

Technische Probleme in den französischen AKW und ihre Auswirkungen

Christoph Pistner

Misère Nucléaire – Wenn AKW ungeplant ausfallen

Basel, 30.06.2023, Schweizerische Energie-Stiftung, Trinationaler Atomschutzverband

Agenda

1 AKWs in Frankreich

2 Risse in Rohren

3 Ursachenklärung – gestern, heute, morgen?

4 Und nun?

5 Fazit

1

AKWs in Frankreich

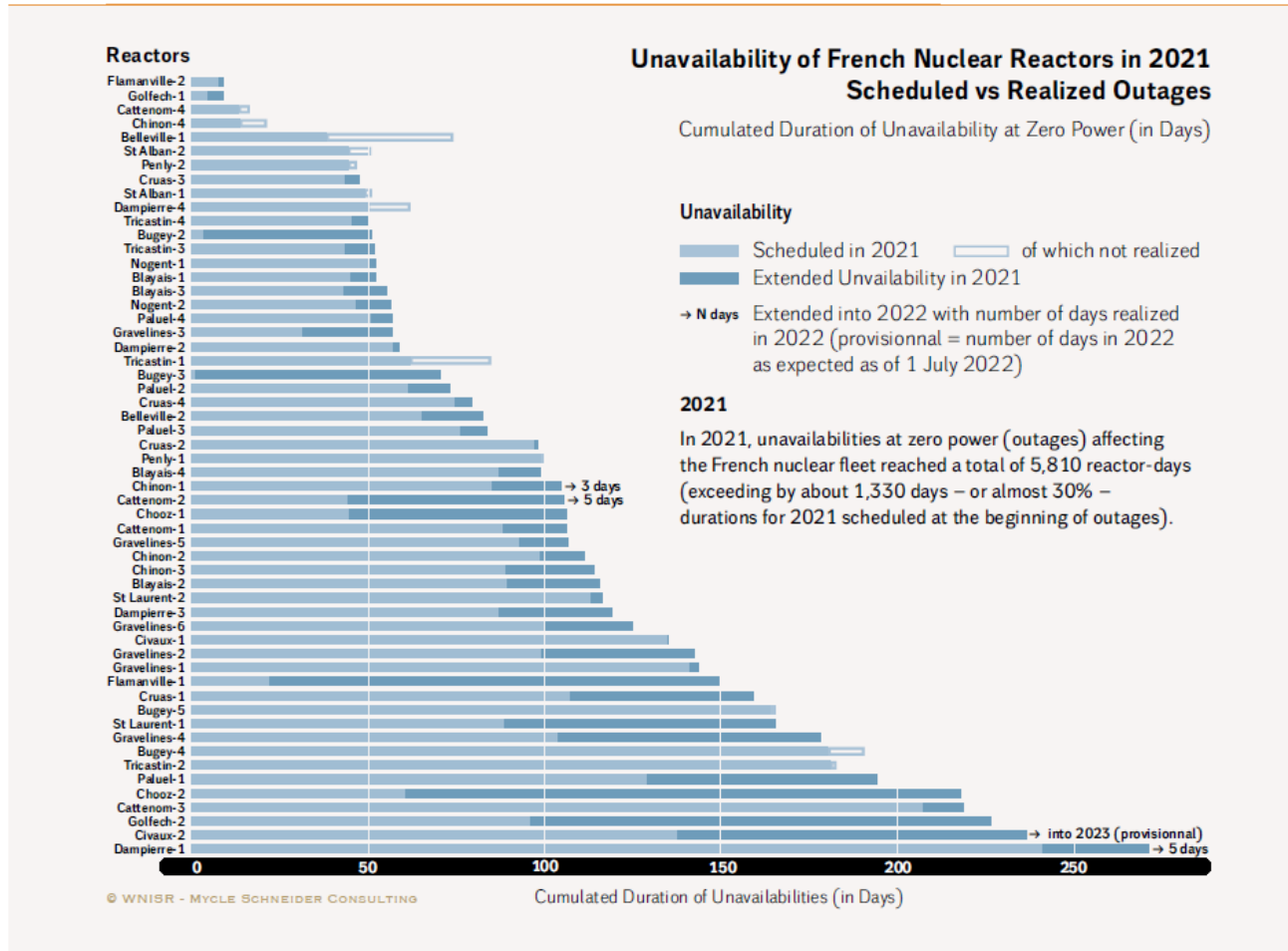
Der französische Nuklearkern I

- 56 AKW an 18 Standorten „in Betrieb“
- Eine Anlage in Bau, 14 endgültig abgeschaltet
- 61,37 GW(e) installierte Netto-Leistung

Der französische Nuklearpark II

- Drei „Generationen“:
 - N4, ~1500 MW(e) Netto-Leistung
 - Seit Ende der 1990er Jahre in Betrieb
 - 4 Blöcke (Civeaux, Chooz)
 - P4, P'4, ~1300 MW(e) Netto-Leistung
 - Seit Ende der 1980er bis Mitte 1990er in Betrieb
 - 20 Blöcke (Belleville, Cattenom, Flamanville, Golfech, Nogent, Paluel, Penly, St. Alban)
 - CPx, ~900 MW(e) Netto-Leistung
 - Seit 1977 bis Ende der 1980er in Betrieb
 - 22 Blöcke (Blayais, Bugey, Chinon, Cruas, Dampierre, Gravelines, St. Laurent, Tricastin)

