

# ENTRIA

ENTSORGUNGSOPTIONEN FÜR RADIOAKTIVE RESTSTOFFE:  
INTERDISZIPLINÄRE ANALYSEN UND  
ENTWICKLUNG VON BEWERTUNGSGRUNDLAGEN

## Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle

Ergebnisse aus dem ENTRIA-Teilprojekt „Oberflächenlagerung“

Manuel Reichardt, Dennis Köhnke, Harald Budelmann  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
TU Braunschweig

**iBMB** **MPA**  
TU BRAUNSCHWEIG

Institut für Baustoffe,  
Massivbau und Brandschutz | Materialprüfanstalt  
für das Bauwesen

# Struktur und Organisation



# Beteiligte Partner I

- Technische Universität Clausthal
  - Institut für Endlagerforschung
  - Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
  - Unterbeauftragungen: risicare GmbH, intac GmbH
- Technische Universität Braunschweig
  - Institut für Rechtswissenschaften
  - Institut für Grundbau und Bodenmechanik
  - Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Leibniz Universität Hannover
  - Institut für Radioökologie und Strahlenschutz
  - Institut für Werkstoffkunde



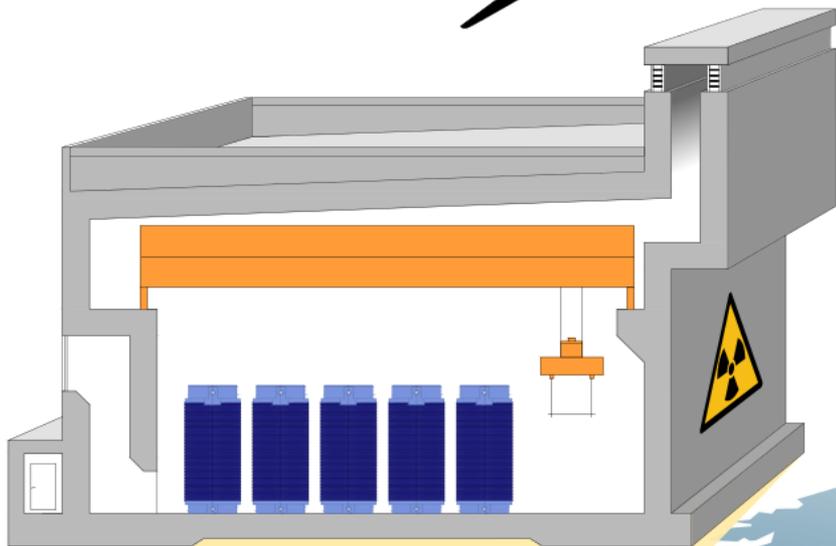
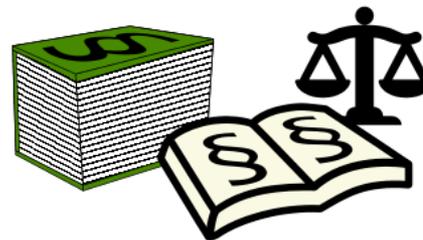
# Beteiligte Partner II

- Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
  - Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
  - Institut für Nukleare Entsorgung
- Freie Universität Berlin
  - Forschungszentrum für Umweltpolitik
- Christian-Albrechts-Universität Kiel  
Philosophisches Seminar
  - Lehrstuhl für Philosophie und Ethik der Umwelt



# Einführung

$$E = mc^2$$



92	U
238,03	
2/8/18/32/	
21/9/2	
	1,4



# Einführung

- weltweit rund **440 kommerziell betriebene Kernreaktoren**
  - jährlich 10.500 t neuer bestrahlter Kernbrennstoff
- insgesamt ca. **300.000 t bestrahlter Kernbrennstoff in der Zwischenlagerung**
- weltweit **mehr als 150** (funktionell unabhängige) **Zwischenlager** für bestrahlte Kernbrennstoffe in Betrieb
- **Zwischenlagerung ≠ Zwischenlagerung:**
  - Umgang mit der Zwischenlagerung international sehr unterschiedlich
  - Zentrale Randbedingungen: Zielsetzung, Zeiträume
  - Abfallarten unterschiedlich (Brennelementarten, Glaskokillen etc.)
  - Vielfalt technischer Systeme
  - Abhängigkeit von vorigen und nachgeordneten Schritten



# Zwischenlagerung ≠ Zwischenlagerung

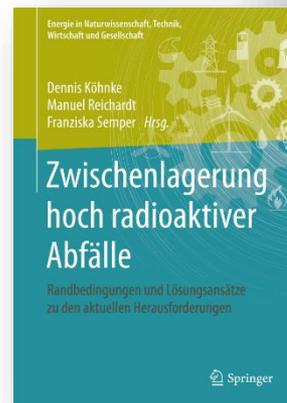
Mögliche Ziele in Anlehnung an [OECD NEA 2006]:

- Abklinglagerung (*decay storage*)
- Pufferlagerung (*buffer storage*)
- Zwischenlagerung (*interim storage*)
- Strategische Lagerung (*strategic storage*)
- „*Indefinite*“ storage

**Ziele und Zeiträume eng miteinander verknüpft!**

# Realanalyse zur Zwischenlagerung

- ENTRIA VP7: Oberflächenlagerung als **integrierte, bewusst gewählte Option**
  - „Langfristzwischenlagerung“
  - Bestandteil einer Entsorgungsstrategie
  - Zwischenlagerungszeiträume > 100 Jahre
- Systemanalysen: **Technische Grundprinzipien**, auf Basis
  - technischer Regelwerke
  - realisierter Systeme
  - praktischer Erfahrungen



# Welche Anforderungen müssen erfüllt werden?

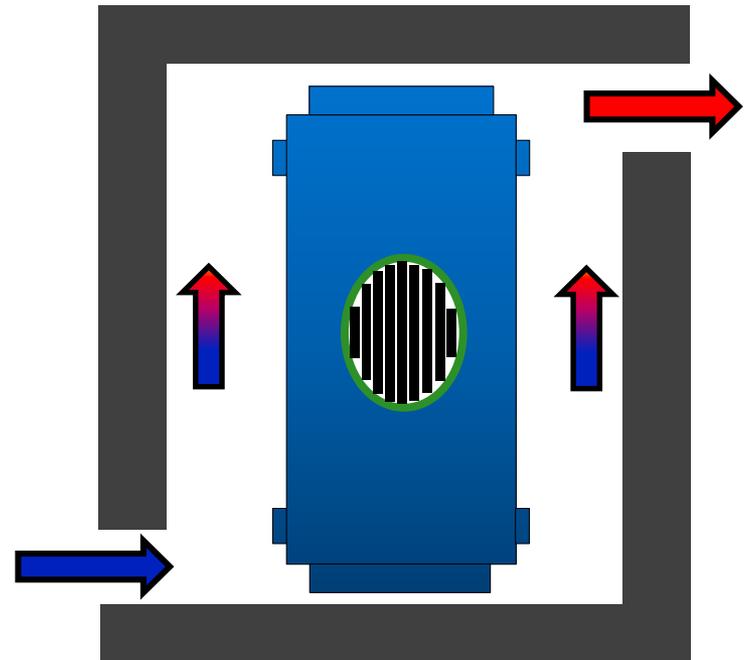
## Fundamentales Schutzziel:

### IAEA Safety Standards [SF-1]:

„Schutz von Mensch und Umwelt vor schädigenden Einflüssen ionisierender Strahlung“

### Gewährleistung durch:

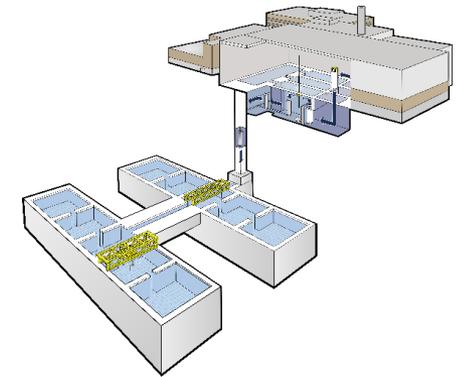
- Abschirmung ionisierender Strahlung
- **Wärmeabfuhr**
- Behälterintegrität
- **Unterkritikalität**



# Grundkategorien der technischen Konzepte

## Zusammenfassung in Grundkategorien

- **Nasslagerung**
- **Trockenlagerung**
  - Behälter, ggf. in Kombination mit Stahlbetonhallen
  - Module
  - Vaults (häufig sehr massige Stahlbetonbauwerke)



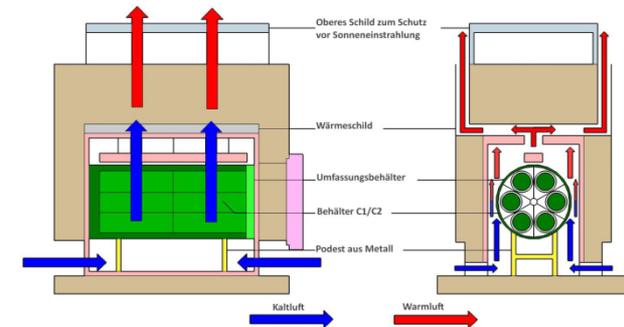
Nasslager (Oskarshamn, S)  
in Anlehnung an [mynewdesk]



Standortzwischenlager Krümmel  
Quelle: Vattenfall

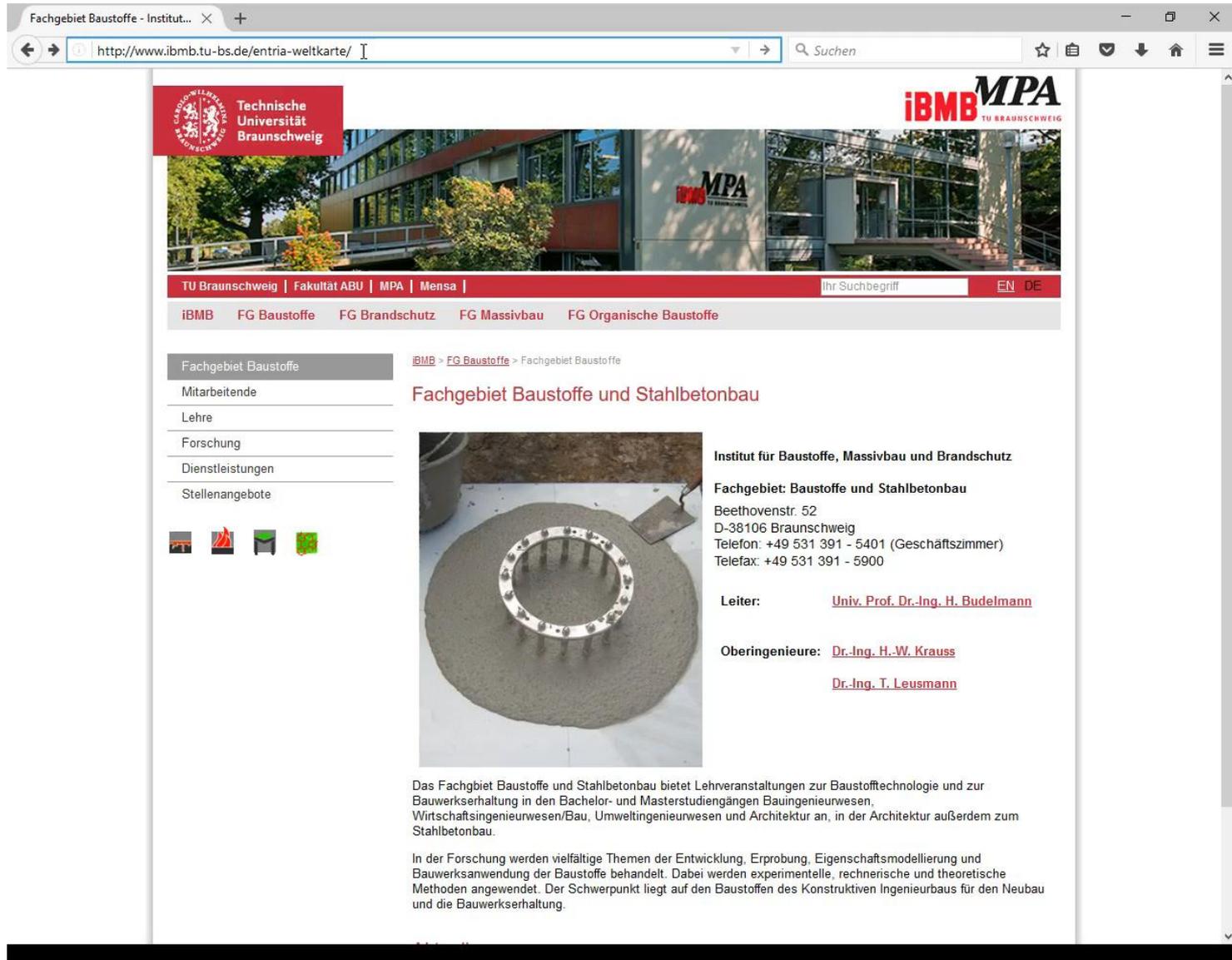


Vault-Konzept (HABOG, NL)



Modulare Systeme (bspw. NUHOMS)  
in Anlehnung an [ANDRA 2012]

# Interaktive Weltkarte zur Zwischenlagerung



The screenshot shows a web browser window with the address bar containing <http://www.ibmb.tu-bs.de/entria-weltkarte/>. The website header features the TU Braunschweig logo and the iBMB MPA logo. A navigation menu includes links for TU Braunschweig, Fakultät ABU, MPA, Mensa, and a search bar. Below the menu, there are links for iBMB, FG Baustoffe, FG Brandschutz, FG Massivbau, and FG Organische Baustoffe. The main content area is titled 'Fachgebiet Baustoffe und Stahlbetonbau' and includes a sidebar with navigation options like 'Mitarbeitende', 'Lehre', 'Forschung', 'Dienstleistungen', and 'Stellenangebote'. A central image shows a circular concrete specimen with a ring of rebar. To the right of the image, contact information for the 'Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz' is provided, including the name of the head of the department, Univ. Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann, and other staff members like Dr.-Ing. H.-W. Krauss and Dr.-Ing. T. Leusmann. A paragraph of text describes the research and teaching activities of the department.

