

FACHGESPRÄCH 2015

Sicherheitsaspekte bei der längerfristigen Zwischenlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle

Robert Kilger

Übersicht

- Zwischenlagerung in Deutschland
- Aktuelle Randbedingungen
- Herausforderungen der längerfristigen Zwischenlagerung
- Technische Alterung allgemein
- Alterungseffekte der Behälterkomponenten
- Alterungseffekte der Brennstab-Hüllrohre
- Arbeiten der GRS
- Zusammenfassung und Ausblick

Trockene Zwischenlagerung in Deutschland (1/3)

Transportbehälterlager

▪ Unfallsichere Transport- und Lagerbehälter

- Typ B(U) zertifiziert
- Innenraum getrocknet und Inertgas gefüllt, Unterdruck
- Doppeldeckeldichtsystem
- Permanente Dichtheitsüberwachung

▪ Zwischenlagergebäude

- Wärmeabfuhr durch Naturkonvektion
- Abschirmung
- Schutz vor äußeren Einflüssen

▪ Schutzziele

- Sicherer Einschluss
- Abfuhr der Nachzerfallswärme
- Unterkritikalität
- Abschirmung



Trockene Zwischenlagerung in Deutschland (2/3)

Transportbehälterlager



Zwischenlager	Anzahl Behälter	In Betrieb seit
TBL Ahaus	329	Juni 1992
TBL Gorleben	113	April 1995
Zwischenlager Nord	74	Ende 1999
AVR-BL Jülich	152	August 1993
SZL Biblis	51	18.05.2006
SZL Brokdorf	26	05.03.2007
SZL Brunsbüttel	9	05.02.2006
SZL Grafenrheinfeld	21	27.02.2006
SZL Grohnde	22	27.04.2006
SZL Gundremmingen	42	25.08.2006
SZL Isar	34	12.03.2007
SZL Krümmel	19	14.11.2006
SZL Lingen	32	10.12.2002
SZL Neckarwestheim	44	06.12.2006
SZL Philippsburg	36	19.03.2007
SZL Unterweser	16	18.06.2007
Gesamt	1020	—

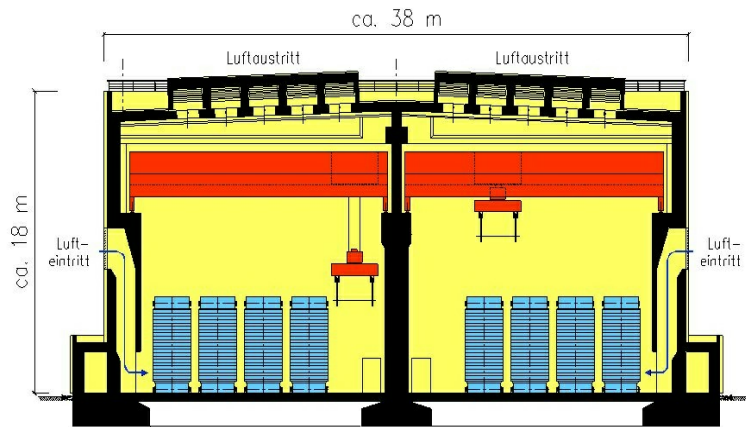
Quelle: BFS, Stand 12/2014

Ca. weitere 930 Behälter müssen noch eingelagert werden.

