



Passive Kühlsysteme am Beispiel der Kühlung abgebrannter Brennelemente

Leo Ornot, IBUP-G

Dresden, 15. Oktober 2013



What means passive?



► Definition:

Passive systems utilize basic laws of physics, such as gravity and natural convection, enabling them to function without any power or actuation by instrumentation and control (I&C) equipment.

► System needs:

- ◆ ***Driving force***
- ◆ ***Activation of system function***

What means passive?



IAEA Definition

▶ Category A

- ◆ no signal inputs of I&C
- ◆ no external power sources or forces
- ◆ no moving mechanical parts, and
- ◆ no moving working fluid.

▶ Category B

- ◆ no signal inputs of I&C
- ◆ no external power sources or forces
- ◆ no moving mechanical parts; but
- ◆ **moving working fluids**

▶ Category C

- ◆ no signal inputs of I&C
- ◆ no external power sources or forces
- ◆ moving mechanical parts, whether or not moving working fluids are also present.

▶ Category D

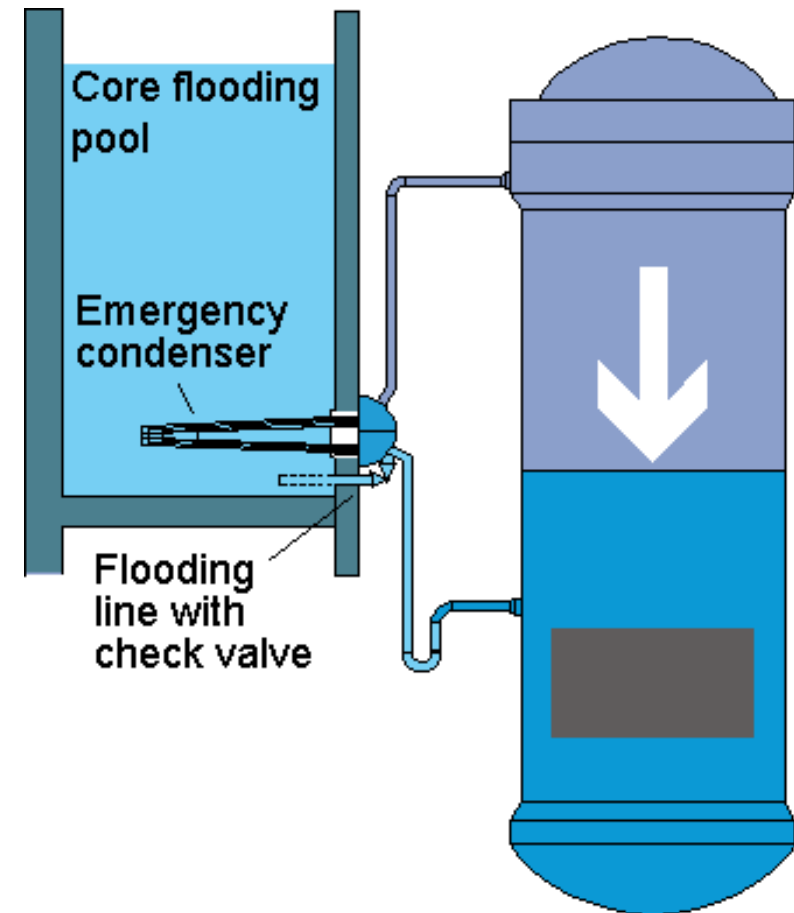
- ◆ signal inputs of I&C to initiate the passive process
- ◆ energy to initiate the process must be from stored sources such as batteries or elevated fluids
- ◆ active components are limited to controls, instrumentation and valves to initiate the passive system
- ◆ Manual initiation is excluded.

What means passive?

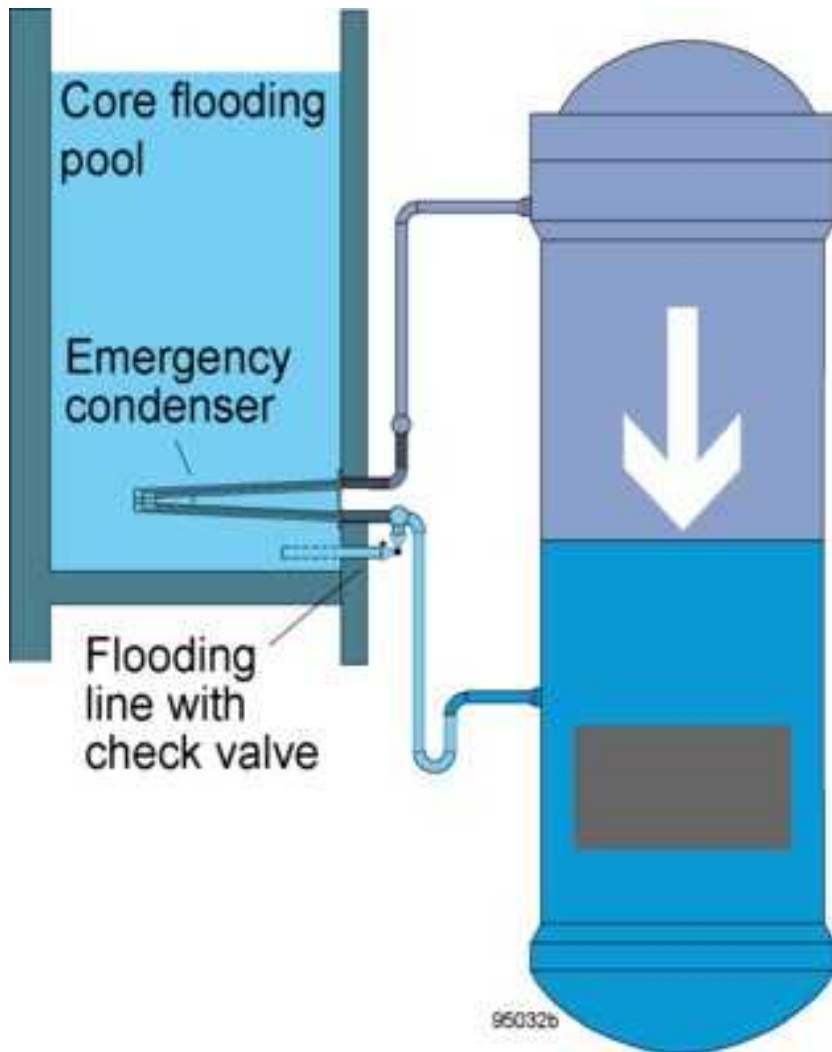
► Category B

- ◆ no signal inputs of I&C
- ◆ no external power sources or forces
- ◆ no moving mechanical parts; but
- ◆ moving working fluids