# Beispiele – USA



# Praxis der Zwischenlagerung – USA

## Fort St. Vrain ISFSI

<http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001021048> (Bericht)

## Elea Project

<https://www.nmlegis.gov/handouts/ERDT%20111215%20Item%207%20Carlsbad%20Nuclear%20Task%20Force.pdf>  
(Präsentation)

## NUHOMS System

<http://us.arevablog.com/2014/09/03/s-ea-of-red-applauds-nrcs-green-light/>  
(Blogeintrag)

## Areva, NUHOMS System

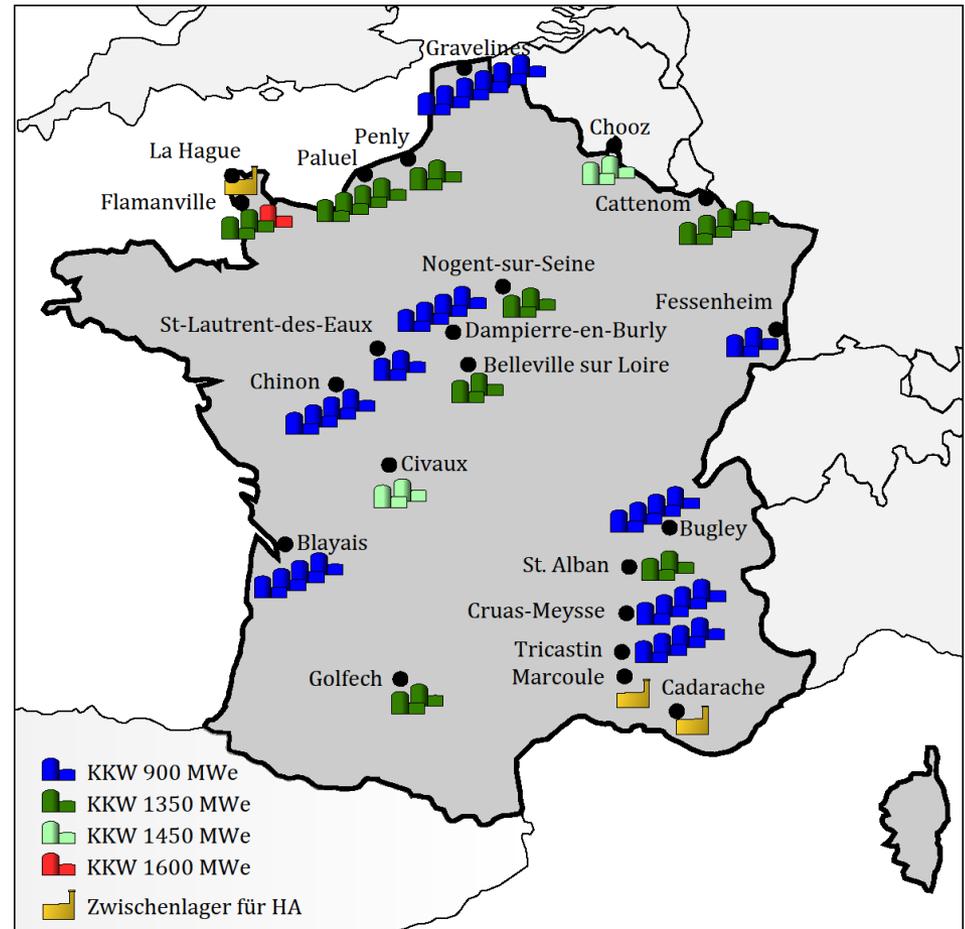
<http://us.aveva.com/EN/home-2271/areva-inc-areva-tn.html>  
(Herstellerwebsite)



Der Autor erklärt hiermit ausdrücklich, dass zum Zeitpunkt der Linksetzung keine illegalen Inhalte auf den zu verlinkenden Seiten erkennbar waren. Auf die aktuelle und zukünftige Gestaltung, die Inhalte oder die Urheberschaft der verlinkten Seiten hat der Autor keinen Einfluss. Deshalb distanziert sich der Autor hiermit ausdrücklich von allen Inhalten aller verlinkten Seiten, die nach der Linksetzung verändert wurden.