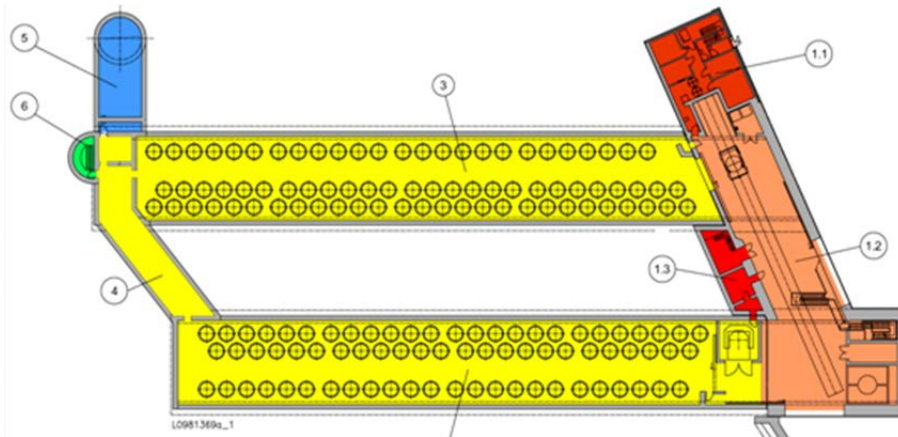
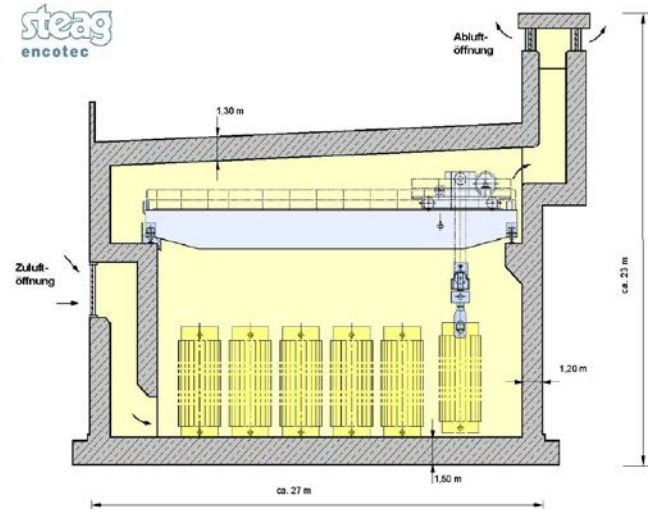
Trockene Zwischenlagerung in Deutschland (3/3)

Transportbehälterlager

WTI-Konzept



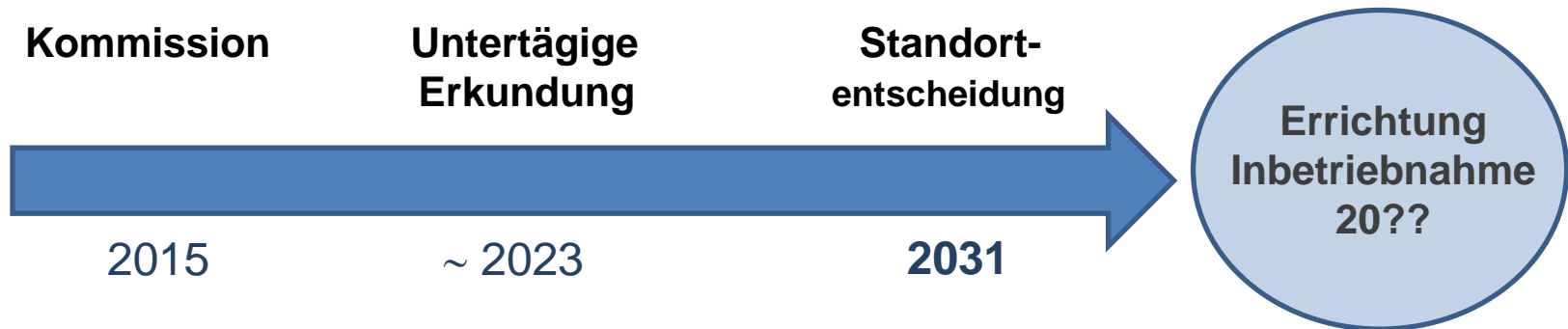
STEAG-Konzept



Tunnel-Konzept in Neckarwestheim

Aktuelle Randbedingungen

- Genehmigungen der Transportbehälterlager i.d.R. für **40 Jahre ab der ersten Einlagerung**
 - TBL Gorleben bis 2034; SZL individuell, z. B. Lingen bis 2042
- **Standortauswahlgesetz** (StandAG) vom 27.06.2013



- Errichtung eines **Eingangslagers** am Endlagerstandort erforderlich
- Bestehende Sicherheitsnachweise sind für 40 Jahre geführt ✓
- Zwischenlagerung über die derzeit genehmigten Zeiträume hinaus könnte für eine Reihe von Behältern notwendig werden
- **Weltweit keine praktischen Erfahrungen** mit der Zwischenlagerung und dem Transport für Zeiträume, die wesentlich über die in Deutschland vorliegenden hinausgehen

Herausforderungen (1/2)

- ESK-Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern (10.06.2013)

„Ist dieser Zeitraum (40 Jahre) absehbar nicht ausreichend, sind geeignete zusätzliche Nachweise (z. B. zum Langzeitverhalten von Werkstoffen und Komponenten der Behälter und Inventare unter den lagerspezifischen Beanspruchungsbedingungen) zu erbringen.“

