

# 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

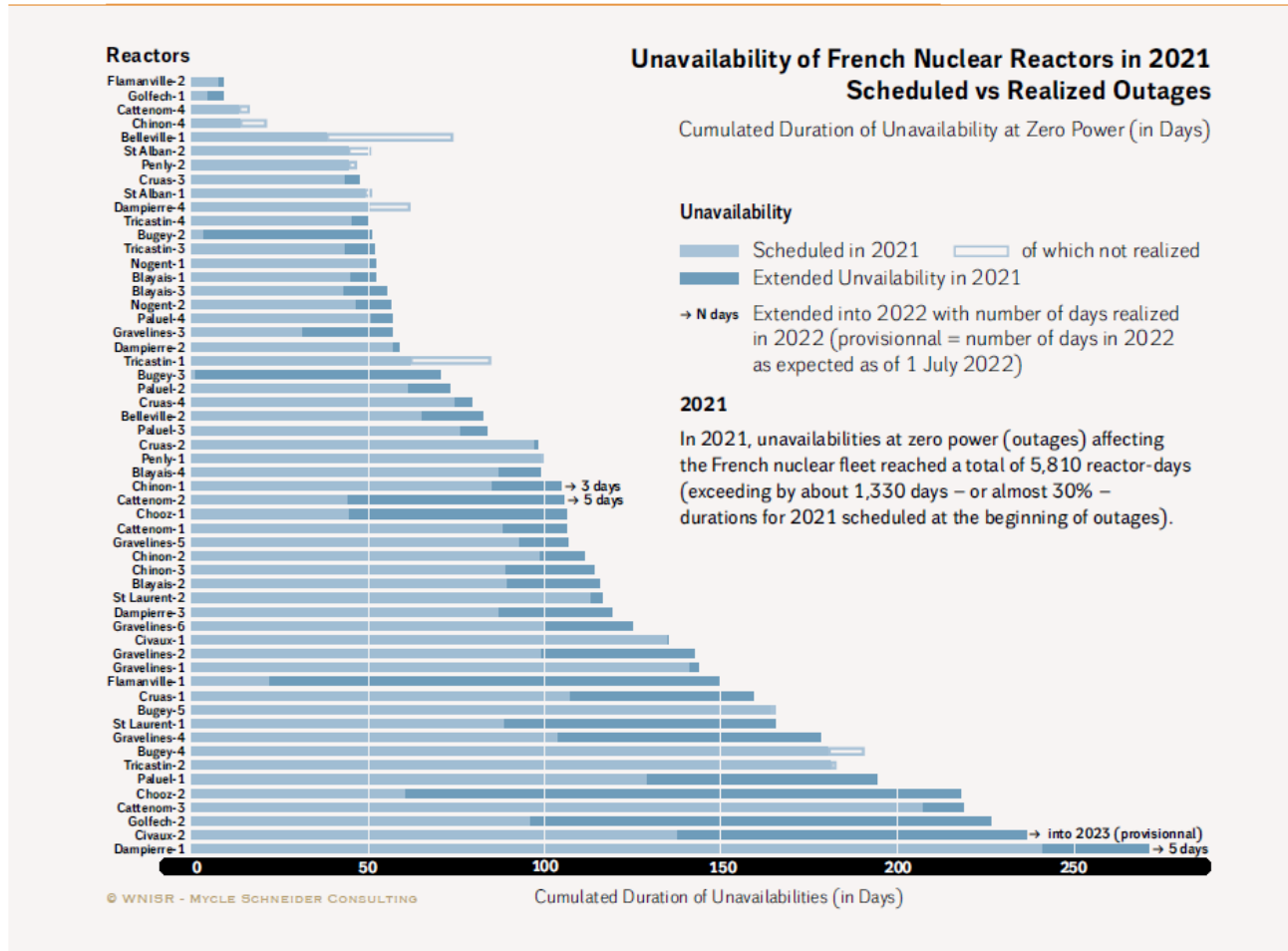
# Der französische Nuklearkern I

- 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)

