



ÖVS/ÖGMP Frühjahrstagung  
**Aktuelle Aufgaben im Strahlenschutz**  
**Vom Routinebetrieb bis zur Nuklearkatastrophe**  
19. Mai 2011, Salzburg



# Unfallbedingte Freisetzung von Radionukliden – von Majak bis Tschernobyl

*Franz Josef Maringer*

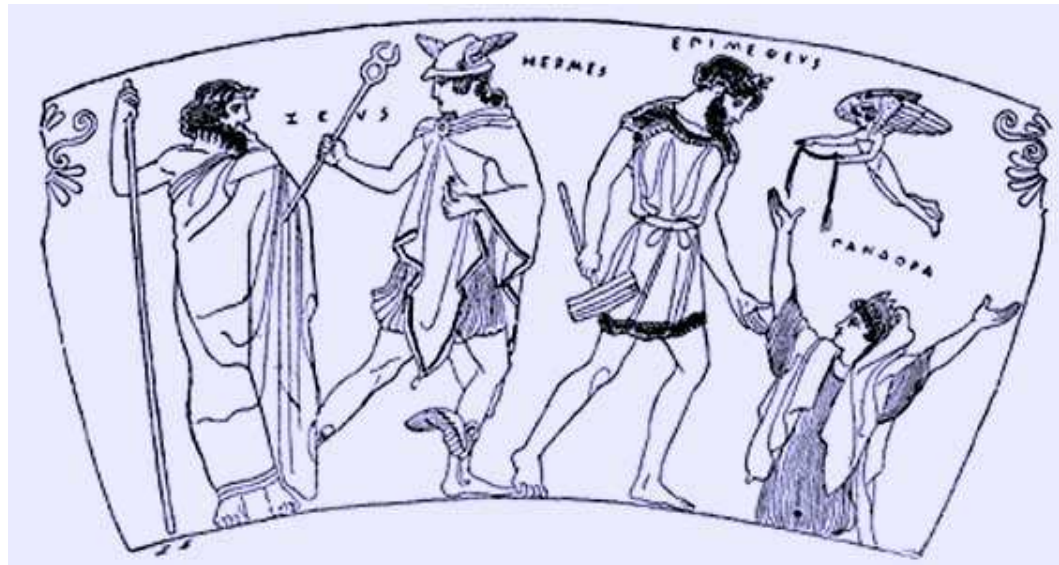


BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen



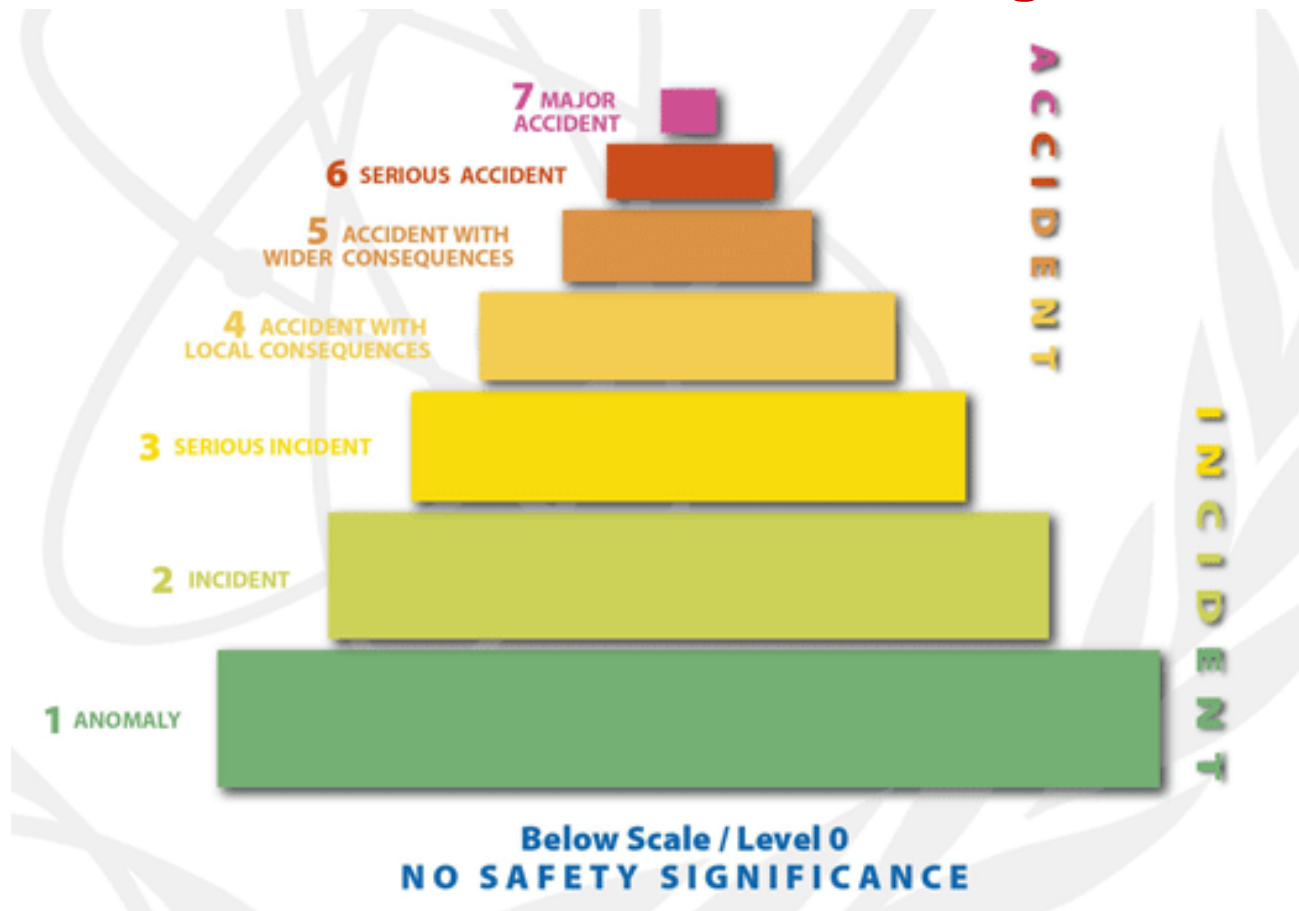
## Der rote Faden ....

- Klassifizierung von Nuklearunfällen
- Begriffe
- Nuklearunfälle 1945 bis 2011
- Einige typische Unfälle im Detail
- Entwicklung - Weltbevölkerung und Energiebedarf



# INES

## The International Nuclear and Radiological Event Scale

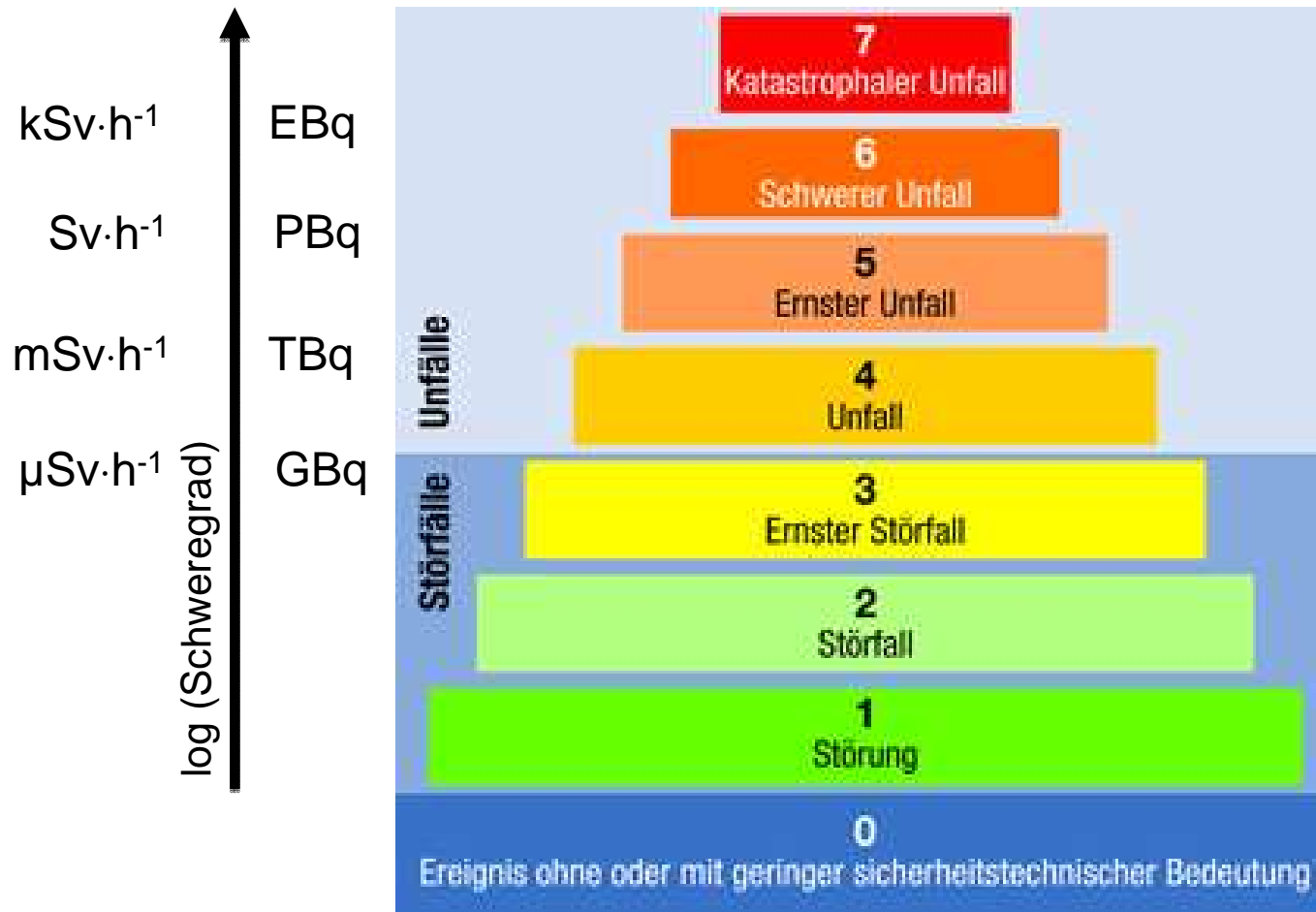


<http://www-ns.iaea.org/tech-areas/emergency/ines.asp>

**INES User's Manual 2008 Edition (218 Seiten!)**

# INES

## The International Nuclear and Radiological Event Scale



<http://www.grs.de/content/ines-information-auf-einen-blick>

## INES – Kriterien für die Einstufung

- **Auswirkung auf Mensch und Umwelt**
    - Strahlenexposition von Personen
    - Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umwelt
  - **Auswirkung auf radiologische Barrieren und Überwachungsmaßnahmen in Anlagen**
    - Kernbrennstoffschäden
    - ungeplant erhöhte Dosiswerte
    - Ausbreitung signifikanter Mengen radioaktiver Stoffe
  - **Beeinträchtigung der Sicherheitsvorkehrungen**
    - Beeinträchtigung der gestaffelten Sicherheitsvorkehrungen
    - Ausfall/Beschädigung von Sicherheitseinrichtungen/-barrieren
- 
- **Wer stuft ein?** → Betreiber der Anlage → Überprüfung durch nationalen INES-Officer (z.B. BMLFUW) → IAEA → Öffentlichkeit (www)

## Begriffe

- **GAU „größter Auslegungsunfall“**  
Störfall in einem Kernkraftwerk, für dessen Beherrschung die Sicherheitssysteme der Anlage gerade noch ausgelegt sind.  
Außerhalb der Anlage dürfen beim Eintritt des GAU die geltenden Störfallgrenzwerte für die Strahlenbelastung der Bevölkerung nicht überschritten werden.  
Ein GAU entspricht maximal der INES Stufe 4.
- **Super-GAU**  
Störfall, für dessen Beherrschung die Sicherheitssysteme der Anlage nicht mehr ausgelegt sind.  
Ein Super-GAU entspricht den INES Stufen 5 bis 7.