- **Längerfristige Zwischenlagerung** über 40 Jahre hinaus
 - Gewährleistung der fortbestehenden **Schutzzieleinhaltung** und des **sicheren Betriebs** eines Transportbehälterlagers
 - SZL: Erhalt bzw. Aufbau von **Infrastruktur** während und nach dem Rückbau der Kernkraftwerke
 - **Transportsicherheit** und **Konditionierbarkeit** im Anschluss an die Lagerphase
 - Erweiterung der technischen Basis in Bezug auf
 - Physikalische Randbedingungen
 - Materialverhalten (Alterung)
 - Nicht direkt zugängliche Komponenten (z. B. Hüllrohre der Brennstäbe)

Herausforderungen (2/2)

- **Technisches Alterungsmanagement** für zugängliche Komponenten
 - Wiederkehrende Prüfungen und Inspektionen
 - Auswertung der Betriebserfahrungen
 - Instandhaltung und Wartungsmaßnahmen

➔ Identifikation ggf. systematischer oder bisher nicht berücksichtigter Effekte

- **Nicht-technische Aspekte**
 - **Know-how** Erhalt / Transfer – wie, und welches Know-how?
 - Sicherstellung ausreichender **Personalstärke** und **-qualifikation**
 - Langzeit-**Dokumentation**, z. B. Fortschritt der EDV-Systeme
 - Änderungen der **Infrastruktur** (Rückbau der Kernkraftwerke am SZL-Standort)
 - Nationaler und internationaler **Erfahrungsaustausch**

Technische Alterung allgemein

▪ Ursachen

- Neutronen- und Gamma-Strahlung
- Thermische Beanspruchung
- Mechanische Beanspruchung, ggf. aufgrund von Handhabungsvorgängen
- Chemische Reaktionen / Umwelteinflüsse

▪ Betroffene Materialien

- Metallische Werkstoffe
- Polymere, z. B. implementierte Moderatormaterialien aus Polyäthylen
- (Beton)

▪ Alterungseffekte

- Strahlungsinduzierte Schäden
- Korrosion
- Änderungen von Materialeigenschaften
 - Verformung, Kriechen, Versprödung, Degradation, ...

Alterungseffekte der Behälterkomponenten

▪ Wesentliche sicherheitstechnische Komponenten

- Bolzen und Schrauben
- Metallische und Elastomer-Dichtringe im Deckelsystem
- Dichtheitsüberwachungssystem (Druckschalter)
- Polyäthylen-Strukturen zur Neutronenmoderation / Abschirmung
- Behälterwand mit Korrosionsschutzbeschichtung

▪ Prüfbar von außen

- Anzugsmoment der Verschraubungselemente
- Korrosionserscheinungen an Mantelfläche und Tragbolzen
- Dichtheitsüberwachung (selbstprüfend)
- Oberflächendosisleistung
- Temperaturprofil

▪ Nicht direkt prüfbar

- Dichtheit / Integrität der Hüllrohre



Bildquelle: GNS

Alterungseffekte der Brennstab-Hüllrohre (1/3)

- **Hüllrohre** werden stetig thermisch und mechanisch belastet
 - Strahlung
 - Nachzerfallsleistung
 - Vorherrschender Innendruck
(Druckbeaufschlagung, freigesetzte Spaltgase, Helium)
- Versprödung durch Strahlung und Wasserstoffeinlagerungen
- Verformung durch Kriechen
- Herabsetzung der Duktilität des Hüllrohres bei Temperaturabnahme

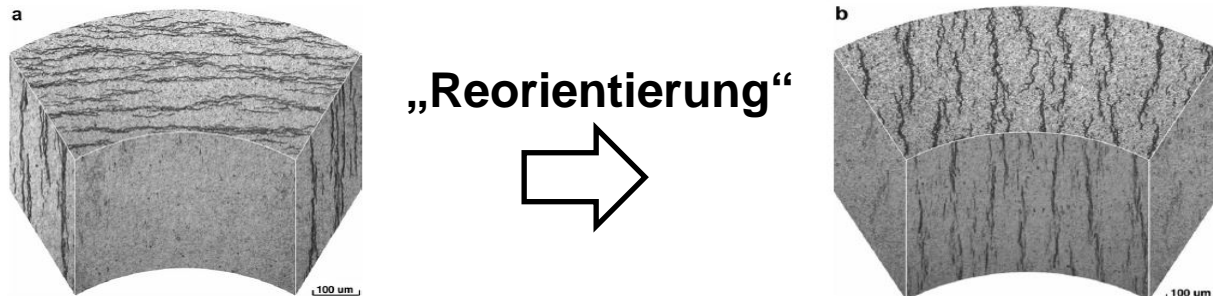
- **Mögliche Konsequenzen** (v.a. Transport und Konditionierung)
 - Verlust der Dichtheit der Hüllrohre
 - Verlust der mechanischen Integrität der Hüllrohre