# Beispiele – Frankreich

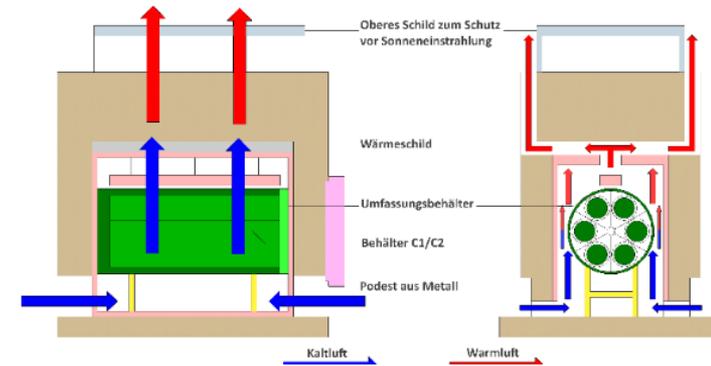
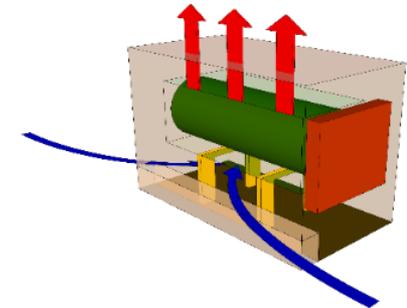
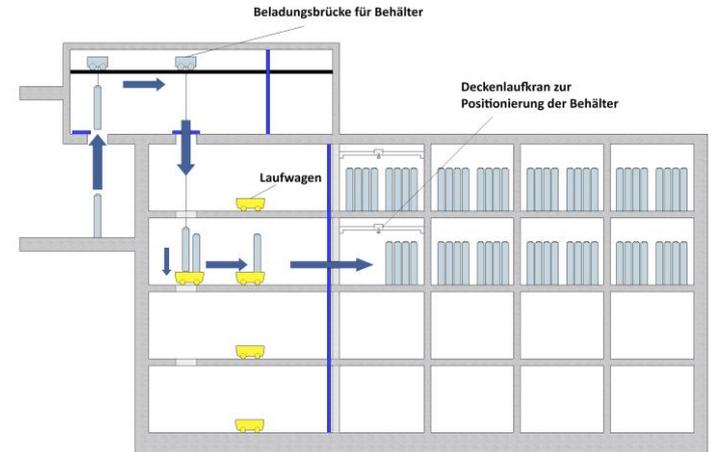
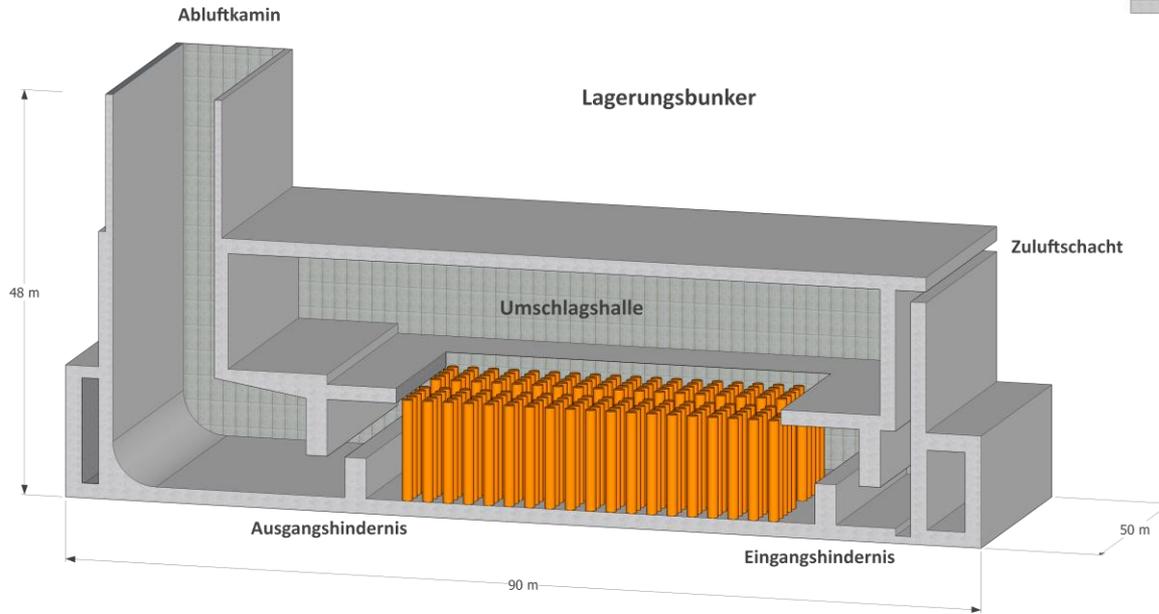
- 58 Reaktoren an 19 Standorten
- ca. 77% Strom aus KKW
- Große Abfallmengen
- Langfristige Strategie notwendig



KKW- und ZWL-Standorte in Frankreich

Quelle: [http://www.ibmb.tu-bs.de/entria-weltkarte/factsheets/Laenderbericht\\_Frankreich.pdf](http://www.ibmb.tu-bs.de/entria-weltkarte/factsheets/Laenderbericht_Frankreich.pdf)

# Konzeptstudien ab 2006



# Machbarkeitsstudien

	Max. Wärmeleistung bei Einlagerung	Robustheit der Sicherheitsfunktionen	Zugänglichkeit der Behälter	Polyvalenz	Eignung Dauerhaftigkeit	Modularität
<b>Zwischenlager an der Oberfläche</b>						
Bauweise mit <b>vertikalen Schächten</b> mit einer Gruppierung in Umfassungsbehältern	1.000 W	+++	++	++++	+++	+++
<b>Mehrstöckiges Gebäude</b> zur Zwischenlagerung	500 W	++	+++	++	+++	++
<b>Modulare Bunker</b> (Kasematten) aus Beton auf einer Sohlplatte (NUHOMS®)	1.500 W	+++	+	+++	+++	++++
<b>Zwischenlager in geringer Tiefe</b>						
Zwischenlager in <b>geringer Tiefe</b> in offener Bauweise, Einzellagerung der Behälter	2.000 W	+++	+	++	+++	++
Zwischenlager in <b>unterirdischen Galerien</b>	500 W	+++	+++	++	++	++

# Beispiele – Niederlande

## Kommerzielle Reaktoren

Dodewaard

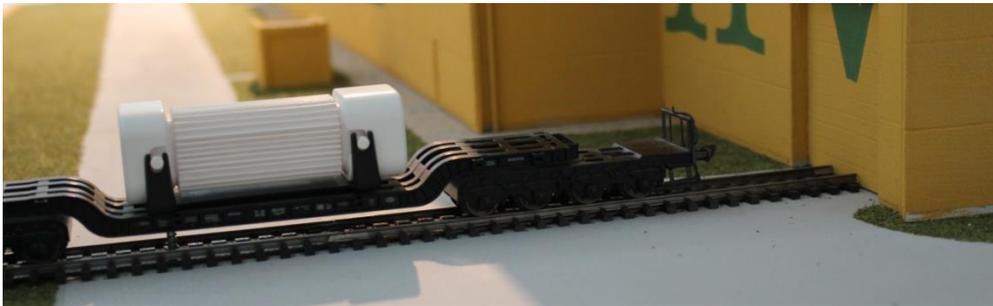
(1968 - 1997 in Betrieb)

Borssele

(1973 - vrstl. 2033 in Betrieb)

