

Herausforderungen der Kernenergie: die Risiken der radiologischen Beeinträchtigung und die Lehre aus Fukushima

Dr.-Ing. Veronika Ustohalova
LionsClub Düsseldorf
19.09.2016



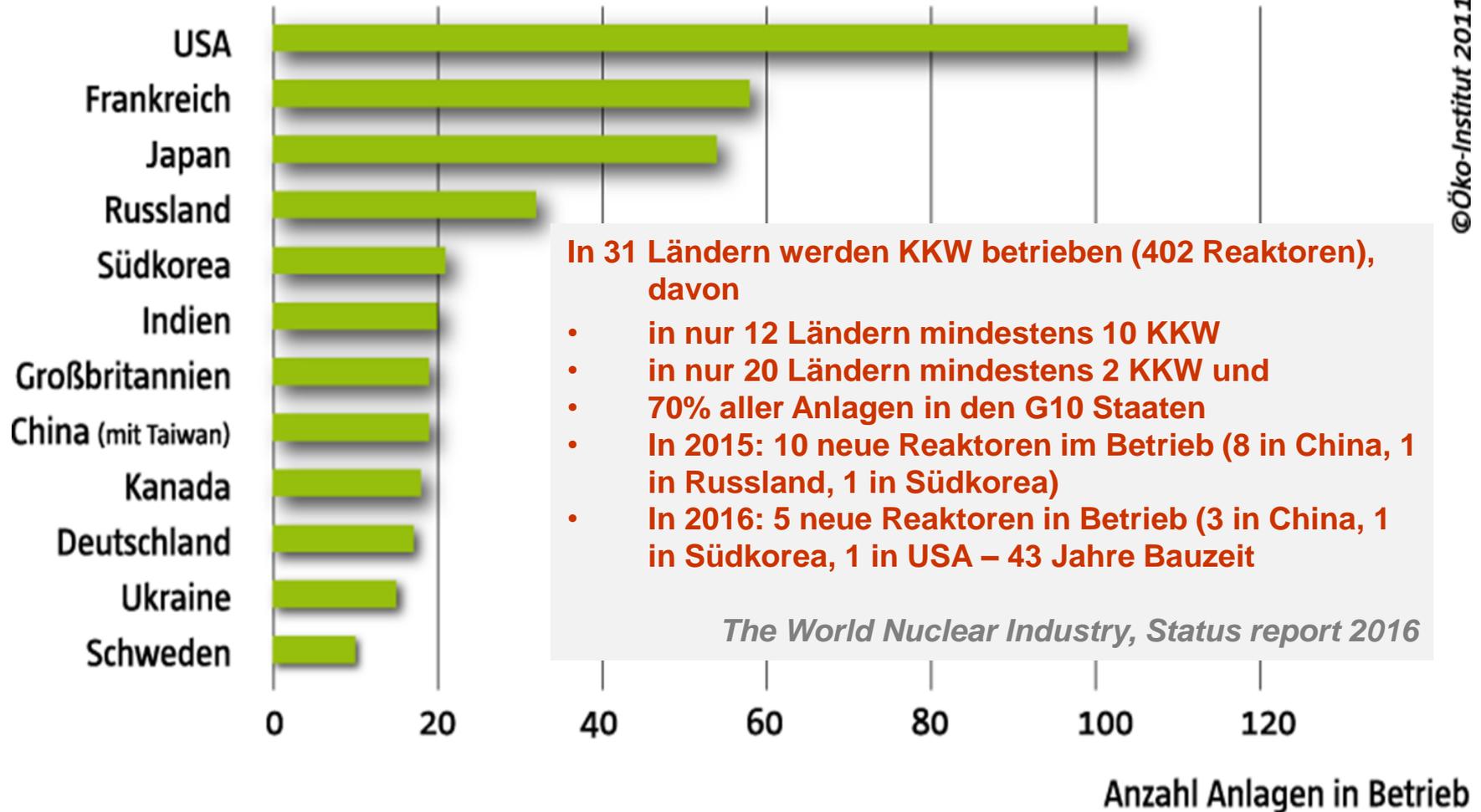
Übersicht

1 Kernenergie: Daten und Fakten

2 Radiologische Beeinträchtigung und Strahlenschutz

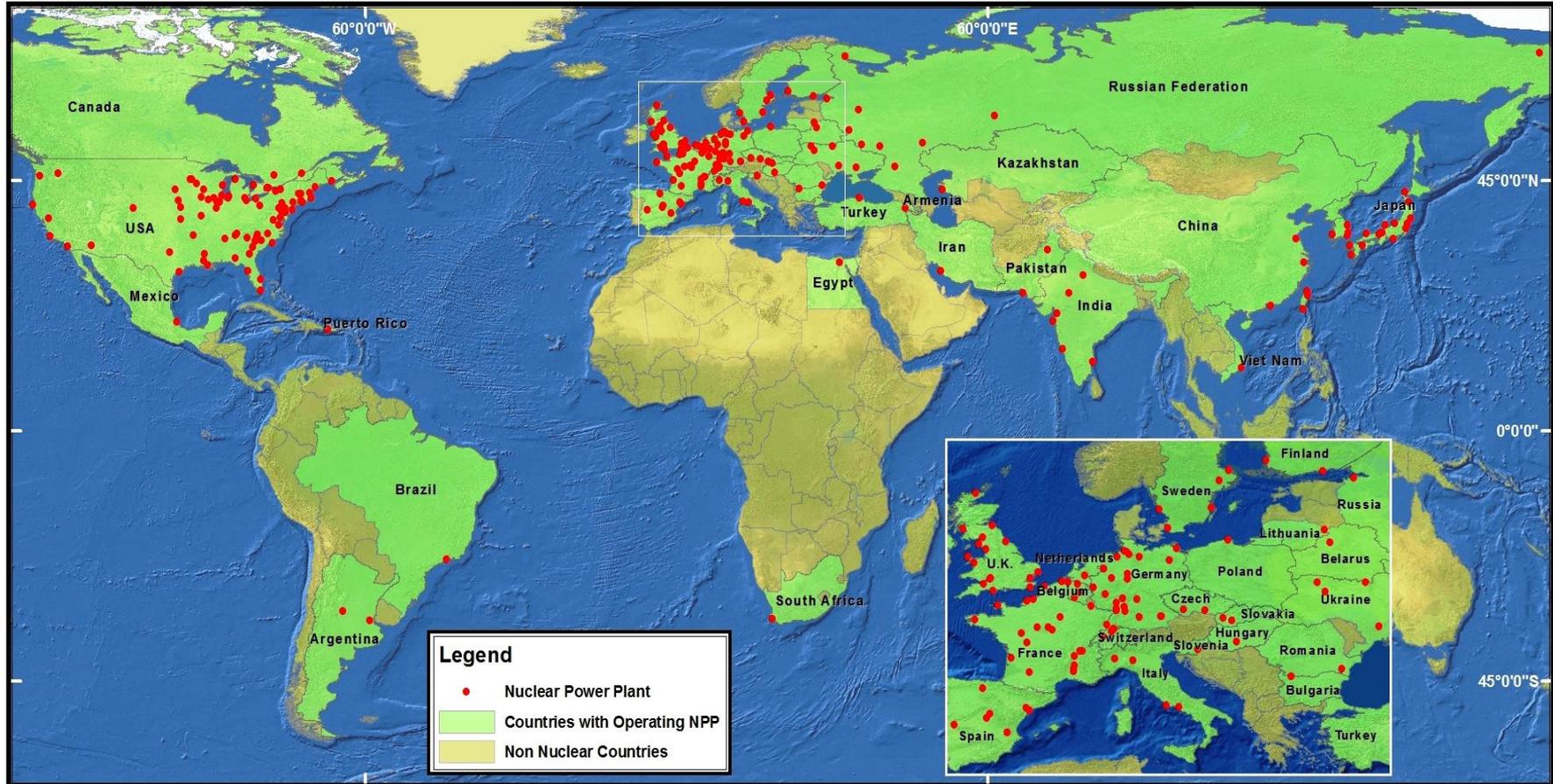
3 Fukushima: der Unfall und die „Vielfalt“ der Folgen