Alterungseffekte der Brennstab-Hüllrohre (2/3)

Wasserstoff-/Hydrid-Thematik allgemein

- Reaktorbetrieb
 - Bei Hüllrohroxidation wird H_2 frei \rightarrow diffundiert in das Hüllrohr, fällt als Hydrid ZrH aus
 - Geringer Druckgradient innen/aussen \rightarrow Ausrichtung der Hydride in Umfangsrichtung [a]
- Übergang zwangsgekühlte Nass- zur trockenen (Langzeit-)Zwischenlagerung
 - Starke Temperaturerhöhung \rightarrow ein Teil der Hydride zersetzt sich, H_2 wird mobil
 - Innendruck \gg Außendruck \rightarrow radialer Spannungsgradient
 - Abkühlung \rightarrow Ausfällung von Hydrid bevorzugt entlang des Spannungsgradienten [b] \rightarrow radiale Hydride - Ausrichtung begünstigt die Ausbreitung von Rissen
 - Abkühlung \rightarrow Herabsetzen der Duktilität („Versprödung“) – verstärkt durch radiale Hydride
 - U. U. (Temp., Druck, Material) Totalverlust der Duktilität $> 25\text{ °C}$ einzelner Stäbe vorstellbar



Alterungseffekte der Brennstab-Hüllrohre (3/3)

▪ Randbedingungen zum eingelagerten Inventar

- Intakte Brennelemente v.a. aus Druck- und Siedewasserreaktoren
- Einsatz verschiedener Brennstoffe (UO_2 und MOX)
- Homogene UO_2 und gemischte UO_2/MOX Behälterbeladungen
- Breites Abbrandspektrum der Brennelemente
 - mittlerer Abbrand für UO_2 und MOX bis 65 GWd/tHM
- Weiterentwicklung der Hüllrohrmaterialien, wie Zry-4, M5, ...

→ **Große Bandbreite** an Temperaturen, Innendrücken und Materialkennwerten, ...

Arbeiten der GRS zu den Sicherheitsaspekten der längerfristigen Zwischenlagerung (1/6)

