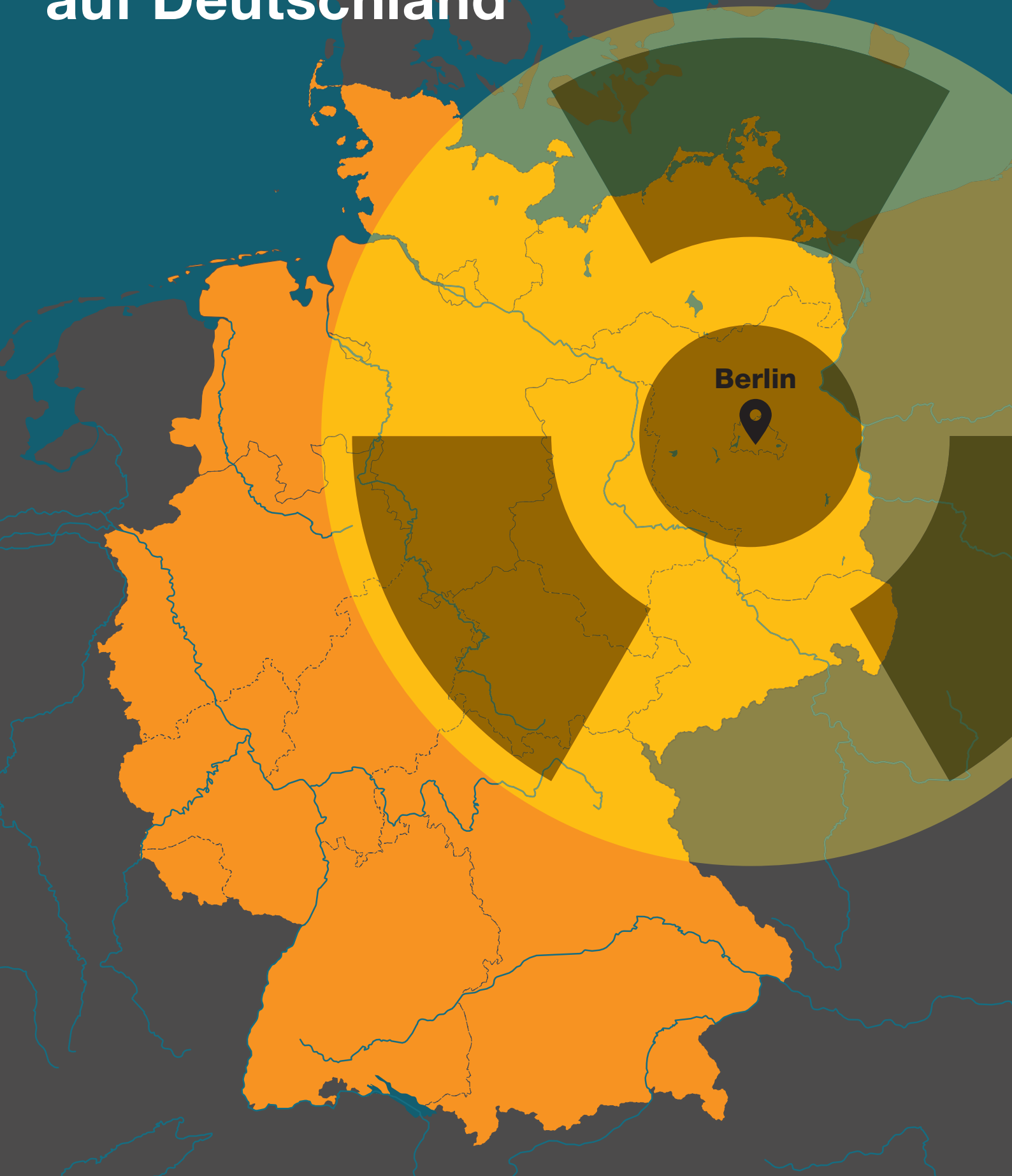


Auswirkungen einer Atombombe auf Deutschland



Auswirkungen einer Atombombe auf Deutschland

Autorin:
Oda Becker

im Auftrag von Greenpeace

Hamburg, im August 2020

➔ Kein Geld von Industrie und Staat

Greenpeace ist international, überparteilich und völlig unabhängig von Politik, Parteien und Industrie. Mit gewaltfreien Aktionen kämpft Greenpeace für den Schutz der Lebensgrundlagen. Mehr als 600.000 Fördermitglieder in Deutschland spenden an Greenpeace und gewährleisten damit unsere tägliche Arbeit zum Schutz der Umwelt.

Impressum

Greenpeace e.V., Hongkongstraße 10, 20457 Hamburg, Tel. 040/3 06 18-0 **Pressestelle** Tel. 040/3 06 18-340, F 040/3 06 18-340, presse@greenpeace.de, www.greenpeace.de
Politische Vertretung Berlin Marienstraße 19–20, 10117 Berlin, Tel. 030/30 88 99-0 **V.i.S.d.P.** Christoph von Lieven **Gestaltung** Klasse 3b

Vorwort



Deutschland verfügt selbst über keine eigenen Atomwaffen. Es ist jedoch ein offenes Geheimnis, dass auf dem Fliegerhorst im rheinland-pfälzischen Büchel etwa 20 US-amerikanische Atombomben lagern. Doch noch immer weiß ein großer Teil der Menschen in Deutschland nicht von der Existenz der Atombomben auf deutschem Boden. Als Kampagner für atomare Abrüstung bei Greenpeace bin ich der festen Überzeugung, dass die Menschen in Deutschland über diese Planungen und Risiken aufgeklärt sein sollten. So hält die Bundesregierung mit der NATO und einem unberechenbaren US-Präsidenten noch immer an einem veralteten Sicherheitsdenken fest, das auf Abschreckung und Vernichtungsdrohung setzt. Die in Büchel stationierten US-Atombomben sollen im Rahmen der nuklearen Teilhabe im Kriegsfall von deutschen Piloten ins Ziel geflogen werden. Damit macht sich Deutschland jedoch zum potenziellen Aggressor und selbst zur Zielscheibe eines möglichen Atomangriffs. Doch was bedeutet das konkret?

In dieser Studie geht Atomexpertin und Physikerin Oda Becker im Auftrag von Greenpeace erstmals der Frage nach, welche Auswirkungen eine Atombombenexplosion auf Deutschlands politisches Zentrum Berlin, auf das Finanzzentrum Frankfurt und auf den Fliegerhorst Büchel konkret hätte. In dieser Analyse wurde bewusst von relativ „kleinen“ Atomwaffeneinsätzen ausgegangen. Tatsächlich verfügen die beiden Weltmächte USA und Russland über Atomwaffen, die bis zu tausendfach stärkere Sprengköpfe haben.

75 Jahre nach den Atombombenangriffen auf Hiroshima und Nagasaki befindet sich die Welt in einem neuen atomaren Wettrüsten. Mit der Aufkündigung des INF-Vertrags über atomare Mittelstreckenraketen durch die USA und Russland erleben wir ein Wiederaufflammen der Dynamik des Kalten Krieges. Der letzte Abrüstungsvertrag, der New-Start-Vertrag zur Begrenzung von strategischen Waffen, läuft im Februar 2021 aus, wenn es bei den kürzlich begonnenen Verhandlungen zu keiner Einigung kommt. Das US-Militär spricht davon, Atomkriege begrenzt führbar machen zu wollen. Gegenwärtig werden in der Fachwelt auch die fatalen Auswirkungen von regional begrenzten, „kleinen Atomkriegen“ zwischen zwei Atomwaffenstaaten diskutiert. Ihre fatalen Auswirkungen mit Dürren, Temperaturstürzen, unbewohnbaren Gebieten und Flüchtlingsströmen zeigen, dass es im Falle eines Atomkriegs keine regionalen Begrenzungen gibt. In dieser Studie wird deutlich: Die Auswirkungen von Atombombeneinsätzen wären schon in Deutschland verheerend für Menschen und Umwelt und müssen verhindert werden. Eine hier ebenfalls behandelte Untersuchung von Atomwaffenexplosionen in US-Städten zeigt deutlich den Zusammenbruch der Infrastruktur mit seinen Folgen. Was wir jetzt brauchen, ist ein neues Konzept von Sicherheit, das auf gegenseitige Vernichtungsdrohungen verzichtet, auf Kooperation setzt und Atomwaffen endgültig zu Relikten der Vergangenheit macht.

Mit dieser Studie tragen wir dazu bei, die notwendige Diskussion über eine atomwaffenfreie Welt und ein modernes Verständnis von Sicherheit zu führen. Vor den nächsten Wahlen im Herbst 2021 müssen sich alle Parteien dazu verpflichten, Deutschland und Europa als atomwaffenfreies Friedensprojekt zu gestalten. Laut einer aktuellen Greenpeace-Umfrage, die das Meinungsforschungsinstitut Kantar im Juli dieses Jahres geführt hat, sprechen sich 92 Prozent der Menschen in Deutschland dafür aus, dass Deutschland den Atomwaffenverbotsvertrag unterzeichnet. Deutschland hat die Chance, durch die Unterzeichnung und Ratifizierung des Atomwaffenverbotsvertrags einen wichtigen Schritt als Vorreiter für eine atomwaffenfreie Welt zu gehen. Deutschland sollte diese Chance nutzen. Diese Studie zeigt, was auf dem Spiel steht.

Christoph von Lieven,
Greenpeace-Sprecher für atomare Abrüstung

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	2
2 Arten von Nuklearwaffen	2
2.1 Strategische und taktische Atomwaffen	2
2.2 Anzahl der Atomsprengköpfe.....	3
3 Wirkungen einer Atomwaffenexplosion	6
3.1 Energieverteilung einer Atomexplosion	6
3.2 Hitzestrahlung	7
3.3 Druckwelle	8
3.4 Elektromagnetischer Puls	8
3.5 Sofortstrahlung	8
3.6 Radioaktiver Fallout	9
3.7 Verteilung und Abnahme des lokalen Fallouts.....	11
3.8 Unterschied eines Reaktor-Unfall und eines Atombombenabwurfs	11
3.9 Schutz vor Strahlung	12
4 Biologische Wirkung von Strahlung auf Menschen	12
4.1 Akute Strahlenfolge (deterministische Strahlenwirkung)	12
4.2 Langzeitfolgen (stochastische Strahlenwirkung).....	14
4.3 Probleme der medizinischen Versorgung.....	16
5 Auswirkungen einer Atomwaffenexplosion in den USA.....	16
5.1 Explosionsschäden, thermische Auswirkungen und Sofortstrahlung.....	17
5.2 Fallout-Gebiete und Opfer von Fallout	17
5.3 Auswirkungen einer 550 kt Bombe	17
5.4 Auswirkungen einer 20 kt Atombombe	18
5.5 Kombinationen von Verletzungen und fehlende medizinische Versorgung	18
6 Berechnungen der Auswirkungen in Deutschland	19
6.1 Verwendetes Programm (NUKEMAP)	19
6.2 Auswirkungen einer 20-kt Atomwaffe auf Berlin	20
6.3 Auswirkungen einer 550-kt Atomwaffe auf Frankfurt am Main.....	24
6.4 Auswirkungen einer 170-kt Atomwaffe in Büchel.....	29

1 Einleitung

Diese Studie zeigt die Auswirkungen auf die Bevölkerung nach einer Explosion einer Atombombe in Deutschland auf. Dazu wird in Anlehnung an die in Kapitel 6 dargestellte Studie angenommen, dass eine relativ kleine Atombombe in Berlin oder ein deutlich größerer Atomsprengsatz in Frankfurt explodiert. Zusätzlich wird die potenzielle Auswirkung einer Explosion einer in Büchel (Rheinland-Pfalz) stationierten Atomwaffe betrachtet.

Im Kapitel 2 werden zunächst einige Fakten über die weltweite Verteilung von Atomwaffen und die derzeitigen Entwicklungen dargestellt. Kapitel 3 und 4 erläutern die Wirkung einer Atomwaffenexplosion und die biologischen Wirkungen von Strahlung auf Menschen.

2 Arten von Nuklearwaffen

Die Explosionsenergie einer Atombombe wird in den Maßeinheiten Kilotonne (kt) und Megatonne (Mt) angegeben. Eine Atomwaffe mit einer Explosionsenergie von 1 Kilotonne ist eine Waffe, die bei einer Explosion dieselbe Energiemenge erzeugt wie 1.000 Tonnen (1 kt) TNT bzw. 1.000.000 Tonnen (1 Mt) des Sprengstoffs Trinitrotoluol TNT. Zum Vergleich: Die im 2. Weltkrieg über Hiroshima abgeworfene Atombombe („Little Boy“) hatte einen Detonationswert von 12,5 kt; die über Nagasaki abgeworfene Bombe („Fat Man“) von 22 kt.

Die Zerstörungskraft einer Bombe steigt nicht linear mit der Explosionsenergie. So würde eine Bombe mit einer Explosionskraft von 1 Mt 80 Quadratmeilen zerstören. Während acht Bomben mit jeweils 125 kt insgesamt 160 Quadratmeilen zerstören würden. Diese Beziehung ist ein Grund für die Entwicklung von Trägersystemen, die mehrere Sprengköpfe (MIRV= *Multiple Independently targetable Re-entry Vehicle*) haben können. Bei modernen Raketen sind die einzelnen Sprengköpfe so steuerbar, dass mit jedem Sprengkopf ein anderes Ziel angegriffen werden kann.

Atomsprengeköpfe verfügen entweder über eine bestimmte unveränderbare Sprengkraft oder es besteht die Möglichkeit die Sprengkraft zu variieren. Die in Deutschland (Büchel) vorhandenen Fliegerbomben B61 können vor dem Einsatz variabel aus vier unterschiedlichen Optionen wählen. Die kleinste Sprengkraft der nicht-strategischen (taktischen) Versionen liegt bei 0,3 kt; die größte bei 170 kt und liegt damit im Bereich der Sprengkraft strategischer Waffen.

Atomwaffen nutzen die Atomenergie durch Spaltung (Fission) oder Fusion von Atomkernen. Die ersten Atombomben nutzten nur die Kernspaltung, neuere Atomwaffen (thermonukleare Waffen) nutzen Kernfusion und Kernspaltung.

2.1 Strategische und taktische Atomwaffen

Strategische Atomwaffen sind Atomwaffen mit großer Sprengkraft, die nicht auf dem Gefechtsfeld eingesetzt werden, sondern Ziele im gegnerischen Hinterland zerstören sollen. Strategische Atomwaffen sind insbesondere freifallende Bomben, die von Flugzeugen (meist Langstreckenbomben) direkt auf das Ziel abgeworfen werden: landgestützte Interkontinentalraketen (Intercontinental Ballistic Missile, ICBM) und Mittelstreckenraketen (MRBM, IRBM)¹ mit nuklearem Sprengkopf.

U-Boot-gestützte und luftgestützte ballistische Raketen mit nuklearem Sprengkopf sowie Marschflugkörper (Cruise-Missiles) mit nuklearem Sprengkopf, die von Flugzeugen, Kriegsschiffen oder U-Booten abgefeuert werden können, sind vorwiegend für den „taktischen“ Einsatz vorgesehen. Taktische Atomwaffen sollen ähnlich wie konventionelle Waffen zur Bekämpfung gegnerischer Streitkräfte eingesetzt

¹ Derartige Waffen werden heute lediglich noch von solchen Staaten stationiert, denen die Technik von Interkontinentalraketen fehlt, wie Pakistan oder Israel.

werden. Ihre Sprengkraft ist deutlich geringer als bei strategischen Waffen. Die kleinste taktische Atomwaffe hat eine Sprengkraft von circa 0,3 kt. Die in Büchel (Rheinland-Pfalz) lagernden Atombomben B61 zählen zu den taktischen Waffen. In Büchel ist das „Taktische Luftwaffengeschwader 33“ der Bundeswehr stationiert. Im Anforderungsfall (Angriff mit Atomwaffen) würden Piloten der Luftwaffe die Atombomben mit deutschen Tornado-Kampflugzeugen ans Ziel fliegen und abwerfen.¹

Taktische Atomwaffen sind auch in weiteren Formen vorhanden, beispielsweise nukleare Artilleriegranaten, die von konventionellen Artilleriegeschützen (etwa Panzerhaubitze M109) verschossen werden können, Infanteriegranaten, Atomic Demolition Munition und nuklear bestückte Torpedos.

Die NATO-Nuklearstrategie „Flexible Response“ ging davon aus, dass der Einsatz taktischer Atomwaffen kontrollierbar sei: Würden sich konventionelle Kampfmittel als zu schwach erweisen, würde der Gebrauch taktischer Atomwaffen die Abwehr von Angriffen auf NATO-Gebiet ermöglichen, ohne dass die Auseinandersetzung zu einem umfassenden nuklearen Schlagabtausch (sog. „all-out war“) eskalieren müsste. Zweifel an dieser Theorie führten dazu, dass auf dem NATO-Gipfeltreffen in Rom am 8. November 1991 eine neue Strategie des Bündnisses beschlossen wurde. Sie setzte auf die Triade von Dialog, Kooperation und Erhaltung der Verteidigungsfähigkeit und löste die Strategie des „Flexible Response“ ab.

2.2 Anzahl der Atomsprengköpfe

Zu Beginn des Jahres 2019 sind fast **13.900 Atomwaffen weltweit** vorhandenen, verteilt auf neun Staaten. Die beiden militärischen Supermächte, Russland und die USA, verfügen über die mit Abstand größten nuklearen Arsenale mit jeweils mehr als 6.000 Atomsprengköpfen. Diese große Anzahl an Atomwaffen resultierte aus dem jahrzehntelangen Wettrüsten während des Kalten Krieges zwischen den beiden Ländern.

Neben den fünf „offiziellen“ Atomwaffen-Staaten (China, Frankreich, Großbritannien, Russland, USA) gibt es vier „de facto“ Atomwaffen-Staaten: Indien, Israel, Nordkorea und Pakistan. Die offiziellen Atomwaffenstaaten bilden im Weltsicherheitsrat der Vereinten Nationen die Gruppe der ständigen Mitglieder, die über ein Vetorecht verfügen und eine Beschlussfassung des Rates verhindern können.²

Nur drei der weltweit neun Atomwaffenstaaten haben ihr Sprengkopffarsenal in den vergangenen fünf Jahren reduziert: USA, Russland und Großbritannien. Alle anderen Länder besitzen heute mehr Atomwaffen als im Jahr 2014. Das zeigt die folgende Abbildung, die auf Basis von aktuellen Daten des Friedensforschungsinstitut SIPRI (Stockholm International Peace Research Institute) erstellt wurde.³ Weil die USA und Russland ihren großen Waffenbestand reduziert haben, ging die Gesamtzahl der Atomsprengköpfe im Zeitraum von 2014 bis 2019 um rund 15 Prozent zurück. Jedoch sind nun beide Staaten dabei, ihre Atomwaffen zu modernisieren und durch neuere zu ersetzen.