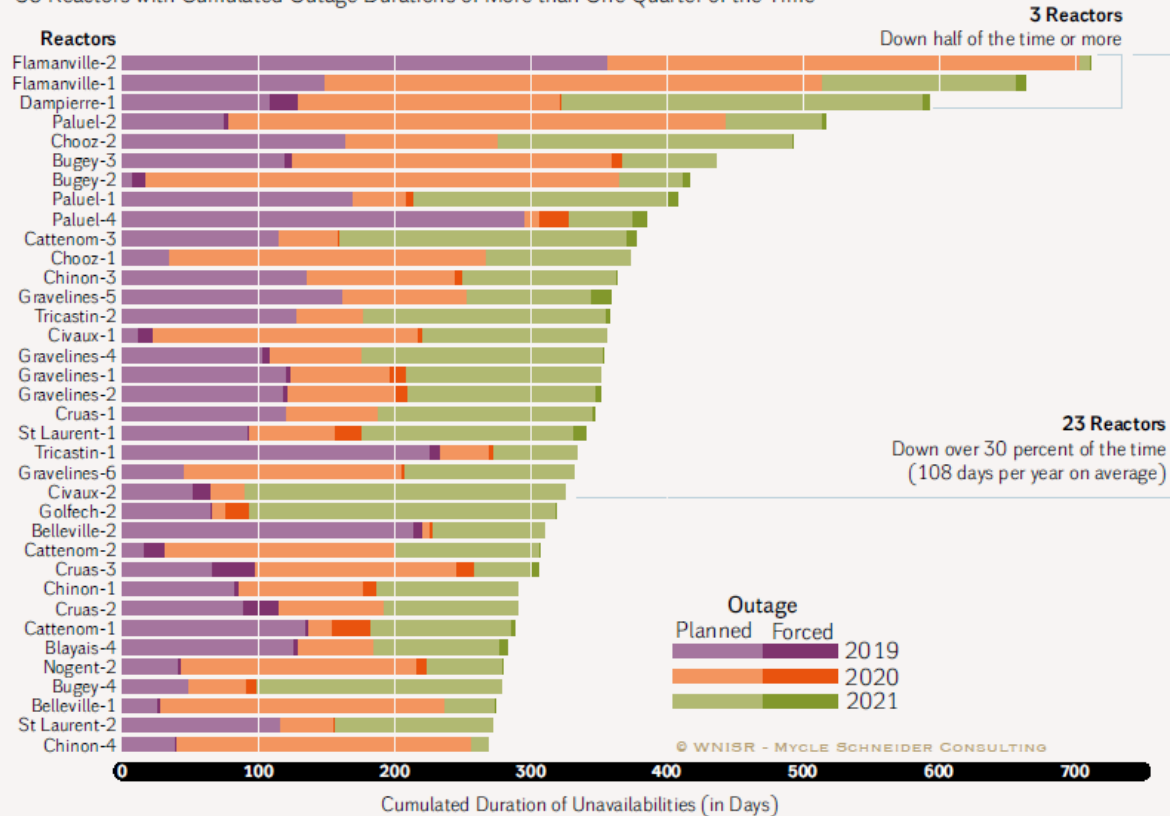
Geplante und realisierte Unverfügbarkeiten französischer AKW in 2021



Unverfügbarkeiten französischer AKW 2019-2021

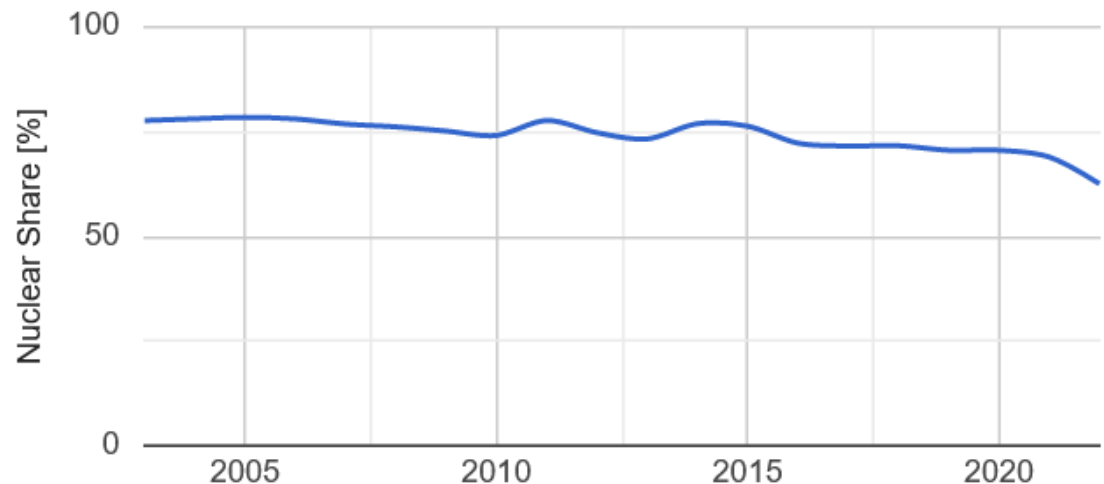
Unavailability of French Nuclear Reactors in 2019–2021