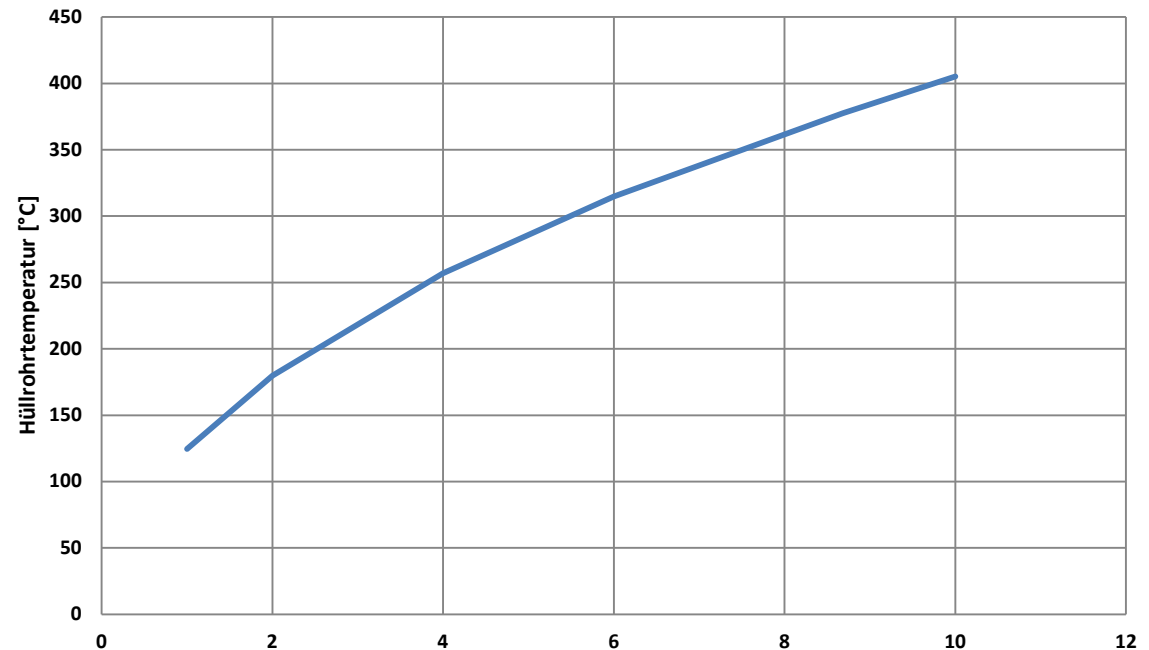
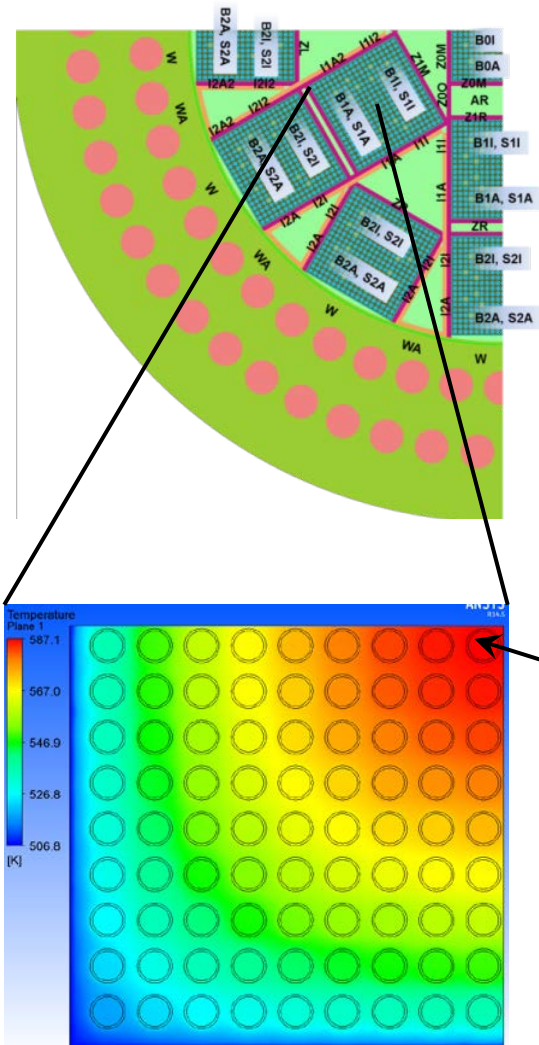
- **Zielstellung: Sicherheitstechnische Bewertung**
 - Berücksichtigung des vorhandenen Abbrandspektrums
 - Analysen zu Temperatur-, Druck- und Spannungszuständen im Hüllrohr
 - Ermittlung des Sachstands auf dem Gebiet der Materialwissenschaften
 - Radiologische Auswirkungen
- **Durchgeführte Arbeiten (1): Analysen zum Hüllrohr-Verhalten**
 - Abbrandrechnungen für DWR-Brennelemente (**Quellterm-Bestimmung**)
 - **Temperaturberechnungen** anhand eines generischen Behältermodells mit homogenen und heterogenen (MOX) Beladeszenarien
 - Modellentwicklung zur Bestimmung **Hüllrohr-Umfangsspannungen**
 - Vergleich mit experimentellen Daten
 - Hüllrohr-Umfangsspannungen (p, T)
 - Duktil-Spröd-Übergang (*ductile-brittle transition temperature*, DBTT; materialspezifisch)
- **Durchgeführte Arbeiten (2): Abschirmungsberechnungen**
 - Einschätzung der Dosisentwicklung bei hochabgebranntem Inventar
 - Auswirkung von postulierten Dichteänderungen des Moderatormaterials

Arbeiten der GRS zu den Sicherheitsaspekten der längerfristigen Zwischenlagerung (2/6)

▪ Ergebnisse (1) – Analysen zum Hüllrohr-Verhalten

- Methode zur Bestimmung der **Hüllrohrinnendrucke** und **Umfangsspannungen**
 - Zusammenführung der Ergebnisse der Abbrand- und Temperaturberechnungen
 - Anwendung der idealen Gasgleichung
 - Modellierung mit Näherungen, noch nicht alle relevanten Phänomene implementiert
 - Konservativer Ansatz (z. B. heißester Stab)
- Potenzielle Schädigungsmechanismen qualitativ weitgehend bekannt, Bestimmung der physikalischen Randbedingungen grundsätzlich möglich, aber:
 - **Experimentelle Datenlage zur Validierung der Methodik bislang wenig umfassend**
 - International anerkannte Problematik
 - Weitere nationale und internationale Anstrengungen zur Erweiterung des Kenntnisstandes erforderlich