## $^{239}\text{Pu}$

- $^{238}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \longrightarrow ^{239}_{92}\text{U} \xrightarrow[23,5 \text{ min}]{\beta^-} ^{239}_{93}\text{Np} \xrightarrow[2,3565 \text{ d}]{\beta^-} ^{239}_{94}\text{Pu}$
- $T = 24\,100$  Jahre
- Radiotoxizität:  
 50  $\mu\text{g}$  ... tödliche Inhalationsmenge  
 25 mg ... tödliche Ingestionsmenge
- ca. 3000 kg ... Kernwaffentests 1960er-Jahre (Nordhemisphäre)
- ca. 2,6 kg ... Tschernobyl-Freisetzung
- 1 ... 10 Bq/kg in Österreichs Böden

$$a = A/m = 2,3 \cdot 10^{12} \text{ Bq/kg}$$

$$\underline{10 \text{ Bq}} \Leftrightarrow 4,3 \cdot 10^{-12} \text{ kg} = \underline{4,3 \cdot 10^{-6} \text{ mg}} = 4,3 \cdot 10^{-3} \mu\text{g}$$

Stufe	Bezeichnung <i>Original</i>	Auswirkungen außerhalb der Anlage	Auswirkungen innerhalb der Anlage, Beeinträchtigung der Sicherheitsvorkehrungen	Beispiel(e)
0	Ereignis ohne oder mit geringer sicherheitstechnischer Bedeutung <i>Below scale – No safety significance</i>		Keine oder nur sehr geringe sicherheitstechnische Bedeutung	2007: Brand im KKW Krümmel, DE
1	Störung <i>Anomaly</i>		Abweichung vom normalen Betrieb der Anlage (Nichtbehebung der Problemquelle könnte allenfalls zu einem höherstufigen Folgeereignis führen)	1987: KKW Biblis in DE 2009: KKW Cattenom in FR
2	Störfall <i>Incident</i>		Begrenzter Ausfall der gestaffelten Sicherheitsvorkehrungen	1977: Grundremmingen, DE; 1998: Unterweser, DE; 2001: Philippsburg, DE, 2006: Forsmark, SE; 2010: Leibstadt, CH
3	Ernster Störfall <i>Serious incident</i>	Sehr geringe Freisetzung, Strahlenexposition der Bevölkerung in Höhe eines Bruchteils der natürlichen Strahlenexposition	Schwere Kontaminationen und/oder akute Gesundheitsschäden beim Personal Weitgehender Ausfall der gestaffelten Sicherheitsvorkehrungen	1975: Greifswald/Lubmin, DDR; 2005: Freisetzung von Uran und Plutonium in Sellafield, GB; 2011: Fukushima Daini, JP

Daten: <http://de.wikipedia.org/wiki/INES>



Stufe	Bezeichnung <i>Original</i>	Auswirkungen außerhalb der Anlage	Auswirkungen innerhalb der Anlage, Beeinträchtigung der Sicherheitsvorkehrungen	Beispiel(e)
4	Unfall <i>Accident with local consequences</i>	Geringe Frei- setzung (einige 10 bis einige 100 TBq), Strahlenexposition der Bevölkerung etwa in der Höhe der natürlichen Strahlenexposition	Schäden am Reaktorkern/an den radiologischen Barrieren Schwere Kontaminationen und/oder Strahlenbelastung des Personals, die zu akuten Gesundheitsschäden führen kann (Größenordnung 1 Sv)	1977: KKW Bohunice, SK; 1966: KKW Enrico Fermi, USA; 1999: Wiederaufarbeitungs- anlage Tōkai-mura, JP
5	Ernster Unfall <i>Accident with wider consequences</i>	Begrenzte Freisetzung (einige 100 bis einige 1.000 TBq), Einsatz einzelner Katastro- phenschutzmaß- nahmen	Schwere Schäden am Reaktorkern/an den radiologischen Barrieren	1957: Brand des Kernreaktors der Produktionsstätte für Plutonium Windscale/Sellafield, GB (Schätzungen: 1.800 ..... 47.000 TBq); 1969: Kernschmelze im Kaver- nen-Reaktor in Lucens, CH; 1979: KKW Three Mile Island (Harrisburg), USA; (750 TBq) 1982: KKW Tschernobyl / Block 1 (UdSSR / Ukraine); 1987: Goiânia-Unfall (Diebstahl eines Strahlentherapiegeräts) (44 TBq)

Stufe	Bezeichnung <i>Original</i>	Auswirkungen außerhalb der Anlage	Auswirkungen innerhalb der Anlage, Beeinträchtigung der Sicherheitsvorkehrungen	Beispiel(e)
6	Schwerer Unfall <i>Serious accident</i>	Erhebliche Freisetzung (einige 1.000 bis einige 10.000 TBq), voller Einsatz der Katastrophenschutzmaßnahmen		1957: Kyschtym/Majak-Unfall, UdSSR / Russland (Schätzungen: 400.000 ..... 8.900.000 TBq)
7	Katastrophaler Unfall <i>Major accident</i>	Schwerste Freisetzung, Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt in einem weiten Umfeld, Erhebliche Freisetzung (Äquivalent von > einigen 10.000 TBq von <sup>131</sup> Iod), Gesundheitliche Spätschäden über große Gebiete, ggf. in mehr als einem Land		1986: Katastrophe von Tschernobyl, UdSSR / Ukraine (630.000 TBq); 2011: Nuklearkatastrophe von Fukushima, JP (ca. 60.000 TBq bis zum 12. April 2011)

## (Nicht komplette) Liste von Nuklearunfällen (INES $\geq 4$ )

wann, wo	was	INES
21. August 1945 Los Alamos, New Mexico, USA	überkritische Pu-Masse (6 kg), 1 unmittelbarer Strahlentodesfall	4
21. Mai 1946 Los Alamos, New Mexico, USA	überkritische Pu-Masse, 1 unmittelbarer Strahlentodesfall	4
12. Dez. 1952, Chalk River, Kanada	partielle Kernschmelze im NRX-Forschungs-Reaktor, Knallgasexplosion, ~100 TBq in Atmosphäre, ~400 TBq in $4 \cdot 10^6$ Liter Wasser in Sickergrube	5
29. November 1955, Idaho Falls, Idaho, USA	partielle Kernschmelze im Forschungsreaktor, kein Personenschaden	4

wann, wo	was	INES
29. September 1957, Kyschtym / Majak, UdSSR	Wiederaufbereitungsanlage, Pu-Produktion, Explosion von Nitratsalzen in 250 m <sup>3</sup> Tank, Freisetzung von ~ 4·10 <sup>5</sup> ... 9·10 <sup>6</sup> TBq	6
7. - 12. Okt. 1957 Windscale bzw. Sellafield, GB	Luftgekühlter, graphitmoderierter Natururanreaktor zur Pu-Gewinnung begann zu brennen; Freisetzung von ~ 750 TBq in Atmosphäre	5
30. Dezember 1958 Los Alamos, New Mexico, USA	3. Kritikalitätsunfall während Pu-Extraktion, 1 unmittelbarer Strahlentodesfall	4
26. Juli 1959 Simi Valley, Kalifornien, USA	Partielle Kernschmelze in 7,5 MW <sub>e</sub> schnellem Forschungs-Brüter, große Mengen gasförmige Freisetzungen (I-131, ...)	5 - 6
20. November 1959 Knoxville, Tennessee, USA	Chemische Explosion in radiologisch-chemische Fabrik Oak Ridge Nat. Lab., Freisetzung von ~15 g Pu-239, Kontamination am Gelände	3 - 4

wann, wo	was	INES
3. Januar 1961 Idaho Falls, Idaho, USA	Dampfexplosion an experimentellem Reaktor mit Freisetzung von Radioaktivität, 2 unmittelbare Strahlentodesfälle	4
24. Juli 1964 Charlestown, Rhode Island, USA	Kritikalitätsunfall in Brennelementefabrik, 1 unmittelbarer Strahlentodesfall	4
1964 – 1979 Belojarsk, UdSSR	Serie von Brennstoffzwischenfällen in KKW mit jeweils erheblichen Expositionen des Personals	4
7. Mai 1966 Melekess, nahe Nischnii Nowgorod (Gorki), UdSSR	Leistungsexkursion bei experimentellen Siedewasserreaktor, 2 MA hochgradig Strahlenexponiert	3 - 4
5. Oktober 1966 Monroe, Michigan, USA	Partielle Kernschmelze in experimentellen schnellem Brüter, keine Freisetzung von Radioaktivität	4

wann, wo	was	INES
21. Januar 1969 Lucens, Schweiz	Partielle Kernschmelze im experimentellen 8 MW <sub>e</sub> „NRX“-Reaktor, Kontamination der Reaktor-kaverne, keine Freisetzung in die Umwelt	4 - 5
11. Mai 1969 Rocky Flats, Colorado, USA	Brand von 2 t Material mit Pu, Freisetzung von Pu-Oxid in die Umwelt	4 - 5
1973 Windscale bzw. Sellafield, GB	Chemische Reaktion in einem Becken der Wiederaufbereitungsanlage mit Freisetzung von Radionukliden, 35 Mitarbeiter exponiert	4
6. Februar 1974 Leningrad, UdSSR	Bruch eines Wärmetauschers im KKW, Freisetzung von Radioaktivität, 3 Todesfälle	4
Oktober 1974 Leningrad, UdSSR	Beschädigung des Reaktorkerns, Freisetzung von ca. 55 PBq mit der Abluft	4 - 5
1977 Belojarsk, UdSSR	Schmelzen von ca. 50% der Brennstoffkanäle im KKW (~ RBMK-Typ), hohe Strahlenexp. von MA	5

wann, wo	was	INES
Februar 1977 Jaslovské Bohunice, CS	Beladen des Druckröhrenreaktors → Überhitzung von Brennstäben → Kontamination des Reaktorgebäudes	4
31. Dez. 1978 Belojarsk, UdSSR	Großbrand im Turbinengebäude, hohe Strahlenexposition von MA	3 - 4
28. März 1979 Three Mile Island, Pennsylvania, USA	50% Kernschmelze nach Ausfall der Reaktorkühlung (techn. Defekte & Bedienungsfehler), Freisetzung von ca. 90 TBq in die Atmosphäre	5
1980 Saint-Laurent, FR	Teilschmelze von Brennstäben, Kontamination des Reaktorgebäudes	4
September 1982 Tschernobyl, UdSSR	Zerstörung eines Brennstoffkanals des KKW-Blocks 1 mit Freisetzung von Radioaktivität in die Umwelt (Stadt Pripyat)	5