36 Reactors with Cumulated Outage Durations of More than One Quarter of the Time

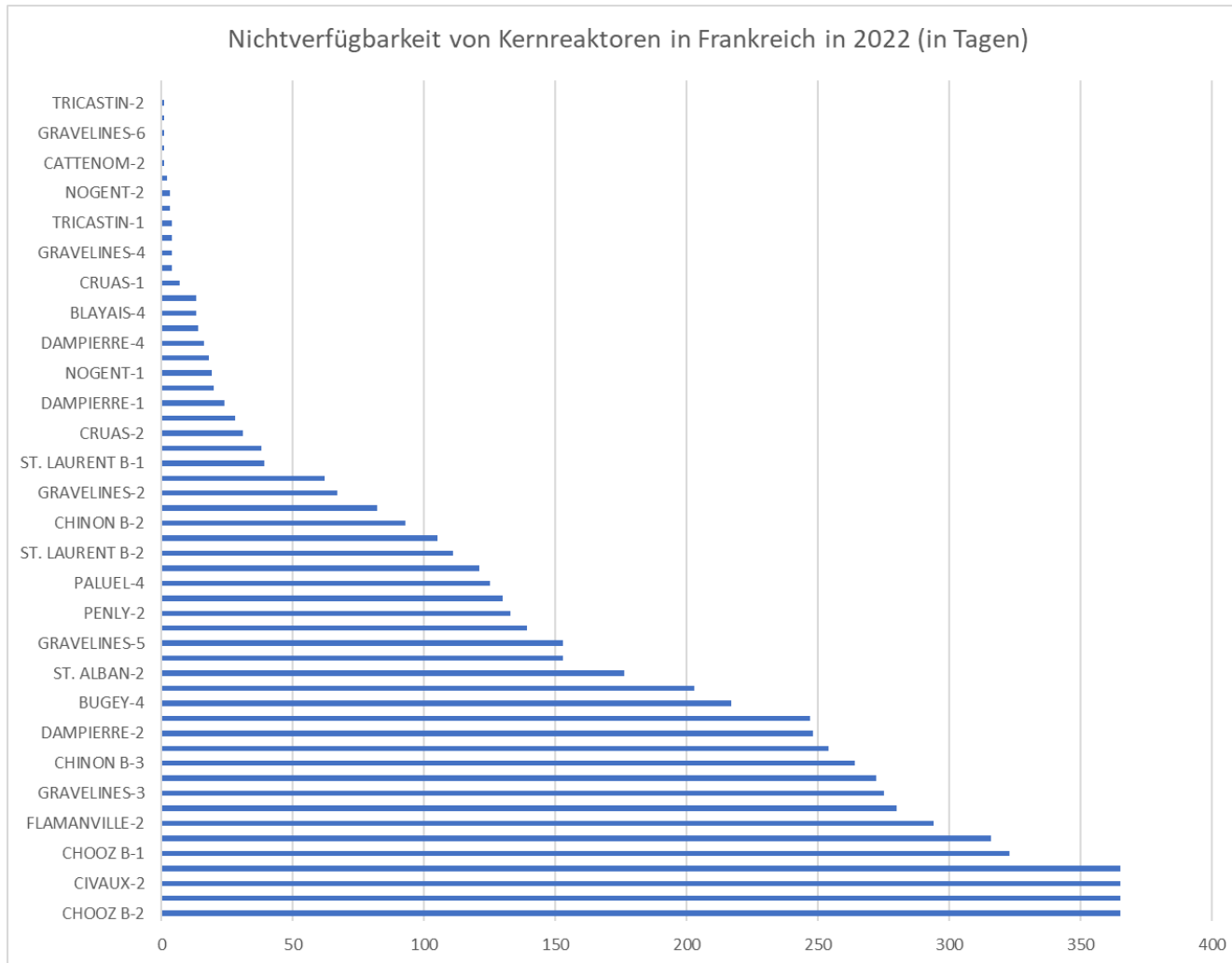


Der französische Nuklearpark III

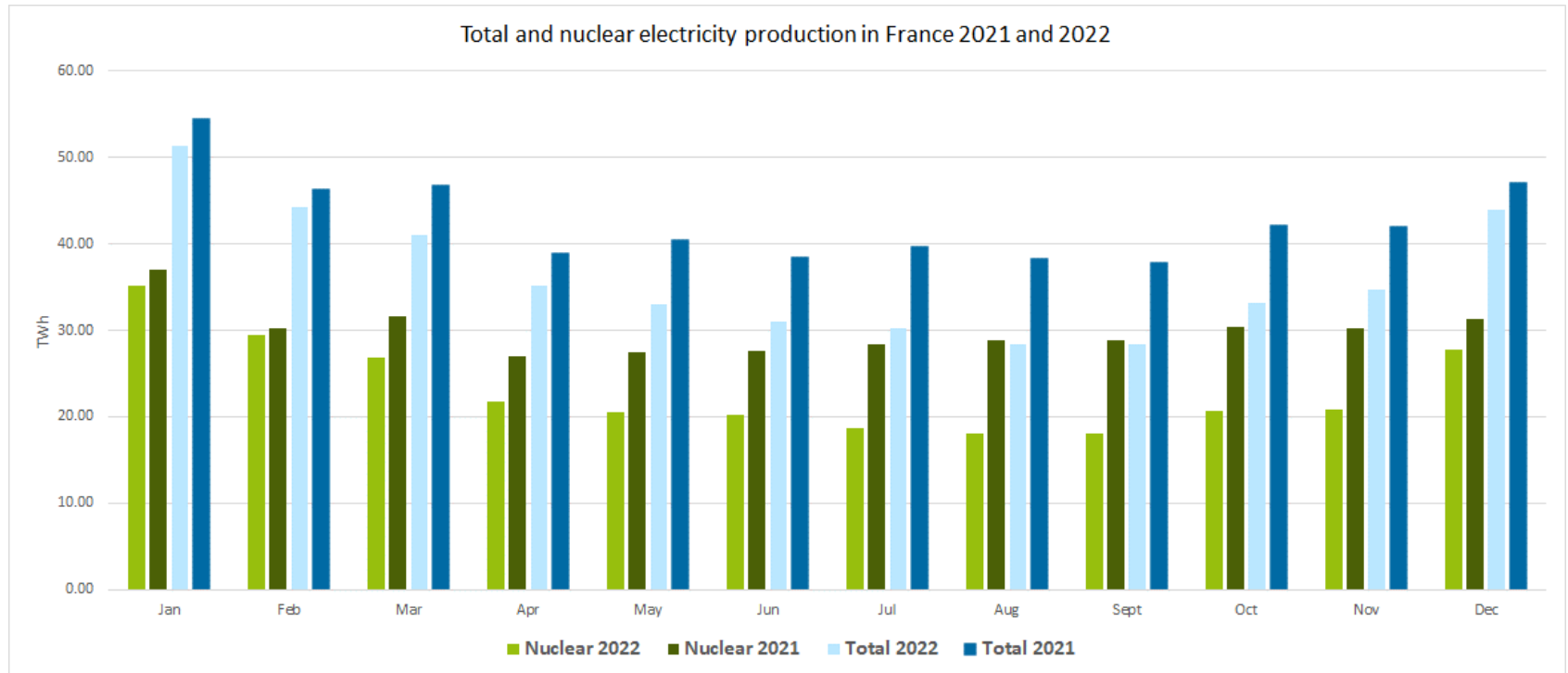
- 56 AKW an 18 Standorten „in Betrieb“
- Eine Anlage in Bau, 14 endgültig abgeschaltet
- 61,37 GW(e) installierte Netto-Leistung
- Anteil an der Stromproduktion
 - 2005: 78,5%
 - 2020: 70,6%
 - 2021: 69,0%
 - 2022: 62,6%



Unverfügbarkeit französischer AKW in 2022



Monatliche Stromerzeugung in Frankreich 2021/2022



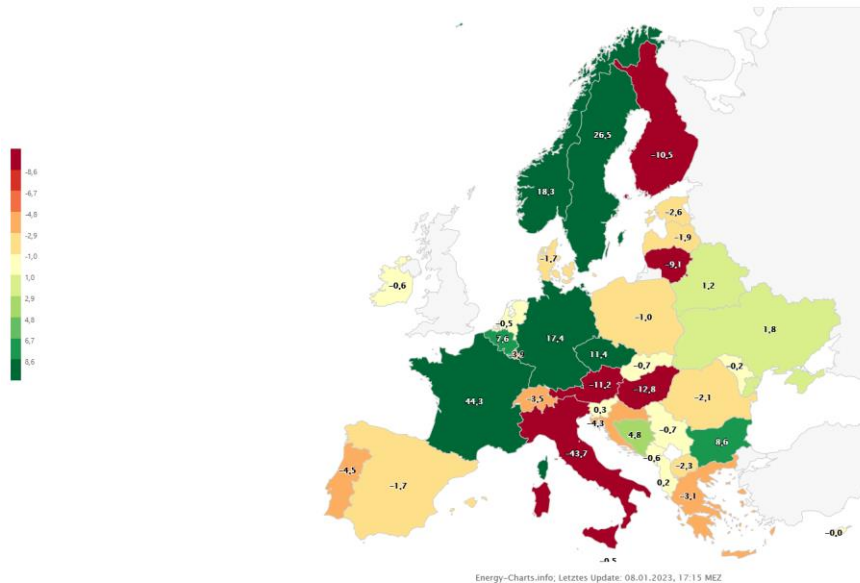
Französische Stromproduktion 2022

- In 2022: 279 TWh Strom produziert
- August 2022: 32,8 GW von 61,3 GW installierter Leistung unverfügbar
- Ursachen:
 - Korrosion: alle Anlagen pot. betroffen, im Oktober 2022 15 Anlagen im Stillstand
 - Zeitweise 20 Reaktoren in Wartung (davon 7 in 10 Jahres-Revision)
 - Leistungsreduktion aufgrund hoher Flusstemperaturen/geringer Wasserstände
- EDF Kostenschätzung des Produktionsverlusts vom 18.05.2022: 18,5 Mrd. Euro

