

Radioaktivität und Strahlungsmessung

Prof. Dr. Andreas Türlér
Labor für Radio- und Umweltchemie
Universität Bern und Paul Scherrer Institut

- Aufbau des Atoms
- Radioaktivität und radioaktive Zerfallsarten
- Halbwertszeit
- Kernspaltung und Kernreaktor
- Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit Materie
- Strahlenschutz
- Dosis und Dosisleistung
- Exposition, Kontamination und Inkorporation
- Krebsrisiko
- Bewertung der Situation in Fukushima

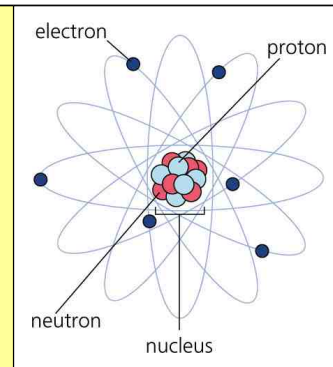
Das Atom besteht aus
einem **positiv** geladenen Kern
(**Protonen**) und (**Neutronen**) und
einer **negativ** geladenen Hülle (**Elektronen**)

Die Nukleonen (**Protonen** + **Neutronen**) werden
durch die Kernkraft aneinander gebunden!

Die **Protonen** (positive Ladung) stoßen sich ab! (Coulombkraft)

Der Kerndurchmesser ist sehr klein (10^{-15} m)
im Vergleich zum Atomdurchmesser (10^{-10} m)

Der Kern ist demnach extrem massereich, d.h. extrem dicht!
1 Würfelzucker Kernmaterie: ca. $2 \text{ cm}^3 = 400$ Millionen Tonnen!



Die Anzahl der **Protonen** und **Neutronen** in
einem Kern bestimmt, wie stark die
Bindung der Nukleonen ist:

Ideale Mischung:
⇒ stabile Kerne
⇒ nicht radioaktiv!

Nicht ideale Mischung:
⇒ instabile Kerne
⇒ radioaktiv!



Radioaktive Umwandlung!

265 stabile Nuklide!

> 2800 instabile Nuklide!

