwachsene links, Kleinkinder rechts) und Lebenszeitäquivalentdosis der Schilddrüse für Kleinkinder (unten) in Abhängigkeit von der Entfernung zum Explosionsort einer bodennah gezündeten 10 kT Kernwaffe. Die durchgezogene Linie gibt den Median über 365 betrachtete Wetterszenarien an, der graue Bereich das 80 % Überdeckungsintervall (vom 10. bis zum 90. Perzentil). Die gestrichelten grauen Linien stehen für die jeweiligen Dosiskriterien für die Anwendung medizinischer Maßnahmen, wie sie im ANoPI-Bund (BMUV 2023) festgelegt sind.

Die Distanzen, in denen entsprechende Dosen für Erwachsene für eine bodennahe Explosion im 90. Perzentil überschritten sein können, ergeben sich nach den Berechnungen zu 100 km, 150 km bzw. 220 km, siehe Abb. 6-12, Tab. 6-5. Betroffene Gebietsgrößen betragen im 90. Perzentil 500 km², 950 km² bzw. 3000 km², woraus je nach Bevölkerungsdichte entsprechend betroffene Personenzahlen zu etwa 5000 bis 350000, 7500 bis 500000 bzw. 11000 bis 1100000 Personen abgeschätzt werden können.

Für Kinder besteht formal die Indikation nach dem ANoPI-Bund (BMUV 2023) für eine Dekorporationstherapie bereits ab 20 mSv verbleibender effektiver Folgedosis, was innerhalb von 230 km bzw. einer betroffenen Fläche von 3500 km² im 90. Perzentil (vgl. Abb. 6-11) erreicht wird. Auch in diesem Falle sollte bedacht werden, dass die externe Strahlung den überwiegenden Anteil dieser Dosis ausmacht und kein effektives Dekorporationsmittel für die angenommene Radionuklidinkorporation zur Verfügung steht.

Tab. 6-5: Statistische Größen (50., 80., 90. Perzentil P50, P80, P90) der Entfernungen für Lebenszeitfolgedosen (effektiv oben, Schilddrüse unten) für die im ANoPl-Bund (BMUV 2023) festgelegten Dosiskriterien für medizinische Behandlungen. Für die Berechnung der Lebenszeitfolgedosis wurde ein Aufenthalt in Gebäuden mit einem Schutzfaktor von 3 bzgl. der Inhalation und der Bodenstrahlung für die ersten 48 h angenommen

Lebenszeitfolgedosis effektiv		Beispielort			Deutschland		
		P50	P80	P90	P50	P80	P90
Erwachsene	> 200 mSv	78 km	94 km	102 km	75 km	102 km	112 km
	> 100 mSv	91 km	125 km	147 km	84 km	138 km	148 km
	> 20 mSv	152 km	201 km	216 km	145 km	216 km	247 km
Kleinkinder	> 20 mSv	165 km	213 km	226 km	161 km	233 km	259 km
Lebenszeitfolgedosis Organäquivalentdosis Schilddrüse							
Kleinkinder	> 50 mSv	wird nicht erreicht					

6.5.7 Oberflächenkontamination und Kontamination in landwirtschaftlichen Produkten

Die Angemessenheit landwirtschaftlicher Maßnahmen richtet sich gemäß ANoPl-Bund nach der Ortsdosisleistung. Ab $1 \mu\text{Sv h}^{-1}$ nach Wolkendurchzug sind generelle Maßnahmen angemessen, wie z. B. das Verschieben der Ernte, der Verzicht auf Nutzung von Oberflächengewässern als Viehtränke bzw. zur Bewässerung oder das Abdecken von Kulturflächen. Dieser Wert kann in über 800 km noch überschritten werden, sowohl für bodennahe Explosionen als auch für Luftexplosionen, besonders in Folge von Regenfällen. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass die Berechnungen lediglich bis zu Entfernungen von ca. 800 km bis 1 000 km (richtungsabhängig aufgrund eines quadratischen Rechengitters) durchgeführt wurden, so dass keine Aussagen für mögliche Überschreitungen jenseits dieser Distanzen möglich sind. Vermarktungsverbote aufgrund der Kontamination mit Radionukliden sind in EURATOM 2016/52 (EU 2016) geregelt und entsprechende Grenzwerte sind im ANoPl-Bund (BMUV 2023) übernommen worden. Für Kuhmilch gelten Grenzwerte von 125 Bq kg^{-1} für Sr-Isotope, 500 Bq kg^{-1} für I-Isotope und $1 000 \text{ Bq kg}^{-1}$ für Cs-Isotope. Diese Grenzwerte können in über 800 km Entfernung bei einer Fläche von $36 000 \text{ km}^2$ im 90. Perzentil noch überschritten werden. Ähnliches gilt hinsichtlich der Prognose der Kontamination von Blattgemüse, dessen Grenzwerte von 750 Bq kg^{-1} bzgl. Sr-Isotopen, $2 000 \text{ Bq kg}^{-1}$ bzgl. I-Isotopen und $1 250 \text{ Bq kg}^{-1}$ bzgl. Cs-Isotopen, im 90. Perzentil in über 800 km Entfernung bzw. auf einer Fläche von $77 000 \text{ km}^2$ überschritten werden können. Für die Luftexplosion ergeben sich im Rahmen dieser Berechnungen und dem betrachteten Rechengitter ähnliche Werte für die genannten Distanzen und betroffenen Flächen.

Insgesamt ist folglich davon auszugehen, dass landwirtschaftliche Maßnahmen sowie Verhaltensempfehlungen bei einer 10 kT Kernwaffenexplosionen in über 800 km bis 1 000 km Entfernung empfohlen werden müssten.

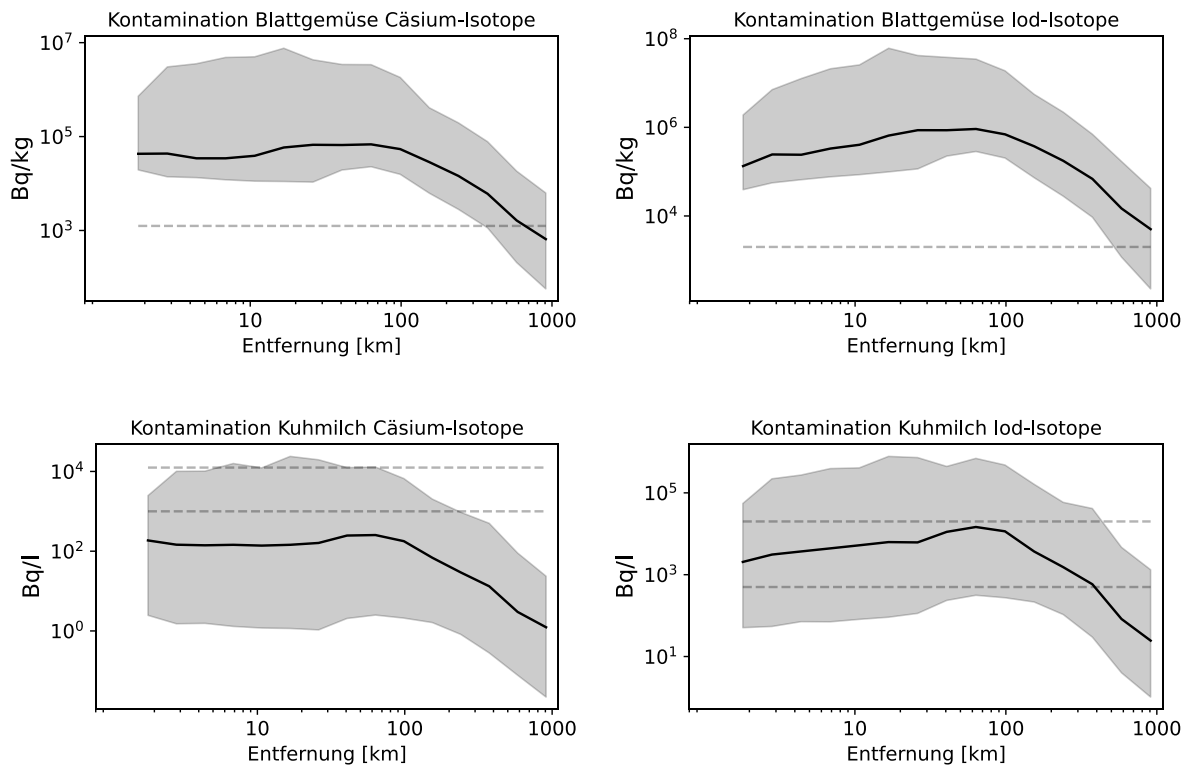


Abb. 6-13: *Modellierte Kontamination in landwirtschaftlichen Erzeugnissen (Blattgemüse oben, Kuhmilch unten) für die Nuklidgruppen Cäsium (links) und Iod (rechts) über die Entfernung zum Explosionsort einer bodennah gezündeten 10 kT Kernwaffe. Die durchgezogene Linie gibt den Median über 365 betrachtete Wetterszenarien an, der graue Bereich das 80 % Überdeckungsintervall (vom 10. bis zum 90. Perzentil). Die gestrichelten grauen Linien stehen für die festgelegten Grenzwerte für das Vermarktungsverbot aus EURATOM 2016/52 (EU 2016).*

6.6 Abhängigkeit der Effektdistanzen von der Explosionsstärke und der Explosionshöhe über Grund

Die Explosionsstärke beeinflusst die freigesetzte Menge an Radioaktivität linear: Bei doppelter Explosionsstärke wird auch näherungsweise doppelt so viel Radioaktivität freigesetzt. Die Dosisleistung bzw. die erhaltene Dosis in Gebieten, die von Fallout betroffen sind, skaliert aber nicht linear mit der Explosionsstärke. Bei stärkeren Explosionen wird auch ein größerer Anteil der Radioaktivität in höhere atmosphärische Schichten befördert. Üblicherweise herrschen dort größere Windgeschwindigkeiten als in bodennäheren Schichten, und typischerweise bestehen auch Windscherungen mit der Höhe über Grund. Deshalb reagiert die Vorhersage betroffener Gebiete unter typischen Wetterbedingungen sensitiv auf den Eingabeparameter der Explosionsstärke, die kurzfristig nach der Explosion auch nur näherungsweise geschätzt werden kann. Einfache Faustregeln, die eine Skalierung der im vorherigen Kapitel bestimmten typischen Effektdistanzen für die 10 kT-Explosion auf andere Explosionsstärken erlauben, lassen sich deshalb nicht allgemeingültig ableiten. Die Distanz vom Explosionsort, in der Dosiswerte überschritten werden, hängt neben der Explosionsstärke besonders von der vorherrschenden Wettersituation ab. Als schnelle Methode, um die Bereiche mit als gefährlich eingestuften Dosisleistungen für gegebene Explosionsstärken und gegebener effektiver Zuggeschwindigkeit

zu ermitteln, sei die Vorgehensweise in ATP-45²¹ erwähnt (NATO 2020), anhand derer die Zonen, in denen Expositionen von 1,5 Gy in 4 h bzw. 500 mGy in 24 h nach Einsetzen von Fallout auftreten können, mittels einer grafischen Methode zügig abgeschätzt werden können.

Als Beispiel für diese komplexen Zusammenhänge sollen die nachfolgenden Graphiken dienen, die die Modellierung der Oberflächenkontamination an ¹³⁷Cs nach Explosionen mit verschiedenen Eingabeparametern (500 kT, 100 kT, 10 kT, 1 kT, jeweils bodennah und 100 kT nicht-bodennah) am gleichen Explosionsort und zur gleichen Zeit jeweils 24 h nach der Explosion zeigen. Hierfür wurde ein vollständiger Satz an Wetterdaten des Wetter-Modells ICON-EU des DWD verwendet. Die Modelldomäne weist in der Höhe eine Ausdehnung bis ca. 22 km auf, während die entsprechende Domäne in RODOS derzeit lediglich 10 km beträgt. Diese Modellierung wurde durch eine angepasste Version des Lagrange-Partikelmodells FLEXPART (Pisso et al. 2019) realisiert, die sich derzeit nicht im operationalen Einsatz befindet, aber für wissenschaftliche Zwecke eine realistische Vorhersage für Explosionsstärken über 30 kT ermöglicht. Darüber hinaus lassen sich hier die Partikelgrößen im Unterschied zu RODOS als kontinuierliche Verteilung definieren (im Gegensatz zur diskretisierten Version aus Tab. 6-1).

In solchen Modellierungen, wie z. B. in Abb. 6-14, zeigt sich deutlich, dass sich mit der Explosionsstärke sowohl die Höhe der resultierenden Kontaminationen ändert, als auch die Ausdehnung der betroffenen Gebiete sowie deren räumlichen Bezug zum Explosionsort. Für dieses Beispiel beträgt die Windscherung mit der Höhe ca. 30°. Für stärkere Windscherungen würden sich noch deutlich stärkere Unterschiede in den betroffenen Gebieten ergeben. Ebenso sind hohe Depositionen, besonders bei den stärkeren Explosionen noch in mehreren hundert km Entfernung zu erkennen, die sich aufgrund von nasser Deposition (*washout*) ergeben. Für das Auftreten nasser Deposition spielt auch die Verfrachtungshöhe der Radioaktivität eine Rolle, da bei größeren Explosionsstärken ein erheblicher Teil der Radioaktivität über der Wolken-decke befindet und somit durch Niederschlag nicht mehr deponiert werden kann.

Das Beispiel illustriert auch den Einfluss der Explosionshöhe über Grund, die bei gleicher Explosionsstärke ebenfalls zu einer deutlichen Verschiebung der betroffenen Gebiete führen kann und in jedem Fall zu wesentlich geringeren Depositionsdichten führt. Dies ist dadurch bedingt, dass bei Explosionen über Grund eine wesentlich abweichende Partikelgrößenverteilung auftritt (Abb. 6-3). Bemerkenswert ist dabei, dass trotzdem lokal und in großer Entfernung ähnlich hohe Depositionswerte durch *washout* auftreten, wie es bei einer vergleichbaren bodennahen Explosion der Fall ist. Zusammenfassend kann aus diesem Beispiel abgeleitet werden, dass die Vorhersage der Ausdehnung und Lage betroffener Gebiete und die darin erhaltenen Dosen im Falle einer Kernwaffenexplosion mit noch erheblicheren Unsicherheiten verbunden ist, als das beispielsweise bei KKW-Unfällen der Fall ist. Insofern spielt die Verfügbarkeit und Qualität von Beobachtermeldungen und Messdaten eine entscheidende Rolle für nachfolgende Schutzreaktionen, da diese zum einen sensible Eingabedaten für Ausbreitungsmodellierungen liefern, zum anderen Sicherheit in entsprechenden Modellierungen geben können, insbesondere, da Messdaten verhältnismäßig früh verfügbar sein werden, bzw. bei solchen Ereignissen in der Regel von einer sehr kurzen bis zu keiner Vorwarnzeit auszugehen ist.

21

ATP: Allied Tactical Publication der NATO

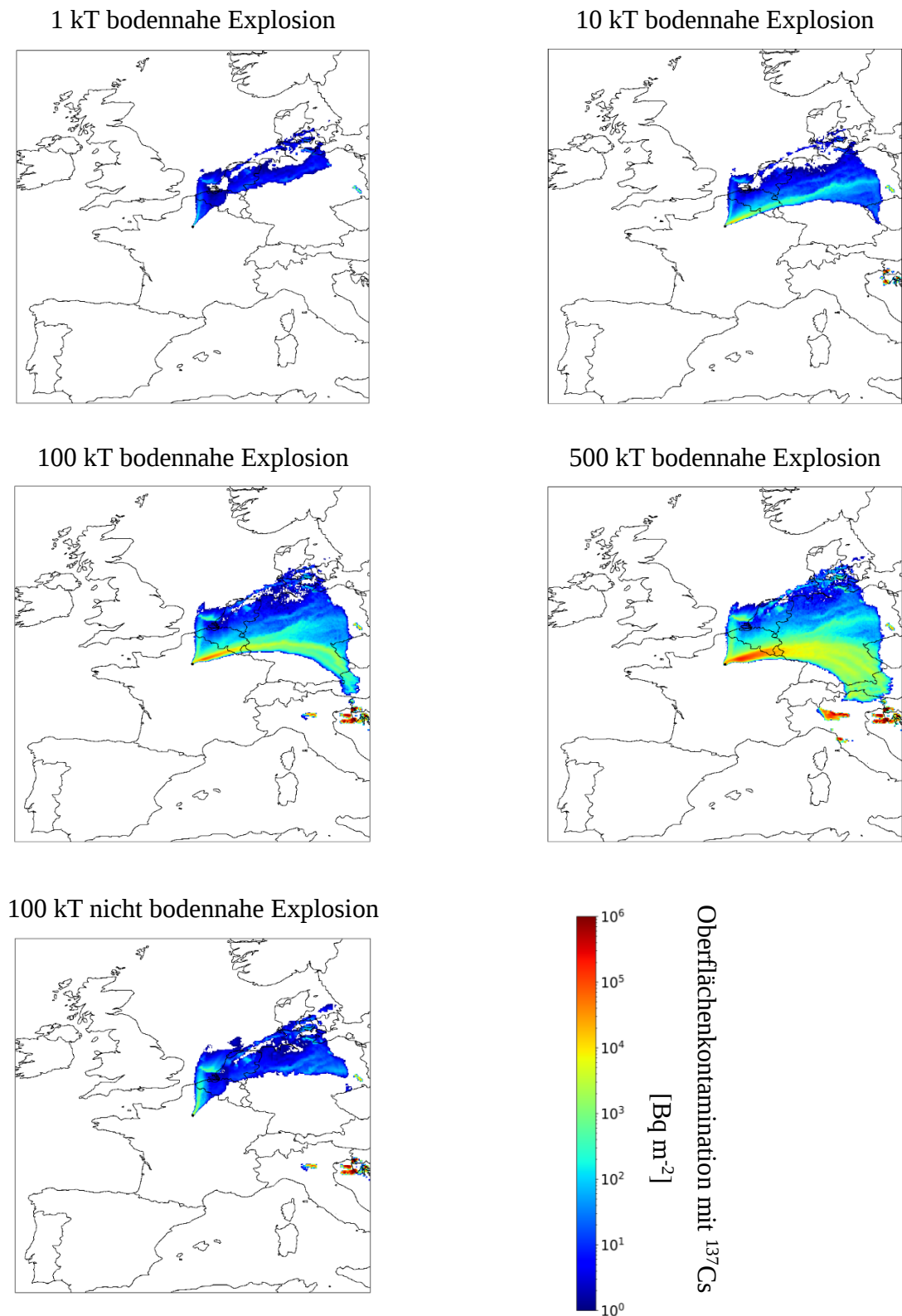


Abb. 6-14: Modellerte Oberflächenkontamination mit ^{137}Cs für verschiedene Explosions-szenarien: 1 kT, 10 kT, 100 kT, 500 kT bodennah sowie 100 kT nicht-bodennah. Kontaminationen im Süden aufgrund von lokalen Regenfällen. Atmosphärische Ausbreitungsrechnungen mit einer adaptierten Version von FLEXPART und den numerischen Wettervorhersagedaten ICON-EU des DWD vom 19.02.2021, 12 Uhr UTC

6.7 Bisherige Planungen und Prozeduren für die Notfallreaktion im Falle einer Kernwaffenexplosion

Im Falle einer Kernwaffenexplosion im In- oder grenznahen Ausland ist davon auszugehen, dass es durch Beobachter der NATO zunächst zur Schätzung der Explosionsstärke ausgehend von visuellen Beobachtungen des sich ausbildenden Atompilzes kommt. Die NATO ATP-45 (NATO 2020) sieht dafür (militärische) Warn- bzw. Meldeverfahren vor, sodass in den ersten Meldungen mit Informationen zur Ermittlung der Explosionsstärken erwartet werden können. Ferner liefert die ATP-45 zwei – verschieden komplexe – graphische Verfahren, durch die die Verbreitung des Fallouts ausgehend von einer effektiven Windgeschwindigkeit und -richtung bzw. höhenabhängigen Winddaten abgeschätzt werden kann. Zu diesem Zweck liegen in ATP-45 verschiedene Nomogramme vor. Formal sieht die ATP-45 die Festlegung zweier Zonen vor, Zone I in der 1,5 Gy innerhalb von 4 h nach dem Eintreffen des Fallouts erreicht werden können, und Zone II in der über 500 mGy innerhalb von 24 h erreicht werden können. Diese Zonen sind dazu gedacht, die militärisch bzw. taktischen Auswirkungen des Fallouts zu bewerten, nicht jedoch zur Bewertung der kurz- bzw. längerfristigen Auswirkungen auf die Zivilbevölkerung. Dennoch ist davon auszugehen, dass Zone I in etwa den Bereich abdeckt, in dem mit kurzfristig eintretenden, deterministischen Auswirkungen zu rechnen ist, sofern keine Maßnahmen ergriffen werden. Im radiologischen Lagebild werden diese beiden Zonen bei einer Kernwaffenexplosion zusätzlich ausgewiesen.

Bezüglich der Reaktion auf radiologische Notfälle im Sinne des StrlSchG (StrlSchG 2017), gilt seit 2023 der ANoPI-Bund (BMUV 2023), der die Notfallreaktion für 15 Referenzszenarien festlegt. Zentral ist das radiologische Lagebild des Bundes, in dem – sofern erfüllt – nur die radiologischen Kriterien für die Angemessenheit von Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung für bestimmte Gebiete dargelegt werden, die im Anschluss von den zuständigen Behörden unter Berücksichtigung weiterer nicht-radiologischer Aspekte (z. B. Verfügbarkeit von Ressourcen oder Durchführbarkeit von Maßnahmen) umgesetzt werden können. Im ANoPI-Bund ist das Referenzszenario S14 „Nuklearwaffenexplosion“ aufgeführt, wenn auch die dortigen Bestimmungen nicht für Notfälle im Zusammenhang mit Spannungs- oder Verteidigungsfällen gelten. Die Planung für radiologische Notfälle im Zusammenhang mit Spannungs- oder Verteidigungsfällen erfolgt in der „Konzeption Zivile Verteidigung“ (BMI 2016). In 2024 wurden neue Rahmenrichtlinien für die Gesamtverteidigung – Gesamtverteidigungsrichtlinien – (RRGV) (BMI 2024) erstellt. Allerdings können die Regelungen der Notfallpläne nach StrlSchG (StrlSchG 2017) und ANoPI-Bund (BMUV 2023) ganz oder teilweise auf radiologische Notfälle entsprechend anwendbar sein, die sich im Rahmen von Spannungs- oder Verteidigungsfällen ereignen, soweit die KZV (BMI 2016) keine speziellen Regelungen für solche radiologischen Notfälle enthält.

Typisch für die meisten Notfallszenarien gemäß ANoPI-Bund (BMUV 2023) ist, dass eine Vorwarnzeit besteht bzw. es zu einer Vorfreisetzungsphase kommt. Während dieser Phase können aus radiologischer Sicht angemessene Maßnahmen und deren Gebiete bereits durch Ausbreitungsrechnungen mit dem Entscheidungshilfesystem RODOS durch das BfS in Zusammenarbeit mit dem deutschen Wetterdienst (DWD) bestimmt werden, insbesondere sobald ein Quellterm vorliegt. Im Falle der Kernwaffenexplosion ist allerdings zu erwarten, dass die Vorwarnzeit sehr gering ausfällt, bzw. unter Umständen sogar vollständig entfällt. Trotzdem kann in solchen Fällen rasch ein repräsentativer Quellterm abgeschätzt werden, sofern die Explosionsstärke bekannt ist (wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben). Dafür benötigt das RLZ-Bund Informationen zu Beobachtungen und zur Lage vor Ort (u. a. „Beobachtermeldungen“), um die ersten prognostischen Abschätzungen der Strahlenexposition der Bevölkerung zu ermöglichen. Idealerweise liegen darüber hinaus Informationen darüber vor, ob es sich um eine bodennahe oder eine Luft-Explosion handelt. Derzeit ist für diese Mel-

dewegen noch kein Verfahren festgelegt, insbesondere nicht für Kernwaffenexplosion im grenznahen Ausland. Aufgrund des Zeitbedarfs für die Alarmierung, für die Herstellung der Einsatzbereitschaft des RLZ-Bund, die Erstellung von Ausbreitungsprognosen bzw. die Bewertung der Situation und für die Erstellung des Lagebilds und dessen Freigabe, ist nicht davon auszugehen, dass das radiologische Lagebild örtliche Katastrophenschutzbehörden und die betroffene Bevölkerung schneller als 1 bis 2 Stunden nach der Explosion erreicht. In dieser Zeit kann der Fallout bereits bis zu 200 km zurücklegen, sodass die Anwendbarkeit von Schutzmaßnahmen abgeleitet aus Ausbreitungsrechnungen für diese Zone eingeschränkt ist. Dies spricht dafür, dass erste schnelle Empfehlungen für Schutzmaßnahmen für kreisförmige Gebiete um den Explosionsort ohne Berücksichtigung der aktuellen Windrichtung ausgesprochen werden.

Sobald Fallout das deutsche Staatsgebiet erreicht, bzw. bei einer Kernwaffenexplosion im deutschen Staatsgebiet ist davon auszugehen, dass praktisch sofort auch Messdaten durch das engmaschige deutsche Ortsdosisleistungsmessnetz vorliegen. Damit können die Ergebnisse der Ausbreitungsmodellierung sukzessive angepasst werden, wobei jedoch keine Automatisierung dafür bisher operationell einsetzbar ist. Mit Fortschreiten des Ereignisses kann die Angemessenheit von Maßnahmen auf Basis der Messdaten durch eine Rekonstruktion der Dosis ausgehend von erhaltenen Messdaten überprüft bzw. angepasst werden. Dies beinhaltet auch Entscheidungen über zusätzliche Schutzmaßnahmen wie z. B. eine nachträgliche Evakuierung der Bevölkerung aus hoch kontaminierten Gebieten. In der Nähe der Explosion können jedoch die Datenübertragung bzw. die Sonden des Ortsdosisleistungsmessnetz selbst durch den NEMP oder durch die Zerstörung von Infrastruktur beeinträchtigt sein. Gegenwärtig führt das BfS – in Zusammenarbeit mit der Bundeswehr – Untersuchungen durch, wie empfindlich das Ortsdosisleistungsmessnetz auf einen NEMP reagieren würde und wie es ggf. gegen einen NEMP besser geschützt („gehärtet“) werden kann.

7 Bisherige Erkenntnisse zu Gesundheitseffekten von stattgefundenen Kernwaffenexplosionen

Bisherige Erkenntnisse zu den Folgen von Kernwaffenexplosionen beruhen auf Forschungen an den Opfern und Überlebenden der Atombombenabwürfe in Hiroshima und Nagasaki 1945 sowie an Beteiligten und Bevölkerungsgruppen, die durch Kernwaffenversuche exponiert wurden. Im Folgenden werden die wichtigsten Daten zu Eigenschaften der verwendeten Kernwaffen (Sprengkraft, Explosionshöhe, für Exposition kritische Designmerkmale), Daten zur Exposition und – sofern vorhanden – zu durchgeführten Schutzmaßnahmen zusammengefasst. In der Literatur verfügbare epidemiologische Abschätzungen von beobachteten Gesundheitseffekten werden ebenfalls zusammengefasst. Einen umfassenden Überblick über Dosisschätzungen für lokale Bevölkerungsgruppen (bis zu einigen 100 km Entfernung vom Explosionsort) um die 16 wichtigsten Testorte (außer Trinity) findet sich in einer Publikation von Simon und Bouville (2002) (siehe Tab. A 1).

7.1 Atombomben in Hiroshima und Nagasaki

7.1.1 Gesundheitseffekte Hiroshima und Nagasaki

7.1.1.1 Die Explosionen über Hiroshima und Nagasaki

Am 6. August 1945 um 8:15 explodierte über Hiroshima die erste für militärische Zwecke eingesetzte Atombombe („*little boy*“). Drei Tage später folgte am 9. August um 11:02 Uhr die zweite Atombombenexplosion über Nagasaki („*fat man*“). Zum Zeitpunkt der Explosionen befanden sich in Hiroshima etwa 350 000 Bewohner, in Nagasaki etwa 270 000 Bewohner (Tomonaga 2019). Die über Hiroshima in einer Höhe von $600 \text{ m} \pm 20 \text{ m}$ explodierte Bombe basierte auf der Spaltung von ^{235}U , wobei zwei Hälften mit jeweils subkritischer Masse und Dichte aufeinander geschossen wurden, um eine kritische Masse zu erzeugen und so eine nukleare Kettenreaktion in Gang zu setzen. Die über Nagasaki in einer Höhe von etwa $503 \text{ m} \pm 10 \text{ m}$ explodierte Bombe basierte dagegen auf der Spaltung von ^{239}Pu , wobei hier die Kettenreaktion in Gang gesetzt wurde, indem eine ausreichende Menge an Plutonium mit relativ geringer Dichte durch die Explosion von konventionellem Sprengstoff auf eine hohe Dichte komprimiert wurde. Trotz der unterschiedlichen Funktionsweise hatten beide Bomben eine ähnliche Bombenstärke – für die Hiroshimabombe wird eine Stärke von $16 \text{ kT} \pm 2 \text{ kT TNT}$, für die Nagasaki-Bombe eine Stärke von $21 \text{ kT} \pm 2 \text{ kT TNT}$ angegeben (Young und Kerr 2005). Entsprechend waren die Folgen der Explosionen für die Bewohner beider Städte ähnlich.

Die bei einer Atombombenexplosion freigesetzte Energie verteilt sich auf die entstehende Druckwelle, die Hitzestrahlung sowie auf die ionisierende Strahlung (Gammastrahlung und Neutronen). Beispielsweise wurde für die Atombombe von Hiroshima abgeschätzt, dass sich etwa 50 % der Energie auf die Druckwelle, 35 % die Hitzestrahlung und 15 % die ionisierende Strahlung verteilte. Entsprechend starben nahe der Ground Zeros viele der Betroffenen an den Folgen der Druckwelle (sie wurden z. B. erschlagen durch umherfliegende Trümmer), der Hitzestrahlung (zum Beispiel kam es zu schweren Verbrennungen der Opfer, die auch in den entstandenen Feuern umkamen) und der ionisierenden Strahlung (an den akuten Gesundheitseffekten hoher Strahlendosen, sog. deterministischer Effekte oder Gewebereaktionen) (Shigematsu et al. 1995).

Die Zahl der Todesopfer durch die akuten Folgen der Explosionen ist nur schwer abzuschätzen. Zahlen, die in der Literatur für einen Beobachtungszeitraum bis Ende 1945 (ca. 5 Monate) häufig genannt werden, sind etwa 140 000 Todesopfer in Hiroshima und etwa 70 000 in Nagasaki (Tomonaga 2019).

7.1.1.2 Strahlendosen durch initiale Strahlung

In beiden Fällen entwickelte sich mit Einsetzen der Kettenreaktionen ein aus Gammastrahlung und Neutronen bestehendes Strahlungsfeld, das sich ausbreitete und in Abhängigkeit vom Abstand von den Ground Zeros der Explosionen zur Strahlenexposition der Bewohner beider Städte führte. Abb. 7-1 und Abb. 7-2 zeigen die Positionen der Mitglieder der Kohorte von Atombombenüberlebenden, an denen bis heute Untersuchungen zu den Langzeitfolgen dieser Strahlenexposition durchgeführt werden (Life Span Study – LSS), zum Zeitpunkt der Explosionen (Cullings et al. 2017). Die Farbkodierung gibt die Energiedosen wieder, wie sie für die Überlebenden im Rahmen des Dosimetriesystems DS02R1 abgeschätzt wurden. Dabei wird die Summe der Kerma von Gammastrahlung und Neutronen in Luft 1 m über dem Boden angegeben. Die Erarbeitung des Dosimetriesystems war äußerst komplex und erforderte u. a. die individuelle Erfassung des Aufenthaltsortes von Personen, der modellierten für Einzelpersonen, bis hin zu Nachbauten von Häusern. Es fällt auf, dass in beiden Städten selbst innerhalb eines Abstands von etwa 1 000 m vom Ground Zero Personen überleben konnten, wenn auch sehr wenige. Diese Personen befanden sich an Orten mit starker Abschirmung, was auch dazu führte, dass die Strahlendosen dieser Überlebenden nicht verlässlich abgeschätzt werden konnten (schwarze Punkte in Abb. 7-1 und Abb. 7-2). Die in Abb. 7-1 und Abb. 7-2 gezeigten Dickdarm-Dosiswerte umfassen in Abhängigkeit vom Abstand zum Ground Zero Werte von weniger als 5 mGy bis zu Werten von mehr als 2 Gy (Cullings et al. 2017).