wann, wo	was	INES
1983 Buenos Aires, AR	Operator bei Arbeiten nahe am Reaktorkern (Missachtung von Sicherheitsregeln) mit 20 Gy tödlich exponiert	4
10. August 1985 Wladiwostok, UdSSR	Brennelemente-Wechsel an Atom-U-Boot, spontane Kettenreaktion mit Explosion, Freisetzung in die Umwelt, 10 Personen letal und 29 Personen hoch exponiert	5
6. Januar 1986 Gore, Oklahoma, USA	Behälter in Wiederaufbereitungsanlage durch Überhitzung zerstört, 1 Todesfall und 100 exponierte Personen	2 - 4
26. April 1986 Tschernobyl, UdSSR	Super-GAU mit Graphitbrand und großräumiger Freisetzung von Radioaktivität, 31 unmittelbare Todesfälle durch Strahlenexposition, ~0,7 EBq	7
6. April 1993 Sewersk, RUS	In Wiederaufbereitungsanlage Tomsk (Produktion von waffenfähigem Pu) Freisetzung von Radioaktivität in die Umwelt	2 - 4



wann, wo	was	INES
30. Sept. 1999 Tōkai-mura, JP	Nach unkontrollierte Kettenreaktion durch Hantierungs-Fehler in Brennelementefabrik Freisetzung von Radioaktivität, 2 unmittelbare Strahlen-Todesfälle (ca. 20 Sv, 10 Sv), ca. 60 MA hoch exponiert (~ Sv)	4 / 5
11. März 2006 Fleurus, BE	Exposition eines MA der radiopharmazeutischen Produktionsanlage (kerntechnische Anlage) durch Co-60-Quelle mit ca. 4,5 Sv	4
11. März 2011, Fukushima, JP	Teilweise Kernschmelze und Zerstörung zwischenlagerter abgebrannter Brennelemente nach Ausfall der Notkühlsysteme infolge eines Erdbebens mit Tsunami, Freisetzung von rund 60 PBq (bis Ende April 2011) in Atmosphäre und Meerwasser	7

## 21. Mai 1946, Los Alamos, New Mexico, USA

- Atomwaffenfabrik in Los Alamos kanadische Physiker Louis Slotin & mehrere Wissenschaftlern: Test zur Kritikalität von Plutonium
- unterkritischer, ca. 6 kg schweren Plutonium-Kern und 2 Halbkugelschalen aus Beryllium als Neutronenreflektoren
- zwei 3,2 mm dicke Distanzstücke (Sicherheitsvorrichtung) entfernt und durch Schraubendreher ersetzt
- Be-Halbkugelschalen manuell langsam an Pu-Kern angenähert - Schraubendreher rutschte heraus → kurzzeitige Überkritikalität: kurze Hitzewelle und bläuliches Schimmern (Tscherenkow-Licht) im Versuchsraum
- Slotin: Energiedosis ~ 10 Gray, † 30. Mai – Strahlenkrankheit
- Beobachter ~ 1,7 Gray

⇒ seither Verwendung von Manipulatoren für derartige Experimente

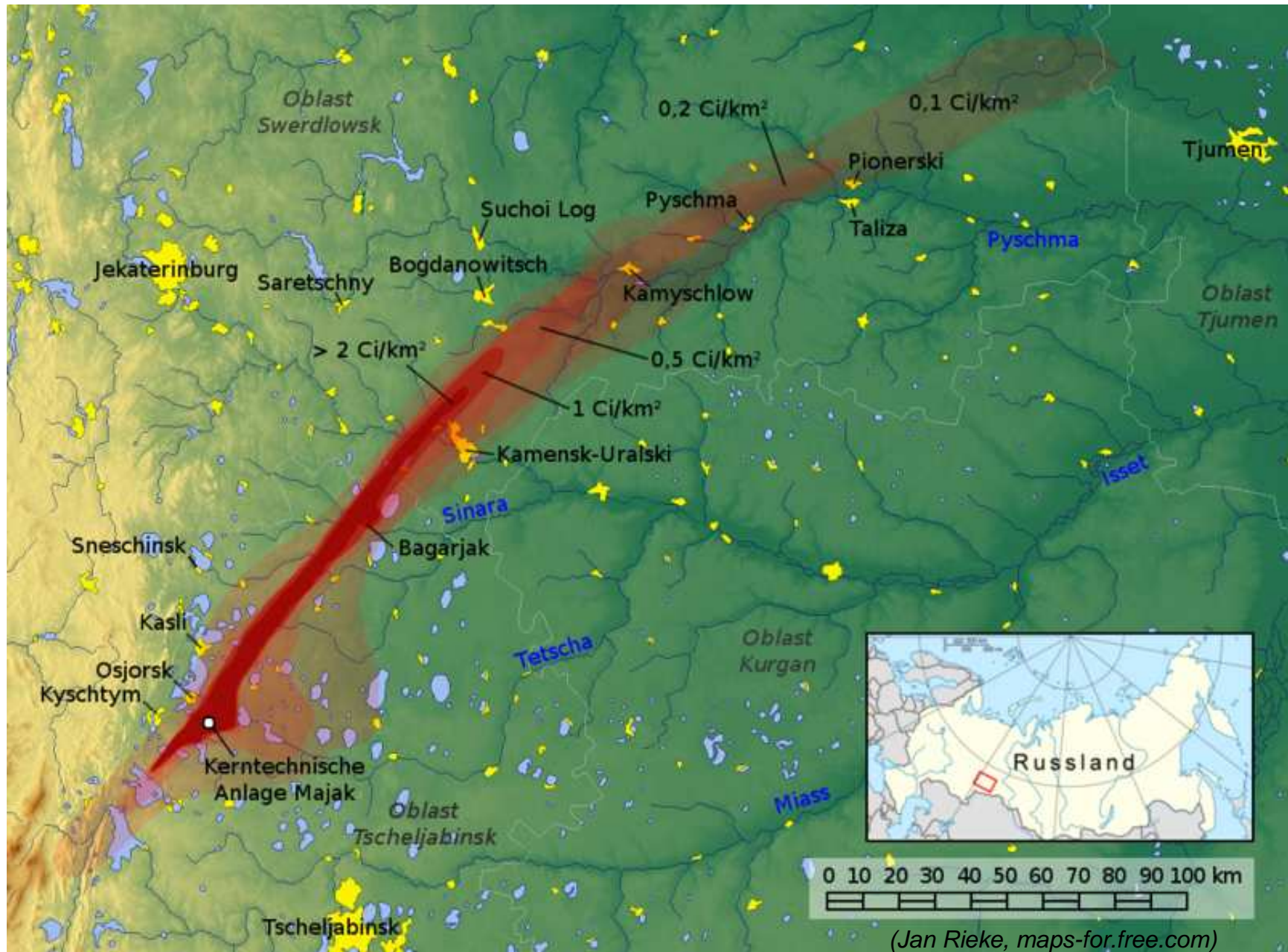
# Kyschtym/Majak UdSSR 29. Sept. 1957



(NASA, Jan Rieke)

## Kyschtym/Majak, 1957 – Unfallgeschehen

- Aufbereitung von abgebrannten Brennstäben zur Pu-Gewinnung
- Zwischenprodukte mit Spaltprodukten in 250 m<sup>3</sup> Tanks gelagert → Nachzerfallswärme ← Kühlung
- Kühlleitung undicht, Kühlung ausgefallen, auskristallisieren, Funke eines Kontrollgerätes → Explosion eines Tanks mit radioaktiven Nitratsalzen
- ~ 400 PBq → ca. 90 % am Gelände, 10 % auf ~ 20 000 km<sup>2</sup> atmosphärisch ausgebreitet
- <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>239</sup>Pu
- ~ 1000 km<sup>2</sup> mit ca. 74 kBq/m<sup>2</sup> <sup>90</sup>Sr → rund 1000 Bewohner in drei nahegelegenen Dörfern: Organdosis Knochenmark bis 570 mSv
- 10 700 Personen umgesiedelt (Wochen, Monate nach der Explosion)



## Kyschtym/Majak, 1957

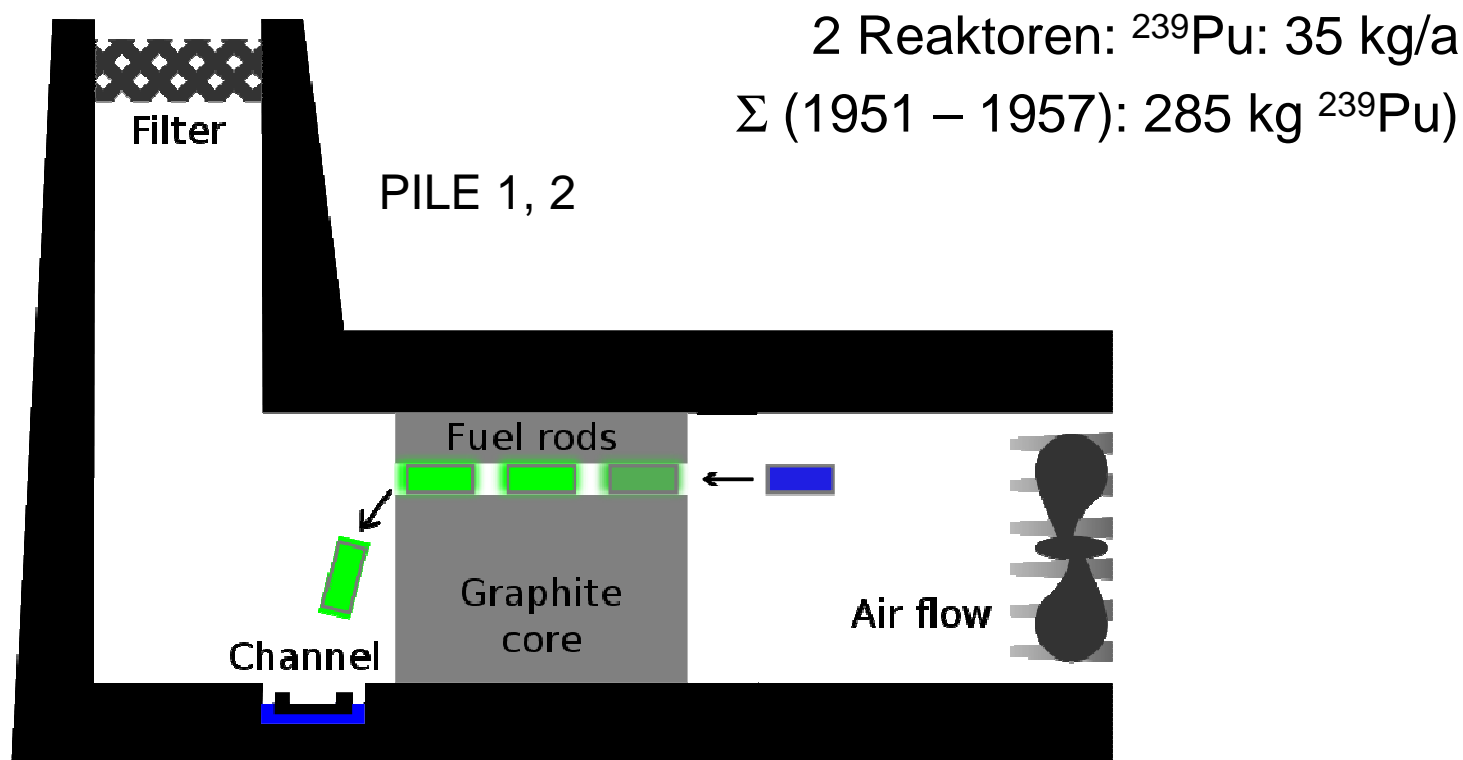
- Unfall bis 1976 von UdSSR-Regierung vertuscht
- 1976 *New Scientist*-Artikel des sowjetischen Journalisten und Dissidenten *Schores Alexandrowitsch Medwedew*
- volle Informationen erst ab 1989
- → seit 1948:  $\Sigma A(^{90}\text{Sr} + ^{137}\text{Cs}) = 8,9 \text{ EBq}$  in die Umwelt
- überdurchschnittlich viele weibliche MA beschäftigt
- Schätzungen: ca. 1 000 zusätzliche Krebsfälle durch Unfall
  