KERENA™ Emergency condenser



KERENA™ Passive Core Flooding System - RPV Flooding



- ▶ Pool located in the upper part of the Containment connected to RPV
- ▶ Driving Force: Gravity
- ▶ Activation: Check Valve – accident conditions (pressure RPV/Containment, RPV water level)

Category C

Nasslager für abgebrannte Brennelemente – Kernkraftwerk Gösgen

- ▶ **Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG (KKG)**
- ▶ **DWR**
- ▶ **Siemens / KWU**
 - ◆ **Einzelblock mit einer Nettoleistung von 985 MWe**
 - ◆ **Inbetriebsetzung in 1979**
 - ◆ **3 Loop Anlage, vergleichbar mit Neckarwestheim 1 und Trillo**



AREVA

KKG Brennstoffstrategien bis 2003



- ▶ **Geschlossener Brennstoffkreislauf**
- ▶ **Nach 3 Jahren der Zwischenlagerung im Becken des Reaktorgebäudes wurden die Brennstoffe zur Wiederaufarbeitung nach La Hague und Sellafield verbracht**
- ▶ **MOX-BE und ERU-BE in Zusammenarbeit mit der Areva hergestellt**
- ▶ **Abfallstoffe aus dem Recycling Prozess wurden zurück in die Schweiz verbracht und in ZWILAG Würenlingen zwischengelagert**

- ▶ **=> Die Strategie war technisch problemlos und wirtschaftlich erfolgreich**

KKG Brennstoffstrategien

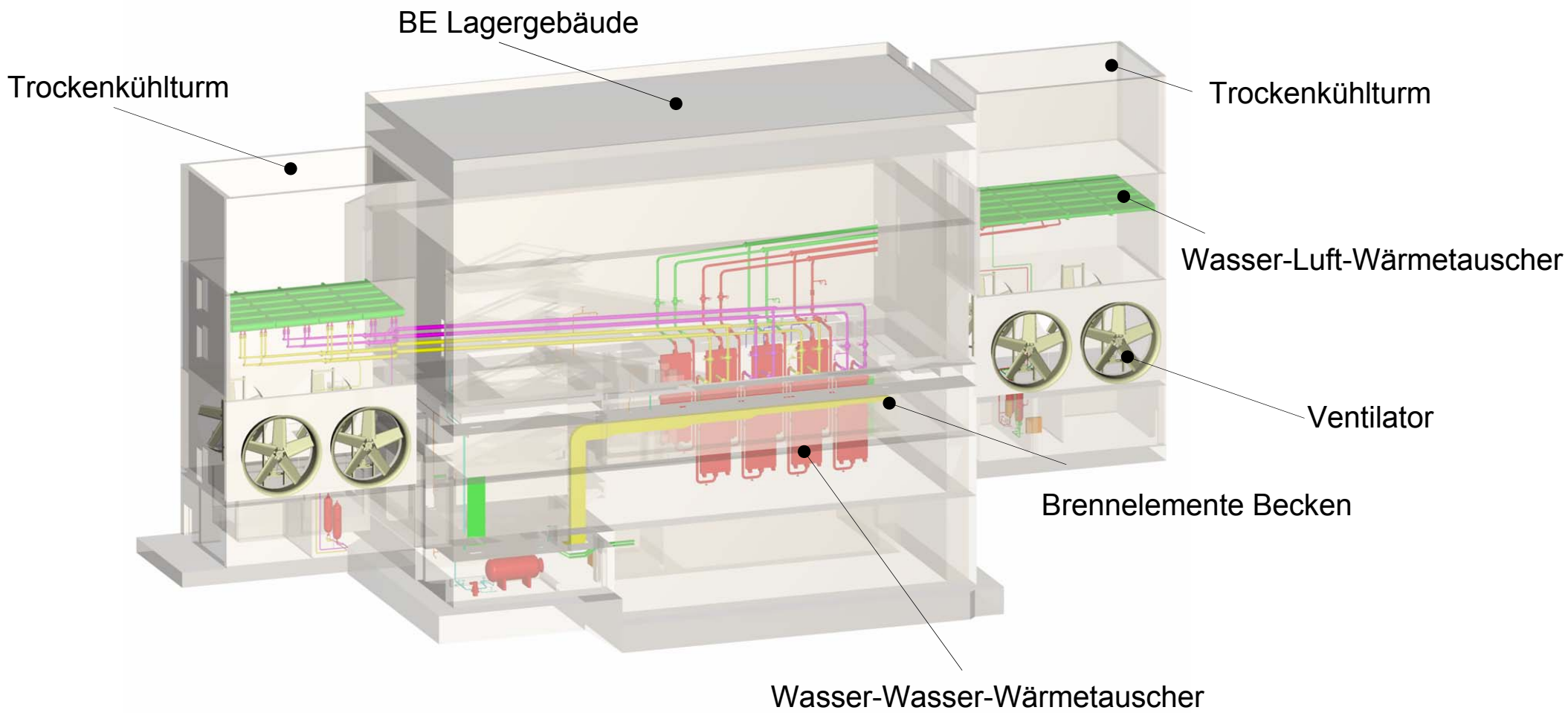


- ▶ Durch das „Kernenergiegesetz“ von 2003, wurde der Transport von abgebrannten Brennelementen in die Wiederaufarbeitungsanlagen nach Frankreich und England für 10 Jahre suspendiert (von 2006 bis zunächst 2016...)
- ▶ Die Einlagerungskapazität innerhalb des Kernkraftwerkes war auf 240 – 280 beschränkt
- ▶ Für eine optimale Einlagerung von MOX BE's in eine Lagerbehälter ist eine längere Abkühlphase erforderlich