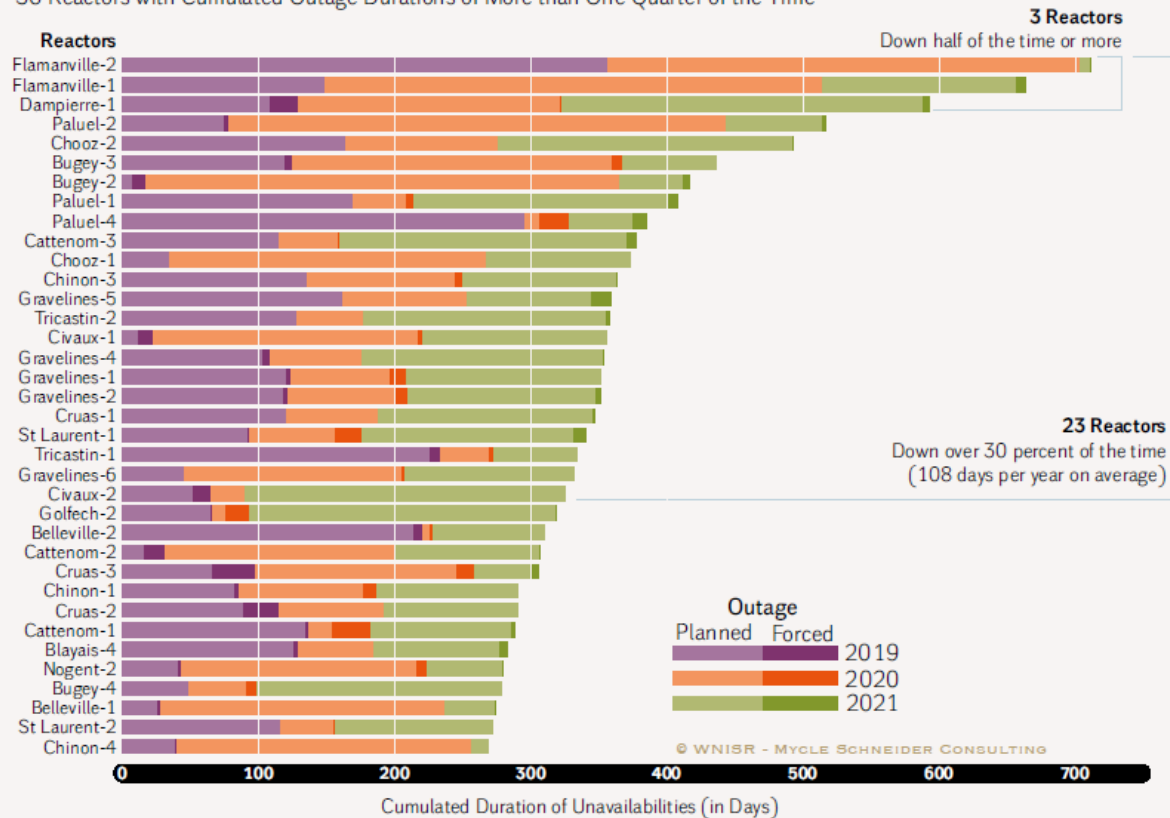
# Geplante und realisierte Unverfügbarkeiten französischer AKW in 2021



# Unverfügbarkeiten französischer AKW 2019-2021

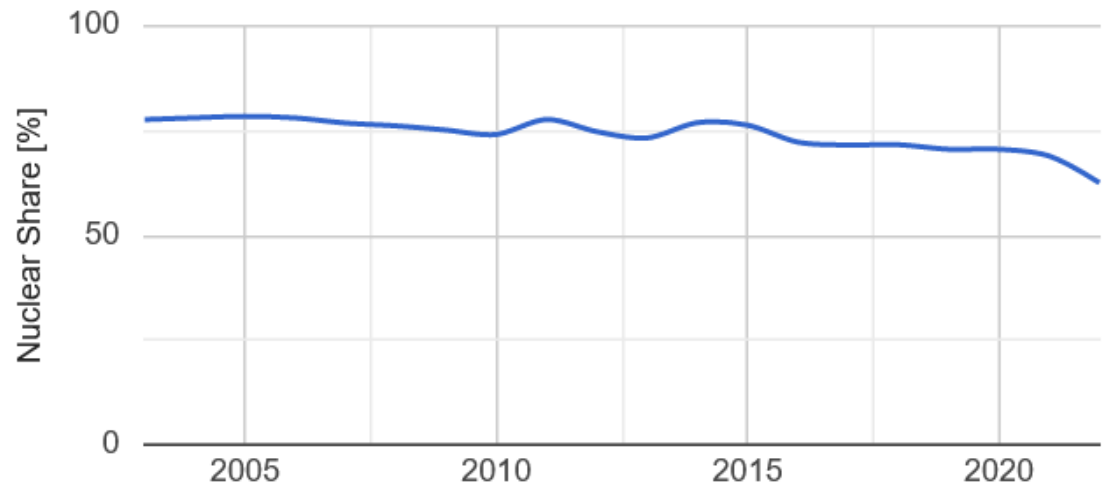
## Unavailability of French Nuclear Reactors in 2019–2021

