

Ionisierende Strahlung

Stefan Sattler

22. Januar 2007

- 1 Physikalische Grundlagen
 - Einleitung
 - Strahlenbiologie
- 2 Allgemeine Pathophysiologie
 - Einleitung
 - Radiochemische und radiobiochemische Reaktionen
- 3 Spezielle Pathophysiologie
 - Ganzkörperbestrahlung
 - Teilbestrahlung einzelner Organe
- 4 Radioaktivität im Alltag
 - Flüge ins Weltall
 - Strahlungsdosis – Wirkung
 - Reaktorunfälle
 - Atombomben

Strahlungsarten

- α Strahlung
- β^+ und β^- Strahlung
- γ Strahlung

Energieübertragung

- **Korpuskular Strahlen:** Energieübertragung über direkte Zusammenstöße mit den Atomen der Materie
- **Elektromagnetische Schwingungsstrahlung:** Sekundäre Erzeugung von Elektronenstrahlen (Photoabsorption, Comptenstreuung, Paarbildung)
- **Biologische Wirkung:** Übertragene Energie in Form von Ionisationsprozessen

$$1R = (\text{Röntgen}) = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

Einheiten

- **Gray:** Energiedosis

$$D = \frac{dE}{dm}$$

- **Sievert:** Äquivalenzdosis

$$D_q = q \times D$$

$q = \text{RBW Faktor} \propto \text{Teilchengröße (DNA Beschädigung)}$

- **Becquerel:** Aktivität (Hz)

Biologische Strahlenwirkung

- somatische Strahlenschäden
- genetische Strahlenschäden

Ganzkörper- und Teilkörperbestrahlung

- Ganzkörperbestrahlung von 6–7 Gy: Letaldosis von 100%
- Hautfläche von 6×6 cm mit 6–7 Gy: lokale Hautrötung keine Allgemeinerkrankung

Zeitfaktor

- über kurze Zeit eingestrahlte Dosis größere biologische Wirkung
- über lange Zeit eingestrahlt weniger Wirkung (Letaldosis von 6–7 Gy über Jahre verteilt zeigt keine klinische Wirkung)
- Stochastisch auftretende Strahlenschäden

Treffertheorie

- Zellschädigung durch Treffer an lebenswichtigen Zentren
- genetische Schäden durch Treffer
- indirekte Treffer: radiochemische Übertragung der Energie

biologische Strahlenwirkung

- Absorption der Strahlenenergie
- primär- und radiochemische Reaktionskette
- chemischen Reaktionskette
- beobachteter Effekt

Übersicht

- Proteine und Enzyme
- Strahlenchemische Veränderung an Nucleinsäuren
- Zellen und Zellsystem
- Bildung von RNS
- Hemmung der Mitose
- Biochemische Veränderungen

Proteine und Enzyme

- Strahlenempfindlichkeit großteils nicht bestätigt
- Ausfälle nur bei Dosen, die bereits den gesamten Organismus aufs schwerste schädigen
- SH-Gruppen wesentlich (S – S Verbindungen können radiogene Wasserstoffmoleküle abfangen)
- Veränderungen der Makrostruktur

Veränderungen an Nucleinsäuren

- Desaminierungen
- Dehydroxlierung
- Bruch Basen-Zucker Verbindungen
- in vitro nur mit sehr hohen Dosen

Zellen und Zellsysteme

- große Vielfalt
- hohe Dosen die morphologisch zu schweren Störungen führen
- hoher Elektrolytverlust bei Ganzkörperbestrahlung
- Nach Bestrahlung: Zellmembran versagt als Ionenbarriere

Bildung von RNS

- wenig gehemmt

Hemmung der Mitose

- DNS – Synthese nur bedingt strahlensensibel
- Zellkern bedeutend strahlenempfindlicher als Zytoplasma

„Röntgenstrahlen wirken mit einer um so größeren Intensität auf die Zellen ein, je größer die reproduktive Aktivität der Zellen ist, je länger ihr karyokinetischer Werdegang andauert und je weniger ihre Morphologie und ihre Funktion definitiv festgelegt sind.“ [2]