Stromhandel in Europa in 2022/21

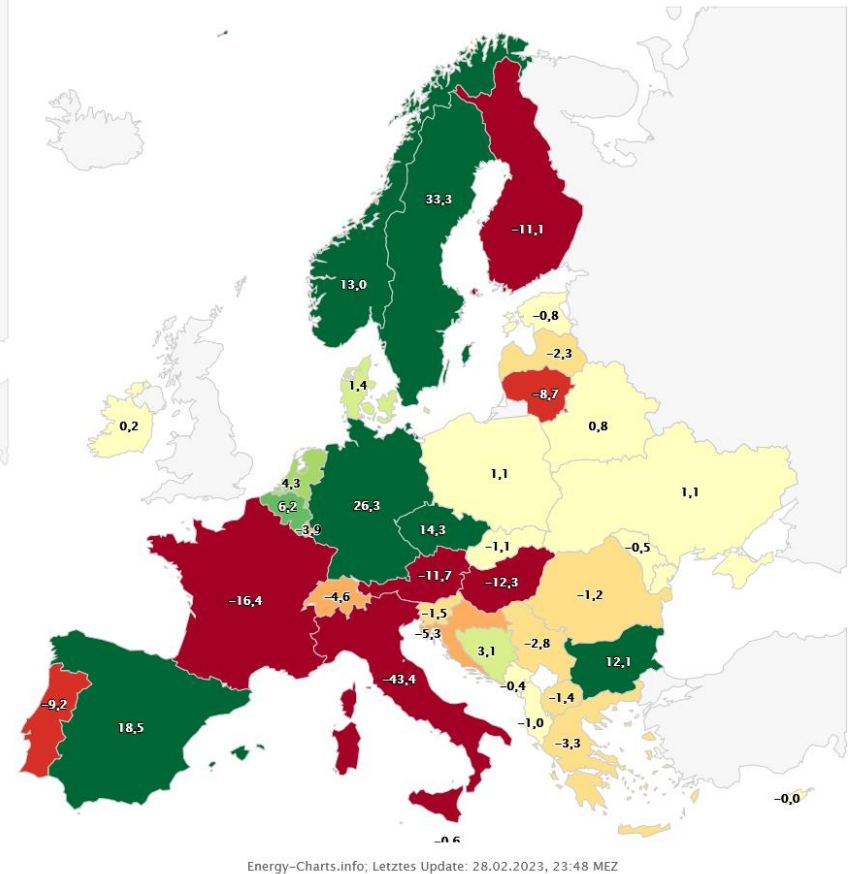
Gesamter geplanter Stromhandel im Jahr 2021

In TWh, positive Werte (grün) bedeuten Exporte, negative Werte (rot) bedeuten Importe



Gesamter geplanter Stromhandel im Jahr 2022

In TWh, positive Werte (grün) bedeuten Exporte, negative Werte (rot) bedeuten Importe



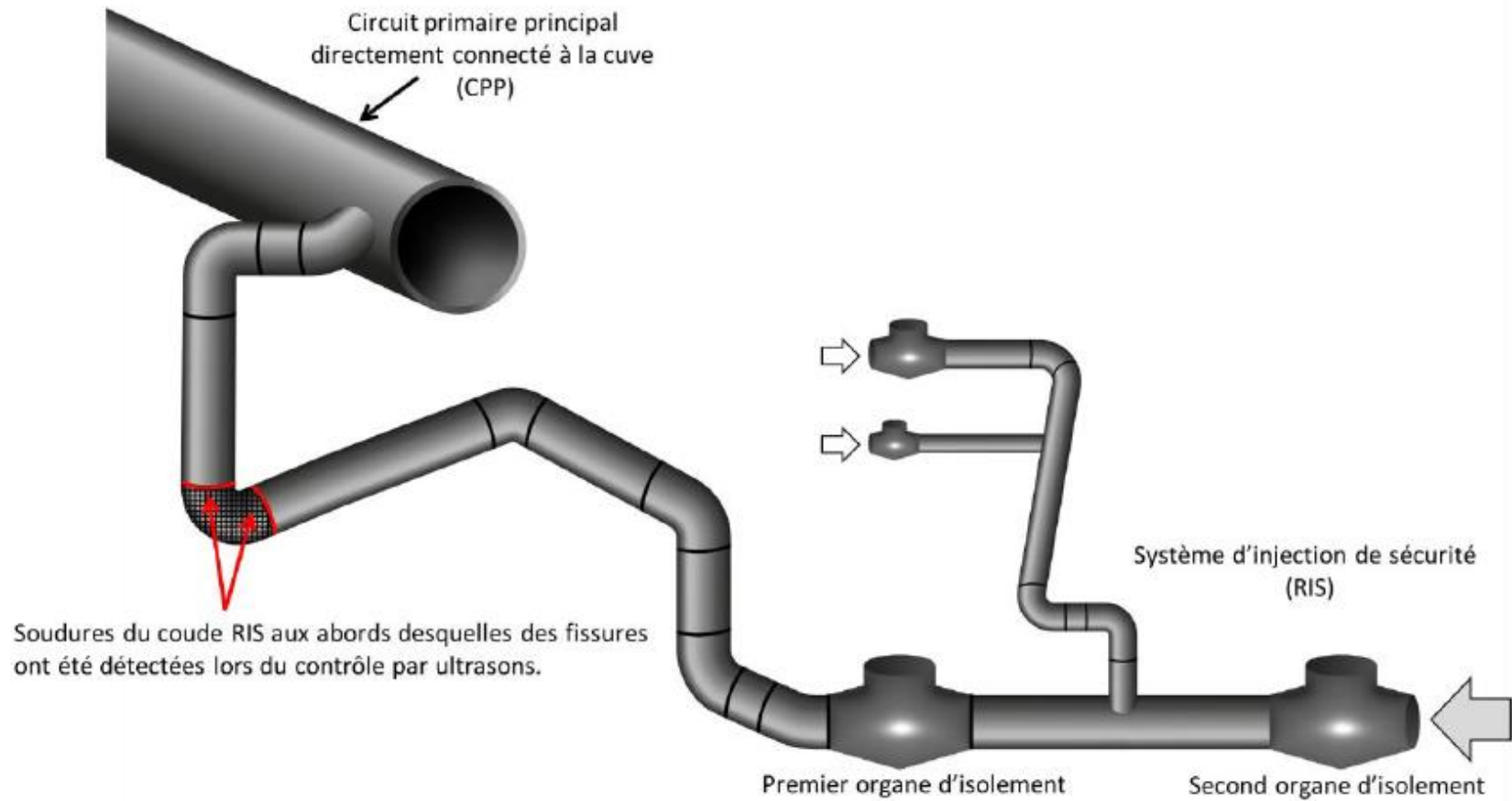
2

Risse in Rohren

Was über die Risse bekannt ist

- Erstmalig bei routinemäßiger Prüfung (Ultraschallprüfungen) in Civeaux-1 in 2021 entdeckt
- Risse zunächst in den Einspeiseleitungen des Sicherheits-Einspeisesystems entdeckt
 - Für Störfälle erforderlich, dient zur Notkühlung
- Später auch Risse in den Nachkühlleitungen gefunden
 - Zur betrieblichen Kühlung im Stillstand, aber auch bei Störfällen
- Tiefen von 0,75-5,6 mm bei Wandstärken von 30 mm
- Die routinemäßige Prüfung war nicht dafür gedacht, diese Risse zu finden!
- Diese Art der Risse war an diesen Rohrleitungen nicht erwartet worden!