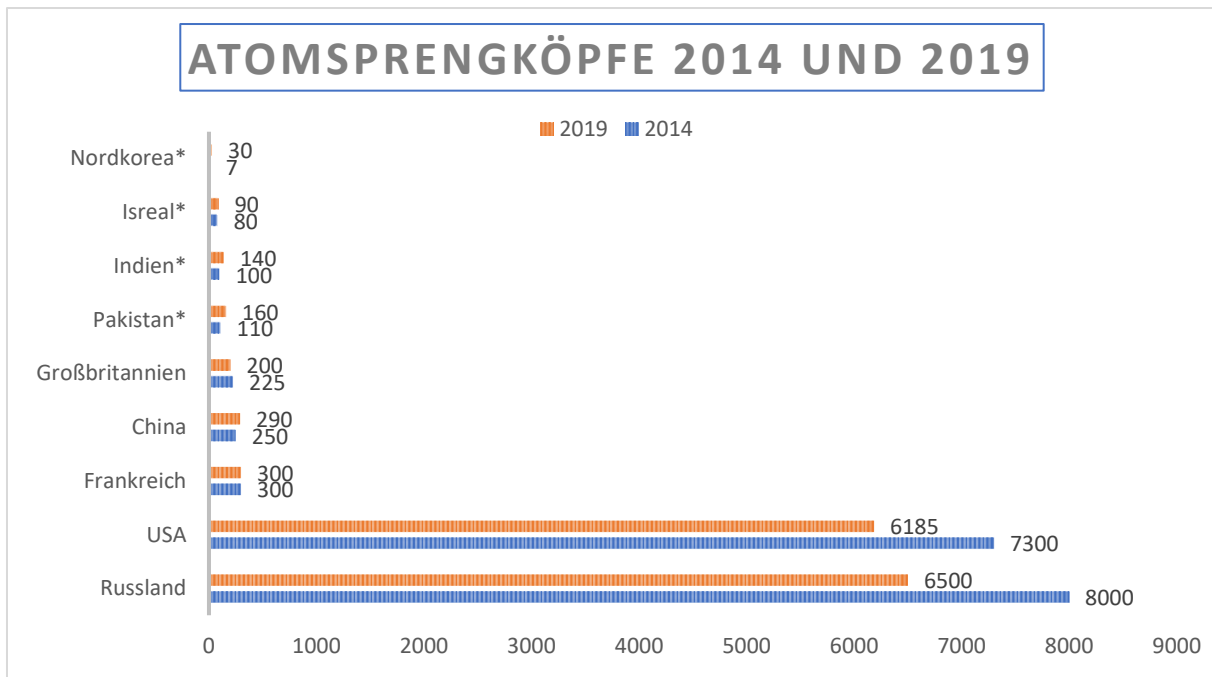


Abbildung 1: Vergleich der Anzahl der Atomsprengeköpfe weltweit 2014 und 2019

In dem Bemühen, die Verbreitung von Atomwaffen zu unterbinden und das Risiko eines Atomkrieges zu mindern, wurde der Atomwaffensperrvertrag (Nuklearer Nichtverbreitungsvertrag, NVV, englisch Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons, NPT) von den fünf „offiziellen“ Atommächten angestoßen und von fast allen Ländern weltweit unterzeichnet. Israel, Indien und Pakistan haben neben dem Südsudan die Ratifizierung des Vertrags verweigert, um sich nicht der Kontrolle ihrer kerntechnischen Anlagen durch die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) zu unterwerfen. Zudem trat Nordkorea im Jahr 2003 aus dem Vertrag aus, um seinen Weg zu einer Atommacht ungestört verfolgen zu können.

Laut Politikwissenschaftler Carlo Masala (Universität der Bundeswehr, München) befinden wir uns bereits in einer nuklearen Aufrüstung. Russland habe alle Militärmanöver in den vergangenen beiden Jahren mit nuklearen Komponenten durchgeführt. Die USA erneuern derzeit mit Milliardenaufwand ihre Atomwaffen. Sie testeten beispielsweise Ende letzten Jahres neue Interkontinentalraketen.⁴ Auch sollen die auf dem deutschen Fliegerhorst Büchel stationierten Atombomben der USA des Typs B61-3 und -4 durch das neue Modell B61-12 ersetzt werden. Dieses Waffenmodell soll deutlich zielgenauer sein als das vorherige.

Eine neue Art von Risiko könnte ein Waffentyp bringen, an dem beide Staaten, aber auch Länder wie China oder Frankreich arbeiten: sogenannte Hyperschallwaffen. Sie fliegen mit vielfacher Schallgeschwindigkeit zu ihrem Ziel und bleiben dabei manövrierfähig. Sie könnten Atomsprengeköpfe schnell und mit wenig Möglichkeit zur Abwehr abliefern.

Im Kalten Krieg hatte die nukleare Abschreckung die Supermächte dazu gebracht, sich auf Verträge zur Rüstungskontrolle zu einigen. Das Wettrüsten wäre sonst zu teuer geworden. Doch diese internationalen Vereinbarungen laufen aus. Russland und die USA haben 2019 den **INF-Vertrag** über das Verbot landgestützter Mittelstreckenwaffen aufgekündigt. Ob beide Seiten ein Interesse daran haben, den im Jahr 2021 auslaufenden **Vertrag über strategische Atomwaffen** (New Strategic Arms Reduction Treaty) zu verlängern, ist sehr zweifelhaft. Erst wenn die USA und Russland deutlich abrüsteten, würde sich China an Rüstungskontrollverträgen beteiligen. Doch genau das passiert nicht. Indien und Pakistan haben ebenfalls kein Interesse an Rüstungskontrollen, für sie sind Atomwaffen wichtig für die gegenseitige Abschreckung. Zuletzt verschlechterte sich das Verhältnis beider Staaten massiv. Israel hat bis heute

noch nicht einmal offiziell bestätigt, Atomwaffen zu besitzen. Nordkorea testet weiter Raketen. Iran nutzt die Drohung einer nuklearen Waffenentwicklung ebenfalls im Atomstreit mit den USA.⁵

3 Wirkungen einer Atomwaffenexplosion

Aus den Atombombenabwürfen auf Hiroshima und Nagasaki während des Zweiten Weltkriegs und durch die circa 520 oberirdischen Atomwaffentests, die vor dem Verbot 1963 durchgeführt wurden, ließen sich Informationen über die direkten Auswirkungen von Nuklearexplosionen gewinnen.²

Im Augenblick der Zündung einer Atombombe steigt die Temperatur des spaltbaren Materials und anderer Bestandteile der Waffe auf viele Millionen Kelvin und der Druck bis in die Größenordnung von Tera-Pascal. Ein (physikalischer) Körper³ strahlt bei Erhöhung seiner Temperatur elektromagnetische Wellen aus. Bei der hohen Temperatur der Atomwaffe hat die Strahlung eine kurze Wellenlänge und liegt im Röntgenstrahlung-Bereich. Bei Explosionen in nicht allzu großer Höhe vollzieht sich die Absorption der Energie in der Luft nahezu vollständig innerhalb weniger Meter. Luft mit niedriger Temperatur strahlt Energie längerer Wellenlänge ab, sodass ein allmählicher Übergang von Röntgenstrahlen in ultraviolette, sichtbare und infrarote Strahlung stattfindet. Dieser Prozess führt zur Bildung einer hell leuchtenden Luftmasse des sogenannten Atompilzes. Gleich nach seiner Entstehung beginnt der Atompilz sich auszudehnen und nach oben zu steigen. In dem Maße wie sich sein Umfang vergrößert, sinkt die Temperatur ab. Nach etwa einer Minute ist die Temperatur so weit gesunken, dass der Feuerball keine sichtbare Strahlung mehr aussendet. Die Größe des Atompilzes hängt von der Explosionskraft der Bombe ab. Die atmosphärische Stabilität beeinflusst die Höhe des Atompilzes und das Verhalten des Fallouts, Dicke und Höhe der Wolken beeinflussen die Streuung, Reflexion und Absorption der Strahlung.

3.1 Energieverteilung einer Atomexplosion

Die bei einer Atomwaffenexplosion erreichten Temperaturen sind sehr viel höher als bei einer konventionellen Explosion, und ein großer Teil der Energie wird in Form von Licht und Wärme, die allgemein als thermische Energie bezeichnet wird, freigesetzt. Die folgende Abbildung zeigt die Energieverteilung.

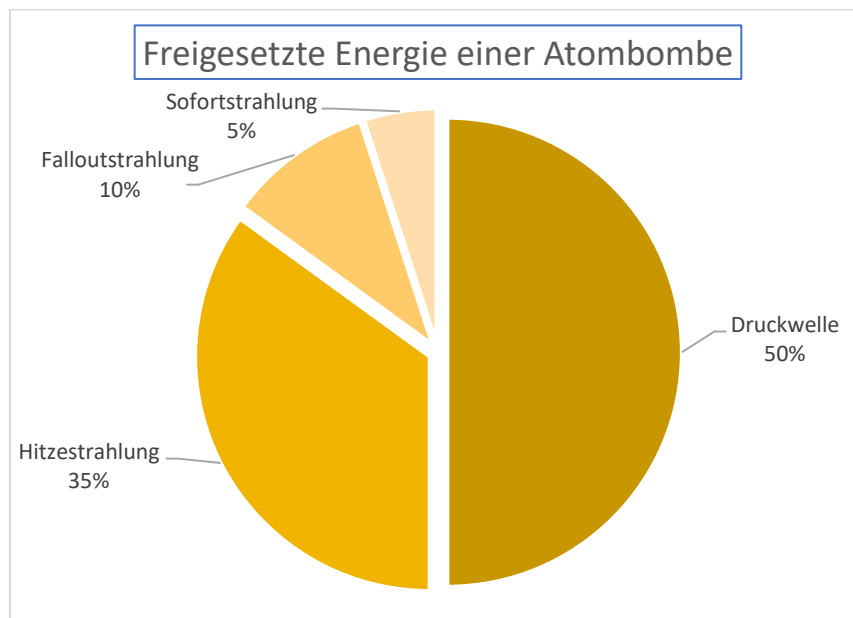


Abbildung 2: Energieverteilung einer Atombombenexplosion

² Die in diesem Kapitel dargestellten Inhalten sind aus: Rotblat, Joseph: Strahlungswirkungen beim Einsatz von Kernwaffen; Berlin Verlag, Arno Spitz GmbH, 1996

³ In der Physik ist ein (physikalischer) Körper etwas, das Masse hat und Raum einnimmt.

Ungefähr 85 Prozent der Energie einer Atomwaffe erzeugt eine Druckwelle und Hitzestrahlung. Die restlichen 15 Prozent der Energie werden als verschiedene Arten von radioaktiver Strahlung freigesetzt. Davon sind 5 Prozent die Sofortstrahlung, definiert als die innerhalb von etwa einer Minute nach der Explosion erzeugte Strahlung, hauptsächlich Gamma- und Neutronenstrahlung. Die letzten 10 Prozent der gesamten Spaltungsenergie stellt die Reststrahlung dar, die über eine bestimmte Zeitspanne abgegeben wird. Dies ist weitgehend auf die Radioaktivität der Spaltprodukte zurückzuführen, die in den Waffenresten und im Fallout nach der Explosion vorhanden sind.⁴

3.2 Hitzestrahlung

Die erste Wirkung einer Atombombe ist ein intensiver Lichtblitz. Dabei steigen die Temperaturen so stark an, dass in einem bestimmten Umkreis alles verdampft wird. Die elektromagnetischen Wellen, die vom Atompilz infolge seiner hohen Temperatur ausgesandt werden, werden Hitzestrahlung genannt. Diese Strahlung erfolgt in zwei Etappen. Zunächst ein kurzer, einige Millisekunden langer Impuls, und danach ein längerer, von einigen Sekunden Dauer. Die Dauer wächst mit der Explosionsstärke der Bombe. Die erste Strahlung besteht hauptsächlich aus ultravioletten Strahlen, die das Augenlicht von Menschen schädigen können, die zufällig in die Richtung der Explosion blicken.

Der zweite Impuls emittiert den Hauptanteil der Energie und ist für die Hitzewirkung der Bombe verantwortlich. Diese Strahlung kann über ein großes Gebiet tödliche oder sehr schwere Verbrennungen verursachen. Ihre Reichweite hängt von der Explosionskraft der Bombe und den atmosphärischen Bedingungen ab. Niedrige Wolken über dem Feuerball verursachen ein beträchtliches Maß an Reflexion zurück zur Oberfläche und die Wirkung der Hitzestrahlung wird erheblich verstärkt und Brände begünstigt. Frischer Schnee auf dem Boden würde die Strahlung ebenfalls reflektieren und die thermische Wirkung noch verstärken. Bei guter Sicht kann die Hitzewelle über eine weit größere Entfernung Opfer fordern als die anderen Auswirkungen (Druckwelle und ionisierende Strahlung).

Abgesehen von Verbrennung der Haut kann die Hitzestrahlung auch Tod und Verletzungen durch Brände verursachen. Leicht entzündliche und brennbare Stoffe können durch die Hitze in Brand geraten. Viele einzelne Brände können sich zu einem Flächenbrand zusammenschließen, der sich über große Gebiete erstreckt.

Hautverbrennungen werden im Allgemeinen in Verbrennungen ersten Grades (wie ein sehr schlimmer Sonnenbrand), zweiten (erzeugen Blasen, die unbehandelt zu einer Infektion führen) und dritten Grades (die Haut und darunter liegendes Gewebe ist zerstört) eingeteilt. Menschen mit Verbrennungen könnten überleben, wenn sie ärztliche Behandlung erhalten, nach einem Atomangriff ist dieses jedoch unwahrscheinlich.

Die Atomwaffentests fanden in Gebieten mit wenig brennbarem Material statt, um Großbrände zu verhindern, so dass die Tests wenig Informationen über die Entzündung von Bränden und das Brandverhalten in städtischen Gebieten liefern. In Hiroshima (12,5 kt Atombombe) war das zerstörte Gebiet größer als in Nagasaki (20 kt Atombombe), was wahrscheinlich auf Unterschiede in der Topographie zurückzuführen ist. Der bombardierte Teil von Nagasaki liegt in einem Tal, während Hiroshima in einem flachen Gelände liegt. Etwa 20 Minuten nach der Atomexplosion von Hiroshima entwickelte sich aus den vielen kleinen Bränden, die die Explosion direkt oder indirekt entzündete, ein Feuersturm. Aufgrund der einströmenden Winde hatte sich das Großfeuer zwei bis drei Stunden nach der Explosion voll entwickelt und war etwa sechs Stunden nach der Explosion erloschen. Die in diesem Großfeuer freigesetzte

⁴ Die Neutronenbomben erzeugen eine starke Sofortstrahlung, haben aber weniger Hitze- und Druckwirkung. Ihr Effekt ist somit anders: Die Zerstörung von Gebäuden ist wesentlich geringer; umso schlimmer ist aber die Strahlenwirkung auf den Menschen. Ihr Ziel ist es, Soldat*innen sofort kampfunfähig zu machen. Sie verursacht mehr Tote und weniger Gebäudeschäden: Deshalb wurde die Neutronenbombe oft als „Saubere Bombe“ bezeichnet.

Energie kann mehr als 1000 Mal größer gewesen sein als die Energie, die bei der Explosion der Atombombe selbst freigesetzt wurde.

3.3 Druckwelle

Etwa die Hälfte der Energie einer Atomexplosion wird als Druckwelle freigesetzt. Die Explosionskraft ist gewaltig. Wenn eine Bombe über einem Bevölkerungszentrum gezündet wird, verursacht die Druckwelle die größten unmittelbaren Verluste von Menschenleben. Sie ist auch die Hauptursache für die Zerstörung von Gebäuden. Die Schäden werden sowohl durch den Luftüberdruck an der Vorderseite der Druckwelle als auch durch die extrem starken Stürme verursacht. Diese Stürme halten auch dann noch an, wenn die Druckwellenfront das Gebiet passiert hat. Die entfachten Brände dehnen sich dadurch schnell aus. Die Druckwelle verursacht auch Schäden und Explosionen etwa an Tanks, Gaskesseln und Raffinerien. Diese gehen ihrerseits in Flammen auf und verursachen weitläufige Sekundärbrände.

Eine Druckwelle breitet sich nach allen Seiten aus. Im Laufe der Ausbreitung verliert die Welle an Stärke und Geschwindigkeit. Der menschliche Körper kann einen recht hohen Überdruck aushalten. Es wird allgemein angenommen, dass ein Überdruck von 35 Kilo-Pascal der Wert für die letale Wirkung einer Druckwelle ist. Ein derartiger Überdruck ist zum Beispiel bei einer Explosion⁵ einer 1 kt Bombe bis in ca. 700 Meter, und bei einer 1 Mt Bombe bis in 5 km vorhanden. Die meisten Todesfälle resultieren aus der indirekten Wirkung der Druckwelle: Gebäude stürzen ein, Menschen werden durch die Luft geschleudert oder von umherfliegenden Trümmern getroffen.

3.4 Elektromagnetischer Puls (EMP)

Die zu Beginn auftretende ionisierende Strahlung einer Atomwaffe ruft eine intensive Ionisierung der Luft hervor. Eine ihrer Wirkungen ist die kurze Aussendung von starker elektromagnetischer Strahlung. Dieser Impuls ähnelt den Radiowellen, umfasst jedoch ein fortlaufendes Spektrum von Wellenlängen und weist Amplituden auf, die millionenfach stärker als die von örtlichen Radiowellen sind. Diese Strahlung dauert nur wenige Mikrosekunden an, trotz dieser kurzen Dauer kann sie durch ihre heftigen Schwingungen bei einer Explosion in niedriger Höhe dauernden Schaden an elektrischen Geräten bis in eine Entfernung von 20 Kilometer anrichten.