Biochemische Veränderungen

- **Atmung** und **Kohlenhydratstoffwechsel** bei höchsten Dosen
- **Glykogen** kann direkt nach Bestrahlung abnehmen
- **Enzyme** können vermehrt sein (Leber)
- **Blutbild**: Vermehrung von α_1 , α_2 und β Globuline, Abnahme der γ Globuline (Stickstoffbilanz nach Ganzkörperbestrahlung neg.)
- **DNA** und **RNA Abbau** erhöht (im bestrahlten Gewebe)
- Reaktion auf **Zelluntergänge**

Zusammenstellung der klinischen Symptome der Strahlenkrankheit (nach Bacq u. Alexander)

Zeit nach dem Strahlen-insult	Letaldosis 600 R	halbe Letaldosis 400 R	mäßige Dosen 300 R-100 R
1. Woche	Nausea(Übelkeit) und Erbrechen nach 1-2 Stunden		keine charakteristischen Symptome
	keine charakteristischen Symptome	keine charakteristischen Symptome	
Durchfall Erbrechen Entzündung von Mund und Rachen	beginnende Epilation		
2. Woche	Fieber rasche Gewichtsabnahme Tod (wahrscheinlich 100%ige Sterblichkeit 100%)	Appetitlosigkeit und allgemeine Übelkeit	
3. Woche		Fieber schwere Entzündung von Mund und Rachen	Epilation Appetitlosigkeit und allgemeine Übelkeit trockener Hals
4. Woche		Blässe petechiale Blutungen, Durchfall, Nasenbluten	Blässe petechiale Blutungen Durchfall
		rasche Gewichtsabnahme Tod (wahrscheinlich Sterblichkeit 50%)	mäßige Gewichtsabnahme (Erholung möglich, wenn nicht durch eine ungünstige körperliche Disposition oder durch eine Infektion oder durch eine sonstige überlagerte Schädigung kompliziert)

Ganzkörperbestrahlung – Einteilung

- 1 **zentralnervöse Reaktionsform:** hohe und höchste Strahlendosen (mehrere 1000 Röntgen)
- 2 **gemischt gastrointestinale–hämoepoetische Reaktionsform:** mittlere und hohe Dosen (500 bis 1500 Röntgen)
- 3 **hämatopoetische Reaktionsform:** bei niedrigen und mittleren Strahlendosen bis 500 R

zentralnervöse Reaktionsform

- wenige Beobachtungen (Los Alamos)
- Dosis im Rumpfbereich 45 Gy
- schwerste Störungen des ZNS und Kreislauf
- Patient kurz nach Unfall im Schock
- Haut erythemartig verfärbt
- Tod nach 30 Stunden
- Histaminfreisetzung (Schock)

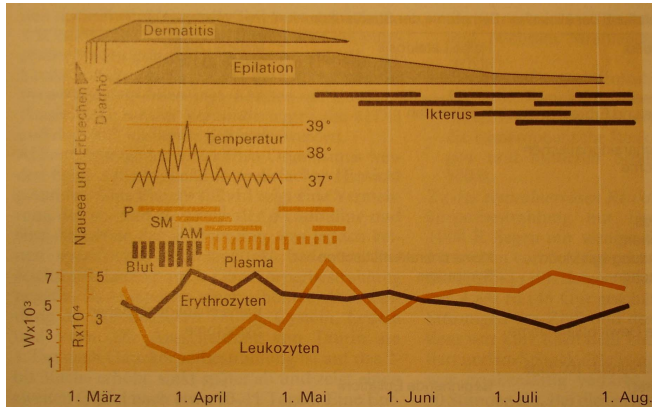
gemischt gastrointestinale–hämoetische Reaktionsform

- Patient erhielt (13,5 Gy)
- anfänglich Erbrechen, Übelkeit, allgemeine Schwäche
- Permeabilitätsstörung im ZNS
- Symptomatik bessert sich
- nach 6 bis 7 Tagen kritische Phase (Verschwinden der Granulozyten)
- Herz- Kreislaufversagen nach 8 bis 12 Tage.