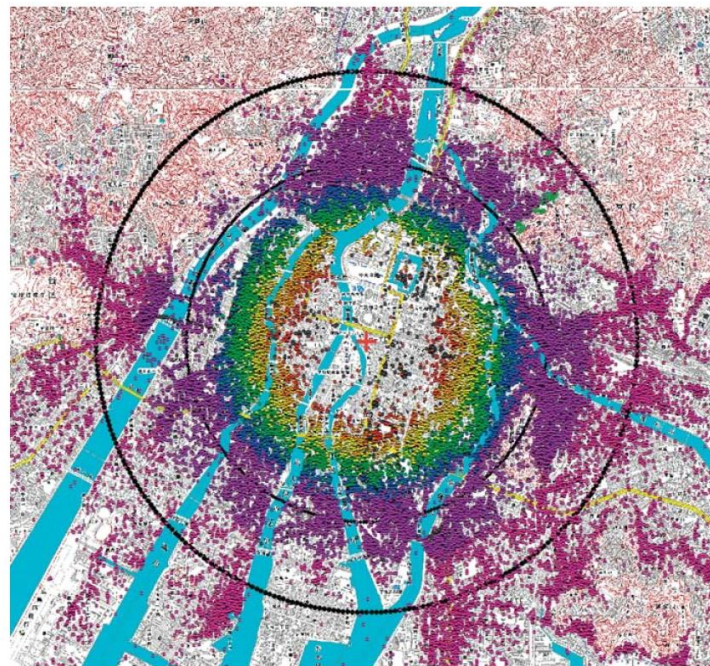


Fig. 20. Revised survivor locations in Hiroshima. Map: Digital Map 25000, Geographical Survey Institute of Japan, 2002. Circles of black dots at 2 and 3 km from hypocenter. Color key, in order of drawing, starting with bottom layer: dark gray = unknown dose; pink < 5 mGy weighted, adjusted colon dose; purple 5 to 100; blue 100 to 200; green 200 to 500; yellow 500 to 1,000; orange 1,000 to 2,000; red > 2,000.

Abb. 7-1 Aufenthaltsort von Personen zum Zeitpunkt der Atombombenexplosion über Hiroshima, die im Rahmen der Life Span Study (LSS) nachbeobachtet werden. Rotes Kreuz – Ground Zero der Explosion; Schwarze Ringe markieren Abstände von 2000 m und 3000 m vom Ground Zero. Farbkodierung der Punkte kodiert die abgeschätzte Dickdarm-Strahlendosis bei der die Neutronendosis mit einem Faktor von 10 einging: schwarz – unbekannte Dosis; rot - > 2 000 mGy; orange – 1 000 mGy – 2 000 mGy; gelb: 500 mGy – 1 000 mGy; grün – 200 mGy – 500 mGy; blau: 100 mGy – 200 mGy; lila: 5 mGy – 100 mGy; violett: < 5 mGy (aus Cullings et al. 2017). Das Stadtgebiet ist in grau hinterlegt.

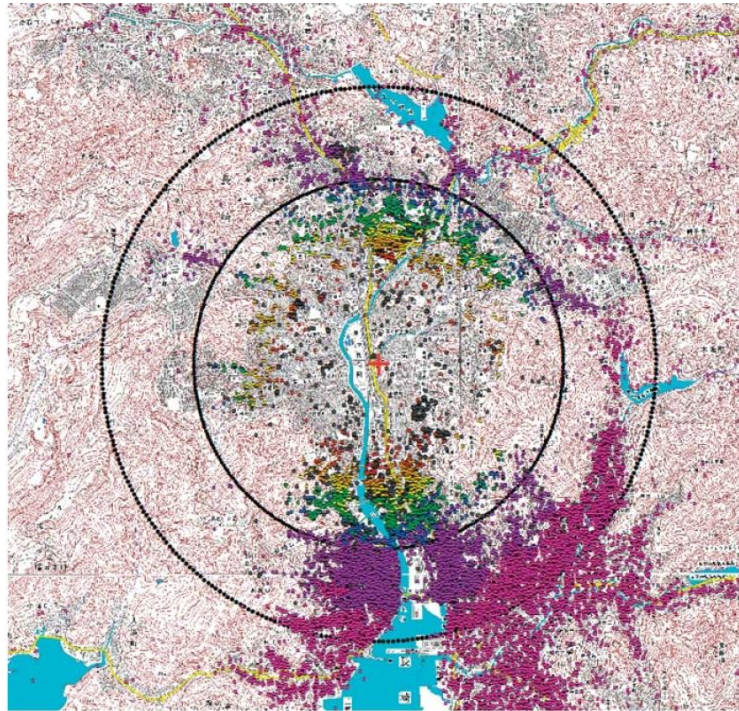


Fig. 21. Revised survivor locations in Nagasaki. Map: Digital Map 25000, Geographical Survey Institute of Japan, 2002. Circles of black dots at 2 and 3 km from hypocenter. Color key same as Fig. 20.

Abb. 7-2: Aufenthaltsort von Personen zum Zeitpunkt der Atombombenexplosion über Nagasaki, die im Rahmen der Life Span Study (LSS) nachbeobachtet werden. Rotes Kreuz: Ground Zero der Explosion. Schwarze Ringe markieren Abstände von 2000 und 3000 m vom Ground Zero. Farbkodierung der Punkte kodiert die abgeschätzte Dickdarm-Strahlendosis bei der die Neutronendosis mit einem Faktor von 10 einging: schwarz – unbekannte Dosis; rot - > 2 000 mGy; orange – 1 000 mGy – 2 000 mGy; gelb: 500 mGy – 1 000 mGy; grün – 200 mGy – 500 mGy; blau: 100 mGy – 200 mGy; lila: 5 mGy – 100 mGy; violett: < 5 mGy (aus Cullings et al. 2017). Das Stadtgebiet ist in grau hinterlegt.

7.1.1.3 Strahlendosen durch Fallout

Für die Abschätzung der Folgen des Fallouts ist ein Vergleich mit Reaktorunfällen informativ. Bei den Reaktorunfällen von Tschornobyl und Fukushima, die kommerzielle Leistungsreaktoren mit einem typischen Inventar an spaltbarem Material von ca. 100 t bis 200 t pro Reaktorblock betrafen, wurden beträchtliche Mengen radioaktiven Materials freigesetzt. Kürzlich schätzte UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) für die radiologisch besonders relevanten Radionuklide ^{131}I und ^{137}Cs ab, dass beim Unfall von Tschornobyl etwa 1 730 PBq ^{131}I und 85 PBq ^{137}Cs in die Atmosphäre freigesetzt worden waren, während es beim Unfall von Fukushima etwa 120 PBq ^{131}I bzw. 10 PBq ^{137}Cs waren (UNSCEAR 2022). Während in Japan nach dem Unfall Fallout insbesondere in der näheren Umgebung niederging, wurden nach dem Unfall von Tschornobyl vergleichsweise große Flächen in der Ukraine, in Weißrussland und Russland kontaminiert, und auch weite Teile Westeuropas waren betroffen. In Deutschland waren insbesondere im süddeutschen Raum relativ hohe Depositionen von radioaktivem Material zu beobachten, da es, während radioaktive Luftmassen über das Land zogen, zu relativ starken Niederschlägen kam. In der Folge konnte beispielsweise im Raum München eine ^{137}Cs -Deposition in der Größenordnung von 20 kBq m⁻² nachgewiesen werden, wobei lokal entsprechend der Niederschlagsverteilung in Südbayern noch deutlich höhere Werte beobachtet wurden (LfU 2006).

Die über Hiroshima und Nagasaki eingesetzten Bomben enthielten im Vergleich zu den in Tschornobyl und Fukushima betroffenen Reaktorkernen relativ geringe Mengen spaltbaren

Materials (in der Größenordnung von 60 kg Uran bzw. 10 kg Plutonium). Dieses Material wurde nach den Explosionen zusammen mit Aktivierungsprodukten in größere Höhen der Atmosphäre verfrachtet („Atompilz“) und dann entsprechend der herrschenden meteorologischen Bedingungen (Windrichtung etc.) weiter verteilt. Etwa eine halbe Stunde nach den Explosionen wurde lokal von Regenfällen berichtet, die von den Überlebenden als schwarzer Regen („black rain“) beschrieben wurden (z. B. Shizuma et al. 2012). Dies führte in einer Entfernung von etwa 3 000 m westlich vom Ground Zero in Hiroshima (Koi-Takasu) und östlich vom Ground Zero in Nagasaki (Nishiyama) zu relativ eng begrenzten Bereichen mit einer Fläche von einigen 10 000 m², in denen eine erhöhte radioaktive Kontamination und eine erhöhte externe Gammadosisleistung nachgewiesen wurden.

Ergebnisse von direkten Messungen von Bodenkontaminationen aus beiden Städten sind rar, und deren Interpretation wird erschwert durch die Tatsache, dass es durch den Fallout der oberirdischen Kernwaffentests in den 1950er und zu Beginn der 1960er Jahre in den Breitengraden von Japan typischerweise zu einer ¹³⁷Cs-Deposition von etwa 4 kBq m⁻² kam (UNSCEAR 1982). Im Abschlussbericht zum Dosimetriesystem DS86 wird von einer Bodenprobe aus Nagasaki berichtet, die vor den oberirdischen Kernwaffentests genommen worden war. Aus dieser Probe wurde – korrigiert auf den Zeitpunkt der Explosion – eine ¹³⁷Cs-Deposition von etwa 5 kBq m⁻² abgeschätzt. Messungen an später genommenen Proben deuten auf höhere Werte von bis zu 30 kBq m⁻² hin (Roesch 1987). Für Hiroshima werden im DS86-Bericht keine Werte für die ¹³⁷Cs-Deposition angegeben.

Etwa 10 Jahre nach Veröffentlichung des DS86-Berichts (Roesch 1987) untersuchten Shizuma und Mitarbeiter mehr als 20 Bodenproben aus Hiroshima, die drei Tage nach der Explosion im Umkreis von maximal 5 300 m vom Ground Zero gesammelt worden waren und daher nicht vom Fallout der oberirdischen Kernwaffentests betroffen waren. Aus den in diesen Proben gemessenen ¹³⁷Cs-Aktivitätskonzentrationen leiteten Shizuma und Mitarbeiter für die meisten Proben eine ¹³⁷Cs-Deposition von typischerweise 15 Bq m⁻² ab. Die einzige Probe, die im Fallout-Bereich lag, ergab dagegen eine deutlich höhere ¹³⁷Cs-Deposition von etwa 500 Bq m⁻² (Shizuma et al. 1996).

Für beide Städte wurde, z. B. zusammenfassend in einem Buch herausgegeben von Roesch (1987), von Ergebnissen früher Messungen der Ionendosisleistung berichtet. Auf der Basis derartiger Messungen und unter der Annahme einer kontinuierlichen kumulativen Exposition ab einem Zeitpunkt von einer Stunde nach den Explosionen wurden in diesem Buch für Hiroshima für Bewohner im Falloutbereich mit den höchsten Dosisleistungen kumulative Ionendosis-Werte im Bereich von ca. $2,6 \cdot 10^{-4}$ C kg⁻¹ bis ca. $7,8 \cdot 10^{-4}$ C kg⁻¹ (im Original 1 R bis 3 R) angegeben (Roesch 1987, Shizuma et al. 1996). Da in der Originalliteratur keine detaillierte Umrechnung von Ionendosis zu Energiedosis angegeben ist, nimmt die SSK an, dass dies in etwa einer Energiedosis von 10 mGy bis 30 mGy entspricht. Für Nagasaki lauten die entsprechenden Werte ca. $52 \cdot 10^{-4}$ C kg⁻¹ bis ca. $104 \cdot 10^{-4}$ C kg⁻¹ (im Original 20 R bis 40 R (Roesch 1987, Shizuma et al. 1996)). Dies entspricht also in etwa einer Energiedosis von 200 mGy bis 400 mGy. Diese Dosisangaben sind aber mit hohen, jedoch schwer zu quantifizierenden Unsicherheiten behaftet. Daher werden die Dosisbereiche nur als Richtwerte angegeben. Weder der Kernwaffeneinsatz in Hiroshima noch der in Nagasaki können als Fallout-Beispiel einer Kernwaffenexplosion dienen, die in Bodennähe erfolgt.

7.1.1.4 Strahlendosen durch Bodenaktivierung

In Hiroshima und Nagasaki führte die Neutronenkomponente des Strahlenfeldes, das bei den Explosionen entstanden war, dazu, dass der Boden in Abhängigkeit von seiner chemischen Zusammensetzung und vom Abstand vom Ground Zero aktiviert wurde. Dabei entstand eine Vielzahl von Radionukliden, die je nach physikalischer Halbwertszeit zur Dosisrate am

betreffenden Ort beitrugen. Laut Imanaka et al. (2008) waren für die Dosisleistung die wichtigsten entstandenen Radionuklide ^{28}Al ($t_{1/2}$: 2,24 m), ^{56}Mn ($t_{1/2}$: 2,58 h), ^{24}Na ($t_{1/2}$: 15,0 h) und ^{46}Sc ($t_{1/2}$: 83,8 Tage). Auf der Basis des Dosimetriesystems DS02 schätzten sie beim Ground Zero eine Minute nach der Explosion für Hiroshima eine Dosisleistung durch aktivierten Boden von 6 Gy h^{-1} ab, für Nagasaki entsprechend 4 Gy h^{-1} . Einen Tag später waren die Dosisleistungen bereits um einen Faktor 1 000, eine Woche später um einen Faktor 1 000 000 geringer. Dies hätte bei einem hypothetischen dauerhaften Aufenthalt am Ground Zero eine kumulative Dosis von 1,2 Gy in Hiroshima und 0,6 Gy in Nagasaki ergeben. Bei einem Abstand von 500 m von den Ground Zeros ergaben sich um einen Faktor 10, bei einem Abstand von 1 000 m um einen Faktor 300 bis 400, und bei einem Abstand von 1 500 m um einen Faktor 1 000 geringere kumulative Dosen. Die Autoren schlossen, dass die durch die Neutronenaktivierung des Bodens entstandenen Strahlendosen nur für solche Personen relevant waren, die innerhalb der ersten Woche nach den Explosionen in Hiroshima und Nagasaki Bereiche innerhalb eines Abstands von 1 000 m um die Ground Zeros betreten hatten (Imanaka et al. 2008).

Tanaka und Mitarbeiter schätzten die Hautdosis ab, die sich durch den aktivierten Boden in Hiroshima sowohl durch externe Strahlung als auch durch eine Hautkontamination mit aktiviertem Boden ergab. Dabei nahmen sie eine Schichtdicke auf der Haut durch kontaminiertes Bodenmaterial von $26 \mu\text{m}$ an. Für eine Person, die sich die ersten sieben Tage nach der Explosion am Ground Zero aufhielt, ergab sich eine kumulierte Hautdosis von etwa 0,8 Gy. 99 % dieser Dosis entstand durch externe Strahlung, wobei 0,19 Gy auf Betastrahlung und 0,63 Gy auf Gammastrahlung entfiel. Mehr als die Hälfte der so abgeschätzten Hautdosis kam während der ersten Stunde nach der Explosion zustande (Tanaka et al. 2008).

Auf der Basis von Interviews rekonstruierten Imanaka und Mitarbeiter die Wege von vier Personen, die sich ursprünglich zum Zeitpunkt der Explosion über Hiroshima nicht in der Stadt aufgehalten hatten, jedoch noch am selben oder dem nächsten Tag die Stadt betraten und auch den Bereich nahe des Ground Zeros passierten. Zwei der Personen berichteten später von akuten Gesundheitseffekten. Für diese beiden Personen schätzten die Autoren kumulative Dosen von 9,4 mGy und 2,6 mGy ab. Für die beiden anderen Personen, die nicht von Gesundheitseffekten nach ihrem Besuch in der Stadt berichteten, waren die abgeschätzten Strahlendosen 23,7 mGy und 4,0 mGy. Die Autoren boten drei Erklärungen dafür an, dass die für die ersten beiden Personen abgeschätzten Dosen zu niedrig waren, um die berichteten Gesundheitseffekte zu erklären: a) diese Gesundheitseffekte waren nicht durch ionisierende Strahlung verursacht worden, b) die abgeschätzten Strahlendosen wurden durch die Autoren unterschätzt oder 3) die Dosischwelle für die Induktion von Gesundheitseffekten könnte durch das Vorhandensein zusätzlicher äußerer Faktoren drastisch verringert worden sein (Imanaka et al. 2012).

7.1.2 Akute Gesundheitsfolgen und Todesursachen bis Ende 1945

Wie bereits erwähnt, waren bis Ende 1945 infolge der Atombombenexplosionen in Hiroshima etwa 140 000 und in Nagasaki etwa 70 000 Betroffene verstorben. Die tatsächlichen Todesursachen der Opfer anzugeben war jedoch schwierig, und die berichteten Zahlen müssen mit Vorsicht interpretiert werden. Dies liegt unter anderem daran, dass für Bewohner, die sich zum Zeitpunkt der Explosionen sehr nahe an einem der Ground Zeros aufgehalten hatten, als Todesursache sowohl die Druckwelle, die Hitzewelle und die ionisierende Strahlung gleichzeitig in Betracht kam. So wurde berichtet, dass innerhalb eines Abstands von 2 000 m vom Ground Zero fast 50 % der Todesopfer mehrfache Verletzungen aufwiesen. Betrachtet man alle Todesopfer bis zu einem Abstand von 2 000 m vom Ground Zero in Hiroshima, dann starben etwa 89 % innerhalb der ersten zwei Wochen nach der Explosion, weitere 11 % starben zwischen der 3. und der 8. Woche. Zudem wurde abgeschätzt, dass innerhalb eines Abstands von 1 200 m vom Ground Zero etwa 20 % der Betroffenen ihr Leben wegen der Folgen der Druckwelle und 60 %

wegen der Folgen der Hitzestrahlung (einschließlich der dadurch entstandenen Feuer) verloren hätten. Entsprechend dieser Abschätzungen starben etwa 20 % der Betroffenen durch die Exposition mit ionisierender Strahlung (Shigematsu et al. 1995).

Um die Induktion von Gewebereaktionen in Abhängigkeit von der Strahlendosis zu quantifizieren, bestimmten Fujita und Mitarbeiter (Fujita et al. 1989) für Hiroshima die Strahlendosis, bei der die Hälfte der Exponierten innerhalb von 60 Tagen nach der Exposition verstorben war (die sog. LD_{50/60} Dosis). Dazu untersuchten sie das Schicksal von 7 593 Personen, die sich in Hiroshima bis zu einem Abstand von 1 600 m vom Ground Zero in Holzhäusern aufgehalten und die Atombombenexplosion anfänglich überlebt hatten. Im Mittel betraf dies etwa 2 500 Haushalte mit durchschnittlich drei Bewohnern. Die zugehörigen Knochenmarksdosen wurden im Rahmen des Dosimetriesystems DS86 unter Berücksichtigung der abschirmenden Wirkung der Häuser abgeschätzt (Roesch 1987). 1 095 der in die Studie aufgenommenen Personen starben innerhalb von 60 Tagen nach Exposition. Auf dieser Basis ergab sich für die LD_{50/60} Knochenmarksdosis ein Wertebereich von 2,3 Gy bis 2,6 Gy. Die Autoren wiesen unter anderem darauf hin, dass sie nicht ausschließen konnten, dass einige der in die Studie aufgenommenen Personen nicht an den Folgen der ionisierenden Strahlung, sondern an denen der Hitze- oder Druckwelle gestorben waren. Würde auf diese Fälle korrigiert, wären die abgeschätzten LD_{50/60} Knochenmarksdosen etwas höher und lägen im Bereich 2,7 Gy bis 3,1 Gy (Fujita et al. 1989). Dabei sei auch darauf hingewiesen, dass die primär Überlebenden in den meisten Fällen nicht ausreichend medizinisch versorgt werden konnten.

Gewebereaktionen traten bei den Überlebenden ab Strahlendosen von einigen hundert mGy auf. Mit zunehmender Dosis nahm die Schwere dieser Reaktionen zu und viele Betroffene starben innerhalb weniger Tage bzw. Wochen an deren Folgen. Typische akute Symptome während der ersten Phase, d. h. während der ersten zwei Wochen nach Exposition, waren Erschöpfung, Übelkeit und Erbrechen. Während der zweiten Phase, den folgenden sechs Wochen (3. bis 8. Woche nach Exposition), kam es häufig zu Fieber, Durchfall, Hämoptysen (Bluthusten), Hämatemesis (Erbrechen von Blut) oder Blut in Stuhl und Urin, unter anderem aufgrund Schädigungen des blutbildenden Systems (z. B. des Knochenmarks). Die Anfälligkeit für Infektionen war erhöht, bei vielen Betroffenen trat Haarausfall auf. Erste Anzeichen von Erholung wurden beobachtet, jedoch kam es insbesondere zwischen der 6. bis 8. Woche nach Exposition auch zu Komplikationen wie Pneumonie (Lungenentzündung), Empyem (Ansammlung von Eiter) oder Kolitis (Darmentzündung). In der dritten Phase ab dem 3. Monat bis Ende Dezember 1945 zeigten sich zunehmend Anzeichen der Erholung, zum Beispiel bildeten sich Organschäden zurück, das Haarwachstum setzte wieder ein, und die Anzahl weißer Blutzellen normalisierte sich (Shigematsu et al. 1995).

7.1.3 Gesundheitliche Langzeitfolgen

Häufig werden als Beispiele für gesundheitliche Langzeitfolgen einer Strahlenexposition stochastische Gesundheitseffekte wie zum Beispiel Krebserkrankungen und Leukämie genannt. Typisch für derartige Effekte ist, dass ihre Eintrittswahrscheinlichkeit mit zunehmender Strahlendosis zunimmt. Zudem geht man davon aus, dass es im Gegensatz zu den Gewebereaktionen bei stochastischen Gesundheitseffekten keine Dosischwelle gibt, dass also auch kleine Strahlendosen derartige Effekte hervorrufen können, wenn auch mit entsprechend geringer Wahrscheinlichkeit. Strahleninduzierte stochastische Gesundheitseffekte können auch Jahrzehnte nach einer Strahlenexposition noch auftreten.

Um derartige und andere Effekte zu untersuchen, wird bis heute der Gesundheitszustand von Atombombenüberlebenden aus Hiroshima und Nagasaki im Rahmen verschiedener Studien überwacht, und es werden entsprechende Erkrankungs- und Sterberaten aufgezeichnet. Dazu zählen Untersuchungen an etwa 120 000 Überlebenden im Rahmen der „Life Span Study“

(LSS), zweijährlich klinische Gesundheitsuntersuchungen an einer Untergruppe von mehr als 24 000 Überlebenden („Adult Health Study“ – AHS), Untersuchungen an mehr als 3 600 Personen, die in utero exponiert wurden („In Utero Cohort“), an fast 77 000 nach 1945 geborenen Personen („Children of Survivors Study“ – F1-Studie) sowie an etwa 24 600 dieser Personen, bei denen eine regelmäßige Gesundheitsüberprüfung (ähnlich zur AHS-Studie) durchgeführt wird („Filial one offspring clinical study“ – FOCS) (Ozasa et al. 2019).

7.1.3.1 Solide Tumoren

Im aktuellsten Bericht zur Krebsmortalität der Überlebenden wurden die Mortalitätsdaten von mehr als 86 000 Überlebenden über einen Zeitraum von 1950 – 2003 ausgewertet (Ozasa et al. 2012). Etwa 50 600 dieser primär Überlebenden (58 %) waren im Beobachtungszeitraum gestorben, darunter etwa 10 900 an spontanen und zu einem geringen Teil (etwa 5 %) an strahleninduzierten soliden Tumoren. Für alle soliden Tumoren zusammen ergab sich bei einem Alter von 70 Jahren und bei einem Alter bei Exposition von 30 Jahren geschlechtsgemittelt eine zusätzliche relative Rate von $0,42 \text{ Gy}^{-1}$ (von Ozasa et al. 2012 „excess relative risk“ (ERR) genannt) (95 % Konfidenzintervall (KI): $0,32 \text{ Gy}^{-1}$ bis $0,53 \text{ Gy}^{-1}$). Der kleinste Dosisbereich, bei dem eine statistisch signifikant erhöhte Krebsmortalität nachgewiesen werden konnte, war für gewichtete Kolondosen der Bereich 0,0 Gy bis 0,2 Gy (dabei wurde für den Dickdarm die Energiedosis durch Gammastrahlung und das zehnfache der Energiedosis durch Neutronen addiert). Die Analyse der Existenz einer möglichen Dosischwelle ergab eine Dosis von 0 Gy für den besten Schätzwert einer Schwelle. Aufgrund der Größe der untersuchten Kohorte und der Länge des Untersuchungszeitraums konnten auch Aussagen zum strahleninduzierten Risiko einzelner Krebsarten getroffen werden. So waren die Mortalitätsraten aufgrund von Tumoren in Magen, Lunge, Leber, Dickdarm, Brust, Gallenblase, Speiseröhre, Blase und Eierstöcke statistisch signifikant erhöht. Dagegen konnten für Rektum-, Bauchspeicheldrüsen-, Uterus-, Prostata- und Nierentumoren keine Erhöhung der Mortalitätsraten gefunden werden (Ozasa et al. 2012).

Im Bericht zur Krebsinzidenz unter den Atombombenüberlebenden berichteten Grant und Mitarbeiter im Rahmen der LSS von Ergebnissen an mehr als 105 000 Überlebenden, die auf der Basis von Gesundheitsdaten aus den Jahren 1958 – 2009 abgeleitet wurden (Grant et al. 2017). In dieser Studie wurden 22 538 Fälle von soliden Tumoren beobachtet, von denen 992 Tumoren als strahleninduziert (geschätzter Anteil 5 %) gelten. Auf der Basis eines linearen Dosiseffektmodells ergab sich für alle Tumoren zusammen geschlechtsgemittelt ein ERR pro Dosis von $0,47 \text{ Gy}^{-1}$ (95 % KI: $0,39 \text{ Gy}^{-1}$ bis $0,55 \text{ Gy}^{-1}$), für Männer $0,33 \text{ Gy}^{-1}$ (95 % KI: $0,25 \text{ Gy}^{-1}$ bis $0,42 \text{ Gy}^{-1}$) und für Frauen $0,60 \text{ Gy}^{-1}$ (95 % KI: $0,49 \text{ Gy}^{-1}$ bis $0,72 \text{ Gy}^{-1}$). Diese Ergebnisse sind mit den Ergebnissen früherer Studien konsistent. Zudem berichteten die Autoren, dass die Daten für Männer besser durch eine linear-quadratische Dosiseffektkurve, während die für Frauen dagegen besser durch eine lineare Dosiseffektkurve beschrieben werden konnten. Wenn über beide Geschlechter gemittelt wurde, konnte bei Verwendung eines linearen ERR-Modells selbst im Dosisbereich von 0,0 Gy bis 0,1 Gy noch eine statistisch signifikante Erhöhung der Krebsinzidenz festgestellt werden. Die Autorinnen und Autoren betonten zusammenfassend, dass bei den Atombombenüberlebenden Krebsinzidenzraten selbst mehr als 60 Jahre nach den Atombombenexplosionen über Hiroshima und Nagasaki erhöht sind.

7.1.3.2 Leukämie

Hsu und Mitarbeiter untersuchten im Rahmen der Life Span Study bei mehr als 113 000 Überlebenden die Inzidenz von Leukämie, Lymphomen und multiplen Myelomen (Hsu et al. 2013). Dazu verwendeten sie 944 Fälle aus dem Untersuchungszeitraum 1950 – 2001, darunter 176 Fälle akuter myeloischer Leukämie (AML), 75 Fälle chronischer myeloischer Leukämie (CML), 43 Fälle akuter lymphatischer Leukämie (ALL) und 12 Fälle chronisch lymphatischer Leukämie (CLL). Für insgesamt 312 Leukämiefälle (ohne CLL und adulte T-Zell-Leukämie)

berichteten die Autorinnen und Autoren für das ERR von einer linear-quadratischen Dosis-effektkurve (getrieben durch AML), deren linearer Anteil bei einem erreichten Alter von 70 Jahren und einem Alter bei Exposition von 30 Jahren bei $0,79 \text{ Gy}^{-1}$ (95 % KI: $0,34 \text{ Gy}^{-1}$ bis $1,80 \text{ Gy}^{-1}$) lag. 94 der beobachteten 312 Fälle waren strahleninduziert. Grundsätzlich nahm das ERR für Leukämie mit der Zeit nach Exposition ab, wobei die Autoren speziell für AML erstmals von Hinweisen berichten, dass ein erhöhtes ERR im Untersuchungszeitraum bestehen blieb. Evidenz für ein erhöhtes strahleninduziertes Auftreten von Hodgkin Lymphomen oder multiplen Myelomen wurde nicht gefunden.

7.1.3.3 Nicht neoplastische Erkrankungen

Im weiter oben bereits erwähnten Bericht zur Mortalität der Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki untersuchten Ozasa und Mitarbeiter auch nicht neoplastischen Erkrankungen als mögliche Todesursachen (Ozasa et al. 2012). Im Beobachtungszeitraum von 1966 – 2003 fanden sie 25 618 Todesfälle durch nicht neoplastische Erkrankungen, darunter 14 586 Todesfälle durch Herz-/Kreislauferkrankungen, 4 190 durch Atemwegserkrankungen sowie 2 226 durch Erkrankungen des Verdauungstrakts. Für diese Endpunkte waren bei Verwendung eines linearen Dosiseffektmodells die ERR-Werte pro Dosis signifikant erhöht: für die Gesamtheit der nicht neoplastischen Erkrankungen $0,13 \text{ Gy}^{-1}$ (95 % KI: $0,08 \text{ Gy}^{-1}$ bis $0,18 \text{ Gy}^{-1}$), für Kreislauferkrankungen $0,11 \text{ Gy}^{-1}$ (95 % KI: $0,05 \text{ Gy}^{-1}$ bis $0,18 \text{ Gy}^{-1}$), für Atemwegserkrankungen $0,23 \text{ Gy}^{-1}$ (95 % KI: $0,11 \text{ Gy}^{-1}$ bis $0,36 \text{ Gy}^{-1}$), und für Erkrankungen des Verdauungstrakts $0,20 \text{ Gy}^{-1}$ (95 % KI: $0,05 \text{ Gy}^{-1}$ bis $0,38 \text{ Gy}^{-1}$). Insgesamt berichteten Ozasa und Mitarbeiter von 35 685 Todesfällen durch nicht neoplastische Erkrankungen, wobei sie 353 zusätzliche Todesfälle der Strahlenexposition der Betroffenen zuschrieben (Ozasa et al. 2012).

Seit 1986 wurden unter 6 066 Atombombenüberlebenden, die am AHS-Programm teilnahmen und sich vor 1986 keiner Kataraktoperation unterziehen mussten, Kataraktoperationen dokumentiert. Bis 2005 zählten Neriishi und Mitarbeiter in dieser Population 1 028 derartige Operationen (Neriishi et al. 2012). Das mittlere Alter bei Exposition war 20,4 Jahre, das bei der Kataraktoperation 74,4 Jahre. Die Auswertung der Daten erfolgte auf der Basis der gewichteten Augendosis, wobei den Neutronen ein Wichtungsfaktor von 10 zugeordnet wurde, und bekannte Risikofaktoren, die das Auftreten von Katarakten begünstigen, wie z. B. Rauchen, Körpergewicht, Diabetes, Bluthochdruck und Angina Pectoris, berücksichtigt wurden. Unter Verwendung einer linearen Dosiseffektkurve berichteten die Autorinnen und Autoren für ein Alter bei Exposition von 20 Jahren und ein erreichtes Alter von 70 Jahren bei einer Dosis von 1 Gy von einem ERR-Wert von 0,32 (95 % KI: 0,17 – 0,52) und schätzten für eine Dosischwelle den Wert 0,5 Gy (95 % KI: 0,10 – 1,05 Gy) ab (Neriishi et al. 2012). Bei Untersuchungen an anderen Kollektiven von z. B. beruflich Strahlenexponierten fanden sich höhere Raten von Katarakten und meist keine eindeutigen Dosissschwellen (Hamada et al. 2020).