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



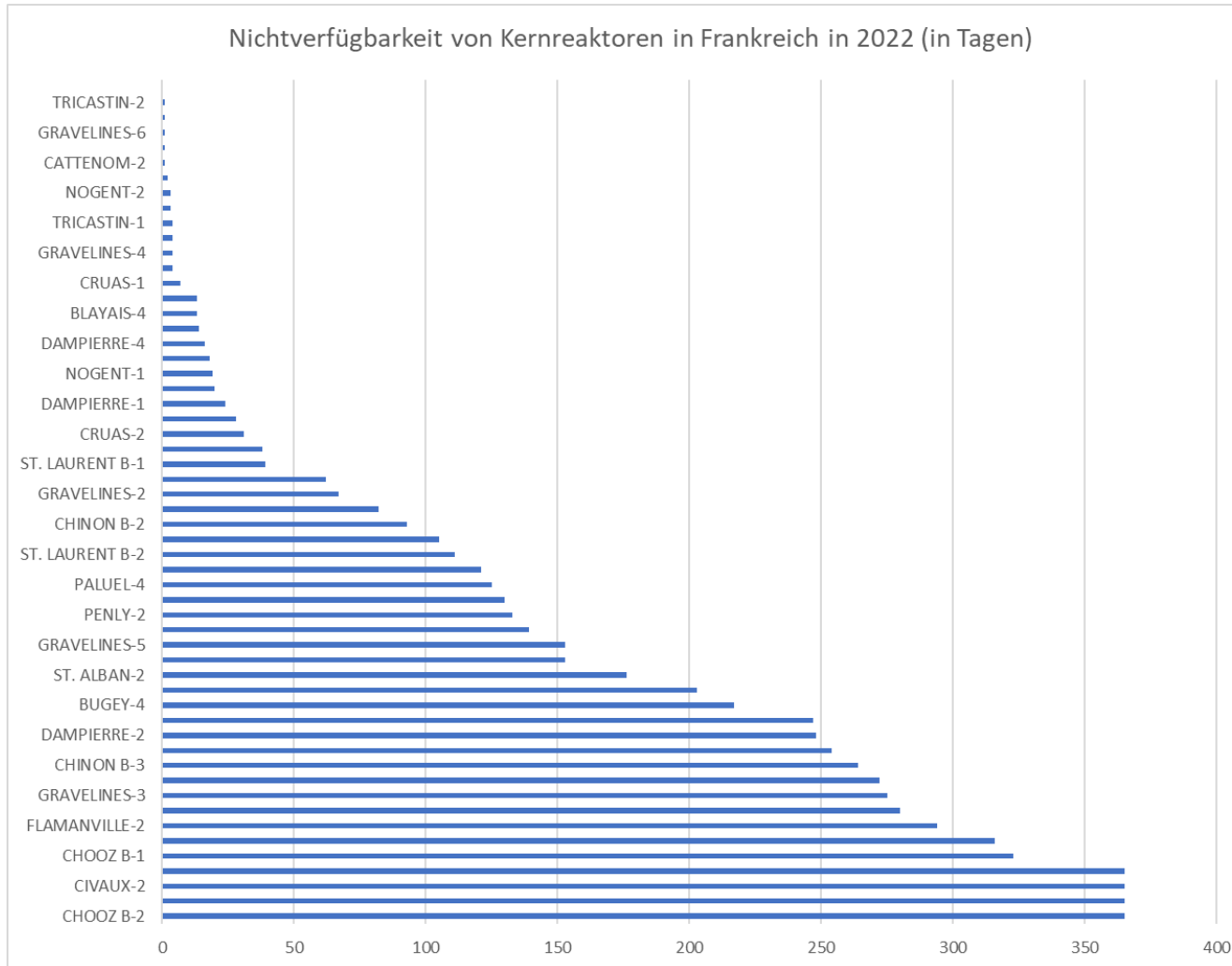
## Der französische Nuklearpark III

- 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%

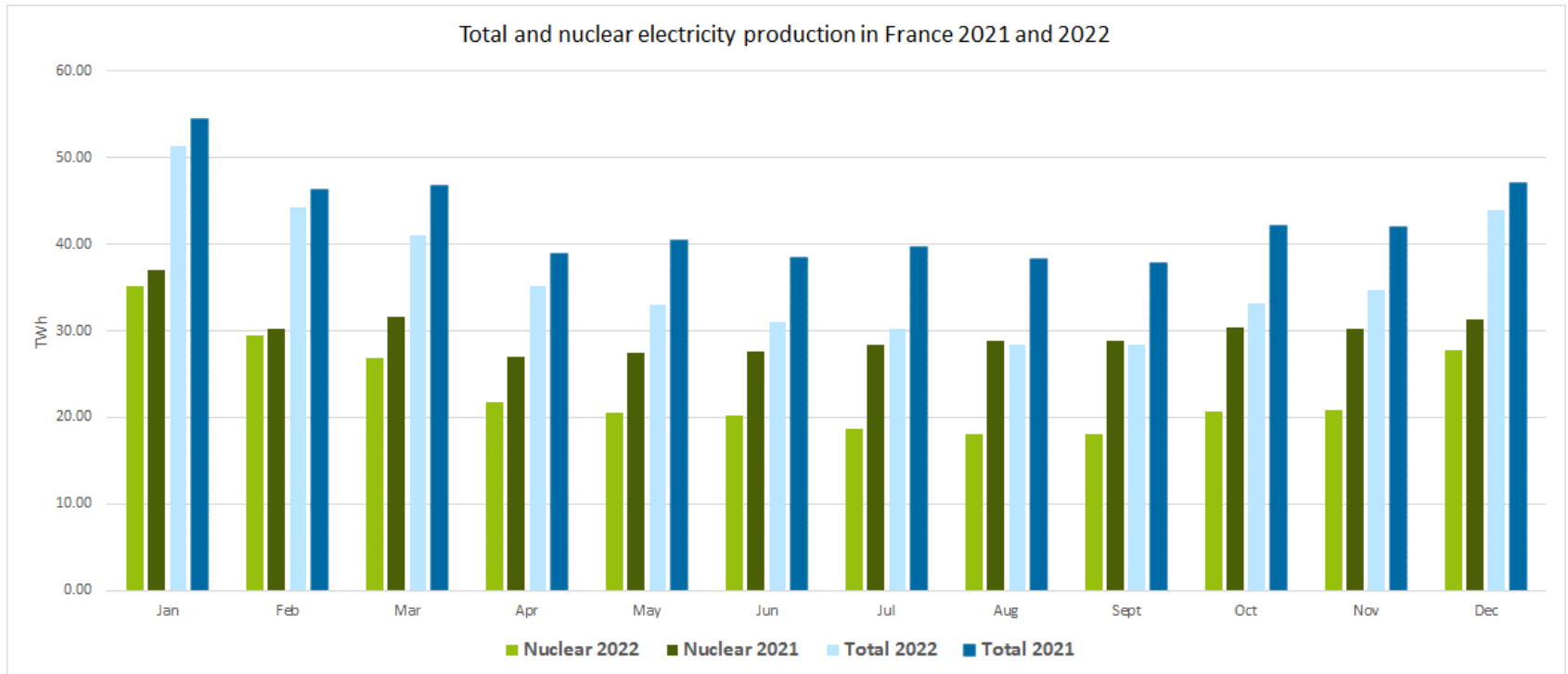




# Unverfügbarkeit französischer AKW in 2022



# Monatliche