Länder mit mehr als 10 Kernkraftwerken



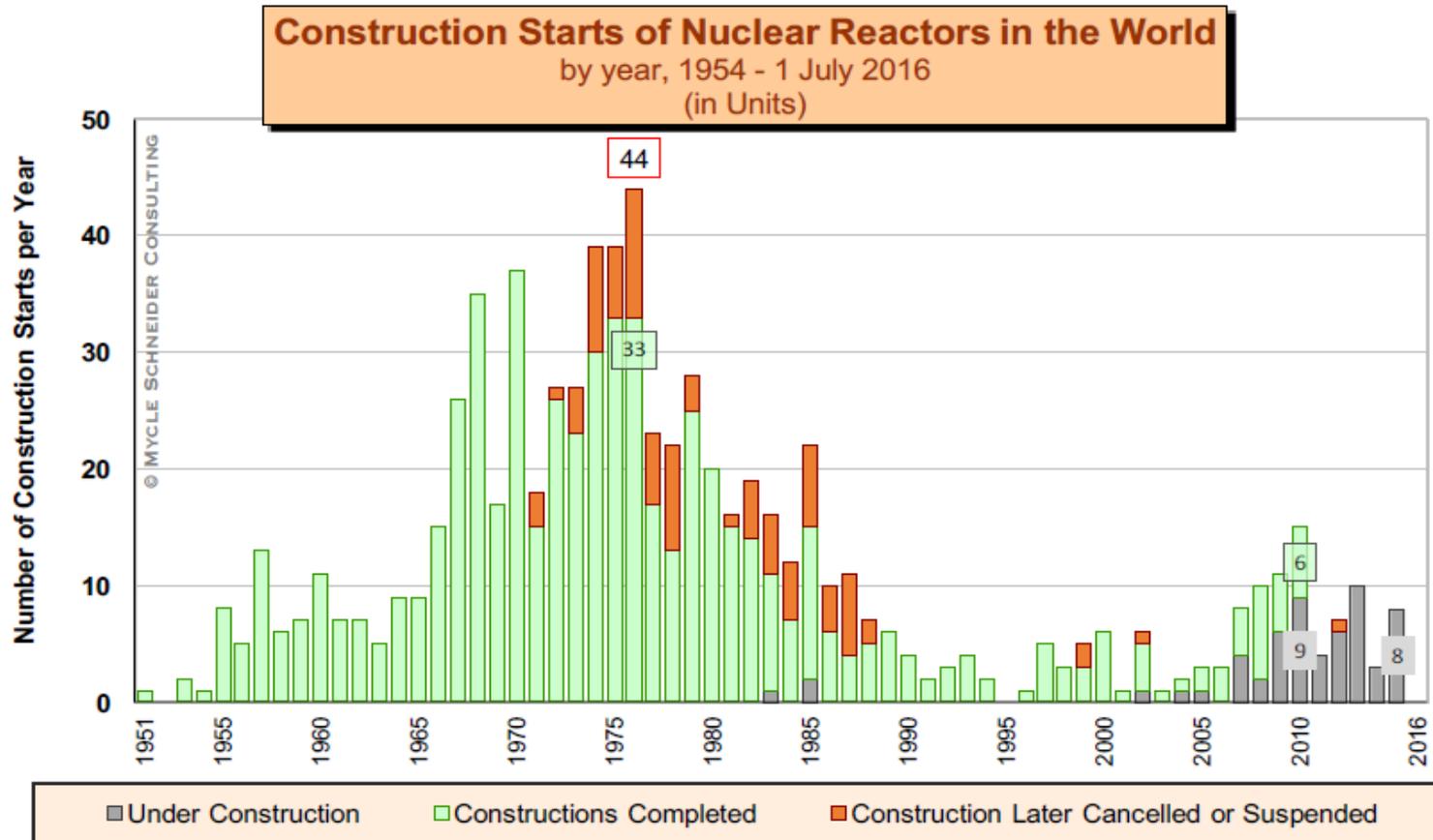
©Öko-Institut 2011

Kernkraftwerke in 2011



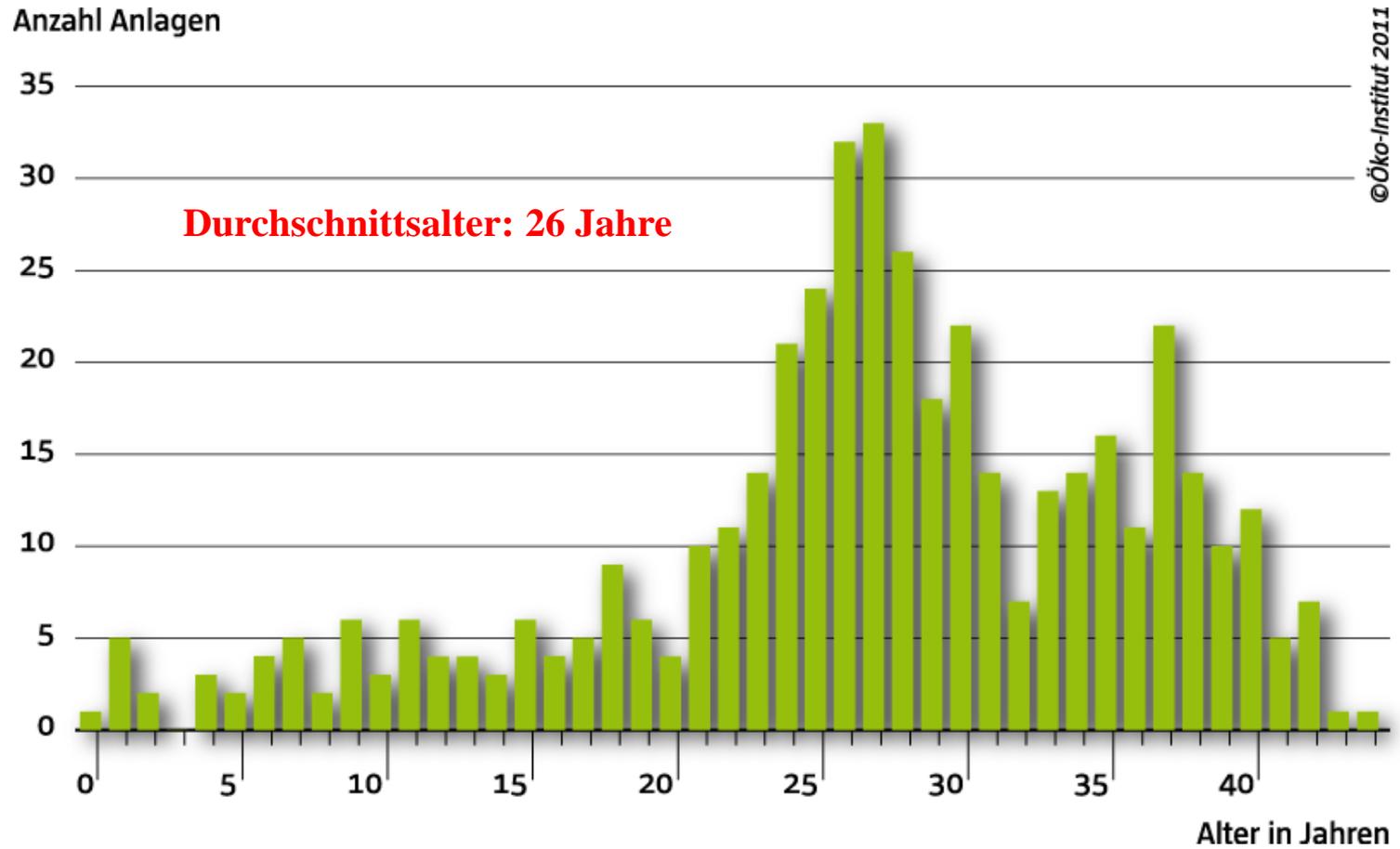
- Die freigesetzte Kontamination bei einem Reaktorunfall kann über Hunderte bis Tausende Kilometer getragen werden

Baubeginn der Kernreaktoren



Quelle: IAEA-PRIS, MSC, 2016

Altersverteilung der laufenden Reaktoren (Stand 2011)

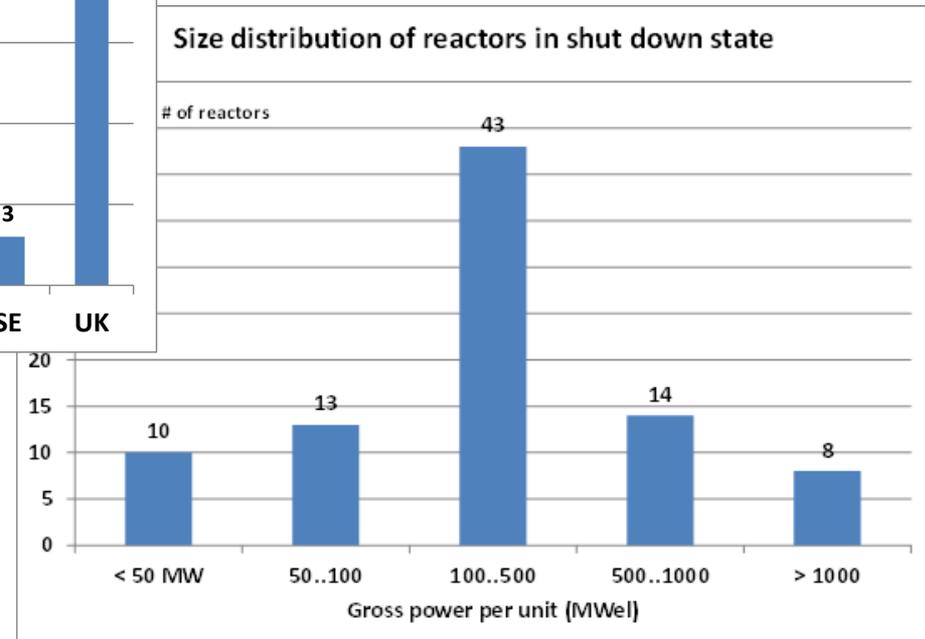
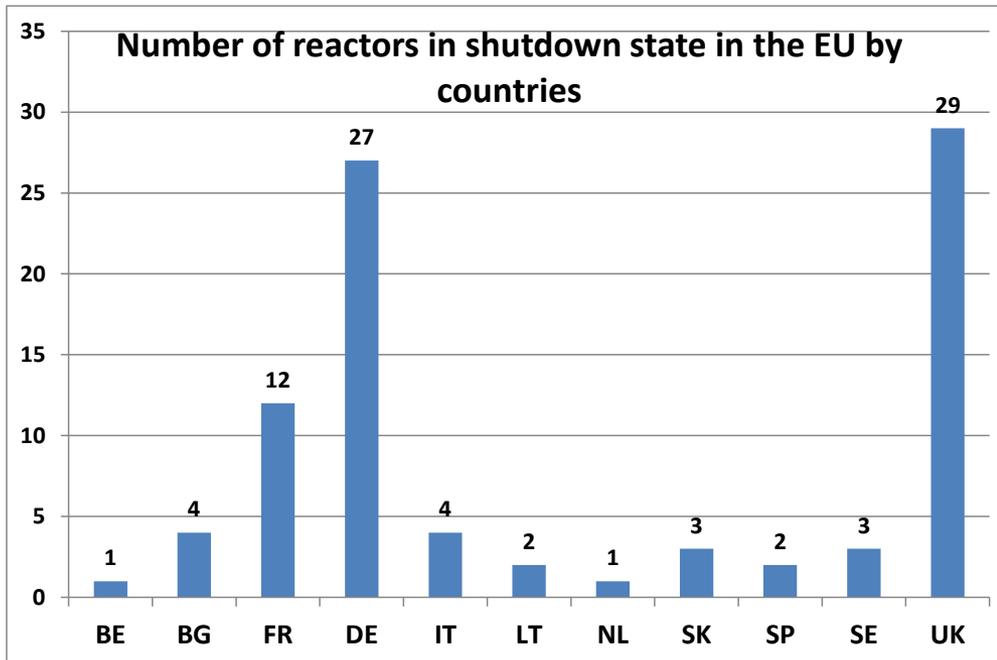


Durchschnittliche Bauzeit weltweit 1954-1 July 2016

Construction Times (in years) – Startups Between 2006 and July 2016				
Country	Units	Mean Time	Min	Max
China	25	5.7	4.3	11.2
India	6	7.7	5.0	11.6
South Korea	5	5.3	4.0	7.2
Russia	4	28.8	25.3	32.0
Argentina	1	33.0	33.0	33.0
Iran	1	36.3	36.3	36.3
Japan	1	5.1	5.1	5.1
Pakistan	1	5.2	5.2	5.2
Romania	1	24.1	24.1	24.1
USA	1	43.5	43.5	43.5
Total	46	10.4	4	43.5

Quelle: IAEA-PRIS, MSC, 2016

EU: die Anzahl und die Größe der Reaktoren, welche stillgelegt werden



Source: Öko-Institut, data aus IAEA-PRIS database /PRIS 2013/

Bestand der Reaktoren

- In 2011: 442 Reaktoren mit 375 GW el. Leistung; in 2016: 402 Reaktoren mit 348 GW
- Steigung der Kernenergieproduktion um 1,3% dank China (31%)
- Bauentscheid für die meisten Reaktoren in 60er und 70er Jahren (Maximum in 1975)
- Weniger als 60 Reaktoren weniger als 10 Jahre alt
- Gros der Reaktoren zwischen 20 und 30 Jahren
- Mittleres Alter der laufenden Reaktoren entspricht etwa mittlerem Alter der bereits abgeschalteten Reaktoren
- Bei mittlerer Laufzeit von 40 Jahren (je älter, desto störfallanfälliger)
 - **340 Reaktoren gehen innerhalb von 20 Jahren vom Netz**

Was passiert mit den abgeschalteten Reaktoren, was sind die Kosten für die Entsorgung?