- Seit dem 1. August 2005: Untersuchung im Rahmen des internationalen Forschungsprojekts „Southern Urals Radiation Risk Research (SOUL)“, Helmholtz-Zentrum-München

## Kyschtym / Majak, UdSSR - heute

- 165 km<sup>2</sup> Sperrgebiet
- Anlage nach wie vor in Betrieb: Wiederaufbereitung, Produktion von Radionuklidpräparaten, Lagerung von abgebrannten Brennelementen
- ~ 14 900 Beschäftigte
- Am Ufer des Karatschi-Sees: bis zu 6 Sv/h !!!
  
- Radioökologische Zukunft: Ausbreitung der Radionuklide über Flüsse Tetscha → Ob → Arktischer Ozean

## 7. - 12. Okt. 1957, Windscale (→ Sellafield), GB

- Luftgekühlter, graphitmoderierter Natururanreaktor zur Pu-Gewinnung und Tritium-Produktion (Kernwaffen)





## Okt. 1957, Windscale-Unfall

- Ausheizen der Wigner-Energie (Ausdehnung des Graphitblocks durch n-Beschuss bei niedrigen Temperaturen → spontane Temperaturanstiege im Graphitblock)  
→ Sprunghafter Anstieg der Temperatur (400 °C) → vorerst unentdeckter Brand des Graphitblocks in Pile 1
- Löschversuche mit 25 t CO<sub>2</sub>: erfolglos; mit Wasser: erfolgreich, aber kontaminierter Wasserdampf in die Atmosphäre  
900 ... 3700 TBq <sup>131</sup>I • 280 ... 6300 TBq <sup>132</sup>Te • 90 ... 350 TBq <sup>137</sup>Cs, 0.2 ... 3.1 TBq <sup>90</sup>Sr • 14 ... 110 TBq <sup>210</sup>Po • 8 ... 80 PBq <sup>133</sup>Xe
- > 500 km<sup>2</sup> Agrarland kontaminiert
- Oktober 1957: Milch <sup>131</sup>I > 3700 Bq/l → ~ 2 Mio. l ins Meer entsorgt
- Information der Bevölkerung zurückhaltend bis unzureichend
- 40 ... 240 indirekte Todesfälle zugeordnet

## Windscale Pile 1 - Rückbau

- 1958 – 1961: Konservierung und Abdeckung des Reaktors mit Beton
- Ab 1993 - 1999: Rückbau bis zum Reaktorkern
- bis 2012: Entsorgung der radioaktiven Abwässer und Schlämme aus den Abklingbecken, Vorbereitung zur Endlagerung des beschädigten Reaktorkerns

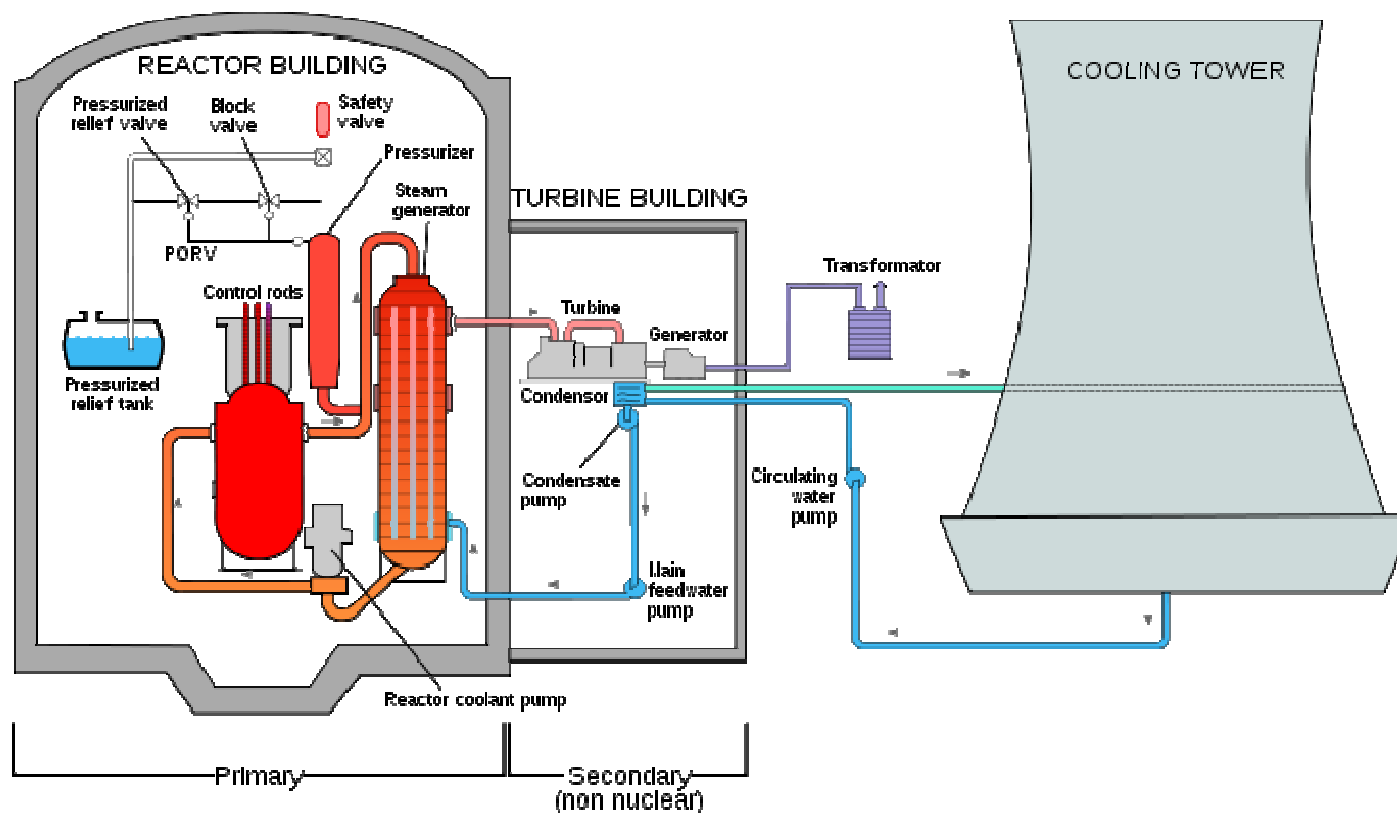


## 28. März 1979, Three Mile Island, Pennsylvania, USA

- 50% Kernschmelze nach Ausfall der Reaktorkühlung (techn. Defekte & Bedienungsfehler), Freisetzung von ca. 90 TBq in die Atmosphäre



## 28. März 1979, Three Mile Island, Pennsylvania, USA



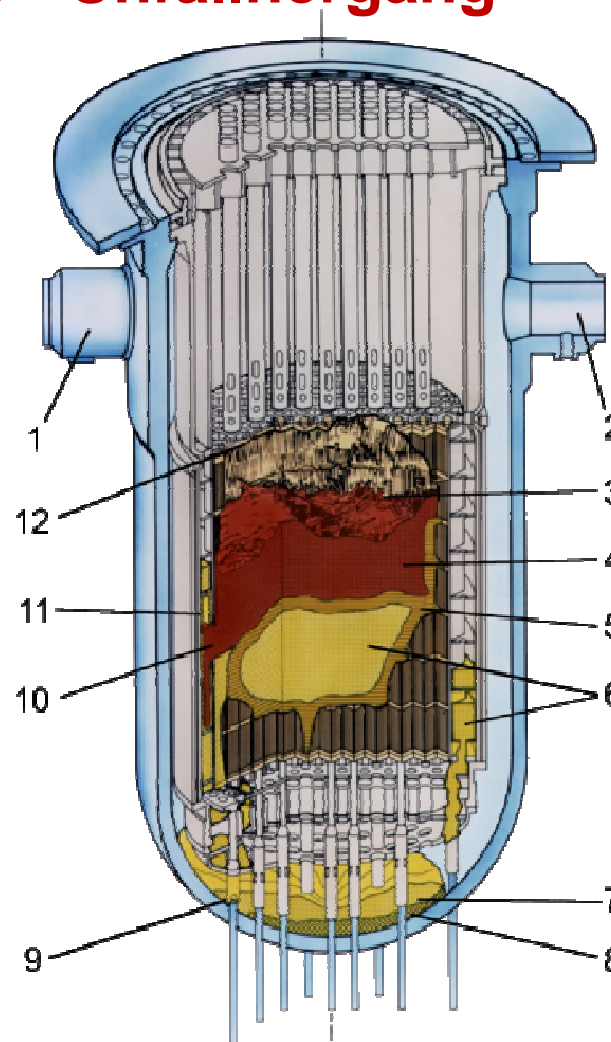
## Three Mile Island, März 1979 - Unfallhergang

- Pumpenausfall im Sekundärkreislauf durch technischen Defekt
- Schnellabschaltung aktiviert, Nachzerfallswärme ca. 6% der thermischen Betriebsleistung von 155 MW
- Notkühlung aktiviert, Pumpen ok jedoch: Ventile in der Notkühlleitung bleiben geschlossen
- Temperatur im Reaktorkern und Druck im Reaktordruckbehälter steigen → Sicherheitsventil (PORV pilot-operated relief valve) öffnet bei  $\uparrow 158$  bar → Druckentlastung, Ventil schließt aber nicht mehr bei  $\downarrow 155$  bar → Kühlmittel im Containment
- Notkühl-Ventile wieder geöffnet → große Dampfblase im Reaktor
- Brennstäbe fallen trocken, Hülle der Brennstäbe oxidieren durch eine Zirconium-Wasser-Reaktion und überhitzen,  $H_2 \rightarrow$  Containment → mit  $O_2 \rightarrow$  Knallgas

## Three Mile Island, 1979 - Unfallhergang

- Knallgasexplosion im Containment und Kernschmelze:

1. 2B-Anschluss
2. 1A-Anschluss
3. Hohlraum
4. lose Bruchstücke des Kerns
5. Kruste
6. geschmolzenes Material
7. Bruchstücke in unterer Kammer
8. mögliche Uran-abgereicherte Region
9. zerstörte Durchführung
10. durchlöcherter Schild
11. Schicht aus geschmolzenem Material auf Oberflächen der Bypass-Kanäle
12. Beschädigungen am oberen Gitter



## Three Mile Island, 1979 - Folgen

- ~ 1,7 PBq gasförmige Radionuklide in die Atmosphäre
- Langzeitstudie 18 Jahre, ~ 30 000 Anwohner: keine signifikanten Gesundheitsfolgen feststellbar
- Aufräumarbeiten 1979 bis 1993:
  - Rückbau des Reaktors und Entfernung des Brennstoffes (100 t)
  - Entfernen & Verdampfen von 8 Mio l radioaktiv kontaminiertem Kühlwasser aus dem Containment (2 Jahre)
  - Finaler Rückbau des kontaminierten Reaktorgebäudes vorerst ausgesetzt



Dekontamination im Reaktorhilfsanlagengebäude, Oktober 1979

## 26. April 1986, Tschernobyl, UdSSR

- Super-GAU mit Graphitbrand
- 31 unmittelbare Todesfälle durch Strahlenexposition
- großräumige Freisetzung von Radioaktivität





## April 1986, Tschernobyl - Unfallhergang

- **Experiment** - Simulation eines Stromausfalles
- Notstromversorgung mit Dieselgeneratoren vorhanden – Anlaufzeit bis zu voller Leistung 40 - 60 Sekunden
- **Frage:** Produziert der Turbinenauslauf genug Strom um diese Zeitspanne zu überbrücken?
  