## Wiederaufarbeitung in GB und F;

Rücktransport in Transportbehältern als verglaste Abfälle in Kokillen

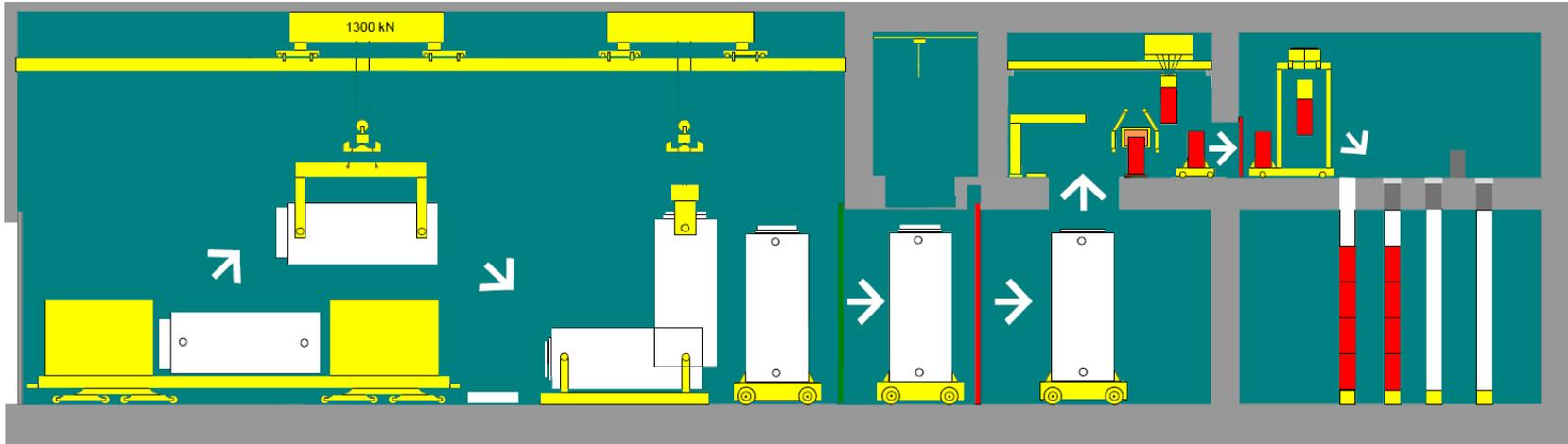


HABOG: Hoogradioactief Afval Behandeling- en Opslag Gebouw  
(Behandlungs- und Lagergebäude für hochradioaktive  
Abfälle)

# HABOG Betriebssystem

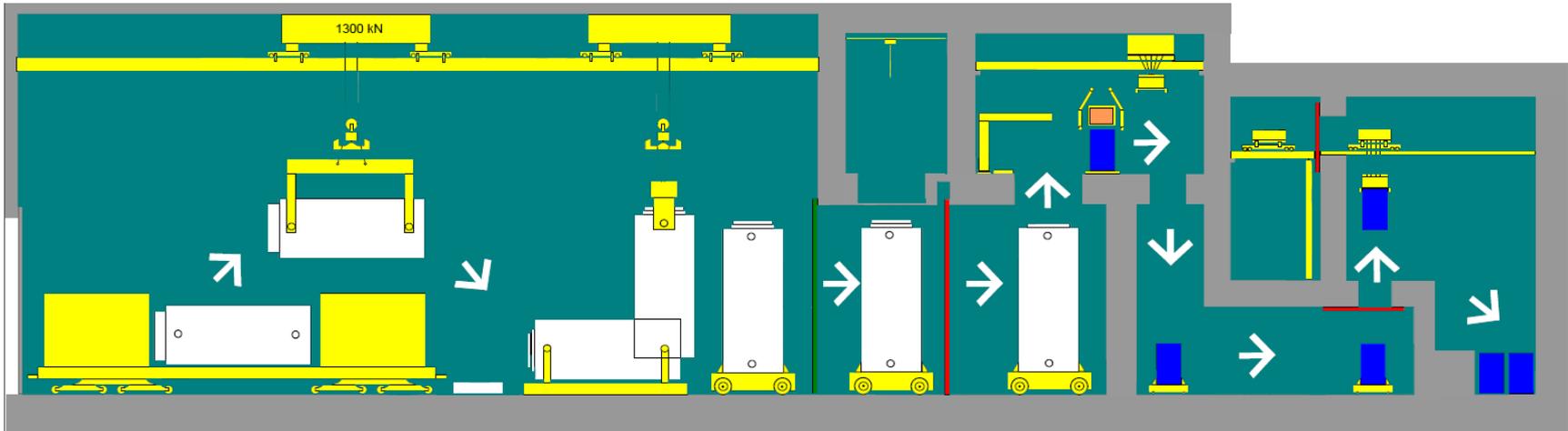
## Wärmeproduzierende Abfälle aus Kernkraftwerken