Für Krankenhäuser bedeutet dies, dass die Stromversorgung und alle angeschlossenen Notstromquellen verloren gehen und die meisten Geräte, die an die Stromversorgung angeschlossen sind, werden wahrscheinlich zerstört. Die Kombination von EMP auf Elektronik und die Auswirkungen der Explosion auf die Integrität und Ausrichtung der Antennen schränken die Funk-, Mobiltelefon- und Satellitenkommunikation in der Umgebung nach dem Ereignis stark ein. Elektrische Geräte und elektronische Geräte auf der Basis von Halbleitern und Transistoren sind besonders empfindlich gegen Wirkung der EMP. Strahlungsmessgeräte können zudem ausfallen oder falsche Werte liefern. Der Elektromagnetische Puls ist für Menschen ungefährlich.

3.5 Sofortstrahlung

Die von einer Explosion ausgehende radioaktive Strahlung kann in zwei Kategorien unterteilt werden: Sofortstrahlung und Reststrahlung. Die Sofortstrahlung besteht hauptsächlich aus Gammastrahlung und wirkt bis zu einer Minute. Das Niveau der Sofortstrahlung nimmt mit der Entfernung vom Explosionsmittelpunkt rasch ab. Außerdem hält die Sofortstrahlung nur so lange an, wie die Kernspaltung im Feuerball stattfindet. Die Sofortstrahlung macht einige Prozent der Gesamtenergie einer Atomwaffenexplosion aus. Obwohl Menschen in der Nähe des Explosionsorts tödliche Strahlendosen erhalten können,

⁵ in einer passenden Höhe für die Wirkung der Druckwelle von 300 Meter

werden sie gleichzeitig durch die Druckwelle und der Hitzestrahlung getötet. Bei Atomwaffen ist nur ein relativ geringer Anteil der Toten und Verletzten auf die Sofortstrahlung zurückzuführen.

Die ionisierende Strahlung, die später als eine Minute nach der Explosion emittiert wird, heißt Reststrahlung. Ihr größter Teil ist der sogenannte Fallout. Zusätzlich zu dem Fallout gibt es eine gewisse Reststrahlung in der Nähe des Explosionsherdes, die durch Aktivierung von Neutronen entsteht.

3.6 Radioaktiver Fallout

Als radioaktiver Fallout (radioaktiver Niederschlag) werden die radioaktiven Partikel bezeichnet, die bei einer Atomwaffenexplosion auf die Erde fallen. Er besteht aus Waffenresten, Spaltprodukten und, im Falle einer bodennahen Explosion, aus bestrahltem Boden. Findet eine nukleare Explosion nahe der Oberfläche statt, wird die Erde in eine pilzförmige Wolke gesogen und mit den Überresten der Atomwaffe kontaminiert. Die meisten der durch die Explosion erzeugten radioaktiven Partikel fallen zeitnah auf Gebiete, die sich vom Explosionsort in Richtung mit den vorherrschenden Winden erstrecken.

Die radioaktiven Stoffe können sich über einen großen Bereich am Boden ablagern, weit über die Bereiche der Zerstörung und Todesfälle hinaus, die durch Druckwelle, Hitze- und Sofortstrahlung hervorgerufen wurden. Sie können entfernte Regionen erreichen und ein Strahlungsrisiko auch lange nach der Explosion darstellen.

Die Größe der Fallout-Partikel variiert von Tausendstel Millimetern bis zu mehreren Millimetern. Die schwersten Partikel fallen sehr bald in unmittelbare Nähe der Explosionsstelle. Die leichteren Partikel bleiben länger in der Atmosphäre und können mit dem Wind über große Entfernung fortgetragen werden, bevor sie auf den Boden herabschweben. Die radioaktiven Partikel, die sich innerhalb von 24 Stunden nach der Explosion niederschlagen, bilden den sogenannten frühen Fallout. Dieser stellt die bei weitem größte Gesundheitsgefahr dar. Wenn die Partikel von dem Wind weiter fortgetragen werden, verbreiten sie sich über größere Gebiete, sodass die Dosisrate schnell mit der Entfernung abnimmt. Diese Abnahme geschieht zusätzlich zu dem radioaktiven Zerfall.

Ausmaß und Lage der Fallout-Gebiete hängt von den meteorologischen Bedingungen insbesondere von der Windstärke und -richtung sowie vom Niederschlag ab. Werden die Punkte mit den gleichen Dosisraten miteinander verbunden, ergibt sich theoretisch die Form einer Ellipse. Tatsächlich sieht das Bild viel komplexer aus, weil viele Faktoren die Art und Weise der Verteilung beeinflussen. Zunächst kann der Wind in Richtung oder Geschwindigkeit ändern, das wird die Konturlinien verzerren. Dann kann der Fallout von Regen oder Schnee verwaschen werden, wenn in der Luft schwebende Teilchen durch ein Niederschlagsgebiet ziehen; solche Umstände können zur Bildung einer hohen Konzentration, zu einem Hotspot, führen.

Bei einem Atomversuch auf dem Bikini-Atoll wurde eine Bevölkerungsgruppe auf den Marshallinseln nach dem sogenannten Bravo Test am 1. März 1954 unabsichtlich der Strahlung des lokalen Fallouts ausgesetzt. Es war das erste Experiment mit einer großen thermonuklearen Bombe, die Sprengkraft betrug ca. 15 Mt. Die Situation erfolgte etwa zwei Meter über einem Korallenriff im Bikini-Atoll. Die radioaktive Wolke (Atompilz) kam in einem unerwartet langen Streifen in östlicher Richtung auf den Marshallinseln herunter. Einige dieser Inseln waren bewohnt und zusätzlich war dort Personal der US-Streitkräfte stationiert. Zwei Tage nach dem Test wurden die Menschen evakuiert. Zu dem Zeitpunkt hatten einige Personen Dosen bis zu 2 Gy erhalten.

Etwas kleinere Partikel, die durch die nukleare Explosion erzeugt werden, verhalten sich wie Aerosole und werden in der Troposphäre verteilt, wo sie monatelang in der Schwebelage bleiben könnten. Dieser Teil des Fallouts wird oft als globaler oder „später Fallout“ bezeichnet und ist weniger gefährlich als früherer Fallout.

Bei Explosionen in größerer Höhe, bei denen der Atompilz nicht die Erde berührt, gibt es keinen frühen Fallout. Wird eine Bombe weit über der Oberfläche gezündet, steigen die Fissionsprodukte (gasförmig) mit der pilzförmigen Wolke in große Höhen bis in die Stratosphäre auf. Wenn die Temperatur zurückgegangen ist, formen sich feste radioaktive Partikel. Die Teilchen sind sehr klein und fallen allmählich über einem großen Gebiet nieder. Dieser Vorgang wird auch als später und globaler Fallout bezeichnet. Der radioaktive Niederschlag, der später als 24 Stunden nach der Explosion auftritt, wird ebenfalls später Fallout genannt.

Die Aufteilung in frühen und späten Fallout ist bei einer oberflächennahen Explosion ziemlich willkürlich, weil die feinen Partikel auch nach 24 Stunden weiterhin absinken. Bis dahin ist die Aktivität soweit vermindert, dass nur noch 20 Prozent der Dosis übrig ist. Selbst dann können noch beträchtliche Strahlungen von Radionukliden mit mittleren und langen Halbwertszeiten in Entfernungen von Tausenden Kilometern festgestellt werden. Ein großes Risiko des Fallouts geht von Jod 131 aus, dessen Halbwertszeit etwa acht Tage beträgt. Seine Aktivität geht in vier Wochen um ein Zehntel zurück. Am häufigsten gelangt Jod 131 in den menschlichen Körper durch die Milch von Kühen, die auf kontaminierten Weiden grasen. Die Kette Gras – Kuhmilch – Mensch wird sehr schnell durchlaufen.

Die Strahlenbelastung der Bevölkerung kann durch folgende Pfade erfolgen:

- externe Strahlenexposition durch die radioaktive Wolke (Atompilz),
- externe Strahlenexposition durch die radioaktiven Substanzen, die sich auf dem Boden ablagern (Bodenstrahlung),
- interne Strahlenexposition durch Einatmen der radioaktiven Stoffe in der Luft und
- interne Strahlenexposition durch den Verzehr von Lebensmitteln (Ingestion).

Im Falle des lokalen Fallouts stellt die externe Strahlenbelastung die größte Risikoquelle dar.

Wird ein Plutonium- oder Uranatom gespalten, entstehen Spaltprodukte. Es gibt über 300 verschiedene Spaltprodukte, die aus einer Spaltreaktion in der Atomwaffe entstehen können. Die meisten der Fissionsfragmente sind radioaktiv und zerfallen mit charakteristischen Halbwertszeiten zwischen Bruchteilen einer Sekunde und vielen Millionen Jahren. Von einigen dieser Stoffe geht ein größeres Strahlenrisiko aus als von anderen. Im Folgenden sind einige wichtige Spaltprodukte und ihre Wirkung aufgelistet.

- Strontium-90 ist sehr langlebig mit einer Halbwertszeit von 28 Jahren. Es ist Kalzium chemisch ähnlich, wodurch es sich in Knochen anreichert. Diese Strahlung kann Tumore, Leukämie und andere Blutanomalien verursachen.
- Jod 131 hat eine Halbwertszeit von 8,1 Tagen. Bei der Einnahme konzentriert sich das Jod in der Schilddrüse. Die Strahlung kann die Schilddrüse ganz oder teilweise zerstören. Die Einnahme von Kaliumjodid kann die Auswirkungen verringern.
- Die Menge des freigesetzten Tritiums variiert je nach Art der Atomwaffe. Es hat eine Halbwertszeit von 12,3 Jahren und kann leicht vom Körper aufgenommen werden, da es einen Wasserstoff in Wasser ersetzen kann. Die während des Zerfalls ausgesandte Betastrahlung kann Lungenkrebs verursachen.
- Cäsium 137 hat eine Halbwertszeit von 30 Jahren. Es verhält sich ähnlich wie Kalium und verteilt sich ziemlich gleichmäßig im ganzen Körper. Das Nuklid kann zur Bestrahlung der Gonaden und zu genetischen Schäden beitragen.
- Wenn eine Plutoniumwaffe explodiert, wird nicht das gesamte Plutonium gespalten. Plutonium 239 hat eine Halbwertszeit von 24.400 Jahren. Die Verschluckung von nur 1 Mikrogramm Plutonium ist ein ernstes Gesundheitsrisiko, das die Bildung von Knochen- und Lungentumoren verursacht.

3.7 Verteilung und Abnahme des lokalen Fallouts

Der Zerfall jedes der Radionuklide der Spaltprodukte geschieht auf Basis einer exponentiellen Abnahme in Abhängigkeit von der Zeit. Für die gesamte Mischung der Spaltprodukte ist die Veränderung der Aktivität im Laufe der Zeit ein sehr komplexer Vorgang. Obwohl die Reststrahlung bei verschiedenen Bombentypen unterschiedlich ist, ist die Änderung der Dosis mit der Zeit ähnlich. Die folgende Tabelle gibt die durchschnittliche Dosisrate von Gammastrahlern bei dem lokalen Fallout zu verschiedenen Zeiten nach der Explosion an. Die akkumulierte Dosis bewegt sich zu einem Grenzwert.

Der Fallout wird im hohen Maße durch die Bodenbeschaffenheit sowie durch die Art der Bebauung beeinflusst. Aufgrund der wenigen praktischen Erfahrungen sind Voraussagen des Risikos durch den frühen Fallout sehr unzuverlässig. Dennoch ist auch eine schematische Darstellung nützlich, um die möglichen Strahlenrisiken durch Fallout abzuschätzen. Es können große Dosen bis zu akuter tödlicher Wirkung noch in beträchtlicher Entfernung auftreten. Es kann die Entfernung berechnet werden, in der Menschen im Freien eine LD-50 Dosis⁶ erhalten würden. Bei einer 1 Mt Bombe ist dieses eine Entfernung von etwa 125 Kilometer, bei der 10 Mt-Bombe fast 300 Kilometer.

Geeigneter als die Entfernung ist die Angabe des betroffenen Gebietes. Bei einer 1 Mt Bombe ist das Gebiet etwa 1.700 Quadratkilometer groß, bei 10 Mt etwa 21.000 Quadratkilometer. Wenn die Bevölkerungsdichte in einem Fallout-Gebiet bekannt ist, kann die Zahl der Personen berechnet werden, die verschiedener Dosen ausgesetzt sind sowie die möglichen Todesfälle. Bei einer angenommenen Bevölkerungsdichte von hundert Menschen pro Quadratkilometer (Durchschnitt in Europa) würden etwa zwei Millionen Menschen eine Dosis erhalten, an der sie innerhalb weniger Wochen sterben würden, wenn sie im Freien dem Fallout einer einzigen 10 Mt Bombe ausgesetzt wären.

In der Praxis sind die Dosen möglicherweise kleiner: Aufgrund der Verzögerung, mit der der Fallout in Gebieten fern von der Explosion auftritt, haben die Menschen einige Stunden, um das bedrohte Gebiet zu verlassen oder Schutz zu suchen. Was den Schutz betrifft, so kann erwartet werden, dass die Menschen sich mindestens während der ersten Zeit nach dem Bombenabwurf in geschlossenen Räumen aufhalten, das würde aber voraussetzen, dass noch intakte Häuser vorhanden sind. Ein Aufenthalt in Häusern würde die Gammastrahlendosis um einen Faktor 3 - 5 reduzieren.⁷

3.8 Unterschied eines Reaktor-Unfall und eines Atombombenabwurfs

Für jede Kilotonne (kt) Explosionskraft einer Atombombe ist die gesamte Aktivität der Gammastrahlung etwa $2 \cdot 10^{19}$ Bq eine Stunde nach der Explosion. Diese Aktivität nimmt mit der Zeit schnell ab. Die Einheit der Aktivität ist das Becquerel (Bq), das entspricht der Anzahl der Zerfälle pro Sekunde.

In dem Reaktorkern eines Atomkraftwerks ist der Anteil von Spaltprodukten mit langen Halbwertszeiten größer als nach einer Atombombenexplosion. Daher nimmt die Kontamination nach einem Reaktorunfall viel langsamer ab als nach einer Atomwaffenexplosion.

Ein Vergleich der Abnahme der Aktivität einer Explosion von einer 1 Mt Bombe und eines schweren Unfalls in einem Leichtwasserreaktor mit einer Leistung von 1 GW zeigt, dass die Gesamtaktivität im Reaktor anfangs etwa hundertmal kleiner ist als die Aktivität der Bombe. Sie ist aber bereits nach etwa vier Tagen gleich groß und danach übertrifft die Aktivität des Reaktorunfalls die Aktivität der Bombenexplosion. Der Unterschied wird immer größer: So ist zum Beispiel die Aktivität nach einem Jahr immer noch so hoch wie sie bei einer Bombe nach einem Monat war. Nach einem Jahr ist die noch vorhandene

⁶ LD-50: Letale (tödliche) Dosis für 50 Prozent der Menschen einer Bevölkerungsgruppe

⁷ Langfristig kann eine weitere Verminderung der Dosis durch Witterungseinflüsse, das heißt die Verlagerung in den Boden durch Wirkung von Regen und Wind, auftreten. Eine gewisse Reduktion könnte durch gezielte Dekontaminationsmaßnahmen erzielt werden, das heißt durch Abwaschen von Oberflächen und Abtragen der obersten Erdschicht.

Aktivität der Kontamination durch einen Reaktorunfall noch etwa 50-mal höher als die Aktivität der Kontamination ein Jahr nach einer Atomwaffenexplosion.

3.9 Schutz vor Strahlung

Die **Gebäude** bieten je nach Bauart und Standort unterschiedliche Schutz vor Strahlung. Durch Explosionsschäden werden die Schutzfaktoren durch das Zerstören von Türen, den Verlust der Dachintegrität und das Zerschlagen von Fenstern stark reduziert. In Hiroshima zerbrachen Fenster durch Überdruck in einem Radius von 15 km und in Ausnahmefällen bis zu 27 km Entfernung. Durch Extrapolation der Zahlen aus Hiroshima ist zu erwarten, dass die Fenster in einem Radius von bis zu 17,5 km bei der 20 kt und 53 km bei der 550 kt Bombe zerbrechen können. Forschungen haben zudem gezeigt, dass selbst guterhaltene Gebäude keine gute Filterung von radioaktiven Partikeln im Bereich von 1-10 µm bieten, bei denen die größte Gesundheitsgefahr besteht, da diese Partikel lungengängig sind.

Die höchsten Strahlungsbelastungen treten in der Regel auf, wenn Menschen sich im Freien aufhalten. Es ist zu erwarten, dass viele Menschen aufgrund mangelnder Informationen versuchen werden, mit dem Auto oder zu Fuß zu fliehen, oft in die falsche Richtung, und sich dabei hohen Strahlungen aussetzen, da Fahrzeuge praktisch keinen Schutz bieten. Aufgrund von Erfahrungen aus den Naturkatastrophen in den USA ist es wahrscheinlich, dass die Hauptaussgangsstraßen nach einem nuklearen Ereignis in der Zeit, in der die Falloutstrahlung am stärksten ist, völlig unpassierbar sind und die fliehende Bevölkerung im Stau hohen Fallout-Strahlung ausgesetzt ist.

4 Biologische Wirkung von Strahlung auf Menschen

Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Strahlendosis und ihrer Wirkung auf den Körper. Die Strahlendosis kann sich als eine vom Körper absorbierte Energiemenge vorgestellt werden. Das Gray (Gy) ist die Einheit der absorbierten Strahlendosis, die als die tatsächlich im Gewebe deponierte Energie definiert ist. Ein Gy ist die absorbierte Energie von 1 Joule pro Kilogramm Gewebe. Um das Strahlenrisiko genau zu beurteilen, wird die Energie der Dosis mit der relativen biologischen Wirksamkeit (RBW) der Strahlung multipliziert, um die biologische Äquivalentdosis zu erhalten. Die RBW ist ein „Qualitätsfaktor“, der oft mit dem Buchstaben Q bezeichnet wird und den durch eine bestimmte Art und Energie der Strahlung verursachten Gewebeschaden bewertet. Bei Alphateilchen kann Q bis zu 20 betragen, so dass ein Gy Alphastrahlung 20 Sievert (Sv) entspricht. Die Q von Neutronenstrahlung hängt von ihrer Energie ab. Bei Beta-, Röntgen- und Gammastrahlen ist $Q=1$, das heißt 1 Sv entspricht einem Gy.