- Geplanter Beginn: 25.4.1986 Mittag
- Stromlastverteiler-Zentrale Kiew forderte, den Reaktor auf 50% Leistung laufen zu lassen um hohe Stromnachfrage abzudecken  
→ Start des Experimentes wurde um 9 Stunden verschoben.
- 23:10 Absenkung auf 25% Leistung
- Notkühlsystem wurde abgeschaltet

## Tschernobyl - Unfallhergang

- Nachtschicht übernahm – war auf das Experiment nicht vorbereitet. Hätte nur die Nacharbeiten übernehmen sollen.
- Leistung fiel unerwartet auf < 1%  
nicht geklärt ob Bedienfehler oder technischer Defekt
- Xenonvergiftung bei Leistungsabfall!!!  
 $^{135}\text{Xe} + n \rightarrow ^{136}\text{Xe}$   
fängt Neutronen ein und hemmt die Kettenreaktion
- Steuerstäbe wurden entfernt um Reaktion zu steigern. Untergrenze von 28 Stäben wurde unterschritten.
- Sicherheitsprotokoll wurde ignoriert
- ↑ 7% Leistung

## Tschernobyl - Unfallhergang

- 2 Hauptkühlmittel Pumpen wurden hinzu geschaltet
- Wärmeabfuhr verbesserte sich
  - Positiver Dampfblasenkoeffizient
  - Leistung des Reaktors verringerte sich weiter
- Weitere Steuerstäbe wurden herausgefahren
- Beginn
  - Fluss zu den Turbinen wurde unterbrochen
  - Damit Wärmeabfuhr aus dem Reaktor unterbrochen
  - Kühlmitteltemperatur stieg an
  - Positiver Dampfblasenkoeffizient verursachte Leistungsanstieg
- Steuerstäbe wurden eingefahren um Leistung zu drosseln

## Tschernobyl - Unfallhergang

- Gefährliche Konstruktion
  - Spitzen der Steuerstäbe mit Graphit versehen
  - Graphitspitzen erhöhen die Reaktionsrate bis Stab tiefer eingedrungen ist
  - Einfahrtgeschwindigkeit der Stäbe zu gering. 40 cm/s
- **Explosionsartige Leistungsexkursion des Reaktors  $\sim 100 \times P_{th}$**
- Hitze verformte die Kanäle der Steuerstäbe
- Stäbe verklemmten sich nach nur 2 - 2,5 m anstelle der vorgesehenen 7 m (!)
- Druckröhren rissen und Wasser reagierte mit Ummantelung der Brennstäbe (Zirconium)
- Wasserstoff und Kohlenmonoxyd bildeten sich
  - Knallgas !!!  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

## Tschernobyl - Unfallhergang

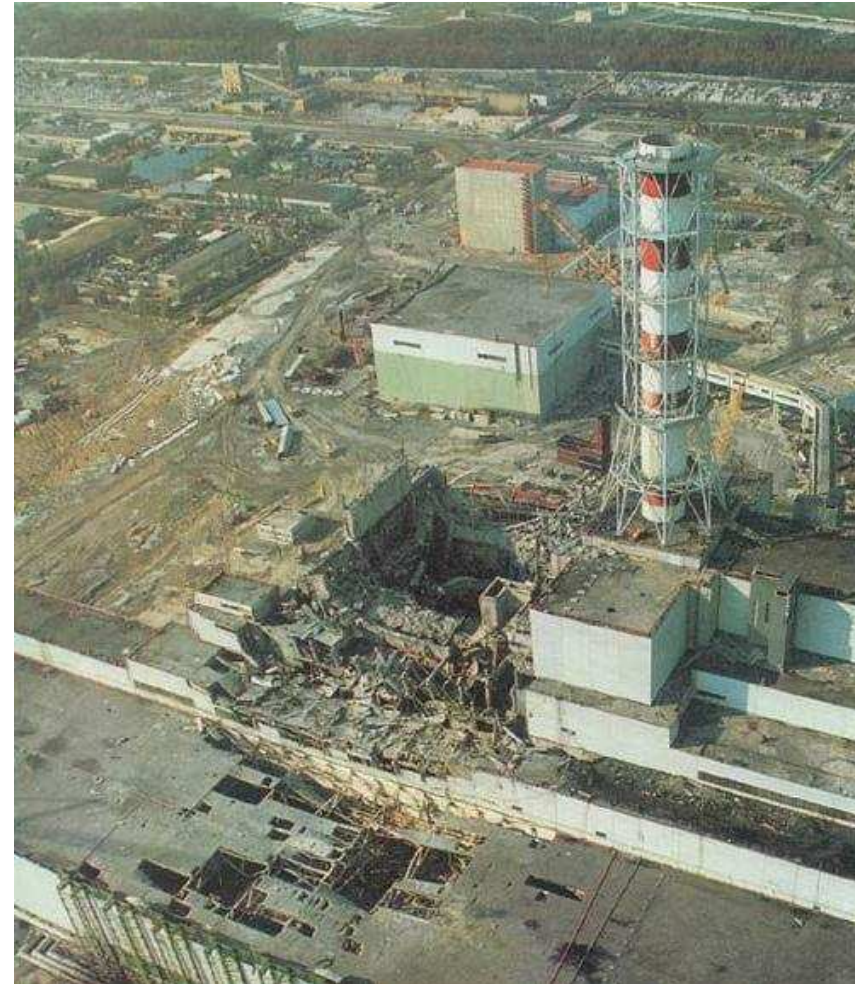
- Explosion zerriss Deckel des Reaktorkerns und Dach (~1000 t)
- **Brand des Graphitkerns beginnt**
- Radioaktives Inventar wurde in Umwelt freigesetzt und atmosphärisch viele hunderte bis tausende Kilometer getragen
- Brände außerhalb des Gebäudes wurden gelöscht
- Block 3 abgeschaltet
- Am 27.4. folgten auch Blöcke 1 & 2
- Reaktor Block 4 mit Blei, Bor, Dolomit, Sand und Lehm abgedeckt / Brand erstickt
- UdSSR verhängte Nachrichtensperre
  - 28.4. „Unfall“
  - 29.4. „Katastrophe“ - aber keine Bilder veröffentlicht

## Tschernobyl - Folgen

- In Folgemonaten arbeiten ~400 000 (~600 000?) „Liquidatoren“
  - dekontaminierten Kraftwerk
  - bauten Sarkophag
  - eliminierten weitere Gefahren (kontaminiertes Wild, ...)
- Todesfälle durch Immunschwäche, Krebs, Herz-Kreislauf und psychosomatische Erkrankungen und auch Selbstmord
- Opferzahlen äußerst schwer belegbar (>10 000?)

## Tschernobyl - Folgen

- 27.4. Pripyat evakuiert
- Totale Sperrzone: 4300 km<sup>2</sup>
- ~1000 Bewohner kehrten bald wieder zurück
- Nach Aufräumarbeiten wurden Blöcke 1-3 wieder hochgefahren (bis ins Jahr 2000 in Betrieb)
- Heute: ~100 Rückkehrer und mehrere hundert KKW-MA im Dorf Tschernobyl



## Der Sarkophag

- Block 4: mit provisorischem Sarkophag versehen
- 1997: *Chernobyl Shelter Fund*
  - Bau eines neuen Sarkophag
  - Kooperation EU, USA & Ukraine
  - Geschätzte Kosten: 768 Millionen Dollar
  - sichere Lagerung für 100 Jahre
  - Bau 200 Meter neben Block 4
  - anschließend über Block 4 gefahren
  - alter Sarkophag: anschließend demontiert
- Geplante Fertigstellung: 2013? (ursprünglich 2005)
- Restaurierungsarbeiten am provisorischen Sarkophag waren erfolgreich → daher prov. Sarkophag für weitere 15 Jahre sicher