7.1.3.4 In Utero-Exposition – Mentale Retardierung und Krebsmortalität

In einer Studie an 1 544 Kindern, deren Mütter zum Zeitpunkt der Explosionen in Hiroshima und Nagasaki schwanger waren, untersuchten Otake und Mitarbeiter die mentale Entwicklung der Kinder. Sie fanden beispielsweise 30 Fälle schwerer mentaler Retardierung, von denen fünf keine zusätzliche Strahlendosis durch die Atombombenexplosion erhalten hatten. 19 Kinder waren zwischen der 8. und 15. Schwangerschaftswoche exponiert worden, davon hatten zwei das Down-Syndrom. Die Ergebnisse ließen die Deutung zu, dass eine Schwellendosis von etwa 0,4 Gy vorlag. In der 16. – 25. Schwangerschaftswoche war eine schwere mentale Retardierung niedriger, die Schwellendosis lag bei etwa 1 Gy (Otake et al. 1989). Dagegen ergaben sich keine Hinweise für eine schwere mentale Retardierung vor der achten und nach der 26. Schwangerschaftswoche.

Sugiyama und Mitarbeiter untersuchten für einen Zeitraum von 1950 bis 2021 die Krebsmortalität bei 2 463 Personen, die in Hiroshima oder Nagasaki in utero exponiert worden waren. Sie fanden für Frauen ein statistisch signifikant erhöhtes ERR pro Dosis von $2,24 \text{ Gy}^{-1}$ (95 % KI: 0,44–5,58), dagegen kein statistisch signifikant erhöhtes ERR pro Dosis für Männer. Das Trimester während der Schwangerschaft, während dem die Exposition stattfand, spielte hier keine Rolle (Sugiyama et al. 2021).

7.1.3.5 Ergebnisse bei Kindern von Überlebenden

Die Studie zur Untersuchung der Krebs- und Nichtkrebsmortalität von Nachkommen der ersten Generation von Atombombenüberlebenden umfasste einen Studienzeitraum von 1948 bis 2009 (Grant et al. 2015). Unter den 75 327 Kindern, die Teil der Studie waren, starben im Untersuchungszeitraum 1 246 an Krebs und 3 937 an Nichtkrebserkrankungen. Dabei ergab sich für beide Gruppen kein Zusammenhang zwischen der Mortalität dieser Personen und der Strahlendosis ihrer Mütter oder Väter. Zwar wird in der F1-Studie eine relativ hohe Anzahl an Kindern berücksichtigt, und dies bereits über einen relativ langen Nachbeobachtungs-Zeitraum. Möglicherweise ist jedoch die Anzahl an Eltern, die mit hohen Dosen exponiert waren, und/oder der zu erwarteten Effekt zu gering, um einen Zusammenhang zwischen Dosis der Eltern und Mortalität der F1-Generation belegen zu können (Ozasa et al. 2019).

7.1.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Atombombenabwürfen

Im Kontext einer direkten militärischen Auseinandersetzung wurden bis zum heutigen Tag nur zweimal Kernwaffen eingesetzt – im August 1945 bei den Bombardierungen von Hiroshima und Nagasaki. Diese beiden Explosionen stellen daher die einzige Informationsquelle über die Auswirkungen einer nuklearen Explosion über einer bewohnten Region dar und können wichtige Hinweise liefern, welche Maßnahmen in einer derartigen Situation aus radiologischer Sicht angemessen sind, und welche besonderen Anforderungen bei der Durchführung dieser Maßnahmen zu beachten wären.

Die Explosionen hatten Stärken von 16 kT TNT (Hiroshima) und 21 kT TNT (Nagasaki). Bis Ende 1945 starben etwa 140 000 der Betroffenen in Hiroshima und etwa 70 000 in Nagasaki, davon etwa 20 % an den Folgen der Druckwellen und 60 % an Verbrennungen. Etwa 20 % starben an den akuten gesundheitlichen Folgen der durch die Strahlenexposition hervorgerufenen Gewebereaktionen. In Abhängigkeit von der Entfernung zum Ground Zero traten kurzzeitig Strahlendosen von wenigen mGy bis zu vielen Gy auf. Trotz der hohen Dosisleistungen nahe der beiden Ground Zeros konnten dort einige Betroffene überleben, wenn sie sich an Orten starker Abschirmung aufgehalten hatten.

In Hiroshima und Nagasaki führte die Neutronenkomponente des Strahlenfeldes, das bei den Explosionen entstanden war, dazu, dass der Boden in Abhängigkeit von seiner chemischen Zusammensetzung und vom Abstand vom Ground Zero aktiviert wurde. Dadurch entstanden nahe der Ground Zeros Dosisleistungen von 4 Gy bis 6 Gy pro Stunde, die einen Tag später bereits um einen Faktor 1 000, eine Woche später um einen Faktor 1 000 000 abgenommen hatten. Bei Aufenthalt in einem Abstand von 500 m von den Ground Zeros ergaben sich um einen Faktor 10, in einem Abstand von 1 000 m um einen Faktor 300 bis 400, und in einem Abstand von 1 500 m um einen Faktor 1 000 geringere kumulative Strahlendosen als bei Aufenthalt am Ground Zero.

Der aufgetretene Fallout war bei beiden Explosionen wegen der geringen Explosionsstärken, der Explosionshöhen von 500 m bis 600 m Höhe sowie der herrschenden Witterungsbedingungen gering. Weder der Kernwaffeneinsatz in Hiroshima noch der in Nagasaki kann daher als Fallout-Beispiel einer Kernwaffenexplosion dienen, die in Bodennähe erfolgte.

Entsprechend der aufgetretenen Strahlendosen wurden unter den Betroffenen sowohl Gewebereaktionen (ab einer Dosis von einigen 100 mGy) als auch stochastische Schäden (im Wesentlichen solide Tumoren und Leukämie) beobachtet.

Was Gewebereaktionen betrifft, wurden unter den Überlebenden je nach Strahlendosis in den ersten Tagen und Wochen nach den Explosionen Symptome wie z. B. Erschöpfung, Übelkeit und Erbrechen, später dann Fieber, Durchfall, Hämoptyse (Bluthusten), Hämatemesis (Erbrechen von Blut), oder Blut in Stuhl und Urin beobachtet. Die Anfälligkeit für Infektionen war erhöht, bei vielen Betroffenen trat Haarausfall auf, und es kam trotz erster Anzeichen von Erholung zu Komplikationen wie Lungenentzündungen (Pneumonie), Empyeme (Ansammlung von Eiter) oder Darmentzündungen (Kolitis).

Stochastische Spätfolgen wurden bei mehr als 100 000 Überlebenden untersucht. Bei einer Beobachtungszeit von etwa 50 Jahren wurden beispielsweise etwa eintausend zusätzliche Fälle solider Tumoren beobachtet sowie etwa 100 zusätzliche Leukämiefälle. Bei 86 000 Überlebenden wurden zudem in knapp 40 Jahren mehr als 300 zusätzliche Todesfälle durch Herzkreislauferkrankungen beobachtet. Weitere gesundheitliche Spätfolgen betrafen das Auftreten von Linsentrübungen sowie mentale Retardierung bei Kindern, die im Mutterleib exponiert worden waren. Bei Nachkommen von Überlebenden konnte kein Zusammenhang zwischen der Mortalität dieser Personen und der Strahlendosis ihrer Mütter oder Väter nachgewiesen werden.

7.2 Kernwaffentests

7.2.1 Kernwaffentests der Vereinigten Staaten und Auswirkungen auf die Bevölkerung

7.2.1.1 Trinity

Trinity war der erste Kernwaffentest der Geschichte. Dabei wurde eine Plutoniumbombe, die nach neuesten Schätzungen eine Sprengkraft von $24,8 \text{ kT} \pm 2 \text{ kT}$ hatte (Selby et al. 2021), am 16. Juli 1945 frühmorgens (5:29 Uhr) in niedriger Höhe (30,5 m) gezündet. Wegen der militärischen Geheimhaltung gab es keine Warnungen oder Evakuierungen der Bevölkerung. Messtrupps waren beauftragt, Dosisleistungen im Bereich der Ausbreitung der Wolke zu messen. Die lokalen Depositionen wurden anhand lokaler Messungen von Ionendosisraten oder mittels Gammaskpektrometrie der Radionuklide im Boden und Auswertung von Filmschwärzungen abgeschätzt. Der durch Fallout hauptsächlich kontaminierte Bereich wurde als eine Zone von ca. 100 Meilen x 30 Meilen angegeben (Ferenc Morton Szasz, „the day the sun rose twice“).

Eine detaillierte Abschätzung der externen und internen Expositionen und Dosen der Bevölkerung in New Mexico wurde 2020 vorgelegt (Bouville et al. 2020, Simon et al. 2020). Für die externen Expositionen wurden dabei Daten von Quinn (1987) genutzt, die auf in den ersten drei Wochen nach Explosion durchgeführten Messdaten beruhten, sowie Daten von Cederwall und Peterson (1990), welche die Quinn-Daten mittels meteorologischer Modelle ergänzten. Alle Messungen wurden auf 12 Stunden nach Explosion normalisiert. Durch Interpolation und Modellierung wurden Expositionsdaten für alle damaligen 721 Wahlbezirke in New Mexico abgeschätzt (Bouville et al. 2020, Simon et al. 2020). Historisch angegebene Ionendosisraten in mR h^{-1} wurden mit einem Konversionsfaktor von $6,6 \cdot 10^{-3} \text{ mGy mR}^{-1}$ für Erwachsene und etwas höheren Faktoren für Kinder umgerechnet. Die höchste gemittelte Dosisrate durch externe Exposition lag im Bereich von 4 mGy h^{-1} (500 mR h^{-1}) bei H+12 in einem Wahlkreis im südlichen County Tarrant (geschätzte Entfernung vom Explosionsort ca. 100 km). Für einzelne lokalisierte Orte in wenig besiedelten Regionen nord-östlich des Explosionsorts wurden maximale über ein Jahr integrierte Werte für Luft-Kerma von 0,2 Gy bis 0,3 Gy geschätzt, woraus sich nach Berücksichtigung der Abschirmung innerhalb von Häusern und der Dauer der im Freien verbrachten Zeit für die dortige Bevölkerung maximale Dosen für das erste Jahr im

Bereich von 100 mGy ergaben (Bouville et al. 2020, Simon et al. 2020). Vermutlich entsprechen diese Orte den von einigen Autoren berichteten Hotspots 20 Meilen nord-östlich vom Explosionsort (Hoot Owl Canyon) (Carr 2021, Widner 2009). Mehr als 50 % der externen Dosis wurde durch ^{239}Np , ^{140}La , ^{95}Nb und ^{132}I verursacht. Aufgrund des hohen Anteils kurzlebiger Radionuklide im Fallout innerhalb einiger 100 km vom Explosionsort wurde davon ausgegangen, dass der größte Teil der externen Exposition innerhalb weniger Monate stattfand. Gemittelt über den gesamten Staat New Mexico war für die dortige Bevölkerung die Exposition durch den Trinity-Test vergleichbar der durch die Explosionen auf dem Nevada Test-Gelände, aber an einigen Orten war sie deutlich höher.

Dosen im ersten Jahr durch interne Exposition für fünf Organe (Schilddrüse, rotes Knochenmark, Dickdarm, Magen, Lunge) wurden – z. B. basierend auf Interviews, um damalige Ernährungsgewohnheiten der betroffenen Bevölkerung in Abhängigkeit ihrer ethnischen Zugehörigkeit zu erfassen – aufwändig rekonstruiert (Potischman et al. 2020) und auf Bezirksebene abgeschätzt. Die höchsten Organdosen wurden für die Schilddrüse ermittelt. Für Schilddrüsendosen spielte der Konsum von Kuhmilch die größte Rolle, gefolgt von Trinkwasser und Blattgemüse, was auf das Unterbleiben von Warnungen und Verzehrempfehlungen für die Bevölkerung zurückgeführt wurde. Schilddrüsendosen durch externe Exposition und Inhalation lagen bei etwa 10 % bzw. 5 % der Dosis durch den Verzehr von Kuhmilch. Die populationsgewichteten durchschnittlichen Schilddrüsendosen in den am höchsten betroffenen Bezirken lagen bei ca. 35 mGy bis 80 mGy, je nach ethnischer Zugehörigkeit. Wegen der inhomogenen Deposition könnten die abgeschätzten Dosen für einzelne Individuen jedoch deutlich größer gewesen sein. Organdosen (extern und intern) für den Dickdarm lagen bei etwa 35 % der Schilddrüsendosen, für Lunge, Magen und Knochenmark bei jeweils unter 10 % der Schilddrüsendosen. Die vergleichsweise hohen Dickdarmdosen wurden auf unlösliche Fallout-Partikel zurückgeführt, die nach Inkorporation vor der Ausscheidung längere Zeit im Dickdarm bleiben. Zu den genannten Organdosen (außer für die Schilddrüse) trugen insbesondere ^{239}Np , ^{97}Zr , ^{237}U , ^{89}Sr , ^{140}Ba , ^{132}Te und ^{140}La bei. Die Beiträge von ^{237}U und ^{239}Np , die keine Spaltprodukte sind, beruhen auf einer Besonderheit des Designs der Trinity-Bombe.

Cahoon et al. (2020) führten, basierend auf den Dosisabschätzungen von Simon et al. (2020) und Standard-Risikomodellen, eine Vorhersage der durch den Trinity-Test verursachten Krebsrisiken (Inzidenz) für Bewohnerinnen und Bewohner von New Mexico durch. Für die über 580 000 potenziell exponierten Bewohnerinnen und Bewohner wurden Lebenszeit-Hintergrundrisiken von 183 000 Krebsfällen (außer Schilddrüsenkrebs und nicht-melanozytären Hautkrebs) geschätzt. Für alle soliden Tumoren (ohne Schilddrüsenkrebs und nicht-melanozytären Hautkrebs) wurden 210 bis 460 (90 % Unsicherheitsintervall) durch den Test verursachte zusätzliche Krebsfälle geschätzt, für Schilddrüsenkrebs 80 bis 530 zusätzliche Fälle und für Leukämie (außer CLL) 0 bis 10 zusätzliche Fälle. Der attributable Anteil ist demnach nur für Schilddrüsenkrebs relevant. Er liegt für den Zeitraum 1945 – 2015 im Mittel bei 8,4 % und für die vier am höchsten kontaminierten Bezirke bei 17 % bis 58 %. Für andere solide Tumoren und für Leukämien liegen die mittleren attributablen Risiken unter 0,2 %.

7.2.1.2 Nevada Testgelände

Das Nevada-Testgelände (Nevada Test Site – NTS) wurde zwischen 1951 und 1962 für 86 atmosphärische Kernwaffentests mit insgesamt 1 MT Sprengkraft genutzt. Vier größere Studien mit Dosisrekonstruktionen wurden in den 1980er Jahren durchgeführt, drei davon limitiert auf die lokale Bevölkerung (bis zu 800 km Entfernung), eine weitere (NCI 1997) für die gesamte Bevölkerung des US-Festlands. Simon und Bouville (2002) fassten die Ergebnisse wie folgt zusammen: Für die lokale Bevölkerung lagen die rekonstruierten Dosen durch externe Bestrahlung infolge des Fallouts aller Tests unter 5 mGy; maximale Knochenmark-Dosen, die im Rahmen einer Studie zu Leukämiefällen rekonstruiert wurden, lagen bei ca. 30 mGy. Dosen

durch interne Exposition waren i. A. deutlich geringer als Dosen durch externe Bestrahlung, mit Ausnahme der Schilddrüsendosen. In der Utah-Schilddrüsenstudie (Simon 1999) wurden mittlere Schilddrüsendosen von 98 mGy (Median 25 mGy) berichtet, der höchste berechnete Wert lag bei 4,6 Gy. Es konnte gezeigt werden, dass die hohen Schilddrüsendosen mit Milchkonsum korrelierten.

Beruhend auf der Studie des National Cancer Institute (NCI) (NCI 1997), in welcher die mittlere Schilddrüsendosis durch die NTS-Testversuche auf Bezirks-Ebene für 14 Kategorien von Alter, Geschlecht und Verzehrgewohnheiten abschätzt wurden, wurde in einer ersten Analyse keine signifikant erhöhte Inzidenz oder Mortalität durch Schilddrüsenkarzinome beobachtet (Gilbert et al. 1998). Bei einer Nachanalyse mit verlängertem Follow-Up und insgesamt 18 545 Krebsfällen konnte allerdings eine signifikant erhöhte Mortalität für Personen gezeigt werden, die im Alter unter 1 Jahr exponiert worden waren (ERR pro Dosis $1,8 \text{ Gy}^{-1}$ (95 % KI: $0,4 \text{ Gy}^{-1}$ bis $3,2 \text{ Gy}^{-1}$). Für Menschen über 1 Jahr konnte dagegen keine Beziehung zwischen erhöhter Exposition der Schilddrüse und Mortalität gezeigt werden. Die Diskrepanz zu Studien, die erhöhte Risiken auch für ältere Kinder zeigen (z. B. nach dem Reaktorunfall von Tschornobyl) wurde auf die Limitierungen ihres ökologischen Studienansatzes zurückgeführt (Gilbert et al. 2010). Eine andere Gruppe untersuchte eine Kohorte von 12 bis 18-jährigen Schulkindern in drei Bezirken, die 1965-1966 identifiziert wurden und für die umfassende individuelle Abschätzungen der Schilddrüsendosen (extern und intern) für die Expositionen durch NTS-Versuche zwischen 1951 und 1962 durchgeführt wurden. Für die 2 496 Kohortenmitglieder wurde dosisassoziiert ein signifikanter Anstieg des relativen Risikos u. a. für Thyreoiditis und alle Neoplasien (inklusive gutartige) festgestellt, für Schilddrüsenkarzinome konnte jedoch, bei sehr geringer Fallzahl (insgesamt 8 Fälle), kein signifikant erhöhtes Vorkommen gezeigt werden (Lyon et al. 2006).

7.2.1.3 Pazifik

Die Vereinigten Staaten führten zwischen 1946 und 1958 insgesamt 66 Kernwaffenversuche auf den oder nahe der zuvor evakuierten Bikini- und Enewetak-Atolle der Marshall-Inseln durch, wovon 20 Versuche zu messbarem Fallout auf bewohnte Atolle des Archipels führten (Simon et al. 2010). Am 01.03.1954 wurde auf dem Bikini-Atoll der stärkste durch die USA durchgeführte Kernwaffentest unter dem Namen Castle Bravo durchgeführt. Für die dabei verwendete Fusionsbombe wurde eine Sprengkraft von ca. 6 MT berechnet, die tatsächliche Sprengkraft lag aber bei ca. 15 MT (Simon und Bouville 2002); die Explosion erfolgte in Bodennähe auf einer künstlichen Insel. Der Fallout der Explosion kontaminierte einen Umkreis von 20 Meilen (32 km) in der Richtung, aus der der Wind kam, sowie einen 330 Meilen (531 km) langen und bis zu 60 Meilen (97 km) breiten Bereich in Windzugrichtung. Dadurch wurden neben dem Bikini-Atoll auch die von Marshallern bewohnten Atolle Ailinginae (18 Bewohnende), Rongelap (64 Bewohnende) und Utirik (157 Bewohnende) kontaminiert, sowie das Atoll Rongerik, auf dem 28 US-Soldaten stationiert waren.

Die an den Betroffenen gemachten klinischen Beobachtungen sind im Bericht des „Projekt 4.1“ von Cronkite et al. (1954) sehr ausführlich dargestellt und untenstehend zusammengefasst.

Da von US-Seite nicht mit einer Kontamination der Inseln gerechnet wurde, waren nur wenige Strahlenmessgeräte im Einsatz, so dass die Dosis der Betroffenen weitestgehend errechnet werden musste. Die errechnete Gammadosis (in Luft) bis zur Evakuierung für Rongelap wird mit $0,026 \text{ C kg}^{-1}$ bis $0,045 \text{ C kg}^{-1}$ (im Original 102 R bis 175 R) benannt. Da in der Originalliteratur keine detaillierte Umrechnung von Ionendosis zu Energiedosis angegeben ist, nimmt die SSK an, dass dies in etwa Energiedosen von 1 000 mGy bis 1 750 mGy entspricht (160 km von Ground Zero).

Für Rongerik sind es $0,013 \text{ C kg}^{-1}$ bis $0,027 \text{ C kg}^{-1}$ (im Original 50 R bis 104 R), für Ailinginae $0,014 \text{ C kg}^{-1}$ bis $0,018 \text{ C kg}^{-1}$ (im Original 53 R bis 69 R) und für Utirik ca. $0,004 \text{ C kg}^{-1}$ (im Original 14 R). Dies entspricht nach Auffassung der SSK in etwa Energiedosen von 500 mGy bis 1000 mGy für Rongerik, 500 mGy bis 700 mGy für Ailinginae und 100 mGy für Utirik. Diese Dosisangaben sind aber mit hohen, jedoch schwer zu quantifizierenden Unsicherheiten behaftet. Daher werden die Dosisbereiche nur als Richtwerte angegeben.

Aus der Rongelap-Gruppe berichteten ca. 2/3 der Exponierten über Übelkeit innerhalb der ersten zwei Tage nach Niedergang des Fallouts; 10 % litten unter Erbrechen und Durchfall. Ein Patient der Ailinginae-Gruppe berichtete ebenfalls von Übelkeit, wohingegen die Utirik-Gruppe, sowie die US-Amerikaner auf Rongerik keine Frühreaktionen entwickelten.

In den exponierten Gruppen wurden Untersuchungen zu den Anzahlen der Neutrophilen, der Lymphozyten und der Thrombozyten im Blut durchgeführt. Der detaillierte Verlauf der Zellzahlen im Blut der Betroffenen ist ebenfalls im o. g. Bericht zu finden. Die ersten Messungen in der am stärksten exponierten Gruppe (Rongelap) wurden drei Tage nach Niedergang des Fallouts durchgeführt; hier wurde während der zweiten Woche nach Exposition im Mittel für die Neutrophilen ein Abfall auf 70 % bis 80 % der Referenzgruppe (nicht exponierte Marshalliesen) festgestellt (ca. $3\,900 \mu\text{l}^{-1}$). Nach fünf Wochen gab es einen weiteren signifikanten Abfall auf ca. 50 % der Vergleichsgruppe (ca. $2\,600 \mu\text{l}^{-1}$). Die Altersgruppe < 5 Jahren war im Mittel stärker von einem Abfall betroffen als die Altersgruppe > 5 Jahre.

Die Zahl der Lymphozyten in der Altersgruppe > 5 Jahre war am dritten Tag (erste Messung) auf ca. 55 % der Kontrollgruppe abgefallen ($2\,200 \mu\text{l}^{-1}$) und stieg über den gesamten Beobachtungszeitraum nicht mehr signifikant an (ca. 70 Tage). In der Altersgruppe < 5 Jahre war die Lymphozytenzahl zum Zeitpunkt der ersten Messung auf 25 % der Referenzgruppe abgefallen ($1\,800 \mu\text{l}^{-1}$), erholte sich jedoch im Laufe der Beobachtung.

Die Zahl der Thrombozyten lag zum Zeitpunkt der ersten Messung (10 Tage nach Exposition) bei ca. 70 % der Kontrollgruppe ($221\,000 \mu\text{l}^{-1}$); der Tiefpunkt war nach ca. vier Wochen bei 35 % der Kontrollgruppe ($109\,000 \mu\text{l}^{-1}$). Nach einer weiteren Woche war der Wert der ersten Messung wieder erreicht.

Im Bericht wurden die Veränderungen des Blutbilds auf die externe Bestrahlung durch Fallout zurückgeführt, wohingegen ein Einfluss der Haut-Betadosis sowie der inkorporierten Nuklide ausgeschlossen wurde.

Durch radiochemische Urinalysen und Ganzkörpermessungen konnte die Aktivität an inkorporierten Radionukliden für die Rongelap-Gruppe abgeschätzt werden. Nennenswert sind die Werte für ^{89}Sr – berechnet für Tag 1 59 kBq bis 81 kBq (im Original $1,6 \mu\text{Ci}$ bis $2,2 \mu\text{Ci}$), ^{131}I mit 237 kBq bis 414 kBq (im Original $6,4 \mu\text{Ci}$ bis $11,2 \mu\text{Ci}$) sowie ^{140}Ba mit 13 kBq bis 100 kBq (im Original $0,34 \mu\text{Ci}$ bis $2,7 \mu\text{Ci}$) aus (Robbins et al. 1967). Die Schilddrüsendosis der Rongelap-Gruppe wurde für Kinder unter 10 Jahren auf 7 Gy bis 14 Gy (im Original 700 rad bis 1400 rad) berechnet, in der Altersgruppe zwischen 10 Jahren und 19 Jahren mit 3,5 Gy bis 6 Gy (im Original 350 rad bis 600 rad) und in der Altersgruppen 20 Jahre bis 40 Jahre sowie über 40 Jahre mit jeweils 1,6 Gy (im Original 160 rad).

Erkrankungen der Schilddrüse wurden bei 15 von 19 Kindern der Gruppe unter 10 Jahren zwischen 1963 und 1966 diagnostiziert, die jedoch alle gutartig waren (2x Atrophie, 13x Struma nodosa). Ein einzelner Fall eines Schilddrüsenkarzinoms wurde im März 1965 bei einer zum Zeitpunkt des Tests 20-jährigen Frau diagnostiziert und erfolgreich therapiert (Robbins et al. 1967, Howard et al. 1995).

Neuere Dosisabschätzungen und Projektionen der erwarteten Gesundheitseffekte aller Kernwaffentests auf den Marshall-Inseln wurden 2010 veröffentlicht (Simon et al. 2010). Anhand

geschätzter Depositionen von 63 Spaltprodukten und gemessenen Dosisleistungen zu unterschiedlichen Zeiten nach dem Fallout wurden für alle Bewohnerinnen und Bewohner Organdosen (Energiedosen) durch externe und interne Exposition geschätzt. Während erwachsene ständige Bewohnende der südlichen Atolle im Mittel externe Dosen von 5 mGy bis 12 mGy erhielten, und die der mittleren Atolle bei 22 mGy bis 59 mGy, lagen die externen Dosen in den stark betroffenen nördlichen Atollen bei mehreren 100 mGy bis über 1 Gy. Bei den internen Expositionen sind vor allem die Schilddrüsendosen relevant, die für die erwachsenen Bewohnenden Rongelaps mehr als 7,5 Gy betrugen und für im Kindesalter Exponierte dreimal so hoch waren (Simon et al. 2010). Die vorliegenden Aufzeichnungen zu Gesundheitseffekten bei den Bewohnenden der Marshall-Inseln erlaubten keine detaillierte epidemiologische Studie. Land et al. (2010) berechneten Lebenszeitrisiken für Betroffene, die während der Testperiode (1948 – 1958) durch Fallout und im Zeitraum bis 1970 durch verbliebene Radioaktivität exponiert worden waren. Für die Gesamtzahl potenziell Exponierter von fast 25 000 wurden ca. 170 von 10 500 abgeschätzten Krebserkrankungen als Fallout-assoziiert angesehen.

Neben den Personen, welche sich zum Zeitpunkt des Castle Bravo Tests auf den oben genannten Atollen aufgehalten hatten, war auch ein japanisches Fischerboot von dem Fallout betroffen. Die 23 Fischer, die sich auf diesem Boot befanden, wurden extern durch direkt aufliegende Asche bzw. durch radioaktives Material auf Deck sowie durch Inkorporation von Radionuklidern exponiert. Die Ganzkörper-Gammadosis der Fischer wurde auf mindestens 170 r (1,5 Gy) und bei einigen Fischern auf bis zu 700 r (6,1 Gy) geschätzt, wobei über 50 % der Dosis am ersten Tag erhalten wurde. Zudem wurden signifikante Mengen an Radionukliden im Urin nachgewiesen, was auf eine Inkorporation schließen lässt (Kumatori et al. 1965). Alle 23 Fischer litten unter Erythemen, Ödemen oder Bläschenbildung, ein Großteil unter Erosionen, Ulcera oder Nekrosen sowie Haarausfall. Der Schweregrad war nicht in allen Fällen von der vermuteten Gesamtdosis abhängig (Messerschmidt 1960).

Die Leukozytenzahl fiel nach Exposition und erreichte ihren Tiefpunkt ($3\,700\,\mu\text{l}^{-1}$ bis $800\,\mu\text{l}^{-1}$, je nach Patient) 4 bis 8 Wochen nach Niedergang des Fallouts; eine negative Korrelation zwischen externer Gammadosis und Leukozytenzahl konnte bestätigt werden. Nach acht Wochen stieg die Zahl der Leukozyten wieder an. Die Zahl der Neutrophilen sank ebenfalls und war zwischen Woche 4 und 8 auf dem tiefsten Stand ($\sim 200\,\mu\text{l}^{-1}$ bis $2\,000\,\mu\text{l}^{-1}$); eine Abhängigkeit von der erhaltenen Dosis wurde ebenfalls gezeigt. Darüber hinaus erlitten alle Patienten eine Lymphopenie zwischen Woche 2 und 8 (Kumatori et al. 1965). Ein Patient verstarb 206 Tage nach Beginn der Exposition an Leberversagen, jedoch waren er und einige andere Besatzungsmitglieder bereits zuvor an Hepatitis B erkrankt.

Eine weitere Untersuchung der Patienten 10 Jahre nach Exposition zeigte, dass bei einigen Patienten Hautveränderungen wie Pigmentierung, Depigmentierung oder Teleangiectasien an den Stellen der Beta-Verbrennungen nach wie vor zu erkennen waren. Histologisch konnten u. a. der Verlust von Pigmentzellen, jedoch keine Entzündungsreaktionen, chronische Dermatitis oder Neoplasien gezeigt werden. Bis auf einzelne Ausnahmen waren die Zellzahlen des peripheren Blutes im Normalbereich. An 13 Patienten wurde eine Chromosomenanalyse in peripheren Lymphozyten durchgeführt; die Rate chromosomaler Aberrationen war gegenüber einer Vergleichsgruppe deutlich erhöht, darüber hinaus waren bei sieben Patienten dizentrische Chromosomen vorhanden. Bei weiteren Laborwertanalysen wurden nur vereinzelte Auffälligkeiten gefunden; es gab keinen dauerhaften Fall von Infertilität. Ebenso wurde bei einer Ganzkörpermessung und einer Ausscheidungsanalyse keine signifikant erhöhte Aktivität durch ^{137}Cs oder ^{90}Sr gefunden (Kumatori et al. 1965).

7.2.2 Kernwaffentests der Vereinigten Staaten und Auswirkungen auf beteiligtes Personal

Die USA führten im Zeitraum von 1945 bis 1962 insgesamt 215 atmosphärische Kernwaffentests durch. Anfänglich wurden Filmdosimeter nur bei einer repräsentativen Stichprobe des teilnehmenden Personals eingesetzt, bei späteren Tests wurden weitestgehend alle Teilnehmenden mit Filmdosimetern ausgestattet.

Bis auf wenige Unfälle (Castle Bravo) wurde das Personal so positioniert, dass es nur geringen Mengen von Initialstrahlung oder Fallout-verursachter Strahlung exponiert war; Kombinationsverletzungen aus Strahlen-, Verbrennungs- und konventionellen Verletzungen wurden nicht berichtet.

Die aktuellste und umfangreichste Auswertung zu den Spätfolgen der Initialstrahlung bei den Teilnehmenden der Kernwaffentests wurde mit einer Kohorte von 114 270 männlichen militärischen Teilnehmern durchgeführt. Untersucht wurde die Todesursache bis einschließlich 2010 der Teilnehmer der US-Kernwaffen Testserien Castle (1954), Crossroads (1946), Hardtrack I (1958), Redwing (1956, Pacific Proving Ground, PPG); Greenhouse (1951), Plumbbob (1957), Upshot-Knothole (1953, Nevada Test Site, NTS) sowie Trinity (1945, New Mexico). Über die Hälfte der betrachteten Personendosimeter war einer Gammadosis von < 5 mSv ausgesetzt und lediglich 33 Personen wurden mit einer Dosis von > 300 mSv exponiert. Zum 31.12.2010 waren 66,0 % der betrachteten Personen verstorben. Die Autorinnen und Autoren fanden weder bei den betrachteten Todesursachen, noch bei der Gesamtsterblichkeit und der Sterblichkeit durch maligne Neoplasmen eine signifikant erhöhte standardisierte Mortalitätsrate, welche mit der Strahlenexposition in Verbindung gebracht werden konnte (Boice et al. 2022). Vergleichbar wurde im Jahr 2000 eine Studie mit ca. 70 000 männlichen Teilnehmern von fünf der acht oben genannten Testserien publiziert (Greenhouse, Upshot-Knothole, Castle, Redwing, Plumbbob). Auch hier konnte, verglichen mit einer äquivalent großen militärischen Vergleichskohorte, keine signifikante Übersterblichkeit allgemein, durch Krebs-erkrankungen oder Leukämien festgestellt werden (ein „Trend“ bezüglich der Leukämien war laut der Autorinnen und Autoren jedoch zu erkennen) (Thaul et al. 2000).