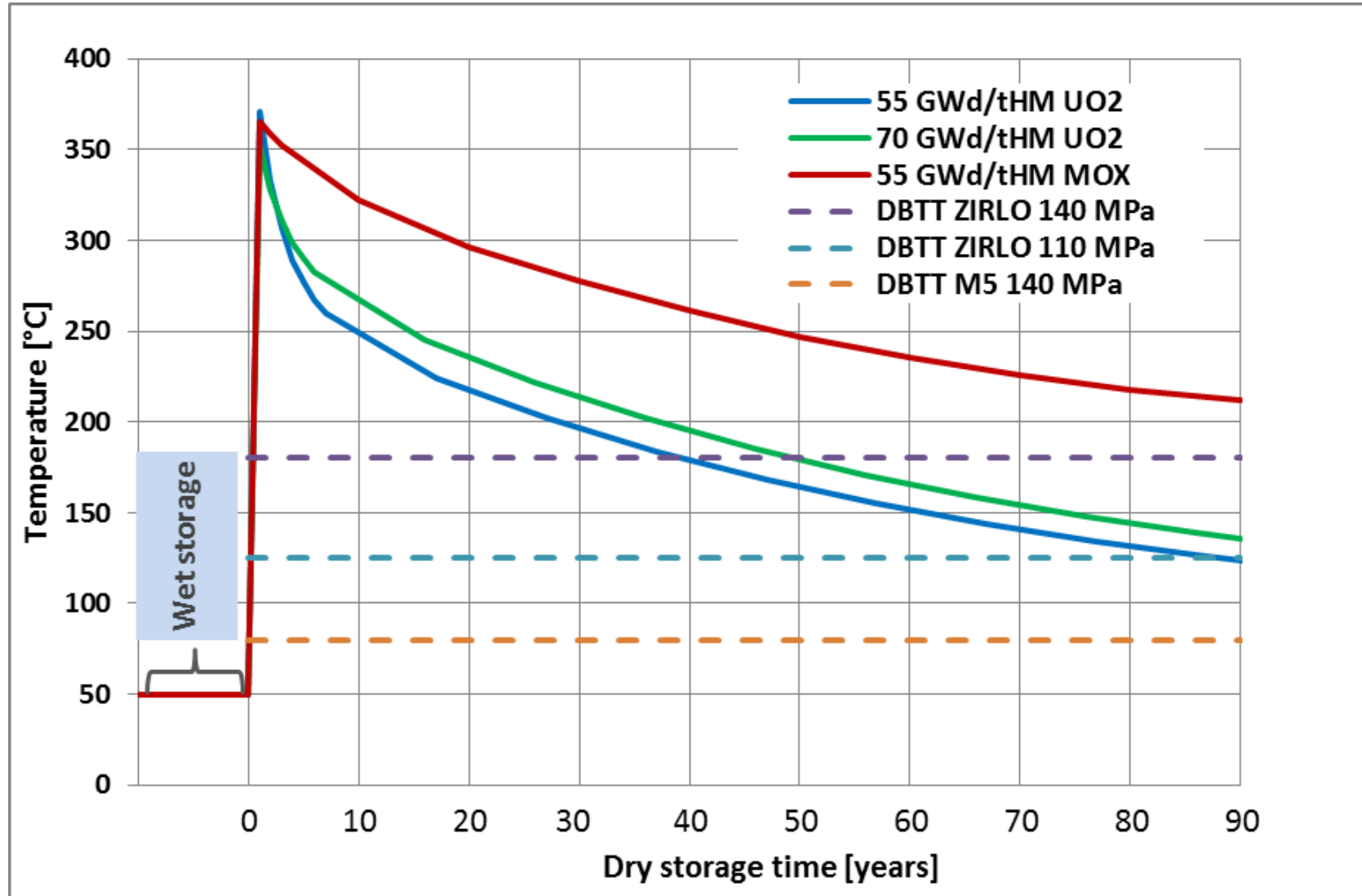
Arbeiten der GRS zu den Sicherheitsaspekten der längerfristigen Zwischenlagerung (3/6)