Stromerzeugung in Frankreich 2021/2022

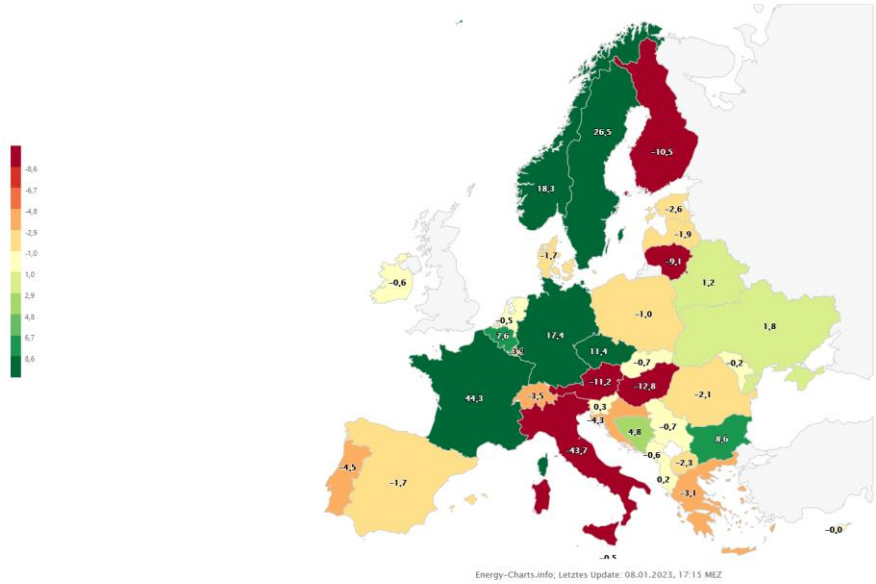


# Französische Stromproduktion 2022

- 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

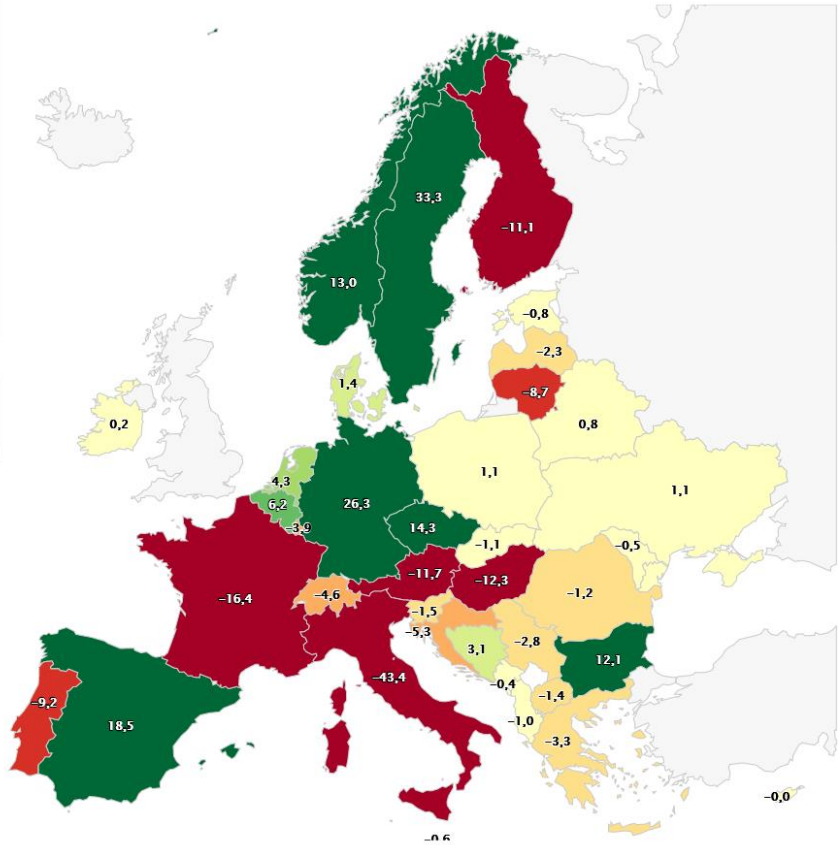
# Stromhandel in Europa in 2022/21

Gesamter geplanter Stromhandel im Jahr 2021  
 In TWh, positive Werte (grün) bedeuten Exporte, negative Werte (rot) bedeuten Importe



Energy-Charts.info, Letztes Update: 08.01.2023, 17:15 MEZ

Gesamter geplanter Stromhandel im Jahr 2022  
 In TWh, positive Werte (grün) bedeuten Exporte, negative Werte (rot) bedeuten Importe



