

# **Renaissance der Kernenergie und heutiger Stand der Sicherheitstechnik**

Energie für die Zukunft, h\_da, 20.11.2008

**Dr. Christoph Pistner**

**Öko-Institut e.V., Darmstadt**

## Gibt es eine Renaissance der Kernenergie?

Ist es eine Renaissance der Kernenergie

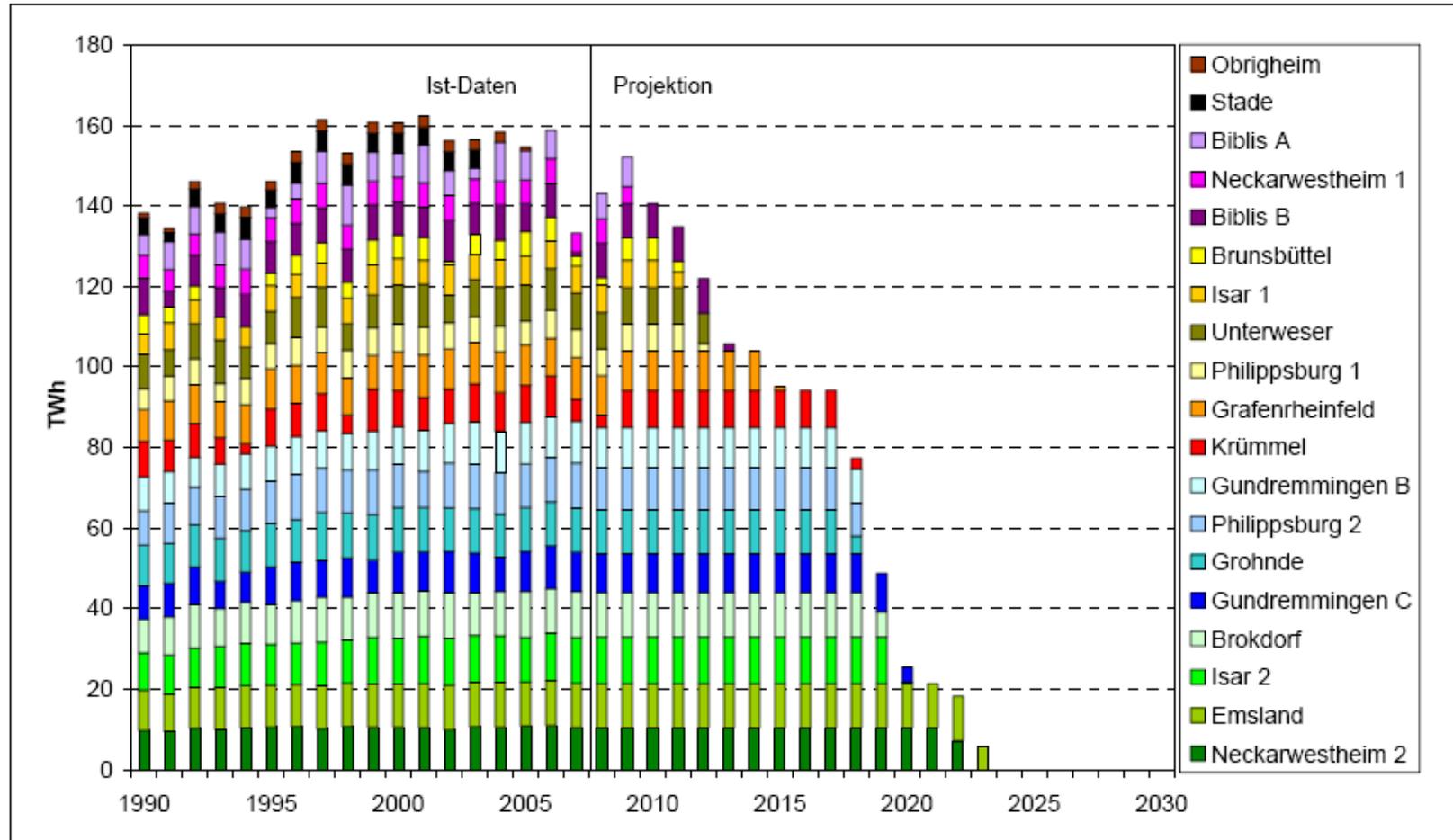
- wenn wieder so viele Reaktoren gebaut werden, wie schon früher einmal?
- wenn überhaupt neue KKW gebaut werden?
- wenn über neue KKW nachgedacht wird?