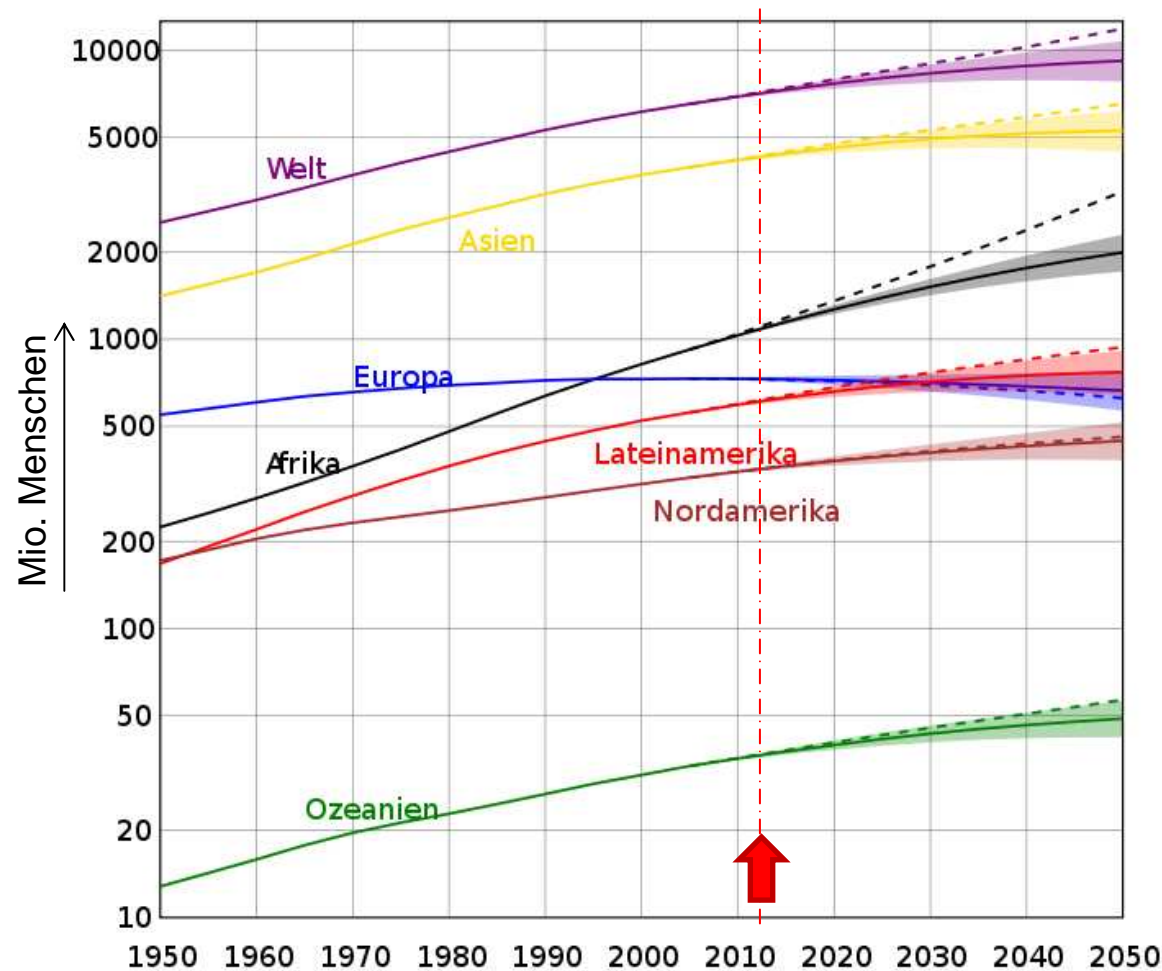




## Radioaktivitätsfreisetzung, Dosis und Risiko

- ~1000 Liquidatoren: 2 ... 20 Gy
- ~400 000 Liquidatoren: 0,1 Gy (max. 0,5 Gy)
- ~50 Folgetodesfälle durch Strahlenexposition (IAEA, WHO) dokumentiert (bis 2006), davon 28 im Jahr 1986
- ~5 000 Schilddrüsenkrebsfälle im Gebiet dokumentiert
- ~4 000 zusätzliche Todesfälle im Gebiet prognostiziert (60 Jahre Folgezeitraum)
- ~9 000 .... zusätzliche Krebstodesfälle in Nord-Hemisphäre prognostiziert (60 Jahre Folgezeitraum)
- **Die Langzeitfolgen des Unglücks sind schwer abzuschätzen. Wegen der Unsicherheit vieler Daten und epidemiologischer Modell-Parameter sind alle Voraussagen über zukünftige Morbiditäts- oder Mortalitätszahlen mit Vorsicht zu betrachten!**

## Entwicklung der Weltbevölkerung

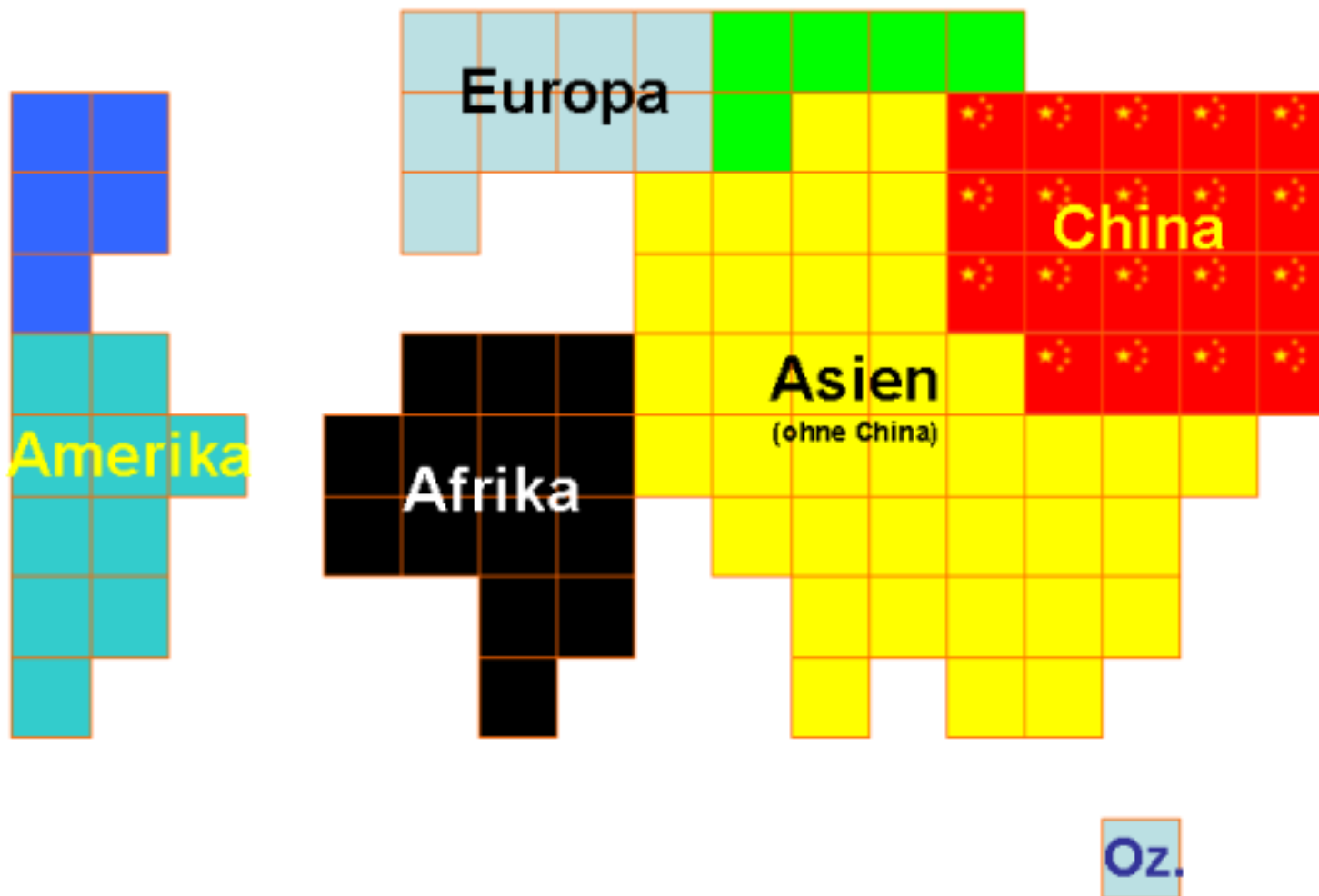


Mitte 2011:  
**7 Mrd. Menschen**

4 l Trinkwasser pro Tag  
und Person:  
**28 Mrd. l / Tag**

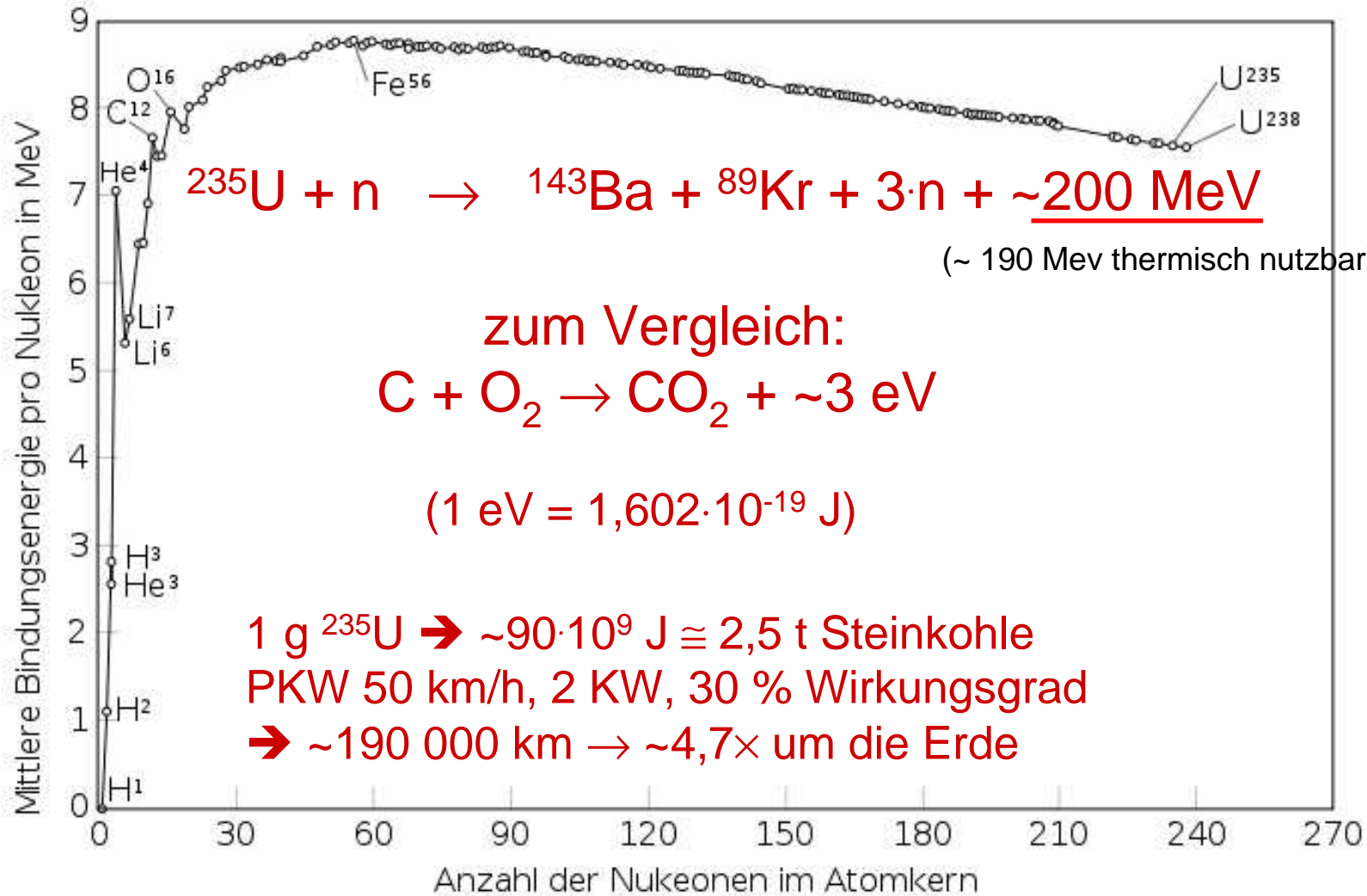
*(Vereinte Nationen 2009)*

## Globale Verteilung der Bevölkerung 2011 7 Mrd. Menschen $\Leftrightarrow$ 100 %



de.wikipedia.org

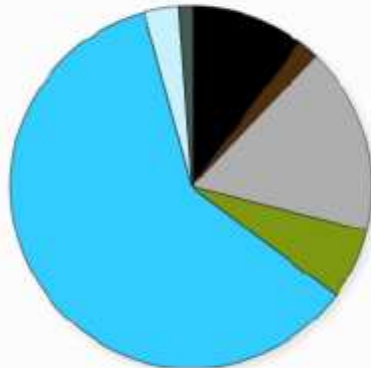
## Energie aus der Super-Nova für ‚zu Hause‘