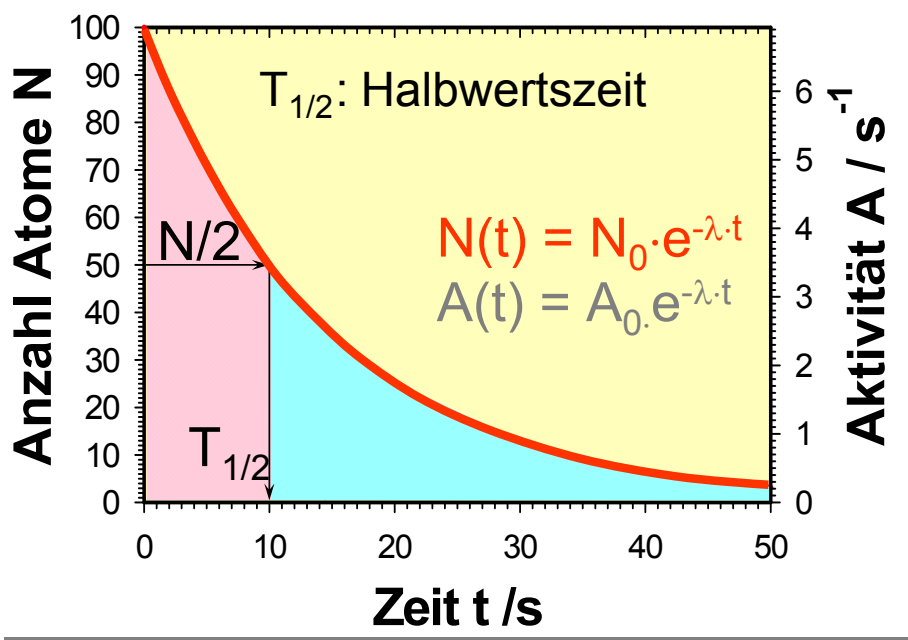
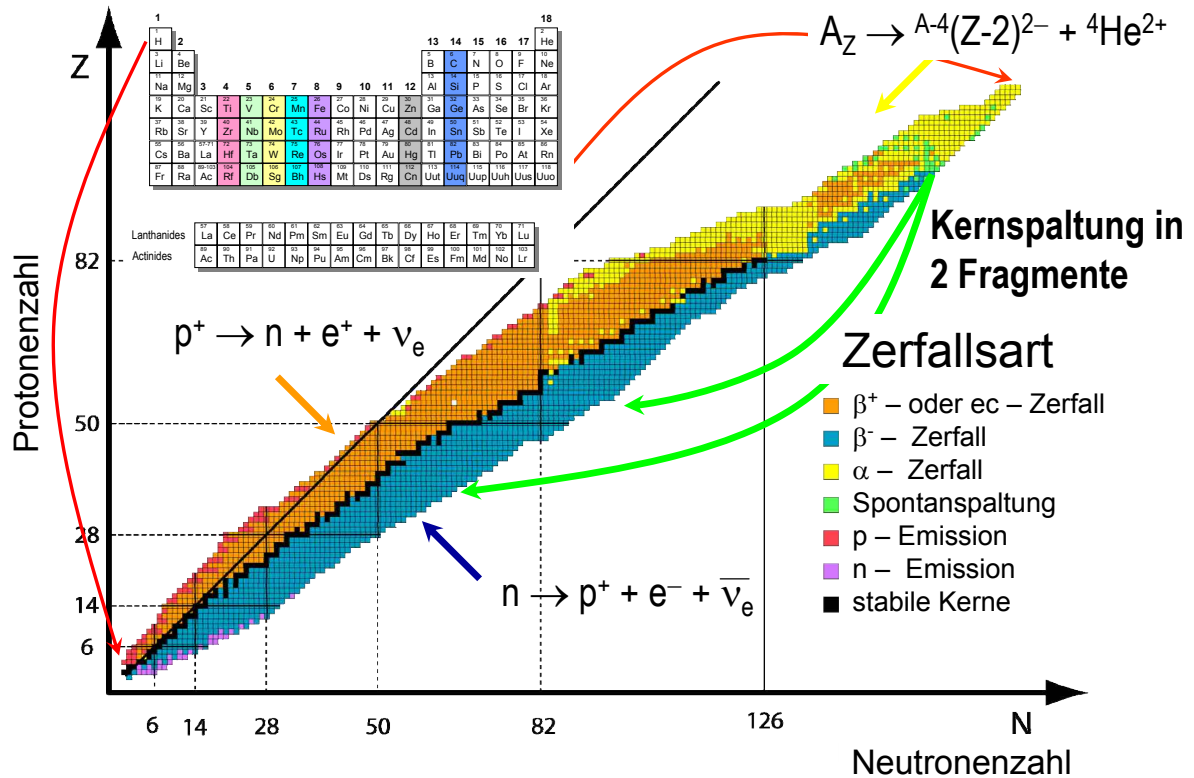


z.T. chemisch toxisch:
Arsen, Antimon, Blei, ...



alle radiotoxisch:
(stark unterschiedlich)