Es ist eine allgemein akzeptierte Tatsache, dass jede ionisierende Strahlung schädliche Folgen haben kann. Die Art und Schwere der Auswirkung und der Zeitpunkt ihres Auftretens sind aber sehr unterschiedlich. Bei hohen Dosen, die zum Tode führen sind die Symptome schon kurz nach der Strahleneinwirkung festzustellen. Diese akuten Wirkungen (deterministische Strahleneffekte) müssen von den Langzeitfolgen (stochastische Strahleneffekte) unterschieden werden.

4.1 Akute Strahlenfolge (deterministische Strahlenwirkung)

Die Symptome akuter Einwirkungen zeigen sich kurz nach dem Strahleneinfluss innerhalb von Stunden oder sogar innerhalb von Minuten.⁸ Die ersten Symptome sind Appetitlosigkeit, Übelkeit und Kopfschmerzen. Mit Erhöhung der Dose steigt auch die Sterblichkeit und erreicht 100 Prozent bei Dosen von

⁸ Todesfälle können allerdings auch erst später auftreten. Innerhalb von zwei Monaten werden sie noch zu den akuten Schäden gezählt. Nach Ablauf dieses Zeitraums beginnen Todesfälle durch Langzeitfolge.

ca. 5 Gy. Gesunde Erwachsene können etwas höhere Strahlendosen überleben, wenn sie eine medizinische Behandlung erhalten. Der Tod bei Dosen von 1–5 Gy tritt hauptsächlich durch Schädigung der blutbildenden Organe ein. Höhere Dosen als 5 Gy sind tödlich, wobei der Tod infolge von Störungen des Magen-Darmtrakts und bei noch höheren Dosen durch Schädigung des Zentralnervensystems eintritt.

Gleich nach der Einwirkung der Strahlung beginnt der betroffene Mensch Symptome akuter gastrointestinaler und neuromuskulärer Schädigung zu zeigen. Die gastrointestinalen Symptome sind Appetitlosigkeit, Übelkeit, Erbrechen, Durchfall, Darmkämpfe, Speichelfluss, Flüssigkeits- und Gewichtsverlust. Zu den neuromuskulären Symptomen gehören Müdigkeit, Apathie, Schweißausbrüche, Fieber, Kopfschmerzen sowie Blutdruckabfall und dadurch ausgelöster Schock.

Die tödliche Wirkung geht hauptsächlich von der Zerstörung der Zellen des menschlichen Körpers aus. Bei hohen Dosen reicht die Energie aus, um die Zellen vollständig zu zerstören. Kleinere Dosierung können die Mitose schädigen, das heißt die Fähigkeit der Zellen, sich zu teilen. Für die richtige Funktion eines Organismus ist es lebenswichtig, dass bestimmte Zellen, die fortlaufend absterben, mittels Zellteilung ersetzt werden. Wenn aber nach der Strahlung zu wenige teilungsfähige Zellen verbleiben, kann der Organismus nicht arbeiten und der Tod tritt ein. Die schwerwiegendste Folge der Strahlung auf die Zellen macht sich im Knochenmark bemerkbar. Knochenmarkstammzellen und Lymphozyten gehören zu den strahlenempfindlichsten Teilen des menschlichen Körpers. Die vielleicht augenfälligste Veränderung durch Strahlung ist die Abnahme der weißen Blutkörperchen. Der Zweck dieser Zellen ist es, Entzündung zu bekämpfen und Giftstoffe aus dem Körper zu entfernen.

Die Wirkung der Strahlung einer gegebenen Dosis in der Größenordnung von 1–5 Gy ist bei Menschen unterschiedlich. Einige Menschen sterben, andere Menschen überleben. Die Zellen zeigen eine offensichtliche Erholung, die Gefahr von Langzeitschäden ist allerdings vorhanden. In vielen Fällen wird die Gesundung lange dauern und möglicherweise von Krankheiten wie Entzündung der Bauchspeicheldrüse oder Leberfunktionsstörungen begleitet sein.

Zur Angabe der Überlebenswahrscheinlichkeit werden statistische Angaben benötigt, es stehen aber wenige Zahlen zur Verfügung. In der folgenden Abbildung ist der Prozentsatz von Menschen aus einer großen Zahl strahlungsbetroffener Menschen dargestellt, die wahrscheinlich infolge einer bestimmten Dosis sterben. Die Dosis, die einer 50-prozentigen Wahrscheinlichkeit des Überlebens (LD-50) entspricht, liegt bei etwa 2,5 Gy. Bemerkenswert ist, wie steil die Kurve innerhalb eines geringen Wertebereichs ansteigt. Bei Dosen zwischen 0,9 und 4 Gy steigt die Sterblichkeitsrate von 10 auf 90 Prozent.

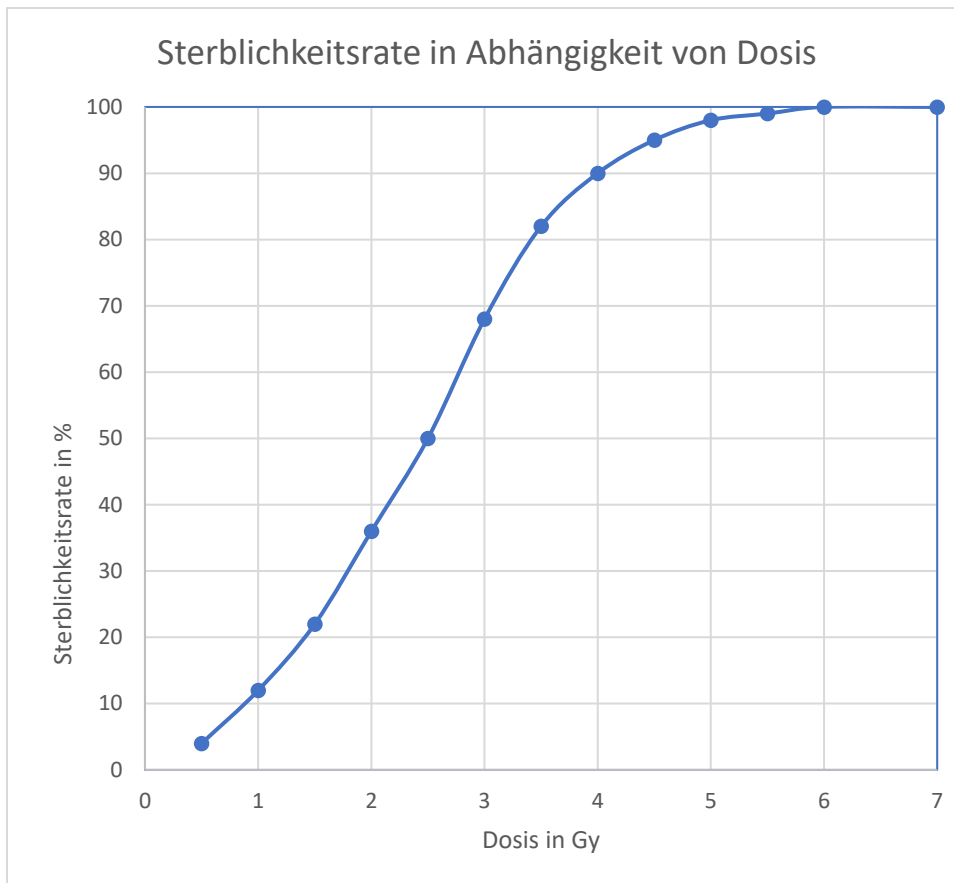


Abbildung 3: Sterblichkeitsrate in Abhängigkeit von der Dosis

Bei Dosen von 5–20 Gy tritt der Tod frühzeitig als Folge von Veränderung des Verdauungsapparates ein. Minuten nach Erhalt der Strahlung wird die Zellbildung der inneren Darmzellen herabgesetzt. Es entsteht hohes Fieber und anhaltender Durchfall. Unter Anschwellen des Abdomens fällt der Mensch ins Koma. Der Tod tritt durch Darmentzündung, Vergiftung und Veränderung von Körperflüssigkeiten ein. Die Heilungschancen bei Dosen dieser Stärke sind minimal. Bei Dosierung über 20 Gy stirbt die betroffene Person sofort an pathologischen Veränderungen des Nervensystems. Personen, die einer solchen Strahlung ausgesetzt sind, werden sofort desorientiert und handlungsunfähig.

Das Lebensalter hat einen Einfluss auf die potenziellen Strahlenfolgen. Eine sehr hohe Strahlenempfindlichkeit haben Embryos. Kinder sind am empfindlichsten; mit zunehmendem Alter nimmt die Empfindlichkeit zunächst ab, erreicht ein Minimum bei jungen Erwachsenen und steigt dann bei älteren Menschen langsam wieder an. Das Risiko für das Entstehen von Krebs ist bei einigen Krebsarten geschlechtsabhängig. Frauen sind aufgrund der häufigeren Zellteilung während ihren fruchtbaren Jahren anfälliger.

Es gibt auch weitere, nicht tödliche Strahlenwirkungen, wie Haarausfall und, insbesondere bei Frauen, eine vorübergehende oder dauerhafte Unfruchtbarkeit.⁶

4.2 Langzeitfolgen (stochastische Strahlenwirkung)

Hat die erhaltene Dosis keine tödlichen Folgen, können aber Langzeitfolgen auftreten. Die Langzeitfolgen sind in zwei Kategorien zu unterteilen: Somatische Schäden sind solche Schäden, die der betroffene Mensch selbst erleidet, meist erst viele Jahre nach Erhalt der Strahlung. Genetische Folgen entstehen erst in den Kindern und Kindeskindern der bestrahlten Person und können sich in verschiedenen Formen manifestieren, die als Erbschäden bezeichnet werden.

Für die sogenannte stochastische Strahlenwirkung gilt, dass in einer von Strahlung betroffenen Gruppe mit der Dosis die Häufigkeit, aber nicht die Schwere der Folgen steigt. Mit Abstand der wichtigste der stochastischen Effekte ist die Auslösung einer Krebserkrankung durch Strahlung. Die wissenschaftliche Meinung geht heutzutage davon aus, dass es keinen Schwellenwert gibt, sondern dass selbst die kleinste Strahlendosis zu einer geringen, aber spürbaren Zunahme von Krebserkrankung in der strahlenexponierten Bevölkerungsgruppe führen kann. Jedoch ist die Einschätzung über das Ausmaß der kreberzeugenden Wirkung von kleinen Dosen sehr unterschiedlich.

Eine quantitative Erfassung der stochastischen Wirkung ist nicht einfach, da sich nicht erkennen lässt, ob sich ein Tumor aufgrund ionisierender Strahlung oder aus einem anderen Grund entwickelt hat. Daher wird mithilfe epidemiologischer Untersuchungen von größeren Populationen, die strahlenexponiert wurden (Atombombenopfer von Hiroshima und Nagasaki), die Zahl von Krebstodesfällen ermittelt, die die Zahl auch ohne zusätzliche Dosis auftretender Krebstodesfälle übersteigt. Diese Zahl kann in Beziehung gesetzt werden zu der Dosis einer vorausgegangenen Strahlenexposition. Aus beiden Daten lässt sich das Strahlenrisiko als Eintrittswahrscheinlichkeit pro Doseinheit mathematisch-statistisch ausdrücken. Die so berechneten Risikofaktoren stellen keine unveränderliche Größe dar. Veränderungen in der Datenbasis können eine Änderung des berechneten Risikos bewirken.⁹

International anerkannt ist zurzeit ein numerisches individuelles tödliches Krebsrisiko nach der International Commission on Radiological Protection (ICRP) aus dem Jahr 2007. Andere Untersuchungen zur Strahleninduzierung von Krebs haben teils auch höhere Risiken ergeben. Es hat sich auch gezeigt, dass dieses Modell die Strahlenempfindlichkeiten der verschiedenen Altersgruppen nicht berücksichtigt.

Laut ICRP würde bei Erhalt einer Dosis von 1 Sievert (Sv) 5,5 Prozent der Bevölkerung einen strahlenbedingten Krebstod oder eine gleichgewichtig schwere Krebserkrankung, die nicht zum Tode führt, erleiden. Das abgeleitete Risiko ist ein Mittelwert für eine Bevölkerung unterschiedlichen Alters.

Das absolute Strahlenrisiko von Kindern wird in ICRP (2007) höher eingeschätzt als das der Gesamtbevölkerung, es soll im frühen Kindesalter höchstens dreifach höher liegen. Dieses ergäbe ein Lebenszeitrisiko für Krebserkrankungen für Kleinkinder von maximal 16,5 Prozent pro Sv.

Eine sehr viel größere relative Strahlenempfindlichkeit als bisher angenommen zeigt sich in zwei großen aktuellen Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Krebsinzidenz bei Kindern und Hintergrundstrahlung aus Großbritannien und der Schweiz.

Es ist heute anerkannter Erkenntnisstand, dass **vorgeburtliche Exposition** durch diagnostisches Röntgen Leukämie und andere Krebserkrankungen auslöst. Aus der Strahlenforschung ist auch bekannt, dass zwei weitere Klassen von Schädigungen zu erwarten sind: a) das vorzeitige Absterben der Frucht in utero und eine Erhöhung der perinatalen Sterblichkeit, b) Missbildungen von Organen oder des Körperbaus und fehlerhafte Organfunktion. Die Effekte sind stark vom Entwicklungsstadium bei Exposition abhängig.

Für **genetische Strahlenschäden** gibt es keine gesicherten, am Menschen gewonnenen Erkenntnisse. In Hiroshima und Nagasaki konnte bisher bei Nachkommen der bestrahlten Atombomben-Überlebenden keine erhöhte Rate von vererbten Erkrankungen im Vergleich zur übrigen japanischen Bevölkerung festgestellt werden. Laut ICRP ist bei einer Dosis von 1 Sv rechnerisch zu erwarten, dass 0,2 Prozent der Nachkommen in der ersten Generation einen strahlenbedingten Erbschaden erleiden.

⁹ Bemerkenswert ist wie sich der Risikofaktor verändert hat: Während 1977 (ICRP 26) das Risiko an Krebs zu sterben mit 1% pro Sievert angegeben wurde, hat sich die Einschätzung dieses Risikos 14 Jahre später verfünffacht. In ICRP 60 von 1991 wird von einem Risiko einer tödlichen Krebserkrankung in Höhe von 5 % pro Sievert der erhaltenden Strahlendosis ausgegangen.

Aufgrund von Forschungsergebnissen aus Tierversuchen und Beobachtungen beim Menschen muss mit folgenden Erbschäden bei den Nachkommen bestrahlter Eltern durch ionisierende Strahlung gerechnet werden:

- 1) schwerwiegende Entwicklungsstörungen (Aborte, geringes Geburtsgewicht, perinatale Sterblichkeit, früher Kindstod, Fehlbildungen, Unfruchtbarkeit, durch Chromosomen- oder Genanomalien bedingte Krankheiten wie Downsyndrom);
- 2) Krebs im Kindes- oder Erwachsenenalter und
- 3) Immunschwäche und multiple Degenerationserscheinungen.

Der Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland fordert daher, dass als oberstes Schutzziel im Strahlenschutz die Unversehrtheit von Ungeborenen, Nachkommen, und Kindern angesehen werden muss.⁷

4.3 Probleme der medizinischen Versorgung

Eine Gruppe von Ärzt*innen und medizinischen Wissenschaftler*innen aus 14 Ländern veröffentlichte folgende Warnung:

Nach einer Atomwaffenexplosion wird es wahrscheinlich viele Menschen mit Verletzungen geben, die ärztliche Behandlung benötigen. Es gibt voraussichtlich Hunderttausende mit schweren Brandwunden, Traumaverletzungen und Strahlenkrankheit, die alle intensiver Behandlung benötigen. Selbst wenn alle medizinischen Einrichtung intakt wären, wäre die Behandlung aller unmittelbar Überlebenden nahezu unmöglich. Im Ernstfall wären die meisten Krankenhäuser zerstört, medizinisches Personal wäre unter den Toten und Verwundeten und die meisten Transport-, Kommunikation- und Energie-Systeme würden außer Betrieb sein. Viele Arzneimittel werden wegen des Ausfalls der Kühlung unbrauchbar. Wenn keine medizinische Behandlung möglich ist, wird die Mehrzahl der zunächst Überlebenden später doch sterben.

Medizinische Probleme, die in normalen Zeiten geringfügig wären, wie einfache Infektionen, Knochenbrüche, wären für viele Menschen tödlich. Zahlreiche Todesfälle gäbe es auch durch die vielfache Kombination von Verletzungen, die harmlos wären, wenn jede einzeln auftrate. Außerdem steigt unter den Bedingungen des Chaos die Zahl der physischen Erkrankungen steil an. Das Risiko von Langzeitfolgen, wie zum Beispiel Krebs, wäre bei vielen Überlebenden erhöht und möglicherweise auch für ihre Nachkommen. Daher ziehen wir daher den Schluss, dass Atomwaffen so verheerend für die menschliche Gesundheit und das Leben sind, dass sie niemals eingesetzt werden dürfen. Das Verhindern eines Atomkriegs ist die einzige Möglichkeit die Menschen vor den Folgen eines Atomkrieges zu bewahren.

5 Auswirkungen einer Atomwaffenexplosion in den USA

Um die Auswirkungen einer Atomwaffenexplosion in einem großen städtischen Gebiet auf die Zivilbevölkerung abzuschätzen, wurde in den USA eine umfassende Studie⁸ durchgeführt. Vier der zehn größten Städte (New York City, Chicago, Washington D.C. und Atlanta) wurden für diese Studie ausgewählt. Für die Simulation wurden zwei Größen von Atomwaffen verwendet. Die Explosion einer taktischen Atomwaffe mit einer Sprengkraft von 20 Kilotonnen (kt) und die Explosion einer gängigen strategischen Waffe im russischen Arsenal mit einer Sprengkraft von 550 kt. Bei beiden Waffen wurde angenommen, dass sie in der Nähe der Bodenoberfläche explodieren, wie in einem Lastwagen oder einem Schiff.¹⁰

¹⁰ Explosionen in größerer Höhe würden größere thermische und Explosions-Effekte verursachen, die durch geringere Strahlungseffekten in Windrichtung etwas ausgeglichen würden.

Die Berechnungen der betroffenen Bevölkerung basieren auf nächtlichen Bevölkerungsdaten. In den Innenstädten wären die Tagesbevölkerungen und damit auch die Zahl der Opfer höher. Die Gesamtbevölkerung in Manhattan z. B. beträgt nachts etwa 1,5 Millionen und steigt während eines typischen Tages auf 2,1 Millionen an. Zu dieser Zahl kommen Besucher für besondere Veranstaltungen und Touristen hinzu.