# Übersicht

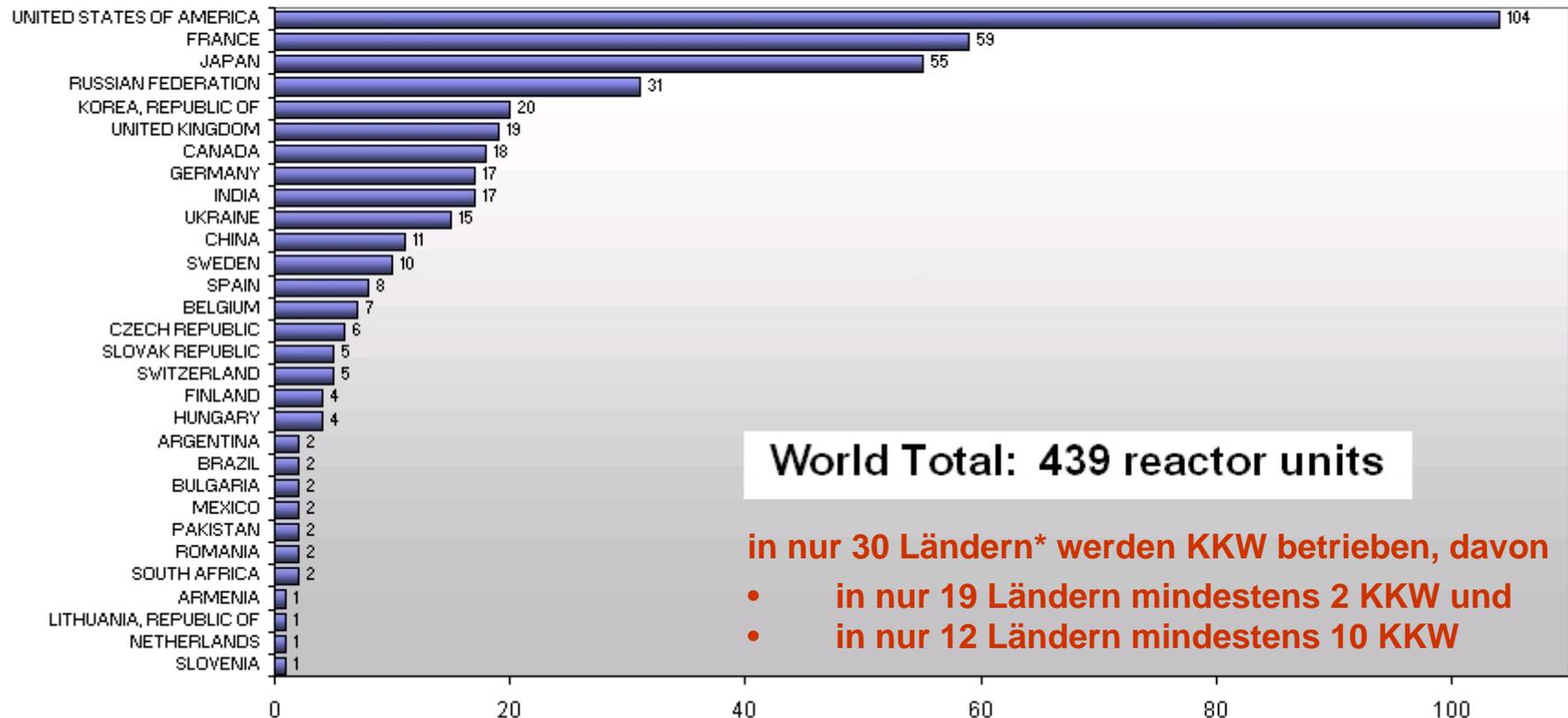
- Stand Kernenergie heute
  - Zahlen und Fakten
- Wichtige Aspekte einer Renaissance der Kernenergie
  - Kosten
    - Neubau: Beispiel Finnland
  - Reaktorsicherheit
  - Uranreserven
  - Endlagerung
  - Sicherheitspolitik
  - Neue Reaktorkonzepte
- Fazit

# Stand Kernenergie heute

# Reststrommengen in Deutschland



## Number of Reactors in Operation Worldwide

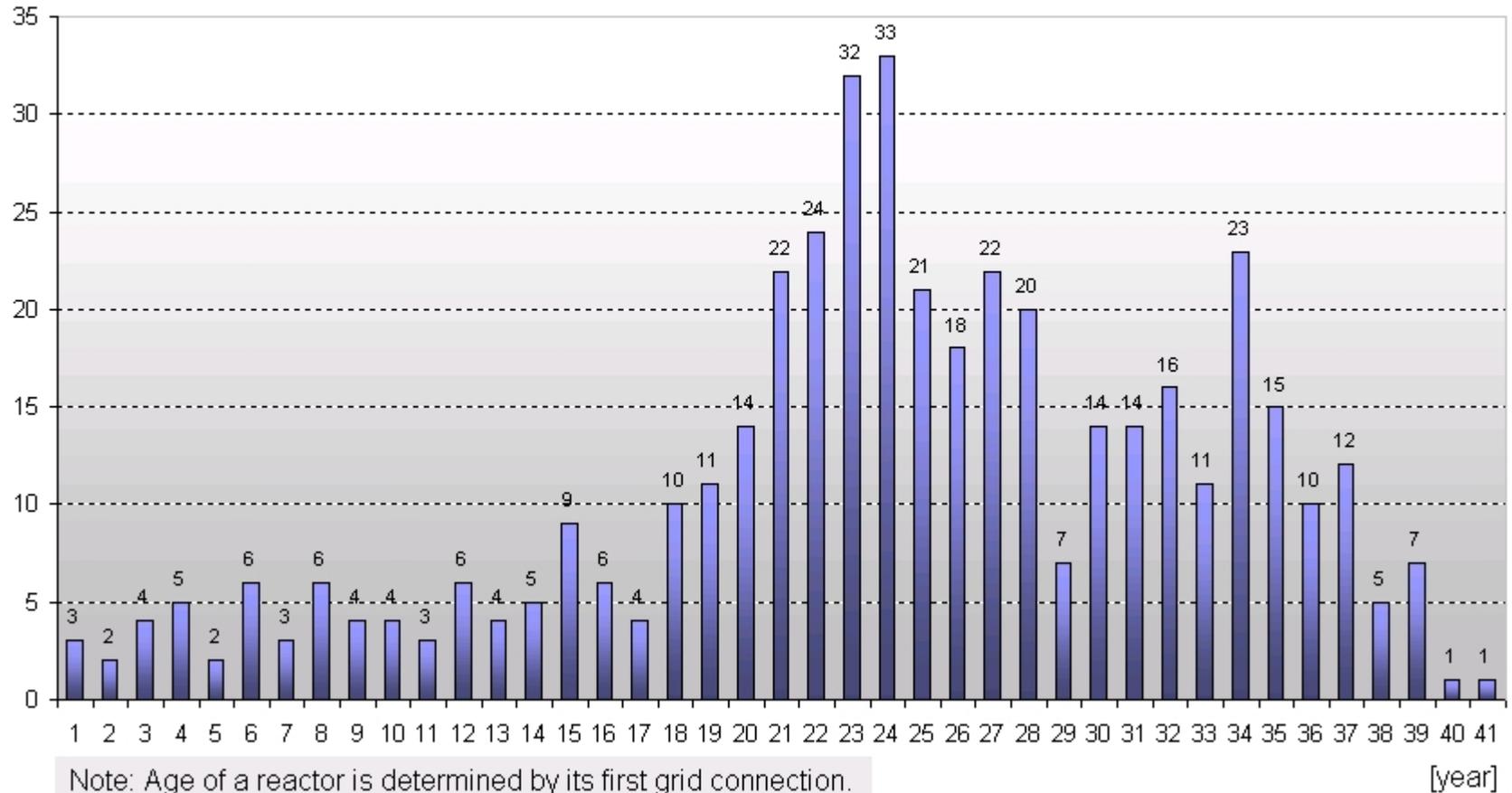


**World Total: 439 reactor units**

- in nur 30 Ländern\* werden KKW betrieben, davon**
  - in nur 19 Ländern mindestens 2 KKW und**
  - in nur 12 Ländern mindestens 10 KKW**