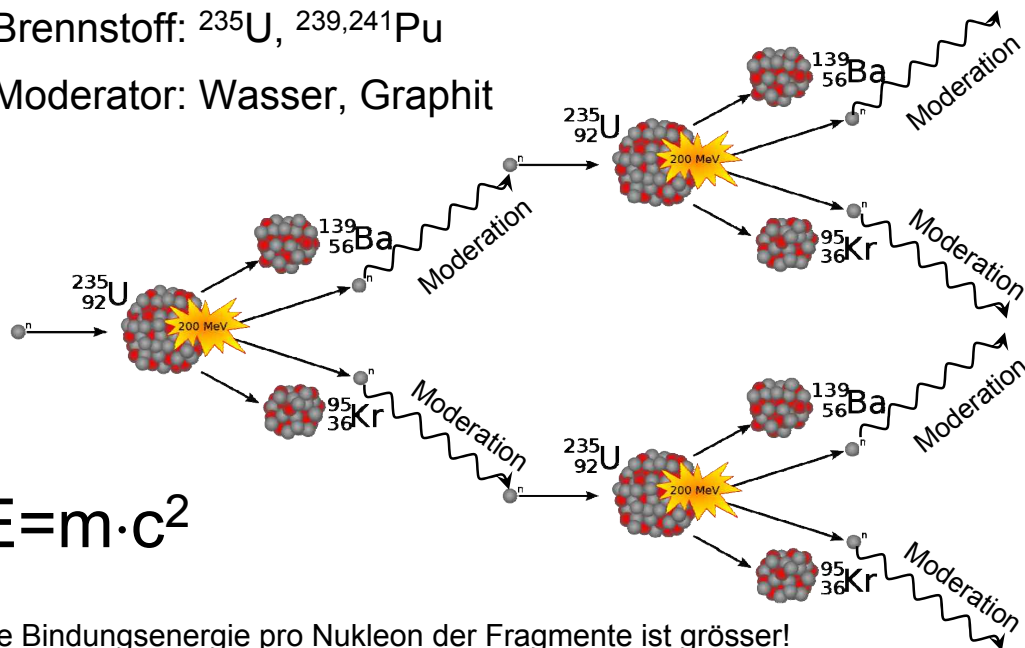




z.B. ^{131}I ($T_{1/2} = 8.02 \text{ d}$); ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30.17 \text{ a}$); ^{239}Pu ($T_{1/2} = 24110 \text{ a}$)

Brennstoff: $^{235}_{92}\text{U}$, $^{239,241}_{94}\text{Pu}$

Moderator: Wasser, Graphit

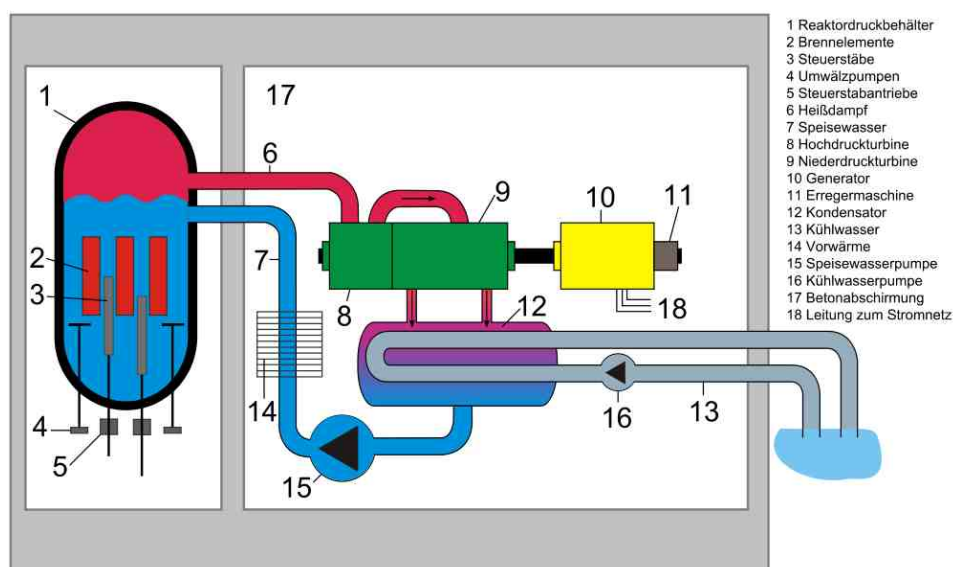


$$E = m \cdot c^2$$

die Bindungsenergie pro Nukleon der Fragmente ist grösser!

Energieproduktion: kinetische Energie der Fragmente $\Rightarrow$ Wärme
radioaktiver Zerfall der Fragmente $\Rightarrow$ Wärme

<http://de.wikipedia.org/wiki/Kernspaltung>



Kontrolle der Kettenreaktion durch Kontrolle der Neutronen
 $\Rightarrow$ Steuerstäbe aus neutronenabsorbierendem Materialien!

<http://de.wikipedia.org/wiki/Kernkraftwerk>

Nuklid:	Teilchen:	Absorber:	Effekt:
^{239}Pu	α ($^4\text{He}^{2+}$)	1 Blatt Papier	sehr starke Ionisation
^{137}Cs	β (Elektron)	4mm Plexiglas	starke Ionisation
^{137}Cs	γ (Photon)	10 cm Blei	schwache Ionisation

<http://de.wikipedia.org/wiki/Alphastrahlung>

Strahlenschutzgesetz (StSG)

814.50

vom 22. März 1991 (Stand am 1. Januar 2007)

*Die Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft,
gestützt auf die Artikel 24^{quinqies}, 24^{septies}, 27^{sexies}, 64 und 64^{bis}
der Bundesverfassung^{1,2}
nach Einsicht in die Botschaft des Bundesrates vom 17. Februar 1988³,
beschliesst:*

1. Kapitel: Allgemeine Bestimmungen

Art. 1 Zweck

Dieses Gesetz bezweckt, Mensch und Umwelt vor Gefährdungen durch ionisierende Strahlen zu schützen.