Eine isolierte Betrachtung der militärischen Teilnehmer der Übung „Desert Rock“, welche im Rahmen von Plumbbob „Smoky“ stattfand, konnte unter Teilnehmern eine signifikant erhöhte Rate an lymphatischen Leukämien ohne CLL feststellen (SMR = 1,89; KI 1,24-2,75) (Caldwell et al. 2016). Hier waren die Soldaten ca. 4,5 km von Ground Zero bei Explosion entfernt und hielten sich danach im Rahmen der Übung in näherer Umgebung auf.

Eine ältere Studie betrachtete die Übersterblichkeit der Teilnehmer des Crossroads Tests und fand zwar eine signifikant um 4,6 % erhöhte Sterblichkeit der Teilnehmer, konnte diese jedoch nicht auf eine Strahlenexposition zurückführen (Johnson et al. 1996).

7.2.3 Kernwaffentests der Sowjetunion

Das Semipalatinsk Testgelände in Kasachstan wurde seit 1949 von der Sowjetunion für Kernwaffentests genutzt. Bis 1962 wurden 111 atmosphärische Tests (davon 25 bodennah) mit einer gesamten Sprengkraft von 6,6 MT durchgeführt. Vier Tests werden für 95 % der Exposition der lokalen Bevölkerung verantwortlich gemacht (29.8.1949, 24.9.1951, 12.8.1953 und 24.8.1956). Der Test 1956 soll zur Hospitalisierung von etwa 600 Personen in Ust-Kamenogorsk (ca. 400 km vom Testgelände entfernt) wegen akuter Strahlenkrankheit geführt haben (Yan 2019), jedoch ergab ESR-Dosimetrie im Zahnschmelz von 30 Bewohnern dieser Stadt nur Dosen bis zu ca. 120 mGy (Zhumadilov et al. 2009, Zhumadilov et al. 2013). Nach einer vergleichenden Analyse mehrerer Dosisrekonstruktionsmethoden (Stepanenko et al. 2006) kann man im am

höchsten kontaminierten Dorf (Dolon, ca. 100 km vom Testgelände entfernt) infolge des Tests von 1949 durchschnittlich von ca. 500 mGy durch externe Exposition ausgehen.

Land und Mitarbeitende (Land et al. 2008, Land et al. 2015) rekonstruierten Schilddrüsendosen durch externe Exposition und Ingestion in einer Kohorte von über 2000 in vom Fallout betroffenen Dörfern Wohnenden. Mittlere geschätzte Schilddrüsendosen lagen bei ca. 300 mSv, maximale Dosen bei über 4 Gy; Bei Dosen über 0,1 Gy dominierten im Allgemeinen die Beiträge durch interne Exposition, v.a. durch Ingestion von Milchprodukten, gegenüber der externen Exposition.

Eine historische Kohorte von ca. 20 000 Bewohnern exponierter Ortschaften in der Umgebung des Testgeländes und von Vergleichsortschaften ergab Hinweise auf verschiedene gesundheitliche Spätfolgen (verschiedene Krebserkrankungen und kardiovaskuläre Effekte) (Bauer et al. 2005, Grosche et al. 2011, Grosche et al. 2015). Apsalikov et al. (2019) berichteten von einer neuen Kohorte, die mehr als 200 000 direkt exponierte Personen und 150 000 Nachkommen umfasst. Es sind aber keine weiteren Ergebnisse dazu veröffentlicht.

Weitere Testgelände der Sowjetunion befanden sich auf Novaya Zemlya, wo auch die bisher größte Explosion einer thermonuklearen Waffe stattfand, und in Kapustin Yar. Beide Gelände sind sehr abgelegen, und es sind kaum Informationen zu lokalen und regionalen Expositionen aufgrund der Tests verfügbar (Simon und Bouville 2002).

7.2.4 Kernwaffentests des Vereinigten Königreichs

Das Vereinigte Königreich führte zwischen 1952 und 1958 insgesamt 21 atmosphärische Kernwaffentests durch, 12 in Australien und neun in oder bei Kiribati (Übersicht bei Kendall et al. 2004). Weitere Tests nach 1958 wurden auf dem Nevada Testgelände durchgeführt. Zudem unterstützte das Vereinigte Königreich Kernwaffentests der Vereinigten Staaten bei Kiribati. 1983 wurde eine epidemiologische Studie aufgesetzt mit über 20 000 männlichen Militärangehörigen und zivilen Angestellten, die sich zu definierten Zeiträumen (die zum Teil deutlich über den letzten Test hinausreichten) an den Testorten aufgehalten hatten, wobei eine Anwesenheit zum Zeitpunkt einer Testexplosion nicht Voraussetzung war (Kendall et al. 2004). Die Kontrollgruppe von ebenfalls etwa 20 000 Personen umfasste Militärangehörige, die ebenfalls in (sub-)tropischen Gebieten eingesetzt waren und die hinsichtlich Geburtsdatums, Dienstgrads, etc. gematcht wurden. Nur für 23 % der Teilnehmer sind Dosisaufzeichnungen verfügbar, und 8 % der Teilnehmer erhielten Dosen von über 1 mSv mit einer mittleren Gammastrahlungsdosis von 9,9 mSv. Etwa 100 Teilnehmer hatten aufgezeichnete Dosen über 50 mSv, davon zwei mit ca. 300 mSv (Gillies und Haylock 2022, Kendall et al. 2004). Die neueste Auswertung (Gillies und Haylock 2022) umfasst ein Follow-up von 1952 bis 2017 und vergleicht Mortalität aufgrund einer Vielzahl von Krebs- und Nicht-Krebserkrankungen, sowie Krebsinzidenz zwischen Teilnehmern und Kontrollen sowie zwischen Teilnehmern und Männern der allgemeinen Bevölkerung des Vereinigten Königreichs. Gegenüber der Kontrollgruppe zeigten Teilnehmer eine leicht erhöhte Gesamtmortalität ($RR = 1,02$; 90 % KI 1,00-1,05; $p = 0,04$) und eine nicht-signifikante Erhöhung der Mortalität durch alle Krebsarten zusammen ($RR = 1,03$; 90 % KI 1,00-1,07; $p = 0,07$), wobei letztere durch erhöhte Mortalität durch Lungen-, Magen- und Prostatakrebs dominiert wurde. Zudem zeigten sie eine nicht-signifikant erhöhte Mortalität aufgrund von Leukämie (ohne CLL) ($RR = 1,26$; 90 % KI 0,98-1,43; $p = 0,16$), die vor allem auf der Mortalität durch CML beruht ($RR = 2,43$; 90 % KI 1,43-4,13; $p = 0,003$). Die Autoren argumentieren, dass die aufgezeichneten Expositionen zu gering seien, um die beobachteten Effekte zu erklären.

Die gesamte Explosionsstärke der Tests in Australien lag bei unter 0,2 MT. Nach Simon und Bouville (2002) wurden die Dosen durch externe Bestrahlung für die lokale Bevölkerung nicht

für alle Testreihen bestimmt; in den Fällen, in denen Schätzungen vorliegen, liegen diese unter 1 mGy. Die Kiribati-Inseln wurden zwischen 1957 und 1962 vom Vereinigten Königreich und von den Vereinigten Staaten für Tests mit einer gesamten Explosionsstärke von ca. 30 MT genutzt. Es gibt keine Informationen zu Expositionen der Bevölkerung (Simon und Bouville 2002).

7.2.5 Weitere Kernwaffentests

Frankreich führte zwischen 1960 und 1966 vier atmosphärische Kernwaffentests und 13 Untergrundtestexplosionen auf zwei Testgeländen in der algerischen Sahara durch. Dosisabschätzungen für die Bevölkerung sind nicht bekannt. Zwischen 1966 und 1974 nutzte Frankreich als Testgelände die Mururoa- und Fangataufa-Atolle in Französisch-Polynesien. Insgesamt wurden 46 atmosphärische und 137 Unterwasser-Tests durchgeführt. Für mehrere Atolle in 120 km bis über 1 000 km Entfernung wurden Dosen gemessen. Die durchschnittlichen Ganzkörperdosen für die Bevölkerung lagen unter 1 mGy (Simon und Bouville 2002). Kürzlich wurde der Zusammenhang von Schilddrüsendosis und differenzierten Schilddrüsenkarzinomen (DTC) in exponierten Regionen Französisch Polynesiens infolge von Deklassifizierung von Unterlagen neu bewertet (de Vathaire et al. 2023). Bei einer mittleren Schilddrüsendosis von annähernd 5 mGy und 395 Fällen von DTC, die zwischen 1983 und 2016 diagnostiziert wurden, ergab die Fall-Kontroll-Studie keine klare Assoziation zwischen Schilddrüsendosis und DTC-Risiko. Modellrechnungen schätzten, dass die französischen Kernwaffentests mit 2,3 % des Lebenszeitriskos für DTC assoziiert sein könnten.

China führte zwischen 1964 und 1988 34 Kernwaffentests am Lop Nor Testgelände durch, davon 22 oberirdisch. Die durchschnittlichen Ganzkörperdosen für die Bevölkerung lagen unter 1 mGy (Simon und Bouville 2002).

Erkenntnisse zu exponierten Personen bzw. möglichen gesundheitlichen Folgen aus anderen Ländern (u. a. Nordkorea, Indien, Pakistan, Israel), die möglicherweise Kernwaffentests durchgeführt haben, liegen nicht vor.

7.2.6 Zusammenfassung Erkenntnisse aus Kernwaffentests

Kernwaffentests wurden in wenig besiedelten Gebieten durchgeführt und führten nur in Ausnahmefällen zur Exposition der Bevölkerung mit Dosen im potenziell tödlichen Dosisbereich (mehrere Gy) (siehe Tab. A 1). Im Allgemeinen lagen die maximalen Dosen durch externe Exposition aufgrund von Fallout bei Entfernungen zwischen ca. 100 km und bis zu einigen 100 km vom Explosionsort bei einigen 100 mGy. Wenn Verzehrwarnungen unterlassen wurden, konnten in den betroffenen Gebieten beträchtliche Schilddrüsendosen beobachtet werden (bis zu mehreren Gy). Der Beitrag von Inhalation zur Schilddrüsendosis wird als gering angesehen. Generell nimmt die relative Bedeutung interner Exposition, vor allem durch Ingestion, mit dem Abstand vom Explosionsort zu. Anspaugh et al. (2022) gehen davon aus, dass mit heutigem Wissen und bei entsprechendem Verhalten eine interne Exposition durch den Ingestionspfad auch bei überraschenden nuklearen Explosionen zum größten Teil vermeidbar wäre.

8 Gesundheitliche und psychosoziale Effekte sowie Maßnahmen zu deren Vermeidung bzw. Reduzierung

In Anwendung des erweiterten Gesundheitsbegriffs der WHO von 1948 „Gesundheit ist ein Zustand völligen physischen, psychischen und sozialen Wohlbefindens und nicht nur das Freisein von Krankheit und Gebrechen“ werden in den Abschnitten 8.1 bis 8.4 zunächst somatische Auswirkungen von Kernwaffenexplosionen abgehandelt. Es folgt ein weiterer Abschnitt zu den möglichen psychosozialen Folgen (siehe Abschnitt 8.5).

Die somatischen Auswirkungen von Kernwaffenexplosionen beruhen auf dem entstehenden Feuerball und der extrem heißen Hitzewelle, direkten und indirekten Folgen der Druckwelle, der Freisetzung initialer Strahlung, der Bildung von Radionukliden, die als Fallout größere Regionen kontaminieren können und der Aktivierung von Boden im Nahbereich. Die Radien um den Explosionsort, innerhalb derer schwer gesundheitsgefährdende und potenziell tödliche Effekte auftreten können, hängen von Explosionsstärke und -höhe, sowie anderen Faktoren ab (z. B. Geologie, Bebauung, Wetterbedingungen) und haben für Hitzewirkung, Druck und initiale Strahlung ähnliche Abmessungen (siehe Kapitel 5). Daher sind Menschen in diesen Bereichen meist von Kombinationsschäden betroffen. Dies führt dazu, dass bei einer gegebenen Strahlendosis mehr Menschen versterben werden, als dies ohne zusätzliche Traumata der Fall wäre. Dies ist bei den folgenden Ausführungen zu Strahleneffekten zu beachten. Bei Menschen, die sich in vom Fallout betroffenen Gebieten aufhalten, sind weniger Kombinationsschäden aus Strahlenwirkungen, Verletzungen und Verbrennungen zu erwarten. Hier dominiert bei den Strahlenwirkungen in den ersten Tagen eine externe Bestrahlung durch Radionuklidablagerungen, während zu späteren Zeitpunkten die relative Bedeutung von Ingestion, teils auch Inhalation zunimmt.

Gesundheitliche Strahlenwirkungen in Fallout-Bereichen können kurzfristig durch einfache Verhaltensmaßnahmen – „get inside, stay inside, stay tuned“ („sheltering“) wirksam reduziert werden. Im zentralen Falloutgebiet sind in den ersten Stunden extrem hohe, lebensbedrohliche Strahlenintensitäten zu verzeichnen, die bereits nach etwa ein bis zwei Tagen auf ein Niveau abklingen, welches aufgrund radiologischer Kriterien eine Evakuierung erlaubt. Mittelfristig ist die Versorgung mit unkontaminierten Lebensmitteln wichtig.

8.1 Effekte durch ionisierende Strahlung

8.1.1 Akute Strahlenkrankheit

Die Gesundheitseffekte durch Exposition mit ionisierender Strahlung hängen u. a. von der Gesamtdosis, der Dosisleistung, der Strahlenqualität und dem Teil des Körpers ab, der bestrahlt wurde. Auch individuelle Faktoren wie genetische Faktoren, Lebensstil oder Vorerkrankungen beeinflussen die auftretenden Effekte bei den Betroffenen. Daher sind alle im Folgenden genannten Dosisangaben als grobe Orientierung zu verstehen. Nach Ganzkörperexposition oder großvolumiger Exposition des Körperstammes entwickelt sich bei Dosiswerten oberhalb von ca. 1 Gy (bei Gamma- oder hochenergetischer Röntgenstrahlung) das akute Strahlensyndrom (acute radiation syndrome, ARS), dessen Symptomatik ab ca. 2 Gy klinisch bedeutsam wird. ARS folgt einem spezifischen zeitlichen Verlauf mit Prodromal- und Latenzphase vor der manifesten Erkrankung, wobei die Dauer dieser Phasen prognostische Bedeutung hat. Die in Abhängigkeit der Dosis unterschiedlichen Manifestationen der Krankheit, ihre Diagnostik und Behandlungsmöglichkeiten sind ausführlich in SSK 2022a beschrieben, so dass hier nur ein Überblick gegeben wird.

Subklinische charakteristische Veränderungen im Blutbild werden ab ca. 0,5 Gy beobachtet, symptomatische Manifestationen im blutbildenden System ab ca. 1 Gy. Die sogenannte hämatopoetische Manifestation des ARS beruht auf der hohen Strahlenempfindlichkeit der Lymphozyten und dem Verlust der Teilungsfähigkeit der Stammzellen im Knochenmark, die für die Neubildung von Lymphozyten, Granulozyten und Thrombozyten verantwortlich sind. Die fehlende Neubildung bei gleichzeitiger natürlicher Abnahme der verschiedenen differenzierten Zelltypen im Blut führt zu massiven Beeinträchtigungen des Immunsystems, Blutungsgefahr und, bei Verringerung von Erythrozyten, suboptimaler Sauerstoffversorgung der Gewebe. Frühe Abschätzungen der Dosis bei Ganzkörperexposition, die in Abwesenheit medizinischer Versorgung bei 50 % der Betroffenen innerhalb von 60 Tagen zum Tod führt ($LD_{50/60}$), lagen bei ca. 3,5 Gy (Cronkite 1982). Bei einer Exposition in Höhe von ca. 3,5 Gy liegt die Todesursache hauptsächlich in einer Knochenmarkinsuffizienz begründet (DiCarlo et al. 2011), und der Tod tritt innerhalb von zwei bis sechs Wochen auf. Eine Erholung der Knochenmarkfunktion ist möglich, sofern überlebende Stammzellkompartimente vorhanden sind (wenige Prozent reichen aus), und eine Phase der Infekt- und Blutungsanfälligkeit überlebt wurde. Die medizinische Versorgung beinhaltet die Vermeidung von Infektionen, Antibiose und antivirale und antifungale Therapie, Stützung des Flüssigkeitshaushalts und die Verabreichung von Bluttransfusionen. Durch diese Maßnahmen lässt sich die $LD_{50/60}$ ungefähr verdoppeln (Hall 2000, Dainiak et al. 2003).

Moderne Behandlungsansätze beruhen auf Zytokinen, also zelltyp-spezifischen Wachstumsfaktoren, wie z. B. G-CSF (granulocyte colony stimulating factor), GM-CSF (granulocyte-macrophage colony stimulating factor), Erythropoiesis-stimulierende Agenzien und Thrombopoietin-Mimetika (Dainiak und Albanese 2022, MacVittie und Farese 2021). Diese fördern die Erholung verbliebener Stammzellkompartimente im Knochenmark. In den USA wurden durch die FDA (Food and Drug Administration) die Wirkstoffe Filgrastim, Pegfilgrastim, Sargramostim und Romiplostim für zu erwartende hämatologische Schäden nach Strahlenexposition zugelassen²². Eine vergleichbare Zulassung durch die EMA (European Medicines Agency) gibt es zurzeit nicht. In Europa sind Filgrastim und Pegfilgrastim u. a. für die Indikation Neutropenie bei Krebspatienten und Romiplostim bei chronischer immuntrombozytopenischer Purpura zugelassen.

Allerdings ist zu erwarten, dass diese Medikamente bei einem Massenanfall von Verletzten nicht flächendeckend zur Verfügung stehen werden. Insbesondere gibt es nach Kenntnis der SSK weder in Deutschland noch in der europäischen Union eine Vorratshaltung von Zytokinen und vermutlich auch nicht von Supportivtherapeutika, die bei der Explosion einer Kernwaffe von 10 kT in einer Großstadt für die umfassende Versorgung der zu erwartenden Menge an betroffenen Personen ausreichend wäre.

Bei akuten Expositionen ab ca. 5 Gy tritt zusätzlich zur potenziell irreversiblen hämatologischen Manifestation eine Beeinträchtigung des gastrointestinalen Systems auf, die hauptsächlich auf einem Verlust der Teilungsfähigkeit von Zellen der Darmschleimhaut beruht. Durch den Verlust der epithelialen Barriere kommt es zu schweren gastrointestinalen Symptomen wie Durchfall, Infektionen, Sepsis und Blutungen. Die Behandlungsmöglichkeiten sind gering und bei Dosen ab ca. 8 Gy bis 10 Gy führen die gastrointestinalen Symptome innerhalb weniger Tage zum Tod. Eine Abschätzung der $LD_{50/7-14}$, die zum Versterben von 50 % der Betroffenen innerhalb von 7 Tage bis 14 Tagen führt, ergab 9,6 Gy [95 % KI 5,7 Gy bis

²² WHO: National stockpiles for radiological and nuclear emergencies: policy advice.
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240067875>, zuletzt aufgerufen am 16.09.2024

17,2 Gy]. Neben gastrointestinalen Effekten sind bei diesen Dosen auch Beeinträchtigungen des zerebrovaskulären Systems todesursächlich (DiCarlo et al. 2011).

Die Mechanismen der zerebrovaskulären Symptomatik sind noch immer schlecht verstanden. Übelkeit und Erbrechen, die rasch nach Exposition und schon bei relativ niedrigen Dosen auftreten, beruhen auf einer Stimulierung des Brechzentrums (Chemorezeptor Trigger Zone), vermutlich aufgrund von Serotoninfreisetzung im Gastrointestinaltrakt.

Unter der Schirmherrschaft der Europäischen Union wurde 2001 ein Handbuch „METREPOL, Medical TReatment ProtocOLs for radiation accident victims“ (Fliedner et al. 2001) verfasst, das basierend auf der Pathophysiologie der betroffenen Organsysteme diagnostische und therapeutische Leitlinien definiert. Schweregrade, nach METREPOL als „response categories“ bezeichnet, lassen sich meist erst im Verlauf der Krankheit (bis ca. 3 Wochen) verlässlich diagnostizieren. Gegenwärtig wird eine Überarbeitung des Handbuches diskutiert (Stenke et al. 2022, Lebaron-Jacobs und Herrera-Reyes 2022), das neuere Behandlungskonzepte berücksichtigen soll.

8.1.2 Stellenwert der Stammzelltransplantation

Der NCRP-Report 98 (1989) gibt bei minimaler medizinischer Versorgung eine LD_{50/60} von 3,2 Gy bis 3,6 Gy an, bei ausreichender Versorgung von 4,8 Gy bis 5,4 Gy und nach Stammzelltransplantation von > 5,4 Gy. Der potenzielle Nutzen der Stammzelltransplantation in der Therapie der akuten Strahlenkrankheit wird aktuell kontrovers diskutiert, da überbrückende „Bridging“-Behandlungen mit Zytokinen, Transfusionen und unterstützenden Therapien ähnliche Erfolge zeigen konnten. Es ist anzunehmen, dass die LD_{50/60} bei Ausschöpfung aller aktuell verfügbaren Möglichkeiten medizinischer Versorgung bei etwa 7 Gy liegt. Für die ARS-Patienten unter den Liquidatoren des Reaktorunfalls in Tschornobyl wurde sogar eine LD_{50/60} von 8,8 Gy geschätzt (Satyamitra et al. 2022, DiCarlo et al. 2021), wobei einige der Liquidatoren eine Knochenmarktransplantation erhielten. Die Effektivität dieser Transplantationen wurde in Fachkreisen jedoch intensiv hinterfragt. Nach Einschätzung des „Nuclear Accident Committees“ der „European Society for Blood and Marrow Transplantation“ stellt die Knochenmark- oder Stammzelltransplantation weder eine Notfallmaßnahme innerhalb der ersten Tage dar, noch ist sie bei irreversiblen Schaden eines anderen Organsystems indiziert. Hinsichtlich eines Vergleichs der zur erwartenden LD_{50/60}-Schätzungen nach Reaktorunfall und Kernwaffenexplosion sind neben den Unterschieden in der Anzahl Betroffener und der Versorgungsmöglichkeiten auch Unterschiede in der Dosisleistung zu beachten. Derzeit ist die allogene Stammzelltransplantation als individuelle Therapieoption für einzelne Patienten in mit Strahlenunfällen vertrauten Zentren anzusehen²³.

8.1.3 Beta-Strahlung und Hauteffekte

Hautschäden nach Strahlenexposition treten als „local radiation injury“ (LRI), als kutanes Strahlensyndrom bei Ganzkörperexposition oder als sogenannte „Beta burns“ auf (Iddins et al. 2022). LRI ähneln thermischen oder elektrischen Verbrennungen und können auch anfänglich leicht damit verwechselt werden. Die im Umfeld beruflicher Unfälle durch Punktstrahler mit hoher Dosisleistung häufig auftretenden LRI spielen bei einer Exposition nach Kernwaffeneinsatz keine Rolle. Vielmehr ist mit Exposition durch lokalen Fallout auf ungeschützter, aber auch geschützter Haut zu rechnen, wenn der Fallout nicht schnellstmöglich entfernt wird. Bei direktem Hautkontakt überwiegt vermutlich die Wirkung durch Betastrahler und es kommt zu

²³ <https://www.ebmt.org/sites/default/files/2018-03/EBMT%20Nuclear%20Accident%20Committee%20Pocket%20Guide%202017.pdf>, zuletzt aufgerufen am 16.09.2024

einer verstärkten Schädigung oberer Hautschichten. Derartige Schäden treten lokal verzögert und bei sehr hohen Dosen auf. Erste Zeichen bereits nach wenigen Stunden deuten bei isolierter Exposition mit ionisierender Strahlung auf eine hohe Dosis hin. Bei einem Kernwaffeneinsatz ist jedoch, bis auf reinen Fallout, mit einer Kombination aus Hitzeabstrahlung und ionisierender Strahlung zu rechnen. Neben den akuten Folgen wie akuter Desquamation, Blasenbildung, Epilation oder Radioulcera ist mit Langzeitfolgen zu rechnen. Hierzu zählen die Radiodermatitis und der Verlust von Funktionen der Haut und Schleimhäute wie Schweiß- und Sekretbildung. Nach den Atombombenabwürfen von Hiroshima und Nagasaki wurde eine schwere Form der Keloidbildung nach Abheilen der Brandwunden beobachtet. Anzumerken ist, dass es sich hierbei nicht um Folgen von „Beta burns“ Strahlenschäden primär aufgrund von Betastrahlern) gehandelt haben dürfte, da es in beiden Städten nicht zu relevantem Fallout gekommen ist, sondern um eine Kombination aus „flash burn“ (initiale thermische Verbrennung bei Detonation der Kernwaffe, sogenannter Hitzeblitz) und Exposition gegenüber externer ionisierender Strahlung.

Derzeit existieren keine zugelassenen speziellen Therapien für Beta burns, kutanes Strahlensyndrom oder LRI (Iddins et al. 2022). Bei kleineren Strahlenunfällen wurden teils erfolgreich Strategien mit lokaler Applikation von Salben und anderen lokalen Arzneimitteln, angepassten Wundverbänden bis hin zu zellulären Therapien durchgeführt. Die vielversprechendste Maßnahme in Hinblick auf Beta burns ist es, die Exposition so schnell wie möglich zu beenden. Dafür ist jegliche kurzfristige Form der schnellen Dekontamination (Trockendekontamination, Selbstdekontamination, Entfernen kontaminierter Kleidung) wichtig. Diese hat immer Priorität vor einer verzögerten gründlichen Dekontamination. Therapien sollten interdisziplinär, möglichst unter Beteiligung erfahrener Ärztinnen und Ärzte aus den Bereichen Verbrennungschirurgie, plastischer Chirurgie und Dermatologie sowie Radioonkologie mit Erfahrung in der Behandlung von Komplikationen nach Strahlentherapie erfolgen und möglichst auch Experten und Expertinnen für Medizinphysik einschließen. Bei massiven lokalen Hautschäden, insbesondere bei tiefer gehenden Verletzungen, haben sich Therapien mit der Applikation von mesenchymalen Stammzellen (MSC) und dosisabhängiger chirurgischer Entfernung von Gewebe bewährt (Benderitter et al. 2010). Für einzelne Patientinnen und Patienten werden diese individuellen und aufwändigen Therapien auch nach dem Einsatz einer Kernwaffe möglicherweise in Frage kommen, allerdings werden sie derzeit aufgrund technischer und finanzieller Gründe nicht für eine große Anzahl Verletzter verfügbar sein. Modulierende (den Krankheitsverlauf verändernde) Medikamente (MSC und verwandte Medikamente) gehören derzeit zu den vielversprechenden Therapieformen. Die dabei genutzten Medikamente und zellulären Komponenten könnten auch Teil zukünftiger Stockpiles werden.

8.1.4 Gesundheitliche Effekte nach Inkorporation

Generell spielen im Nahbereich der Kernwaffenexplosion und in der frühen Phase Inhalation und Inkorporation gegenüber der externen Exposition eine untergeordnete Rolle. Einige der Maßnahmen zur Verringerung der externen Exposition können auch Inhalation und Inkorporation verringern, z. B. der Aufenthalt in schützenden Räumen, Eigen- und Grobdekontamination durch Kleidungswechsel und Abbürsten etc. Hinweise zur professionellen Dekontamination inklusive von Wunden finden sich im Handbuch Strahlennotfallmedizin der SSK (SSK 2022b). Sollte der schützende Raum verlassen werden, können FFP 3-/FFP 2-Masken einen Schutz vor Inhalation und Inkorporation bieten (SSK 2023b). Die relevante Exposition geht allerdings vom „ground shine“ aus, somit dürfen FFP 3-/FFP 2-Masken den Träger nicht in falscher Sicherheit wiegen. Zudem sollten Lebensmittel und Trinkwasser nur aus Vorräten konsumiert werden. Zu meiden sind frisch geerntete Früchte und Gemüse aus kontaminierten Regionen. Die Verpackung von Lebensmitteln, die von außen in schützende Räume gelangen, sollte dekontaminiert werden.

Wegen der überwiegenden Bedeutung der externen Bestrahlung spielt auch der Einsatz von Dekorporationstherapeutika im Falle einer Kernwaffenexplosion voraussichtlich keine oder allenfalls eine geringe Rolle. Der Einsatz dieser Medikamente ist der Akutversorgung nachgelagert und setzt angemessene Ressourcen und optimierte Spezialdiagnostik voraus. Vorgehalten werden in nationalen wie internationalen Stockpiles neben Kaliumiodid die Dekorporationsmedikamente Preussisch blau, DTPA (in Form von Ca-DTPA und Zn-DTPA) und ggf. weitere Medikamente für Spezialanwendungen. Ein Medikament, welches stoffübergreifend radioaktive Kontamination entfernen kann, gibt es nicht. Daher ist eine individuelle Diagnostik mittels z. B. Ausscheidungsanalytik inklusive komplexer Abschätzung der vermeidbaren Folgeexposition (Hochrechnung der zu erwartenden Dosis für z. B. 50 Jahre) erforderlich. Auch Adsorbantien oder Induktion von Diarrhoe oder forcierte Diurese spielen nach Bewertung der SSK keine relevante Rolle.

Prophylaktische Gabe von stabilem Kaliumiodid ist ebenfalls von nachgeordneter Bedeutung, wie bereits in der SSK-Empfehlung zur Iodblockade bei Kernwaffenexplosion (SSSK 2022a) dargelegt.

In späteren Phasen wird im Fallout-Bereich die relative Bedeutung von Inkorporation gegenüber externer Exposition größer, insbesondere durch die Aufnahme kontaminierter Lebensmittel.

8.1.5 Langzeiteffekte

Personen, die die akute Strahlenkrankheit überlebt haben, können verzögerte Effekte der akuten Strahlenexposition (delayed effects of acute radiation exposure, DEARE) zeigen. DEARE ist eine noch schlecht untersuchte chronische Erkrankung mit einem breiten und vielfältigen Spektrum möglicher Symptome, die Monate oder Jahre nach einer Strahlenexposition manifest werden und progressiv verlaufen können (Micewicz et al. 2019, Sridharan et al. 2021). Verschiedene Organe inklusive Lunge, Nieren, Herz, Leber, Gehirn können betroffen sein und zu den möglichen Krankheitsbildern gehören u. a. Lungenfibrosen, Herzerkrankungen, Bluthochdruck, Diabetes mellitus, endokrine Fehlfunktionen, neurokognitive Veränderungen sowie Katarakte, die alle mit unterschiedlichen Inzidenzen auftreten. Im Gegensatz zu ARS, dessen Inzidenz in einem engen Dosisfenster steil ansteigt, sind die Verläufe bei DEARE selbst bei Labortieren mit gleichem genetischen Hintergrund, gleichem Lebensstil und gleichen Bestrahlungsbedingungen variabel. Es wird angenommen, dass chronische Entzündungsreaktionen bei der Entstehung von DEARE eine wichtige Rolle spielen. Weitere Rollen spielen vermutlich Schäden an den Blutgefäßen und endothelialen Geweben, strahleninduzierte Seneszenz und vorzeitige Alterung. Bislang gibt es keine zur Behandlung von DEARE zugelassenen Medikamente; experimentell werden Stoffe aus den Gruppen der Antioxidantien, Phytoöstrogene u. a. untersucht.