Positionen der Risse



Sicherheitstechnische Bedeutung

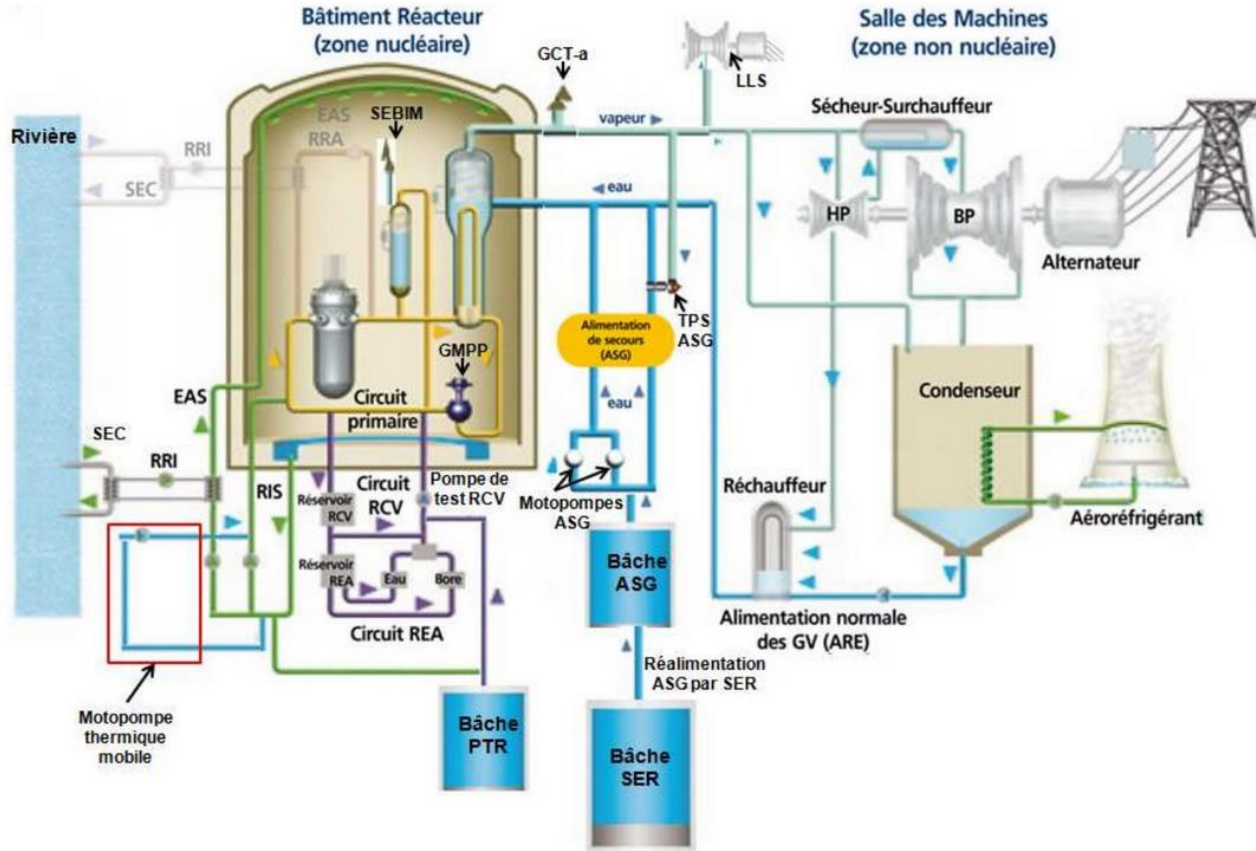


Figure 5.1-1 : schéma de principe d'installation générale d'un réacteur électronucléaire (applicable à Civaux)

Unmittelbare Bedeutung der Risse

- Bei Überschreiten einer kritischen Rissgröße kann die Leitung versagen bzw. kann es zu einem Leck kommen – auch bei mechanischen Einwirkungen wie einem Erdbeben oder im Anforderungsfall des Systems
- Damit entstünde ein Kühlmittelverluststörfall am primären Kühlkreislauf (ggf. zusätzlich zu einem auslösenden Ereignis)
- Dieser wäre aufgrund der Position der Risse nicht absperrbar
- Zur Beherrschung des Ereignisses wäre das System selbst (Sicherheits-Einspeisesystem) erforderlich
- Bei gleichzeitiger mechanischer Einwirkungen auf mehrere Leitungen (z.B. bei Erdbeben) könnten sogar mehrere Leitungen versagen (wenn mehrere Risse vorhanden sind)
- Nicht beherrschte Ereignisse bis hin zu Kernschmelze sind denkbar

3

Ursachenklärung – gestern, heute,
morgen?

Betroffene Anlagen I

- Ende 2021:
 - Entdeckt in Civeaux-1, auch Civeaux-2, Chooz 1 und 2 untersucht, Penly 1 ebenfalls betroffen
 - Einstufung als INES-0 (Ereignis ohne oder mit geringer sicherheitstechnischer Bedeutung)
 - Betroffen: Einspeiseleitung des Sicherheitseinspeisesystems
 - Zunächst Einstufung als INES-0 (keine oder sehr geringe sicherheitstechnische Bedeutung)
- 08.02.2022:
 - Sechs weitere Blöcke zu untersuchen: Bugey 3 sowie Flamanville 1 und 2, außerplanmäßig auch Chinon 3, Cattenom 3 und Bugey 4
 - « une propagation lente du phénomène et une profondeur limitée des fissures qui varient de 0,75mm à 5,6mm au maximum »

Betroffene Anlagen II

- 29.04.2022:
 - Auch Nachkühlsysteme betroffen (N4-Anlagen und Penly-1)
 - Alle französischen Blöcke sollen bis 2024 untersucht werden
- 19.05.2022:
 - 12 Blöcke vom Netz, keine zusätzlichen, ungeplanten Stillstände erwartet
- 03.08.2022:
 - N4 und P'4 werden priorisiert, bis 2025 alle Anlagen untersuchen
 - Betroffen sind vor allem:
 - Leitungen des Sicherheitseinspeisesystems, die sich im kalten Strang befinden (bei N4, P'4)
 - Saugleitungen des Nachkühlsystems (N4)