Strahlenschutzverordnung (StSV)

814.501

vom 22. Juni 1994 (Stand am 1. Januar 2011)

Der Schweizerische Bundesrat,
gestützt auf Artikel 47 Absatz 1 des Strahlenschutzgesetzes (StSG)
vom 22. März 1991¹,
verordnet:

1. Kapitel: Allgemeine Bestimmungen und Grundsätze des Strahlenschutzes

Die Energiedosis D beschreibt die Wirkung der Strahlung:

$$D = dE/dm \quad [D] = \text{Gy} = \text{Gray} \quad 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

1 Joule = Energie die 1 Gramm Wasser von 15 °C um ca. 0,239 Grad erwärmt

Die Äquivalentdosis H beschreibt die Wirkung
der Strahlung auf lebende Materie:

$$H = D \cdot q \quad [H] = \text{Sv} = \text{Sievert}$$

Der Bewertungsfaktor q hängt von der
Ionisierungsstärke der Strahlung ab:

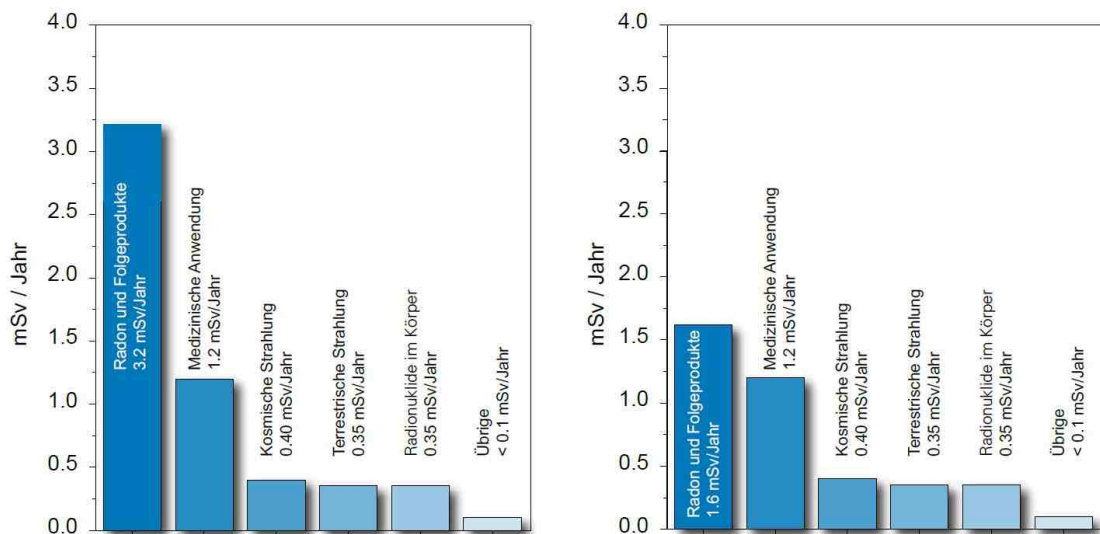
Emittierte Strahlung	Bewertungsfaktor
γ, e^-	1
n, p	5-20
α	20

Die effektive Dosis E beschreibt die
Wirkung der Strahlung auf Organe:

$$E = H \cdot w \quad [E] = \text{Sv} = \text{Sievert}$$

Der Bewertungsfaktor w ist für jedes Organ verschieden!