Note: Long-term shutdown units (5) are not counted

## Number of Operating Reactors by Age (as of 7 of January 2008)



Quelle: IAEA 2008 ([www.iaea.org](http://www.iaea.org))

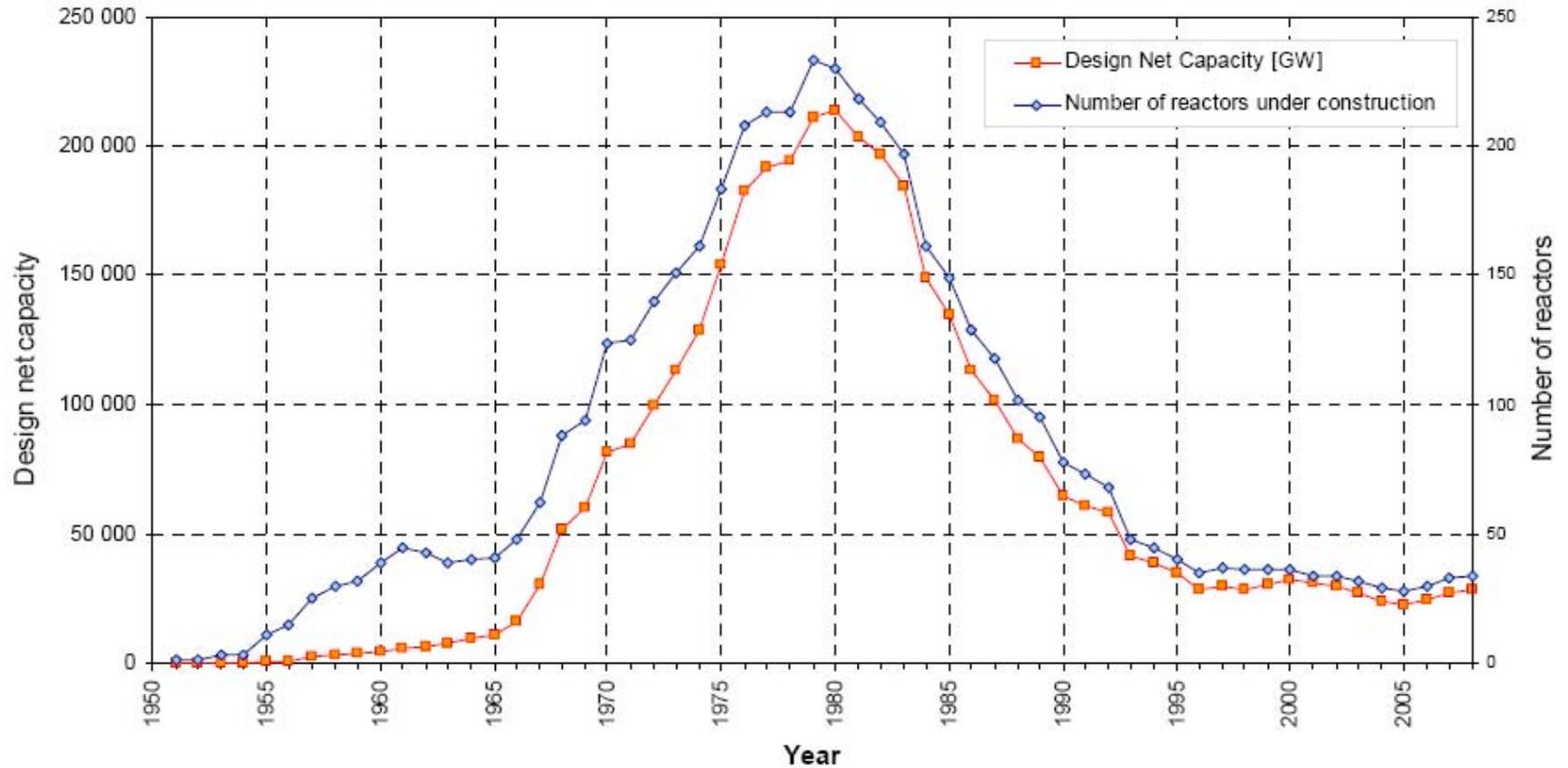
## Rolle der Atomkraft bei den 6 größten Nutzern (Stand 2003)

Land	Primärenergie in Mt <sub>oe</sub>	Endenergie in Mt <sub>oe</sub>	Atomkraft in Endenergie in Mt <sub>oe</sub>	Anteil Atomkraft an Endenergie in %
Frankreich	276	161	28	7,5
Japan	515	359	23	6,4
Südkorea	217	138	9	6,7
Deutschland	330	241	15	6,4
USA	2332	1557	61	3,9
Russland	671	418	13	3,1