hämatopoetische Reaktionsform

- Überleben wahrscheinlich
- Schädigung der Stammzellen
- Fehlende Regeneration der Granulozyten, Lymphozyten, Erythrozyten
- Verstärktes ausschütten von Leukozytendepots
- Flächenförmige Blutung an Schleimhäuten
- Immunabwehr stark abgeschwächt (AK fehlen)

hämatopoetische Reaktionsform

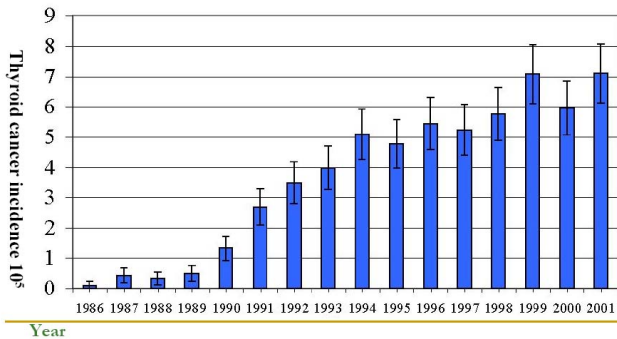


Spätfolgen

- Erholung der Blutbildung gleichförmig
- Sterilität beim Mann und bei der Frau (endgültig wenn über 4,1 Gy)
- Linsentrübungen
- Anstieg der Leukämie

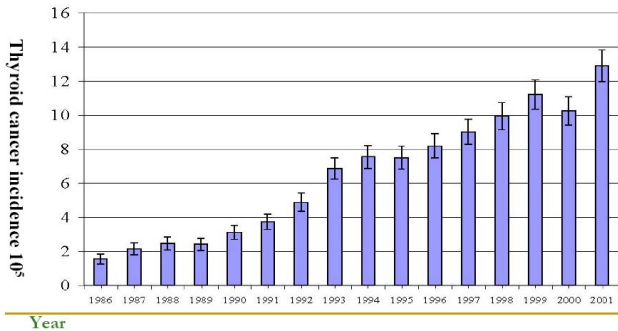
Spätfolgen

Incidence of thyroid cancer among Belarus population exposed to ^{131}I at the age of 0-18 years



Spätfolgen

Incidence of thyroid cancer among Belarus population exposed to ^{131}I at the age of 19 and older



Organe

- **Gehirn:** Durch Gefäßveränderungen (Kolliquationsnekrose)
- **Lunge:** Lungenfibrose
- **Nieren:** Niereninsuffizienz, Albuminurie, Schrumpfniere
- **inkretorische Drüsen:** Hormonbildung reduziert, ACTH kann steigen (bei direkter Bestrahlung)
- **Herz:** sehr strahlenresistent, keine EKG Veränderungen, bei Dosen über 5000 R Myofibrosen gesteigert

Biologische Wirksamkeit verschiedener Strahlungen

Strahlungsart	Wichtung
Photonen, Elektronen, Myonen, X-Ray und γ	1
Protonen	5
Neutronen < 10 keV und > 20 MeV	5
Neutronen 10 – 100 keV und 2 – 20 MeV	10
Neutronen 100 keV – 2 MeV	20
Alphateilchen, schwere Kerne, Spaltfragmente	20

Tabelle: [1]

Verteilung der Strahlung im erdnahen All

Strahlungsart	relative Verteilung
Protonen	93%
Alphateilchen	6%
schwere Kerne und Gammastrahlung	1%

Tabelle: [1]

Typ	Zusammensetzung	Dosis
1 Jahr Meereshöhe	gemischt	0,3 - 2,0 mSv
Thorax Röntgen	Photonen	0,1 mSv
Strahlentherapie	Photonen	Bis 80 Sv
SPE (Raumflug) (Solar particle event)	Protonen	Bis 5 Sv
Flugpersonal (11 km Höhe)	gemischt	$\geq 2,5$ (bis 50) mSv / a
Kosmische Strahlung (Raumflug)	85% Protonen, 12% He-Kerne, 2% schwere Kerne, 1% Elektronen	500 mSv / a
1 Jahr 1600 m Shuttle – Flug 8 Tage		2 mSv
5 Monate ISS		5,3 mSv
Flug zum Mond		180 mSv
Flug zum Mars		11 mSv
Marsoberfläche		500 mSv/a
		120 mSv/a