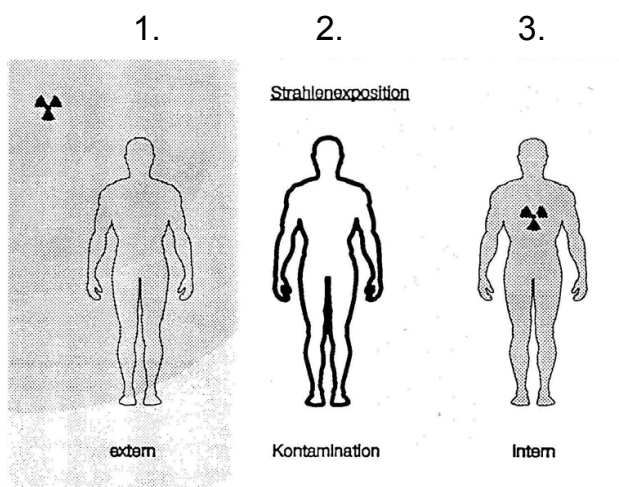
Durchschnittliche Strahlendosen der Schweizer Bevölkerung



Figur 1:
Durchschnittliche Strahlendosen der Schweizer Bevölkerung in [mSv pro Jahr pro Person]
(links: neue durchschnittliche «Radondosis» - rechts: bisherige Abschätzung der «Radondosis»).

Jahresbericht Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz 2009 (<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00045/11472/index.html?lang=de>)

Man unterscheidet zwischen drei Arten der Exposition



1. Externe Bestrahlung:

- Durch offene und geschlossene Quellen
- γ -, Röntgen- und harte β -Strahlen

2. Hautkontamination:

- Durch flüssige und staubförmige Quellen

3. Inkorporation:

- Wenn feste oder gasförmige Stoffe in den Körper gelangen

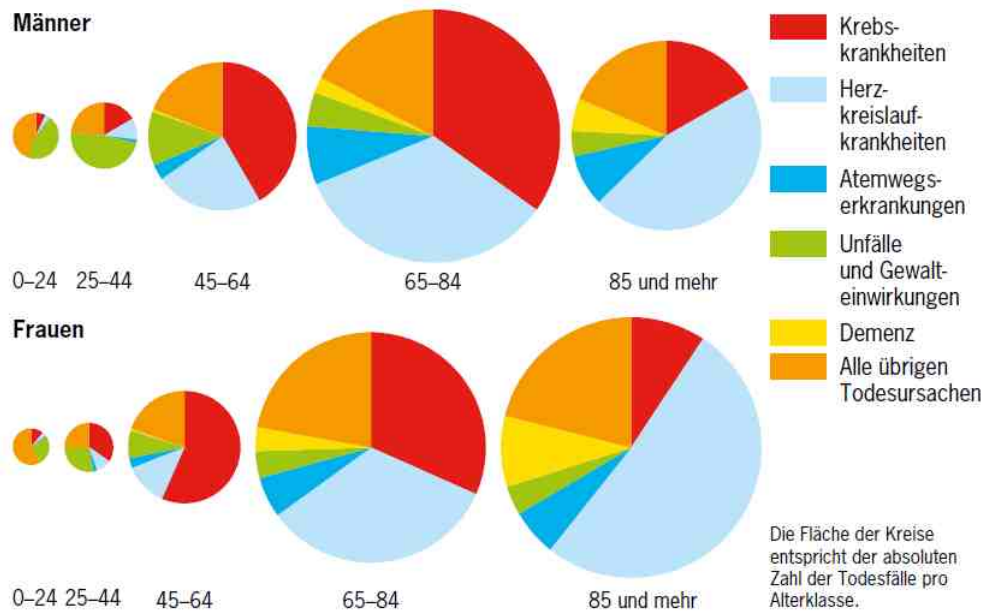
Dosis	Grenzwert
Allgemeine Bevölkerung (ohne medizinische Anwendungen und natürliche Exposition)	1 mSv/Jahr
Beruflich strahlenexponierte Personen über 18 Jahre	20 mSv/Jahr
Beruflich strahlenexponierte Personen Organdosis – Haut, Hände, Füße	500 mSv/Jahr
Ganzkörperdosis zur Bewältigung von Störfällen (zur Rettung von Menschenleben, i.e. Fukushima)	1 x 250 mSv

Die Dosisgrenzwerte für die allgemeine Bevölkerung sind **relativ tief!**
Die Behörde geht aber von einer lebenslangen Bestrahlung aus!