- Unmittelbare Stilllegung und Rückbau oder verzögerter Rückbau („Einkapselung“ bis Teil des Inventars abgeklungen ist)
- Rückbaukosten pro Reaktor – 700-800 Mio. €
- Was passiert mit dem radioaktiven Abfall (abgeb. Brennelemente?)
- Aufwändige Zwischen- und Endlagerung in tiefen geologischen Formationen
- Zur Zeit weltweit kein Endlager für hochradioaktive Abfälle

Financial Year	Reserves for decommissioning			Specific reserves	
	million €			Per Unit	Per GWel
	RWE	E.ON	Both	M€/Unit	M€/GW
2012	6865	4945	11810	844	719
2011	6483	4964	11447	818	697
2010	6055	4490	10545	753	642
2009	6444	4626	11070	791	674
Average	6462	4756	11218	801	683

Source: Öko-Institut,

Was heißt die Endlagerung?

- Endlagerprojekt erstreckt sich über 100 Jahre (Standortsuche, Bau, Betrieb, Verschluss), **1 Mio Jahre** müssen die Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich des Endlagers zurückgehalten werden müssen.
- In Deutschland soll Endlager für hochradioaktive Abfälle in 2055 in Betrieb gehen, Betrieb bis 2100
- Daher müssen die hochradioaktive Abfälle in Zwischenlager gelagert werden (am Standort oder außerhalb Kernkraftwerk – in DE Gorleben)
- Problem der verlängerten Naßlagerung (Kühlung im Becken) und der langfristigen Trockenlagerung (z.B. Castorbehälter)
- Weltweit konkrete und vorangeschrittene Planungen nur in Europa – Best Practices Schweiz und in Schweden
- Auch in Japan die Planung eines Endlagers wenig konkret

Was sind die Kosten für die Endlagerung?

- Bis zum Jahr 2099 sollen sich in Deutschland die Kosten für den Rückbau der Kernkraftwerke und die „Entsorgung“ der Brennstäbe auf 169,8 Milliarden Euro summieren. (Wirtschaftsprüfer Warth & Klein für das Bundeswirtschaftsministerium)
- Rückbau und Endlagerung wird sich aus heutiger Sicht auf rund 170 Milliarden Euro belaufen.
- Lohnt es sich?
- Was sind die Kosten beim Rückbau eines verunglücktes Kernkraftwerkes?
 - Tschernobyl Rückbaukosten bis 2012: 200 Milliarden US-Dollar
 - Fukushima: rund 260 Milliarden US Dollar in 2012

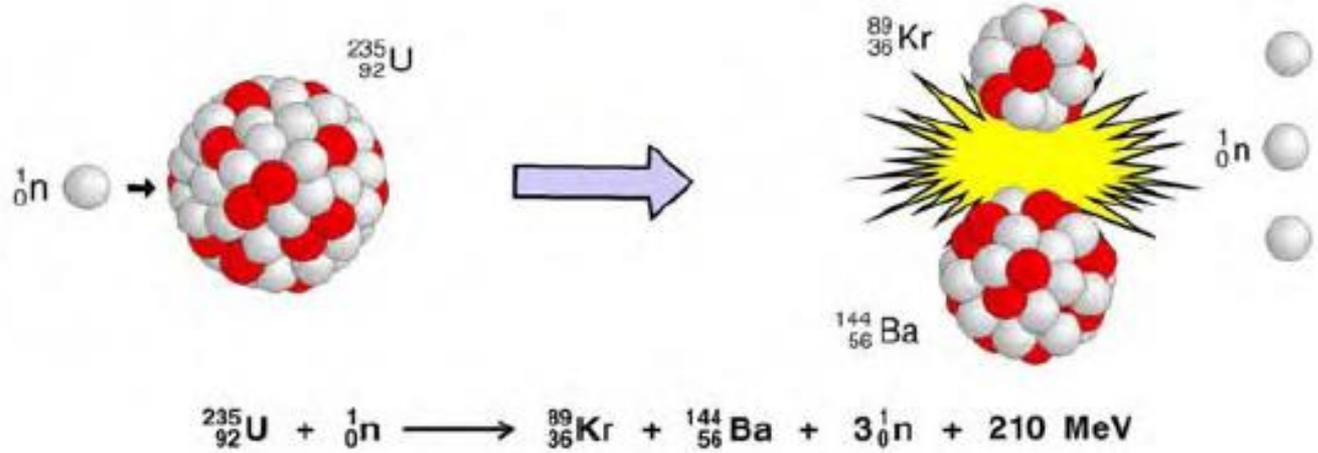
Übersicht

1 Kernenergie: Daten und Fakten

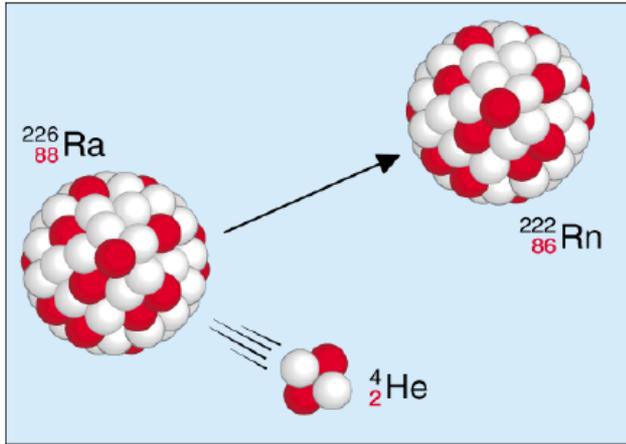
2 Radiologische Beeinträchtigung und Strahlenschutz