In Anlehnung an Darstellung der COVRA



## Nicht wärmeproduzierende Abfälle aus Atomkraftwerken

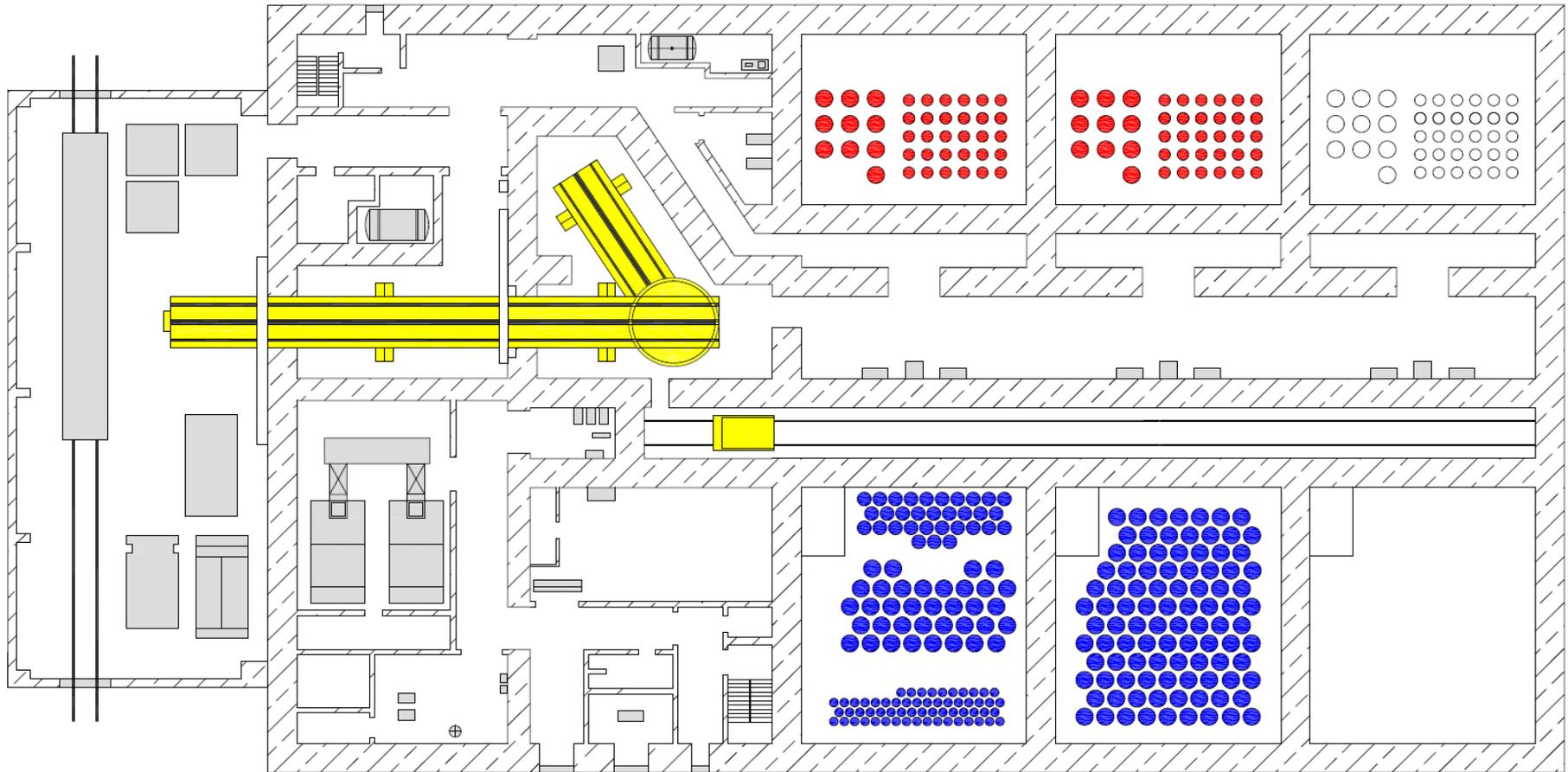
In Anlehnung an Darstellung der COVRA



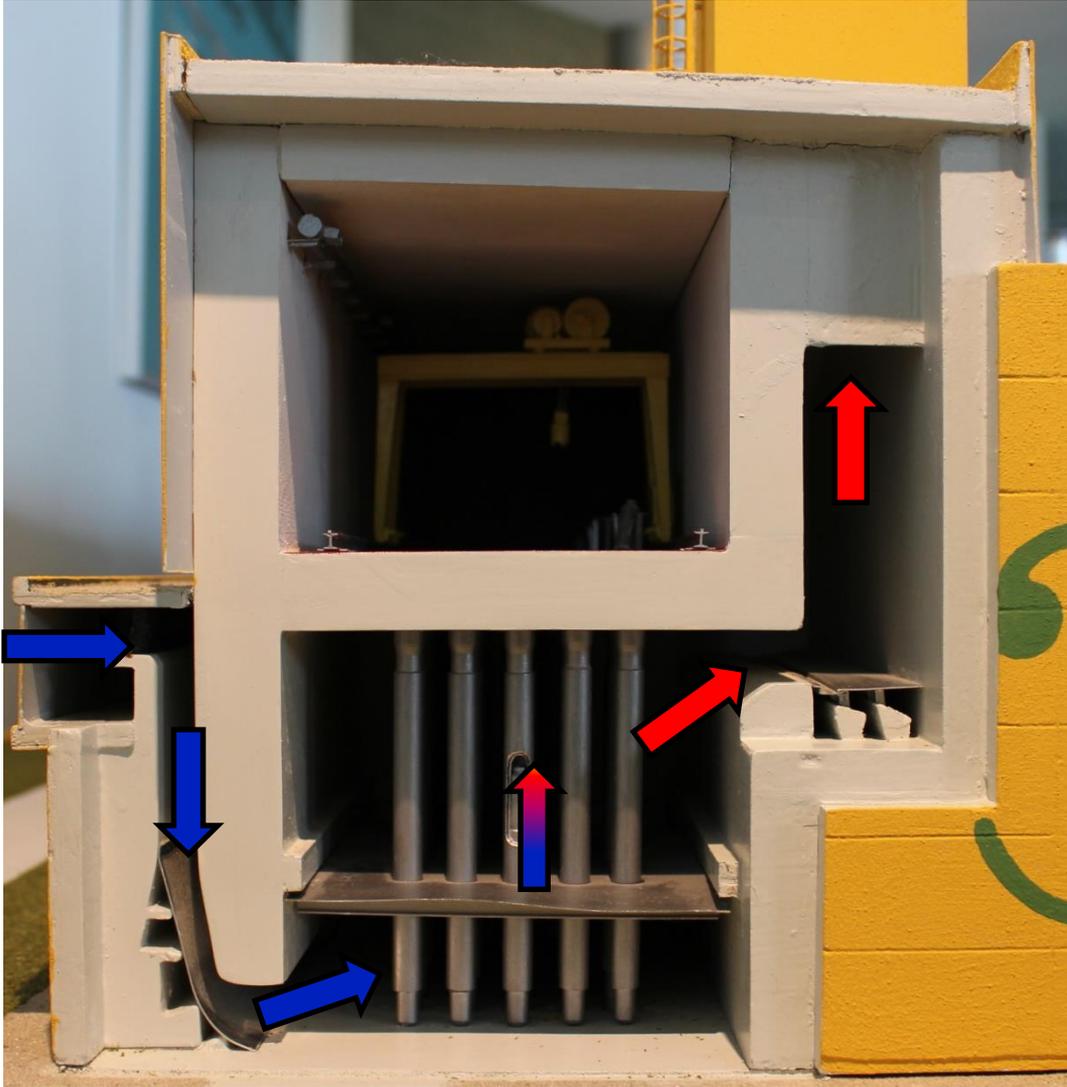
# HABOG Grundriss

Lagerung hoch radioaktiver, Wärme entwickelnder/nicht Wärme entwickelnder Abfälle in unterschiedlichen Modulen