Tabelle: Ionisierende Strahlung

Dosis	Beispiele zum Vergleich	Wirkungen der Strahlung
bis 0,5 mSv	Jährliche Strahlendosis aus dem All	-
bis 1,5 mSv	Tägliche Dosis, die ein Astronaut frei im erdnahen All erhält	-
bis 2 mSv	Jährliche künstliche Strahlendosis insgesamt, die durchschnittlich ein Bundesbürger erhält (z.B. durch Röntgenstrahlen)	-
9 mSv	Gesamtdosis, die ein Astronaut von der Apollo-17-Besatzung während des Mondfluges erhielt (302 h Flugdauer)	tödliches Krebsrisiko: + 0,5 je 1000 Menschen das gewöhnliche tödliche Krebsrisiko liegt in der BRD bei 80 je 1000 Menschen in 30 Jahren

Dosis	Beispiele zum Vergleich	Wirkungen der Strahlung
20 mSv	Jährliche Grenzdosis in Deutschland	tödliches Krebsrisiko: +1 je 1000 Menschen
bis 50 mSv	Spitzenwert der stündlichen Dosis im Zentrum des äußeren Strahlungsgürtels (Van-Allen) Erhielt die Besatzung von Salut 6 während ihres Fluges (4700 h Flugdauer, 55 mSv)	tödliches Krebsrisiko: +2,5 je 1000 Menschen
bis 200 mSv	Spitzenwert der stündlichen Dosis im Zentrum des inneren Strahlungsgürtels (Van-Allen)	tödliches Krebsrisiko (extrapoliert): +10 je 1000 Menschen

Dosis	Beispiele zum Vergleich	Wirkungen der Strahlung
bis 400 mSv	maximal zulässige Dosis der Lebensarbeitszeit in Deutschland und auch der Astronauten der NASA	tödliches Krebsrisiko (extrapoliert): +20 je 1000 Menschen
bis 500 mSv	erhielten 30.000 mit Aufräumarbeiten Beschäftigte in Tschernobyl Spitzenwert der stündlichen Dosis, die ein Astronaut frei im erdnahen All während erhöhter Sonnenaktivität (Flares) erhalten könnte	kaum unmittelbar nachteilige Wirkungen feststellbar, Schwächung des Immunsystems tödliches Krebsrisiko (extrapoliert): +25 je 1000 Menschen

Dosis	Beispiele zum Vergleich	Wirkungen der Strahlung
bis 1 Sv	Hiroshima-Atombombe in 2000 m Entfernung (In dieser Entfernung starben jedoch 70% aller Menschen an der direkten Wirkung der Bombe.)	verändertes Blutbild, Hautrötungen, vereinzelt Übelkeit, Erbrechen, sehr selten Todesfälle tödliches Krebsrisiko (extrapoliert): +50 je 1000 Menschen
bis 2 Sv	Hiroshima-Atombombe in 1500 m Entfernung (In dieser Entfernung starben jedoch 90% aller Menschen an der direkten Wirkung der Bombe.)	Knochenmarkschädigung, Erbrechen, Übelkeit, etwa 20% Sterblichkeit
bis 4 Sv	Jahresdosis der geringer belasteten Gebiete im 30 km Umkreis des Reaktors in Tschernobyl	sehr schlechtes Allgemeinbefinden, Blutbildung stark gestört, stark erhöhte Infektionsbereitschaft, 50%ige Sterblichkeit