8.2 Verbrennungen

Thermische Verbrennungen können im Rahmen eines Kernwaffeneinsatzes sowohl initial durch den Hitzeblitz (flash burns) als auch im Nachgang durch sekundäre Brandherde entstehen. Insbesondere flash burns können zu schwerwiegenden großflächigen Verbrennungen führen, wenn die betroffene Person ungeschützt exponiert wurde. Als Folge kann es zu einem lebensbedrohlichen Verbrennungsschock kommen, welcher eine unmittelbare intensivmedizinische Behandlung erfordert (Tejiram et al. 2023). Darüber hinaus kann es, insbesondere bei Kombination mit Strahlenexposition, zu letalen Infektionen kommen. Da die intensivmedizinische Behandlung im Nachgang eines Kernwaffeneinsatzes sehr wahrscheinlich nicht in ausreichendem Maße bzw. gar nicht gewährleistet werden kann, muss ggf. entschieden werden, wie die durch die gegebenen Umstände limitierten Mittel für eine größtmögliche Anzahl von Patienten

genutzt werden können (Becker et al. 1990). Nach dem Atombombenabwurf über Hiroshima (Messerschmidt 1984) war die Häufigkeit von Brandverletzungen durch thermische Strahlung im Freien mit rund 80 % sehr hoch, während sie bei Aufenthalt in Gebäuden nur etwa 20 % betrug.

8.3 Explosionstraumata

Für die Häufigkeit von Verletzungen durch die Druckwelle ist dieses Verhältnis mit ca. 20 % (im Freien) bzw. ca. 55 % (in Gebäuden) verglichen mit Verbrennungen umgekehrt, allerdings stark abhängig vom Gebäudetyp und dem genauen Aufenthaltsort innerhalb eines Gebäudes (Messerschmidt 1984). Die potenziellen Auswirkungen des Druckpulses auf den Menschen sind vielfältig und können schwerwiegende körperliche Schäden verursachen. Direkte Effekte umfassen Verletzungen an Organen wie der Lunge, dem Magen-Darm-Trakt und den Ohren, die durch den rapiden Druckwechsel verursacht werden. Zudem besteht das Risiko von Traumata durch den Aufprall auf Strukturen oder durch umherfliegende oder herabfallende Objekte. Die längere Dauer des Druckpulses bei Kernwaffenexplosionen im Verhältnis zu konventionellen Sprengkörpern verstärkt diese Gefahren, indem sie die Wahrscheinlichkeit direkter Verletzungen erhöht. Darüber hinaus trägt die vermehrte Entstehung von umherfliegendem Debris²⁴ zur Zunahme indirekter Verletzungen bei, wodurch die Gesamtwirkung des Druckpulses auf den menschlichen Körper erheblich verstärkt wird (Glasstone und Dolan 1977). Schwere Druckstoßverletzungen können sehr schnell zum Tod führen, und der umherfliegende Debris verursacht in der Regel mikrobiell stark kontaminierte Wunden, welche im weiteren Verlauf das Infektionsrisiko deutlich erhöhen (Beaven und Parker 2015).

8.4 Kombination von Strahlenschäden mit Brandverletzungen und sonstigen Verletzungen

Die Kombination einer Strahlenexposition mit sonstigen Verletzungen inklusive Verbrennungen („Radiation Combined Injury“, RCI) erhöht die Sterblichkeit bei gegebenen Dosen gegenüber der Einzelwirkung von Strahlung erheblich, selbst wenn die zusätzliche Verletzung selbst geringe Mortalität verursachen würde (DiCarlo et al. 2010; Kiang und Olabisi 2019). Oft werden negative Synergieeffekte beobachtet. Beispielsweise wurde in Experimenten mit Hunden beobachtet, dass nach einer Verbrennung von 20 % der Körperoberfläche, die selbst nur gering tödlich (12 %) war, die Mortalität auf über 70 % stieg, wenn zudem eine für sich allein nicht tödliche Ganzkörperbestrahlung von 1 Gy erfolgte (Brooks et al. 1952). Strahlung kann Wundheilungsstörungen verursachen und die Wundheilungszeiten deutlich verlängern. Höhere Strahlendosen können zudem durch Immunsuppression und Multiorganversagen die Auswirkung von Verletzungen und Infektionen erhöhen. Diskutiert werden auch schwer zu beherrschende systemische Entzündungsreaktionen durch eine Hochregulierung von pro-inflammatorischen Zytokinen („cytokine storm“; Rios et al. 2022). Eine Ursache für derartige synergistische Wirkungen liegt auch in Infektionen, wobei schon geringe Dosen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Infektionen erhöhen, und andererseits Verletzungen und Verbrennungen den Übertritt von Darmbakterien in den Blutkreislauf fördern (DiCarlo et al. 2011).

Kombinationsverletzungen werden vor allem für Personen relevant, die sich in der Grenzzone der Initialstrahlung aufhalten. Während „Operation Plumbbob Priscilla“ wurde die Wirkung von Kombinationstraumata durch Kernwaffenexplosionen bei Schweinen untersucht (McDonnell et al. 1961). Schweine, die einer Dosis von ca. 0,8 Gy Dosis ausgesetzt waren, zeigten keine veränderte Wundheilung oder erhöhte Mortalität durch Wunden bzw. Verbrennungen. In der Gruppe mit ca. 2,9 Gy zeigte sich ebenfalls keine erhöhte Mortalität durch Wunden (27 % der

²⁴ Sammelbegriff für alle umherfliegenden Gegenstände, Trümmer usw.

verwundeten Tiere vs. 37 % der nicht verwundeten Tiere starben), jedoch war die Mortalität in der Gruppe mit Verbrennungen >10 % der Körperfläche erhöht (42 % mit Verbrennungen vs. 25 % ohne Verbrennungen). Für Wunden wurde berichtet, dass diese sich im weiteren Verlauf häufig infizierten und so zu erhöhter Mortalität beitrugen. In den Kategorien höherer Strahlenexposition starben fast alle Tiere, sodass keine komplette Auswertung möglich war. Eine Korrelation der Überlebensdauer mit der verbrannten Fläche bei vergleichbarer Strahlendosis konnte jedoch gezeigt werden.

Die in Kombination von Strahlung mit Verbrennungen überproportional verschlechterte Prognose konnte auch in anderen Tierversuchen gezeigt werden (Messerschmidt 1977).

8.5 Psychosoziale Folgen von Nuklearkatastrophen

Jede Katastrophe kann zu psychischen Erkrankungen bei Bevölkerung und Einsatzkräften von Angststörungen, Depressionen bis hin zur Suizidalität, posttraumatischen Belastungsstörungen und verschiedenen eher unspezifischen stressbedingten körperlichen Beschwerden führen wie etwa Übelkeit, Magenbeschwerden, Kopfschmerzen, Schlafstörungen und Appetitlosigkeit.

Strahlung und Unsicherheit im Umgang mit Strahlung sind besondere Angstausslöser. Nach dem Fukushima Health Management Survey²⁵ fanden sich darüber hinaus u. a. folgende Belastungsfaktoren²⁶:

- geringes Wissen über die Ausbreitung und Wirkung der Strahlung,
- Überschätzung des radiologischen Risikos,
- Sorge um die eigene Gesundheit und/oder um Angehörige,
- unsichere Informationslage zum aktuellen radiologischen Notfall
- Schutzmaßnahmen wie Evakuierung und Umsiedlung samt ihrer Folgen durch veränderte Lebensumstände und -strukturen,
- Kritik an handelnden Behörden und zuständigen Stellen mit entsprechendem Vertrauensverlust sowie
- Diskriminierung und Stigmatisierung – zum Beispiel, wenn Personen im Zusammenhang mit dem Notfall als „Opfer“ oder „Evakuierte“ stigmatisiert werden, oder wenn sie als „verstrahlt“ diskriminiert werden und Ängste auslösen, nachdem sie möglicherweise einer erhöhten Strahlung ausgesetzt waren.

Die letztgenannten Belastungsfaktoren spielten in Japan nach dem Fukushima Unfall eine besondere Rolle auf dem Hintergrund der gravierenden und spät aufgearbeiteten Stigmatisierung und Diskriminierung der Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki.

Bei jeder größeren Katastrophe können Veränderung der sozialen Lebensumstände der Bevölkerung wie Vermeidung von sportlichen Outdoor-Aktivitäten, Evakuierung und Umsiedlung zu einer Zunahme von life-style Erkrankungen wie Adipositas und dadurch bedingten Folgen (Zunahme von Herz-Kreislauferkrankungen, Stoffwechselstörungen wie Diabetes) kommen.

In der Phase unmittelbar nach einer nuklearen Explosion und dem damit verbundenen Inferno mit Tausenden von Toten und Opfern mit konventionellen Verletzungen und/oder potenziell tödlichen akuten Strahlenfolgen steht die medizinische Erste Hilfe ganz im Vordergrund -

²⁵ <https://fhms.jp/en/fhms/> zuletzt aufgerufen am 11.9.24

²⁶ <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/notfallschutz/folgen/psychosozial/psychosozial.html>, zuletzt aufgerufen am 11.9.24

sofern sie angesichts des Chaos mit massiver Zerstörung von Infrastrukturen überhaupt geleistet werden kann. Die psychische Belastung für Betroffene und Einsatzkräfte ist enorm hoch (Messerschmidt 1984). Für die psychologische Erste Hilfe spielen Einsatzkräfte eine große Rolle; sie haben den Erstkontakt zu den betroffenen Personen und sollten daher während ihrer Ausbildung bereits eine Basiskompetenz in psychologischer Erster Hilfe und Strahlennotfallmanagement erwerben (BBK 2013).

Die auf die Versorgung durch Ersthelfer folgende psychosoziale Akuthilfe setzt unmittelbar nach dem Ereignis ein und wird in der Regel bei Großschadensereignissen von ausgebildeten Mitarbeitenden der Kriseninterventionsteams (KIT), der Notfallseelsorge und/oder Notfallpsychologie übernommen. Auch für diesen Personenkreis ist eine fundierte Ausbildung im Strahlennotfallmanagement zu fordern (SSK 2023a).

An die psychosoziale Akuthilfe schließt sich eine u. U. Wochen und Monate in Anspruch nehmende mittel- und langfristige psychosoziale Nachsorge an, die wissenschaftlich begleitet werden sollte. Wie die Erfahrungen der Betreuung von Atombombenüberlebenden gezeigt haben (Honda et al. 2002, Tomonaga 2019), ist eine derartige langfristige psychosoziale Versorgung speziell nach einem Kernwaffeneinsatz und den damit verbundenen Unsicherheiten, Informationsdefiziten und Ängsten vor gesundheitlichen Spätfolgen von großer Bedeutung. Häufig wurden bei den Überlebenden posttraumatische Belastungsstörungen und Schuldkomplexe gegenüber den Verstorbenen und deren Familien beobachtet, die z. T. lebenslang bestehen blieben.

Zur Einschätzung der Größenordnung derartiger Nachsorgeprogramme kann der „Fukushima Health Management Survey“ dienen²⁷. Bei dem Reaktorunfall von Fukushima traten ähnlich wie bei einer Nuklearexplosion zusätzlich zur Strahlenexposition eine Kombination aus weiteren Stressoren/Belastungen auf. Allerdings war die Höhe der Strahlenexposition²⁸ um mehrere Größenordnungen geringer als es bei einer Kernwaffenexplosion zu erwarten wäre.

Wesentlicher Bestandteil des „Fukushima Health Management Survey“ ist zum einen der „Comprehensive Health Checkup“ mit jährlichen Überprüfungen des Gesundheitszustands, der seit dem Jahr der Katastrophe 2011 einem Kollektiv von rund 200 000 betroffenen Personen aus den evakuierten Gebieten angeboten wird. Die Teilnahmerate war allerdings mit rund 35 % schon 2011 nicht sehr hoch und ging 2021 auf 17 % zurück.

Wesentliches Ergebnis der Verlaufskontrollen bzgl. somatischer Störungen war ein Anstieg der Häufigkeit von Übergewicht und Adipositas mit dazugehörigen Folgekrankheiten, vermutlich bedingt durch eine Reduzierung körperlicher Aktivität und Änderung der Ernährungsgewohnheiten. Der Comprehensive Health Checkup ergab alters- und nach den Lebensumständen adjustierte hazard ratios für das Risiko, nach 7 Jahren Evakuierung übergewichtig zu werden von 1,44 (95 % CI: 1,24 – 1,66) für Männer und 1,66 (95 % CI: 1,47- 1,89) für Frauen (Nagao et al. 2024).

Den Betroffenen wurde zum anderen auch ein systematischer „Mental Health and Lifestyle Survey“ angeboten²⁹. Die Teilnahmerate war mit 21 % niedriger als anfänglich beim „Comprehensive Health Check-up“. Bei der Auswertung fanden sich im Jahr 2012 eine große Anzahl

²⁷ <https://fhms.jp/en/fhms/> zuletzt aufgerufen am 11.9.24

²⁸ Sechs Arbeiter auf der Fukushima Daiichi Reaktoranlage erhielten effektive Dosen von mehr als 250 mSv, die höchste individuelle Dosis betrug 680 mSv, der Median der effektiven Dosis im ersten Jahr lag bei 13 mSv. Bei der erwachsenen Bevölkerung der Fukushima Präfektur betrug die höchste effektive Jahresdosis 3,8 mSv, der Median der effektiven Dosis im ersten Jahr nach dem Ereignis lag bei 2 mSv (UNSCEAR 2020 Report)

²⁹ <https://fhms.jp/en/fhms/>, zuletzt aufgerufen am 11.9.24

von Erwachsenen, die über Schlafprobleme (39 %) und Depressionen (24 %) berichteten. Diese gingen im Jahr 2021 auf 27 % bzw. 18 % zurück. 2012 berichteten 21 % der Männer über problematischen Alkoholkonsum; der Prozentsatz lag in 2021 immer noch bei 18 %. Bei Schulkindern spielten Verhaltensauffälligkeiten (22 % in 2011 und 8 % in 2021) sowie Zukunftsängste eine große Rolle (24 % in 2012, 10 % in 2022).

Zu den „lessons learned“ nach den Reaktorunfällen von Tschornobyl und Fukushima zählt, dass auf vulnerable Gruppen und sogenannte „worried-well“, die über gesundheitliche Beschwerden klagten, ohne dass sie eine gesundheitlich relevante Strahlenexposition hatten, besonders zu achten ist. Zur Gruppe der vulnerablen Personen gehören Kinder und Schwangere aus kontaminierten Gebieten, Personen mit Vorerkrankungen, Personen, die der Risikokommunikation mental oder sprachlich nicht folgen können, Ersthelferinnen und -helfer und Aufräumarbeiterinnen und -arbeiter, Evakuierte, Personen mit vorbestehenden psychischen Gesundheitseinschränkungen sowie auch mögliche Beschäftigte der das Unfallereignis verursachenden Einrichtungen und deren Familien (WHO 2020). Eine inadäquate Information und Kommunikation über Strahlenrisiken führt zudem zu einer großen Zahl hilfeschender nicht relevant strahlenexponierter Betroffener, die mit ihren Sorgen und Ängsten die Kapazitäten medizinischer Versorgungseinrichtungen sprengen können (WHO 2020). Ängste auch bei Ersthelferinnen und -helfern oder auch bei weiterversorgendem medizinischen Hilfspersonal oder selbst bei Ärztinnen und Ärzten aufgrund nicht ausreichender Aus- und Weiterbildung zu strahlenbiologischen Grundlagen oder Strahlenschutzaspekten kann bis zur Verweigerung der Versorgung führen. Dies ist ein wesentlicher Grund, die Weiterbildungsqualifikationen Strahlennotfallärztin und -arzt, bzw. Strahlennotfallexpertin und -experte zu etablieren und weiterzuentwickeln.

9 Allgemeine Schutzmaßnahmen

9.1 Schutzzoneneinteilung nach FEMA-Guide

Für die Planung von Schutzmaßnahmen bietet sich die Einteilung in Zonen gemäß dem FEMA-Leitfaden zur Planung der Reaktionen auf eine Kernwaffenexplosion an (FEMA 2023, siehe Abschnitt 4.2.1). Diese Zonen werden eingeteilt bzgl. der Strahlenexposition (Radiation Zones) und bzgl. der Wirkung der Druckwelle (Blast Zones) (Abb. 9-1).

So zeigt die Abbildung eine innere „gefährliche“ Strahlungszone („dangerous radiation zone“, DRZ) mit Dosisleistungswerten über 100 mSv h^{-1} und um diese eine „heiße“ Zone („hot zone“, HZ) mit Dosisleistungswerten zwischen $0,1 \text{ mSv h}^{-1}$ bis 100 mSv h^{-1} . Im Zentrum der DRZ können Personen sehr schnell Dosen aufnehmen, die ausreichend sind, ein Akutes Strahlensyndrom (ARS) zu entwickeln. Diese Gefahr ist außerhalb der DRZ sehr viel geringer. Die Ausdehnungen dieser Zonen betragen nach dem FEMA-Leitfaden für eine Kernwaffenexplosion mit einer Sprengkraft von 10 kT bei auftretendem Fallout für die DRZ einige zehn Kilometer, für die HZ einige hundert Kilometer (jeweils in Windzugrichtung). Während die DRZ schon innerhalb der ersten drei Stunden wieder schrumpft, wächst die HZ weiterhin und beginnt erst nach etwa 48 h kleiner zu werden. Nach etwa zwei Wochen beträgt die Ausdehnung der HZ noch einige zehn Kilometer, eine DRZ liegt nicht mehr vor.

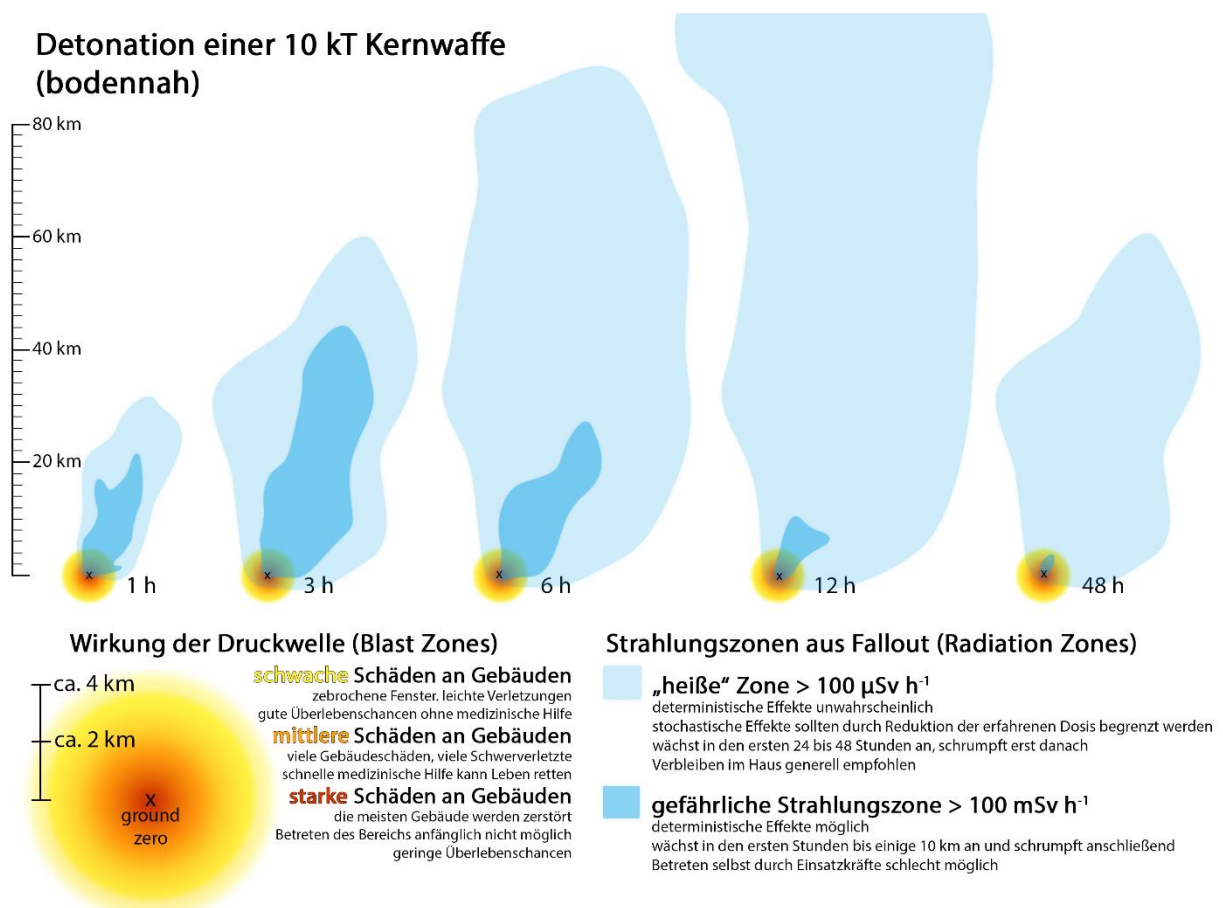


Abb. 9-1: Darstellung und Beschreibung der fünf Planungszonen nach (FEMA 2023)

Im Hinblick auf die Druckwellen-Schäden unterscheidet der FEMA-Leitfaden konzentrische Zonen mit der zentralen „schweren“ Schadenszone mit bei einer 10 kT-Explosion einem Radius von etwa 800 m, der Zone „mäßigen“ Schadens von 800 m bis 1 600 m und eine Zone „leichten“ Schadens (1 600 m bis 4 200 m). In der zentralen Zone sind einfache Gebäude größtenteils

vollständig zerstört und die Überlebenswahrscheinlichkeit ist auch wegen der hohen Strahlenexposition gering. Dies gilt jedoch nicht für Personen, die sich während der Explosion tief in stabilen Gebäuden aufhalten, die auch nach der Explosion noch strukturell wenig beeinflusst sind (Keller, Tiefgaragen, U-Bahnschächte, etc.). In der Zone mäßiger Schäden kann eine frühe medizinische Hilfeleistung die Zahl der Überlebenden trotz massiver Zerstörungen und Brände positiv beeinflussen. In der äußeren Zone leichter Schäden kommt es durch die Explosion zum Bruch von Fensterscheiben und leichteren Verletzungen. Ein Überleben ist dort auch ohne medizinische Soforthilfe möglich.

9.2 Vorbereitungen der Bürger und Bürgerinnen

Um auf den Fall einer Kernwaffenexplosion und ihrer Auswirkungen vorbereitet zu sein, sollten an den üblichen Aufenthaltsorten (zu Hause, am Arbeitsplatz, etc.) Räume mit hoher Stabilität und Abschirmwirkung identifiziert und ausgewiesen werden, die im Ernstfall geeigneten Schutz bieten. Zur Vorbereitung auf ein solches Ereignis sollten dort folgende Dinge verfügbar sein:

- Ein Notvorrat mit Nahrungsmitteln und Trinkwasser gemäß den gültigen Empfehlungen des Bevölkerungsschutzes (Essen und Trinken bevorraten – BBK (bbk.bund.de)).
- Zusätzliches Wasser zur Dekontamination (auch für Haustiere), möglichst in einem Raum mit Abfluss/Auffangmöglichkeit außerhalb des gewählten schützenden Raumes.
- Plastiksäcke für eventuell kontaminierte Kleidung und als Behelfstoilette.
- Kleidung und Schuhe zum Wechseln.
- Materialien und Medikamente (zur ersten Hilfe und für den täglichen Bedarf).
- Werkzeuge und technische Hilfsmittel wie z. B. Taschenlampe, Ersatzbatterien, batteriebetriebenes Radio und Smartphone.
- Kleiner Vorrat an FFP 2- bzw. FFP 3-Masken.

Innerhalb der Familie, Freundeskreis und Nachbarschaft ist es sinnvoll, sich über die Vorbereitungen für eine Nuklearexplosion auszutauschen. Weiterhin müssen Konzepte für Kindergärten und Schulen erarbeitet, kommuniziert und geübt werden. Es muss allen bewusst sein, dass zumindest im näheren Bereich um den Explosionsort geschützte Orte zum Schutz vor dem Fallout schnell aufgesucht werden müssen, so dass Familienmitglieder unter Umständen die ersten 24 h bis 48 h an unterschiedlichen Orten verbringen müssen. So sollten im Vorfeld Treffpunkte vereinbart werden, um sich nach getrenntem Aufenthalt an unterschiedlichen geschützten Orten wieder zu finden. Besonders wichtig ist diese Vorbereitung für Kinder und Jugendliche. Für Kindertagesstätten, Kindergärten und Schulen müssen Schutzkonzepte erarbeitet und auch geübt werden. Auch Eltern sollten eingebunden werden, um zu vermeiden, dass sie sich in der Phase der höchsten Strahlenexposition auf eigene Faust auf die Suche nach den Kindern machen. Es ist sinnvoll, Namensschilder an der Kleidung insbesondere kleiner Kinder anzubringen, um die Zuordnung/Identifizierung nach einer Trennung zu erleichtern.



Abb. 9-2: Verhaltensempfehlungen nach (FEMA 2023)

Der unmittelbar bei der Kernwaffenexplosion erzeugte NEMP kann auch weit außerhalb der Zone maximaler Schädigung elektrische und elektronische Installationen und Geräte schädigen. Ein Schädigungsradius hierfür ist nicht klar zu benennen, doch sind folgende Trends festzuhalten:

- 1.) mit Versorgungs- oder Datenleitungen verbundene Geräte (z. B. Handy während des Aufladens mittels Netzteils) können auch in mehreren Kilometern Entfernung betroffen sein, es sei denn die jeweiligen Installationen sind speziell gegen einen NEMP gehärtet.
- 2.) der Schädigungsradius ist deutlich kleiner bei Geräten, die mit ungeschützten Installationen nicht verbunden sind – so insbesondere auch für z. B. Batterie- oder Handkurbel-betriebene FM-Radios.

Die behördlichen Informationen werden parallel auf allen verfügbaren Kanälen ausgegeben, so empfiehlt es sich, alle noch intakt erscheinenden Kommunikationsmittel auszuprobieren.

Die SSK empfiehlt eindringlich, sich bereits im Vorfeld über alle Fragen im Zusammenhang mit einer nuklearen Explosion zu informieren.

9.3 Frühe Schutzmaßnahmen (innerhalb der ersten 24h)

Die individuellen Maßnahmen unmittelbar nach der Explosion einer Kernwaffe hängen vom zeitlichen Abstand zur Explosion und der Entfernung des Aufenthaltsorts vom Ground Zero sowie von evtl. vorhandenen Abschirmungen durch Geländeformationen und baulichen Gegebenheiten ab (vgl. Kapitel 5). Individuelle Schutzmaßnahmen müssen darauf abzielen, sich – bei Zugrundelegung der Schadenszonen nach FEMA (siehe Abschnitt 9.1) – vor allem

in der bis zu einigen zehn Kilometern reichenden „gefährlichen“ Strahlungszone vor ionisierender Strahlung und thermischer Strahlung und vor dem bis zu einige km reichenden hohen bzw. mäßigen Risiko durch die Druckwelle zu schützen (vgl. auch Abb. 5-4 Kapitel 5).

Sobald ein enorm heller Lichtblitz, der heller als das Sonnenlicht ist, wahrgenommen wird, gilt im Freien die Maßgabe „Ducken und Bedecken“, also das unmittelbare Einnehmen einer möglichst stabilen geschützten Position und der Verbleib in dieser für etwa 1 Minute. Liegt ein Alarm bzw. Information zu einer unmittelbar bevorstehenden Kernwaffenexplosion vor, so, sollten vor der Explosion schützende Räume wie Keller, Tiefgaragen, U-Bahnstationen o. ä. oder innenliegende Räume im Haus aufgesucht werden. Diese bieten auch guten Schutz vor sich etwas später ausbreitendem radioaktivem Fallout. In jedem Fall sollten die Anweisungen der Behörden, die über verfügbare Kommunikationsmittel erhalten werden können (batteriebetriebenes Radio, Internet etc.), befolgt werden.

Bei einer Kernwaffenexplosion treten nahezu sofort folgende Wirkungen auf:

- **Neutronen- und Gammastrahlungsimpuls:** sofort einsetzend, nach wenigen Sekunden vorüber – nicht wahrnehmbar.
- **Lichtblitz/Hitze-Impuls:** sofort einsetzend, bis zu 10 Sekunden lang andauernd. Dieser wird selbst durch dünne nicht-transparente Materialien abgehalten, die sich jedoch je nach Material entzünden können.

Je nach Abstand vergehen nach erster Wahrnehmung des Lichtblitzes mehrere Sekunden, bevor die **Druckwelle** eintrifft.

Bei Wahrnehmen des Lichtblitzes bleiben somit lediglich ein Moment bis wenige Sekunden, um:

- sofort Deckung zu suchen und möglichst Gesicht und Körper zu bedecken (**Ducken und Bedecken**), um sich vor weiterer Schädigung durch die eventuell. mehrere Sekunden andauernden Hitzewelle und vor der in Kürze (rund 5 Sekunden bei 2 km Abstand) eintreffenden Druckwelle zu schützen.

Bei direktem Blick in den Lichtblitz entsteht durch die Blendung eine oft erst nach mehreren Minuten wieder nachlassende „Erblindung“. Betroffene Personen sollten von Sehtüchtigen geleitet werden.

Je nach Abstand vom Explosionsort und Wetterlage bleibt ein Zeitfenster von Minuten bis zu Stunden, bevor **Fallout** eintrifft, so dass in den meisten Fällen genügend Zeit bleibt, einen geeigneten Raum zum Verbleiben aufzusuchen (**schützenden Raum aufsuchen**):

Die wichtigste Schutzempfehlung ist:

- Geeignete Deckung möglichst im Haus, Keller, Tiefgarage etc. suchen, für mindestens 24 Stunden dort verbleiben und auf Informationen der Behörden achten (**auf Informationen achten**).

Personen, die im Freien direkt dem Fallout ausgesetzt waren und somit kontaminiert sind, sollten sich selbst sofort durch Abklopfen/Abbürsten dekontaminieren und anschließend noch vor Eintreten in einen schützenden Raum die Oberbekleidung ablegen und diese z. B. in einem Plastiksack verstauen, um eine Verschleppung der Kontamination möglichst zu vermeiden. Besteht die Möglichkeit, so sollte eine angenommene Kontamination von ungeschützten oder beim Dekontaminieren evtl. belasteten Hautarealen und Haaren abgewaschen werden (z. B.

durch Duschen). Eventuell kontaminierte Haustiere sollten ebenfalls zuerst außerhalb eines schützenden Raumes abgebürstet und danach, wenn möglich, gewaschen werden. Dies sollte aber nicht in dem Raum geschehen, der für den Aufenthalt von Personen vorgesehen ist (siehe ICRP³⁰).

Die durch den radioaktiven Fallout ausgehende Gefahr nimmt mit der Zeit rasch ab. Daher sollten Betroffene, wenn keine weiteren Informationen vorliegen, zunächst mindestens 24 Stunden im schützenden Raum verbleiben. In jedem Fall sollten die Anweisungen der Behörden, die über verfügbare Kommunikationsmittel erhalten werden können (batteriebetriebenes Radio, Internet etc.), befolgt werden.

Bei unmittelbaren Gefahren wie Feuer und instabilen Gebäuden kann es nötig sein, die geschützten Bereiche zu verlassen und neue Bereiche zu suchen. Dabei sollte so wenig Zeit wie möglich im Freien und in Bereichen mit wenig Schutz (z. B. Fahrzeugen) verbracht werden. Kraftfahrzeuge, egal welcher Bauart, stellen aufgrund ihrer geringen Abschirmwirkung keinen geeigneten Strahlenschutz dar (siehe ICRP²⁹), können jedoch bei Aufenthalt im Freien vorübergehend zur Minderung der direkten Kontamination durch Fallout als kurzfristiger Aufenthaltsort hilfreich sein.

Die SSK hat sich kürzlich zur Verwendung von Atemschutzmasken zum Schutz der Bevölkerung bei Explosion nuklearer Waffen geäußert (SSK 2023b). Sie empfiehlt, dass FFP 2-Masken von jeder Bürgerin und jedem Bürger vorgehalten werden sollten. Atemschutzmasken können die Aufnahme von radioaktiven Partikeln bei Nuklearexplosionen reduzieren. Insbesondere bei unzureichendem Schutz vor Radioaktivitätseintrag durch Außenluft in Innenräumen oder bei der Notwendigkeit, Innen- bzw. schützende Räume verlassen zu müssen, sollten sie getragen werden. Falls verfügbar, sind Masken mit Ausatemventil und der höheren Schutzklasse FFP 3 zu bevorzugen. Die Maskenanwendung dürfe jedoch nicht zu einem falschen Sicherheitsgefühl führen, weil sie lediglich die Dosis aufgrund von Inhalation der Radioaktivität verringern kann, nicht jedoch die Höhe der externen Exposition. Demgegenüber sieht die SSK in der Einnahme von Iodtabletten (Iodblockade der Schilddrüse) wegen des geringen Dosisbeitrags von radioaktiven Iodisotopen keine relevante Schutzmaßnahme (SSK 2022a).