In Anlehnung an Darstellung der COVRA



# HABOG Wärmeabfuhr

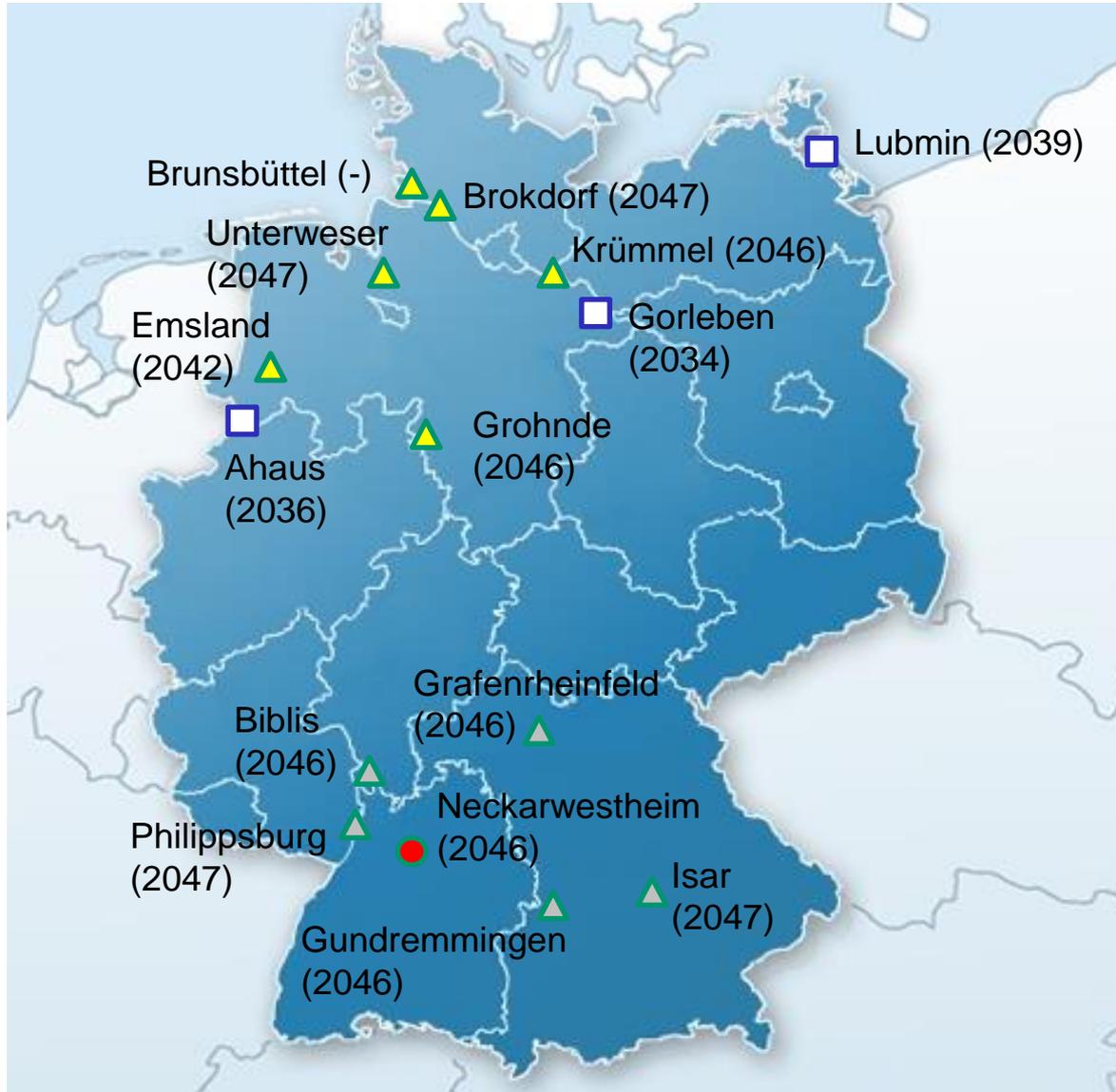


Schnitt durch ein Modell  
des Lagerbereichs (li.)



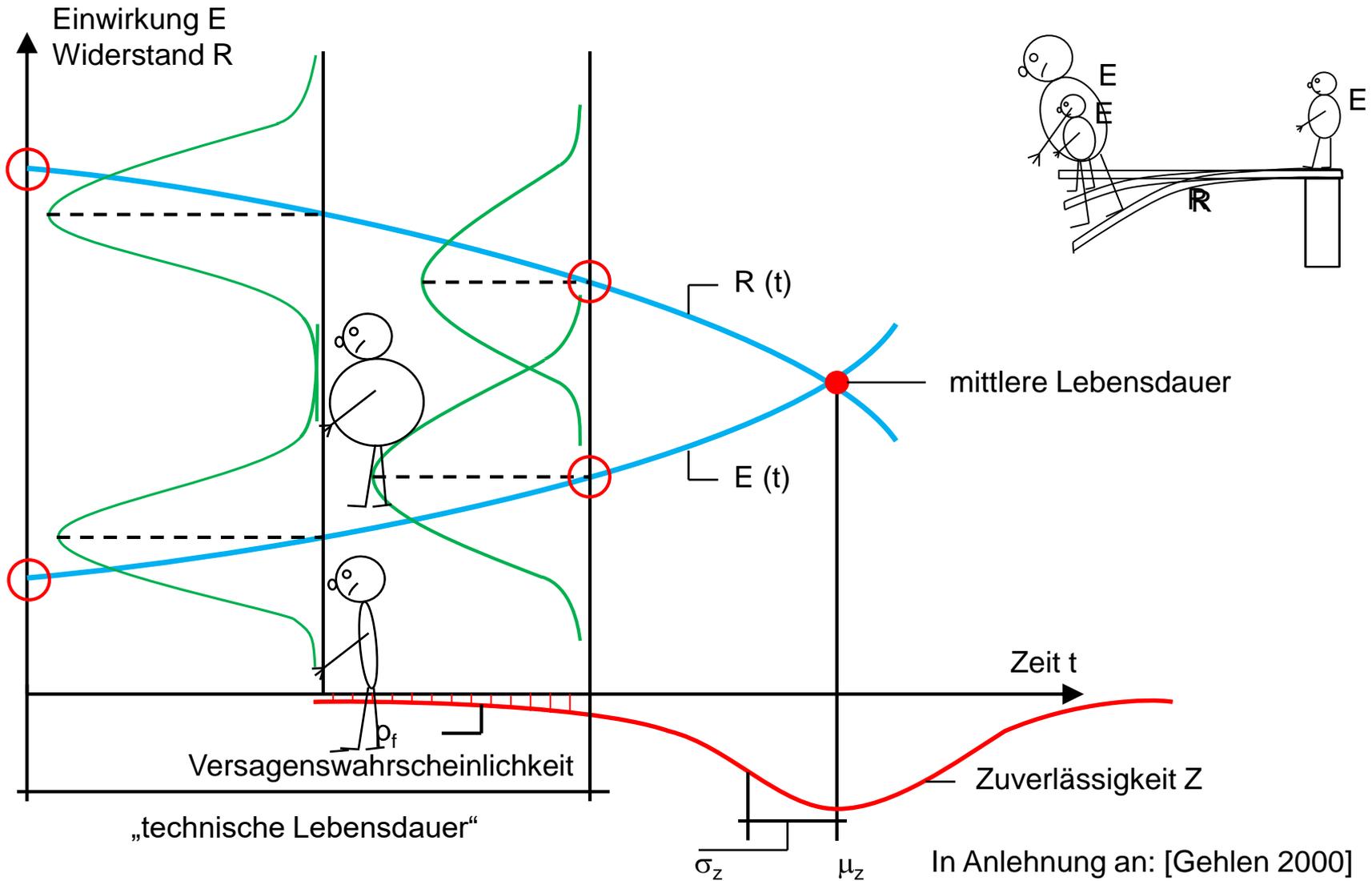
Modell der eingelagerten  
Glaskokillen (re.)