Betroffene Anlagen III

- 18.10.2022:
 - 15 Blöcke im Stillstand, davon 10 in Reparatur
- 04.11.2022:
 - Arbeiten an sechs Blöcken abgeschlossen: Tricastin-3, Cattenom-4, Bugey-4, Chinon-B3, Civaux-1 und Flamanville-2
 - Weiter in Reparatur: Penly-1, Civaux-2, Chooz-1 und 2
 - Identifizierter Reparaturbedarf: Cattenom-1 und 3 und Penly-3
 - Offen: Golfech-1 und Flamanville-1

Betroffene Anlagen IV

- 28.12.2022:
 - Abgeschlossene Reparaturen in Civaux-1 und Civaux-2
 - Weitere Arbeiten in Chooz-1 und Chooz-2
 - Für P'4 sollen Untersuchungen bis 2023 abgeschlossen werden: Belleville 1+2, Cattenom 1-4, Golfech 1+2, Nogent 1+2 und Penly 1+2
 - Reparaturen in Cattenom-1 und -3 laufen

Betroffene Anlagen V

- 09.03.2023:
 - Neuer Riss in Penly-1 entdeckt: diesmal im heißen Strang des Sicherheitseinspeisesystems
 - 155 mm Länge (ein Viertel des Leitungsumfangs)
 - Max. Tiefe 23 mm (bei Wandstärke von 27 mm):
 - Nachweis der Festigkeit der Rohrleitung nicht mehr möglich
 - Aber Beherrschung des Ereignisses bei Bruch der Leitung noch gegeben
 - Einstufung als INES-2 Ereignis („Störfall“), bisherige Risse zwischenzeitlich als INES-1 („Störung“)

Betroffene Anlagen VI

- 17.03.2023:
 - Überarbeitung der Prüfstrategie durch EDF aufgrund neuer Befunde
 - Schweißnaht in Penly-1 war bei Errichtung zweimal repariert worden
 - 320 Schweißnähte des Sicherheits-Einspeisesystems sowie des Nachkühlsystems waren von Reparaturen während des Reaktorbaus betroffen
 - 90% dieser Schweißnähte sollen noch 2023 geprüft werden, alle bis Ende erstes Quartal 2024

Bisher bekanntermaßen betroffene Anlagen (ohne Gewähr)

- Alle vier Blöcke vom Typ N4 (1560 MW):
 - Chiveau-1, -2; Chooz B-1, B-2
- Anlagen vom Typ P4 (1300 MW):
 - Cattenom-1 und -3, Penly-1 und -3
- 900 MW-Anlagen:
 - Chinon-3, Flamanville-2: gefundene Schweißfehler (nicht einschlägig)
- Keine Hinweise:
 - Bugey 4, Cattenom-4, Tricastin-3
- Weitere?

Schadensanalyse

- Umlaufende Rissanzeige (d.h. entlang des Umfangs der Leitung)
- Im Grundmaterial, neben Schweißnähten
- Durch (bisherige) Ultraschallprüfungen nur schwer zu erkennen
- Bei Befunden kann genaue Art nur „zerstörend“ geprüft werden:
 - Heraustrennen von Rohrleitungsteilen und Untersuchungen in Laboren erforderlich → Abfahren der Anlage und längerfristiger Stillstand sind die Folge
- Ergebnis (vor allem):
 - Interkristalline Spannungsrisskorrosion



Schadenmechanismus I

- Interkristalline Spannungsrissskorrosion
 - Grundsätzlich bekanntes Korrosionsphänomen
 - Aber: Rissbildung hat Voraussetzungen
 - Wurde an der vorgefundenen Stelle nicht erwartet
 - War deshalb (dort) auch nicht unterstellt worden
 - War deshalb (dort) in der Vergangenheit auch nicht gesucht worden
 - Konnte (zunächst?) nicht erklärt werden
- Nachbewertungen früherer Ultraschallprüfungen zeigen bereits Risse
 - wird ein Phänomen nicht erwartet, wird es (wahrscheinlich) auch nicht gefunden (vgl. bspw. erhöhte Korrosion M5, Wasserstofflockenrisse in RDBs ...)