Es wurde das CATS-JACE-Modell zur Simulation der Auswirkung des radioaktiven Fallouts der Atomexplosion verwendet. Bei allen derartigen Modellen gibt es viele Unsicherheiten bei den verwendeten Parametern, die sich auf die Genauigkeit der Vorhersagen auswirken.

Im Folgenden werden einige Ergebnisse der Studie dargestellt.

5.1 Explosionsschäden, thermische Auswirkungen und Sofortstrahlung

Die meisten Schäden an Gebäuden in Städten entstehen durch Explosionen. In der Regel überlebt nur etwa die Hälfte der Menschen in niedrigen Gebäuden den Einsturz. Ein erheblicher Faktor der Explosionsschäden in Washington ist die extrem hohe Konzentration von Regierungsgebäuden innerhalb der Explosionszonen. Die Explosion einer Atomwaffe neben einer großen Wasserfläche, wie z.B. in Chicago am Lake Michigan, bewirkt, dass ein großer Teil der Energie über das Wasser abgeleitet wird und dadurch die Explosionsschäden und die thermischen Auswirkungen geringer ausfallen. Bedeutende gesundheitliche Auswirkungen der Sofortstrahlung erstrecken sich auf etwa zwei Kilometer bei der 20-kt-Bombe und auf drei bis vier Kilometer bei der 550-kt-Bombe.

5.2 Fallout-Gebiete und Opfer von Fallout

Für New York führt die vorherrschende Windrichtung von West nach Ost zu einer Ausdehnung der Fallout-Gebiete über die Länge von Long Island nach der Detonation einer 550-kt Atombombe in Manhattan. Dies könnte zu mehr als fünf Millionen Todesfällen im Bereich der Fallout-Gebiete mit einer Sterblichkeitsrate von mehr als 90 Prozent führen, die sich von Brooklyn bis fast zur Hälfte der Länge von Long Island erstrecken würde. Dieses Szenario hat erhebliche negative Auswirkungen auf die Gesundheitssysteme, die gleichmäßig über die gesamte Länge der Insel verteilt sind.

Selbst bei Detonation der kleineren 20-kt-Bombe in New York führen Winde, die vom Ozean ins Landesinnere kommen, zu einem Verlust der meisten Einrichtungen des Gesundheitssystems zwischen dem Osten und dem Hudson River. Ein bemerkenswertes Muster zeigt sich in diesen abgestuften Sterblichkeitsgebieten der 20-kt-Bombe. Die Zahl der Opfer in den Fallout-Gebieten mit einer Sterblichkeitsrate von 50 bis 90 Prozent ist erheblich geringer als in den Gebieten mit einer Sterblichkeitsrate von zehn bis 50 Prozent. Bei der 20-kt-Bombe für New York liegen diese Sterblichkeitszahlen bei einem ungefähren Verhältnis von 1:2. Auch für Atlanta war das gleiche Muster zu erkennen, nur dass der Unterschied mit fast 1:4 noch größer war. Diese höhere Anzahl von Todesfällen in den Gebieten mit einem geringeren Prozentsatz der Sterblichkeit ist auf die deutlich größere Fläche zurückzuführen. Offenbar nehmen die sehr hohen Ablagerungsraten von radioaktiven Partikeln, die in den ersten Kilometern nach der Detonation auftreten, mit der Windausbreitung rasch ab, wobei die breiteren Ausbreitungsgebiete bei den niedrigeren Kontamination ausreichen, um eine bemerkenswert hohe Sterblichkeitsrate zu verursachen.

Nicht alle Fallout-Gebiete werden symmetrische Ellipsen sein, wie die Simulation für Chicago zeigt. Das Wettergeschehen an diesem Tag führt zu einer breiteren, herzförmigen Wolke.

5.3 Auswirkungen einer 550 kt Bombe

Die Auswirkung einer 550-kt-Bombe unterscheidet sich stark von den Auswirkungen einer 20-kt-Bombe, da der thermische Effekt im Verhältnis zu den Explosionseffekten stark zunimmt. In den

ersten 1800 Meter Entfernung werden die Überdrücke 138 kPa überschreiten und selbst die größten und stabilsten Strukturen zerstören. In 2200 Meter Entfernung wird der Überdruck über 83 kPa liegen und dadurch würden fast alle Gebäude zerstört werden. Die hohe Explosionswirkung, die hohe Dosisleistung und die Hitzestrahlung bedeuten, dass es praktisch keine langfristigen Überlebenden aus diesem Bereich geben wird. Verbrennungen dritten Grades treten bis 7,3 Kilometer, zweiten Grades bis 8,7 Kilometer auf und ersten Grades bis etwa zwölf Kilometer auf; Glasbruch erstreckt sich bis fast 20 Kilometer.

Ein großes Gebiet ist sowohl von der Explosion als auch von den Hitzestrahlung betroffen. Simulationen sagen in diesem Gebiet Flächenbrände voraus. Für alle vier Städte erzeugt das Modell bei einer 550-kt-Bombe ein nahezu gleiches Gebiet für diese zentrale Brandzone. Es ist zu erwarten, dass die Brandverletzungen zu einer praktisch vollständigen Sterblichkeit führen wird. Die Menschen, die die Explosionsverletzung überlebt haben, würden stattdessen durch die Brände getötet werden. Insgesamt ist die Gesamtzahl der von Brandverletzungen betroffenen Bevölkerung für alle vier Städte um 30 Prozent höher als die Zahl der Verletzten durch die Explosion.

5.4 Auswirkungen einer 20 kt Atombombe

In den ersten 750 Metern werden praktisch alle Gebäude durch die Explosion zerstört, Flächenbrände sind häufig und die Sofortstrahlung ist außer in gut geschützten Kellern oder der U-Bahn tödlich, was zu sehr wenigen Überlebenden führt. Zwischen 750 und 1250 Metern sinkt der maximale Überdruck von 83 auf 34 kPa, bei diesem Druck werden die Wände aus den Gebäuden herausgesprengt. Ungefähr die Hälfte der Bevölkerung in diesem Gebiet würde getötet, hauptsächlich durch einstürzende Gebäude. Die meisten der Überlebenden werden einer tödlichen Dosis durch Sofortstrahlung ausgesetzt sein, jedoch würde der Tod zuvor durch Brände oder Verbrennungen dritten Grades eintreten.

In der inneren Brandzone (1500 Meter) werden 15 Prozent der betroffenen Bevölkerung, die sich im Freien oder in der Nähe von Fenstern befinden, an Verbrennungen zweiten oder dritten Grades, gefolgt von einem Schock sterben; auf weitere 40 Prozent der Menschen werden Gebäude oder Mauern stürzen und sie werden so durch Trauma-Verletzungen getötet. Mindestens 15 Prozent der Menschen erhalten eine tödliche Dosis durch die Sofortstrahlung, und 10 Prozent der Menschen sterben, weil sie einer sehr hohen Fallout-Strahlung ausgesetzt sind. Von den verbleibenden 20 Prozent der Menschen wird etwa ein Drittel 5 Sv erhalten haben, die sich in dieser Umgebung als tödlich erweisen wird. Ein weiteres Drittel wird etwa 3 Sv erhalten haben, was sich für fünf bis zehn Prozent von ihnen nach 60 Tagen als tödlich erweisen wird. Am Ende wird es möglicherweise nur eine Überlebensrate von 10 Prozent in der inneren Brandzone geben.

Von 1500 Metern auf 2000 Meter Entfernung vom Explosionspunkt verbessern sich die Überlebenschancen schnell. Die Dosis durch Sofortstrahlung fällt steil von 10 Sv in 1600 m auf 4 Sv in 1700 m ab und beträgt in 2000 Meter nur noch 0,8 Sv. Viele der Menschen in dem Fallout-Gebiet werden tödlichen Dosen ausgesetzt sein, nur diejenigen, die sich in Gebäuden mit ausreichendem Schutzfaktor befinden, sind vor Strahlung geschützt. Die Sterblichkeitsrate der Menschen im Fallout-Gebiet wird dennoch hoch sein, da diese Menschen sehr hohen Dosisraten ausgesetzt sind und zusätzlich Kombinationen aus Explosions- und Brandverletzungen aufweisen.

Die meisten Todesfälle jenseits von 2000 Metern werden durch die Fallout-Strahlung resultieren, wo die Strahlungsbelastung selbst mit Schutz im tödlichen Bereich bleibt (24 Sv im Freien in 3800 m). In einer Entfernung von bis zu 3800 Metern sind Menschen durch herumfliegendes Glas und Trümmer von beschädigten Strukturen gefährdet. Glas zerbricht bis in eine Entfernung von mehr als sechs Kilometer, wodurch die Menschen auch in Gebäuden in dem Fallout-Gebiet einer höheren Strahlung ausgesetzt werden.

5.5 Kombinationen von Verletzungen und fehlende medizinische Versorgung

Aufgrund der Kombination von Verletzungsarten können die Todesraten weit über das hinausgehen, was für eine der Verletzungen allein erwartet wird. Die Opfer können sich nicht bewegen und könnten vom Feuer getötet werden oder sterben aufgrund fehlender medizinischer Versorgung. Andere sterben aufgrund des Versagens der wichtigsten Strom- und Wasserversorgung und der schlechten sanitären Einrichtungen. Fehlende sofortige (zwölf Stunden) oder mittelfristige (48 Stunden) medizinische Versorgung führt oft dazu, dass der Körper in einen Schockzustand gerät oder einer Infektion erliegt, was nicht geschehen wäre, wenn eine medizinische Grundversorgung zur Verfügung gestanden hätte.

Der landesweite Trend, die Mehrheit der großen städtischen Gesundheitseinrichtungen in den Innenstädten anzusiedeln, würde zu einem Verlust der gesamten institutionellen Gesundheitsversorgung nach dem Einsatz von Atomwaffen führen. Diese Ergebnisse sind angesichts der sehr unterschiedlichen geographischen und demographischen Landschaften dieser vier Städte auffallend ähnlich. Der Verlust von mindestens der Hälfte des medizinischen Personals in der ersten Minute des Anschlags ist umso dramatischer, als viele der Brand- und Traumaverletzungen eine sofortige Versorgung erfordern und nicht auf medizinisches Ersatzpersonal warten können.

Der Einsatz einer Atomwaffe würde sehr viele Brandopfer verursachen – eine große medizinische Herausforderung. Die Krankenhäuser in den USA haben nur sehr wenige Betten für Verbrennungsoffer (< 1500) und nur wenige (< 150) werden nicht bereits belegt sein. Selbst ein kleines nukleares Ereignis wird die Kapazität der Krankenhäuser völlig überfordern. Ein weiteres besonders gefährliches Defizit der medizinischen Versorgung ist der Mangel an Ausrüstung für die Beatmung. In einer Krise, in der Zehntausende von Opfern ein Beatmungsgerät benötigen, besteht die Gefahr, dass die meisten der kritischeren Fälle umkommen.

6 Berechnungen der Auswirkungen in Deutschland

Im Folgenden werden die Auswirkungen einer Atombombenexplosion in Deutschland abgeschätzt. Dazu werden exemplarisch drei Szenarien untersucht: In Anlehnung an die in Kapitel 6 dargestellte Studie aus den USA, wird angenommen, dass eine 20 kt Atombombe oder eine 550 kt Atombombe explodiert. Zusätzlich wird die mögliche Auswirkung einer 170 kt Atombombe in Büchel betrachtet. Diese Atombomben sind dort gelagert.

Im Folgenden werden die Auswirkung in Berlin, Frankfurt und Büchel dargestellt, dabei werden die Simulationen des Programms NUKEMAP verwendet.¹¹

Vorab muss betont werden, dass die Abschätzungen bezüglich der möglichen Todesfälle auf einer Reihe von Annahmen beruhen. Die möglichen Todesfälle sind beispielsweise stark davon abhängig, ob sich die Menschen bei Explosion der Waffe aufgrund der Tages- und Jahreszeit eher im Freien oder in geschlossenen Räumen aufhalten. Die Ausbreitung der Falloutstrahlung ist zudem stark wetterabhängig. Zielsetzung bei der Ermittlung der Todesfälle war es mittlere Werte abzuschätzen. Insofern können die Anzahl der Todesfälle auch deutlich über den im Folgenden angegebenen Zahlen liegen.

6.1 Verwendetes Programm (NUKEMAP)

NUKEMAP wurde von 2012 bis 2020 von Alex Wellerstein entwickelt.¹² Das NUKEMAP-Fallout-Modell ist ein Skalierungsmodell.¹³ Es gibt zwei grundsätzliche Ansätze zur Modellierung des Fallouts. Der eine Ansatz besteht darin, zu versuchen, den Fallout auf der Grundlage der Wetterbedingungen zu modellieren. Dieses Vorgehen ist komplex und rechenintensiv, liefert aber Ergebnisse, die sich sehr gut

¹¹ <https://nuclearsecrecy.com/nukemap>

¹² Alex Wellerstein ist ein Atomwaffenhistoriker. Er begann 2014 als Assistenzprofessor für Wissenschafts- und Technologiestudien am Stevens Institute of Technology in Hoboken, New Jersey, zu arbeiten.

¹³ Dieses Modell ist ausschließlich für die Modellierung einer oberflächennahen Explosion entwickelt; für eine Explosion in großer Höhe („Airburst“) kann es nicht verwendet werden.

mit früheren Atomwaffentests decken. Der andere Ansatz sind sogenannte Skalierungsmodelle, die versuchen, eine allgemeine Vorstellung von den radioaktiven Belastungen zu ermitteln.

Die Skalierungsmodelle haben Vorteile. Zum einen sind sie rechnerisch sehr einfach: Es sind keine detaillierten meteorologischen Daten über den Ort der Detonation erforderlich. Zum anderen ist ihr abschätzender Charakter offensichtlich. Sie vermitteln keine Scheingenauigkeit, sondern sind als grobe Anhaltspunkte für die potenziellen Belastungen zu verstehen.

Das in NUKEMAP verwendete Skalierungsmodell basiert auf dem „Simplified Fallout Scaling System“ (SFSS) von Carl F. Miller, das dieser in den 1960er Jahren auf Grundlage von Informationen aus atmosphärischen Atomtests der USA entwickelte.⁹ Alex Wellerstein implementierte das SFSS in Javascript und Google Maps. Das Miller-Fallout-Modell geht von der Annahme aus, dass die Fallout-Gebiete sowohl von der Wolke als auch vom Stengel herrühren. Im Grunde genommen ähnelt seine längliche Form einer Art Pilzwolke, die auf ihren Stiel gelegt und ausgeschmiert wird.

Die Skalierungsmodelle sind H+1-Modelle. Das bedeutet, dass der Fallout so „normalisiert“ wurde, wie er nach einer Stunde aussehen würde, unter der Annahme, dass seine maximale Zeit bis zur endgültigen Größe eine Stunde beträgt. Dies ist durchaus üblich, obwohl die Ankunftszeit bei großen Waffenstärken viel länger als eine Stunde ist. Das H+1-Stunden-Modell stimmt relativ gut mit den endgültigen Konturen der Gesamtdosis für die Fallout-Gebiete überein.

Das Unfallmodell NUKEMAP berechnet Verletzte und Todesfälle. Es fragt dazu in einer großen Datenbank die Zahl der Umgebungsbevölkerung (LandScan Global Population 2011) ab. Die Datenbank wurde vom Oak Ridge National Laboratory entwickelt. Unter „Umgebungsbevölkerung“ ist ein 24-Stunden-Durchschnitt der Anzahl von Menschen in einem Gebiet zu verstehen. Diese Zahl ist zutreffender als die Verwendung von Bevölkerungsdaten, denn damit wird normalerweise nur gemessen, wo die Menschen leben, im Gegensatz zu dem Ort, an dem sie sich aufhalten.

Die Berechnung von Verletzungen und Todesfällen beruht in erster Linie auf der Explosionswirkung. Dieses Vorgehen hat seine Grenzen: Bei einigen Waffenstärken, insbesondere bei sehr niedrigen oder sehr hohen Stärken, sind Explosionseffekte weniger wichtig als Hitze- oder Strahlungseffekte. Das Modell berücksichtigt auch nicht die Tatsache, dass hoch verdichtete städtische Gebiete eine Abschirmwirkung gegen die Explosionswirkung haben. Die Zahlen könnten also zu hoch sein. Sie könnten auch zu niedrig sein.¹⁴

Das NUKEMAP-Fallout-Modell bietet auch die Möglichkeit, einen Punkt am Boden auszuwählen und für diesen auf der Grundlage der Windgeschwindigkeit, der Expositionszeit und des potenziellen Schutzes Informationen zu erhalten, welche radiologischen Auswirkungen zu erwarten sind. Diese Vorgehensweise wird im Weiteren verwendet, um die zeitabhängigen Belastungen in einem bestimmten Punkt zu ermitteln.

6.2 Auswirkungen einer 20-kt Atomwaffe auf Berlin

Da der Regierungssitz als eines der wahrscheinlichsten Angriffsziele in Deutschland angesehen werden kann, wird für diese Studie als erster Explosionsort Berlin gewählt. Es wird angenommen, dass eine 20-kt Atombombe auf der Wiese vor dem Reichstagsgebäude detoniert. Die häufigste Windrichtung in Berlin ist West mit 21 Prozent aller Stunden, gefolgt von Südwest mit 16 Prozent aller Stunden. Bei beiden Windrichtungen treten Windgeschwindigkeiten größer 4 Meter/Sekunde am häufigsten auf.¹⁵ Für

¹⁴ Laut Wellerstein gibt es einige andere offizielle Schätzungen der Todesopfer und Verletzten, die viel höher sind als die Schätzungen, die das von ihm verwendete Unfallmodell liefert, andere offizielle Schätzungen fallen je nach Gebäudetyp niedriger aus.

¹⁵ https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/d403_02.htm

die Ermittlung der Strahlenfolgen wird hier von Westwind mit einer Windgeschwindigkeit von ca. 4,5 m/s ausgegangen.

Auswirkungen durch Druck- und Hitzewelle sowie Sofortstrahlung

In einem Radius des Feuerballs von 260 m (0,22 km²) wird alles verdampft (innerer oranger Kreis mit gelbem Rand). In diesem Bereich liegt der Bundestag. Zudem halten sich in diesem Bereich meist sehr viele Touristen auf. Würde die durchschnittliche Bevölkerungszahl zugrunde gelegt, wären rund 900 Menschen betroffen.

Der Radius des Gebiets mit schweren Explosionsschäden beträgt 590 m, die Fläche 1,1 km² (violetter Kreis mit rotem Rand). Bei einem derartigen Überdruck (ca. 138 kPa = 20 psi) werden Betongebäude schwer beschädigt oder zerstört; die Zahl der Todesopfer nähert sich 100 Prozent. Dort wohnen rund 4500 Menschen.