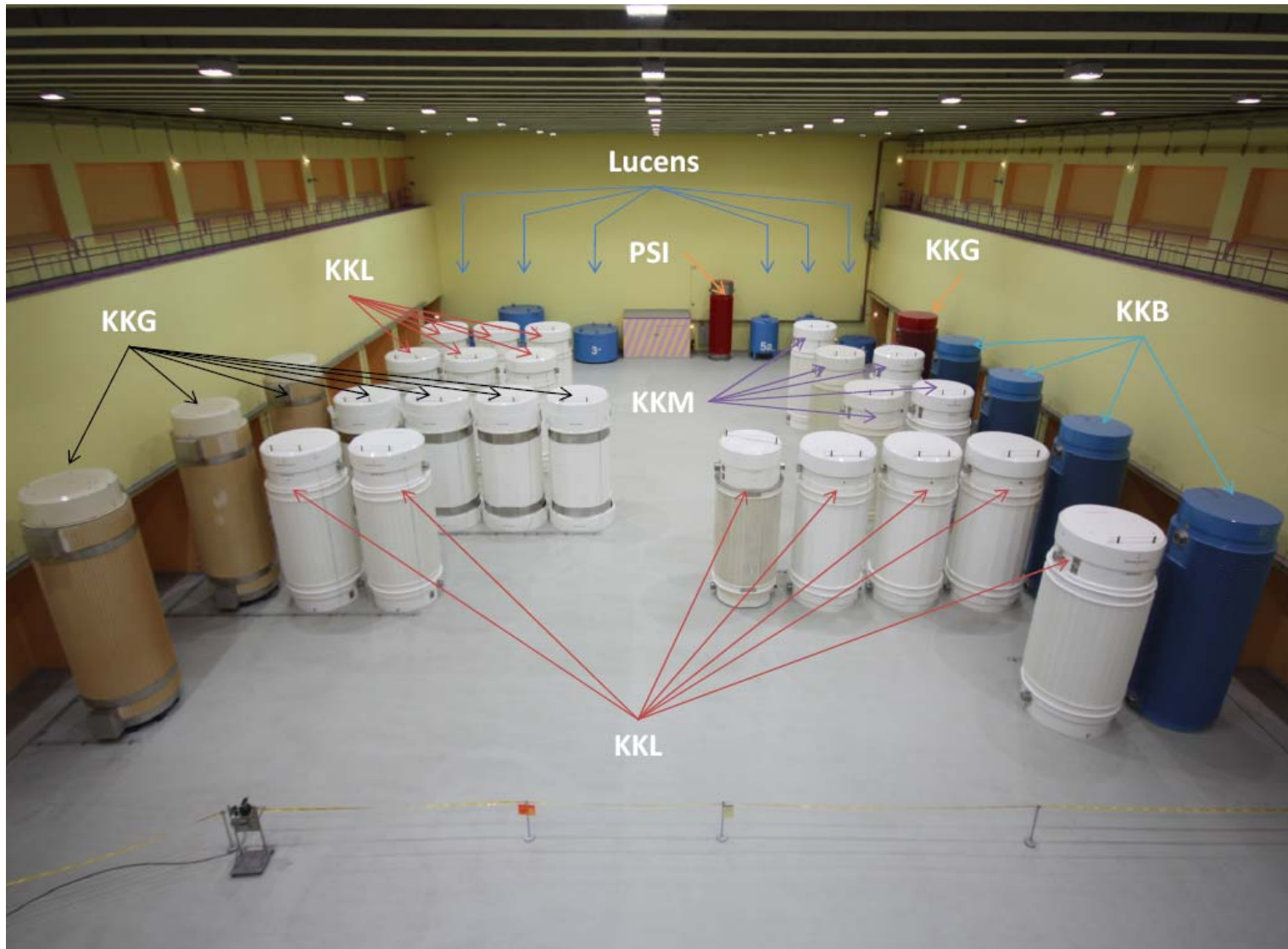
→ Notwendigkeit der Erhöhung der Lagerkapazität

- ▶ Neubau eines Nasslager zur Erhöhung der Lagerkapazität, längere Kühlperiode

Nasslager für abgebrannte Brennelemente – Kernkraftwerk Gösgen



KKG Brennstoffstrategien



Nasslager für abgebrannte Brennelemente – Kernkraftwerk Gösgen



Turn-Key Projekt

Vertragsunterzeichnung: 5. Juli 2002
Übergabe: März 2008

L&L von AREVA GmbH:

- Basic und Detailed Design für mechanische und elektrische Komponenten
- Genehmigungsunterlagen, Genehmigungsinhaber KKG
- Herstellung und Lieferung der mechanischen und elektrischen Komponenten
- Errichtung der Bauwerke
- Montage
- Inbetriebsetzung

Nasslager für abgebrannte Brennelemente – Kernkraftwerk Gösgen Technische Merkmale



- ◆ Kapazität für 1008 Brennelemente (Uran und MOX BE's)
- ◆ Hauptabmessungen des Lagergebäudes (APC bunker): 35 m x 17 m
Umbauter Raum des Lagergebäudes: 20,000 m³
Betonvolumen für das Lagergebäude: ca. 10,000 m³ (ohne Pfahlgründung)
Beton Einbringung (z.B. Fundamentplatte): 820 m³ pro Tag
- ◆ Passive Kühlung der Brennelemente im Naturumlauf bei Störfällen (max. 1 MW)
- ◆ Auslegung gegen Flugzeugabsturz und Erdbeben
- ◆ Weitestgehende Autarkie - nur wenige Versorgungssysteme mit der Anlage verbunden
- ◆ Reduzierung der induzierten Erschütterungen auf das BE-Becken durch Federdämpfer
- ◆ Lokales Steuerpult mit Verbindung von sicherheitstechnisch wichtigen Informationen zur Hauptwarte
- ◆ Zugang des Personals über bestehende Anlage
- ◆ Transport der Brennelemente vom Reaktorgebäude zum Nasslager über Schienenwagen

Nasslager für Brennelemente – Goesgen NPP

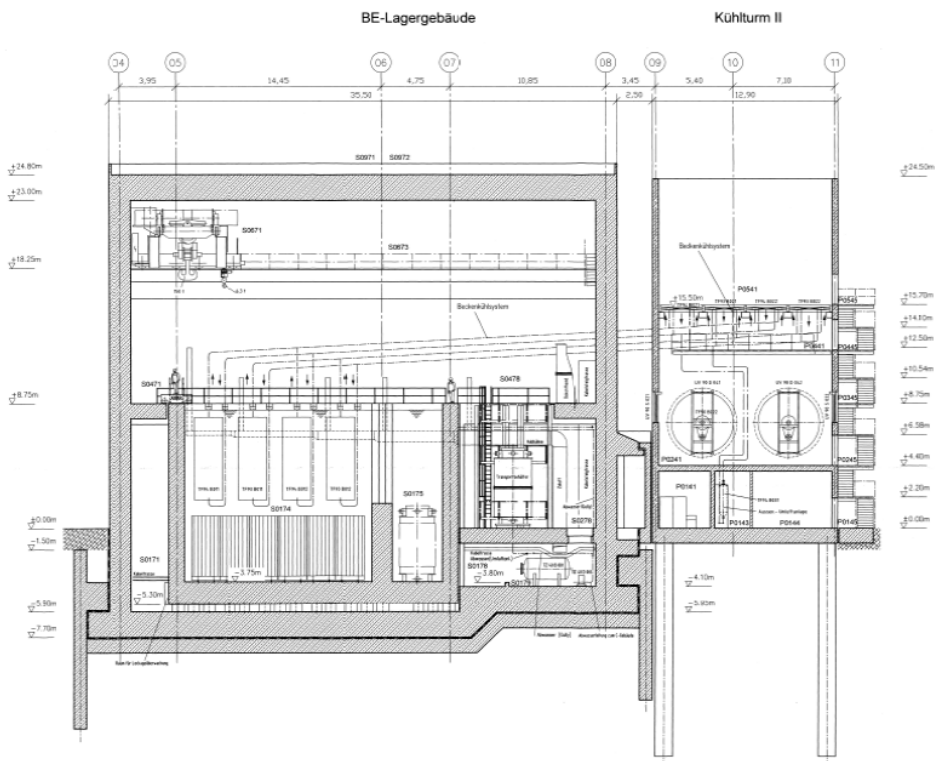
Airplane Crash (APC),

OBE (Operating basis earthquake) / (SSE Safe Shutdown earthquake)