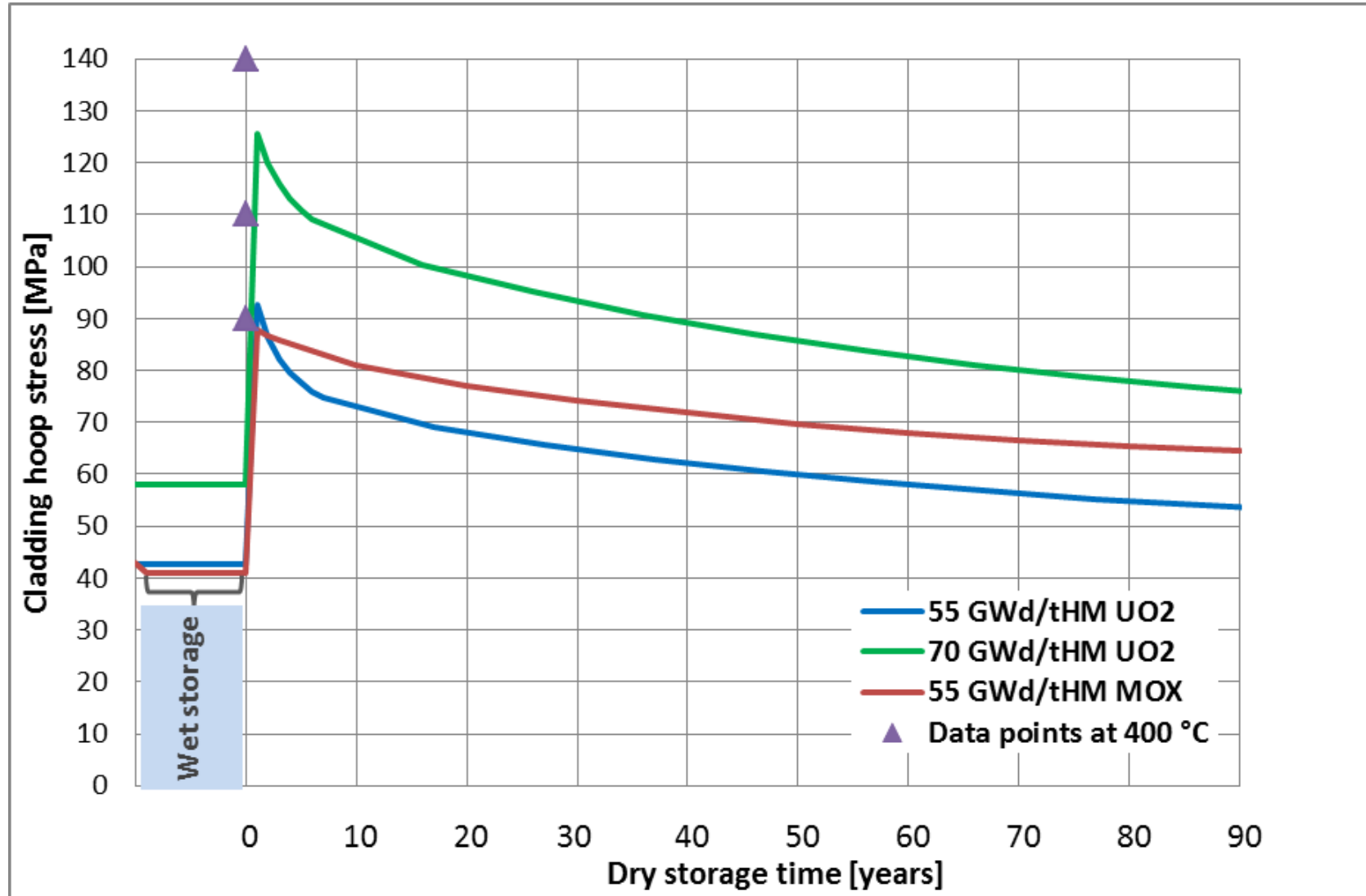
Hüllrohrtemperatur als Funktion der Wärmeleistung pro Brennstab [W]

- Wärmeleistung nimmt während der Lagerzeit ab
- Sinkende Hüllrohrtemperaturen

Arbeiten der GRS zu den Sicherheitsaspekten der längerfristigen Zwischenlagerung (4/6)