Bis in eine Entfernung von 1,41 km vom Explosionsort und auf einer Gesamtfläche von 6,22 km² (grüner Kreis) erhalten Menschen im Freien eine Strahlendosis durch Sofortstrahlung von mindestens 5 Sv. Diese Strahlendosis ist für die meisten Menschen tödlich, insbesondere aufgrund der zusätzlichen Verletzungen durch die Druck- und Hitzewelle. Die Menschen würden innerhalb eines Monats sterben. Besonders dramatisch ist, dass die Charité in diesem Bereich liegt und damit ein großes Krankenhaus und medizinischen Personal nicht mehr zur Verfügung steht. Aber auch die Humboldt-Universität, der Tiergarten und das Regierungsviertel liegen in diesem Radius. Würde die durchschnittliche Bevölkerungszahl zugrunde gelegt, wären mehr als 25.000 Menschen betroffen. Die Umgebungsbevölkerung ist vermutlich weit höher. Die wenigen Überlebenden haben ein erheblich erhöhtes Risiko im Laufe ihres Lebens eine schwere oder tödliche Krebserkrankung zu erleiden. Das rechnerische Risiko liegt bei etwa 25 Prozent. Für Erbschäden in den folgenden Generationen ist der rechnerische Anteil bei 1 Prozent.

Der Radius für moderate Zerstörungen beträgt 1,24 km, die Fläche beträgt 4,85 km² (blauer Kreis) und wird von fast 20.000 Menschen bewohnt. Bei diesem Überdruck (ca. 34,5 kPa = 5 psi) stürzen die meisten Wohngebäude ein, Todesfälle sind weit verbreitet. Die Wahrscheinlichkeit für einen Brand bei Gebäuden ist hoch, und so beschädigte Gebäude sind einem hohen Risiko der Brandausbreitung ausgesetzt.

Der Radius mit Brandverletzungen dritten Grades beträgt 1,91 km, das betroffene Gebiet hat eine Fläche von 11,5 km² (oranger Kreis) mit einer Bevölkerung von ca. 47.000 Menschen.

Das Programm NUKEMAP ermittelt für das hier betrachtete Szenario aus den Daten für die durchschnittliche Umgebungsbevölkerung insgesamt 26.760 Todesfälle und 73.550 Verletzte (ohne Berücksichtigung der Falloutstrahlung).

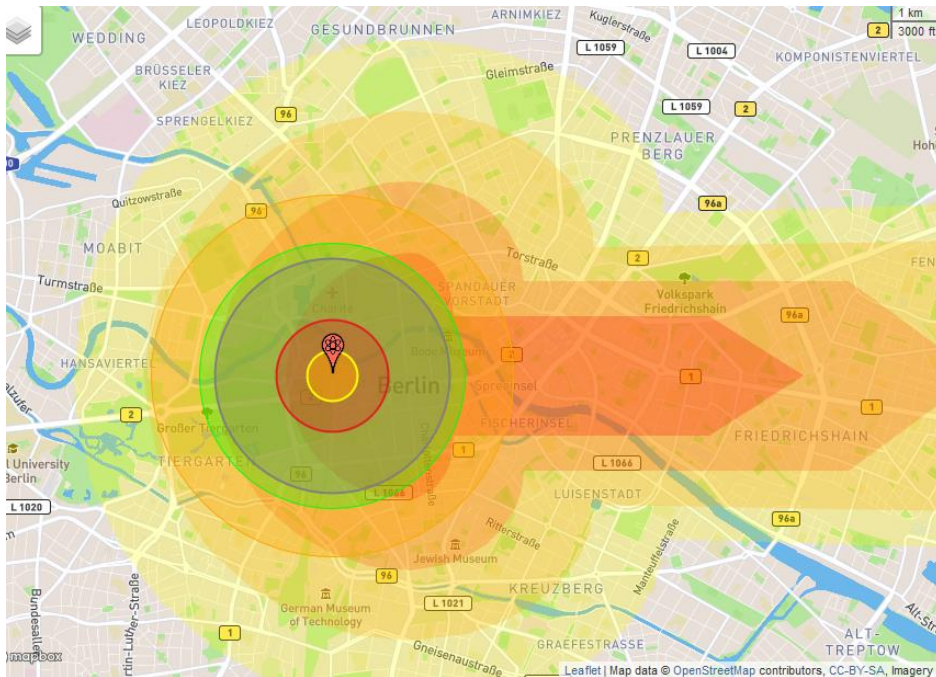


Abbildung 4: Auswirkungen einer 20-kt Atombombe in Berlin

Auswirkungen in den Falloutgebieten

Etwa 46.000 Menschen wohnen in einem Falloutgebiet (11 km²) (rotes Gebiet) mit einer Dosisleistung von mindestens 10 Gy/h bis in Entfernungen von 4,99 km. Die nach einer Stunde erhaltene Dosis wäre im Freien wie auch in den meisten Gebäuden tödlich. Glas zerbricht bis in eine Entfernung von mehr als 6 km, wodurch die Menschen in Gebäuden noch weniger geschützt sind. Lediglich in den Randgebieten hätten Menschen, die sich in gut geschützten Kellerräumen für höchstens 3 Stunden aufhalten, eine geringe Überlebenschance.

Rund 318.000 Menschen¹⁶ wohnen im Falloutgebiet (152 km²) mit Dosisleistungen zwischen 1–10 Gy/h (dunkel-oranges Gebiet) bis in eine maximale Entfernung von 31,2 km. Der Teil der Menschen, die sich in Berlin befinden, erhält im Freien eine für fast alle Menschen tödliche Dosis. Das sind viele Zehntausend Menschen. Die Überlebenden sind von erheblichen Langzeitfolgen betroffen. Wird hier abschätzend davon ausgegangen, dass die Überlebenden im Mittel eine Dosis von 3 Sv erhalten, würden rund 40.000 Menschen das zusätzliche Risiko aufweisen eine tödliche oder schwere Krebserkrankung zu erleiden. Fast 1500 Menschen würden strahlenbedingte genetische Schäden aufweisen, sodass sie Nachkommen mit Erbschäden bekommen würden.

Etwa 306.000 Menschen¹⁷ wohnen im Falloutgebiet (407 km²) mit Dosisleistungen zwischen 0,1–1 Gy/h (oranges Gebiet) bis in eine maximale Entfernung von 66,8 km. Einige Tausend Menschen in diesem Gebiet werden eine für sie tödliche Dosis erhalten. Bei einer Dosis von 1 Sv beträgt die Sterblichkeitsrate etwa 12 Prozent. Diese Dosis erhalten Menschen im Freien nach wenigen Stunden in dem Bereich mit höheren Dosisraten. Von einer tödlichen oder schweren Krebserkrankung sind abschätzend 1660 bis 16.600 Menschen, von genetischen Schäden 60 bis 600 Menschen betroffen.

Etwa 320.000 Menschen¹⁸ wohnen im Falloutgebiet (661 km²) mit Dosisleistungen zwischen 0,01–0,1 Gy/h (gelbes Gebiet) bis in eine Entfernung von 102 km. Todesfälle aus akuten Strahlenschäden sind in diesem Gebiet nicht mehr zu erwarten. Es sind aber erhebliche Langzeitfolgen möglich. Es ist nur sehr grob abzuschätzen, welche Dosis die Menschen in diesem Gebiet tatsächlich erhalten. Es hängt davon

¹⁶ Abschätzend wurde hier vereinfacht angenommen, dass eine Hälfte der Fläche in Berlin und die andere Hälfte in Brandenburg liegt.

¹⁷ Es wurde vereinfacht abgeschätzt, dass ein Sechstel der Fläche in Berlin und der Rest in Brandenburg liegt.

¹⁸ Es wurde vereinfacht abgeschätzt, dass ein Zehntel der Fläche in Berlin und der Rest in Brandenburg liegt.

ab, wie lange sich die Menschen jeweils in den Gebieten aufhalten, und ob sie im Freien sind oder zumindest einen gewissen Schutz durch Aufenthalt in Gebäuden haben. Sollten diese etwa 320.000 Menschen Dosen zwischen 0,01 und 0,1 Sv erhalten haben, würde dies bedeuten, dass 174 bis 1740 Menschen schwer oder tödlich an Krebs erkranken. Statistisch würden 6 bis 63 Menschen Nachkommen mit Erbschäden bekommen.

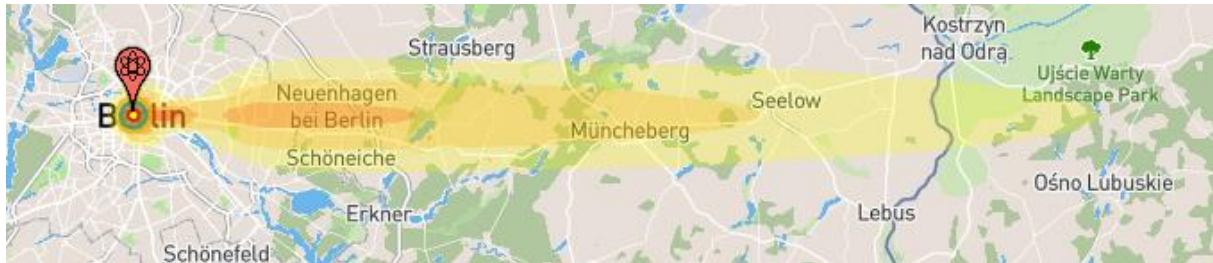


Abbildung 5: Falloutgebiete nach einer 20-kt Atombombe in Berlin

Insgesamt sind in dem beschriebenen Szenario nach einer Explosion einer Atombombe mit einer Stärke von nur 20 kt rund 120.000 Tote durch die Fallout-Strahlung zu erwarten. Mit den oben genannten Toten aus den Wirkungen durch Druck- und Hitzewelle sowie Sofortstrahlung wären das rund 145.000 unmittelbare Tote. Dazu kommen noch mehr als 50.000 spätere Todesfälle durch eine Krebserkrankung.

Dosis aus Falloutstrahlung für bestimmte Entfernungen

Bei der Betrachtung der Dosis in bestimmten Entfernungen und ihrer zeitabhängigen Entwicklung ist folgendes zu beobachten (siehe folgende Tabelle).

Tabelle 1: Maximale Strahlendosen in bestimmten Entfernungen vom Explosionsort

Stunden nach Explosion	Strahlendosis in Sv								
	1	2	3	5	12	24	48	72	
Entfernung in km									
2	751,01	939,13	1037,67	1150,97	1320,15	1434,60	1534,23	1586,42	Ankunftszeit
5	12,01	17,91	21,00	24,56	29,87	33,46	36,59	38,22	0:18
10	1,30	3,01	3,90	4,92	6,45	7,49	8,39	8,86	0:37
15	0,18	1,83	2,69	3,68	5,16	6,16	7,03	7,48	0:55
20	nn	0,79	1,41	2,13	3,19	3,91	4,54	4,87	1:14
30	nn	0,06	0,38	0,76	1,32	1,69	2,02	2,20	1:51
50	nn	nn	nn	0,09	0,25	0,35	0,44	0,48	3:06
75	nn	nn	nn	0,00	0,03	0,05	0,07	0,08	4:39
100	nn	nn	nn	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	6:13

In einer Entfernung von 2 km treten bereits nach kurzer Zeit tödliche Dosen aus Falloutstrahlung auf. Das Leben der Menschen ist durch Sofortstrahlung, Brand, Verbrennungen und die Wirkungen durch Explosion so stark gefährdet, dass praktisch keine Überlebenschancen im Freien oder in Gebäuden bestehen. In einer Entfernung von 5 km (Friedrichshain) erhalten Menschen im Freien bereits nach wenigen Minuten eine tödliche Dosis. Nach mehr als 2 Stunden würde auch die Dosis in Gebäuden einem tödlichen Wert entsprechen. Es ist nicht zu erwarten, dass diese Menschen innerhalb von 2 Stunden nach der Explosion evakuiert werden könnten.

Menschen in einer Entfernung von 10 km (Friedrichsfelde) würden durch die Falloutstrahlung im Freien bereits nach einer Stunde eine für ca. 20 %, nach 2 Stunden eine für ca. 72 % und nach mehr als 3 Stunden eine für fast alle Menschen tödliche Dosis erhalten. Wird hier unterstellt, dass die Menschen 1 Stunde nach der Explosion in ein Gebäude gelangen und dort nur für 12 Stunden der Falloutstrahlung ausgesetzt sind, würden sie eine Dosis von 1,3 Sv erhalten. Diese Dosis wäre für 20 % der Menschen bereits tödlich. Für die Überlebenden beträgt das zusätzliche Risiko einer schweren oder tödlichen Krebserkrankung 7 % und für Erbschäden in den nächsten Generationen 0,3 %.

In 15 km Entfernung (Hellersdorf) erhalten Menschen im Freien nach 2 Stunden eine für fast 30 % der Menschen und erst nach 12 Stunden eine für alle Menschen tödliche Dosis. Hier wird angenommen, dass die Menschen sich ab einer Stunde nach der Explosion in Gebäuden aufhalten und nach 24 Stunden evakuiert werden. Die Menschen würden so eine Dosis von 1,5 Sv erhalten. Diese Dosis wäre für mehr als 20 % der Menschen tödlich. Für die Überlebenden beträgt das zusätzliche Risiko einer Krebserkrankung ca. 8 % und für Erbschäden in den nächsten Generationen ca. 0,3 %.

In 20 km Entfernung (Dahlwitz-Hoppegarten) erhalten Menschen im Freien nach 3 Stunden eine Dosis, die einer etwa 20 % Sterblichkeitsrate entspricht. Es wird hier plausibel angenommen, dass sich die Menschen bis eine Stunde nach der Explosion im Freien aufhalten und bis etwa 24 Stunden nach der Explosion im Gebäude.¹⁹ Fast niemand würde so eine tödliche Dosis aufgrund akuter Strahlenwirkung erhalten. Allerdings wäre das zusätzliche Risiko einer schweren oder tödlichen Krebserkrankung in einer Entfernung von 20 bis 30 km um 2 bis 4 % erhöht. Das Risiko von Erbschäden liegt bei ca. 0,1 bis 0,2 %.

Menschen in Entfernungen von mehr als 50 km (Müncheberg) werden keine tödliche Dosis aus akuten Strahlenfolgen erhalten. Allerdings besteht ein geringes zusätzliches Risiko für eine spätere Krebserkrankung und für Erbschäden in den nächsten Generationen (deutlich unter 1%). Es wird hier vereinfacht angenommen, dass die Menschen sich in Gebäuden aufhalten und erst nach 3 Tagen (72 h) evakuiert werden. Die radioaktive Wolke erreicht erst nach mehr als 3 Stunden Gebiete ab 50 km Entfernung.

6.3 Auswirkungen einer 550-kt Atomwaffe auf Frankfurt am Main

Ein weiteres Szenario ist die Detonation einer größeren 550-kt Atomwaffe in Frankfurt am Main. Das Finanzzentrum Deutschlands stellt ein weiteres mögliches Ziel für einen Angriff dar. Die häufigste Windrichtung in Frankfurt ist Südwest; dabei ist eine mittlere Windgeschwindigkeit von ca. 5,3 m/s (19 km/h) besonders häufig.²⁰ Diese Windrichtung und -geschwindigkeit wird zur Abschätzung der Strahlenfolgen verwendet. Zur Abschätzung wird weithin die durchschnittliche Bevölkerungsdichte von 3033 Menschen pro Quadratkilometer in Frankfurt benutzt.

Auswirkungen durch Druck- und Hitzewelle sowie Sofortstrahlung

In einem Feuerball mit einem Radius von 990 m (3,07 km²) wird alles verdampft (innerer oranger Kreis mit gelbem Rand). In diesem Bereich wohnen auf Basis der durchschnittlichen Bevölkerungszahl mehr als 9300 Menschen.

Der Radius mit schweren Explosionsschäden beträgt 1,78 km, die Fläche 9,99 km² (violetter Kreis mit rotem Rand). Bei einem derartigen Überdruck (ca. 138 kPa =20 psi) werden Betongebäude schwer beschädigt oder zerstört; die Zahl der Todesopfer beträgt fast 100 Prozent. In diesem Bereich wohnen in Frankfurt rund 30.000 Menschen.

Bis in einer Entfernung von 2,32 Kilometer und auf einer Gesamtfläche von 16,9 km² (grüner Kreis) erhalten mehr als 50.000 Menschen im Freien eine Strahlendosis durch Sofortstrahlung von 5 Sv. Diese Strahlendosis ist für die meisten Menschen tödlich, insbesondere aufgrund der zusätzlichen

¹⁹ mit einem mittleren Schutzfaktor von 4

²⁰ https://www.meteoblue.com/de/wetter/historyclimate/climatemodelled/frankfurt-am-main_deutschland_2925533

Verletzungen durch die Druck- und Hitzewelle. Die Überlebenden haben ein erheblich erhöhtes Risiko im Laufe ihres Lebens eine schwere oder tödliche Krebserkrankung zu erleiden. Der rechnerische Anteil liegt bei etwa 27 Prozent und für genetische Schäden bei einem Prozent.

Der moderate Zerstörungsradius beträgt 3,75 Kilometer, die Fläche 44,2 km² (blauer Kreis). Auf dieser Fläche wohnen in Frankfurt etwa 134.000 Menschen. Bei diesem Überdruck (ca. 34,5 kPa =5 psi) stürzen die meisten Wohngebäude ein, was zu sehr vielen Todesfällen führt. Die Wahrscheinlichkeit für einen Brand bei Gebäuden ist hoch und die beschädigten Gebäude sind einem hohen Risiko der Brandausbreitung ausgesetzt.

Der Radius, in dem Brandverletzungen dritten Grades auftreten, beträgt 8,24 Kilometer (oranger Kreis). Das betroffene Gebiet hat eine Fläche von 213 km². Auf dieser Fläche wohnen in Frankfurt etwa 646.000 Menschen.

Das Programm NUKEMAP ermittelt für das hier betrachtete Szenario aus den Daten für die durchschnittliche Umgebungsbevölkerung insgesamt 206.080 Todesfälle und 226.360 Verletzte (ohne Berücksichtigung der Falloutstrahlung).