# Heutige Zwischenlagerung in Deutschland



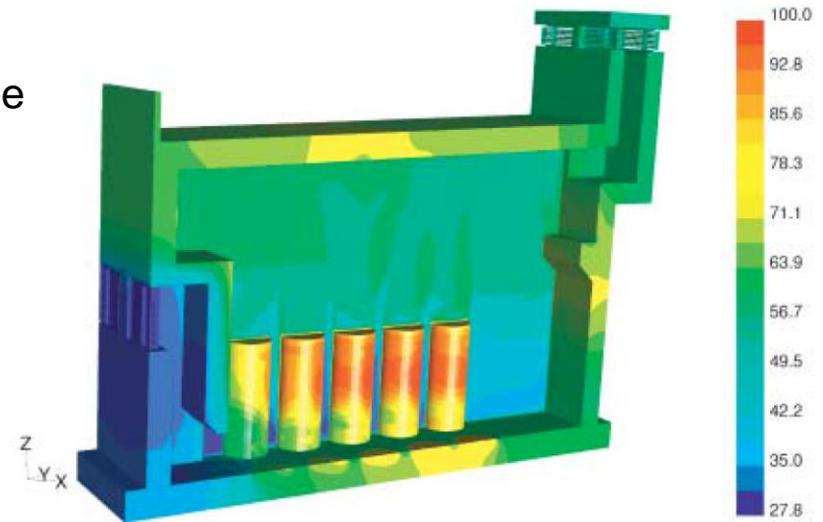
- Zentrale Zwischenlager □
- Dezentrale Zwischenlager:
- WTI-Konzept △
- STEAG-Konzept △
- Tunnel-Konzept ●

# Zuverlässigkeit und Lebensdauer



# Besondere Randbedingungen in Zwischenlagern

- Besondere Randbedingungen in Zwischenlagern sind nicht in der Normung erfasst
  - Direkter Zustrom von Außenluft infolge Naturzugkühlung
  - erhöhte Temperaturen
    - Beschleunigung chemischer Prozesse
    - Zwangsspannungen (Gefahr der Rissbildung)
  - außergewöhnliche bzw. extreme Einwirkungen
    - Erdbeben
    - Explosionsdruckwelle
    - Flugzeugabsturz
    - etc.

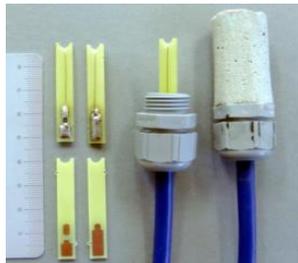


Simulation der Temperaturfelder in einem STEAG-Lager  
Quelle: [BfS 2005, S.40]

# Bauwerksmonitoring

Quelle: [IAEA TecDoc 1025]

- **Möglichkeiten der Zustandsüberwachung**
  - Mess- und Monitoringsysteme
  - Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen
  - Kombination verschiedener Verfahren
- **Definition relevanter Parameter**
  - Wahl geeigneter Methoden auf Basis der Randbedingungen
  - Interpretation der Ergebnisse
  - Grundlage für Ingenieurmethoden



Evaluation Method* \ Concrete Property or Characteristic	Air Permeability (S)	Audio Methods (N)	Break-off Methods (S)	Carbonation Depth (D)	Chloride Testing (S)	Core Testing (D)	Infrared Thermography (N)	Instrumentation (N)	Magnetic Methods (N)	Modal Analysis (N)	Petrographic Methods (D)	Probe Penetration (S)	Pullout Testing (S)	Radar (N)	Radiation/nuclear (N)	Rebound Hammer (N)	Stress Wave Transmission (N)	Tomography (N)	Ultrasonic Pulse Velocity (N)	Visual Inspection (N)
Alkali-Carbonate Reaction											X									
Air Content	X										X									
Acidity				X	X															
Alkali-Silica Reaction											X									
Bleeding Channels											X									X
Cement Content											X									
Chemical Composition											X									X
Chloride Content					X	X														
Compressive Strength			X		X							X	X			X			X	
Concrete Cover						X			X					X						
Aggregate Content											X									
Mixing Water Content											X									
Corrosive Environment	X			X	X															X
Cracking		X				X	X			X					X		X	X	X	X
Creep						X	X													
Delamination		X			X	X				X					X		X	X	X	X
Density						X									X					
Elongation					X		X													
Embedded Parts														X	X			X		
Frost Damage											X									
Honeycomb					X						X				X		X	X	X	
Modulus of Elasticity						X													X	
Modulus of Rupture						X														
Moisture Content					X					X										
Structural Performance		X						X		X										X
Permeability	X									X										
Pullout Strength													X							
Aggregate Quality											X									X
Freeze/Thaw Resistance											X									
Soundness						X									X		X			
Splitting-Tensile Strength						X														
Sulfate Resistance											X									
Tensile Strength			X		X															
Concrete Uniformity										X						X				X
Voids						X								X	X		X	X	X	X
Water-Cement Ratio											X									

(N) = nondestructive method, (S) = semidestructive method, and (D) = destructive method.

# Extreme Einwirkungen

## Grundkategorien

- Sicherheit (zufällig bzw. unbeabsichtigt auftretend)
- Sicherung (Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter)

## Unter dem Aspekt der Sicherheit, Auszug nach [ESK 2013]

- Einwirkungen von innen
  - Mechanische Einwirkungen (z. B. Behälterabsturz)
  - Thermische Einwirkungen durch Brand
- Einwirkungen von außen
  - Naturbedingte Einwirkungen von außen:  
Sturm, Regen, Schneefall, Frost, Blitzschlag, Hochwasser, Erdbeben
  - Zivilisatorisch bedingte Einwirkungen von außen:  
Druckwellen aufgrund chemischer Reaktionen, Flugzeugabsturz (zufälliger Absturz eines schnell fliegenden Militärflugzeugs)

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

## Fragen?

[www.entria.de](http://www.entria.de)

Förderkennzeichen 15S9082A

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Quellen

- [ANDRA 2012] ANDRA: Bilan des études et recherches sur l'entreposage - Déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue, 2012, <https://www.andra.fr/download/siteprincipal/document/editions/501.pdf>, Abruf: 02.07.2015
- [BfS 2005] Bundesamt für Strahlenschutz: Dezentrale Zwischenlager – Bausteine zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, 2005
- [ESK 2013] Entsorgungskommission: Empfehlung der Entsorgungskommission: Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern. Revidierte Fassung vom 10.06.2013.
- [Gehlen 2000] Gehlen, Christoph: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken - Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion, DAfStb (2000), Heft 510.
- [IAEA 2015] International Atomic Energy Agency: Nuclear power reactors in the world. Wien, 2015.
- [IAEA SSG-15] International Atomic Energy Agency: IAEA Safety Standards. Specific Safety Guide No. SSG-15: Storage of Spent Nuclear Fuel. Wien, 2012
- [IAEA TecDoc 1025] International Atomic Energy Agency: IAEA-TECDOC-1025: Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: Concrete containment buildings - IAEA-TECDOC-1025, Wien, 1998
- [mynewsdesk] <http://www.mynewsdesk.com/se/skb/images/nyhetsgrafik-clab-585121>, Abruf: 30.01.2018