Tätigkeit, Anwendung, Ereignis	Dosis
Computertomographie (CT) Abdomen	10 mSv
Flug Zürich – Los Angeles und zurück	0.15 mSv
20 Zigaretten pro Tag	0.3 mSv/Jahr
Folgedosis des Reaktorunfalls von Tschernobyl im Durchschnitt für die Schweizer Bevölkerung (über die letzten 20 Jahre)	0.5 mSv
Bereits akkumulierte Dosis eines Kindes zum Zeitpunkt der Geburt	1 mSv

Männer: 30%, Frauen: 23% (über alle Altersgruppen)

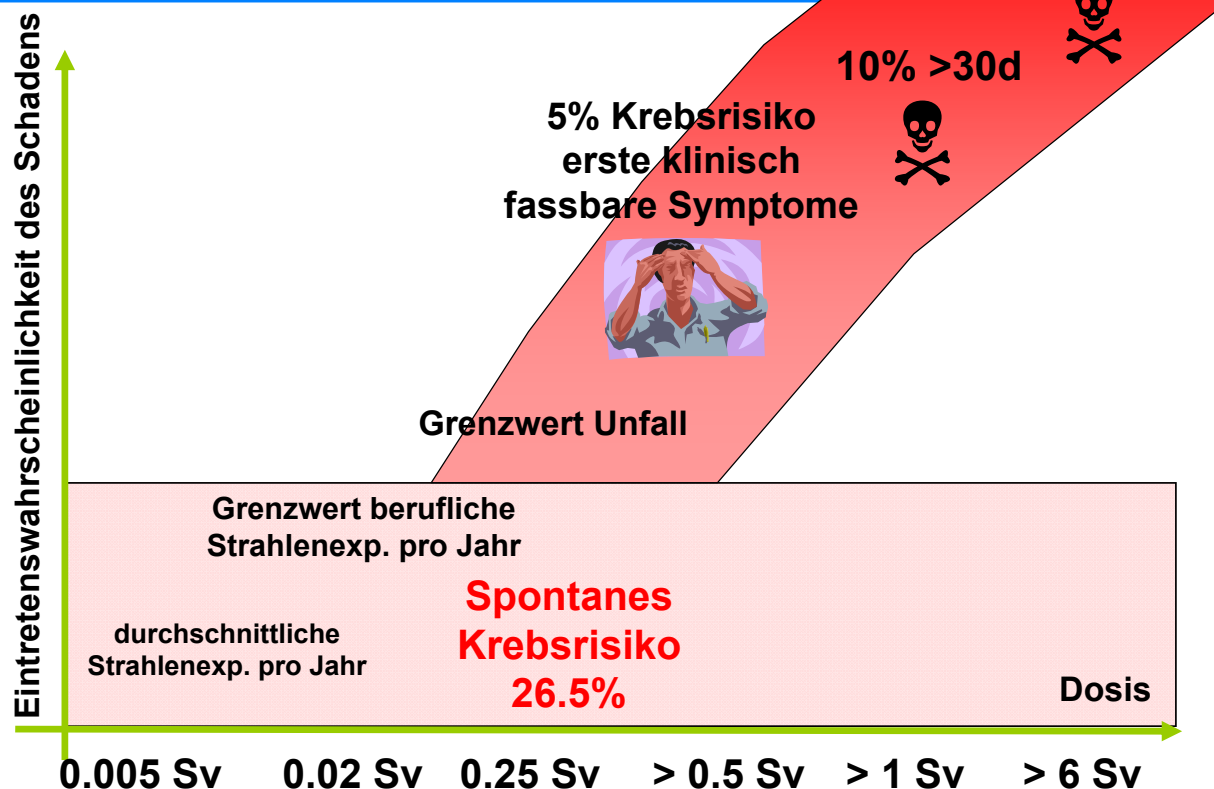
Anteile der häufigsten Todesursachen nach Altersklasse 2007