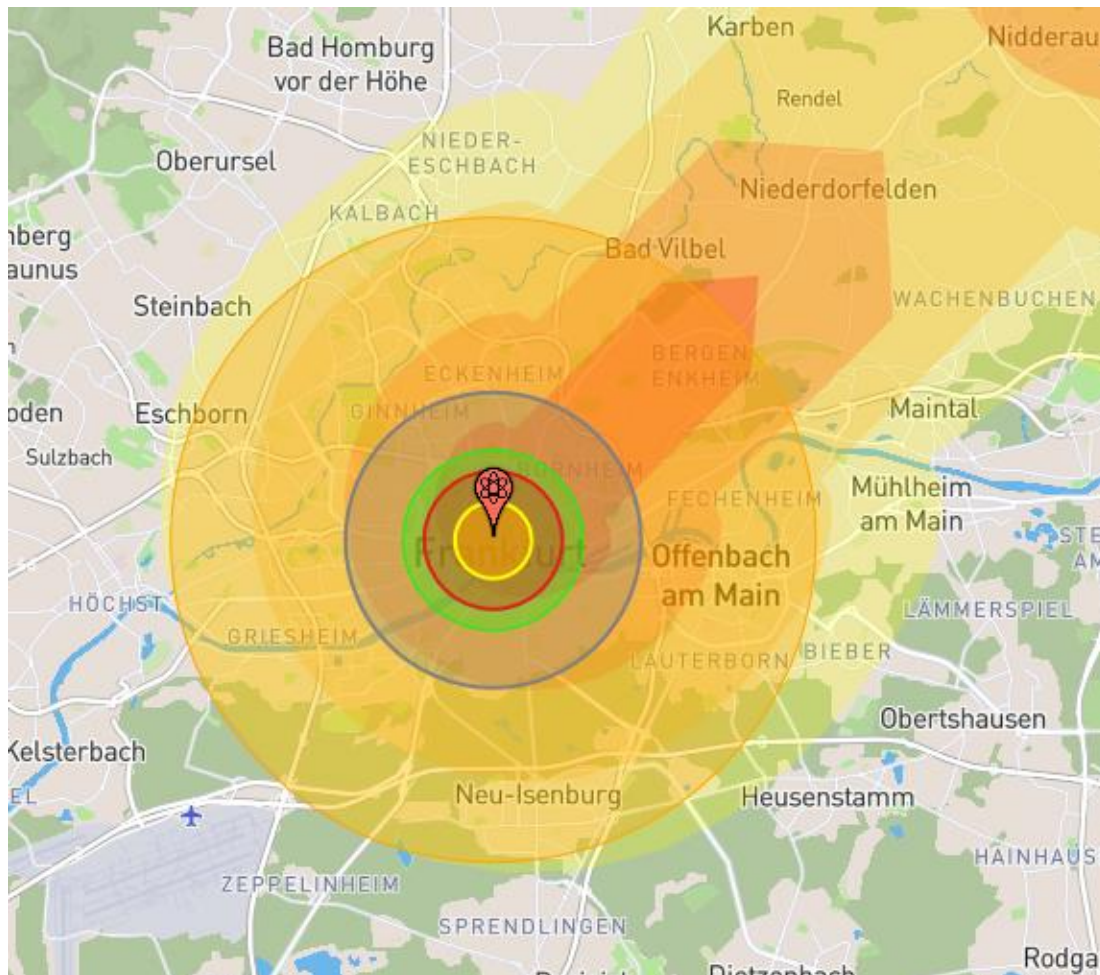


Abbildung 6: Auswirkung einer 550-kt Atombombe in Frankfurt

Auswirkungen in den Falloutgebieten

Etwa 90.000 Menschen wohnen im Falloutgebiet (301 km²) in Hessen in einer Entfernung von ca. 20 bis 50 Kilometern mit Dosisleistungen von mindestens 10 Gy/h (rotes Gebiet). Die nach einer Stunde erhaltene Dosis wäre im Freien wie auch in den meisten Wohngebäuden tödlich.

Rund 790.000 Menschen wohnen im Falloutgebiet (2669 km²) bis in einer Entfernung von 135 Kilometern mit Dosisleistungen zwischen 1-10 Gy/h (dunkel-oranges Gebiet). Ein Teil der Menschen (viele

Zehntausend) erhält im Freien eine für fast alle tödliche Dosis. Die Überlebenden sind von erheblichen Langzeitfolgen betroffen. Wird hier abschätzend davon ausgegangen, dass die Überlebenden im Mittel eine Dosis von 3 Sv erhalten, würden rund 115.000 Menschen das zusätzliche Risiko aufweisen, eine tödliche oder schwere Krebserkrankung zu erleiden. Mehr als 4000 Menschen würden strahlenbedingte genetische Schäden aufweisen, sodass sie Nachkommen mit Erbschäden bekämen.

Etwa 1,46 Millionen Menschen²¹ wohnen im Falloutgebiet (5420 km²) in einer maximalen Entfernung von 219 Kilometern mit Dosisleistungen zwischen 0,1 -1 Gy/h (oranges Gebiet). Einige Zehntausend Menschen in diesem Gebiet werden eine für sie tödliche Dosis erhalten. Bei einer Dosis von 1 Sv beträgt die Sterblichkeitsrate etwa 12 Prozent. Diese Dosis erhalten Menschen im Freien nach wenigen Stunden in dem Gebiet mit höheren Dosisraten. Wird zur Abschätzung der Anzahl von tödlichen oder schweren Krebserkrankung bzw. genetischen Schäden eine Strahlendosis von 0,1 bis 1 Sv unterstellt, sind 7700 bis 77.000 Menschen von Krebs und 280 bis 2800 Menschen von genetischen Schäden betroffen.

Mehr als 1,4 Millionen Menschen²² wohnen im Falloutgebiet (8170 km²) in einer maximalen Entfernung von 303 km mit Dosisleistungen zwischen 0,01 -0,1 Gy/h (gelbes Gebiet). Todesfälle aufgrund akuter Strahlenschäden sind in diesem Gebiet nicht zu erwarten. Sollten diese etwa 1,4 Millionen Menschen Dosen zwischen 0,01 und 0,1 Sv erhalten haben, würde dies bedeuten, dass 770 bis 7700 Menschen schwer oder tödlich an Krebs erkranken. Statistisch würden 28 bis 280 Menschen Nachkommen mit Erbschäden bekommen.

²¹ Es wurde vereinfacht abgeschätzt, dass ein Sechstel der Fläche in Thüringen und der Rest in Hessen liegt.

²² Es wurde vereinfacht abgeschätzt, dass je ein Drittel der Fläche in Hessen, Sachsen-Anhalt und Thüringen liegt.

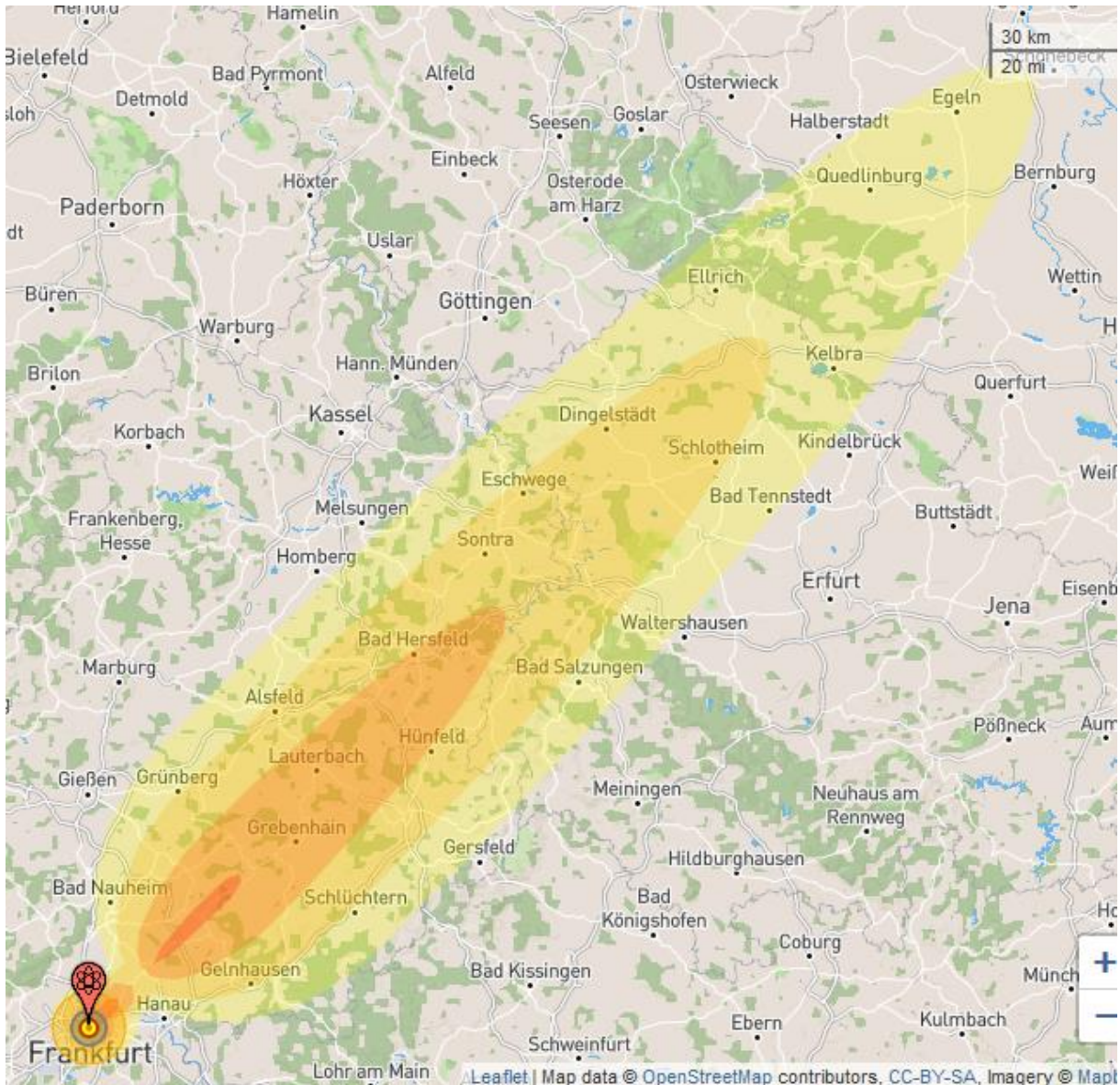


Abbildung 7: Falloutgebiete nach einer 550-kt Atombombe in Frankfurt

Insgesamt sind in dem beschriebenen Szenario nach der Explosion einer Atombombe mit einer Stärke von 550 kt fast 300.000 Tote durch die Fallout-Strahlung zu erwarten. Mit den o.g. Toten aus den Wirkungen durch Druck- und Hitzewelle sowie Sofortstrahlung wären das rund 500.000 Todesfälle. Dazu kommen noch rund 165.000 spätere Todesfälle durch eine Krebserkrankung.

Dosis durch Falloutstrahlung für bestimmte Entfernungen

Bei der Betrachtung der Dosis in bestimmten Entfernungen und ihrer zeitabhängigen Entwicklung ist Folgendes zu beobachten (siehe folgende Tabelle):

Tabelle 2: Maximale Strahlendosen in bestimmten Entfernungen vom Explosionsort

	Strahlendosis in Sv								
Stunden nach Explosion	1	2	3	5	12	24	48	72	

Entfernung in km									Ankunftszeit
	1	2	3	5	12	24	48	72	
2	189,8	232,6	255,1	280,9	319,4	345,5	368,2	380,1	6:13
5	137,4	194,8	224,9	259,4	311,0	345,9	376,4	392,2	0:15
10	5,3	10,2	12,7	15,7	20,1	23,1	25,6	27,0	0:31
15	0,1	0,5	0,7	0,9	1,2	1,4	1,6	1,7	0:46
20	nn	3,5	5,4	7,6	11,0	13,2	15,2	16,2	1:02
30	nn	2,8	7,1	12,0	19,2	24,2	28,5	30,7	1:33
50	nn	nn	1,2	4,9	10,5	14,3	17,6	19,3	2:35
75	nn	nn	nn	0,9	3,7	5,6	7,3	8,1	3:52
100	nn	nn	nn	nn	1,3	2,3	3,1	3,5	5:11

In einer Entfernung von zwei und fünf Kilometern treten bereits nach kurzer Zeit tödliche Dosen aus Falloutstrahlung auf. Das betrifft auch Menschen, die sich in gutgeschützten Kellern oder U-Bahn-Schächten befinden. Jedoch ist das Leben der Menschen durch Sofortstrahlung, Brand, Verbrennungen und die Wirkungen durch die Explosion so stark bedroht, dass praktisch keine Überlebenschance besteht, sodass die Menschen vorher und nicht erst durch die Falloutstrahlung zu Tode kommen würden.

Menschen in einer Entfernung von zehn Kilometern (Niederdorfelden) würden im Freien durch die Falloutstrahlung eine bereits nach einer Stunde für alle Menschen tödliche Dosis erhalten. Eine ebenfalls für alle Menschen tödliche Dosis würden Menschen in Gebäuden innerhalb von zwölf Stunden erhalten. Eine schnellere Evakuierung der Menschen erscheint nicht möglich.

In 15 Kilometern Entfernung (Schöneck) erhalten Menschen eine deutlich geringere Dosis, da der Hauptanteil der Falloutpartikel in größerer Entfernung herunterkommt. Hier wird angenommen, dass die Menschen sich ab einer Stunde nach der Explosion in Gebäuden aufhalten und nach 24 Stunden evakuiert werden. Die Menschen würden so keine sofort tödliche Dosis erhalten, allerdings wäre das rechnerische zusätzliche Risiko einer späteren schweren oder tödlichen Krebserkrankung (1,8 Prozent) und für Erbschäden in den nächsten Generationen (ca. 0,1 Prozent) geringfügig erhöht.

Für die Entfernung von 20 Kilometern (Nidderau) und 30 km (Heegheim) wird ebenfalls angenommen, dass die Menschen nach 24 Stunden evakuiert werden. Es wird plausibel unterstellt, dass sich die Menschen maximal eine Stunde nach der Explosion im Freien und dann in einem Gebäude aufhalten²³. Da die Wolke erst nach einer bzw. 1,5 Stunden dieses Gebiet erreicht, würde so keine Exposition im Freien erfolgen. Nach 24 Stunden würden allerdings annähernd alle Menschen auch in Gebäuden eine tödliche Dosis erhalten haben. In den meisten Gebäuden wäre dies bereits nach zwölf Stunden der Fall. (Im Freien würden Menschen bereits nach zwei bis drei Stunden nach der Explosion eine tödliche Dosis erhalten.)

Menschen in Entfernungen von 50 Kilometern (Gedern) können im Freien eine tödliche Dosis erhalten: Drei Stunden nach der Explosion erhalten sie eine für ca. 15 Prozent der Menschen und fünf Stunden eine für alle Menschen tödliche Dosis. Es wird hier vereinfacht angenommen, dass die Menschen in Gebieten ab 50 Kilometern frühestens nach drei Tagen (72 Stunden) evakuiert werden und sich aber in Gebäude aufhalten. Die radioaktive Wolke erreicht nach mehr als 2,5 Stunden, Gebiete ab 50 Kilometer Entfernung. In Gebäuden würden Menschen dann selbst in einer Entfernung von 50 Kilometern eine für fast alle Menschen (98 Prozent), in 75 Kilometern (Lauterbach) eine für fast 40 Prozent der Menschen und in 100 Kilometern (Niederaula) für noch acht Prozent der Menschen tödliche Dosis erhalten. Zudem besteht für die zunächst Überlebenden im Gebiet von 50 bis 100 Kilometern ein nennenswertes

²³ mit einem mittleren Schutzfaktor von 4
28

zusätzliches Risiko für eine spätere schwere oder tödliche Krebserkrankung (fünf bis 26 Prozent) und für Erbschäden in den nächsten Generationen (0,2 bis ein Prozent).

6.4 Auswirkungen einer 170-kt Atomwaffe in Büchel

Ein drittes Szenario, für das hier die Auswirkungen betrachtet werden, ist die Detonation einer 170-kt Atomwaffe in Büchel (Rheinland-Pfalz). Am dortigen Fliegerhorst sind Atomwaffen dieser Stärke gelagert. Eine mögliche Windrichtung ist an diesem Standort Süd.²⁴ Weiterhin wird eine mittlere Windgeschwindigkeit von ca. 5,3 m/s (19 km/h) für die Simulation der Auswirkungen angenommen. Für die Berechnung der betroffenen Bevölkerung wird von einer Bevölkerungsdichte von 206 pro Quadratkilometer ausgegangen. Diese ist die durchschnittliche Bevölkerungszahl für Rheinland-Pfalz.²⁵

Auswirkungen durch Druck- und Hitzewelle sowie Sofortstrahlung

In einem Radius des Feuerballs von 620 m (1,22 km²) wird alles verdampft (innerer oranger Kreis mit gelbem Rand). In diesem Bereich wohnen etwa 250 Menschen.

Der Radius der schweren Explosionsschäden beträgt 1,21 Kilometer, die Fläche 4,57 km² (violetter Kreis mit rotem Rand). Bei einem derartigen Überdruck (ca. 138 kPa =20 psi) werden Betongebäude schwer beschädigt oder zerstört; die Zahl der Todesopfer nähert sich 100 Prozent. In diesem Bereich wohnen etwa 940 Menschen.

Bis in eine Entfernung von 1,98 Kilometern auf einer Gesamtfläche von 12,3 km² (grüner Kreis) erhalten alle Menschen im Freien eine Strahlendosis durch Sofortstrahlung von mindestens 5 Sv. Dort wohnen etwa 2500 Menschen. Diese Strahlendosis ist für die meisten Menschen tödlich, insbesondere aufgrund der zu erwartenden zusätzlichen Verletzungen. Die Überlebenden haben ein erheblich erhöhtes Risiko im Laufe ihres Lebens eine schwere oder tödliche Krebserkrankung zu erleiden. Der rechnerische Anteil liegt bei etwa 27 Prozent und für genetische Schäden bei einem Prozent .

Der moderate Zerstörungsradius beträgt 2,54 Kilometer (blauer Kreis). Es ist eine Fläche von 20,2 km² mit 4160 Menschen betroffen. Bei diesem Überdruck (ca. 34,5 kPa =5 psi) stürzen die meisten Wohngebäude ein, Todesfälle sind weit verbreitet. Die Wahrscheinlichkeit für einen Brand bei Gebäuden ist hoch, und so beschädigte Gebäude sind einem hohen Risiko der Brandausbreitung ausgesetzt.