3 Fukushima: der Unfall und die „Vielfalt“ der Folgen

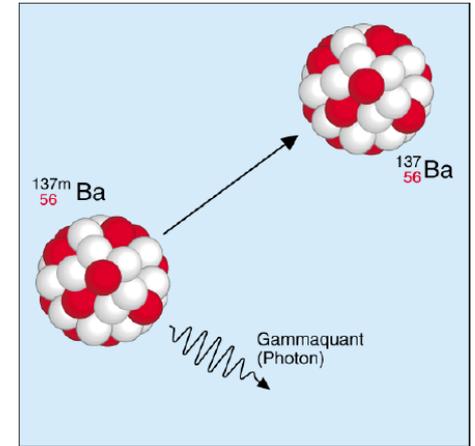
Prozesse im Reaktor: Kernspaltung



Radioaktivität

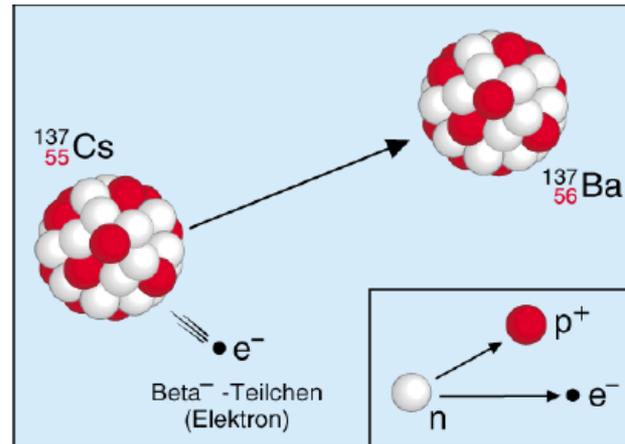


α -Strahlung



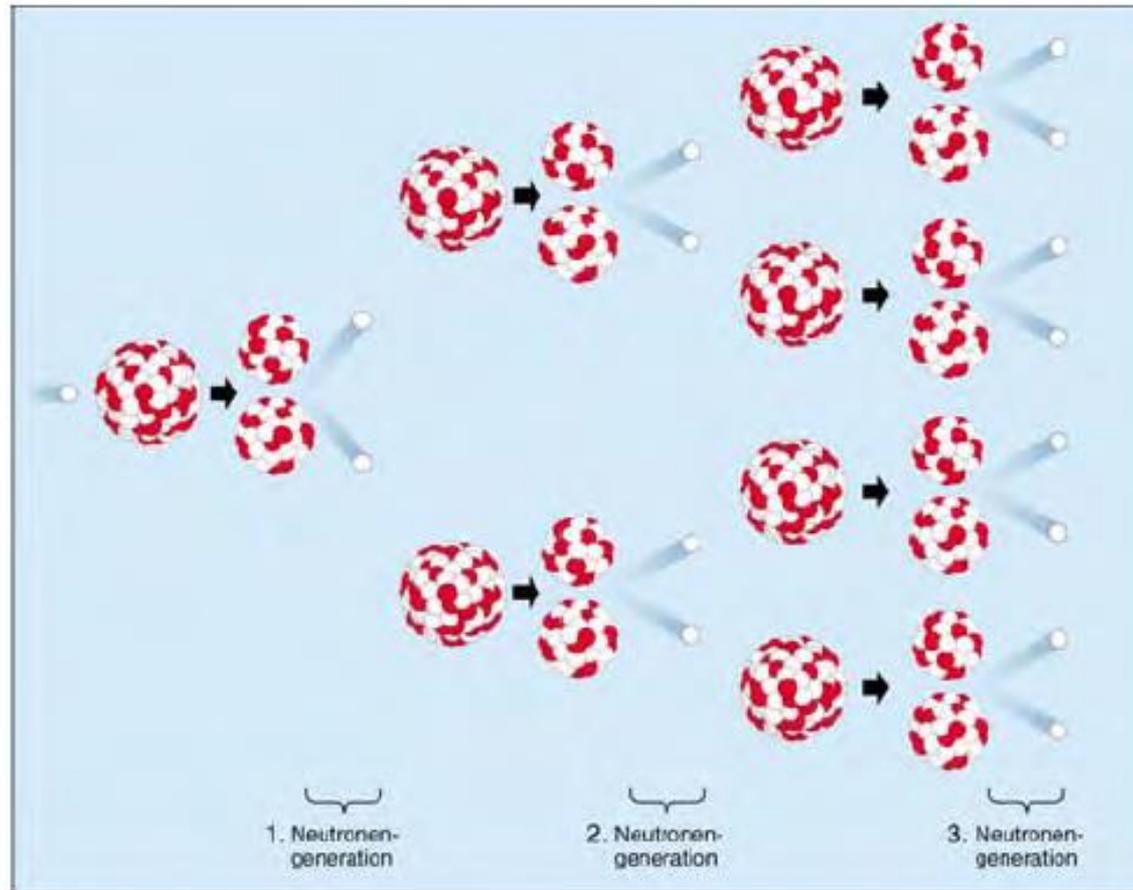
γ -Strahlung

β^- -Strahlung

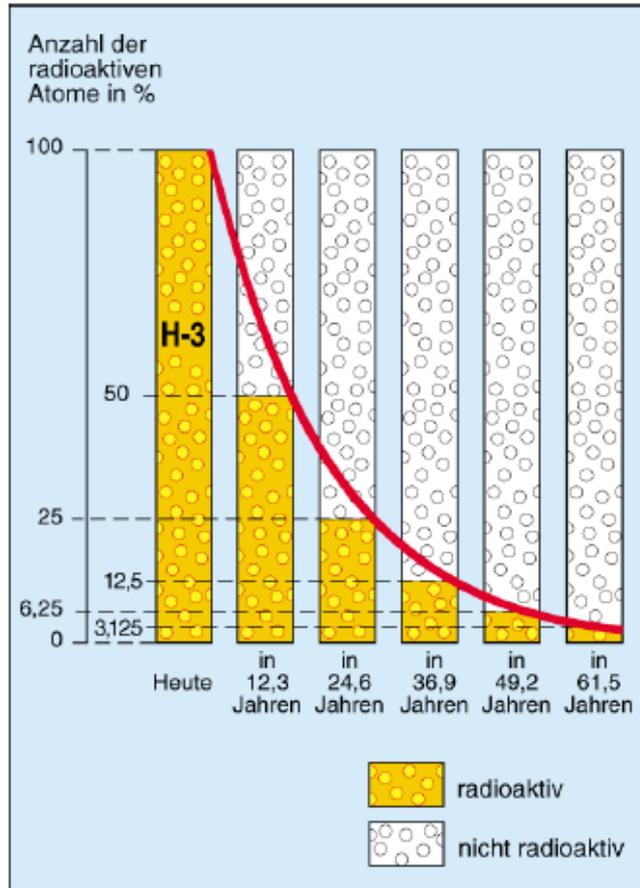


Quelle: Koelzer, Lexikon zur Kernenergie

Kettenreaktion



Halbwertszeit



Die Halbwertszeit ist die Zeitspanne, in der die Menge und damit auch die Aktivität eines gegebenen Radionuklids durch den Zerfall auf die Hälfte gesunken ist. 50 % der Atomkerne haben sich – i. A. unter Aussendung ionisierender Strahlung – in ein anderes Nuklid umgewandelt

Bsp.:
Tritium (H-3),

Halbwertszeit:
12,3 Jahre

Energiefreisetzung bei der Spaltung

Kinetische Energie der Spaltprodukte	175 MeV	83,3 %
Kinetische Energie der Spaltneutronen	5 MeV	2,4 %
Energie der Gamma-Strahlung (unmittelbar)	7 MeV	3,3 %
Energie aus radioaktiven Zerfällen (verzögert)	13 MeV	6,2 %
Energie der Neutrinos	10 MeV	4,8 %
Summe	210 MeV	

Einheiten der Aktivität und die Dosis

Physikalische Größe	SI-Einheit	alte Einheit	Beziehung
Aktivität	Becquerel (Bq) 1 Bq = 1/s	Curie (Ci)	1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq 1 Bq $\approx 2,7 \cdot 10^{-11}$ Ci
Energiedosis	Gray (Gy) 1 Gy = 1 J/kg	Rad (rd)	1 rd = 0,01 Gy 1 Gy = 100 rd
Äquivalentdosis	Sievert (Sv) 1 Sv = 1 J/kg	Rem (rem)	1 rem = 0,01 Sv 1 Sv = 100 rem
Ionendosis	Coulomb durch Kilogramm (C/kg)	Röntgen (R)	1 R = $2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg 1 C/kg ≈ 3876 R

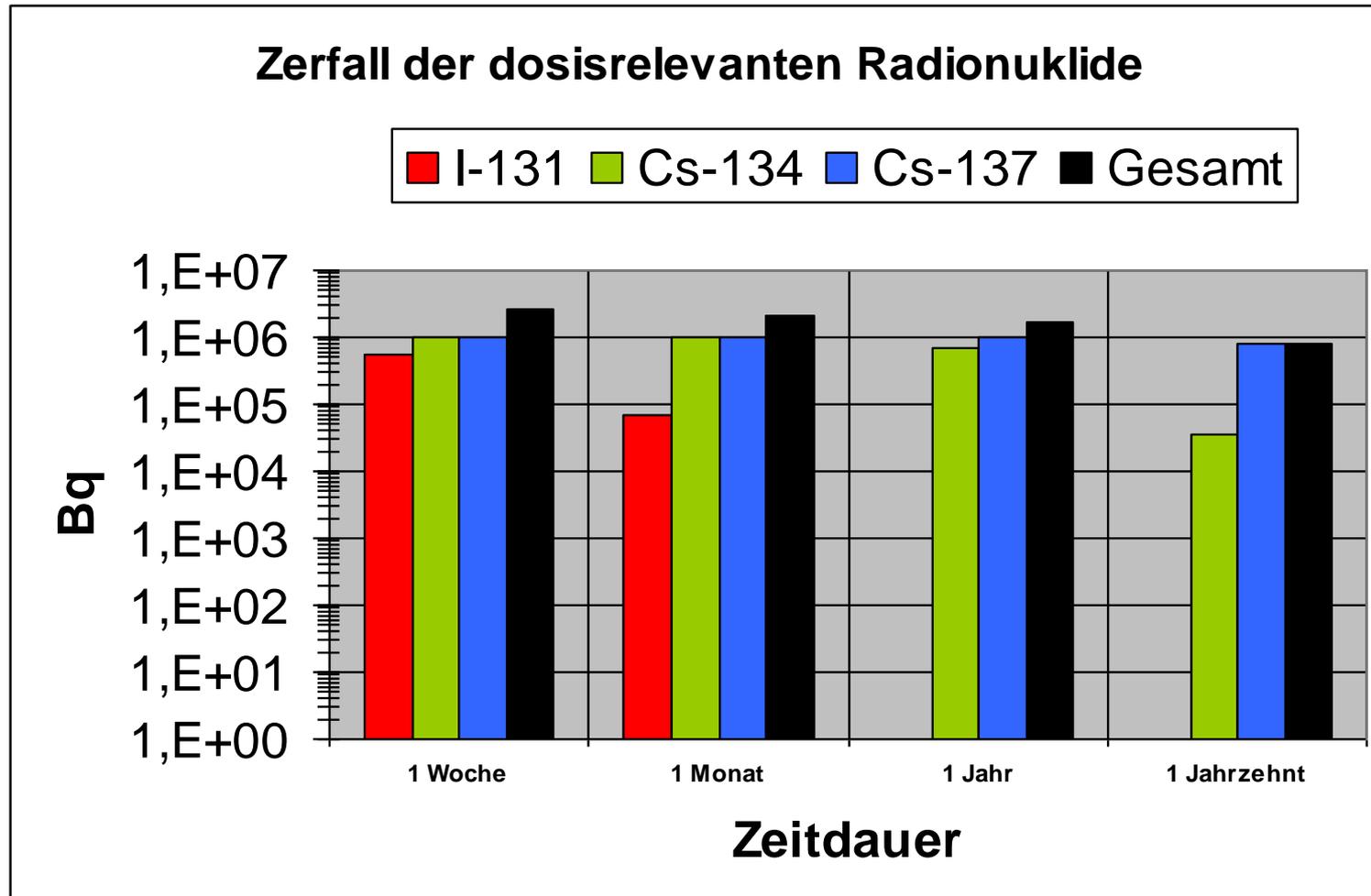
Für Strahlenschutz wichtig: nicht die Energie, die im Körper deponiert wird, sondern die angerichteten biologischen Schäden. Die Äquivalentdosis Sievert gibt an, wie stark gewebeschädigend eine Strahlung ist.