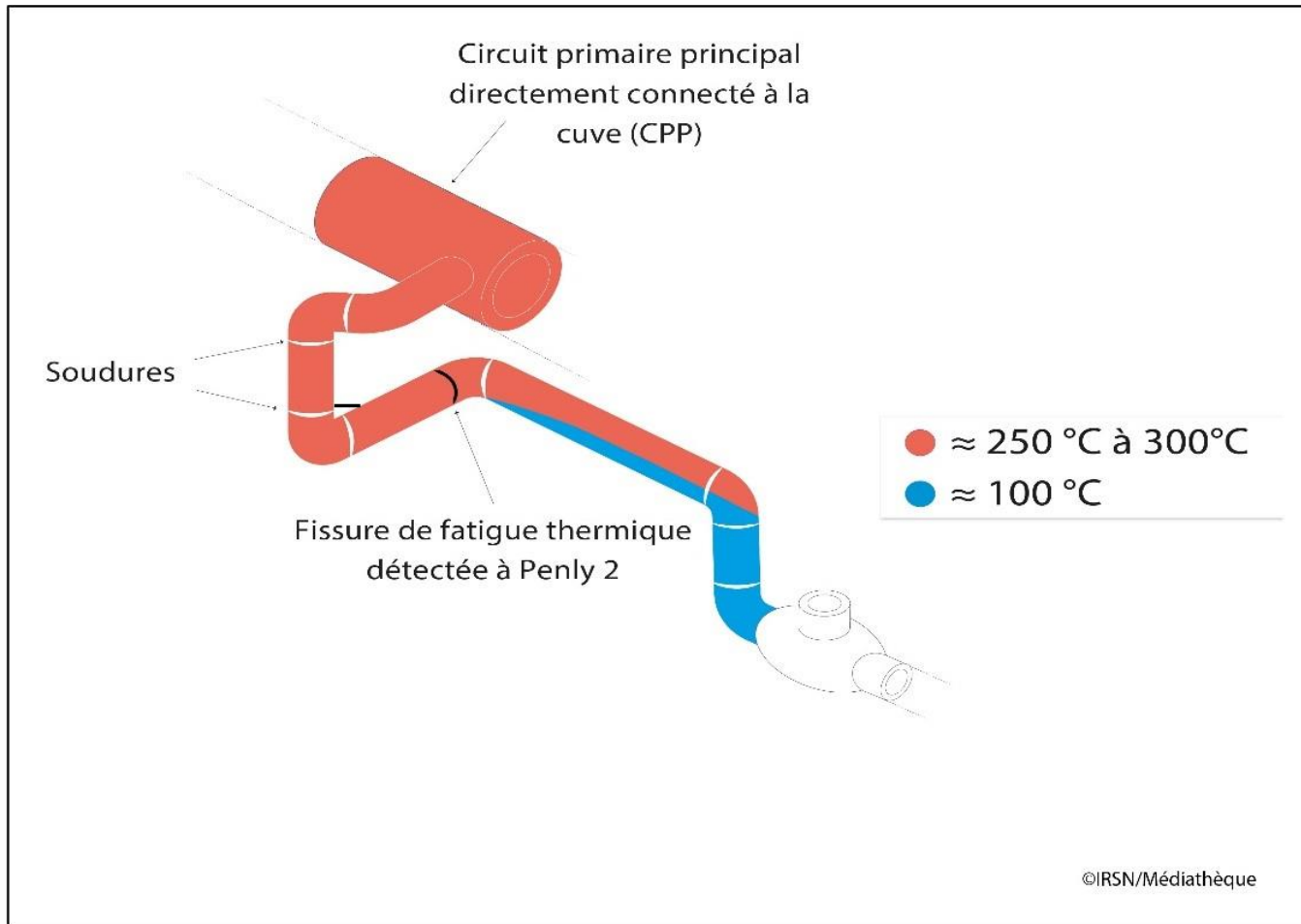
Schadenmechanismus II

- Voraussetzungen für Interkristalline Spannungsrisskorrosion (IkSpRK)
 - Hohe mechanische Spannungen
 - Aggressive Umgebungsbedingungen (Chemie, Mindesttemperatur ...)
 - Empfindlicher Werkstoff
- Für betroffene Rohrleitungen (normalerweise):
 - Konstruktion mit Ziel der Vermeidung von hohen mechanischen Spannungen
 - Normale chemische Bedingungen im Primärkreis: praktisch sauerstofffreies Heißwasser
 - Nichtstabilisierter Chrom-Nickel-Stahl: wenig empfindlich für IkSpRK

Schadenmechanismus III

- Ursachen:
 - Ungünstige Geometrie der Rohrleitungen
 - Eigenspannungen durch Schweißnähte
 - Thermomechanische Belastungen (thermische Schichtung)

Ursachen: thermische Schichtungen



Schadenmechanismus IV

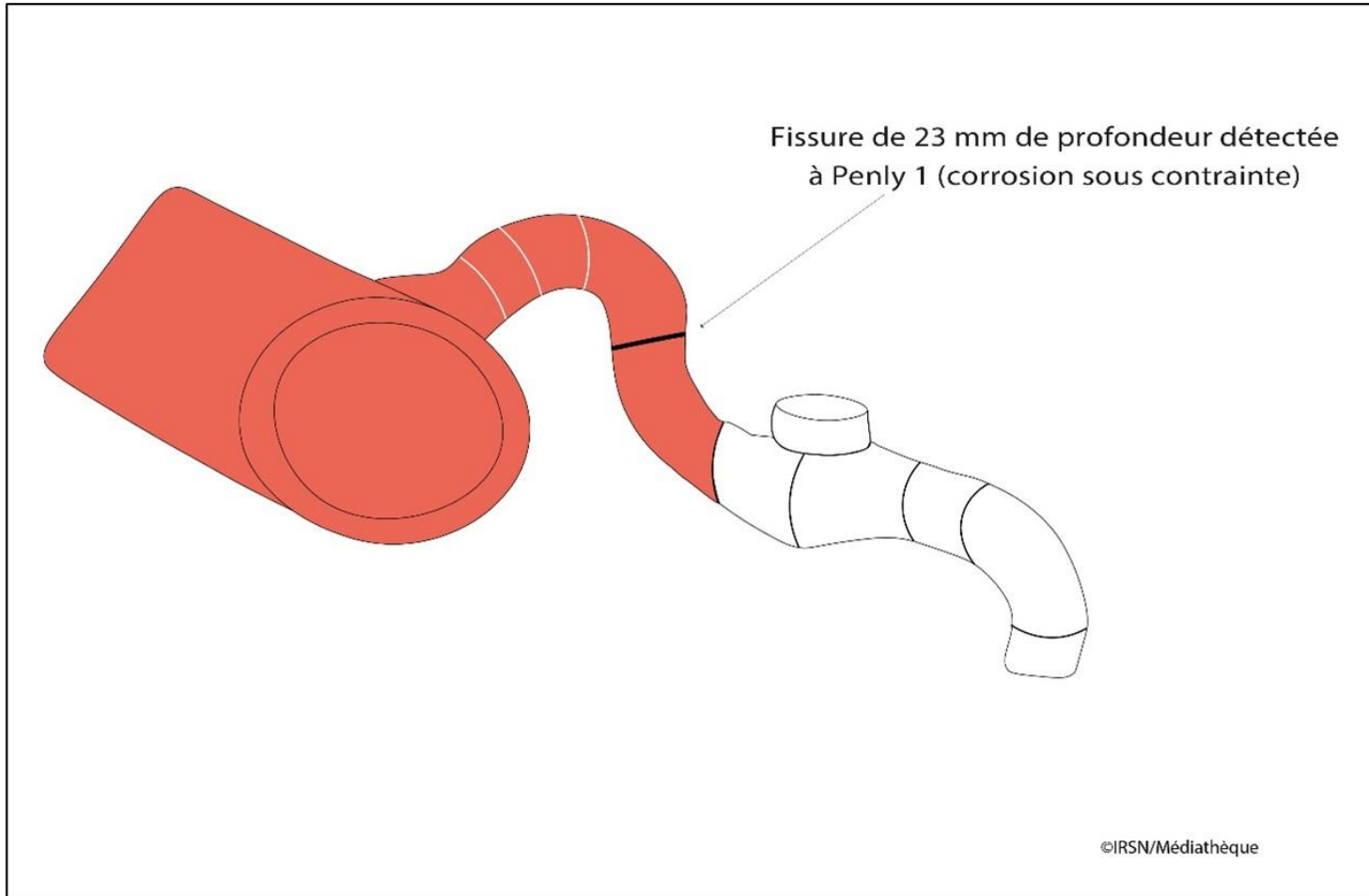
- Ursachen:
 - Ungünstige Geometrie der Rohrleitungen
 - Eigenspannungen durch Schweißnähte
 - Thermomechanische Belastungen (thermische Schichtung)
 - Bereits aus Inbetriebnahme bekanntes Phänomen
 - Bisher nicht überwacht und nicht berücksichtigt?
- Besonders anfällig:
 - Leitungen des Sicherheitseinspeisesystems am kalten Strang des primären Kühlkreislaufs (bei 4 N4-Blöcken und 12 P'4-Blöcken)
 - Saugleitungen des Nachkühlsystems (bei 4 N4-Blöcken)

Schadenmechanismus V

- Aber:
 - Gering empfindlicher Werkstoff?
 - Chemische Voraussetzungen (Sauerstoff)?
 - Neue Befunde in Penly-1 an heißem Strang:
 - Diese Stelle weist keine thermischen Schichtungen auf:

« Cette fissure est située (cf. figure 2) dans une zone qui n'est pas susceptible de présenter une stratification thermique »
 - Weiterhin: zwei Anzeigen für Ermüdungsrisse
 - Penly-2: 57 mm lang, 12 mm tief
 - Cattenom-3: 165 mm lang, 4 mm tief
 - Ursache für Ermüdungsrisse: zyklische thermische Belastungen

Ursachen: thermische Schichtungen?