Energy-Charts.info, Letztes Update: 28.02.2023, 23:48 MEZ

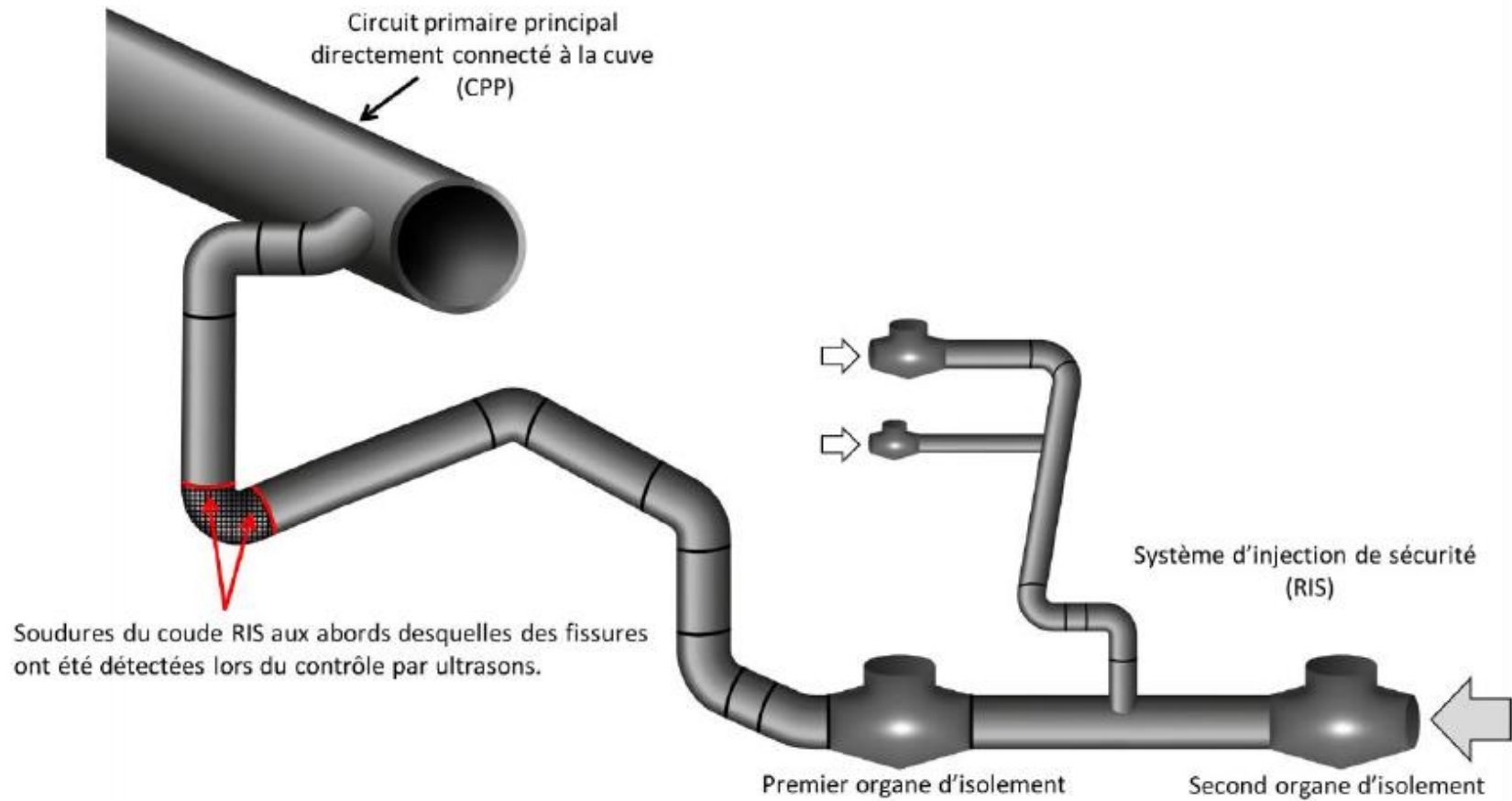
# 2

## 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

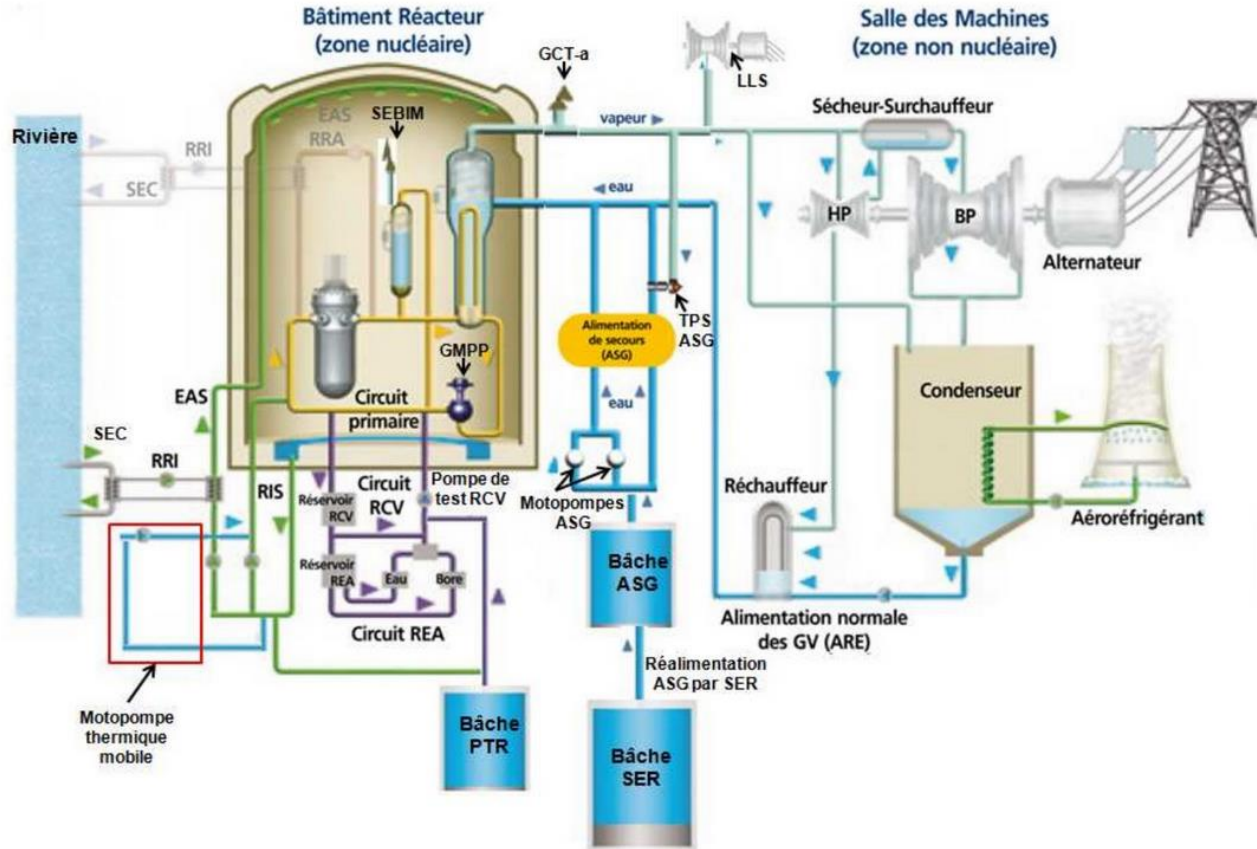


Figure 5.1-1 : schéma de principe d'installation