- ▶ Erhebliche Änderungen nach Projektstart!
- ▶ Flugzeugabsturz: Code HSK-R-102
- ▶ *plus* zusätzliche Anforderungen resultierend aus dem 9/11-Unglück (grosses Flugzeug mit 2 Tanks) → Verstärkung der Wandbreite
- ▶ Erdbebenanforderungen für bestehende Kraftwerke...
- ▶ *...plus* zusätzliche Anforderungen für PEGASOS
- ▶ OBE original: 0.07 g horizontal, 0.035g vertikal
- ▶ OBE revidiert: 0.12 g horizontal, 0.060g vertikal
- ▶ SSE original: 0.15 g horizontal, 0.075g vertikal
- ▶ SSE revidiert: 0.25 g horizontal, 0.125g vertikal

Nasslager für abgebrannte Brennelemente– Kernkraftwerk Gösgen

► Ergänzende Anforderungen



Nasslager für abgebrannte Brennelemente– Kernkraftwerk Gösgen

Passives Kühlsystem, Auslegungsrandbedingungen



► Behördliche Anforderungen

- ◆ Auslegung für Normalbetrieb, Abnormaler Betrieb, Störfallbedingungen (z.B. Erdbeben und Flugzeugabsturz)
- ◆ Auslegung für Störfallbedingungen: Berücksichtigung von Einzelfehler und Wartungsfall
- ◆ Maximal zulässige Temperaturen im BE-Becken
(45 °C während Normalbetrieb, 60°C während abnormalem Betrieb und max. 80 °C während Störfallbedingungen)

► Auslegungsbedingungen Außenlufttemperatur

- ◆ Normalbetrieb: 26 °C → $\Delta T = T_{\text{pool}} - T_{\text{air}} = 19 \text{ K}$
- ◆ Abnormaler Betrieb: 28 °C → $\Delta T = T_{\text{pool}} - T_{\text{air}} = 32 \text{ K}$
- ◆ Störfallbedingungen: 32 °C → $\Delta T = T_{\text{pool}} - T_{\text{air}} = 48 \text{ K}$

► Funktionale Anforderungen

- ◆ Normalbetrieb → freie Konvektion unterstützt durch die Ventilatoren
- ◆ Abnormaler Betrieb und Störfallbedingungen → freie Konvektion ohne Ventilatoren

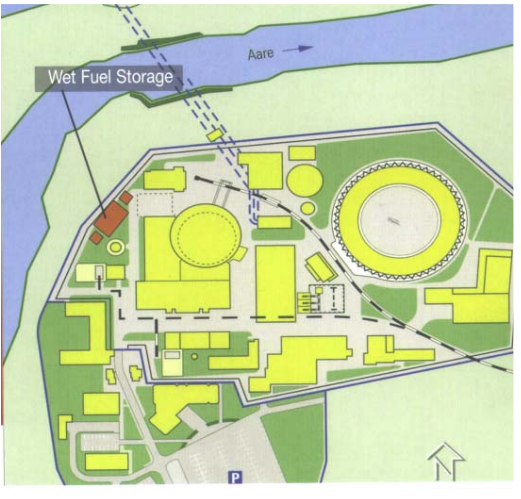
► Abzuführende Nachzerfallsleistung des BE-Beckens

- ◆ Maximum 1,0 MW in 2000 (Auslegung)
- ◆ Neue Anforderungen in 2012: > 1,25 MW

► Grundriss

- ◆ Eingeschränkte Platzverhältnisse des Nasslagers innerhalb der Anlage in Gösgen

Nasslager für abgebrannte Brennelemente – Kernkraftwerk Gösgen



AREVA



Nasslager für abgebrannte Brennelemente – Kernkraftwerk Gösgen Modulare Bauweise in zwei Ausbaustufen



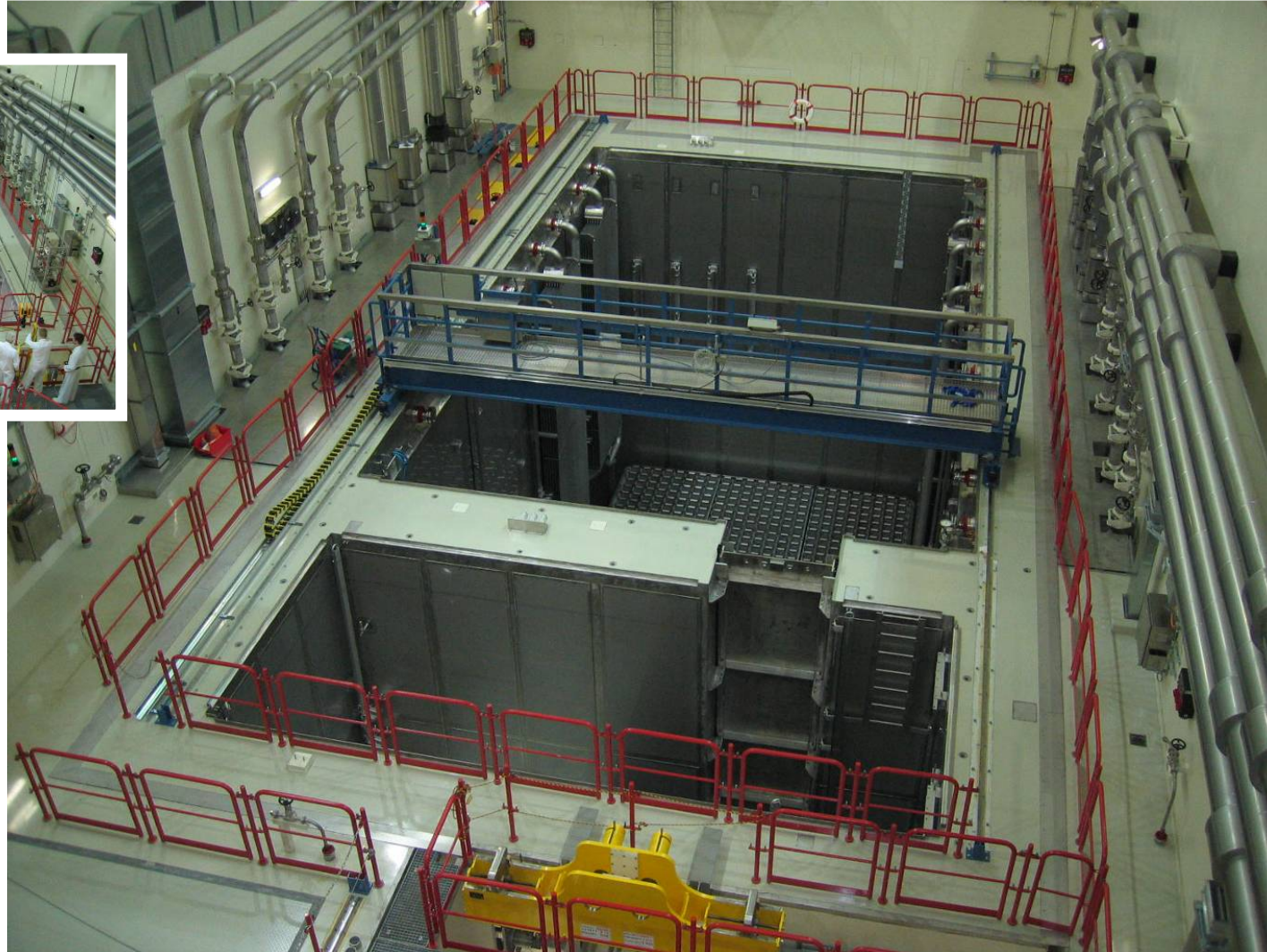
► 1. Ausbaustufe:

- ◆ Lagerkapazität von 504 BE's (Uran und MOX BE's)
- ◆ Passive Kühlung der Brennelemente im Naturumlauf bei Störfällen (0.5 MW)
- ◆ Betriebserfahrungen und Weiterentwicklung der passiven Systeme werden für die 2. Ausbaustufe berücksichtigt

► 2. Ausbaustufe:

- ◆ Vergrößerung der Lagerkapazität auf 1056 abgebrannte Brennelemente (Uran and MOX BE's) => durch optimale Anordnung der Lagegestelle (Erhöhung um weitere 48 Positionen)
- ◆ Vergrößerung der Kühlkapazität der BE's auf 1.25 MW bei freier Konvektion => durch konstruktive Verbesserung der Wärmetauscher (eine 50% Verbesserung)
- ◆ Verbesserung der Zuluftanlage (zusätzliche HEPA Filter) und Installation zusätzlicher UV Lampen zur Verhinderung biologischer Kontamination

Nasslager für abgebrannte Brennelemente– Kernkraftwerk Gösgen Überblick

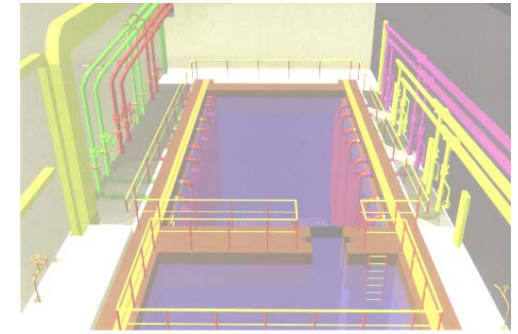
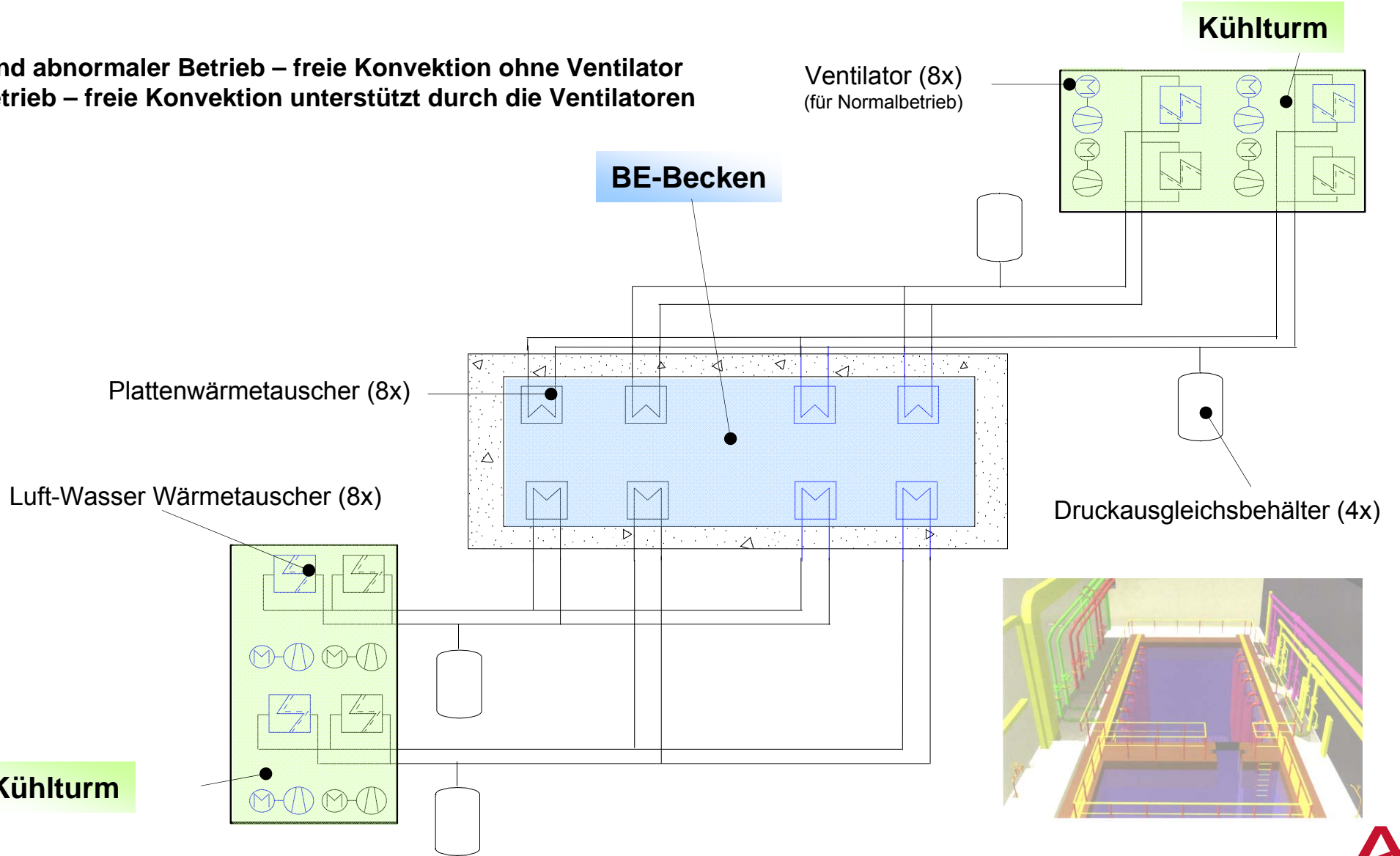