Quelle: BFS: TU

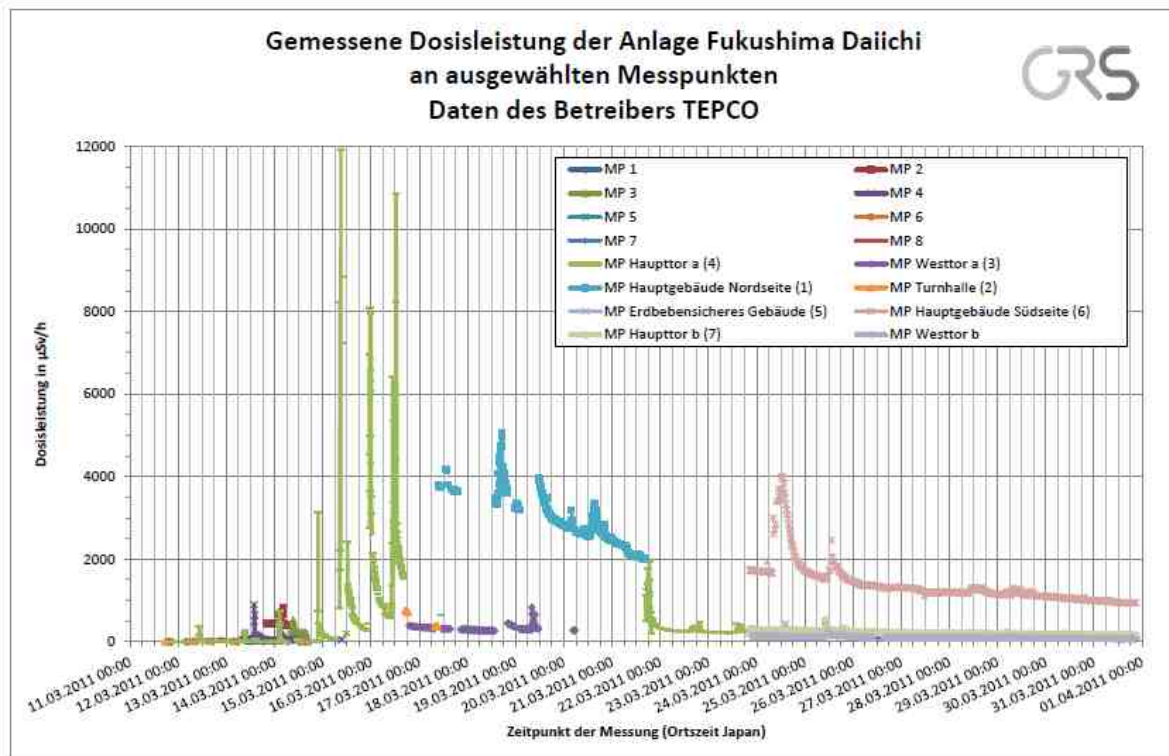
© BFS

Folgen hoher Strahlendosen



- In Folge eines starken Erdbebens, erfolgt eine Schnellabschaltung der Reaktoren 1-3 in Fukushima Daiichi. Reaktoren 4 – 6 befanden sich in Revision. Infolge des Ausfalls des Stromnetzes startet die Notstromgruppe. Alle Brennelemente von Reaktor 4 sind am 30.11.2010 in das Abklingbecken transferiert worden.
- In Folge eines gewaltigen Tsunami (13 m!) wird die Notstromgruppe überflutet und ausser Betrieb gesetzt. Die Stromversorgung der Kühlung der Reaktoren wird mit Batterien weitergeführt. Nach mehreren Stunden sind die Batterien erschöpft. Die Kühlung der Reaktoren und der Abklingbecken fällt aus.
- Mit dem Ausfall der Kühlung steigt der Druck und die Temperatur in Block 1-3 stark an (Nachzerfallswärme!). Die Brennelemente werden in gewissen Bereichen nicht mehr gekühlt. Durch die Überhitzung der Brennelemente setzt eine signifikante Wasserstoffentwicklung ein (chemische Reaktion des Wassers mit dem Zirkoniumcladding der Brennelemente). Der Überdruck muss durch ein Venting reduziert werden (über Filter). Dabei scheinen erhebliche Mengen an Wasserstoff in das Reaktorgebäude zu entweichen.
- Es kommt zu mehreren Wasserstoffexplosionen. Dabei gelangt in signifikantem Ausmass radioaktives Material in die Umwelt und kontaminiert die Umgebung im Umkreis von mindesten 20-30 km. Der Ausfall der Kühlung führt vermutlich zu partiellen Kernschmelzen und auch zur Beschädigung von Brennelementen in den Abklingbecken.
- Der Betreiber verliert die Kontrolle über die Anlage und muss zu nie zuvor getesteten Notmassnahmen greifen, wie der Einspeisung von Meerwasser in die Anlage und Kühlung der Reaktoren und Brennelemente mit Wasserwerfern und Betonpumpen.