générale d'un réacteur électronucléaire (applicable à Civaux)



## 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 ...)

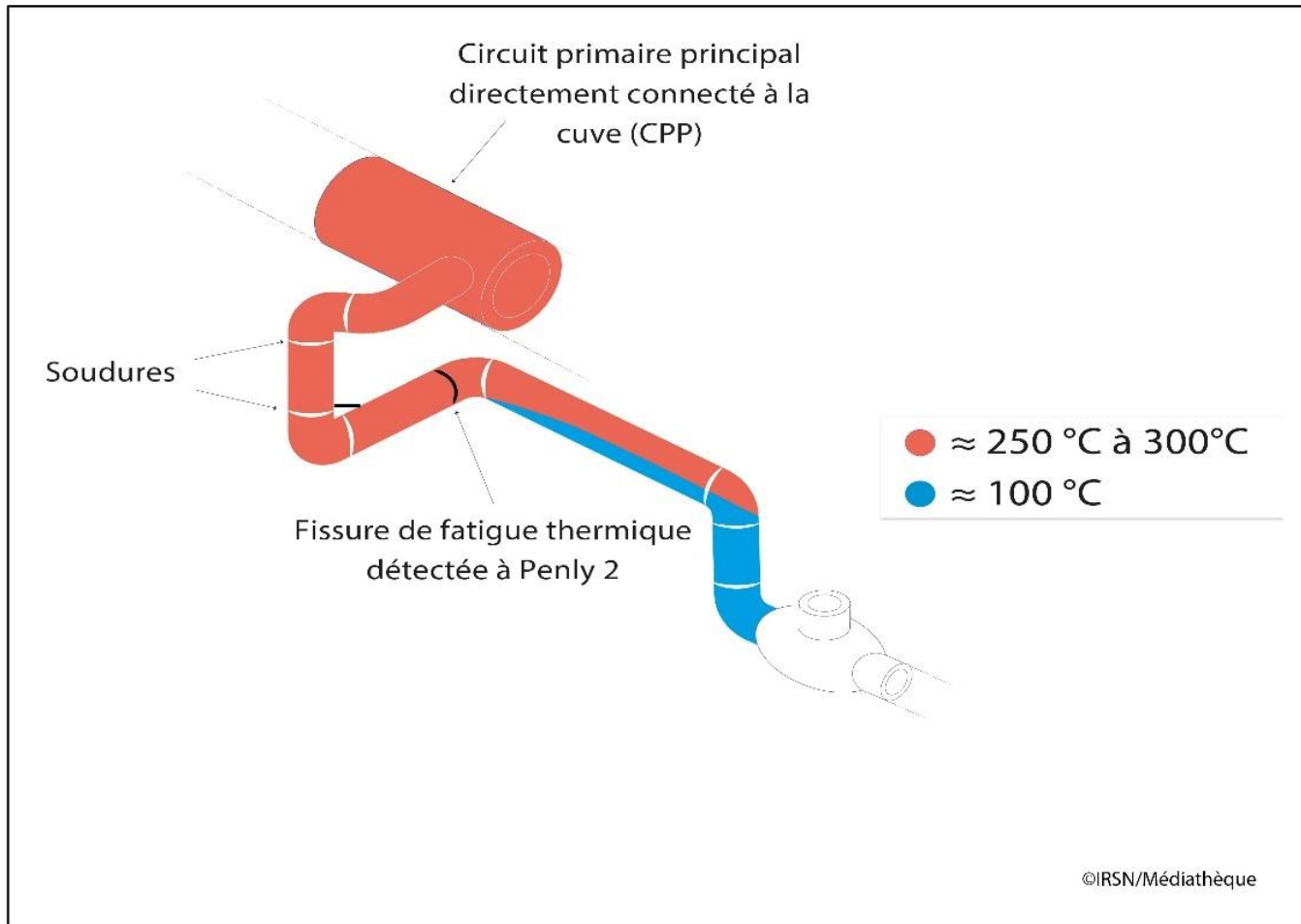
# Schadenmechanismus II

- 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)