## Bestand an Reaktoren

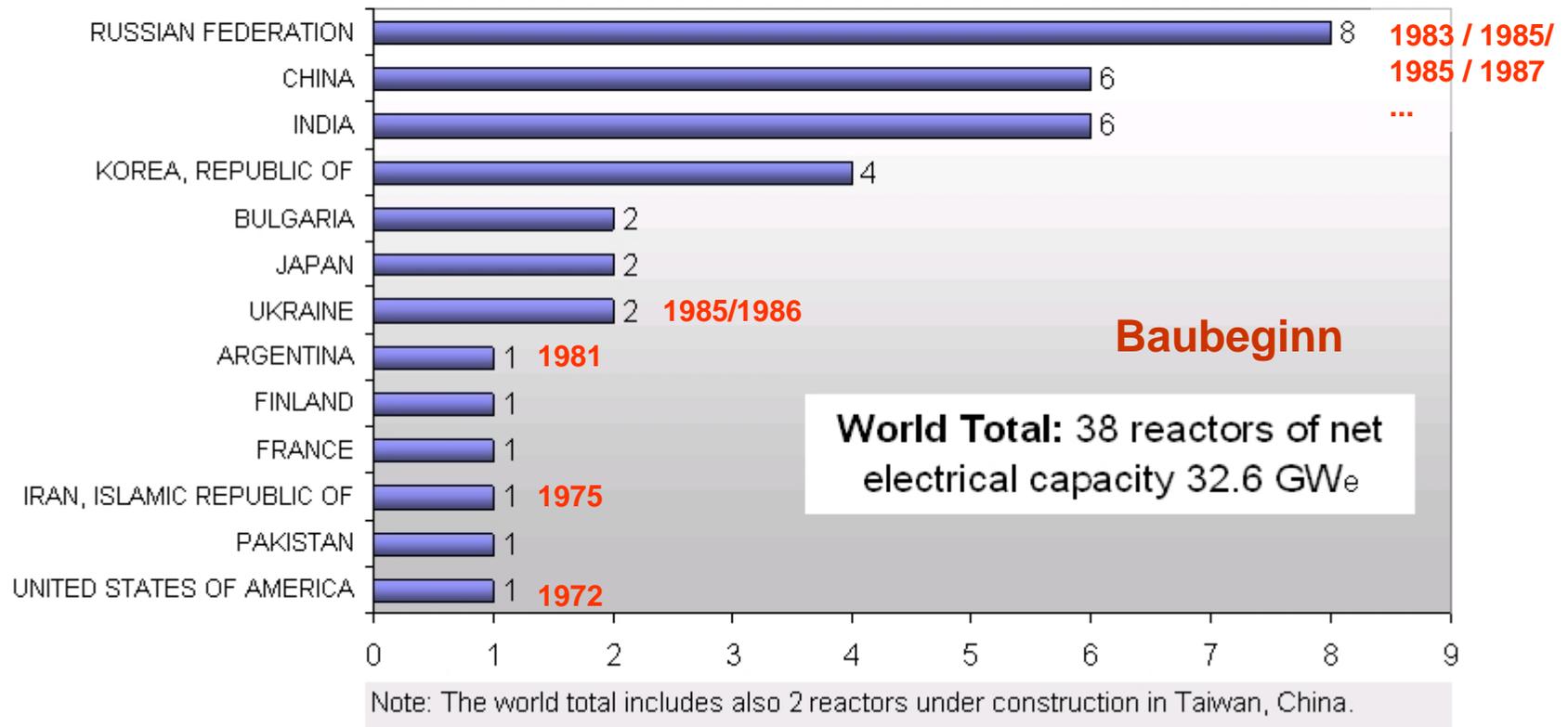
- Derzeit 439 Reaktoren
- darunter nur 38 Reaktoren weniger als 10 Jahre alt
- Gros der Reaktoren zwischen 20 und 30 Jahren
- Bauentscheid für viele Reaktoren in 60er und 70er Jahren
- In Hochzeiten bis über 30 Bauentscheide und Inbetriebnahmen pro Jahr

## Anlagen in Bau



Quelle: IAEA 2008 (GOV/INF/2008/10-GC(52)/INF/6)

## Number of Reactors under Construction Worldwide

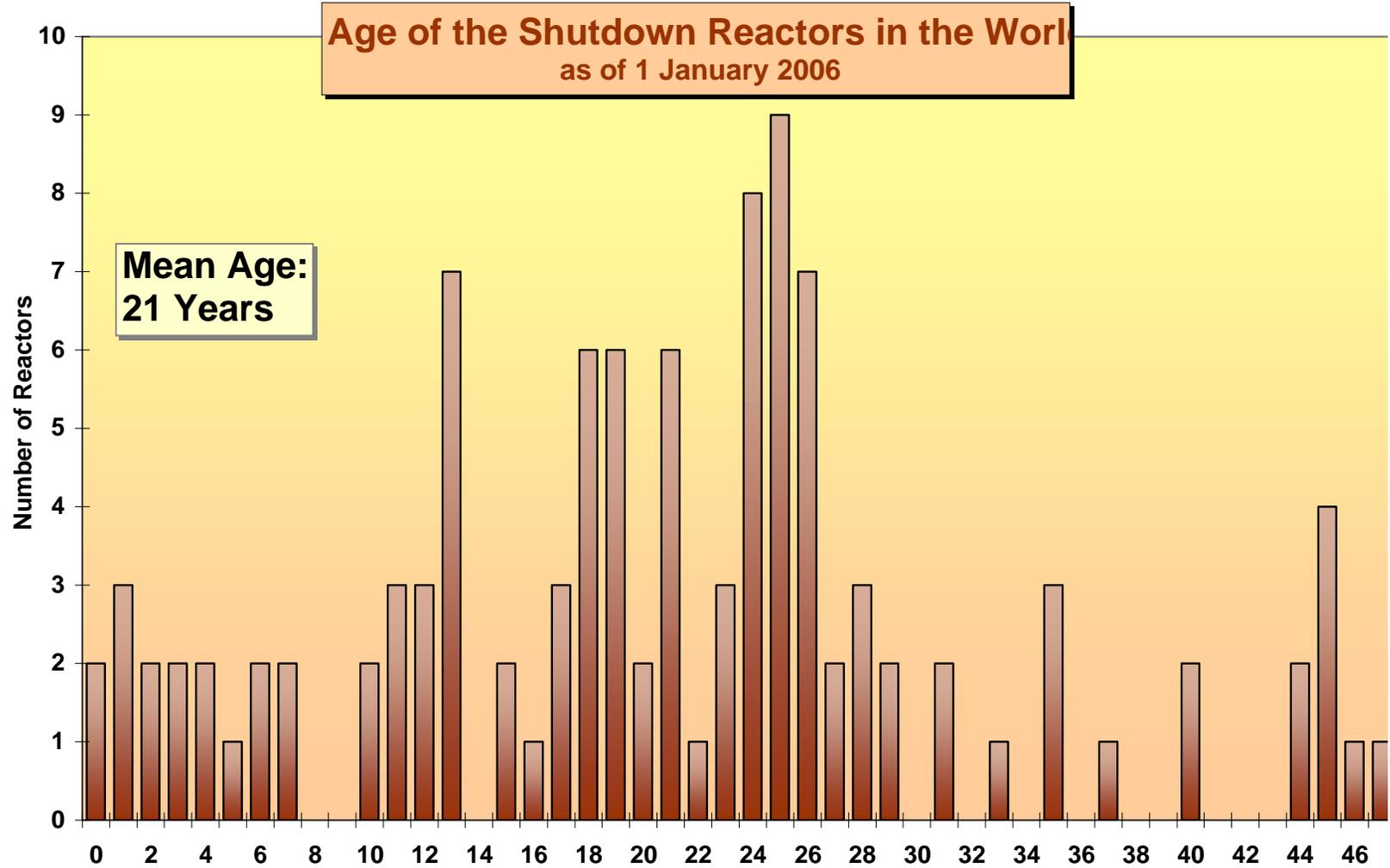


## Bau und Inbetriebnahme

- Auch für die nächsten Jahre wird nur wenig KKW-Leistung in Betrieb genommen werden
- Viele der derzeit im Bau befindlichen Anlagen schon seit den 80er Jahren im Bau
- Jüngere Entscheidungen vor allem in Asien in Ländern, die schon länger KKW betreiben
- Seit langem dominieren DWR und SWR die Entscheidungen, andere Reaktortypen spielen praktisch kaum eine Rolle