4

Und nun?

Maßnahmen der EDF

- EDF tauscht betroffene Rohrleitungsteile aus
- Die Betriebsweise der Reaktoren soll dahingehend optimiert werden, dass Transienten mit Belastung der betroffenen Rohrleitungen vermieden und Lecks frühzeitig erkannt werden
- EDF hat weitere rechnerische Nachweise zur Störfallbeherrschung bei gleichzeitigem Verlust von zwei Strängen des Sicherheitseinspeise- bzw. des Nachkühlsystems unter „realistischen“ Annahmen vorgelegt
- EDF entwickelt neues Ultraschallverfahren, um Risse mit geringer Größe entdecken und ihre Tiefe bestimmen zu können
- EDF schätzt die maximale Risswachstumsgeschwindigkeit mit 0,5 mm pro Jahr ab
- Detaillierte Unterlagen der EDF sind öffentlich nicht verfügbar

Weitere Prüfungen

- EDF hat Prüfplan erstellt, um alle Anlagen zu prüfen
- Neues Ultraschallverfahren:
 - Erkennung und Bestimmung der Tiefe von Rissen
- Vorgesehener Zeitraum 2022-2025, in geplanten Revisionen
- Analysen zu thermischen Belastungen der Rohrleitungen werden durchgeführt

Bewertung der GP ESPN/ASN Sept. 2022

- EDF muss sicherstellen, dass Materialkennwerte, die für die Berechnung aus den Ermüdungsrissversuchen ausgewählt wurde, konservativ ist, wenn diese Risse ihren Ursprung in der Spannungsrisskorrosion (und nicht in einem Ermüdungsprozess) haben
- Der Einfluss der Wasserchemie (Sauerstoffgehalt) soll weiter quantifiziert und der Sauerstoffgehalt häufiger gemessen werden
- Deionat- und Borsäure tanks können höheren Sauerstoffgehalt aufweisen, bisherige Messung nicht unbedingt die Repräsentativste für den maximalen Sauerstoffgehalt im Primärkreislauf

Bewertung der GP ESPN Okt. 2022

- Die aufgetretene Anomalie kann gleichzeitig mehrere Stränge betreffen und geht damit über die im Sicherheitsnachweis bisher getroffenen Annahmen hinaus
- Zentrale Faktoren:
 - Temperatur
 - Temperaturschichtung (Geometrie der Leitungen, große Abstände bis zur ersten Absperrarmatur)
 - Vorverformung (Verarbeitung)
- Aber: große Diskrepanz im Auftreten bei ansonsten gleichen Rohrleitungsabschnitten, Vorhandensein von umlaufenden Defekten nicht ausreichend erklärt

Bewertung der GP ESPN Okt. 2022

- Nur interkristalliner, kein transkristalliner Rissverlauf: kein Ermüdungsanteil; Oxidschicht in den Rissen und Rissspitzen weist auf größeres Alter der Risse hin
- Aber:
 - Mangel an Erklärung für Rissausdehnung
 - Mangel an Beweisen für Begrenzung des Risswachstums
- Empfehlung zu konservativer Festlegung bzgl. Risswachstum und damit der Notwendigkeit periodischer Prüfungen
- Empfehlung zur Bestimmung einer zulässigen Rissgröße, ab der mit Ermüdungsrisswachstum zu rechnen wäre
- Empfehlung zur Qualifizierung des neuen Ultraschallverfahrens (inkl. realistischer Fehlererkennung)

Bewertung der GP ESPN Okt. 2022

- Maßnahme zum identischen Austausch betroffener Rohrleitungen kurzfristig sinnvoll, aber langfristige Strategie (gegen Wiederholung) erforderlich, bspw.:
 - Geometrie der Rohrleitungen, Anzahl der Schweißnähte, Oberflächenbeschaffenheit der Schweißnähte, thermische Belastung der Leitungen, Sauerstoffgehalt im Primärkühlmittel
- Lehren für den EPR und EPR 2 sind zu ziehen

Position der ASN Okt. 2022

- Die Möglichkeit eines ermüdungsbedingtes Risswachstum ist zu bestimmen und zu berücksichtigen
- Entdeckung von Leckagen verbessern
- Ultraschallverfahren für Spannungsrisskorrosion qualifizieren
- Zustand der reparierten Rohrleitungen (Schweißnähte) darstellen und hinsichtlich des geplanten zukünftigen Überwachungssystem während des Betriebs bewerten
- Verwendung von Materialkennwerten in rechnerischen Nachweisen genauer begründen
- Weitere Nachweise zu Rissinitiierung und Rissstabilität
- Langfristige Strategie gegen eine Wiederholung erforderlich

„Übertragbarkeit“

- Bekanntes Phänomen an bislang unbekannter/unerwarteter Position: was ist mit anderen Anlagen (weltweit)?
 - Prüfungen in anderen Ländern erforderlich
 - Bsp. Deutschland:
 - Andere Konstruktion der Rohrleitungen (weniger Bögen, kürzere Strecken)
 - Anderer Herstellungsprozess
 - Andere Prüfbarkeit (durchgeführte Prüfungen hätten derartige Risse gezeigt)
- (Bisher) keine Übertragbarkeit zu unterstellen

5

Fazit

Fazit – Versorgungssicherheit

- Ungeplante Ausfälle von Kernkraftwerken sind möglich
 - Frankreich 2021, 2022
 - Belgien 2021
 - Japan 2011
 - ...
- Bei hoher Abhängigkeit von Kernkraftwerken führt dies zu Problemen mit der Versorgungssicherheit
 - Kernenergie ist zwar steuerbar (anders als Wind und Sonne), aber eben auch nur begrenzt „planbar“
 - Gesellschaftliches Dilemma: Versorgungssicherheit vor Sicherheit?

Fazit – Sicherheit

- Auch nach 80 Jahren Kerntechnik treten neue Phänomene auf oder sind Phänomene noch nicht vollständig verstanden
 - Ursachenklärung kann sich über Monate oder Jahre hinziehen
 - Einschätzung der sicherheitstechnischen Bedeutung kann sich massiv verändern (INES-0 → INES-2)
 - Zufälle verhindern Unfälle (es wurde nicht gesucht, nur gefunden)
- Das „Restrisiko“ ist vorhanden und größer Null

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

Haben Sie noch Fragen?
Do you have any questions?