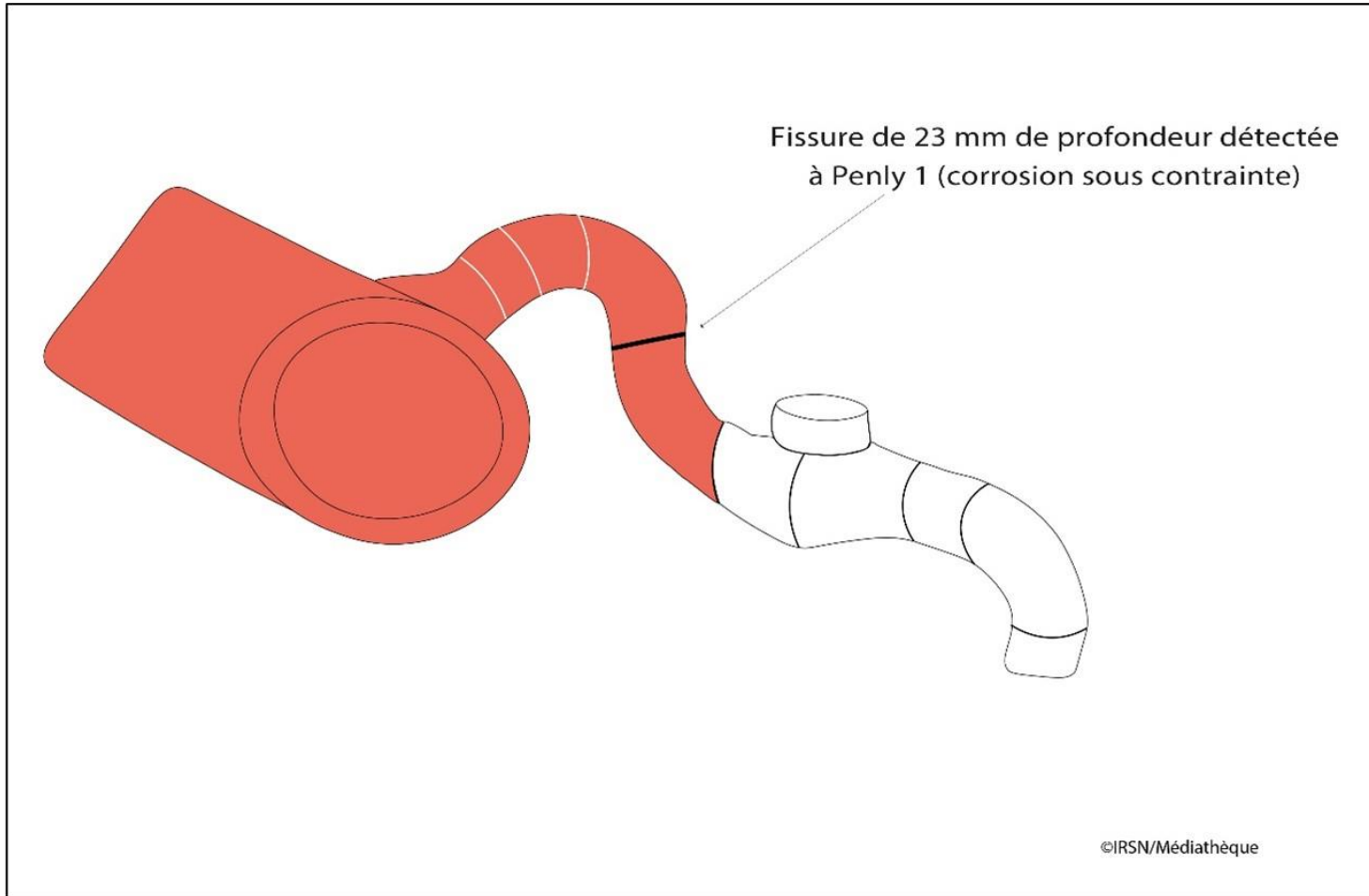
# Schadenmechanismus V

- 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?