9.4 Schutzmaßnahmen für Ersthelfer und Einsatzkräfte

Im Zentrum der „gefährlichen“ Strahlungszone (vgl. Abschnitt 9.1) ist medizinische Ersthilfe wegen der massiven Zerstörungen von Gebäuden und Infrastruktur einerseits und der hohen Dosisleistungen von bis zu mehreren Sv h^{-1} andererseits, anfangs nicht oder kaum möglich. Im Grenzbereich zur „heißen“ Zone und innerhalb dieser kann jedoch medizinische Ersthilfe vor allem zur Versorgung von Verletzten mit konventionellen Traumata und Verbrennungen unter Berücksichtigung von Triagierungsmaßnahmen indiziert sein. Dies gilt insbesondere dann, wenn aufgrund erfolgter Abschätzungen zu möglichen Strahlendosen deterministische Strahlenschäden für Ersthelferinnen und -helfer sowie Einsatzkräfte nicht zu erwarten sind.

Ersthelferinnen und -helfer sowie Einsatzkräfte sollten zunächst schützende Räume aufsuchen und Anweisungen der Behörden abwarten.

Einsatzkräfte werden somit in der Regel erst einige Stunden nach dem Ereignis tätig werden können. Die dafür notwendige persönliche Schutzausrüstung richtet sich nach den lokalen Verhältnissen und damit nach dem zu erwartenden Risiko am Einsatzort. Im Bereich der Zerstörungswirkung einer Kernwaffe ist vor allem der Eigenschutz bei der Rettung von Menschen

30 <https://www.icrp.org/page.asp?id=613>, zuletzt aufgerufen am 03.12.2024

aus Trümmern und das messtechnisch zu erfassende Strahlenrisiko zu beachten. Die Besonderheit der schnell abnehmenden Dosisleistung erfordert eine deutlich von sonstigen radiologischen Gefahrenlagen abweichende Einschätzung der Gefährdung. Eine besonders gründliche Vorbereitung außerhalb der „gefährlichen“ Strahlungszone (vgl. Abschnitt 9.1) vor deren Betreten, und schnelle Personalwechsel anhand festgelegter erreichter Dosiswerte sind ein möglicher Ansatz, um die persönliche Strahlenexposition zu begrenzen.

Bei Gebieten, in denen ausschließlich ein radiologisches Risiko besteht, wird auf die Ausführungen im „Handbuch für die medizinische Versorgung und Ausbildung“ (SSK 2022b) verwiesen (insbesondere auf Kapitel 12 zum Eigenschutz und Verwendung persönlicher Schutzausrüstung). Für die Besatzungen der Fahrzeuge des Bundes für den Zivilschutz stellt der Bund persönliche Schutzausrüstung für CBRN-Lagen bereit. Deren Bestandteile sind auf der Internetseite des BBK³¹ beschrieben.

Besonders wichtig sind im Strahlenschutz die Dosisbestimmung (möglichst unter Verwendung eines Alarmdosimeters) und die Vermeidung der Inkorporation von radioaktiven Stoffen.

Wegen des Ausmaßes der Schäden bei Nuklearexplosionen, u. U. auch wegen eingeschränkten Möglichkeiten des Selbstschutzes, ist die psychische Belastung von Einsatzkräften bei nuklearen Explosionen sehr hoch. Die Folgen dieser Belastung stellen sich im Extremfall ähnlich dar wie bei Opfern (siehe Abschnitt 8.5). Allerdings können bei Einsatzkräften frühzeitig bereits im Rahmen der Aus- und Weiterbildung begonnene Präventionsmaßnahmen zur Reduzierung des Risikos von Spätfolgen im Sinne einer posttraumatischen Belastungsstörung (PTBS) beitragen (SSK 2022b).

9.5 Evakuierung nach der Akutphase und ihre Limitierungen

Das Aufsuchen von Kellern und schützenden Räumen wird als beste Schutzmaßnahme für die Zeit kurz nach der Explosion einer Kernwaffe angesehen. Wie lange diese schützenden Räume aufgesucht werden sollen, hängt von mehreren Faktoren ab, u. a. von der Nähe zum Explosionsort, der Abschirmwirkung des schützenden Raumes und der Versorgung z. B. mit Trinkwasser, Nahrungs- und Arzneimitteln. Bei gering abschirmenden schützendem Raum und hoher Dosisleistung kann eine Evakuierung noch während der ersten 24 h sinnvoll sein (Buddemeier und Dillon 2009). Allerdings sind die Risiken einer solchen Evakuierung nicht zu unterschätzen. Ohne nähere Informationen ist der Verbleib in geeigneten schützenden Räumen für etwa 24 Stunden die beste Option. Dies gilt insbesondere angesichts einer möglicherweise zerstörten Infrastruktur und anderer Hindernisse, die eine Evakuierung massiv behindern könnten.

Von einer Selbstevakuierung wird dringend abgeraten. Eine Evakuierung muss von den Behörden angemessen geplant werden und wird nur dann durchgeführt, wenn dadurch eine deutliche Reduzierung möglicher Risiken zu erwarten ist. Dazu müssen beispielsweise Erkenntnisse über die genaue Lage und Aufnahmekapazität sicherer Bereiche und zuverlässige Zeitbedarfsabschätzungen zu Evakuierungsrouten vorliegen, denn im Gegensatz zu Häusern stellen Fahrzeuge keinen ausreichenden Schutz gegen die aus dem Fallout stammende Strahlung dar. Es muss vermieden werden, dass eine Evakuierung aus kontaminierten Gebieten zum falschen Zeitpunkt erfolgt. Bei Selbstevakuierungen besteht darüber hinaus die Gefahr, in höher kontaminierte Gebiete zu gelangen oder zu verunfallen.

Bei einer nuklearen Explosion ist mit Szenarien zu rechnen, die der Reaktor- und Naturkatastrophe von Fukushima ähneln, vom Ausmaß aber weit darüber hinaus gehen: Beim Fukushima-

³¹ https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/CBRN-Schutz/CBRN-Faehigkeiten/Schutzausstattung/schutzausstattung_node.html, zuletzt aufgerufen am 16.09.2024

Unfall beliefen sich die Transportzeiten für die Evakuierung u. a. von intensivpflichtigen Krankenhauspatienten und -patientinnen aufgrund der durch den Tsunami entstandenen Schäden auf bis zu mehreren Tagen (Boilley 2013). Es ist deshalb notwendig, nach Kernwaffenexplosionen anstehende Evakuierungen besonders sorgfältig zu planen, auf ihre Durchführbarkeit zu prüfen und ggf. trotz Überschreitung von Richtwerten für die Strahlenexposition darauf zu verzichten. In jedem Fall sollten die für eine Evakuierung notwendigen Abläufe regelmäßig geübt werden.

Bei Beachtung der Verhaltensempfehlungen der SSK besteht die beste Möglichkeit, akut-lebensbedrohliche Strahlenexpositionen für viele Menschen zu vermeiden. Dies verhindert nicht nur vermeidbare Todesfälle, sondern reduziert auch deutlich die zu erwartende Überlastung aller Versorgungsstrukturen und ist somit ein Schlüsselfaktor, um auf einen Kernwaffeneinsatz angemessen zu reagieren. Insbesondere diese Schlüsselbotschaft erfordert eine frühe, wiederholte und nachhaltige Aufklärung der Bevölkerung, bevor ein derartiges Ereignis eintritt. Weitere Hinweise zur Information der Bevölkerung finden sich im Kapitel 11 zur Risiko- und Krisenkommunikation.

10 Stand der Vorbereitungen national und international für die gesundheitliche Versorgung von Betroffenen und Einsatzpersonal

Bisherige Planungen zur gesundheitlichen Versorgung nach Großschadensereignissen mit Strahlenexposition konzentrierten sich auf Unfälle, insbesondere Kernkraftwerksunfälle, wo nur relativ wenige Betroffene mit externen Expositionen zu erwarten sind, die zu deterministischen Schäden führen können (SSK 2017). Dabei spielen das Monitoring potenziell kontaminierter Personen und die Verringerung der internen Strahlenexposition durch Iodblockade und Verkehrsverbot kontaminierter Nahrung eine relativ große Rolle. Diese Planungen und Vorbereitungen sind nur bedingt auf die lokale und regionale Situation nach einer Kernwaffenexplosion anwendbar, bei der mit einer großen Zahl von Exponierten mit deterministischen Strahlenschäden oder Kombinationstraumata zu rechnen ist. Dies betrifft insbesondere Gebiete, die von der initialen Wirkung oder vom Fallout innerhalb der ersten 24 bis 48 Stunden betroffen sind. Für weiter von der Kernwaffenexplosion entfernte Gebiete ist die Anwendbarkeit hingegen – mit Ausnahme der Iodblockade – in vielen Bereichen gegeben.

10.1 Allgemeine Maßnahmen

Im Rahmen eines von der EU geförderten Projekts veröffentlichte eine internationale Arbeitsgruppe unter dem Namen „SHAMISEN - Nuclear Emergency Situations - Improvement of Medical And Health Surveillance“ im Jahr 2021 Empfehlungen für vorbereitende Maßnahmen und die Gesundheitsüberwachung der Bevölkerung bei einem Reaktorunfall (Liutsko et al. 2021). Diese Empfehlungen können teilweise auf das Szenario einer nuklearen Explosion übertragen werden.

Den einzelnen Empfehlungen liegen zwei Forderungen zugrunde: 1) bei Strahlenschutzexperten und Strahlenschutzexpertinnen, Beschäftigten im Gesundheitswesen, beruflich Exponierten und der allgemeinen Bevölkerung eine Kultur des Strahlenschutzes zu schaffen. Dafür bedarf es vor allem einer Verbesserung der Strahlenschutz Ausbildung der Beschäftigten im Gesundheitswesen. 2) darauf zu achten, dass Strahlenschutzmaßnahmen den Betroffenen immer mehr nutzen als schaden. Insbesondere die zweite Empfehlung klingt selbstverständlich, wurde aber z. B. bei dem Entschluss, in der Fukushima Präfektur großzügig zu evakuieren, nicht ausreichend berücksichtigt.

In Hinblick auf die Planung von Spätmaßnahmen für die Gesundheitsversorgung der Bevölkerung nach einem schwerwiegenden Strahlenunfall empfiehlt die SHAMISEN-Arbeitsgruppe

zwischen einerseits „Surveillance“ in Form regelmäßiger individueller „Check-ups“ der Gesundheit und des Wohlbefindens von Betroffenen und andererseits epidemiologischen Studien an Betroffenen zum Zweck des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns zu unterscheiden.

10.2 Medizinische Versorgung

In ihrer Empfehlung „Erforderliche medizinische Kapazitäten für die Versorgung und Betreuung der Bevölkerung im radiologischen und nuklearen Notfall“ (SSK 2017) hat die SSK u. a. die Anzahl Betroffener bei einem Notfall nach Unfällen, inklusive Kernkraftwerksunfällen sowie nach einer terroristischen oder anderweitig motivierten Handlung mit radioaktiven Stoffen geschätzt. In dieser Empfehlung war das Szenario „Explosion einer Kernwaffe“ nicht berücksichtigt. Für das angenommene Szenario „Unfall in einem deutschen Kernkraftwerk“ wurde angenommen, dass es keine ARS-Fälle in der Bevölkerung geben würde, aber möglicherweise eine relativ geringe Zahl bei auf dem Kraftwerksgelände Tätigen, dass Messkapazitäten für bis zu 200 000 Personen zur Sichtung und Dosisabschätzung und Evakuierungsstrategien für bis zu 200 000 Personen benötigt würden.

Demgegenüber gab die WHO im Jahr 2023 in ihrer Stellungnahme „National Stockpiles for Radiological and Nuclear Emergencies: Policy Advice“ (WHO 2023) detaillierte Schätzungen zu den Betroffenen bei der Explosion einer 1 kT und 10 kT Bombe heraus. Darin sind Opferzahlen enthalten (Tab. 10-1), deren Schätzung auf eine Veröffentlichung von Waselenko et al. 2004 zurückgehen. Wie in der Tabellenbeschriftung zu Tab. 10-1 aufgeführt, wird bei den Schätzungen von einer nuklearen Explosion im Zentrum einer Stadt mit zwei Millionen Einwohnern ausgegangen.

Unter den Betroffenen, die dem Fallout ausgesetzt sind, dürften sich auch direkt Strahlen-exponierte befinden (vgl. Tab. 10-1). In den Berechnungen des „Hazard Prediction Assessment Capability Programs“ werden relativ einfache Annahmen zum Gelände (flache Oberfläche) und damit fehlenden Abschirmmöglichkeiten durch Gelände und Infrastruktur gemacht. Außerdem werden dosisreduzierende individuelle Schutzmaßnahmen („Schützen und Bedecken“, „schützende Räume aufsuchen“) nicht berücksichtigt.

Beachtenswert ist bei dieser Abschätzung, dass die Überlebenden in drei Gruppen vergleichbarer Größe eingeteilt werden können: 1) diejenigen, die klinische medizinische Versorgung benötigen (Dosen über 1 Gy sowie kombinierte Verletzungen), 2) diejenigen, die eine ambulante Überwachung und ggf. im Verlauf auch medizinische Versorgung benötigen (Dosisbereich 0,25 Gy - 1 Gy), sowie 3) diejenigen, die keine behandlungsbedürftigen körperlichen Schäden haben, aber psychosoziale Unterstützung benötigen (Dosen unter 0,25 Gy).

Tab. 10-1: *Abgeschätzte Opferzahlen für eine Stadt mit 2 Millionen Einwohnern bei der Explosion einer 1 kT und 10 kT Kernwaffe (nach WHO 2023 WHO 2023)*

Patientenkategorie	Strahlendosis (Gy)	Anzahl Patienten und Patientinnen	
		1 kT-Detonation	10 kT-Detonation
Kombinationsverletzungen ^a (minimale bis Intensivmedizinische Versorgung)	alle	1 000 – 3 000	15 000 – 24 000
Unmittelbare Todesopfer	Alle	> 7 000	> 13 000
Fallout (gesundheitliche Auswirkungen)			
nur supportive Palliativversorgung möglich	≥ 10	18 000	45 000
Intensivmedizinische Versorgung	5-10	19 500	79 400
Spezialisierte klinische Versorgung	3-5	33 000	108 000
Klinische Standardversorgung	1-3	66 000	70 000
Ambulante Betreuung	0,5-1	82 500	139 000
Epidemiologische Überwachung	0,25-0,5	106 000	147 000
Medizinische und psychologische Nachsorge für Betroffene	< 0,25	>150 000	>270 000

^a *Kombinationsverletzungen aus Strahlenschäden mit Verbrennungen und/oder stumpfen Traumata*

Zur medizinischen Versorgung von Strahlennotfällen (basierend auf verschiedenen Szenarien ohne Kernwaffeneinsatz) empfahl die SSK 2023 in ihrer Empfehlung „Medizinisches Management von Strahlennotfällen – Voraussetzungen und Organisation“, ein Netzwerk mit einer zentralen Koordinierungsstelle zur adäquaten medizinischen Versorgung von Patientinnen und Patienten bei Strahlennotfällen aufzubauen, und Mindestanforderungen an die beteiligten Kliniken zu stellen (SSK 2023a). Mit Blick auf die Schaffung eines derartigen Netzwerks, das für die Versorgung von Hunderttausenden nach dem Einsatz einer Kernwaffe gerüstet sein soll, kann das von der SSK 2023 vorgeschlagene Netzwerk einen ersten Schritt darstellen und bedarf einer wesentlichen Erweiterung der Anlaufstellen.

Für die Ausstattung von Krankenhäusern mit Infrastruktur, mit Geräten/Material und hinsichtlich des Personals empfahl die SSK u. a.:

- ein bundesweites zweistufiges Netzwerk von Kliniken mit ausreichender Ausstattung zur Versorgung von Strahlennotfallpatienten und -patientinnen (Strahlennotfallzentren) zu schaffen: 20 bis 30 Kliniken mit Bereitschaft zur Aufnahme von Strahlennotfallpatienten und -patientinnen (Strahlennotfallzentren Stufe 1) und fünf bis sieben Spezialeinrichtungen in großen Kliniken (Strahlennotfallzentren Stufe 2),
- Vorhaltungen für die spezielle Notfallversorgung zu schaffen und zu unterhalten, welche nicht in der derzeitigen Standardausstattung der Krankenhäuser vorhandenen sind (z. B. geeignete Raumordnung und Wegeführung, Dekontaminationseinrichtungen, spezielle Messgeräte, ausreichend bestückte Depots für Medikamente, Geräte und medizinisches Material, persönliche Schutzausrüstung),

- in den beteiligten Krankenhäusern für die Versorgung von Strahlennotfallpatientinnen und -patienten Teams aufzubauen, die aus qualifizierten Ärztinnen und Ärzten, Medizintechnologinnen und -technologen, Pflegekräften, Rettungskräften, Medizinphysikerinnen und -physikern, Technikerinnen und Technikern, Strahlenschutzexpertinnen und -experten und Kriseninterventionskräften bestehen,
- mobile Teams zur Unterstützung der Versorgung von Strahlennotfallpatientinnen und -patienten zu bilden, in die auch Strahlenschutzexpertinnen und -experten von Einrichtungen außerhalb von Strahlennotfallzentren eingebunden werden können.

Für die Einrichtung einer zentralen Koordinierungsstelle empfahl die SSK u. a.:

- die Koordinierungsstelle in die Lage zu versetzen, notwendige Informationen über freie Behandlungskapazitäten, die vorhandene apparative und personelle Ausstattung in den Kliniken sowie die aktuelle Verfügbarkeit mobiler Expertinnen und Experten, die die Notfallversorgung vor Ort unterstützen, liefern zu können,
- die deutschlandweite Verteilung der Strahlennotfallpatientinnen und -patienten durch die Koordinierungsstelle auf der Basis tagesaktuell erfasster freier Behandlungskapazitäten und der aktuell vorhandenen apparativen und personellen Ausstattung in den teilnehmenden Kliniken durchführen zu lassen.

Bei Kernwaffenexplosionen in oder nahe Deutschland könnten die den oben genannten Empfehlungen zugrundeliegenden Annahmen zu den benötigten Kapazitäten deutlich überschritten werden. Daher müssen auch Kliniken einbezogen und entsprechend vorbereitet werden, die sich bislang nicht auf die Aufgabe als Strahlennotfallzentrum vorbereitet haben.

10.3 Vorratsbildung und -haltung

Die SSK nahm in ihrem Strahlennotfallhandbuch detailliert Stellung zur Vorratsbildung und -haltung (engl. Stockpiling) spezifischer Medikamente, die zur Behandlung von Strahlennotfallpatienten und -patientinnen erforderlich sind (SSK 2022b). Auch diese Empfehlungen werden den Anforderungen im Falle eines Kernwaffeneinsatzes bei weitem nicht gerecht.

Die WHO gab, ebenfalls im Jahr 2023, die Stellungnahme „National Stockpiles for Radiological and Nuclear Emergencies: Policy Advice (WHO 2023) heraus. Sie empfiehlt bzgl. der Vorbereitung auf Kernwaffeneinsätze vorrangig für Betroffene in der Bevölkerung, die Strahlendosen von mehr als 3 Sv ausgesetzt wurden (Tab. 10-1), Zytokine wie G-CSF oder GM-CSF zur Behandlung des akuten Strahlensyndroms zu bevorraten. Die geschätzte Zahl derartiger Patientinnen und Patienten von mehr als 200 000 erscheint jedoch zu hoch (siehe Abschnitt 10.2) für eine solche Medikation.

Zytokine zur Behandlung des ARS sind am effektivsten, wenn sie frühzeitig, d. h., innerhalb von zwei Tagen nach Strahlenexposition eingesetzt werden. Es handelt sich hierbei nicht um eine prophylaktische ambulante Therapie, sondern um eine Behandlungsform, die in ein stationäres klinisches Konzept eingebettet sein muss.

G-CSF ist ein Medikament zur Behandlung des Chemotherapie-induzierten Mangels an weißen Blutkörperchen und weltweit bisher nur in den USA zur Behandlung des akuten Strahlensyndroms zugelassen. Die SSK sieht hier Handlungsbedarf (z. B. die Übernahme der US-Zulassung von G-CSF sowie anderer zugelassener Medikamente in europäisches Arzneimittelrecht zu prüfen) oder in der Gestattung eines weitreichenden „off-label use“ dieses Arzneimittels im Katastrophenfall.

Weiterhin empfiehlt die SSK zu beachten, dass diese Medikamente in Strahlenunfallzentren nicht in größeren Mengen vorrätig sind, so dass Depots angelegt oder Verfahren entwickelt

werden müssen, aus denen diese Medikamente über eine Leitstelle (wie z. B. die o. a. aufgeführte Koordinierungsstelle) angefordert werden können.

10.4 Biologische Dosimetrie, Inkorporationsmessungen

Die biologische Dosimetrie bietet die Möglichkeit der retrospektiven Abschätzung der Behandlungsbedürftigkeit nach erfolgter Strahlenexposition. Sie unterstützt dadurch die medizinische Entscheidungsfindung bei der Wahl der zur Verfügung stehenden Behandlungsoptionen (SSK 2022b). Verfahren wie Chromosomenanalyse, Mikronukleustest und andere sind allerdings aufwändig und können nur in wenigen drauf spezialisierten Einrichtungen durchgeführt werden. Auch setzen sie eine spezielle Logistik der Probenasservierung voraus, und die Ergebnisse liegen erst nach einigen Tagen vor. Daher sind diese Verfahren im Falle von Nuklearexplosionen für die initiale Diagnostik bei sehr vielen Betroffenen nur beschränkt geeignet, haben aber dennoch einen hohen Stellenwert z. B. bei der Versorgung von Patientinnen und Patienten mit vermutetem ARS.

Ähnlich verhält es sich mit dem Inkorporationsnachweis in Ganzkörperzählern oder über Ausscheidungsmessungen (SSK 2022b). Diese Methoden werden nur von wenigen Messstellen angeboten, setzen aufwändige Messtechniken voraus und sind zeitaufwändig. Die Inkorporationsmessung, ebenso wie die Dekorporationstherapie, spielen nach Kernwaffeneinsatz eine untergeordnete Rolle.

Um der Erfordernis möglichst früher Messungen gerecht zu werden, empfahl die SSK, erste, orientierende Messungen bereits am Ort des Notfalls mit mobilen Messgeräten durchzuführen (SSK 2022b). Eine Vorhaltung derartiger Gräte in den Inkorporationsmessstellen und eine Messbereitschaft rund um die Uhr sind wünschenswert. Auch mit bei Organisationen des Katastrophenschutzes üblichen Messgeräten können Messungen der Dosisleistung, die durch Radionuklide im Körper einer zu messenden Person in deren Umgebung hervorgerufen wird, einen Hinweis auf die Größenordnung der Körperaktivität geben. Zur klinischen Steuerung von Patienten und Patientinnen empfahl die SSK zudem, Strahlennotfallärztinnen und -ärzte in klinischen Triageverfahren auszubilden. Relevant sind hier die angemessene Erfassung klinisch relevanter Symptome und deren Bewertung sowie die frühzeitige Messung von einfachen klinischen Parametern, die zumindest eine orientierende Einschätzung des zu erwartenden klinischen Verlaufs ermöglichen (diff. Blutbild, Entzündungswerte, Spezialmarker der biologischen Dosimetrie falls verfügbar).

Darüber hinaus besteht über das RLZ-Bund bzw. eines für Notfallstationen bereitgestellten Werkzeugs der individuellen Dosisrekonstruktion prinzipiell die Möglichkeit, in Notfallstationen für Einzelpersonen, ausgehend von georeferenzierten Messdaten, die erhaltenen Dosen abschätzend zu berechnen. Insbesondere im vorliegenden Szenario ist der Einsatz eines solchen Tools wegen der im Vergleich zu anderen Szenarien schnellen Verfügbarkeit von Messdaten, angezeigt, z. B. durch das stationäre ODL-Messnetz. Ob das Tool in der jetzigen Entwicklungsstufe bei einer Kernwaffenexplosion eingesetzt werden kann, und welchen Limitationen es diesbezüglich unterliegt, bleibt noch zu prüfen.

10.5 Notfallstationen

Notfallstationen sind in Deutschland ein wesentlicher Bestandteil der Vorsorgeplanungen des Katastrophenschutzes für Unfälle in kerntechnischen Anlagen und bei anderen Notfällen mit einer großen Anzahl an Betroffenen (SSK 2022b). Sie folgen einem bundesweit einheitlichen Konzept, durch das ein erforderlicher länderübergreifender Einsatz vereinfacht werden soll (IMK 2014).

Notfallstationen werden lageangepasst in vorgeplanten Objekten außerhalb eines von der Freisetzung radioaktiver Stoffe betroffenen Gebietes und gegebenenfalls in Aufnahmegebieten eingerichtet. Ihr jeweiliger Standort soll in verkehrsgünstiger Lage und mit der Möglichkeit getrennter Zu- und Abfahrten und ausreichenden Parkmöglichkeiten gewählt werden. Auf Grundlage Szenarien-spezifischer Abschätzungen potenziell betroffener Personen ist im Fall eines schweren Kernkraftwerkunfalls der kontinuierliche Betrieb für die Betreuung von bis zu 1 000 Personen innerhalb von 24 Stunden vorzusehen (SSK 2017).

Im Falle der Explosion von Kernwaffen lässt sich der Standort einer Notfallstation nicht lageabhängig vorausplanen. Während der Nutzung der Kernenergie in Deutschland waren die Reaktoren zumindest in Westdeutschland einigermaßen homogen über das Land verteilt. Entsprechend existieren Planungen für Notfallstationen, die den Kernkraftwerken zugeordnet waren. Dieses Konzept deutschlandweiter Notfallstationen sollte nicht nur in Hinblick auf den Einsatz von Kernwaffen, sondern generell für Strahlenunfälle mit vielen Betroffenen reaktiviert und optimiert werden. Einige Bundesländer wie Bayern und Baden-Württemberg haben bereits Übungen zu einer fortgesetzten Bereitschaft der Notfallstationen durchgeführt; in den östlichen Bundesländern bedarf es jedoch der Aufnahme zusätzlicher Notfallstationen in die Vorsorgeplanung des Katastrophenschutzes.

10.6 Psychosoziale Notfallversorgung

Maßnahmen der Psychosozialen Notfallversorgung (PSNV) sollen den betroffenen Personen und den Einsatzkräften dazu verhelfen, ein belastendes Ereignis psychisch so gut wie möglich zu verarbeiten und dauerhafte Folgen – wie eine posttraumatische Belastungsstörung (PTBS) – nach Möglichkeit zu verhindern oder zumindest zu mildern (SSK 2022b). Auch somatisch gesunde, aber verunsicherte Personen bedürfen einer aufklärenden und angepassten Krisen- und Risikokommunikation.

Die Vorbereitung und Organisation der PSNV stellt eine große Herausforderung dar. In der Akutsituation muss durch geeignete Lenkung der Hilfesuchenden unbedingt vermieden werden, dass ein Ansturm von besorgten Personen nicht nur die Versorgung exponierter Personen behindert, die einer spezifischen strahlenmedizinischen Behandlung bedürfen, sondern auch die übrige Gesundheitsversorgung blockiert. In den Monaten und Jahren nach einem Kernwaffeneinsatz werden sehr große Gruppen von Betroffenen (s. a. Kapitel 11) der psychosozialen Nachsorge bedürfen.

10.7 Dokumentation und Organisation von Nachsorgeprogrammen

Bei Nuklearexplosionen sind große Bevölkerungsgruppen unterschiedlichen Strahlenexpositionen ausgesetzt. Rechnet man die Schätzwerte der SSK für versorgungsbedürftige Exponierte beim terroristischen Einsatz einer schmutzigen Bombe (SSK 2017) auf die Explosion einer Kernwaffe hoch, so ist mit bis zu mehreren 100 000 Betroffenen zu rechnen, die wegen unterschiedlichen Schweregrads der Strahlenüberexposition und/oder Explosions- bzw. Verbrennungstraumata einer medizinischen Behandlung bedürfen. Hinzu kommen mehrere 100 000 Betroffene, die einer psychosozialen Versorgung bedürfen (vgl. Abschnitt 4.1).

Die damit verbunden Aufgaben können nur bewältigt werden, wenn sie vorab in Friedenszeiten geplant und vorbereitet werden. Zur Vorbereitung könnten zählen:

- Die Entwicklung und Verfügbarkeit eines Verfahrens zur frühzeitigen individuellen Dokumentation der klinisch und radiologisch relevanten Parameter der Strahlenexposition

und von Begleitschäden im Sinne eines erweiterten Kerndatensatzes Katastrophenmedizin (vgl. S2 Leitlinie Katastrophenmedizin, AWMF 2023)³².

- Die Etablierung eines digitalen Registers, das automatisch mit Daten der erweiterten elektronischen Patientenakte befüllt werden kann. Dieses Register soll
 - a) ad hoc Auswertungen erlauben, aus denen im Sinne eines „lernenden Systems“ Empfehlungen für die Behandlung individueller Patienten oder Patientinnen in einer Notfallsituation abgeleitet werden können;
 - b) später dazu dienen, die bislang sehr beschränkten Kenntnisse zu den gesundheitlichen Folgen der Explosion und der Strahlenexposition im mittleren und höheren Dosisbereich systematisch wissenschaftlich aufzuarbeiten.

Dazu sollten rechtzeitig Einrichtungen benannt werden (s. a. Liutsko et al. 2021), welche:

- die notwendigen Voraussetzungen für eine digitale Datenerfassung schaffen und die entwickelten Systeme erproben und den Umgang mit ihnen üben,
- regelmäßige „Check-ups“ sowohl der somatischen wie psychischen Gesundheit bei den registrierten exponierten Betroffenen analog der Life-Span-Study nach den Atombombenabwürfen auf Hiroshima und Nagasaki organisieren und
- wissenschaftliche Auswertungen der gesammelten Daten durchführen (wie die Radiation Effects Research Foundation in Japan). In diesem Zusammenhang ist dringend die Berücksichtigung geeigneter Kontrollgruppen nicht-exponierter Personen zu empfehlen.

³² Diese Dokumentation sollte möglichst digital unabhängig vom Stromnetz verfügbar sein und z. B. als Chipkarte oder App vom Betroffenen mitgeführt werden können.

11 Stand der Vorbereitungen zur Risiko- und Krisenkommunikation

Laut § 106 StrlSchG (StrlSchG 2017) obliegt dem BMUV die Einrichtung eines radiologischen Lagezentrums, dessen Verantwortung es unter anderem ist, der Bevölkerung im Falle eines regionalen oder überregionalen Notfalls die in § 112 Absatz 3 StrlSchG (StrlSchG 2017) festgelegten Informationen bereitzustellen. Aufgrund ihrer weitreichenden Auswirkungen ist eine Kernwaffenexplosion laut Referenzszenario S14 des ANoPI-Bund (BMUV 2023) stets ein überregionaler Notfall. Grundlage des Szenarios ist eine durch kriminelle und terroristische Handlungen oder unfallbedingt ausgelöste, nukleare Explosion. Die Referenzszenarien und Regelungen des ANoPI-Bund (BMUV 2023) umfassen grundsätzlich keine Notfälle, die aus Spannungs- und Verteidigungsfällen entstehen. Die Regelungen des ANoPI-Bund (BMUV 2023) können dennoch Anwendung finden, wenn keine speziellen Regelungen für radiologische Notfälle im Konzept der zivilen Verteidigung enthalten sind. Für die Empfehlungen zur Information der Bevölkerung wird hier von den Maßgaben des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG 2017) und des ANoPI-Bund (BMUV 2023) ausgegangen, insbesondere da die Auswirkungen für die Bevölkerung bei einem terroristischen Einsatz von Kernwaffen sehr ähnlich wie bei einem unvermittelten Einsatz einer Kernwaffe während eines Spannungsfalls oder im Verteidigungsfall sein dürften. Dennoch sollte die zivile Verteidigung weitergehende Vorbereitungen treffen und insbesondere die Unterschiede für die angenommenen Szenarien herausarbeiten und diese berücksichtigen.

Während § 106 Absatz 2 Nr. 7 in Verbindung mit § 112 Absatz 3 StrlSchG (StrlSchG 2017) lediglich die Kommunikation im Notfall und im Sinne einer Krisenkommunikation definiert, regelt § 105 StrlSchG die Kommunikation zur Vorbereitung auf einen Notfall im Sinne einer Risikokommunikation.