## Diskussionen über KKW (1)

- Viele Länder diskutieren über Verlängerung der Laufzeit („life time extension“), z.B. auf 60 Jahre
  - sicherheitstechnisch problematisch, da alte Reaktoren nur partiell auf heutige Anforderungen nachgerüstet werden können
  - Betreiber mit Erlaubnis für Verlängerung der Laufzeit benötigen keine neuen Reaktoren



Source: IAEA PRIS

## Diskussionen über KKW (2)

- Eine Reihe von Ländern diskutiert über Neubau von Reaktoren
  - Diskussion ist noch kein Neubau
  - Eine ähnliche Diskussionswelle gab es auch in den 80er Jahren
- Vor Entscheid für Neubau muss Betreiber und Finanzierung gefunden werden
- Land braucht Sicherheitsstandards und qualifizierte Kontrollbehörden

## Diskussionen über KKW (3)

- Weltweit nur wenige Hersteller verfügbar
- Hersteller haben beschränkte Kapazität (Fertigung, Ingenieure), da über lange Jahre Kapazitäten mangels Aufträgen abgebaut werden mussten
- Einige Länder auch mit Industrie, die im eigenen Land bauen kann (China, Korea)

# **Wichtige Aspekte einer Renaissance der Kernenergie**

## Kosten

- Kosten für einen Reaktorbau sind derzeit nicht bestimmbar
  - keine Erfahrung mit aktuellen Baukosten, weil derzeit praktisch keine Projekte unter Marktbedingungen gebaut werden
  - Unklarheiten, welches Niveau von Sicherheitsanforderungen einzuhalten ist
- Kosten müssen für eine in der Industrie unüblich lange Zeit vorfinanziert werden, weil Abschreibungszeiten in der Größenordnung von 20 Jahren erforderlich sind

# Neubau: Beispiel Finnland

## EPR in Finnland (1)

- Nach langer Diskussion Parlamentsentscheid für den Neubau eines Reaktors
- Spezielles Betreiberkonsortium unter Einschluss vieler Industriesparten des Landes – die finnischen Elektrizitätsversorger wollten das Risiko nicht alleine schultern
- Ende 2003 wurde Areva mit dem Bau beauftragt zum Festpreis von 3,2 Milliarden \$
- Technik: „Europäischer Druckwasserreaktor“ (EPR), Entwicklung auf Basis der französischen und deutschen Druckwasserreaktoren

## EPR in Finnland (2)

- Betriebsbeginn:
  - Festlegung bei Beauftragung: Mai 2009
  - Ende 2006: auf 2010/2011 verschoben
  - 8/2007: weit im Jahr 2011
  - Zur Zeit: wahrscheinlich erst 2012
- Gründe:
  - Probleme bei der Koordination und bei der Qualitätssicherung
  - Unterschiedliche Vorstellungen zu sicherheitstechnischer Auslegung (z.B. Rohrleitungsbruch, Flugzeugabsturz)

## EPR in Finnland (3)

- Folgen für den Hersteller
  - drohende Konventionalstrafen
  - massive Verluste wegen Kostenüberschreitung
  - weitere Projekte müssen anders kalkuliert werden

# Reaktorsicherheit

## Zentrale Aspekte der Reaktorsicherheit

- Durch lange Zykluszeit (typisch ein Jahr oder mehr):
  - Anfängliche Überschussreaktivität
  - Hohes Radioaktives Inventar
- Hohe Leistungsdichte:
  - Nukleare versus chemische Energieumwandlung  
Faktor eine Million
- Nachzerfallswärme:
  - Auch nach Sofortabschaltung noch erhebliche  
Wärmeproduktion durch radioaktiven Zerfall

## Anlagensicherheit: Das Kernschmelzrisiko I

- Leistung im Betrieb:  
z.B. 1400 MW elektrisch  
ca. 4000 MW thermisch
- Kontrolle der Reaktivität → sicheres Abschalten muss jederzeit gewährleistet sein
- Auch Tage und Wochen nach Abschaltung → aktive Kühlung des Kerns erforderlich
- Einschluss der Aktivität → Barrieren müssen jederzeit intakt sein

## Sicherheitsfragen (1)

- Bei den derzeit angebotenen Reaktortypen sind schwere Unfälle nicht auszuschließen
  - Sicherheitssysteme können nur deren Eintrittswahrscheinlichkeit verringern, sie aber nicht physikalisch ausschließen
  - Betriebserfahrung zeigt, dass sich Anzahl und Schwere von Störungsereignissen nicht wesentlich verringert
- Risiko wird durch Reifung der Technik nicht eliminiert

## Ausgewählte Ereignisse I (1986-2007)

- Materialfehler
  - 3 April 1991, Shearon Harris (USA)
  - 6 März 2002, Davis Besse (USA) ▶
- Kühlmittelverluste
  - 18 Juni 1988, Tihange-1 (Belgien) ▶
  - 12 Mai 1998, Civaux-1 (Frankreich)
  - 9 Februar 1991, Mihama-2 (Japan)
- Defizite bei der Sicherstellung Unterkritikalität
  - 12 August 2001, Philippsburg (Deutschland) ▶
  - 1 März 2005, Kozloduy-5 (Bulgarien)

## Ausgewählte Ereignisse II (1986-2006)

- Interne Auslöser (Feuer, Explosion)
  - 14 Dezember 2001, Brunsbüttel (Deutschland) ▶
- Externe Auslöser (Überflutung etc.)
  - 2001, Blayais (Sturmflut)
  - 2007, Kashiwasaki-Kariwa (Erdbeben)
- Energieversorgung (Station Blackout)
  - 18 März 2001, Maanshan (Taiwan)
  - 25 Juli 2006, Forsmark (Schweden)
- Generische Effekte (Sumpfkühlung)
  - 28 Juli 1992, Barsebäck-2 (Schweden) ▶