Risiko einer Strahlenexposition

Risiko	
Dosis von 1 Sv:	
Tödliche Krebserkrankung und Nichttödliche Krebserkrankung	5.9%
Schwerwiegende vererbare Wirkungen	0.2 %
Insgesamt	6.1%
Dosis von 100 mSv:	
Alle Wirkungen	0.61%

Die natürliche Strahlenbelastung für Menschen liegt etwa bei 2-3 mSv/a
 Für beruflich arbeitende Personen gibt es eine maximale Dosis von 20
 Millisievert pro Jahr
 Bevölkerung: ALARA (As Low As Reasonably Achievable)

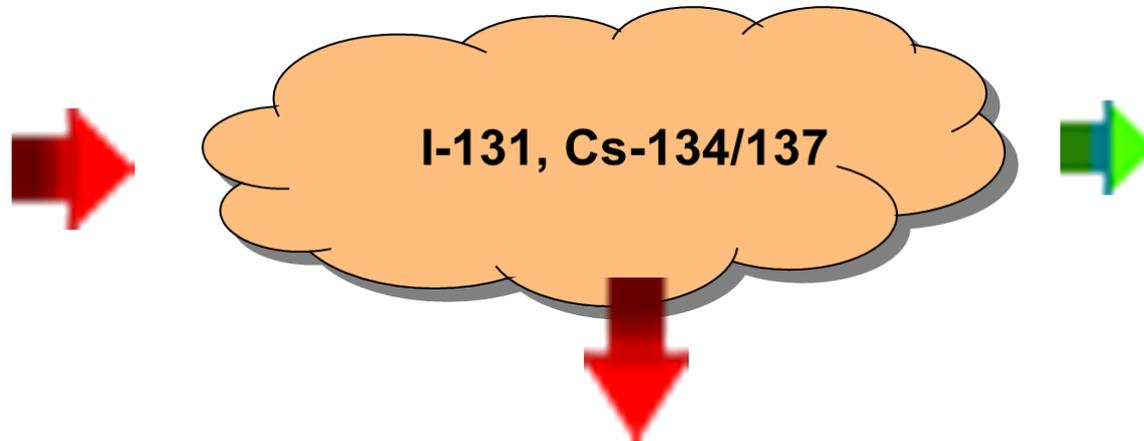
Zerfallseigenschaften: einige wichtige Dosisrelevante Radionuklide



Der Washouteffekt



- Unbeeinflusste Kontaminationswolke wird mit dem Wind transportiert
- Auswaschung der Kontamination durch Regen
- Ablagerung der Kontamination auf dem Boden



z.B. 1 .. 100 kBq/m² I-131 und Cs-134/137

(Beispiele: Tschernobyl in Deutschland, viele Gebiete in Nordjapan in- und außerhalb der Evakuierungszonen)

Notfallschutz: Eingreifrichtwerte nach <Bund 1999b>

- Wesentliche Eingreifrichtwerte in Deutschland bei einem radiologischen Unfall:
 - Aufenthalt in Gebäuden: 10 mSv
(durch äußere Exposition in 7 Tagen und effektive Folgedosis durch in diesem Zeitraum inhalierte Radionuklide)
 - Evakuierung: 100 mSv
(durch äußere Exposition in 7 Tagen und effektive Folgedosis durch in diesem Zeitraum inhalierte Radionuklide)
 - Langfristige Umsiedlung: 100 mSv
(äußere Exposition in 1 Jahr durch abgelagerte Radionuklide)

Notfallschutz. Abgeleitete Eingreifrichtwerte nach <BMU 1999>

Maßnahme	Richtgröße	Cs-137
Aufenthalt in Gebäuden (entspricht 10 mSv in 7 Tagen)	Freigesetzte Aktivität (für 1 km Entfernung zur Quelle)	$2,6 \times 10^{14}$ Bq
	Bodenkontamination	3×10^7 Bq/m ²
	Zeitintegrierte Luftkonzentration (trocken)	$7,9 \times 10^5$ Bq·h/m ³
Evakuierung (entspricht 100 mSv in 7 Tagen)	Freigesetzte Aktivität (für 1 km Entfernung zur Quelle)	$2,6 \times 10^{15}$ Bq
	Bodenkontamination	$3,0 \times 10^8$ Bq/m ²
	Zeitintegrierte Luftkonzentration (trocken)	$7,9 \times 10^6$ Bq·h/m ³
Temporäre Umsiedlung	Bodenkontamination	$2,1 \times 10^7$ Bq/m ²
Langfristige Umsiedlung	Bodenkontamination	$1,2 \times 10^7$ Bq/m ²

Übersicht

1 Kernenergie: Daten und Fakten

2 Radiologische Beeinträchtigung und Strahlenschutz

3 Fukushima: der Unfall und die „Vielfalt“ der Folgen

Kerntechnische Unfälle

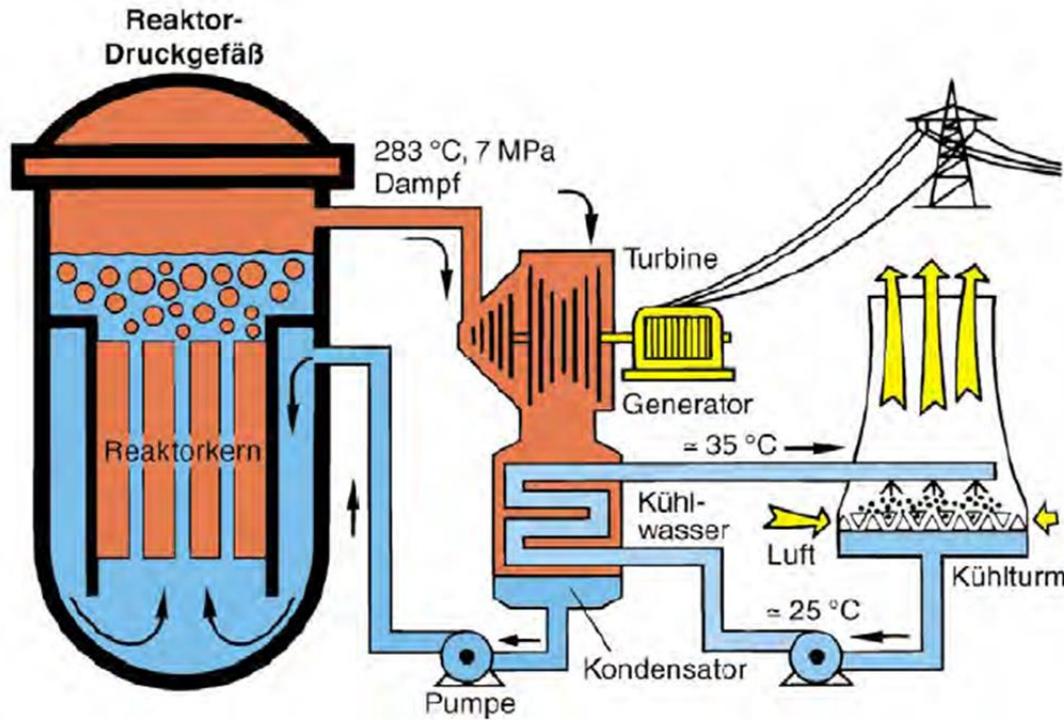
- Ernster Unfall (INES 5)
 - Chalk River, Kanada (1952/58), Kosten 130 Mio. Dollar
 - Wasserstoffexplosion zerstört Reaktorinneres, 30 kg Uranoxid-Partikel treten aus: Brennelemente brennen und kontaminieren weite Teile der Anlage
 - Brand in Windscale-Sellafield*, GB (1957, 1973 INES 4)
 - Three Mile Island mit Kernschmelze, USA (1979): über 1 Milliarde Dollar
- Schwerer Unfall (INES 6)
 - Kyschtym-Unfall*, Russland (1957, damals UdSSR)
 - Explosion hochradioaktiver flüssiger Rückstände, Ausfall der Kühlung
 - Simi Valley, Kalifornien, USA (1959), Kosten 38 Mio. Dollar
 - Teil-Kernschmelze in Forschungsreaktor/Militärnutzung
- Katastrophaler Unfall (INES 7)
 - Tschernobyl, Ukraine (1986, damals UdSSR)
 - direkte wirtschaftlichen Verluste und die Ausgaben infolge der Katastrophe Kosten geschätzt 200 Milliarden Dollar, Beteiligung EU und andere Länder weltweit, Deutschland 19 Mio. Euro Anteil für „Sarkophag“ und weitere Sanierungsarbeiten
 - Fukushima-Daiichi, Japan (2011) Kosten 260 Milliarden Dollar in 2012

INES: International Nuclear and Radiological Event Scale

Fukushima Daiichi



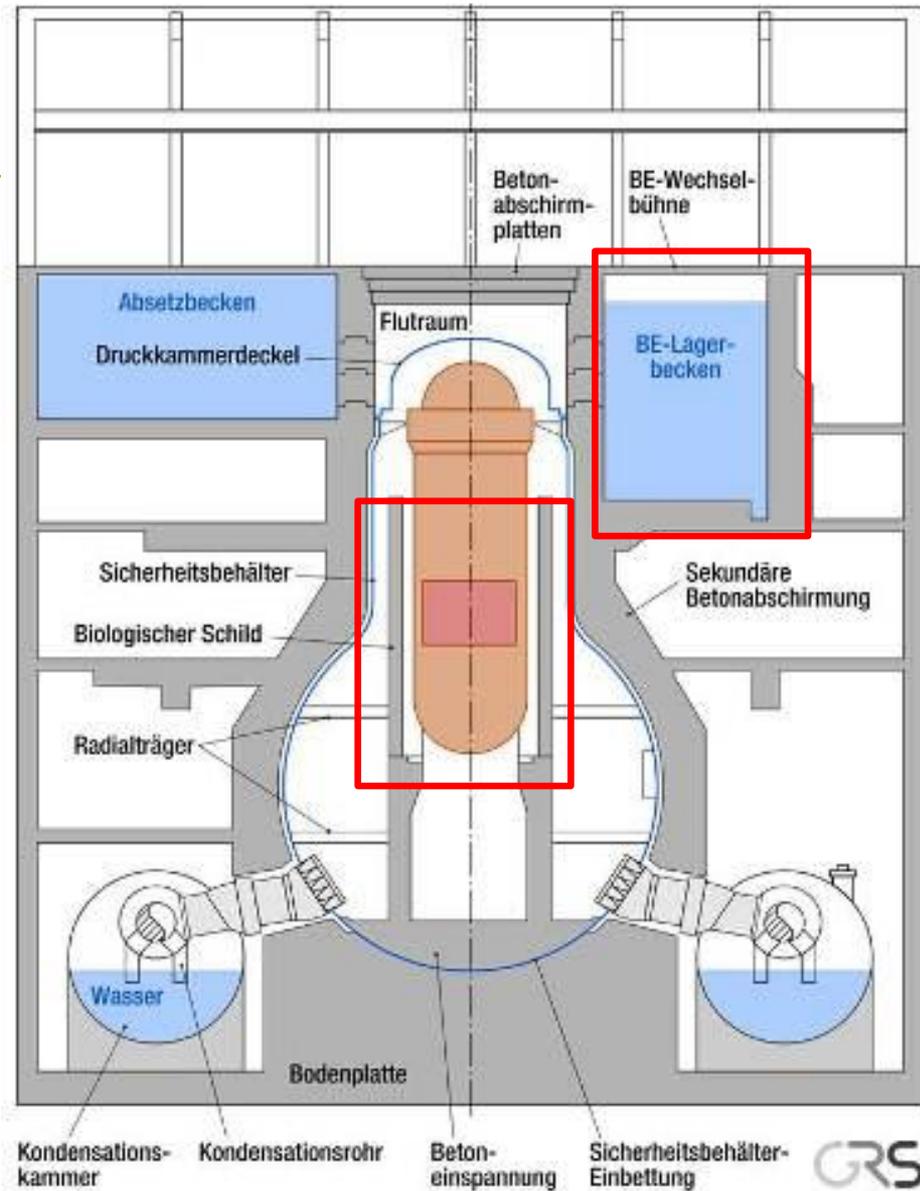
Prinzip de Siedewasserreaktors



- Kontrolle der Kettenreaktion
→ sicheres Abschalten muss jederzeit gewährleistet sein
- Auch Tage und Wochen nach Abschaltung
→ aktive Kühlung des Kerns erforderlich (Notstromdiesel)
- Einschluss der Aktivität
→ Barrieren müssen jederzeit intakt sein