### Stromproduktion in Österreich (2008)

SCHLIESSEN X



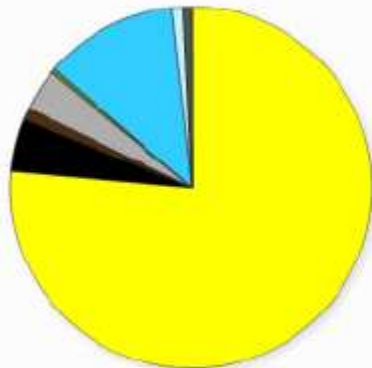
60,62 %	Wasserkraft	40.678 GWh
16,7 %	Gas	11.204 GWh
10,28 %	Kohle	6.898 GWh
6,35 %	Biomasse	4.264 GWh
3 %	Windkraft	2.014 GWh
1,85 %	Erdöl	1.243 GWh
1,12 %	Hausmüll	753 GWh
0,04 %	Photovoltaik	28 GWh
0 %	Geothermie	2 GWh

Einheit: Gigawattstunden (GWh)



### Stromproduktion in Frankreich (2008)

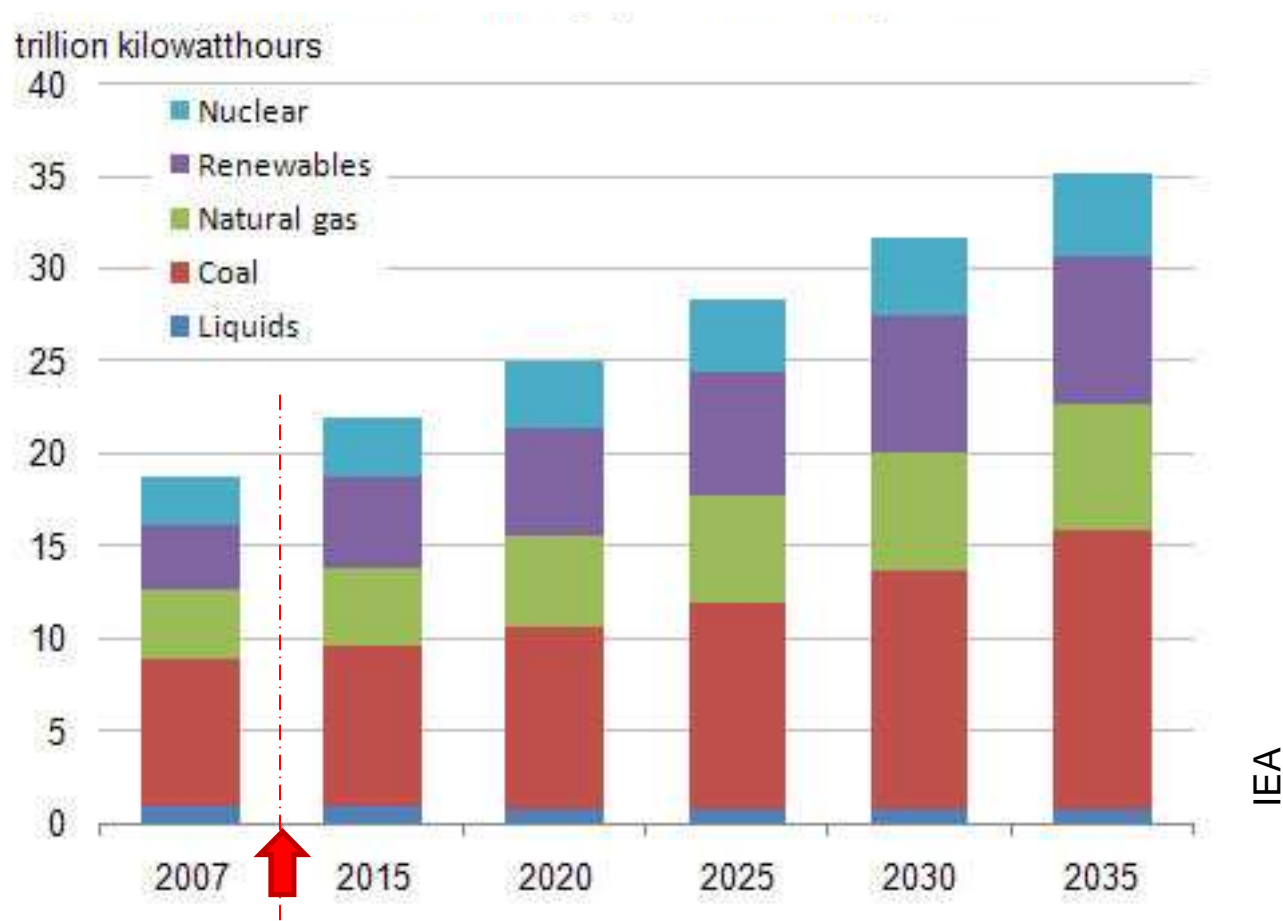
SCHLIESSEN X



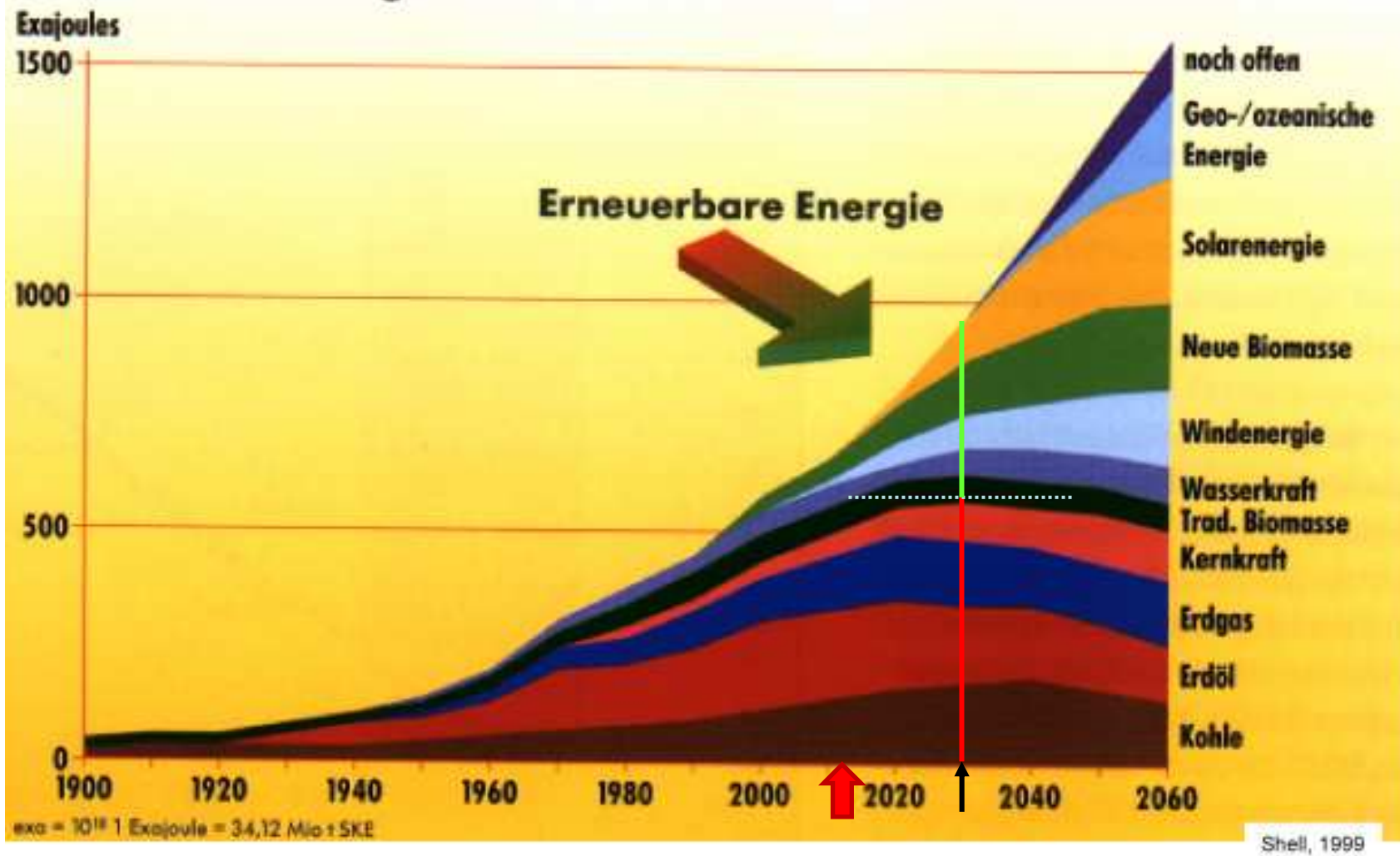
76,45 %	Kernenergie	439.468 GWh
11,89 %	Wasserkraft	68.325 GWh
4,74 %	Kohle	27.231 GWh
3,81 %	Gas	21.884 GWh
1,01 %	Erdöl	5.825 GWh
0,00 %	Windkraft	5.689 GWh
0,66 %	Hausmüll	3.776 GWh
0,37 %	Biomasse	2.116 GWh
0,09 %	Tide	513 GWh
0,01 %	Photovoltaik	41 GWh

Einheit: Gigawattstunden (GWh)

# Elektrizitätsproduktion weltweit



## Szenario „Nachhaltiges Wachstum“





## Schwere Unfälle bei der Elektrizitätsproduktion

**Schwere Unfälle mit mindestens 5 unmittelbaren Todesfällen in den verschiedenen Energieketten in der Periode 1969- 2000**

Energiekette	OECD-Länder			Nicht-OECD-Länder		
	Unfälle	Todesfälle	Anz. Tote bei max. Unfall	Unfälle	Todesfälle	Anz. Tote bei max. Unfall
Kohle	75	2259	272	1146*)	22848	434
Erdöl	165	3789	577	232	16494	4375
Naturgas	90	1043	109	45	1000	100
Flüssiggas	59	1905	498	46	2016	600
Wasserkraft	1	14	14	10	29924	26000***)
Kernenergie	-	-	-	1	31**)	31