## Sicherheitsfragen (2)

- Menschliches Verhalten ist bei vielen Ereignissen dominierend, wichtige Typen:
  - Nicht durchdachte Konstruktionen
  - Fehlmontagen
  - mangelnde Überprüfung
- Das komplexe System wird nicht vollständig verstanden, viele Beispiele aus der Praxis für
  - übersehene Interaktionen zwischen Systemen
  - übersehene Störfallmöglichkeiten

## Endlicher Rohstoff Uran

- Bekannte Reserven an Uran bis 130 US \$/kg gewinnbar:  
ca. 3,3 Mio. t
  - Reichweite (derzeitiger weltweiter Verbrauch von 65.000 t/a):  
ca. 50 Jahre
  - Zusätzlich vermutete Reserven mit abschätzbarem  
Gewinnungsaufwand:  
ca. 1,3 Mio. t → weitere 20 Jahre
- Weltweiter Ausbau würde Reichweite entsprechend reduzieren

## Endlagerung

- Weltweit noch kein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Betrieb
- Neben technischen Anforderungen insbesondere politisch/gesellschaftliche Entscheidungsfindung problematisch
- Realisierbarkeit der Endlagerung wäre in allen zukünftig Kernenergie nutzenden Staaten vor Einstieg in die Kernenergienutzung zu klären

# Sicherheitspolitische Aspekte

## Nukleare Nichtverbreitung

- Zugriff auf kernwaffenrelevante Materialien Schlüssel zum Kernwaffenbesitz
- Wesentliche Materialien/Technologien:
  - Plutonium / Wiederaufarbeitung
  - Hoch angereichertes Uran (HEU) / Anreicherung
  - Ggf. weitere (Tritium, U-233, Np-237 ...) / ...
- Wesentliche Möglichkeiten/Notwendigkeiten der Kontrolle bei:
  - Beständen existierender Materialien
  - Technologien zur Herstellung neuer Materialien

# Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen (NVV)

Artikel II:

„Jeder Nichtkernwaffenstaat ..., verpflichtet sich, Kernwaffen ... von niemandem unmittelbar oder mittelbar anzunehmen, Kernwaffen oder sonstige Kernsprengkörper weder herzustellen noch sonstwie zu erwerben und keine Unterstützung zur Herstellung von Kernwaffen oder sonstigen Kernsprengkörpern zu suchen oder anzunehmen.“

Artikel IV

- „(1) Dieser Vertrag ist nicht so auszulegen, als werde dadurch das unveräußerliche Recht aller Vertragsparteien beeinträchtigt, unter Wahrung der Gleichbehandlung und in Übereinstimmung mit den Artikeln I und II die Erforschung, Erzeugung und Verwendung der Kernenergie für friedliche Zwecke zu entwickeln.
- (2) Alle Vertragsparteien verpflichten sich, den weitestmöglichen Austausch von Ausrüstungen, Material und wissenschaftlichen und technologischen Informationen zur friedlichen Nutzung der Kernenergie zu erleichtern, und sind berechtigt, daran teilzunehmen. ...“

## Mohamed El Baradei (IAEA-General director)

„Some estimates indicate that *40 countries or more now have the know how to produce nuclear weapons.* (...) We are relying primarily on the continued good intentions of these countries, which ... could ... be subject to rapid change.“

„Information and expertise on how to produce nuclear weapons has become more accessible. This places extra emphasis on the importance of controlling access to weapon-usable nuclear material.“

„And under the current regime, there is nothing illicit for a non-nuclear state to conduct uranium-enrichment activities ... or even to possess military-grade nuclear material.“

IAEO-Konferenz 20.9.2004, Speech UN-GA 3.11.2003, Interview in Le Monde 31.10.2003

## Sicherheitspolitische Fragen

- Bei vielen Ländern, die sich für neue Reaktoren interessieren, ist die Trennung zwischen zivilen und militärischen Absichten unklar
- Interesse für nukleare Geschäfte verändert den bisher zurückhaltenden Umgang mit Ländern mit militärischem Nuklearhintergrund (z.B. Indien)
- Sind alle Länder, die sich derzeit für KKW interessieren, in der Lage, eine angemessene Sicherheitskultur und behördliche Überwachung aufzubauen?

**Bsp.: Iran**

## Wichtige nukleare Anlagen in Iran

- Herstellung von Uran-Hexafluorid in Isfahan
- Versuchsanlage zur Laser-Isotopenanreicherung in Lashkar Abad
- Zentrifugen-Anreicherungsanlage in Abali (Versuchsanlage)
- Zentrifugen-Anreicherungsanlage in Nantanz (Industrielle Anlage)
- Bau eines 40 MW Schwerwasserreaktors in Arak
- Bau eines Leistungsreaktors in Bushehr