Risikokommunikation ist der Austausch von Informationen unter anderem über mögliche Risiken und damit verbundene Gefahren sowie über Risikominimierung, also den Schutz vor solchen Gefahren. Sie kann sowohl anlassunabhängig zur Vorbereitung auf mögliche Notfälle als auch anlassbezogen während und nach einem Notfall als Teil der Krisenkommunikation erfolgen. Risikokommunikation hat zum Ziel, von einem Notfall (möglicherweise) Betroffene in die Lage zu versetzen, Optionen im Umgang mit Risiken abzuwägen und informierte Entscheidungen zu treffen. Krisenkommunikation ist dagegen der anlassbezogene Austausch von Informationen zur Verhinderung oder Begrenzung von Schäden im eingetretenen Notfall. Sie beinhaltet Informationen zur aktuellen Lage, zu behördlichen Maßnahmen und Anordnungen, zu Schutzmaßnahmen sowie Botschaften anlassbezogener Risikokommunikation.

11.1 Anlassunabhängige Risikokommunikation

Um die Bevölkerung in die Lage zu versetzen, eine faktenbasierte Risikoeinschätzung im Hinblick auf eine Kernwaffenexplosion vorzunehmen und sich in geeigneter Weise darauf vorbereiten zu können, ist eine proaktive, kontinuierliche Risikokommunikation nötig, wie sie beispielsweise auch hinsichtlich von Hochwassergefahren oder der Notwendigkeit einer Vorratshaltung z. B. für den Falle eines Blackouts betrieben wird. Diese sollte einheitlich durch die verantwortlichen Bundes- und Landesbehörden erfolgen. Um diese Einheitlichkeit der Kommunikation zu gewährleisten, sollten die Inhalte und Kommunikationsmittel möglichst gemeinsam unter der Federführung einer Bundesbehörde, z. B. des BBK, entwickelt werden.

Die Risikokommunikation sollte dabei zumindest folgende Fragen und Themen abdecken:

- Was sind Kernwaffen und wie funktionieren sie? (Diese Informationen sollten den Unterschied zwischen einer Kernwaffe und einer Radiological Dispersal Device („Schmutzige Bombe“) beinhalten.)
- Welche Szenarien einer Kernwaffenexplosion sind denkbar?
- Welche radiologischen und nicht-radiologischen Auswirkungen sind bei einer Kernwaffenexplosion zu erwarten?
- Wovon hängt das Ausmaß dieser Auswirkungen ab?
- Welche Schutzmaßnahmen können ergriffen werden?
- Welche dieser Schutzmaßnahmen können vorbereitet werden und wie?
- Wie groß sind Überlebenschancen und gesundheitliche Risiken, und wovon hängen sie ab?
- Wie wird vor einer Kernwaffenexplosion gewarnt bzw. wie wird im Anlassfall informiert?
- Wo findet man weitere Informationsquellen und Hintergrundinformationen?

Insgesamt sollte bei der Zusammenstellung der Informationen darauf geachtet werden, eine faktenbasierte Einschätzung von Überlebenschancen im Falle einer einzelnen Kernwaffenexplosion sachlich zu vermitteln. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da die Risikowahrnehmung insbesondere der radiologischen Auswirkungen in der Bevölkerung von verschiedenen Faktoren beeinflusst wird und von der Risikoeinschätzung von Experten abweichen kann (IAEA 2020).

Zur Verbreitung dieser Informationen sollte ein möglichst breiter Medienmix genutzt werden. Dazu gehören gedruckte Materialien wie Broschüren, Leitfäden, Plakate oder Notfallkarten für Heim und Büro ebenso wie umfangreiche elektronische Informationen auf einer Webseite, die sich dem Thema dezidiert widmet. Diese Informationen sollten entweder unter einer Behördendomain (z. B. bbk.bund.de) oder einer eigenen Domain (analog jodblockade.de) gehostet werden und auch Antworten auf häufig gestellte Fragen (FAQ) sowie Verlinkungen zu Hintergrundinformationen (z. B. grundlegende Informationen zu Radioaktivität) enthalten.

Zudem sollte darauf geachtet werden, die Information je nach Medium unter sinnvoller Verwendung von Infografiken, Karten, Erklärvideos, Iconboxen etc. möglichst anschaulich und in verständlicher Sprache zu vermitteln. Dazu gehört auch die Übersetzung in Englisch und andere relevante Sprachen sowie die Produktion barrierefreier Informationen.

Die so erstellten Informationen sollten im Rahmen einer umfangreichen Kampagne verbreitet werden. Beispiele dafür sind:

- Social-Media-Postings (z. B. via Instagram oder YouTube) mit Fakten und Zahlen zum Thema (Wussten Sie, dass...?) oder Erklärvideos und Podcasts,
- Plakataktionen,
- Pressegespräche,
- Postwurfsendungen,
- Aktionstage (z. B. anlässlich des Warntags).

Da Schulen und vergleichbare Institutionen in besonderem Maße auf die Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen und entsprechende Vorbereitungen aufmerksam gemacht werden sollten, sollten auch Unterrichtsmaterialien mit Informationen für Schülerinnen und Schüler sowie für das Lehrpersonal entwickelt werden.

Ebenso sollten Einsatzkräfte spezifisch über Risiken, Auswirkungen und Schutzmaßnahmen im Falle einer Kernwaffenexplosion informiert werden. Dabei ist zu beachten, dass auch Einsatzkräfte oft nur eingeschränktes Wissen über radiologische Gefahren oder Kernwaffen und deren Auswirkungen haben.

11.2 Krisenkommunikation

Ausführliche Empfehlungen zu Krisenkommunikation im Allgemeinen finden sich unter anderem im Leitfaden des BMI (BMI 2014), zu Krisenkommunikation bei kerntechnischen Notfällen beispielsweise im Leitfaden zur Information der Öffentlichkeit (SSK 2007).

Im Falle einer Kernwaffenexplosion müssen in der Krisenkommunikation unter anderem Fragen zu radiologischen Gefahren beantwortet werden. Während die zerstörerischen Auswirkungen durch Lichtblitz, Hitzestrahlung und Druckwelle unmittelbar wahrnehmbar sind, sind hinsichtlich radiologischer Auswirkungen erhebliche Unsicherheiten bei Bevölkerung und Einsatzkräften zu erwarten. Um diese Unsicherheiten zu mildern, sollte die Krisenkommunikation möglichst schnell zumindest folgende Fragen beantworten:

- Welches Gebiet ist (potenziell) von radiologischen Auswirkungen betroffen und welches nicht?
- Wie soll man sich verhalten, um sich einem möglichst geringen Risiko auszusetzen?
- Welche Schutzmaßnahmen soll man ergreifen?
- Wann ist die Gefahr vorüber?
- Wo bekommt man Hilfe?

Im Falle einer Kernwaffenexplosion ist von einer erheblichen Zerstörung der Kommunikationsinfrastruktur auszugehen. Es sollten aus Gründen der Redundanz daher Vorbereitungen für die Verbreitung von Informationen über möglichst viele unabhängige Kommunikationsmittel (Rundfunk, Mobilfunk, Lautsprecherwagen, Flugblätter etc.) getroffen werden. Bei der Wahl der Kommunikationsmittel ist zu beachten, dass die Bevölkerung in den betroffenen Gebieten unter Umständen einige Zeit Schutz in Gebäuden suchen muss, um sich vor den anfänglichen radiologischen Auswirkungen zu schützen. So könnte etwa der Abwurf von Flugblättern dazu führen, dass die Betroffenen zu früh den Schutz der Gebäude verlassen, um an Informationen zu gelangen.

12 Literatur

- AFKzV 2022 Ausschuss für Katastrophenschutz, Feuerwehrwesen und zivile Verteidigung (AFKzV). Feuerwehr-Dienstvorschrift FwDV 500. Einheiten im ABC-Einsatz. https://www.sfs-w.de/projektgruppe-feuerwehr-dienstvorschriften/vom-afkzv-verabschiedet-und-zur-einfuehrung-in-den-laendern-empfohlen.html?no_cache=1&download=FwDV500_AFKzV_2022-03-16_final.pdf&did=86, zuletzt aufgerufen am 08.12.2020
- Anspaugh et al. 2022 Anspaugh LR, Bouville A, Thiessen KM, Hoffman FO, Beck HL, Gordeev KI, Simon SL. A Methodology for Calculation of Internal Dose Following Exposure to Radioactive Fallout from the Detonation of a Nuclear Fission Device. *Health Phys.* 2022 Jan 1;122(1):84-124, doi: 10.1097/HP.0000000000001503
- Apsalikov et al. 2019 Apsalikov KN, Lipikhina A, Grosche B, Belikhina T, Ostroumova E, Shinkarev S, Stepanenko V, Muldagaliev T, Yoshinaga S, Zhunussova T, Hoshi M, Katayama H, Lackland DT, Simon SL, Kesminiene A. The State Scientific Automated Medical Registry, Kazakhstan: an important resource for low-dose radiation health research. *Radiat Environ Biophys.* 2019 Mar;58(1):1-11, doi: 10.1007/s00411-018-0762-5, Epub 2018/11/18
- AWMF 2023 Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e. V. (AWMF). S2k-Leitlinie Katastrophenmedizinische prähospitale Behandlungsleitlinien. Version 1.1, Stand: 30.04.2023, gültig bis 29.04.2028. <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/001-043>, zuletzt aufgerufen am 17.12.2024
- Bauer et al. 2005 Bauer S, Gusev BI, Pivina LM, Apsalikov KN, Grosche B. Radiation exposure due to local fallout from Soviet atmospheric nuclear weapons testing in Kazakhstan: solid cancer mortality in the Semipalatinsk historical cohort, 1960-1999. *Radiat Res.* 2005 Oct;164(4 Pt 1):409-19, doi: 10.1667/rr3423.1, Epub 2005/09/29
- BBK 2013 Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK). Katastrophenmedizin. Leitfaden für die ärztliche Versorgung im Katastrophenfall. 6. Auflage. 2013
- BBK 2014 Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK). Rahmenkonzept für den CBRN-Schutz (ABC-Schutz) im Bevölkerungsschutz. Stand 2014, Druck 2016. https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/CBRN/rahmenkonzeption-cbrn-schutz.pdf?__blob=publicationFile&v=7, zuletzt aufgerufen am 05.12.2024
- Beaven und Parker 2015 Beaven A, Parker P. Treatment principles of blast injuries. *Surgery for major incidents.* Volume 33, Issue 9, p. 424-429. 2015

- Becker et al. 1990 Becker W, Buescher T, Cioffi W, WF M, Pruitt BA J. Combined Radiation and Thermal Injury After Nuclear Attack. In: Treatment of Radiation Injuries. Plenum Press, New York, 1990
- Benderitter et al. 2010 Benderitter M, Gourmelon P, Bey E, Chapel A, Clairand I, Prat M, Lataillade JJ. New emerging concepts in the medical management of local radiation injury. Health Phys. 2010 Jun;98(6):851-7, doi: 10.1097/HP.0b013e3181c9f79a, Epub 2010/05/07
- BMI 1962 BMI. Jeder hat eine Chance. Hrsg.: Bundesamt für zivilen Bevölkerungsschutz in Bad Godesberg im Auftrag des Bundesministers des Innern (BMI), Bad Godesberg, 1962
- BMI 2014 Bundesministerium des Innern (BMI). Leitfaden für Krisenkommunikation.
http://www.bmi.bund.de/SharedDocs/Downloads/BVS/DE/Krisenkommunikation/Krisenkommunikation.pdf;jsessionid=7F8611B2AC02E039BA48BE1F89337A51.2_cid295?blob=publicationFile
- BMI 2016 Bundesministerium des Innern (BMI). Konzeption Zivile Verteidigung (KZV) vom 24.08.2016.
<https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/themen/bevoelkerungsschutz/konzeption-zivile-verteidigung.pdf?blob=publicationFile&v=2>, zuletzt aufgerufen am 05.12.2024
- BMI 2024 Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI). Rahmenrichtlinien für die Gesamtverteidigung - Gesamtverteidigungsrichtlinien - (RRGV).
<https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/themen/sicherheit/RRGV.html>, zuletzt aufgerufen am 16.12.2024
- BMK 2020 Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Österreich (BMK). Bundesgesetz über Maßnahmen zum Schutz vor Gefahren durch ionisierende Strahlung (Strahlenschutzgesetz 2020 – StrSchG 2020). Bekanntmachung im Bundesgesetzblatt Nr. BGBl. I Nr. 50/2020 Teil I, Datum der Kundmachung 17.06.2020
- BMK 2022 Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Gesamtstaatlicher Notfallplan. Nuklearwaffeneinsatz in größerer Entfernung zu Österreich. Wien, 2022
- BMU 2001 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition. RS II 1-11413/28 vom 23. Juli 2001, Banz Nr. 160a und b vom 28.08.2001

- BMUV 2023 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Allgemeine Verwaltungsvorschrift für einen Allgemeinen Notfallplan des Bundes nach § 98 des Strahlenschutzgesetzes (ANoPl-Bund) vom 10. November 2023. Bekanntmachung im BAnz AT 23.11.2023 B1
- Boice et al. 2022 Boice JD, Cohen SS, Mumma MT, Chen H, Golden AP, Beck HL, Till JE. Mortality among U.S. military participants at eight aboveground nuclear weapons test series. *Int J Radiat Biol.* 2022;98(4):679-700, doi: 10.1080/09553002.2020.1787543, Epub 20200803
- Boilley 2013 Boilley D. Notfallplan und Evakuierung. https://www.acro.eu.org/wp-content/uploads/2013/12/Fukushima_GPI_Deutsch.pdf, , zuletzt aufgerufen am 05.12.2024
- Bouville et al. 2020 Bouville A, Beck HL, Thiessen KM, Hoffman FO, Potischman N, Simon SL. The Methodology Used to Assess Doses from the First Nuclear Weapons Test (Trinity) to the Populations of New Mexico. *Health Phys.* 2020 Oct;119(4):400-27, doi: 10.1097/HP.0000000000001331, Epub 2020/09/04
- Brooks et al. 1952 Brooks JW, Evans EI, Ham WT, Jr., Reid JD. The influence of external body radiation on mortality from thermal burns. *Ann Surg.* 1952 Sep;136(3):533-45, doi: 10.1097/00000658-195209000-00018, Epub 1952/09/01
- Brown et al. 2018 Brown DA, Chadwick MB, Capote R, Kahler AC, Trkov A, Herman MW, Sonzogni AA, Danon Y, Carlson AD, Dunn M, Smith DL, Hale GM, Arbanas G, Arcilla R, Bates CR, Beck B, Becker B, Brown F, Casperson RJ, Conlin J, Cullen DE, Descalle MA, Firestone R, Gaines T, Guber KH, Hawari AI, Holmes J, Johnson TD, Kawano T, Kiedrowski BC, Koning AJ, Kopecky S, Leal L, Lestone JP, Lubitz C, Márquez Damián JI, Mattoon CM, McCutchan EA, Mughabghab S, Navratil P, Neudecker D, Nobre GPA, Noguere G, Paris M, Pigni MT, Plompen AJ, Pritychenko B, Pronyaev VG, Roubtsov D, Rochman D, Romano P, Schillebeeckx P, Simakov S, Sin M, Sirakov I, Sleaford B, Sobes V, Soukhovitskii ES, Stetcu I, Talou P, Thompson I, van der Marck S, Welser-Sherrill L, Wiarda D, White M, Wormald JL, Wright RQ, Zerkle M, Žerovnik G, Zhu Y. ENDF/B-VIII.0: The 8 th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data. *Nuclear Data Sheets.* 2018;148:1-142, doi: 10.1016/j.nds.2018.02.001
- Buddemeier und Dillon 2009 Buddemeier BR, Dillon MB. Key Response Planning Factors for the Aftermath of Nuclear Terrorism. United States: N. p. 2009, doi: 10.2172/966550
- Buddemeier 2018 Buddemeier BR. Nuclear Detonation Fallout: Key Considerations for Internal Exposure and Population Monitoring. United States: N. p. 2018, doi: 10.2172/1460062

- Cahoon et al. 2020 Cahoon EK, Zhang R, Simon SL, Bouville A, Pfeiffer RM. Projected Cancer Risks to Residents of New Mexico from Exposure to Trinity Radioactive Fallout. *Health Phys.* 2020 Oct;119(4):478-93, doi: 10.1097/HP.0000000000001333, Epub 2020/09/04
- Caldwell et al. 2016 Caldwell GG, Zack MM, Mumma MT, Falk H, Heath CW, Till JE, Chen H, Boice JD. Mortality among military participants at the 1957 PLUMBBOB nuclear weapons test series and from leukemia among participants at the SMOKY test. *J Radiol Prot.* 2016 Sep;36(3):474-89, doi: 10.1088/0952-4746/36/3/474, Epub 2016/06/30
- Carr 2021 Carr AB. Thirty Minutes Before the Dawn. *Nuclear Technology.* 2021;207(sup1):S1-S23, doi: 10.1080/00295450.2021.1927625
- Cederwall und Peterson 1990 Cederwall RT, Peterson KR. Meteorological modeling of arrival and deposition of fallout at intermediate distances downwind of the Nevada Test Site. *Health Phys.* 1990 Nov;59(5):593-601, doi: 10.1097/00004032-199011000-00010, Epub 1990/11/01
- Cronkite 1982 Cronkite E. The effects of dose, dose rate, and depth dose upon radiation mortality. In: *The control of exposure of the public to ionizing radiation in the event of accident or attack*, NCRP Proceedings. 1982
- Cronkite et al. 1954 Cronkite EP, Bond VP, Browning LE, Chapman WH, Cohn SH. Study of response of human beings accidentally exposed to significant fallout radiation. Final report. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0465295>, zuletzt aufgerufen am 05.12.2024
- Cullings et al. 2017 Cullings HM, Grant EJ, Egbert SD, Watanabe T, Oda T, Nakamura F, Yamashita T, Fuchi H, Funamoto S, Marumo K, Sakata R, Kodama Y, Ozasa K, Kodama K. DS02R1: Improvements to Atomic Bomb Survivors' Input Data and Implementation of Dosimetry System 2002 (DS02) and Resulting Changes in Estimated Doses. *Health Phys.* 2017 Jan;112(1):56-97, doi: 10.1097/HP.0000000000000598
- Dainiak et al. 2003 Dainiak N, Waselenko JK, Armitage JO, MacVittie TJ, Farese AM. The hematologist and radiation casualties. *Hematology Am Soc Hematol Educ Program.* 2003:473-96, doi: 10.1182/asheducation-2003.1.473, Epub 2003/11/25
- Dainiak und Albanese 2022 Dainiak N, Albanese J. Medical management of acute radiation syndrome. *J Radiol Prot.* 2022 Jul 19;42(3), doi: 10.1088/1361-6498/ac7d18, Epub 2022/06/30

- de Vathaire et al. 2023 de Vathaire F, Zidane M, Xhaard C, Souchard V, Chevillard S, Ory C, Rachedi F, Nunez S, Leufroy A, Noel L, Guerin T, Shan L, Bost-Bezeaud F, Petitdier P, Soubiran G, Allodji R, Ren Y, Doyon F, Taquet M, Gardon J, Bouville A, Drozdovitch V. Assessment of Differentiated Thyroid Carcinomas in French Polynesia After Atmospheric Nuclear Tests Performed by France. *JAMA Netw Open*. 2023 May 1;6(5):e2311908, doi: 10.1001/jamanetworkopen.2023.11908, Epub 20230501
- DiCarlo et al. 2010 DiCarlo AL, Ramakrishnan N, Hatchett RJ. Radiation combined injury: overview of NIAID research. *Health Phys*. 2010 Jun;98(6):863-7, doi: 10.1097/HP.0b013e3181a6ee32, Epub 2010/05/07
- DiCarlo et al. 2011 DiCarlo AL, Maher C, Hick JL, Hanfling D, Dainiak N, Chao N, Bader JL, Coleman CN, Weinstock DM. Radiation injury after a nuclear detonation: medical consequences and the need for scarce resources allocation. *Disaster Med Public Health Prep*. 2011 Mar;5 Suppl 1(0 1):S32-44, doi: 10.1001/dmp.2011.17, Epub 2011/03/22
- DiCarlo et al. 2021 DiCarlo AL, Homer MJ, Coleman CN. United States medical preparedness for nuclear and radiological emergencies. *J Radiol Prot*. 2021 Dec 6;41(4), doi: 10.1088/1361-6498/ac0d3f, Epub 2021/06/22
- Dolan 1972 Dolan PJ. DNA EM-1 Capabilities of Nuclear Weapons. Defense Nuclear Agency Effects Manual Number 1, DNA EM-1, Defense Nuclear Agency, 1. Juli 1972. <https://archive.org/details/DnaEm1CapabilitiesOfNuclearWeapons/DNA%20EM%201%20Capabilities%20of%20Nuclear%20Weapons%20%20Philip%20J.%20Dolan/page/n1/mode/2up>, zuletzt aufgerufen am 11.12.2024
- EU 2016 Verordnung (Euratom) 2016/52 des Rates vom 15. Januar 2016 zur Festlegung von Höchstwerten an Radioaktivität in Lebens- und Futtermitteln im Falle eines nuklearen Unfalls oder eines anderen radiologischen Notfalls und zur Aufhebung der Verordnung (Euratom) Nr. 3954/87 des Rates und der Verordnungen (Euratom) Nr. 944/89 und (Euratom) Nr. 770/90 der Kommission
- FEMA 2023 Federal Emergency Management Agency (FEMA). Planning Guidance for Response to a Nuclear Detonation. Third edition. https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_nuc-detonation-planning-guide.pdf, zuletzt aufgerufen am 28.09.2023
- Ferrari et al. 2023 Ferrari C, Manenti G, Malizia A. Sievert or Gray: Dose Quantities and Protection Levels in Emergency Exposure. *Sensors (Basel)*. 2023 Feb 8;23(4), doi: 10.3390/s23041918, Epub 2023/03/01
- Fliedner et al. 2001 Fliedner TM, Friesecke I, Beyrer K. Medical Management of Radiation Accidents. Manual on the Acute Radiation Syndrome. The British Institute of Radiology, Alden Group, Oxford, U.K., 2001

- Freiling 1961 Freiling EC. Particle formation and fractionation in air bursts. In: Radioactive fallout from nuclear weapon tests. Proceedings of a Conference Held in Germantown, Maryland, November 15-17, 1961. Ed. Klement, A.W. Jr. . <https://www.osti.gov/servlets/purl/4837321/>
- Fujita et al. 1989 Fujita S, Kato H, Schull WJ. The LD50 associated with exposure to the atomic bombing of Hiroshima. J Radiat Res. 1989 Dec;30(4):359-81, doi: 10.1269/jrr.30.359, Epub 1989/12/01
- Gilbert et al. 1998 Gilbert ES, Tarone R, Bouville A, Ron E. Thyroid cancer rates and 131I doses from Nevada atmospheric nuclear bomb tests. J Natl Cancer Inst. 1998 Nov 4;90(21):1654-60, doi: 10.1093/jnci/90.21.1654, Epub 1998/11/12
- Gilbert et al. 2010 Gilbert ES, Huang L, Bouville A, Berg CD, Ron E. Thyroid cancer rates and 131I doses from Nevada atmospheric nuclear bomb tests: an update. Radiat Res. 2010 May;173(5):659-64, doi: 10.1667/rr2057.1, Epub 2010/04/30
- Gillies und Haylock 2022 Gillies M, Haylock RGE. Mortality and cancer incidence 1952-2017 in United Kingdom participants in the United Kingdom's atmospheric nuclear weapon tests and experimental programmes. J Radiol Prot. 2022 Feb 23;42(2), doi: 10.1088/1361-6498/ac52b4, Epub 20220223
- Glasstone und Dolan 1977 Glasstone S, Dolan PJ. The Effects of Nuclear Weapons. Third edition. Department of Defense, Washington, D.C. (USA); Department of Energy, Washington, D.C. (USA). 1977, doi: 10.2172/6852629
- Grant et al. 2015 Grant EJ, Furukawa K, Sakata R, Sugiyama H, Sadakane A, Takahashi I, Utada M, Shimizu Y, Ozasa K. Risk of death among children of atomic bomb survivors after 62 years of follow-up: a cohort study. Lancet Oncol. 2015 Oct;16(13):1316-23, doi: 10.1016/s1470-2045(15)00209-0, Epub 2015/09/19
- Grant et al. 2017 Grant EJ, Brenner A, Sugiyama H, Sakata R, Sadakane A, Utada M, Cahoon EK, Milder CM, Soda M, Cullings HM, Preston DL, Mabuchi K, Ozasa K. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958-2009. Radiat Res. 2017 May;187(5):513-37, doi: 10.1667/rr14492.1, Epub 2017/03/21
- Grosche et al. 2011 Grosche B, Lackland DT, Land CE, Simon SL, Apsalikov KN, Pivina LM, Bauer S, Gusev BI. Mortality from cardiovascular diseases in the Semipalatinsk historical cohort, 1960-1999, and its relationship to radiation exposure. Radiat Res. 2011 Nov;176(5):660-9, doi: 10.1667/rr2211.1, Epub 2011/07/27
- Grosche et al. 2015 Grosche B, Zhunussova T, Apsalikov K, Kesminiene A. Studies of Health Effects from Nuclear Testing near the Semipalatinsk Nuclear Test Site, Kazakhstan. Cent Asian J Glob Health. 2015;4(1):127, doi: 10.5195/cajgh.2015.127, Epub 2015/05/08

- Gsponer 2006 Gsponer A. Fourth Generation Nuclear Weapons: Military effectiveness and collateral effects. <http://arxiv.org/abs/physics/0510071>, zuletzt aufgerufen am 11.12.2024
- Hall 2000 Hall EJ. Radiobiology for the Radiologist. Lippincott Williams & Wilkins, 2000, ISBN 9780781726498
- Hamada et al. 2020 Hamada N, Azizova TV, Little MP. An update on effects of ionizing radiation exposure on the eye. Br J Radiol. 2020 Nov 1;93(1115):20190829, doi: 10.1259/bjr.20190829, Epub 2019/11/02
- Hansen 1945 Hansen C. The Swords of Armageddon: U.S. Nuclear Weapons Development Since 1945 Chukelea Publications, Sunnyvale, CA, 1945
- Hoffmann 1987 Hoffmann M. Kernwaffen und Kernwaffenschutz. 4. überarbeitete Auflage. Militärverlag der DDR, Berlin, 1987, ISBN 9783327003138
- Honda et al. 2002 Honda S, Shibata Y, Mine M, Imamura Y, Tagawa M, Nakane Y, Tomonaga M. Mental health conditions among atomic bomb survivors in Nagasaki. Psychiatry Clin Neurosci. 2002 Oct;56(5):575-83, doi: 10.1046/j.1440-1819.2002.01057.x
- Howard et al. 1995 Howard JE, Heotis PM, Scott WA, Adams WH. Medical status of Marshallese accidentally exposed to 1954 Bravo fallout radiation: January 1988 through December 1991 Brookhaven National Lab, Upton, New York, 1995
- Hsu et al. 2013 Hsu WL, Preston DL, Soda M, Sugiyama H, Funamoto S, Kodama K, Kimura A, Kamada N, Dohy H, Tomonaga M, Iwanaga M, Miyazaki Y, Cullings HM, Suyama A, Ozasa K, Shore RE, Mabuchi K. The incidence of leukemia, lymphoma and multiple myeloma among atomic bomb survivors: 1950-2001. Radiat Res. 2013 Mar;179(3):361-82, doi: 10.1667/rr2892.1, Epub 2013/02/13
- IAEA 2015 International Atomic Energy Agency (IAEA). Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. General Safety Requirements, No. GSR Part 7. Wien, 2015, ISBN 978-92-0-105715-0
- IAEA 2020 International Atomic Energy Agency (IAEA). Arrangements for Public Communication in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. General Safety Guides, No. GSG-14. Wien, 2020, ISBN 978-92-0-109019-5
- ICRP 2012 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Compendium of Dose Coefficients Based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann ICRP 41(Suppl):1-130, Elsevier, Oxford, 2012, ISBN 9781455754304, doi: 10.1016/j.icrp.2012.06.038

- ICRP 2020a International Commission on Radiological Protection (ICRP). Radiological Protection of People and the Environment in the Event of a Large Nuclear Accident. Update of ICRP Publications 109 and 111. ICRP Publication 146. Ann. ICRP 49(4), Sage Publishing, London, 2020a, ISBN 9781529767582
- ICRP 2020b International Commission on Radiological Protection (ICRP). Dose Coefficients for External Exposures to Environmental Sources. ICRP Publication 144. Ann. ICRP 49(2), Sage Publishing, London, 2020b, ISBN 9781529741230
- Iddins et al. 2022 Iddins CJ, DiCarlo AL, Ervin MD, Herrera-Reyes E, Goans RE. Cutaneous and local radiation injuries. Journal of Radiological Protection. 2022;42(1), doi: 10.1088/1361-6498/ac241a
- Imanaka et al. 2008 Imanaka T, Endo S, Tanaka K, Shizuma K. Gamma-ray exposure from neutron-induced radionuclides in soil in Hiroshima and Nagasaki based on DS02 calculations. Radiat Environ Biophys. 2008 Jul;47(3):331-6, doi: 10.1007/s00411-008-0164-1, Epub 20080327
- Imanaka et al. 2012 Imanaka T, Endo S, Kawano N, Tanaka K. Radiation exposure and disease questionnaires of early entrants after the Hiroshima bombing. Radiat Prot Dosimetry. 2012 Mar;149(1):91-6, doi: 10.1093/rpd/ncr370, Epub 20110912
- IMK 2014 Arbeitskreis V (AK V) „Feuerwehrangelegenheiten, Rettungswesen, Katastrophenschutz und Zivile Verteidigung“ der Innenministerkonferenz (IMK) (IMK). Rahmenempfehlungen zu Einrichtung und Betrieb von Notfallstationen (RE-NFS), Stand: 20.08.2014. https://www.innenministerkonferenz.de/IMK/DE/termine/to-beschluesse/14-12-11_12/anlage4zu34.pdf?_blob=publicationFile&v=2, zuletzt aufgerufen am 17.12.2024
- Izrael 2002 Izrael YA. Radioactive Fallout after Nuclear Explosions and Accidents, Chapter 1. Elsevier Science, 2002, ISBN 9780080540238
- Jodoin 1994 Jodoin VJ. Nuclear cloud rise and growth. Dissertation. U.S. Air Force Institute of Technology, 1994
- Johnson et al. 1996 Johnson JC, Thaul S, Page WF, Crawford H, Institute of Medicine Committee on the CNT. Mortality of Veteran Participants in the Crossroads Nuclear Test. National Academies Press (US), Washington (DC), 1996
- Kendall et al. 2004 Kendall GM, Muirhead CR, Darby SC, Doll R, Arnold L, O'Hagan JA. Epidemiological studies of UK test veterans: I. General description. J Radiol Prot. 2004 Sep;24(3):199-217, doi: 10.1088/0952-4746/24/3/001, Epub 2004/10/30
- Kiang und Olabisi 2019 Kiang JG, Olabisi AO. Radiation: a poly-traumatic hit leading to multi-organ injury. Cell Biosci. 2019;9:25, doi: 10.1186/s13578-019-0286-y, Epub 2019/03/27