Dosis	Beispiele zum Vergleich	Wirkungen der Strahlung
ab 7 Sv	Hiroschima-Atombombe in 1000 m Entfernung (In dieser Entfernung starben jedoch fast alle Menschen an der direkten Wirkung der Bombe.)	fast 100%ige sterblichkeit
ab 10 Sv	Jahresdosis der stark be- lasteten Gebiete im 30 km Umkreis des Reaktors in Tschernobyl.	Einige direkt betroffene An- gestellte in Tschernobyl er- hielten bis zu 13 Sv Schädi- gung des ZNS, Lähmungen 100%ige Sterblichkeit
> 100 Sv		sofortiger Tod

Tabelle: [1]

Tschernobyl [3]



Abbildung: Cs 137 Kontamination in Curie/m²

Tschernobyl – Strahlung

- größte Freisetzung innerhalb der 1. 10 Tage
- 218 000 km² mit 37 000 Becquerel Cs 137 m²
- in Europa 40% der Gesamtfläche kontaminiert

Tschernobyl – strahlenexponierte Personengruppen

- 200 000 Aufräumarbeiter („Liquidatoren“)
- 1 000 erhielten 2 – 20 Gy innerhalb des 1. Tages
- Evakuierten mittlerer Dosiswert von 17 mSv
- Akute Strahlenkrankheit bei 237 Personen vermutet, bei 134 Personen bestätigt
- davon 28 im Jahr 1986 und weitere 19 in den Jahren 1987 bis 2004 verstorben
- bis 2065 in Europa mit ungefähr 16.000 Fällen von Schilddrüsenkrebs und 25.000 Fällen von anderen Krebsarten als Folge der Tschernobyl-bedingten Strahlenbelastung

Tschernobyl – strahlenexponierte Personengruppen

Von 400 unmittelbar betroffenen Kraftwerksangehörigen erhielten, wie in der Tabelle ersichtlich, 237 Personen effektive Dosen im Bereich von unter 2 Sv bis zu 16! Sv.

In der etwa 4 km westlich gelegenen Kleinstadt Pripyat, mit ca. 45 000 Einwohnern, lag die Dosis am Tag nach dem Unfall bei ca. 6 mSv pro Stunde, so dass die Menschen evakuiert werden mussten. Die schätzungsweise insgesamt 600.000 auch später an Aufräumarbeiten beteiligten Menschen (Liquidatoren) sind Strahlendosen von 0,01 Sv bis 0,5 Sv ausgesetzt worden, eine Dosis von 0,5 Sv sollen dabei etwa 30.000 davon erreicht haben. In den stärker kontaminierten Regionen der Ukraine, Weißrusslands und Russlands sind die dort lebenden Menschen immer noch jährlichen Strahlendosen von 6-11 mSv ausgesetzt, [4]

Number of detected cancers in the liquidators' cohort for the period of 1993-2003

Tumor Site	Total	Men	Woman
All sites	3857	3026	831
Stomach	408	338	70
Colon	155	127	28
Lung	540	523	17
Kidney	181	165	16
Urinary bladder	166	160	6
Thyroid	255	133	122
Breast	140	-	140

Effect of A-Bomb Radiation on the Human Body.

Shigematsu I. at all.