## Indizien für militärische Absichten des Iran?

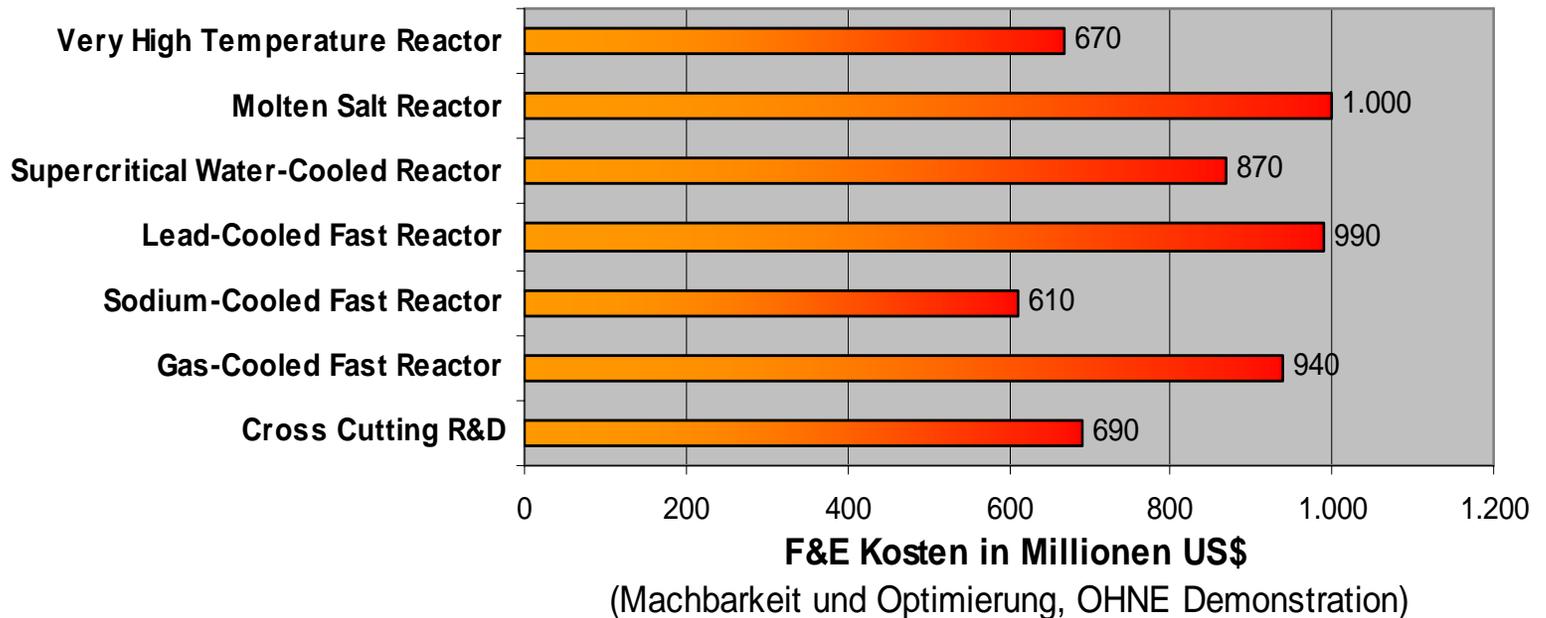
- Eigene Kapazität an Urananreicherung
- Schwerwasserreaktor
- Militärische Verbindungen
- Komplette unterirdische Bauweise
- Tarnfirmen?
- Spurenverwischung?
- Inspektoren in die Irre geführt oder hingehalten
- Polonium-210
- Dokument über Uranmetallbearbeitung

→ Indizien: ja, aber Beweise?

# Neue Reaktorkonzepte

Dez. 2002 Technology Road Map (Generation IV International Forum)

➔ die **sechs** vielversprechendsten Systeme



➔ gesamte F&E Kosten 2002-2020: 5,8 Mrd. US\$

## Generation IV (2)

- Technologie, die sich kaum auf bisherige Reaktoren bzw. großtechnische Erfahrung abstützen kann
  - gesamte F&E Kosten 2002-2020 bis Konzepte zur Antragsreife entwickelt sind:  
5,8 Mrd. US \$
  - EU-Budget für Generation IV:  
FP 5 ca. 21 Mio. €, FP 6 ca. 35 Mio €, FP 7 voraussichtlich ähnlich
  - US-Budget für Generation IV:  
FY 05 ca. 38 Mio \$, FY 06 ca. 53 Mio \$, FY 07 ca. 32 Mio \$
- Finanzierung für echte Entwicklung der Generation IV Reaktoren in weiter Ferne

# Fazit

## **Praxis zeigt Vielzahl von Schwachstellen, die zu Störfällen führen können**

Wesentliche Risikofaktoren:

- Fehleinschätzungen von bestimmten Ereignisabläufen
- Menschliche Fehlhandlungen und unzureichendes Sicherheitsmanagement
- Alterungseffekte
- Abweichungen zwischen Planungs-/Genehmigungsstand und tatsächlicher Ausführung der Anlage
- Zunehmender Kostendruck

## Renaissance?

- Risiko Kernschmelze wesentliche Gefahr der Kernenergienutzung
- Auch heute noch beständig gravierende Ereignisse, die zu schweren Unfällen führen könnten
- Die Kosten für neue evolutionäre Reaktoren (z.B. EPR) sind nicht bestimmbar.
  - Hohes Investitionsrisiko, das irgend jemand tragen müsste (z.B. Betreiber, Hersteller, Staat)
- Bei neuen Reaktoren bestehen im Prinzip die gleichen technischen wie sicherheitspolitischen Risiken wie bei den bisherigen Reaktoren
- „revolutionäre“ Reaktoren (Generation IV) stehen nicht zur Verfügung
- Es gibt bisher keine Renaissance der Kernenergie

# Mission Zukunft gestalten – werden Sie Mitglied!

## Das Öko-Institut

- europaweit führendes, unabhängiges Umweltforschungs- und Beratungsinstitut
- Gegründet 1977
- Gemeinnütziger Verein mit rund 3000 Mitgliedern
- Standorte in Freiburg, Darmstadt und Berlin
- Forschung und Beratung zu 10 Themen: beisp. Energie & Klima, Nukleartechnik & Anlagensicherheit, Nachhaltiger Umgang mit Konsum, Mobilität und Ressourcen...

**Fragen?**

## Materialfehler, Davis Besse, 2002

- ca. 1991: Rissbildung in Anschlussstutzen für Steuerstabantrieb
- Seit ca. 1996: Leckage von Kühlwasser
- Lochbildung im RDB-Deckel durch Korrosion,  $\varnothing$  ca. 10 cm bis auf innere Plattierung (150 mm tief)
- Trotz visueller Inspektionen in 1998 und 2000 wird Loch erst 2002 festgestellt
- → erhebliche Sicherheitsdefizite durch Materialalterung und mangelnde Sicherheitskultur