- Kraus und Foster 2013 Kraus T, Foster K. Analysis of Fission and Activation Radionuclides Produced by the Detonation of a Uranium-Fueled Improvised Nuclear Device and Identification of the Top Dose-Producing Radionuclides. <https://narac.llnl.gov/content/mods/publications/research-and-development/LLNL-JRNL-640177.pdf>, zuletzt aufgerufen am 27.07.2022
- Kristensen und Korda 2022a Kristensen HM, Korda M. Russian nuclear weapons, 2022. Bulletin of the Atomic Scientists. 2022a;78(2):98-121, doi: 10.1080/00963402.2022.2038907
- Kristensen und Korda 2022b Kristensen HM, Korda M. United States nuclear weapons, 2022. Bulletin of the Atomic Scientists. 2022b;78(3):162-84, doi: 10.1080/00963402.2022.2062943
- Kumatori et al. 1965 Kumatori T, Ishihara T, Ueda T, Miyoshi K. Medical Survey of Japanese Exposed to Fall-out Radiation in 1954. A report after 10 Years. National Institute of Radiological Sciences <https://www.osti.gov/opennet/servlets/purl/16063545-1OYKpv/16063545.pdf>, zuletzt aufgerufen am 11.12.2024
- Land et al. 2008 Land CE, Zhumadilov Z, Gusev BI, Hartshorne MH, Wiest PW, Woodward PW, Crooks LA, Luckyanov NK, Fillmore CM, Carr Z, Abisheva G, Beck HL, Bouville A, Langer J, Weinstock R, Gordeev KI, Shinkarev S, Simon SL. Ultrasound-detected thyroid nodule prevalence and radiation dose from fallout. Radiat Res. 2008 Apr;169(4):373-83, doi: 10.1667/RR1063.1, Epub 2008/03/28
- Land et al. 2010 Land CE, Bouville A, Apostoaei I, Simon SL. Projected lifetime cancer risks from exposure to regional radioactive fallout in the Marshall Islands. Health Phys. 2010 Aug;99(2):201-15, doi: 10.1097/HP.0b013e3181dc4e84, Epub 2010/07/14
- Land et al. 2015 Land CE, Kwon D, Hoffman FO, Moroz B, Drozdovitch V, Bouville A, Beck H, Luckyanov N, Weinstock RM, Simon SL. Accounting for shared and unshared dosimetric uncertainties in the dose response for ultrasound-detected thyroid nodules after exposure to radioactive fallout. Radiat Res. 2015 Feb;183(2):159-73, doi: 10.1667/RR13794.1, Epub 2015/01/13
- Lebaron-Jacobs und Herrera-Reyes 2022 Lebaron-Jacobs L, Herrera-Reyes E. The METREPOL criteria-are they still relevant? J Radiol Prot. 2022 Jan 19;42(1), doi: 10.1088/1361-6498/ac3bc2, Epub 2021/11/22
- LfU 2006 Bayer. Landesamt für Umwelt (LfU). Bericht über die Veränderungen der Radioaktivität in Böden seit dem Reaktorunfall von Tschernobyl vor 20 Jahren. https://www.lfu.bayern.de/strahlung/tschernobyl_und_mehr/tschernobyl_bayern/doc/bodenschutzbericht_2006.pdf, zuletzt aufgerufen am 11.12.2024

- Liutsko et al. 2021 Liutsko L, Oughton D, Sarukhan A, Cardis E. The SHAMISEN Recommendations on preparedness and health surveillance of populations affected by a radiation accident. *Environ Int.* 2021 2021/01/01;146:106278, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106278>
- Lyon et al. 2006 Lyon JL, Alder SC, Stone MB, Scholl A, Reading JC, Holubkov R, Sheng X, White GL, Jr., Hegmann KT, Anspaugh L, Hoffman FO, Simon SL, Thomas B, Carroll R, Meikle AW. Thyroid disease associated with exposure to the Nevada nuclear weapons test site radiation: a reevaluation based on corrected dosimetry and examination data. *Epidemiology.* 2006 Nov;17(6):604-14, doi: 10.1097/01.ede.0000240540.79983.7f, Epub 2006/10/10
- MacVittie und Farese 2021 MacVittie TJ, Farese AM. Recent advances in medical countermeasure development against acute radiation exposure based on the US FDA animal rule. *J Radiol Prot.* 2021 Nov 10;41(4), doi: 10.1088/1361-6498/ac20e0, Epub 2021/08/26
- Magee 1953 Magee JL. Mechanisms of fractionation U.S. AEC Report M-7140 Los Alamos Scientific Lab., New Mex., United States, 1953
- McDonnel et al. 1961 McDonnel G, Crosby W, Tessmer C, Moncrief Jr. W, Baker H. Effects of nuclear detonations on a large biological specimen (swine). Walter Reed Army Inst of Research Washington DC, 1961. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0460308>, zuletzt aufgerufen am 12.12.2024
- Messerschmidt 1960 Messerschmidt O. Auswirkungen atomarer Detonationen auf den Menschen: ärztlicher Bericht über Hiroshima, Nagasaki und den Bikini-Fall-out. Thiemig, 1960
- Messerschmidt 1977 Messerschmidt O. Kombinationsschäden als Folge nuklearer Explosionen. Zivilschutz Forschung. Osang Verlag, Bad Honnef-Erpel, 1977
- Messerschmidt 1984 Messerschmidt O. Biologische Folgen von Kernwaffenexplosionen. Pathogenese, Klinik und Therapie. Perimed, Erlangen, 1984
- Micewicz et al. 2019 Micewicz ED, Iwamoto KS, Ratikan JA, Nguyen C, Xie MW, Cheng G, Boxx GM, Deriu E, Damoiseaux RD, Whitelegge JP, Ruchala PP, Avetisyan R, Jung ME, Lawson G, Nemeth E, Ganz T, Sayre JW, McBride WH, Schae D. The Aftermath of Surviving Acute Radiation Hematopoietic Syndrome and its Mitigation. *Radiat Res.* 2019 Apr;191(4):323-34, doi: 10.1667/RR15231.1, Epub 2019/02/08
- Nagao et al. 2024 Nagao M, Okazaki K, Ohira T, Nakano H, Hayashi F, Shimabukuro M, Sakai A, Hosoya M, Kazama JJ, Takahashi A, Maeda M, Yabe H, Ohto H, Kamiya K, Yasumura S. Association between evacuation and becoming overweight after the Great East Japan Earthquake: a 7-year follow-up of the Fukushima Health Management Survey. *Public Health.* 2024 Jul;232:170-7, doi: 10.1016/j.puhe.2024.04.029, Epub 2024/05/25

- NATO 2020 North Atlantic Treaty Organisation Standardization Office (NATO). Warning and Reporting and Hazard Prediction of Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Incidents (Operators Manual). NATO ATP-45, zugangsbeschränkt. <https://nso.nato.int/>, zuletzt aufgerufen am 12.12.2024
- NCI 1997 National Cancer Institute (NCI). Estimated Exposures and Thyroid Doses Received by the American People from Iodine 131 in Fallout Following Nevada Atmospheric Nuclear Bomb Tests. A Report from the National Cancer Institute. U.S. Department of Health and Human Services, Bethesda, 1997
- NDWV 2018 Verordnung zur Festlegung von Dosiswerten für frühe Notfallschutzmaßnahmen (Notfall-Dosiswerte-Verordnung NDWV) vom 29. November 2018 (BGBl I S. 2034, 2172)
- Neriishi et al. 2012 Neriishi K, Nakashima E, Akahoshi M, Hida A, Grant EJ, Masunari N, Funamoto S, Minamoto A, Fujiwara S, Shore RE. Radiation dose and cataract surgery incidence in atomic bomb survivors, 1986-2005. *Radiology*. 2012 Oct;265(1):167-74, doi: 10.1148/radiol.12111947, Epub 2012/08/10
- Otake et al. 1989 Otake M, Yoshimaru H, Schull WJ. Prenatal Exposure to Atomic Radiation and Brain Damage. *Congenital Anomalies*. 1989;29(4):309-20, doi: 10.1111/j.1741-4520.1989.tb00751.x
- Ozasa et al. 2012 Ozasa K, Shimizu Y, Suyama A, Kasagi F, Soda M, Grant EJ, Sakata R, Sugiyama H, Kodama K. Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950-2003: an overview of cancer and noncancer diseases. *Radiat Res*. 2012 Mar;177(3):229-43, doi: 10.1667/rr2629.1, Epub 2011/12/17
- Ozasa et al. 2019 Ozasa K, Cullings HM, Ohishi W, Hida A, Grant EJ. Epidemiological studies of atomic bomb radiation at the Radiation Effects Research Foundation. *Int J Radiat Biol*. 2019 Jul;95(7):879-91, doi: 10.1080/09553002.2019.1569778, Epub 2019/01/25
- Pennington et al. 2022 Pennington HM, Klennert L, Cochran LD. Distances to Prompt Effects for a Nuclear Device. United States, Web. 2022, doi: 10.2172/1845378
- Pisso et al. 2019 Pissó I, Sollum E, Grythe H, Kristiansen NI, Cassiani M, Eckhardt S, Arnold D, Morton D, Thompson RL, Groot Zwaafink CD, Evangeliou N, Sodemann H, Haimberger L, Henne S, Brunner D, Burkhart JF, Fouilloux A, Brioude J, Philipp A, Seibert P, Stohl A. The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 10.4. *Geoscientific Model Development*. 2019;12(12):4955-97, doi: 10.5194/gmd-12-4955-2019
- Potischman et al. 2020 Potischman N, Salazar SI, Scott MA, Naranjo M, Haozous E, Bouville A, Simon SL. Methods and Findings on Diet and Lifestyle Used to Support Estimation of Radiation Doses from Radioactive Fallout from the Trinity Nuclear Test. *Health Phys*. 2020 Oct;119(4):390-9, doi: 10.1097/HP.0000000000001303, Epub 2020/09/04

- Quinn 1987 Quinn VE. Analysis of nuclear test TRINITY radiological and meteorological data. United States, Web. 1987, doi: 10.2172/5893506
- Rios et al. 2022 Rios CI, Hollingsworth BA, DiCarlo AL, Esker JE, Satyamitra MM, Silverman TA, Winters TA, Taliaferro LP. Animal Care in Radiation Medical Countermeasures Studies. *Radiat Res.* 2022 Nov 1;198(5):514-35, doi: 10.1667/RADE-21-00211.1, Epub 2022/08/25
- Robbins et al. 1967 Robbins J, Rall JE, Conard RA. Late effects of radioactive iodine in fallout. Combined clinical staff conference at the National Institutes of Health. *Ann Intern Med.* 1967 Jun;66(6):1214-42, doi: 10.7326/0003-4819-66-6-1214
- Roesch 1987 Roesch WC. U.S.–Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki: vols. 1 and 2. Hiroshima: Radiation Effects Research Foundation, 1987
- Rolph et al. 2014 Rolph GD, Ngan F, Draxler RR. Modeling the fallout from stabilized nuclear clouds using the HYSPLIT atmospheric dispersion model. *J Environ Radioact.* 2014 Oct;136:41-55, doi: 10.1016/j.jenvrad.2014.05.006, Epub 20140528
- Satyamitra et al. 2022 Satyamitra MM, DiCarlo AL, Hollingsworth BA, Winters TA, Taliaferro LP. Development of Biomarkers for Radiation Biodosimetry and Medical Countermeasures Research: Current Status, Utility, and Regulatory Pathways. *Radiat Res.* 2022 May 1;197(5):514-32, doi: 10.1667/RADE-21-00157.1
- Selby et al. 2021 Selby HD, Hanson SK, Meininger D, Oldham WJ, Kinman WS, Miller JL, Reilly SD, Wende AM, Berger JL, Inglis J, Pollington AD, Waidmann CR, Meade RA, Buescher KL, Gattiker JR, Vander Wiel SA, Marcy PW. A New Yield Assessment for the Trinity Nuclear Test, 75 Years Later. *Nuclear Technology.* 2021;207(sup1):321-5, doi: 10.1080/00295450.2021.1932176
- Shibata et al. 2012 Shibata K, Iwamoto O, Nakagawa T, Iwamoto N, Ichihara A, Kunieda S, Chiba S, Furutaka K, Otuka N, Ohsawa T, Murata T, Matsunobu H, Zukeran A, Kamada S, Katakura J-i. JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering. *Journal of Nuclear Science and Technology.* 2012;48(1):1-30, doi: 10.1080/18811248.2011.9711675
- Shigematsu et al. 1995 Shigematsu I, Ito C, Kamada N, Akiyama M, Sasaki H. Effects of A-Bomb Radiation on the Human Body. Harwood Academic Publishers, Chur, Switzerland/Bunkodo, Tokyo, 1995, ISBN 3–7186–5418–0
- Shizuma et al. 1996 Shizuma K, Iwatani K, Hasai H, Hoshi M, Oka T, Okano M. ¹³⁷Cs concentration in soil samples from an early survey of Hiroshima atomic bomb and cumulative dose estimation from the fallout. *Health Phys.* 1996 Sep;71(3):340-6, doi: 10.1097/00004032-199609000-00011

- Shizuma et al. 2012 Shizuma K, Endo S, Fujikawa Y. Isotope ratios of (235)U/(238)U and (137)Cs/(235)U in black rain streaks on plaster wall caused by fallout of the Hiroshima atomic bomb. *Health Phys.* 2012 Feb;102(2):154-60, doi: 10.1097/HP.0b013e31822c514a
- Simon 1999 Simon S. Uncertainty in the University of Utah's Nevada Test Site studies. In: Ron E, Hoffman FO, Hrsg. *Uncertainties in radiation dosimetry and their impact on dose-response analyses* Dept. of Health and Human Services, Public Health Service, National Institutes of Health, National Cancer Institute, Bethesda, Md. : U.S., 1999, Seiten 202– 16
- Simon und Bouville 2002 Simon SL, Bouville A. Radiation doses to local populations near nuclear weapons test sites worldwide. *Health Phys.* 2002 May;82(5):706-25, doi: 10.1097/00004032-200205000-00016
- Simon et al. 2010 Simon SL, Bouville A, Land CE, Beck HL. Radiation doses and cancer risks in the Marshall Islands associated with exposure to radioactive fallout from Bikini and Enewetak nuclear weapons tests: summary. *Health Phys.* 2010 Aug;99(2):105-23, doi: 10.1097/HP.0b013e3181dc523c, Epub 2010/07/14
- Simon et al. 2020 Simon SL, Bouville A, Beck HL, Melo DR. Estimated Radiation Doses Received by New Mexico Residents from the 1945 Trinity Nuclear Test. *Health Phys.* 2020 Oct;119(4):428-77, doi: 10.1097/HP.0000000000001328, Epub 2020/09/04
- Spriggs und Egbert 2020 Spriggs G, Egbert S. Total Residual Radiation Source Term Produced by the Hiroshima Detonation. Technical Report LLNL-TR-814785 <https://www.osti.gov/servlets/purl/1668494>, zuletzt aufgerufen am 13.12.2024
- Spriggs et al. 2020 Spriggs GD, Neuscamman SJ, Nasstrom JS, Knight KB. Fallout Cloud Regimes. Technical Report LLNL-JRNL-813959. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1771428>, zuletzt aufgerufen am 13.12.2024
- Sridharan et al. 2021 Sridharan V, Johnson KA, Landes RD, Cao M, Singh P, Wagoner G, Hayar A, Sprick ED, Eveld KA, Bhattacharyya A, Krager KJ, Aykin-Burns N, Weiler H, Fernandez JA, Griffin JH, Boerma M. Sex-dependent effects of genetic upregulation of activated protein C on delayed effects of acute radiation exposure in the mouse heart, small intestine, and skin. *PLoS One.* 2021;16(5):e0252142, doi: 10.1371/journal.pone.0252142, Epub 20210524
- SSK 1992 Strahlenschutzkommission. Modelle, Annahmen und Daten mit Erläuterungen zur Berechnung der Strahlenexposition bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser zum Nachweis der Einhaltung der Dosisgrenzwerte nach § 45 StrlSchV. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 17, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1992, ISBN 3-437-11419-0

- SSK 2007 Strahlenschutzkommission (SSK). Leitfaden zur Information der Öffentlichkeit in kerntechnischen Notfällen. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 220. Sitzung der SSK am 05./06.12.2007. Bekanntmachung im BAnz Nr. 152a vom 08.10.2008
- SSK 2014 Strahlenschutzkommission (SSK). Planungsgebiete für den Notfallschutz in der Umgebung von Kernkraftwerken. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 268. Sitzung der SSK am 13./14.02.2014. urn:nbn:de:101:1-201403101200. Bekanntmachung im BAnz AT 21.05.2014 B4
- SSK 2017 Strahlenschutzkommission (SSK). Erforderliche medizinische Kapazitäten für die Versorgung und Betreuung der Bevölkerung im radiologischen und nuklearen Notfall. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 287. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 23./24.03.2017. urn:nbn:de:101:1-201804238529. Bekanntmachung im BAnz AT 10.04.2018 B4
- SSK 2019 Strahlenschutzkommission (SSK). Abgeleitete Richtwerte für Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung bei Ereignissen mit Freisetzungen von Radionukliden. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 303. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 24./25. Oktober 2019. urn:nbn:de:101:1-2020040313335986790823. Bekanntmachung im BAnz AT 22.04.2020 B3
- SSK 2022a Strahlenschutzkommission (SSK). Schutzstrategien bei Nuklearwaffeneinsatz - Schutzwirkungen von Iodblockade und partikelfiltrierenden Halbmasken, verabschiedet in der 319. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 29. März 2022. https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse/DE/2022/2022-03-29_Stgn_Iodtabletten.html
- SSK 2022b Strahlenschutzkommission (SSK). Strahlennotfallmedizin Handbuch für die medizinische Versorgung und Ausbildung, verabschiedet in der 319. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 28. August 2022. https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse/DE/2022/2022-09-05_Empf_Strahlennotfallmedizin.html
- SSK 2023a Strahlenschutzkommission. Medizinisches Management von Strahlennotfällen – Voraussetzungen und Organisation. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 327. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 11./12. September 2023. https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse/DE/2023/2023-09-12_Empf_Medizinisches_Notfallmanagement.html

- SSK 2023b Strahlenschutzkommission. Schutzstrategien bei Nuklearwaffeneinsatz - Verwendung von Atemschutzmasken zum Schutz der Bevölkerung bei Explosion nuklearer Waffen. Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 323. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 03.02.2023. https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse/DE/2023/2023-02-07_Empf_FFP_Masken.html
- SSM 2023 Strål Säkerhets Myndigheten (Swedish Radiation Safety Authority) (SSM). Radiological Consequences of Fallout from Nuclear Explosions. <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/publications/reports/radiation-protection/2023/202305e/>, zuletzt aufgerufen am 13.12.2024
- Stenke et al. 2022 Stenke L, Hedman C, Lagergren Lindberg M, Lindberg K, Valentin J. The acute radiation syndrome-need for updated medical guidelines. J Radiol Prot. 2022 Jan 25;42(1), doi: 10.1088/1361-6498/ac4ac6, Epub 20220125
- Stepanenko et al. 2006 Stepanenko VF, Hoshi M, Bailiff IK, Ivannikov AI, Toyoda S, Yamamoto M, Simon SL, Matsuo M, Kawano N, Zhumadilov Z, Sasaki MS, Rosenson RI, Apsalikov KN. Around Semipalatinsk nuclear test site: progress of dose estimations relevant to the consequences of nuclear tests (a summary of 3rd Dosimetry Workshop on the Semipalatinsk nuclear test site area, RIRBM, Hiroshima University, Hiroshima, 9-11 of March, 2005). J Radiat Res. 2006 Feb;47 Suppl A:A1-13, doi: 10.1269/jrr.47.a1
- StrlSchG 2017 Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG) vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch die Bekanntmachung vom 3. Januar 2022 (BGBl. I S. 15) geändert worden ist
- Sugiyama et al. 2021 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 Apr;36(4):415-28, doi: 10.1007/s10654-020-00713-5, Epub 2021/01/26
- Tanaka et al. 2008 Tanaka K, Endo S, Imanaka T, Shizuma K, Hasai H, Hoshi M. Skin dose from neutron-activated soil for early entrants following the A-bomb detonation in Hiroshima: contribution from beta and gamma rays. Radiat Environ Biophys. 2008 Jul;47(3):323-30, doi: 10.1007/s00411-008-0172-1, Epub 20080522
- Tejiram et al. 2023 Tejiram S, Tranchina SP, Travis TE, Shupp JW. The First 24 Hours: Burn Shock Resuscitation and Early Complications. Surg Clin North Am. 2023 Jun;103(3):403-13, doi: 10.1016/j.suc.2023.02.002, Epub 20230321

- Thaul et al. 2000 Thaul S, Page WF, Crawford H, O'Maonaigh H, Institute of Medicine Committee to Study the Mortality of Military Personnel Present at Atmospheric Tests of Nuclear W. In: The Five Series Study: Mortality of Military Participants in U.S. Nuclear Weapons Tests National Academies Press (US), Washington (DC), 2000,
- Tomonaga 2019 Tomonaga M. The Atomic Bombings of Hiroshima and Nagasaki: A Summary of the Human Consequences, 1945-2018, and Lessons for Homo sapiens to End the Nuclear Weapon Age. Journal for Peace and Nuclear Disarmament. 2019;2(2):491-517, doi: 10.1080/25751654.2019.1681226
- UNSCEAR 1982 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Exposures resulting from nuclear explosions. In: Ionizing radiation: sources and biological effects. 249 –332, United Nations, New York, 1982, ISBN
- UNSCEAR 2022 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 II Scientific Annex B: Levels and effects of radiation exposure due to the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: implications of information published since the UNSCEAR 2013 Report. United Nations, New York, 2021, ISBN 978-92-1-139208-1
- WHO 2020 World Health Organization (WHO). A framework for mental health and psychosocial support in radiological and nuclear emergencies. Geneva, 2020, ISBN 9789240015456
- WHO 2023 World Health Organization (WHO). National stockpiles for radiological and nuclear emergencies: policy advice. Geneva, 2023, ISBN 978-92-4-006787-5
- Widner 2009 Widner TE. The world's first atomic blast and how it interacted with the Jornada Del Muerto and Chupadera Mesa. In: Lueth VW, Chamberlin RM, Lucas SG, Hrsg. Geology of the Chupadera Mesa. New Mexico Geological Society 60 th Annual Fall Field Conference Guidebook, 2009, Seiten 425-8
- Yan 2019 Yan W. The nuclear sins of the Soviet Union live on in Kazakhstan. Nature. 2019 Apr;568(7750):22-4, doi: 10.1038/d41586-019-01034-8
- Young und Kerr 2005 Young R, Kerr G. Reassessment of the atomic bomb radiation dosimetry for Hiroshima and Nagasaki Dosimetry system 2002. DS02. Volume 2. Japan, 2005 551°Seiten
- Zhumadilov et al. 2009 Zhumadilov K, Ivannikov A, Zharlyganova D, Zhumadilov Z, Stepanenko V, Apsalikov K, Ali MR, Zhumadilova A, Toyoda S, Endo S, Tanaka K, Okamoto T, Hoshi M. ESR dosimetry study on population of settlements nearby Ust-Kamenogorsk city, Kazakhstan. Radiat Environ Biophys. 2009 Nov;48(4):419-25, doi: 10.1007/s00411-009-0235-y, Epub 20090626

- Zhumadilov et al. 2013 Zhumadilov K, Ivannikov A, Stepanenko V, Zharlyganova D, Toyoda S, Zhumadilov Z, Hoshi M. ESR dosimetry study of population in the vicinity of the Semipalatinsk Nuclear Test Site. J Radiat Res. 2013 Jul 1;54(4):775-9, doi: 10.1093/jrr/rrt008, Epub 20130211
- ZSKG 1997 Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz vom 25. März 1997 (BGBl. I S. 726), das zuletzt durch Artikel 144 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist

Tab. A 1: Übersicht der geschätzten Dosis der Nuklearwaffenversuche (Simon und Bouville 2002)

Testgebiet	Test, Testserie oder Summe aller Tests	Ort der potenziellen Exposition (Städte, Dörfer, Inseln etc.)	Gemittelte externe Ganzkörperexposition (mGy)	Schilddrüsen-dosis für Kinder (1 - 2a) (Gy)	Ungefähre Zahl an exponierten Personen	Geschätzte Kollektiv-Ganzkörperdosis (Person-Gy)	Geschätzte Kollektiv-Schilddrüsen-dosis (Kinder 1 - 2 a) (Person-Gy)	Literatur
Bikini- und Enewetak-Atolle, Marshall-Inseln	BRAVO test (01. 03.1954)	Rongelap Atoll	1900	50	64	122	-	Lessard et al. (1985), Conard (1975)
		Rongerik Atoll	810	keine Kinder	28	23	-	"
		Ailinginae Atoll	1 110	13	18	20	-	"
		Utrik Atoll	110	6,7	157	17	-	"
"	Castle-Serie (1954)	ausgewählte Atolle						Breslin und Cassidy (1955), Population data: RMI (1989)
"		Ailinglaplap	1,7	-	1 300	2,2	-	"
"	"	Ailuk	41	-	400	16,4	-	"
"	"	Kwajalein	8,2	-	1 300	10,7	-	"
"	"	Likierp	14,5	-	640	9,3	-	"
"	"	Majuro	3,1	-	3 400	10,5	-	"
"	"	Wotje	16,8	-	360	6,0	-	"
"	"	alle Atolle	13,6	-	14 000 alle Atolle	191 alle Atolle	-	"
Semipalatinsk, Kasachstan		Ausgewählte Dörfer, Städte						
	29.08.1949	Dolon	900	1 - 2,2	850	765	35 - 77	Stepanov et al. (2001)
	alle Tests	"	2 200		306	2 000		Bouville et al. (2000) ^a

Testgebiet	Test, Testserie oder Summe aller Tests	Ort der potenziellen Exposition (Städte, Dörfer, Inseln etc.)	Gemittelte externe Ganz- körper- exposition (mGy)	Schilddrüsen- dosis für Kinder (1 - 2a) (Gy)	Ungefähre Zahl an exponierten Personen	Geschätzte Kollektiv- Ganzkörper- dosis (Person-Gy)	Geschätzte Kollektiv- Schilddrüsen- dosis (Kinder 1 - 2 a) (Person-Gy)	Literatur
“	29.08.1949	Kanonerka	210	0,35 - 0,7	2 400	500	35 - 70	Stepanov et al. (2001)
	alle Tests	“	840		1 200	1 000		Bouville et al. (2000) ^a
“	24.09.1951	Kaynar	70	3 - 3,8	450	32	54 - 68	Stepanov et al. (2001)
“	12.08.1953	Sarzhai	180	-	630	110	-	Stepanov et al. (2001)
	alle Tests	“	1 200		830	970		Bouville et al. (2000) ^a
Semipalatinsk, Kasachstan	12.08.1953	Kara-Aul	130	-	2 400	310	-	Stepanov et al. (2001)
	alle Tests	“	360		2 300	240		Bouville et al. (2000) ^a
“	24.08.1956	Ust- Kamenogorsk	56	-	130 000	7 300	-	Stepanov et al. (2001)
“	24.08.1962	Semipalatinsk (Stadt)	0,2	-	145 000	30	-	Stepanov et al. (2001)
	alle Tests	“	3,7		163 000	610		Bouville et al. (2000) ^a
“	44 Tests	Altai Region (Russland) 58 Verwal- tungseinheiten	18,6	-	2 200 000	41 200	-	Shoikhet et al. (1999)
Nevada, Testgebiet, USA	alle Tests	ORERP Phase I Areal	2,8	-	180 000	500	-	Anspaugh et al. (1990)

Testgebiet	Test, Testserie oder Summe aller Tests	Ort der potenziellen Exposition (Städte, Dörfer, Inseln etc.)	Gemittelte externe Ganzkörperexposition (mGy)	Schilddrüsen-dosis für Kinder (1 - 2a) (Gy)	Ungefähre Zahl an exponierten Personen	Geschätzte Kollektiv-Ganzkörper-dosis (Person-Gy)	Geschätzte Kollektiv-Schilddrüsen-dosis (Kinder 1 - 2 a) (Person-Gy)	Literatur
“	“	ORERP Phase I + II Areal	0,6	0,007 (alle Tage)	20 000 000	12 000	140 000 (alle Alter)	Anspaugh (2000), Whicker et al. (1996)
“	“	St. George, Utah	15,8	0,25 (alle Alter)	4 900	77,4	1 200 (alle Alter)	Whicker et al. (1996), Beck und Krey (1983)
Emu Field, Maralingan und Monte Bello Inseln, Australien	Ausgewählte Bevölkerungszentren							
	Alle Testserien 1952-1957	Broome	0,18	0,020 (alle Alter)	3 340	0,60	66,8(alle Alter)	Wise und Moroney (1985)
“	“	Noonkanbh	0,16	0,018 (alle Alter)	75	0,01	1,4 (alle Alter)	“
“	“	Onslow	0,10	0,011 (alle Alter)	543	0,06	6,0(alle Alter)	“
“	“	Pt. Hedland	0,23	0,025 (alle Alter)	1 367	0,32	34,2(alle Alter)	“
Novaya Zemlya und Kasputin Yar, Russland,	Alle Tests	-	-	-	-	-	-	Details im Haupttext (Simon und Bouville 2002)
Christmas und Malden Inseln, Kiribati	Alle Tests	Nearby Inseln/Atolle	-	-	-	-	-	“

Testgebiet	Test, Testserie oder Summe aller Tests	Ort der potenziellen Exposition (Städte, Dörfer, Inseln etc.)	Gemittelte externe Ganzkörperexposition (mGy)	Schilddrüsen-dosis für Kinder (1 - 2a) (Gy)	Ungefähre Zahl an exponierten Personen	Geschätzte Kollektiv-Ganzkörper-dosis (Person-Gy)	Geschätzte Kollektiv-Schilddrüsen-dosis (Kinder 1 - 2 a) (Person-Gy)	Literatur
Johnston Atoll, USA	Alle Tests	Keine (Hawaii ist mit 1330 km am nächsten)	-	-	-	-	-	"
Reggane, Algerien	Alle Tests	sehr wenige bewohnte Orte in der Nähe der Testseite (hauptsächlich das Dorf Reggane)	-	-	-	-	-	"
Lop Nor, China		Ausgewählte Städte, Dörfer						
	Alle Tests	Anxi	0,02	-	60 000	1,2	-	Zheng et al. (1996) ^b , UNSCEAR (2000)
"	"	Yumenzhen	0,03	-	159 000	4,8	-	"
"	"	Jinta	0,11	-	99 000	10,9	-	"
"	"	"Jiayuguan	0,11	-	89 000	9,8	-	"
"	"	Shenyang	-	0,022	-	-	-	Liu und Zhu (1996) ^c , Bouville et al. (2000)
"	"	Xining	-	0,02	-	-	-	"
"	"	Lanzhou	-	0,025	-	-	-	"

[illegible]

Abkürzungsverzeichnis

AHS	Adult Health Study
ALL	akute lymphatische Leukämie
AMAD	activity median aerodynamic diameter
AML	akute myeloische Leukämie
ATF	Analytische Task Force
ANoPl-Bund	Allgemeiner Notfallplan des Bundes
ARS	acute radiation syndrome, akutes Strahlensyndrom
ATP	Allied Tactical Publication der NATO
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMI	Bundesinnenministeriums für Inneres und für Heimat
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BNoPL	Besonderer Notfallplan des Bundes
CBRN	Chemisch, biologisch, radiologisch, nuklear
CLL	chronische lymphatische Leukämie
CML	chronische myeloische Leukämie
DEARE	delayed effects of acute radiation exposure,
DHS	Department of Homeland Security
DRZ	dangerous radiation zone,
DTC	differenziertes Schilddrüsenkarzinom
DWD	deutscher Wetterdienst
EMA	European Medicines Agency
EMP	elektro-magnetischer Impuls
ERR	excess relative risk oder excess relative rate
FDA	Food and Drug Administration

FDMT	Food and Dose Model terrestic
FEMA	Federal Emergency Management Agency der USA
FOCS	Filial one offspring clinical study
G-CSF	granulocyte colony stimulating factor
GM-CSF	granulocyte-macrophage colony stimulating factor
HEU	highly enriched uranium
HOB	height of burst,
HZ	hot zone
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
IMIS	Integrierte Mess- und Informationssystem zur Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt
KI	Konfidenzintervall
KIT	Kriseninterventionsteams
KZV	Konzeption Zivile Verteidigung
LD	letale Dosis
LDZ	Light damage zone
LRI	local radiation injury
LSS	Life Span Study
MDZ	Moderate damage zone,
MIRV	Multiple independantly targetable re-entry vehicle
MSC	mesenchymale Stammzellen
NCI	National Cancer Institute
NDWV	Notfalldosiswerteverordnung
NEMP	Nuklearer Elektromagnetischer Impuls
PSA	persönliche Schutzausrüstung
PSNV	Psychosozialen Notfall-Versorgung
PTBS	posttraumatische Belastungsstörung

RBE	relative biological effectiveness
RKI	Robert Koch-Institut
RLZ-Bund	Radiologisches Lagezentrum des Bundes
RR	Relatives Risiko
RRGV	Rahmenrichtlinien für die Gesamtverteidigung - Gesamtverteidigungsrichtlinien
SDZ	Severe damage zone
SF	Schutzfaktoren
SMR	Standardisiertes Mortalitätsverhältnis
SSK	Strahlenschutzkommission
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten, Swedish Radiation Safety Authority
TREE	Transient Radiation Effects on Electronics
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
UVB-CBRN	UnterstützungsverBund CBRN
ZSKG	Gesetzes über den Zivilschutz und die Katastrophenhilfe des Bundes