Fukushima Daiichi

Siedewasserreaktor:
General Electric
entworfenen Baureihen
BWR/3 bis BWR/5



Was geschah in Fukushima

- 11. März 2011: Erdbeben der Stärke 9,0 auf der Momenten-Magnituden-Skala, Hypozentrum 155 Kilometer vom Standort Fukushima-Daiichi entfernt in rund 30 Kilometer Tiefe im Pazifischen Ozean
- Auslösen eines schweren Tsunamis
- 14 Meter hohe Tsunami-Wellen überschwemmten in weiten Teilen das Anlagen-Gelände
- Ausfall der externen Stromversorgung der Anlage
- Eindringen des Wassers in Gebäude und Kellerräume (Ausfall der Notstromdiesel)
- Zerstörung vieler weiterer maschinentechnischer und elektrischer Einrichtungen
- Kernschmelze in mehreren Kraftwerksblöcken
- Durch Wasserstoffexplosion Verbreitung der Radionuklide über die Luft

Verbreitung der Radionuklide - Zeitskala: welche Nuklide sind wann für die Dosis wichtig?

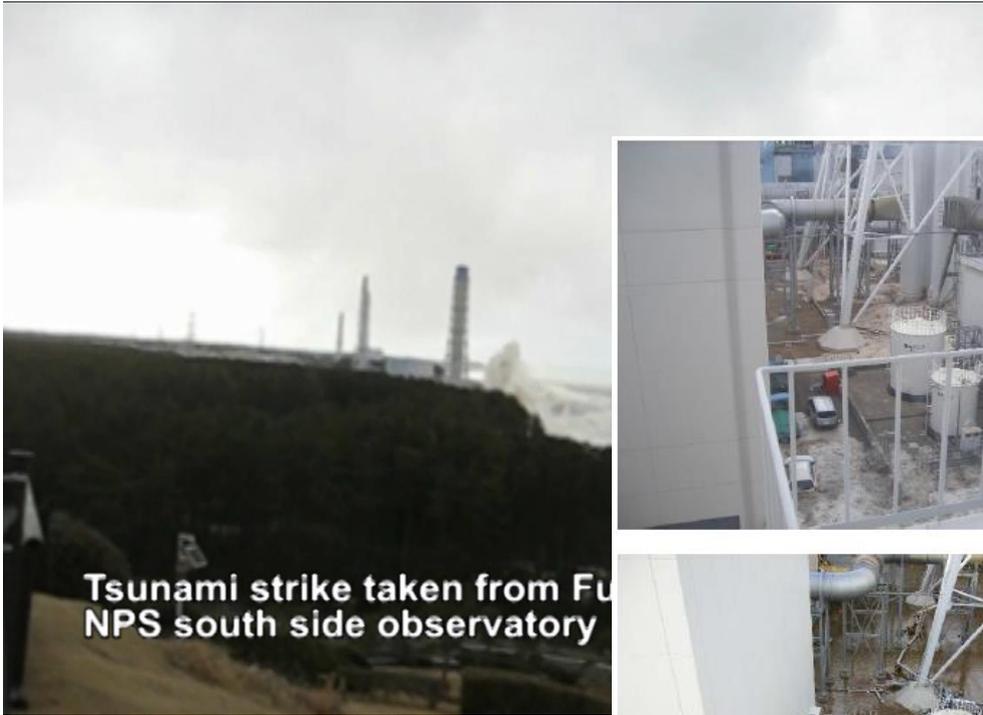
- Kurzzeitig (Stunden nach dem Ereignis): Edelgase
- Kurzfristig (einige Monate): Iod-131
- Mittelfristig (zwei bis drei Jahrzehnte): Cs-134
- Langfristig (> drei Jahrzehnte): Cs-137 und Sr-90

Erdbeben: Zerstörung der Infrastruktur



Quelle: NISA

Tsunami: totaler Station Blackout



Quelle: TEPCO/MEXT

Fukushima Daiichi, März 2011



Vorbereitung auf eine Notfallsituation?

- Die nationale Gesetzgebung und Richtlinien in Japan zur Zeit des Unfalls: die Standards der International Commission on Radiological Protection (ICRP) nicht implementiert:
 - Die Schutzmaßnahmen für die Notfalldienstpersonal nur im Generellen, keine konkrete Ausführungen
 - Viel Personal mit unterschiedlichen Expertisen gebraucht
 - Arbeiter von unterschiedlichen externen Organisationen ohne erforderlicher Erfahrungen – kein Plan zur Integrierung in die Notfallarbeiten
 - Zu wenig Dosimeter zur Personenüberwachung vorhanden
- Über 39.000 Arbeiter bis 2015, davon 4.350 vom TEPCO:
 - Exponiert: über die Luft- und Wasser getragene Kontamination (Kontakt über die Haut oder Inhalation)
- Dosislimit aufgehoben: von 100 mSv auf 250 mSv
- In 6 Fällen Dosis über 678 mSv

Durchgeführte Arbeiten: Blöcke 1-4

- Block 1:
 - In 2011: Einhausung
 - Reduzierung Freisetzung und Reduzierung Eindringen von Wasser
 - Gegenwärtig Öffnen der Einhausung um Brennelemente aus BE-Becken zu bergen
 - Myonen-Detektion des Reaktorkerns: **schwerer Kernschaden**
- Block 2:
 - In 2011: keine Wasserstoffexplosion in Block 2
 - Reaktorgebäude weitgehend intakt, jedoch hohe Freisetzungen, daher nach wie vor kein (bzw. nur extrem kurzzeitiger) Zugang möglich
 - Abbau des 5. Stocks geplant, um Brennelemente aus BE-Becken bergen zu können

Durchgeführte Arbeiten: Blöcke 1-4

- Block 3:
 - Aufbau Krangerüst und Überdachung wie in Block 4
 - Bergung Brennelemente aus BE-Becken ab ca. 2017 geplant (vgl. Block 4)

- Block 4:
 - Gerüst und Einhausung zur BE-Entladung aufgebaut
 - mit Stand 22.12.2014 alle BE aus Block 4 geborgen

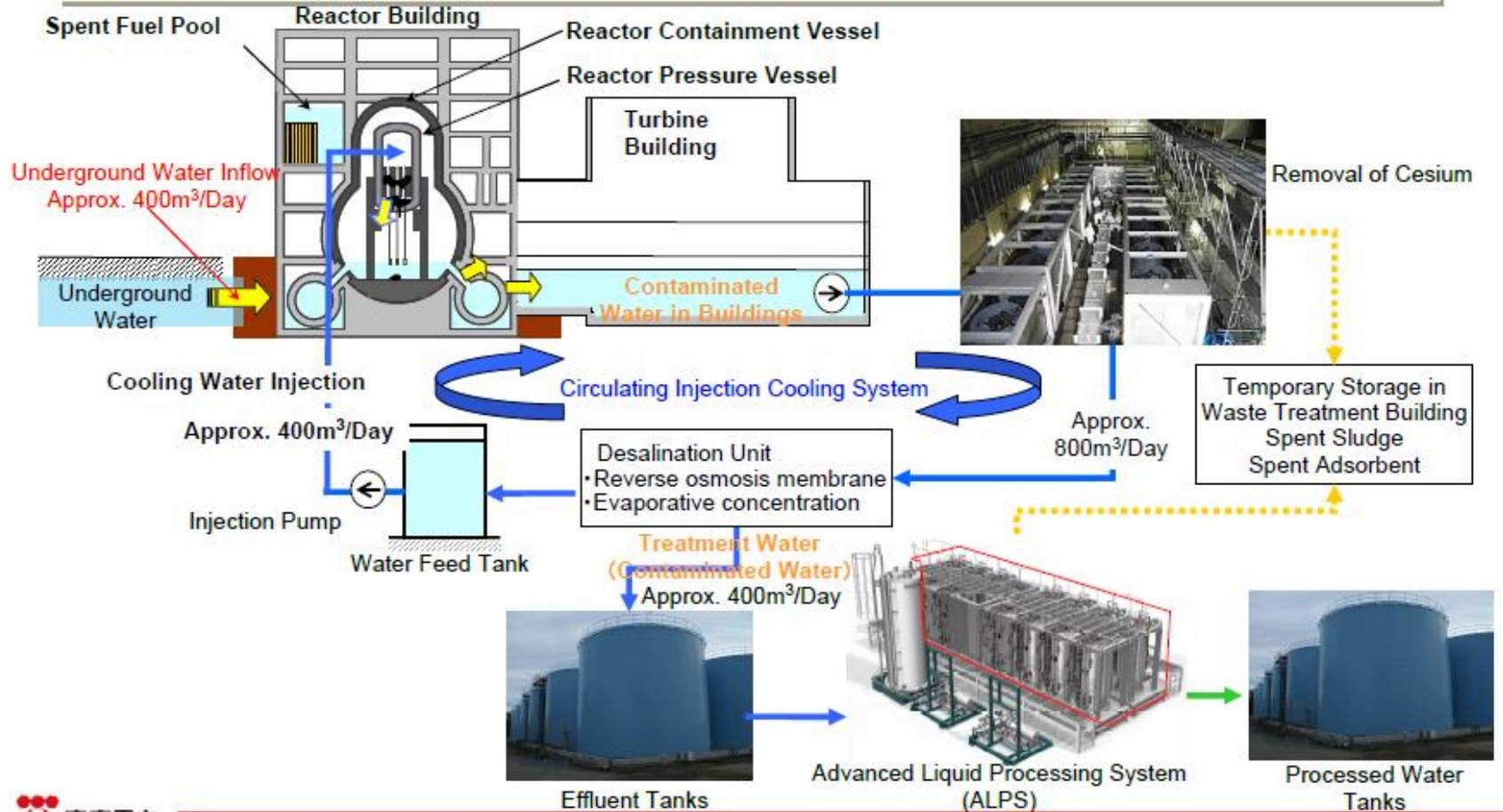
Heutiger Zustand

- Zerstörte Reaktorkerne in den Blöcken 1 bis 3:
 - Block 1 sehr weitgehend, Blöcke 2 und 3 nach wie vor unklar
- Ort und Zustand der Reaktorkerne weitgehend unbekannt
- Reaktordruckbehälter Block 1-3 beschädigt
- Sicherheitsbehälter Block 1 und 3 undicht, bei Block 2 unklare Leckage
- Kontinuierliche Kühlmitelein speisung weiterhin erforderlich
- Große Mengen hochkontaminiertes Kühlmittel in Kellerräumen
- Kühlung im offenen Kreislaufbetrieb: ständiger Neuanfall kontaminierten Wassers
- 150,000 m² Geländeoberfläche betoniert
- Erst ab 2012 Entwicklung eines langfristigen Rückbauplans