AREVA

Nasslager für abgebrannte Brennelemente– Kernkraftwerk Gösgen Schema des passiven Kühlsystems



Störfall und abnormaler Betrieb – freie Konvektion ohne Ventilator
Normalbetrieb – freie Konvektion unterstützt durch die Ventilatoren



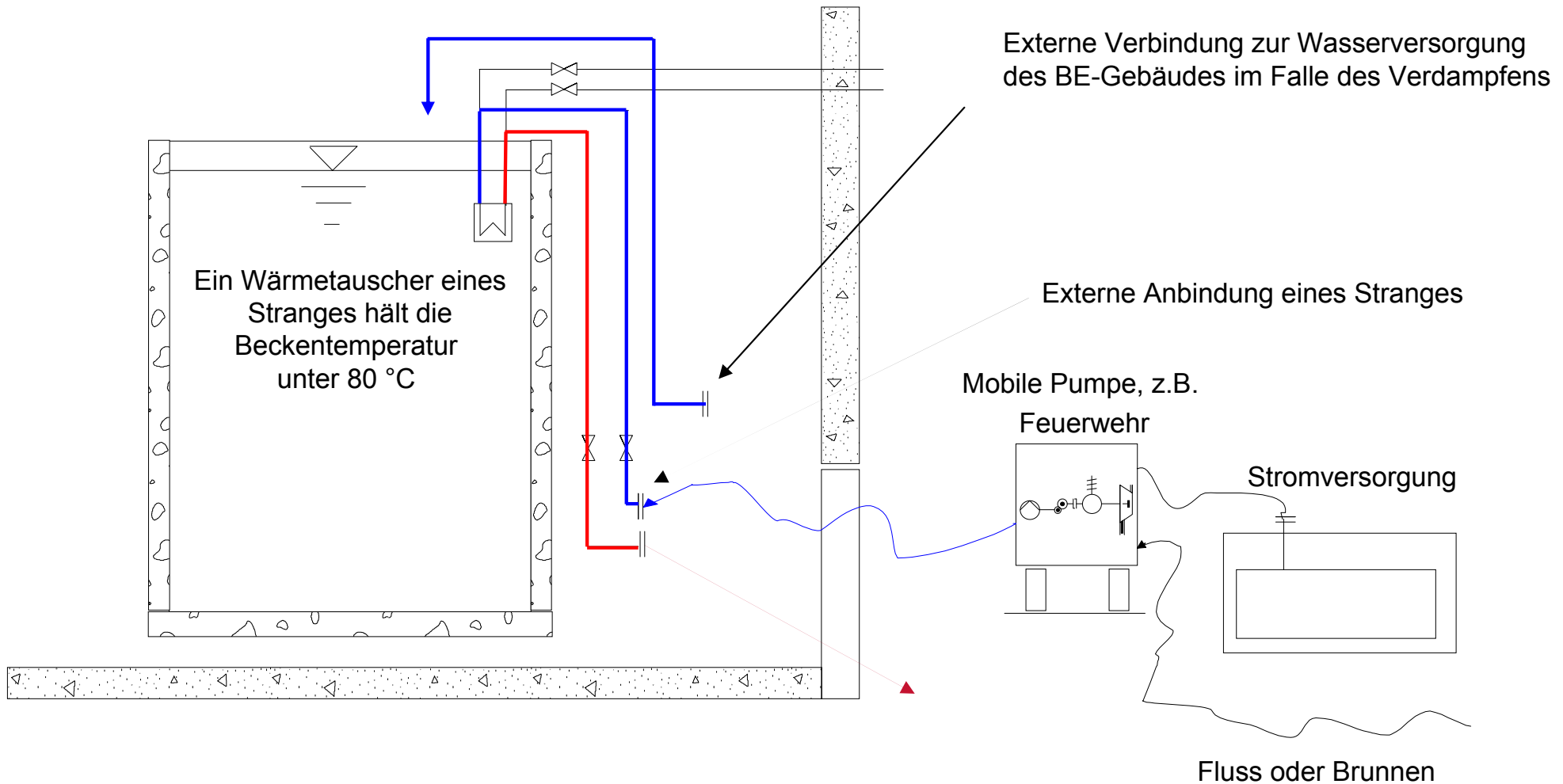
AREVA



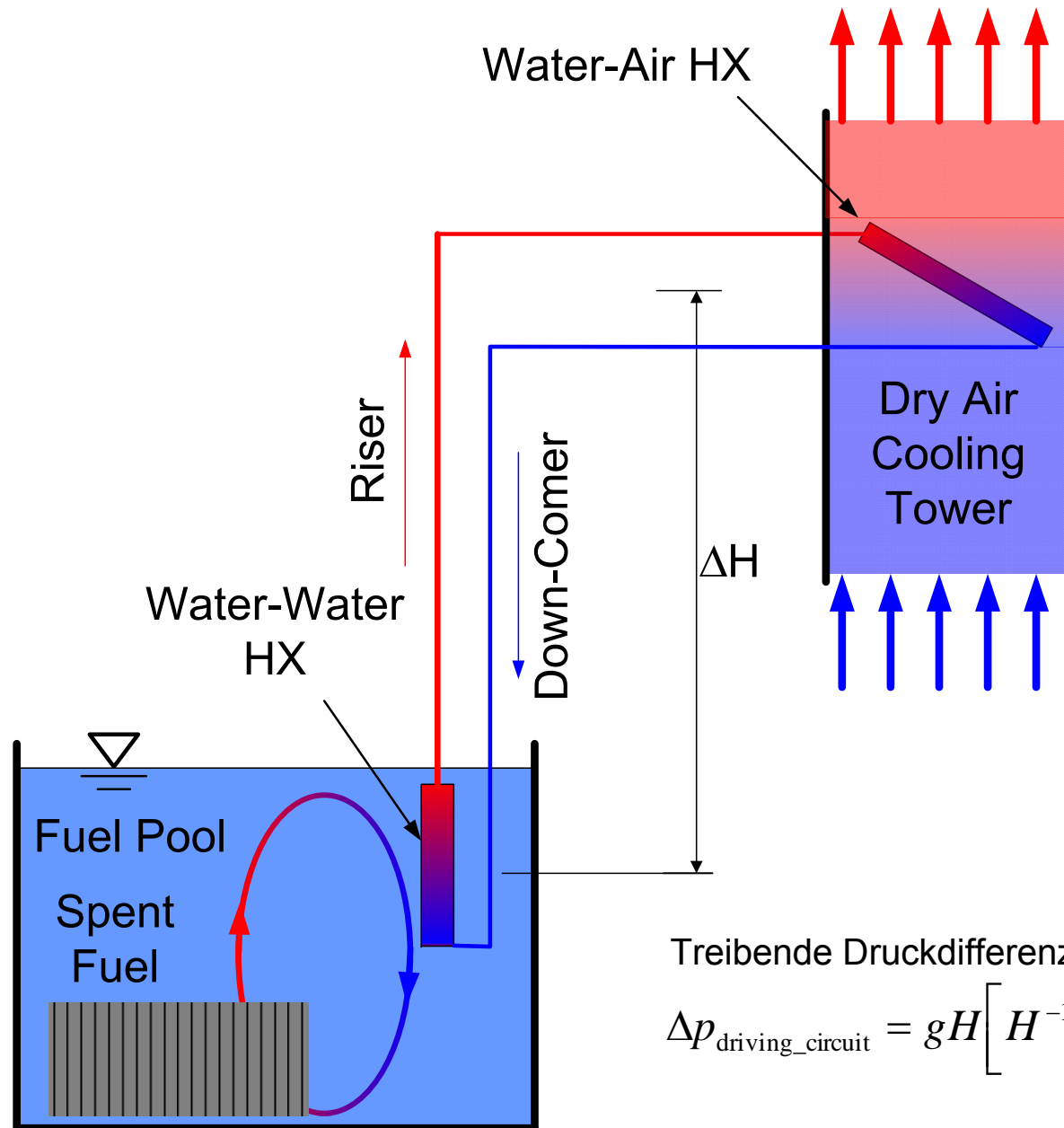
Nasslager für abgebrannte Brennelemente

Kernkraftwerk Gösgen

Accident Management-System



Funktionsweise des Wärmetransportkreislaufs



Beschreibende Gleichungen

Wärmestrom

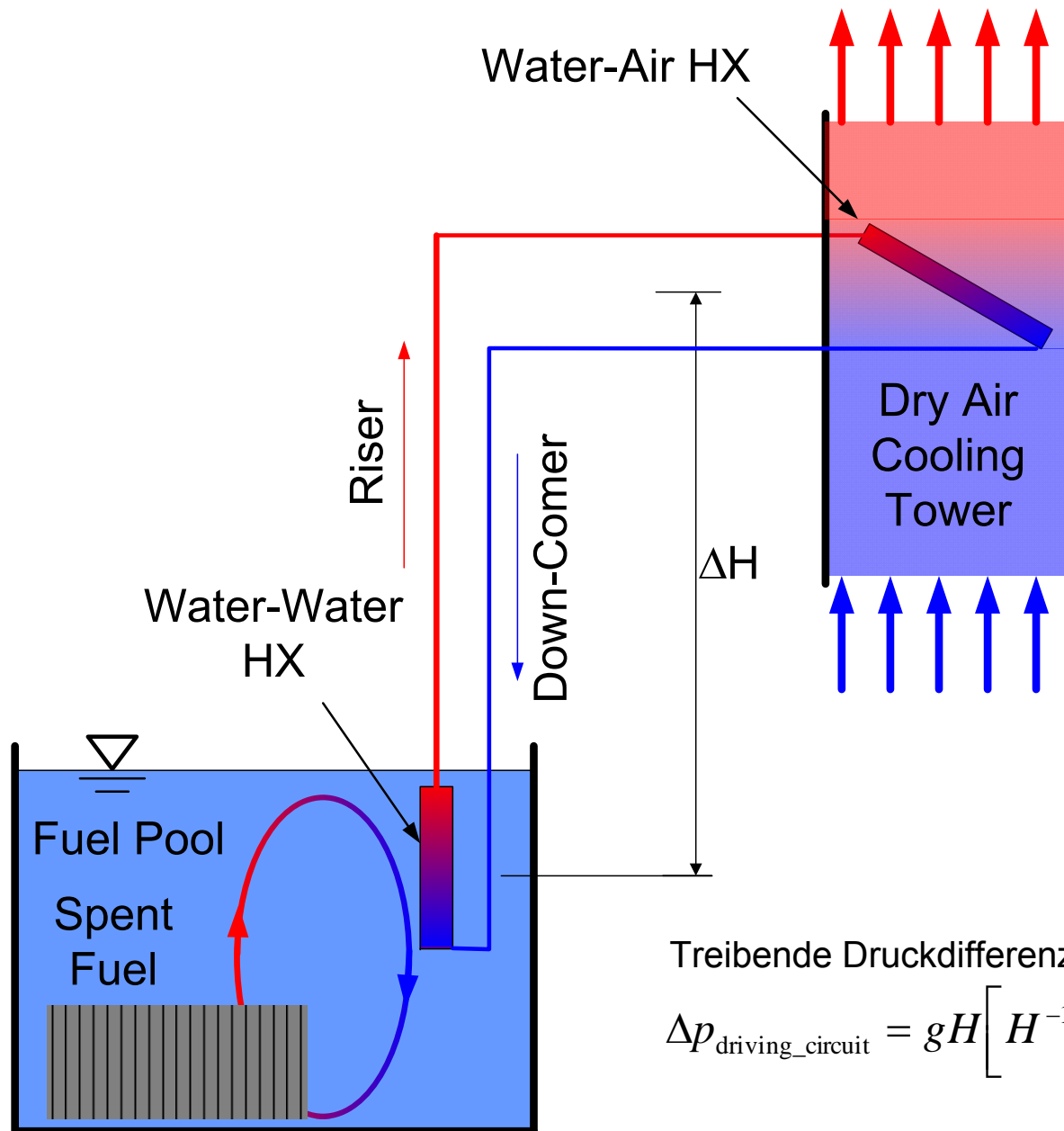
$$\dot{Q}_{HX} = R^{-1} \Delta T_{HX}$$