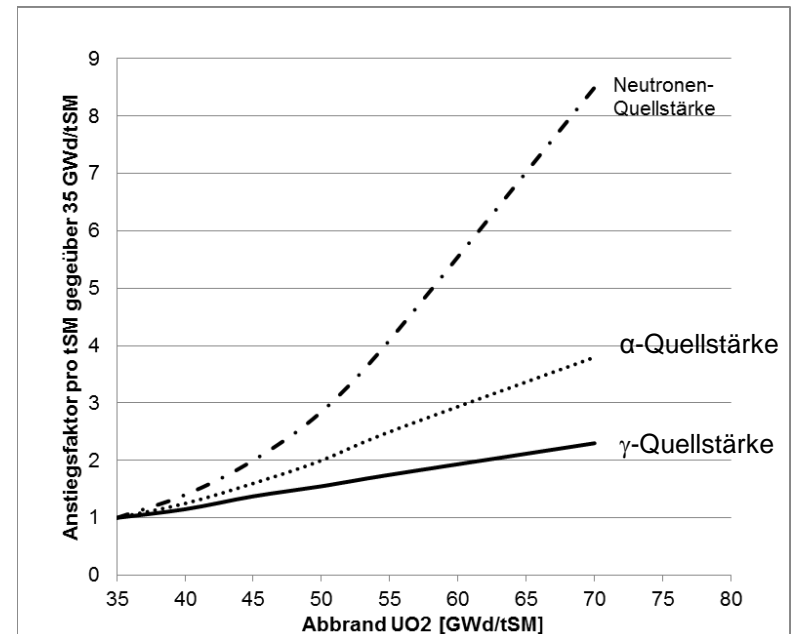
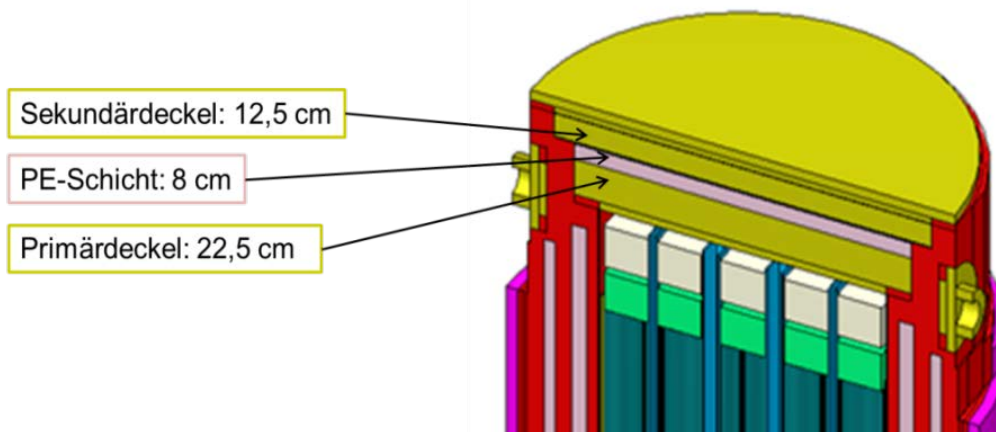
Arbeiten der GRS zu den Sicherheitsaspekten der längerfristigen Zwischenlagerung (5/6)



Arbeiten der GRS zu den Sicherheitsaspekten der längerfristigen Zwischenlagerung (6/6)

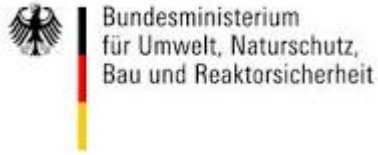
Ergebnisse (2) – Abschirmungsberechnungen

- Generisches Behältermodell
- Hochabbrand und MOX: Neutronenstrahlung dominierend
- Längere Lagerzeiten: Abnahme der Quellstärke
- Postulierter Dichteverlust der PE-Neutronenmoderatoren von 50 %
 - Für Zeiten ≥ 40 a durch zerfallsbedingte Abnahme der Quellstärke kompensiert



Zusammenfassung und Ausblick

- Übergang zum **autarken Betrieb der Standortzwischenlager** nach Stilllegung der Kernkraftwerke muss gewährleistet sein, inklusive Überwachung und Aufsicht
- Durchführung von **Periodischen Sicherheitsüberprüfungen** und **Alterungsmanagement** bilden eine Grundlage für den sicheren Weiterbetrieb
- **Langzeitverhalten** der Brennelemente
 - Entwicklung von verbesserten Modellen und Methoden zur numerischen Vorhersage des Langzeitverhaltens sich abkühlender Hüllrohre
 - Erweiterung der experimentelle Datenbasis für Brennelemente erforderlich, um Sicherheitsnachweise für Zeiträume über 40 Jahre hinaus führen zu können
 - Bisher keine sicherheitstechnischen Erkenntnisse, die einer Verlängerung der Zwischenlagerung grundsätzlich im Wege stehen
- Thematik der **Transportsicherheit** der Behälter und der **Konditionierbarkeit** der Brennelemente im Anschluss an die Zwischenlagerungsphase gewinnt mit zunehmender Zwischenlagerdauer an sicherheitstechnischer Bedeutung



Förderkennzeichen: 3612R03300

*Vielen Dank für
Ihre Aufmerksamkeit.*

Haben Sie Fragen?