Nächste Schritte

- Weiteres Stabilisieren der Gebäude
 - Notwendig wegen Freisetzungsgefahr bei Einsturz/Verlust der Beckenintegrität
- Bergung des Brennstoffs aus den Lagerbecken (10 Jahre oder mehr)
 - Reparaturen und Dekontamination der Reaktorgebäude, Errichten Krananlagen
 - Bergung aus BE-Becken Block 3 als nächster Schritt
- **Bergung des Brennstoffs aus den RDBs (ca. 30-40 Jahre)**
 - Reparaturen der Sicherheitsbehälter
 - Fluten der Sicherheitsbehälter mit Wasser
 - Öffnen Sicherheitsbehälter und Reaktordruckbehälter
 - Verpacken des Brennstoffs in Behälter

Kühlung und Wasserkreislauf I

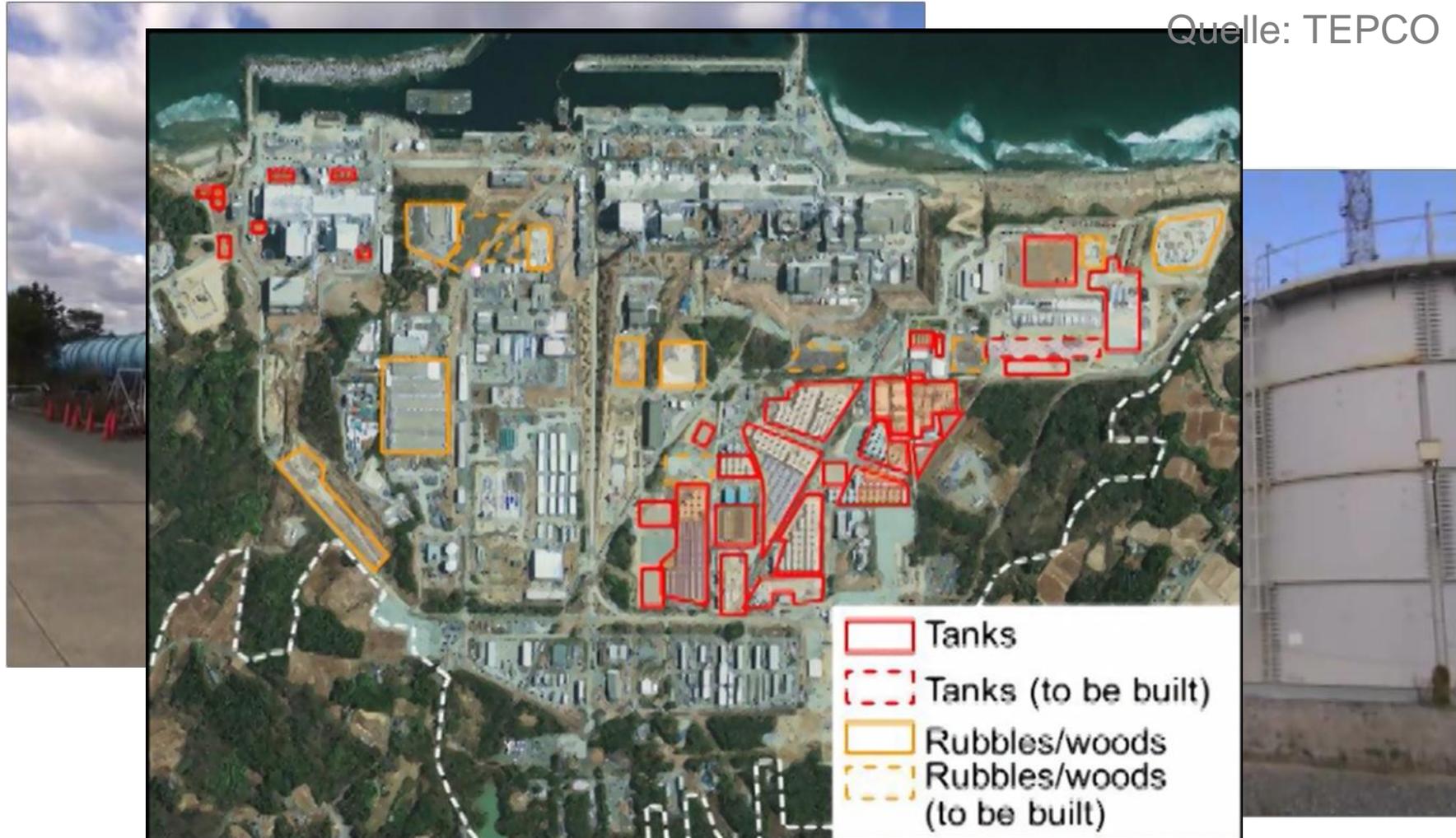


Quelle: TEPCO

Kühlung und Wasserkreislauf II - Stand 19.02.2015

- Tägliche Wassermenge zur Kühlung der Reaktoren:
 - 315 m³
- Wasservolumen in den Untergeschossen Block 1-4
 - 62.500 m³
- Behandelte Wassermenge seit 11.03.2011
 - 1.163.870 m³
- Auf dem Gelände gelagertes kontaminiertes Wasser
 - ca. 550.000 m³ (davon ca. 240.000 m³ hochkont., 315.000 m³ gereinigt)
- Länge des Rohrleitungssystems
 - ca. 3 km

Lagerproblematik



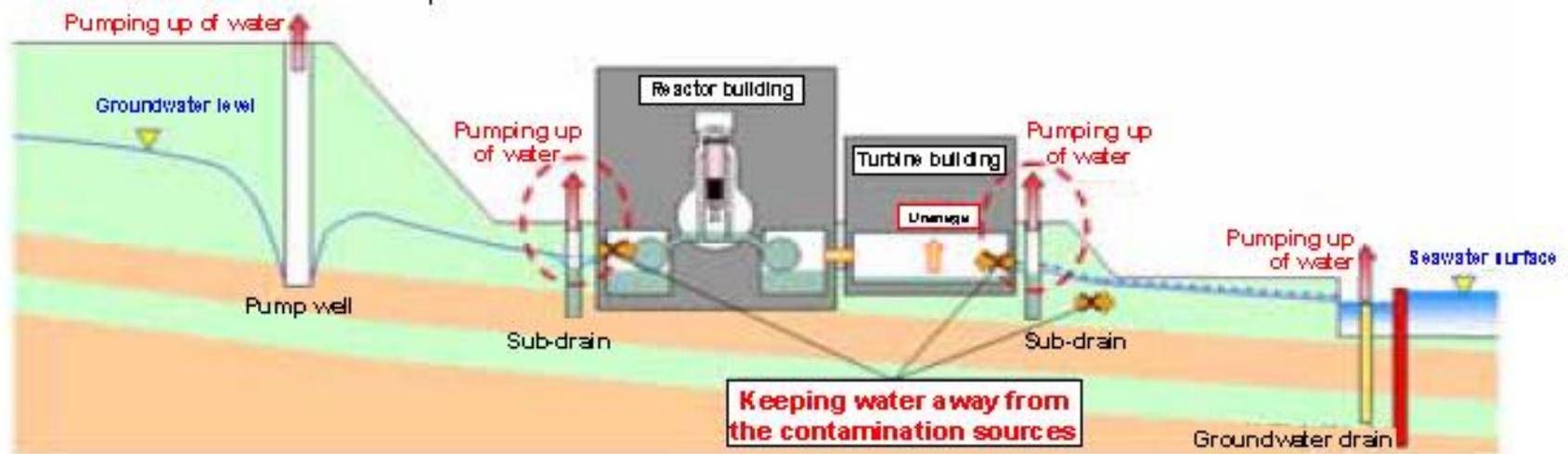
Lagerproblematik

- Einfach zusammengeschraubte Lagereinrichtungen zur Behebung des Wassernotstands, Plastikleitungen, ungeeignete Leckageüberwachungseinrichtungen
 - wären in anderen Bereichen sicherheitstechnisch unzulässig
- Häufige Leckagen mit Austritten radioaktiver Flüssigkeiten
- Teils keine Auffangeinrichtungen gegen Leckagen, Beton rissig, Abfluss in Rinnen oder direkt in den Boden
- Mittelfristig
 - Neuaufbau der Wasserlagerung nach Stand von Wissenschaft und Technik wäre eigentlich zwingend erforderlich
 - „Weiterwursteln“ keine Alternative, weil Zahl und Schwere der Ausfälle künftig eher noch weiter zunehmen wird (Alterung, Erdbeben, etc.)