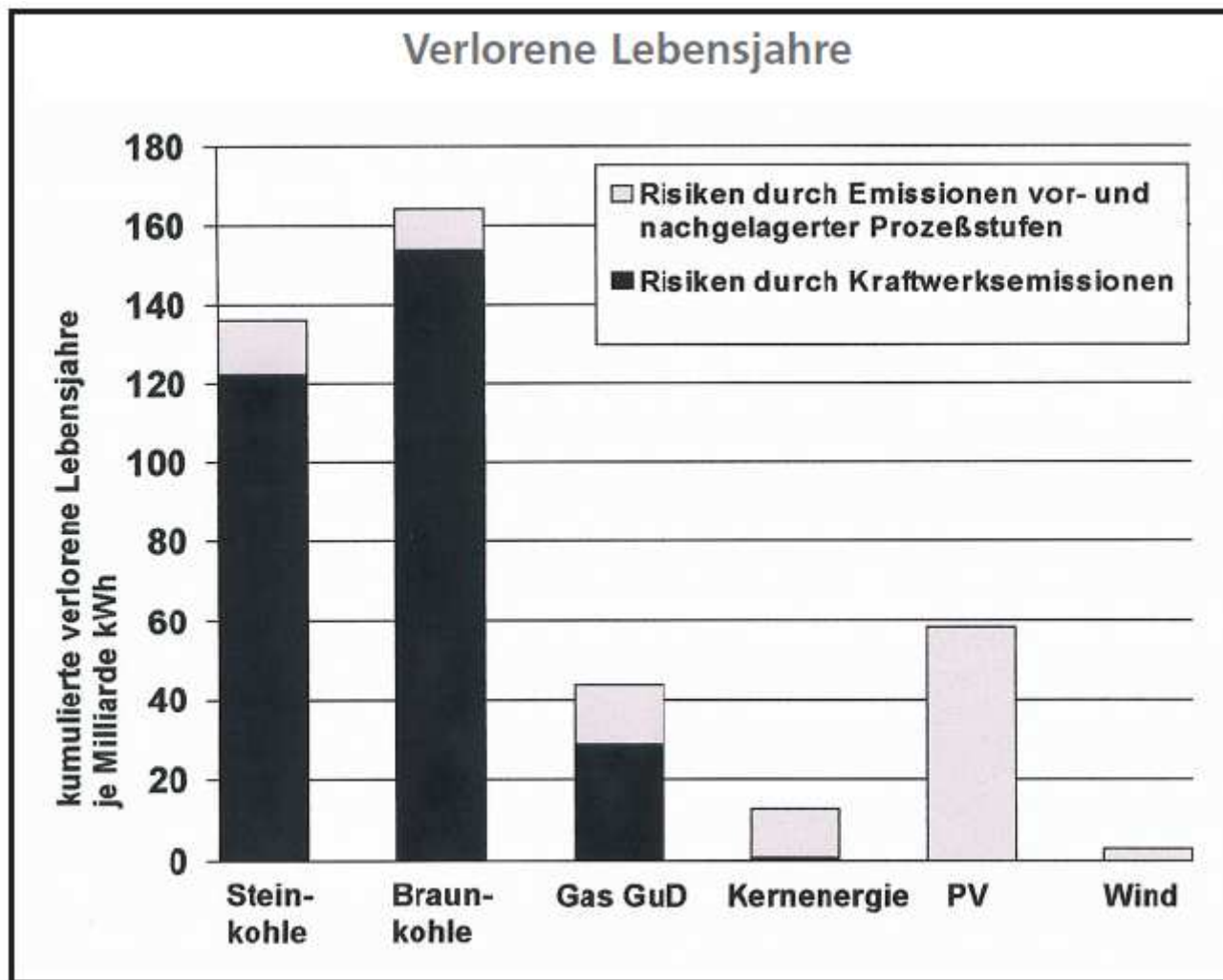
\*) Davon entfallen 1044 Unfälle mit 18017 Todesfällen nur auf China

\*\*\*) ohne Langzeitfolgen. Im Fall von Tschernobyl reichen Berechnungen für die latenten Todesfälle durch Krebserkrankungen von etwa 9000 für die Ukraine, Russland und Weissrussland, bis zu 33000 für die gesamte nördliche Hemisphäre in den nächsten 70 Jahren ([Hirschberg et al., 1998](#)). Nach einer neuen Studie im September 2005 ([Chernobyl Forum, 2005](#); Kurzversion), die von einem Forum aus verschiedenen UNO Organisationen (IAEA, WHO, UNDP, FAO, UNEP, UN-OCHA und UNSCEAR) veröffentlicht wurde, könnten in den am meisten kontaminierten Gebieten bis zu 4000 Menschen an den Folgen der Strahlenbelastung sterben. Dieser Wert ist deutlich tiefer als die obere Grenze des Intervalls der PSI-Schätzung, welche jedoch nicht auf die am meisten kontaminierten Gebiete beschränkt war

\*\*\*) allein 26000 Tote beim Banqiao/Shimantan Staudamm-Bruch in China

([www.energie-fakten.de](http://www.energie-fakten.de) (2006) & PSI, CH)

## Gesundheitsrisiken durch Elektrizitätsproduktion



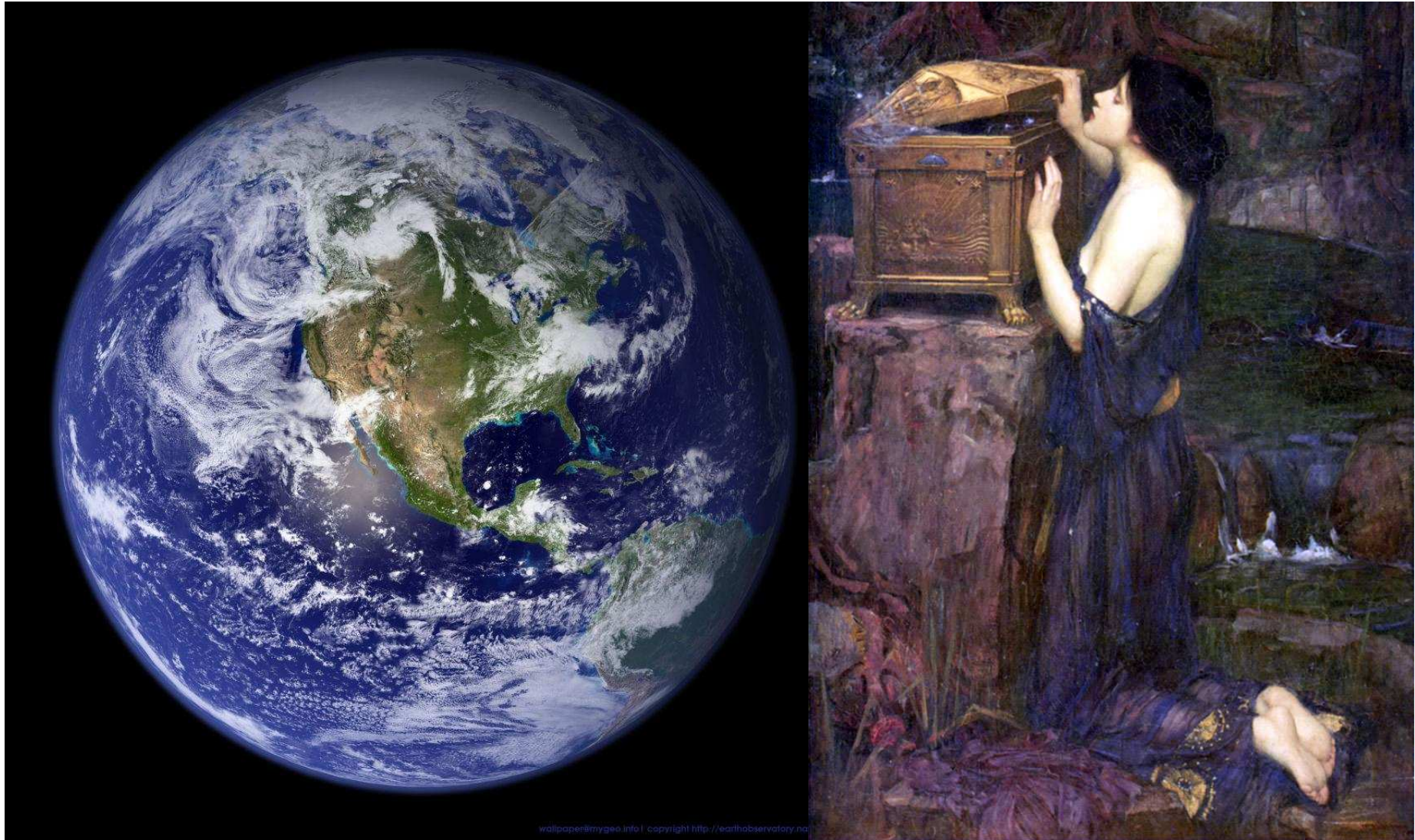
(www.energie-fakten.de (2002) & PSI, CH)

## (M)ein persönliches Resümee

- Ressourcenverbrauch global ausgleichen  
→ Luft, Wasser, Nahrung, Brennstoffe, Energie, CO<sub>2</sub>, Medizin, Technik, ...
- Globale Entwicklungen aktiv gestalten  
→ Bevölkerung, Wirtschaft, Gesundheit, ...
- Globale Handlungskonzepte entwickeln und umsetzen  
→ einbeziehen des Gesamtsystems „Raumschiff“ Erde
  - Unbegrenzte Wissenschaft ↔ ethisch begrenzte Technologien
  - global ver-/antworten ↔ Vereinte Nationen, NGOs, ...

Ratio → Handeln ← Emotion

## Wissen schafft Handlungsspielräume!



## Quellenverzeichnis

- IAEA, INES User's Manual 2008 Edition, 218 S., [www.iaea.org](http://www.iaea.org) (2011-05-17)
- [de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_von\\_Unf%C3%A4llen\\_in\\_kerntechnischen\\_Anlagen](http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Unf%C3%A4llen_in_kerntechnischen_Anlagen) (2011-05-18)
- The Atomic Heritage Foundation Accidents in the Manhattan Project
- Peter Jedicke: The NRX Incident, 1. Mai 2006
- Argonne National Laboratory: Brief History
- A. Lutins: U.S. Nuclear Accidents. Vom 22. Juni 2010, abgerufen am 13. März 2011
- California Energy Commission: Nuclear Plants in California, 1. Mai 2006
- M. V. Malko: The Chernobyl Reactor: Design Features and Reasons for Accident. [1]
- [nuclearfiles.org](http://nuclearfiles.org): Accidents 1960's, 18. Mai 2006
- IAEO: Internationale Bewertungsskala für nukleare Ereignisse. 21. Mai 2006.
- Úrad jadrového dozoru Slovenskej republiky (Slovak Nuclear Regulatory Authority): Annual report 2000. 8. August 2007.
- Cold War submarines: the design and construction of U.S. and Soviet submarines, 1945-2001 Seiten 98 und 99
- DIW Berlin: Nukleare Umweltgefahr in Russland, 26. Februar 2007
- IAEA: INES: The International Nuclear And Radiological Event Scale
- IAEO: Report on the Preliminary Fact Finding Mission Following the Accident at the Nuclear Fuel Processing Facility in Tokaimura. 15. November 1999 (english, PDF, 9 MB)
- Projekt der University of Southern California zum Unfall in Tōkai-mura
- [nuktext.org](http://nuktext.org) (25. März 2011)
- [www.johnstonsarchive.net/nuclear/radevents/](http://www.johnstonsarchive.net/nuclear/radevents/) (Datenbank schwererer radiologischer Unfälle) (2011-05-18)
- IAEA update on Japan Earthquake In: IAEA.org vom 12. März 2011
- ISIS Statement on Events at Fukushima Daiichi Nuclear Site in Japan. 15. März 2011, abgerufen am 15. März 2011 (englisch).



ÖVS/ÖGMP Frühjahrstagung  
Aktuelle Aufgaben im Strahlenschutz  
Vom Routinebetrieb bis zur Nuklearkatastrophe  
19. Mai 2011, Salzburg



# Unfallbedingte Freisetzung von Radionukliden – von Majak bis Tschernobyl

**Danke für die**  
*Franz Josef Maringer*  
**Aufmerksamkeit!**



BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen