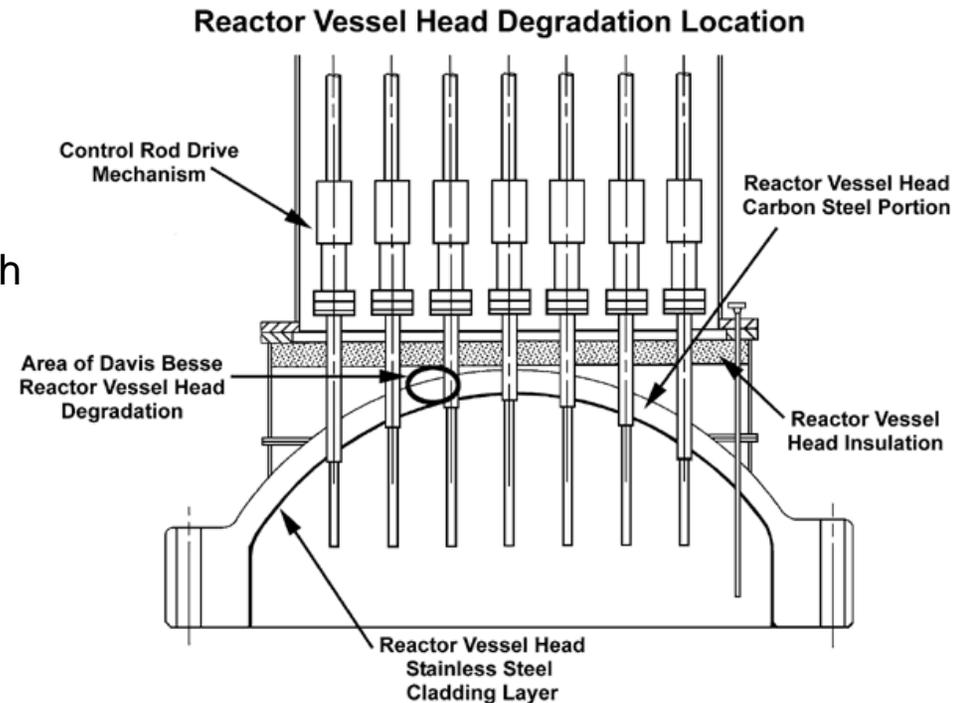


Bild-Quelle: US NRC



## Materialfehler, Davis Besse, 2002

Warnzeichen:

- 1998 und 2000 bei Revision Borablagerungen entdeckt
- Bereits ein Jahrzehnt zuvor Zusage des Betreibers, Borablagerungen zu entfernen
  - Aus Zeitgründen in der Revision nicht beendet
- 1999 führt freigesetzter Rost zu Verstopfungen in Filtern
- 2000 werden Bor- und Rostablagerungen aus dem Lüftungssystem entfernt

Sumpfproblematik:

- bis Wiederinbetriebnahme 2004 Vergrößerung der Sumpfsaugsiebe um einen Faktor 25!

„The company’s management explained to the NRC in August 2002 that it overlooked these, and many other warning signs, because it placed generating revenue ahead of assuring safety.“

From: Residual Risk, 2007



## Kühlmittelverlust, Tihange-1, 1988

- Plötzlich auftretendes Leck im nicht absperrbaren Teil des Not- und Nachkühlsystems (Teil des Primärkreislaufs)
- Kühlmittelverlust von ca. 1300 l/h
- Riss im Grundmaterial einer Leitung, 90 mm Länge innen, 45 mm außen
- Weiter Rissanzeigen in der Nachuntersuchung entdeckt
- Auslöser: thermische Ermüdung → hohes Versagensrisiko im Einsatzfall (Not- und Nachkühlung)
- Vergleichbarer Effekt zunächst in Dampierre 2 (1992) und 1 (1996), später in allen 34 EDF 900 MW-Reaktoren
- 2001: Genehmigung für Nachrüstung in 2 Reaktoren
- 2003: Genehmigung für übrige 32 Reaktoren



## **Sicherstellung Unterkritikalität, Phillipsburg, Deutschland**

- Beim Wiederaanfahren der Anlage ist Borkonzentration in Flutbehältern zu gering (Sicherstellung Abschaltbarkeit)
- Wasserstand in Flutbehältern ebenfalls nicht nach Vorschriften (Sicherstellung Kernkühlung)
- Ursache: Missachtung von Betriebsvorschriften und Genehmigungsrandbedingungen
- Spätere Klärung: regelmäßig und über Jahre Missachtung der Betriebsvorschriften beim Anfahren (auch in anderen Anlagen Probleme)
- Diskussion über Sicherheitsmanagement in deutschen Anlagen resultiert



## Wasserstoffexplosion, Brunsbüttel, 2001

- Dezember 2001, ungewöhnliche Signale auf der Warte: Verdacht auf Dampfleckage im RDB-Sprühsystem, Beendigung durch Schließen eines Ventils
  - Februar 2002, Abfahren, Inspektion im Sicherheitsbehälter
  - Leitungen (5,7 mm Durchmesser) über 2,7 m Länge zerstört
  - In Nachbewertung zeigen Temperaturverläufe Wasserstoffaufbau durch Radiolyse seit Wiederinbetriebnahme der Anlage in 2001
- Da nur betrieblich genutztes System keine ausreichende Fehleranalyse im Vorfeld
- Mängel in der Sicherheitsanalyse, neue Vorschriften durch RSK erforderlich



## Verstopfen der Sumpfsiebe, Barsebäck, 1992

- Durch falsch montiertes Vorsteuerventil voller Druck auf Berstscheibe: bricht
- Kühlmittel tritt aus (ca. 38 kg/s)
- Sicherheitssysteme werden gestartet
- Austretender Wasserstrahl trifft auf wärmegeämmte Rohrleitungen
- Isoliermaterial in großen Mengen (ca. 200 kg) wird abgelöst und sammelt sich im Reaktorgebäudesumpf
- Sumpfsiebe verstopfen, Kavitationsbildung in Notkühlpumpen (nach ca. 1 h)
- Erfolgreiches Rückspülen (nach ca. 2 h) verhindert weitere Schäden



## Verstopfen der Sumpfsiebe, Barsebäck, 1992

- Kleines Leck Auslegungsstörfall  
→ Beherrschung gefährdet!
- Generischer Effekt für Vielzahl Reaktoren weltweit,
  - weitere Ereignisse in 1993, Perry und 1995, Limerick, USA,
  - alle 34 französischen 900 MW Reaktoren betroffen,
  - Biblis-A ...
- Vergessene Vorläufer: 1977 Gundremmingen, 1988 Susquehanna
- Bis heute fachliche Diskussion um Beherrschung der Sumpfsiebverstopfung inkl. Experiment & Theoriebildung hinsichtlich Art Isoliermaterialien, Rückhaltung im Sicherheitsbehälter, Eintrag in den Reaktorkern, Einfluss auf Not- und Nachkühlpumpen ...