Lagerproblematik: Entwicklung neuer Behandlungsanlagen zur Wasserdekontamination

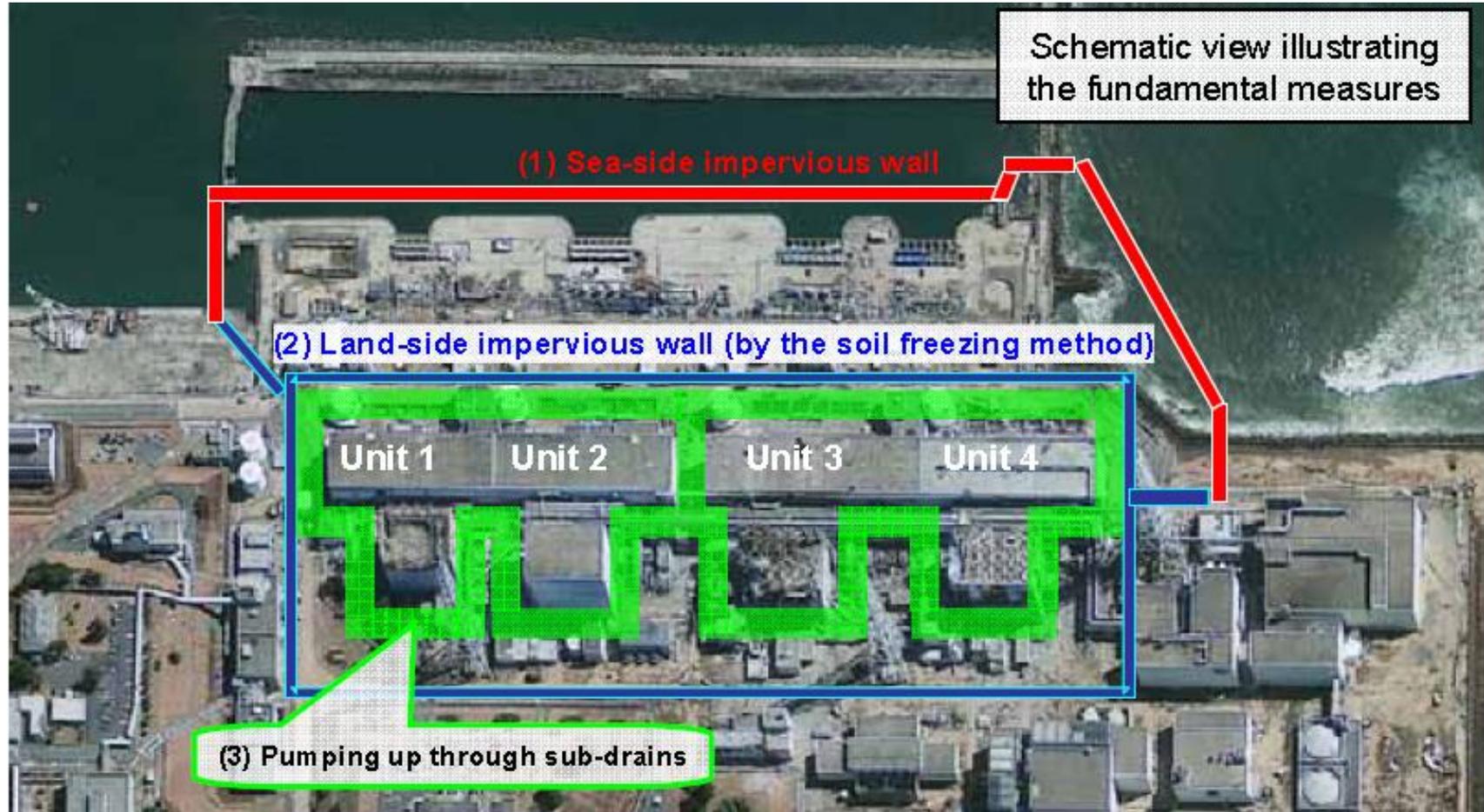
- Die Anlagen zur Cs-Entfernung laufen
- Neue Anlagen (ALPS) zur Abtrennung weiterer Nuklide (insb. Sr) im „Testbetrieb“, mittlerweile jedoch halbwegs stabil
- Aber: Mit einer Freigabe gereinigter Wässer zur Einleitung in das Meer ist aufgrund Widerstand der Bevölkerung nicht zu rechnen
- Langfristig:
 - Kann ernstes Glaubwürdigkeitsproblem bei Meereseinleitung überwunden werden?
 - Kann Technologie zur Tritiumabtrennung entwickelt werden??
 - Sonst einzig gesellschaftlich akzeptierte Technik: Verfestigung mit Zement und Endlagerung in oberflächennahem Lager mit technischen Barrieren und administrativer Kontrolle über längere Zeiträume (mehrere 100 Jahre)

Grundwasserproblematik



Quelle: TEPCO

Grundwasserproblematik



Quelle: TEPCO

Grundwasserproblematik

- Vorhandene Kontaminationen im Grundwasser beobachten (TEPCO-Überwachung derzeit ausreichend)
- Dringend: Maßnahmen zur Eindämmung von Quelltermen
 - Neuaufbau Tanklagerung, Anlagenqualifizierung Tanklager
 - Trockenlegung der Keller (wie kommt das Wasser dort hin?, Abstellen der Versickerungswege, etc.)
 - Bau der Spundwand an der Meeresseite
 - Umstrittene Maßnahme „Icewal“

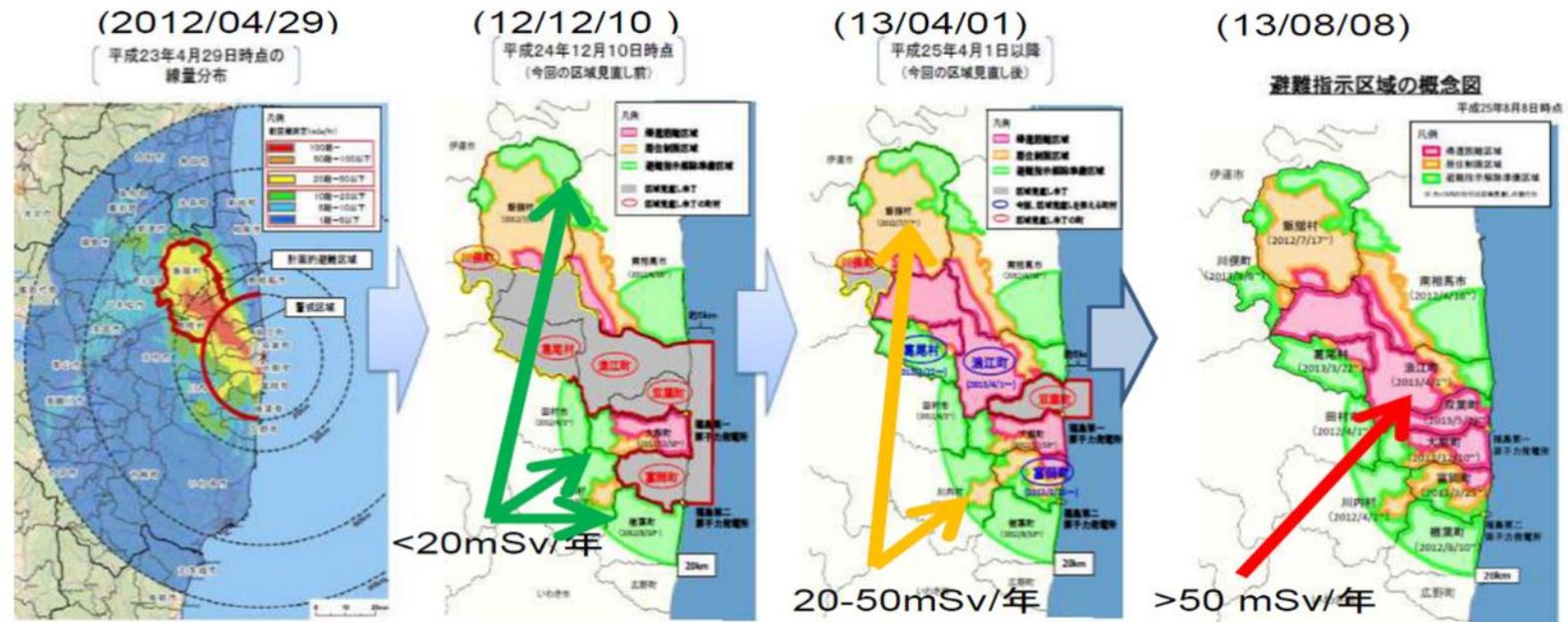
Unfallfolgen – Evakuierung, provisorische Unterbringung



Quelle: Öko-Institut

Unfallfolgen II - Wiederbesiedlungs-dosisziele

- Zone grün < 20 mSv/a: ohne zwingende Auflagen (Dosisziel)
- Zone gelb 20 – 50 mSv/a: Dekontmaßnahmen
- Zone rot > 50 mSv/a: Nicht wiederbesiedelbar



Quelle: MEXTc

Unfallfolgen III - Was bedeutet 20 mSv/a Dosisziel?

- ca. 7-fach höher als durchschnittliche natürliche Hintergrundbelastung von ca. 3 mSv/a
 - Bislang gültiger Dosisgrenzwert für Beruflich Strahlenexponierte
 - Risiko ca. 1 : 1000 für ernsten Gesundheitsschaden (gegenüber 1 : 20.000 bei 1 mSv/a)
 - Beispiel:
 - Es kehren 50.000 Personen zurück
 - jeder erhält tatsächlich 20 mSv/a
 - Kollektivdosis = 1.000 man·Sv/a
 - Anzahl akzeptierte Schäden (Umrechnung nach ICRP) = 56 Fälle pro Jahr
- Rückkehr kann nicht als schadlos betrachtet werden
- Abgesehen von schweren psychischen Schäden.....

Cleanup



Cleanup

- Bei glatten und abwaschbaren Flächen:
 - Reduzierung auf 10 bis 20% möglich
 - Verlagerung der Kontamination in das Waschwasser
- Bei rauen Oberflächen tiefgreifender Oberflächenabtrag
→ erheblicher Abfallanfall, erfordert Deponierung
- Kontamination extrem unterschiedlich verteilt, daher extrem hohe Messdichte erforderlich
- Erreichung des Dosiszielwerts im Einzelfall nicht garantierbar
→ Personen mit noch höherem individuellem Risiko zu beaufschlagen muss in Kauf genommen werden

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!
Thank you for your attention!

Haben Sie noch Fragen?
Do you have any questions?



Ihre Ansprechpartner

Dr.-Ing. Veronika Ustohalova

Senior researcher

Öko-Institut e.V.

Bereich Nukleartechnik & Anlagensicherheit

Rheinstrasse 95

D-64295 Darmstadt

v.ustohalova@oeko.de