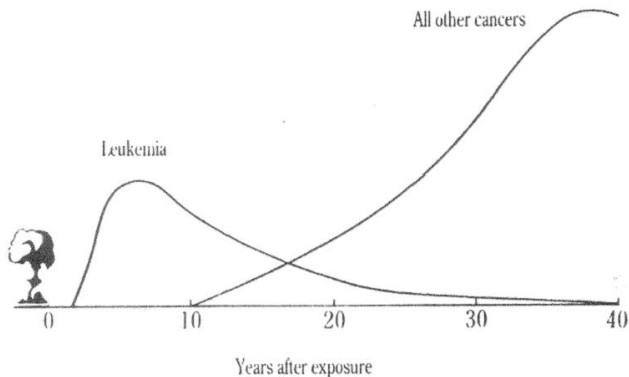
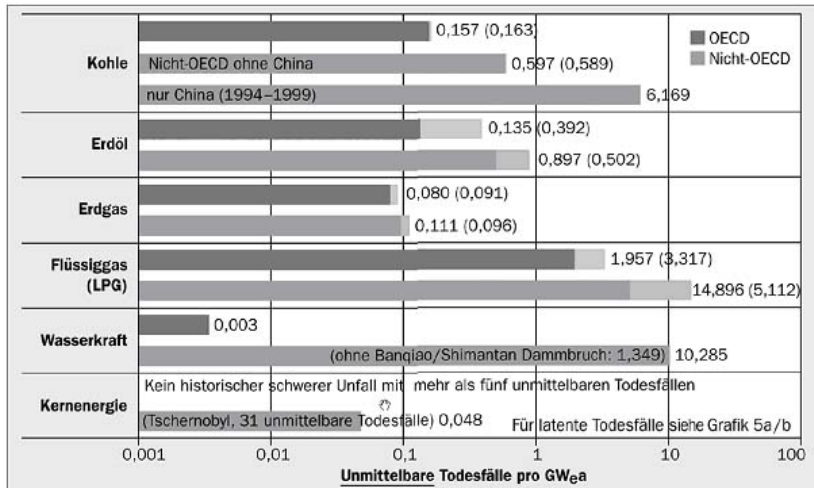
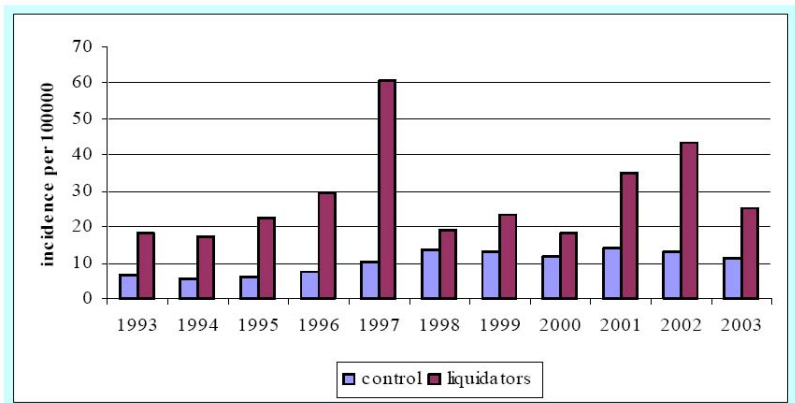


Figure 2 Incidence of radiation-induced cancer after atomic bombing



Dynamics of thyroid gland cancer incidence among Chernobyl liquidators and control population



Lebensmittelproben

- Cäsium 137 (durch Reaktorunfall)
- Kalium 40 (natürliche Aktivität)

Cs 137-Aktivitätskonzentrationen in der Grazer Trinkvollmilch

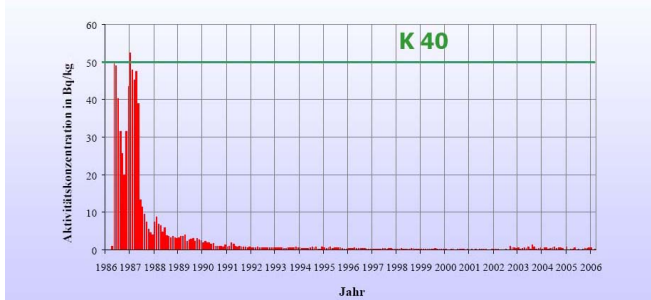


Abbildung: Monatsmittelwerte der Aktivitätskonzentrationen von Cs 137 in der **Trinkvollmilch** eines Supermarktes aus der Stadt Graz angegeben. Seit September 2002 liegen die Aktivitätskonzentrationen zwischen 0,1 und 1,3 Bq/kg. Es ist auch die weitgehend konstante Aktivitätskonzentration von K 40 bei ca. 50 Bq/kg eingezeichnet. [6]

Cs 137-Aktivitätskonzentrationen in Eierschwammerln

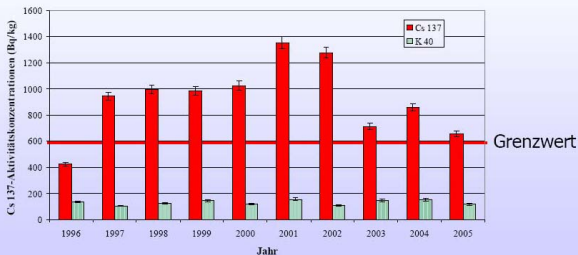


Abbildung: Verlauf Aktivitätskonzentrationen von Cs 137 in **Eierschwammerln** aus einem Wald im Bezirk Deutschlandsberg dargestellt. Es ist keine eindeutige Abnahme der Cs 137-Aktivitätskonzentrationen erkennbar. Die Aktivitätskonzentrationen von Cs 137 lagen im Jahr 2005 noch immer über den Grenzwert von 600 Bq/kg. [6]

Lagernde Atombombe

- 1 kg reines U 235 Meter Abstand etwa $1,5 \mu\text{Sv}$ pro Stunde
- Plutonium Pu 239 ist praktisch ein reiner Alphastrahler
- 3% sind Pu 240 → *Neutronenstrahlung* $1,3 \mu\text{Sv}$ pro Stunde, Gammastrahlung etwa $0,03 \mu\text{Sv}$ pro Stunde, insgesamt also $1,33 \mu\text{Sv}$ pro Stunde
- pro Jahr $2,66 \text{ mSv}$ (max. 20 mSv pro Jahr)

Atombombenexplosion

Zerstörungszonen Allgemeines	Wirkungen auf den Menschen
Zone 1 Extreme Hitze bis hin zur Verdampfung von Metallen; Überdruck: 1,7 bar; Windgeschwindigkeit: 500 km/h	Nahezu 100 % Todesfälle
Zone 2 Schwerste Zerstörungen; sehr starke Hitze; Überdruck: 1,1 bar; Windgeschwindigkeit: 450 km/h	Weit über 90 % Todesfälle; Der Rest schwerste Verletzungen und Verbrennungen
Zone 3 Schwere Beschädigungen; Starke Hitzewelle; Überdruck: 0,6 bar; Windgeschwindigkeit: 400 km/h	Weit über 60 % Todesfälle; ca. 40 % schwerste Verletzungen einschliesslich Verbrennungen
Zone 4 Starke Hitzewelle; Grossbrände; Überdruck: 0,4 bar; Windgeschwindigkeit: 220 km/h	Todesfälle 50 %, über 45 % Schwerstverletzte
Zone 5 Starke Beschädigungen durch Hitze und Druck; Überdruck: 0,2 bar; Windgeschwindigkeit: 160 km/h	15 % Todesfälle; über 50 % teilweise Schwerstverletzte, viele durch Verbrennungen

Atombombenexplosion

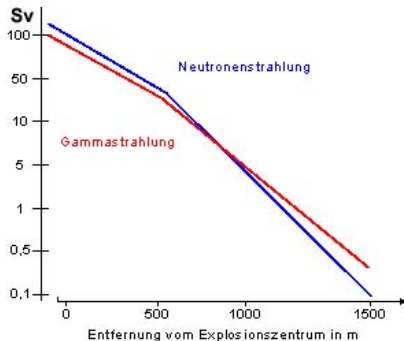








Abbildung: zu erwartende Dosis in Sievert bei der Explosion einer kleineren A-Bombe mit der Sprengkraft von rund 10 kt TNT

-  <http://www.mondlandung.pcdl.de/Index.htm>
-  Klinische Pathophysiologie: Siegenthaler, Thieme (5. Aufl.)
-  http://de.wikipedia.org/wiki/Katastrophe_von_Tschernobyl
-  <http://www.onmeda.de/lexika/strahlenmedizin/tschernobyl.html>
-  Incidence of malignant tumors among different groups of Belarusian population after the Chernobyl accident: A.E. Okeanov, E.Y. Sosnovskaya
-  Aktivitätskonzentrationen von Radiocäsium und Kalium 40 in ausgewählten Lebensmitteln der Steiermark Dipl.-Ing. Dr. Mag. Elke Pichl Strahlenmesstechnik-Graz

stefan.sattler@stud.meduni-graz.at