Der Radius mit Brandverletzungen dritten Grades beträgt 4,93 Kilometer (oranger Kreis), das betroffene Gebiet hat eine Fläche von 76,4 km² mit einer Bevölkerungszahl von etwa 15.700.

Das Programm NUKEMAP ermittelt für das hier betrachtete Szenario aus den Daten für die durchschnittliche Umgebungsbevölkerung insgesamt 2320 Todesfälle und 4070 Verletzte (ohne Berücksichtigung der Falloutstrahlung).

²⁴ https://www.meteoblue.com/de/wetter/historyclimate/climatemodelled/büchel_deutschland_2942688

²⁵ <http://www.statistikportal.de/de/bevoelkerung/flaeche-und-bevoelkerung>

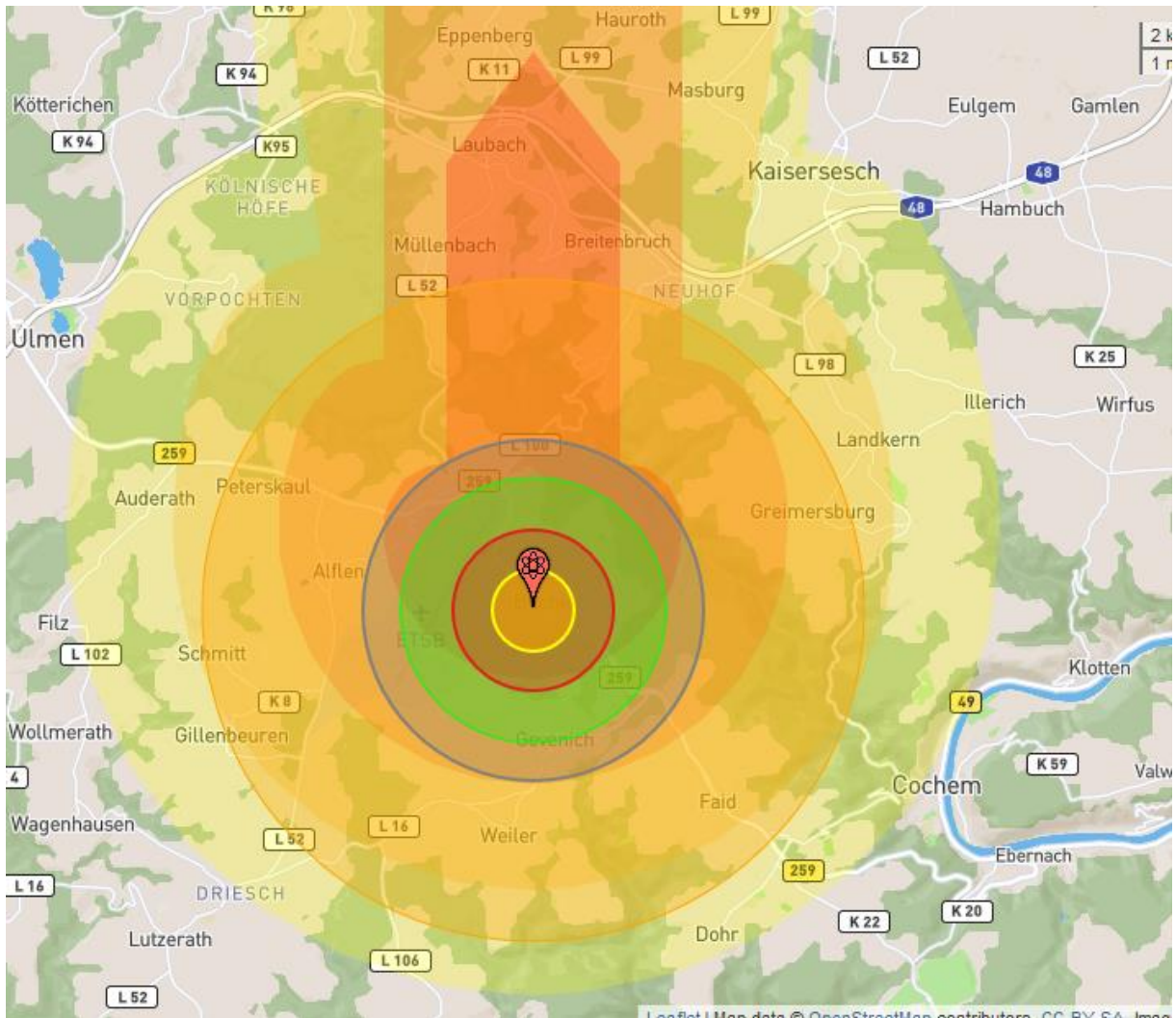


Abbildung 8: Auswirkungen einer 170-kt Atombombe in Büchel

Auswirkungen in den Falloutgebieten

Etwa 17.500 Menschen wohnen im Falloutgebiet (85 km²) bis in einer maximalen Entfernung von ca. 26 Kilometern mit Dosisleistungen von mindestens 10 Gy/h (rotes Gebiet). Die in diesem Gebiet nach einer Stunde erhaltene Dosis wäre im Freien wie auch in den meisten Wohngebäuden tödlich.

Rund 325.000 Menschen²⁶ wohnen im Falloutgebiet (1135 km²) bis in Entfernungen von 89,2 Kilometern mit Dosisleistungen zwischen 1-10 Gy/h (dunkel-oranges Gebiet). Ein Teil der Menschen erhält im Freien eine für fast alle Menschen tödliche Dosis. Das sind viele Zehntausend Menschen. Die Überlebenden (ca. 250.000) sind von erheblichen Langzeitfolgen betroffen. Wird hier abschätzend davon ausgegangen, dass die Überlebenden im Mittel eine Dosis von 3 Sv erhalten haben, würden rechnerisch rund 41.000 Menschen eine tödliche oder schwere Krebserkrankung erleiden. Mehr als 4000 Menschen würden strahlenbedingte genetische Schäden aufweisen, sodass sie Nachkommen mit Erbschäden bekommen würden.

Etwa 1,15 Millionen Menschen²⁷ wohnen im Falloutgebiet (2490 km²) in einer maximalen Entfernung von 153 Kilometern mit Dosisleistungen zwischen 0,1 -1 Gy/h (oranges Gebiet). Einige Zehntausend Menschen in diesem Gebiet werden eine für sie tödliche Dosis erhalten. Bei einer Dosis von 1 Sv beträgt

²⁶ Abschätzend wurde hier vereinfacht angenommen, dass ein Viertel der Fläche in NRW und der Rest in Rheinland-Pfalz liegt.

²⁷ Es wurde vereinfacht abgeschätzt, dass ein Fünftel der Fläche in Rheinland-Pfalz und der Rest in NRW liegt.

die Sterblichkeitsrate etwa 12 Prozent. Diese Dosis erhalten Menschen im Freien nach wenigen Stunden in dem Bereich mit höheren Dosisraten. Mehr als eine Millionen Menschen sind dem Risiko von Langzeitfolgen ausgesetzt. Wird zur Abschätzung der Langzeitfolgen eine Strahlendosis von 0,1 bis 1 Sv unterstellt, ist rechnerisch zu erwarten, dass 6000 bis 60.000 Menschen eine tödliche oder schwere Krebserkrankung erleiden und 220 bis 2200 Menschen von genetischen Schäden betroffen sind.

Etwa 1,9 Millionen Menschen²⁸ wohnen im Falloutgebiet (3850 km²) in einer maximalen Entfernung von 216 Kilometern mit Dosisleistungen zwischen 0,01-0,1 Gy/h (gelbes Gebiet). Todesfälle aufgrund akuter Strahlenschäden sind in diesem Gebiet nicht zu erwarten, aber erhebliche Langzeitfolgen: Sollten diese rund 1,9 Millionen Menschen Dosen zwischen 0,01 und 0,1 Sv erhalten haben, würde dies bedeuten, dass ca. 1000 bis 10.000 Menschen schwer oder tödlich an Krebs erkranken. Statistisch würden ca. 38 bis 380 Menschen Nachkommen mit Erbschäden bekommen.

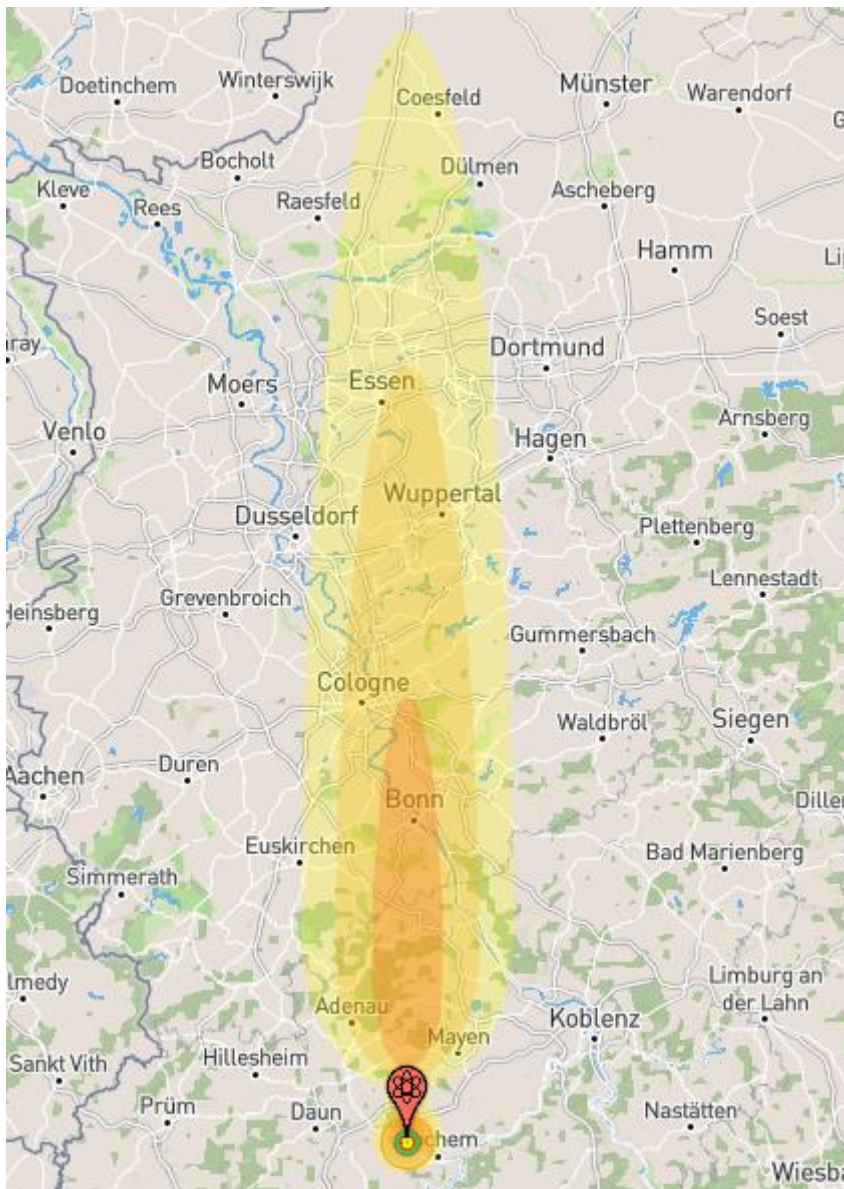


Abbildung 9: Falloutgebiete nach einer 170-kt Atombombe in Büchel

Insgesamt sind in dem beschriebenen Szenario nach einer Explosion einer Atombombe mit einer Stärke von 170 kt rund 107.000 Tote durch die Fallout- Strahlung zu erwarten. Mit den o.g. Toten aus den

²⁸ Es wurde vereinfacht abgeschätzt, dass ein Zehntel der Fläche in Rheinland-Pfalz und der Rest in NRW liegt.
31

Wirkungen durch Druck- und Hitzewelle sowie Sofortstrahlung wären das 130.000 unmittelbare Todesfälle. Dazu kommen noch rund 80.000 spätere Todesfälle durch eine Krebserkrankung.

Dosis durch Falloutstrahlung für bestimmte Entfernungen

Bei der Betrachtung der Dosis in bestimmten Entfernungen und ihrer zeitabhängigen Entwicklung ist folgendes zu beobachten (siehe folgende Tabelle):

Tabelle 3: Maximale Strahlendosen in bestimmten Entfernungen vom Explosionsort

Stunden nach Explosion	Strahlendosis in Sv								Ankunftszeit	
	1	2	3	5	12	24	48	72		
Entfernung in km										
2	703,8	862,7	946,0	1041,7	1184,7	1281,4	1365,6	1409,7	0:06	
5	147,2	208,6	240,7	277,7	332,9	370,2	402,7	419,8	0:15	
10	2,2	4,1	5,2	6,4	8,2	9,4	10,4	11,0	0:31	
15	0,4	1,3	1,8	2,4	3,2	3,8	4,3	4,6	0:46	
20	nn	4,8	7,5	10,6	15,2	18,3	21,0	22,5	1:02	
30	nn	1,8	4,5	7,5	12,1	15,2	17,9	19,4	1:33	
50	nn	nn	0,5	1,9	4,2	5,7	7,0	7,6	2:35	
75	nn	nn	nn	0,3	1,2	1,8	2,3	2,6	3:53	
100	nn	nn	nn	nn	0,3	0,6	0,8	0,9	5:10	

In einer Entfernung von zwei und fünf Kilometern treten bereits nach kurzer Zeit tödliche Dosen aus Falloutstrahlung auf. Das betrifft auch Menschen, die sich in gutgeschützten Kellern befinden. Menschen in diesem Falloutgebiet haben praktisch keine Überlebenschancen. In der folgenden Tabelle sind

Menschen in einer Entfernung von zehn Kilometern (Kalenborn) würden durch die Falloutstrahlung im Freien bereits nach zwei Stunden nach der Explosion eine für fast alle Menschen tödliche Dosis erhalten. Für die Abschätzung der Strahlenfolgen wird davon ausgegangen, dass sich die Menschen nur in der ersten Stunde nach der Explosion im Freien aufhalten und nach zwölf Stunden evakuiert werden. Eine für etwa 25 Prozent der Menschen tödliche Dosis (1,5 Sv) würden diese so innerhalb von zwölf Stunden erhalten. Die Überlebenden würden eine deutliche Erhöhung des Krebsrisikos aufweisen (8 Prozent) und ebenso für genetische Schäden (0,3 Prozent). Eine schnellere Evakuierung der Menschen erscheint nicht möglich.

In 15 Kilometern Entfernung (Laubach) erhalten Menschen eine deutlich geringere Dosis, da der Hauptanteil der Falloutpartikel in größerer Entfernung herunterkommt. Hier wird angenommen, dass die Menschen sich ab einer Stunde nach der Explosion in Gebäuden aufhalten und nach 24 Stunden evakuiert werden. Die Menschen würden so keine sofort tödliche Dosis erhalten, allerdings wäre das rechnerische zusätzliche Risiko einer tödlichen oder schweren Krebserkrankung (4,7 Prozent) und für Erbschäden in den nächsten Generationen (ca. 0,2 Prozent) erhöht.

Für die Entfernung von 20 Kilometern (Virneburg) und 30 Kilometern (Heckenbach) wird angenommen, dass die Menschen nach 24 Stunden evakuiert werden. Es wird wieder unterstellt, dass sich die Menschen maximal eine Stunde nach der Explosion im Freien aufhalten und dann bis etwa 24 Stunden in einem Gebäude. Da die Wolke erst nach einer bzw. 1,5 Stunden dieses Gebiet erreicht, würde keine Exposition im Freien erfolgen. Nach 24 Stunden würden die Menschen in Gebäuden in 20 Kilometern eine für fast 90 Prozent und in 30 Kilometern für fast 70 Prozent der Menschen tödliche Dosis erhalten haben. Die Überlebenden würden ein erhebliches rechnerisches zusätzliches Risiko einer

Krebserkrankung (17 bis 21 Prozent) und für Erbschäden in den nächsten Generationen (0,6 bis 0,8 Prozent) aufweisen. Im Freien würden Menschen bereits nach etwas zwei bzw. drei Stunden eine tödliche Dosis erhalten.

Noch in einer Entfernung von 50 Kilometern (Wachtberg) können Menschen eine tödliche Dosis erhalten. Es wird hier vereinfacht angenommen, dass die Menschen sich in Gebäuden aufhalten aber frühestens nach drei Tagen (72 h) evakuiert werden. Dennoch würden die Menschen in dieser Entfernung eine für rund 35 Prozent der Menschen tödliche Dosis erhalten. Zudem besteht im Gebiet von 50 bis 100 Kilometern ein zusätzliches Risiko für eine spätere Krebserkrankung (1,2 bis 10,5 Prozent) und für Erbschäden in den nächsten Generationen (0,1 und 0,4 Prozent).

-
- ¹ Deutsche Welle: USA modernisieren Atombomben in Deutschland; 26.03.2020; <https://www.dw.com/de/usa-modernisieren-atombomben-in-deutschland/a-52856021> , eingesehen Juli 2020
- ² Statista Research Department: Anzahl der Atomsprengköpfe weltweit 2019; 09.08.2019 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36401/umfrage/anzahl-der-atomsprengkoepfe-weltweit/#professional>; eingesehen Juni 2020
- ³ Statista Research Department: Das atomare Auf- und Abrüsten; 17.06.2019; <https://de.statista.com/infografik/8092/anzahl-der-atomwaffen-weltweit/> eingesehen Juni 2020
- ⁴ Der Standard: USA testeten Interkontinentalrakete im Pazifik; 2. Oktober 2019; <https://www.derstandard.de/story/2000109375907/usa-testen-interkontinentalrakete-im-pazifik>; eingesehen Juli 2020
- ⁵ Spiegel Wissenschaft: Das neuen nuklear Wettrüsten; Christoph Seidler, 19.08.2019; <https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/atomwaffen-die-welt-steht-vor-einem-neuen-nuklearen-wettruesten-a-1282676.html>; eingesehen Juni 2020
- ⁶ Joseph Rotblat: Strahlungswirkungen beim Einsatz von Kernwaffen; Berlin Verlag, Arno Spitz GmbH, 1996
- ⁷ BUND-Stellungnahme zum Entwurf des Strahlenschutzgesetzes; Deutscher Bundestag, Ausschuss für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit; Ausschussdrucksache 18(16)539-G zur Anhörung am 27.03.2017
- ⁹ Carl F. Miller, "Fallout and Radiological Countermeasures, Volume 1", Stanford Research Institute Project No. IM-4021 (Januar 1963).