$$\dot{Q}_{circuit} = \dot{M}c(T_R - T_{D-C})$$

Treibende Druckdifferenz

$$\Delta p_{driving_circuit} = gH \left[H^{-1} \int_0^H \rho_{D-C}(z, T) dz - H^{-1} \int_0^H \rho_R(z, T) dz \right]$$

Funktionsweise des Wärmetransportkreislaufs



Beschreibende Gleichungen

Wärmestrom

$$\dot{Q}_{HX} = R^{-1} \Delta T_{HX}$$

$$\dot{Q}_{circuit} = \dot{M}c(T_R - T_{D-C})$$

Treibende Druckdifferenz

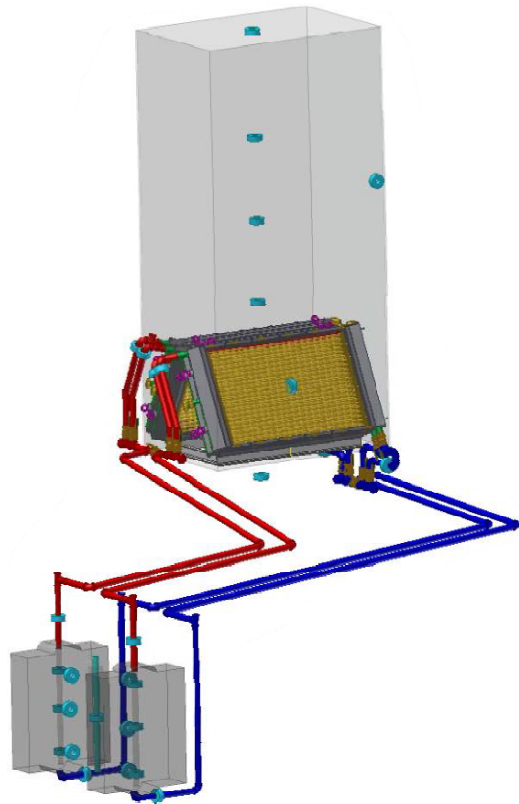
$$\Delta p_{driving_circuit} = gH \left[H^{-1} \int_0^H \rho_{D-C}(z, T) dz - H^{-1} \int_0^H \rho_R(z, T) dz \right]$$