- ! Die Behörde erhöht den Dosisgrenzwert für TEPCO Mitarbeiter auf 250 mSv zwecks Bewältigung der Krise.
- ? Ist das zulässig?
- ⇒ *Der Dosisgrenzwert zur Bewältigung der Krise entspricht internationalen Normen!*
- ! Am 24.03.11 wurden drei Arbeiter beim Kabellegen im Maschinenhaus bei Block 3 Strahlungsdosen von mehr als 170 mSv ausgesetzt. Bei zwei von ihnen wurde bestätigt, dass Haut an den Beinen kontaminiert wurde. Da auch nach der Dekontamination eine Verbrennungsverletzung durch Beta-Strahlen möglich erschien, wurden sie in ein Krankenhaus eingeliefert. Damit sind bislang 17 Arbeiter einer Strahlungsdosis von mehr als 100 mSv ausgesetzt worden.
- ? Werden diese Arbeiter qualvoll sterben oder Krebs entwickeln (Kamikaze Einsatz)?
- ⇒ *Sofern die angegebenen Dosen richtig sind, besteht kein akutes Sterberisiko. Sofern sichergestellt wird, dass die Arbeiter keiner weiteren Strahlung mehr ausgesetzt sind und kontinuierlich ärztlich überwacht werden, besteht die Hoffnung (aber nicht die Gewissheit) dass sie keine gravierenden gesundheitlichen Folgen davon tragen werden. Ein leicht erhöhtes Krebsrisiko kann aber nicht ausgeschlossen werden (ev. vergleichbar mit dem Risikofaktor Rauchen). Da der Einsatz der Rettung von Menschenleben vieler (ev. Millionen) diene, bestand eine Rechtfertigung der Strahlenexposition.*



<http://fukushima.grs.de/>

- Gemessen am radioaktiven Inventar das sich noch in der Anlage befindet, ist bisher nur ein relativ geringer Anteil in die Umwelt emittiert worden. Dies sind jedoch trotzdem **signifikante Mengen!**
- Das persönliche Schicksal von über 200'000 evakuierten Menschen ist derzeit offen! Auch ausserhalb der Evakuierungszone von 20-30 km können lokale Hotspots (d.h. lokal stark erhöhte Radioaktivität) auftreten!
- Eine erste Bewertung, ob und wann die evakuierten Gebiete wieder bewohnbar sind müssen detaillierte und sehr aufwändige Messkampagnen ergeben. Erst auf Grund dieser Daten, d.h. einer Gesamtbetrachtung der radiologischen Situation, kann ev. eine Rückkehr in die kontaminierten Gebiete erlaubt werden. Für Tschernobyl wurde eine lebenslange Folgedosis von 350 mSv als Kriterium für die dauerhafte Errichtung von Sperrgebieten zu Grunde gelegt (Güterabwägung!).

• Persönliche Zwischenbewertung:

Vermutlich mit viel Glück im Unglück ist Japan an einer grossen Nuklearkatastrophe vorbei geschrammt. Da der Grossraum Tokio relativ nahe liegt, wären die Folgen einer kompletten Zerstörung der Anlage unter Emission des Inventars verheerend gewesen.

Die massive Kritik an den getroffenen Massnahmen kann ich nur bedingt teilen. Die Aufarbeitung des Ereignisses wird vermutlich zeigen, dass im Rahmen des Möglichen (d.h. neben der Rettung der Tsunamiopfer und mit einer z.T. komplett zerstörten Infrastruktur), die Massnahmen vernünftig und zielführend waren.

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Hinweis: Die präsentierten Daten basieren auf eigenen Internetrecherchen. Die Zuverlässigkeit der Daten konnte nur auf Plausibilität hin überprüft werden. Die Daten stammen von normalerweise zuverlässigen Quellen. Die Bewertung erfolgte aufgrund von Daten aus der Strahlenschutzverordnung. Eigene Rechnungsfehler können nie ganz ausgeschlossen werden. Die Bewertung gibt nur Eintretenswahrscheinlichkeiten von Folgeschäden an.

Individuelle Schicksale auf Grund von Strahlenexposition können nicht vorausgesagt werden!

Sollte die eigene Bewertung von offiziellen Stellungnahmen des PSI abweichen, so gilt diejenige des PSI.