Designprozess eines modularen Wärmeabfuhrsystems

1999 Angebotserstellung

Nasslager Gösgen

Design und numerische Simulation des Wärmeabfuhrsystems der ersten Ausbaustufe mit 0.5 MW



- ▶ Errichtung des Nasslagers mit ersten Ausbaustufe
- ▶ 0.5 MW (passiv) während der Inbetriebsetzung im Jahr 2008
- ▶ 4 Jahre Betriebserfahrung

2012

Verbesserte “heat transfer unit”

4 Jahre F&E in Zusammenarbeit mit den Universitäten Dresden und Darmstadt
Sukzessive Optimierung des passiven Wärmeabfuhrsystems

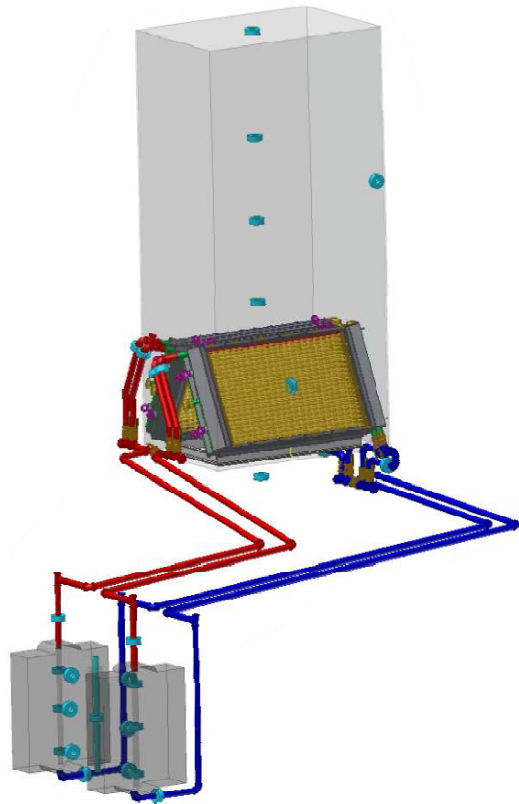
AREVA

Designprozess eines modularen Wärmeabfuhrsystems

1999 Angebotserstellung

Nasslager Gösgen

Design und numerische Simulation des Wärmeabfuhrsystems der ersten Ausbaustufe mit 0.5 MW



- ▶ Errichtung des Nasslagers mit ersten Ausbaustufe
- ▶ 0.5 MW (passiv) während der Inbetriebsetzung im Jahr 2008
- ▶ 4 Jahre Betriebserfahrung

4 Jahre F&E in Zusammenarbeit mit den Universitäten Dresden und Darmstadt

Sukzessive Optimierung des passiven Wärmeabfuhrsystems

2012

Verbesserte "heat transfer unit"

AREVA

Vorteile des passiven Kühlsystems



- ◆ Sicherstellung der Brennelementkühlung im Fall eines Stromausfalls (SBO)
- ◆ Keine Notstromdiesel erforderlich
- ◆ Keine sicherheitsbezogene Leittechnik erforderlich
- ◆ Vermeidung des „aktiven“ Einzelfehlerkriterium für die Kühlfunktion
- ◆ Marginale Betriebskosten
- ◆ Eichfaches Wartungs- und Reparaturkonzept
- ◆ Einfache Genehmigung
- ◆ Kleiner Grundriss, anpassbar an die spezifische Anlagensituation
- ◆ Betriebserfahrungen in Gösgen vorhanden

- ◆ Stromersparnis von $50 \cdot 10^6$ kWh (50 000 000 kWh) in 40 Jahren – das entspricht ungefähr 1840 Wagons Steinkohle (18400 t) oder 6800 Wagons Braunkohle (68000 t) oder 0,00625 t Uran (6,25 kg)
- ◆ Das hierfür eingesparte CO₂ (bei einer Verstromung von Kohle ca. 50 000 t) entspricht dem Ausstoß von ca. 31000 PKW's während eines Jahres (PKW mit 128 g CO₂/km und 12000 km/Jahr)

Nasslager für abgebrannte Brennelemente – Kernkraftwerk Gösgen

► Patenterteilung in 2010

(19)



(11) EP 1 497 835 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
07.04.2010 Patentblatt 2010/14

(21) Anmeldenummer: **03725017.2**

(22) Anmeldetag: **14.04.2003**

(51) Int Cl.:
G21C 19/07 (2006.01)

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2003/003839

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2003/090233 (30.10.2003 Gazette 2003/44)

(54) **ZWISCHENLAGERSYSTEM FÜR Brennelemente aus einer kerntechnischen Anlage sowie Verfahren zum Betreiben eines derartigen Zwischenlagersystems**

INTERMEDIATE STORAGE SYSTEM FOR FUEL ELEMENTS FROM A NUCLEAR FACILITY, AND METHOD FOR OPERATING ONE SUCH INTERMEDIATE STORAGE SYSTEM

SYSTEME DE STOCKAGE INTERMEDIAIRE DESTINE A DES ELEMENTS DE COMBUSTIBLE PROVENANT D'UNE CENTRALE NUCLEAIRE ET PROCEDE D'UTILISATION D'UN TEL SYSTEME DE STOCKAGE INTERMEDIAIRE

Claims

1. An interim storage system (1) for fuel elements (2) with a combustion of up to 60,000 MW/dtU from a nuclear facility, having a wet-storage pond (14) whose interior can be re-cooled via an associated secondary cooling loop (22) operable in natural circulation, into which a number of heat exchangers (24) arranged in the wet-storage pond (14) are inserted, the heat exchangers (24) being suspended in the wet-storage pond (14) and the heat exchangers (24) being connected, via the secondary cooling loop (22), with a number of re-cooling elements (26) arranged above the rated level of the wet-storage pond (14),

Passive Kühlsysteme am Beispiel der Kühlung abgebrannter Brennelemente

▶ Leo Ornot – IBUP-G Erlangen