

# VII. Bericht zum Arbeitspaket Nr. 7

## Fessenheim

Mitglieder (in alphabetischer Reihenfolge):

Nicolas Arbor, IPHC – Université de Strasbourg (Koordinator)

Dominique Badariotti, LIVE – Université de Strasbourg

Frédérique Berrod CEIE – Universität Straßburg

Maria Boltoeva, IPHC – CNRS

François Chabaux, ITES – Universität Straßburg

Fanny Greullet, LIVE – Universität Straßburg

Michal Kozderka, ICube – Universität Straßburg

Aurélio Labat, IPHC/LIVE – Interreg-Postdoktorat

Gaetana Quaranta, IPHC – Universität Straßburg

Benoit Ribon, LIVE & Dynartio

Paul Robineau, IPHC – Interreg-Postdoktorat

Bertrand Rose, Icube – Universität Straßburg

Thomas Schellenberger – CERDACC – Universität Haute-Alsace



**Interreg**



Cofinancé par  
l'Union Européenne  
Kofinanziert von  
der Europäischen Union

**Rhin Supérieur | Oberrhein**

## VII.1. Kontext und Zielsetzung

### VII.1.1. **Prendre en charge l'ancien : Démantèlement du CNPE de Fessenheim**

Die Atomindustrie, weltweit zweitgrößte Quelle für kohlenstoffarme Elektrizität, steht im Zentrum von Kontroversen, die in gegensätzlichen kulturellen Denkweisen begründet sind (van de Graaff, 2016). Über die Debatten um ihre Zukunft hinaus kündigt das Alter der historischen Reaktoren eine Welle von Stilllegungen in den kommenden Jahrzehnten an (IAEA, 2024). Das Ende der Lebensdauer von Industrieanlagen ist jedoch noch wenig erforscht, da sich die Forschung vor allem auf den Bau und den Betrieb konzentriert (Invernizzi et al., 2020; Invernizzi, Locatelli, Brookes, 2020). Diese Lücken betreffen insbesondere das Wissen über die Umweltauswirkungen (Lebenszyklusanalyse, LCA) und die Gesetzgebung im Zusammenhang mit der Stilllegung von Kernkraftwerken.

Wissenschaftliche Arbeiten sind von grundlegender Bedeutung, um die politischen Leitlinien für Strategien zum Rückbau von Kernkraftwerken zu untermauern, insbesondere im Zusammenhang mit Fragen der Wiederverwertung von Materialien und der Wiederverwendung von Infrastrukturen im Kontext der Energiewende in einem nuklearisierten Gebiet wie dem Oberrhein. Im Rahmen des Arbeitspakets Nr. 7 haben wir diese Problematik unter drei sich ergänzenden Gesichtspunkten behandelt:

#### **1) Untersuchung des deutsch-französischen Rechtsrahmens für den Rückbau**

Die Rechtslage ist lückenhaft. Auf europäischer Ebene besteht der Rahmen für den Rückbau hauptsächlich aus unverbindlichen Empfehlungen. Darüber hinaus gibt es keine Harmonisierung zwischen den EU-Mitgliedstaaten hinsichtlich der Freigabegrenzwerte für Kernmaterialien.

Das französische und das deutsche Recht zum Rückbau unterscheiden sich. Im Gegensatz zu Frankreich ist der Rückbau aller Kernkraftwerke in Deutschland eine allgemeine Verpflichtung. Es gibt verschiedene Rückbaustrategien, die vom Völkerrecht anerkannt sind. Seit 2012 schreibt das französische Umweltgesetzbuch den sofortigen Rückbau vor (Umweltgesetzbuch Art. L593-25), während in Deutschland das Atomgesetz vom 22. April 2002 die Wahl zwischen sofortiger und später Stilllegung lässt. In Frankreich wird die Stilllegung vom Zentralstaat genehmigt, in Deutschland hingegen von den Bundesländern. Schließlich verfolgen Frankreich und Deutschland völlig unterschiedliche Ansätze in der Frage der Freigabe von Abfällen. Der im französischen Recht bestehende Status von radioaktiven Abfällen mit sehr geringer Aktivität (TFA) hat in Deutschland keine Entsprechung, wo sehr schwach radioaktive Materialien leichter recycelt werden können.

## 2) Lebenszyklusanalyse (LCA) der Stilllegung des Kernkraftwerks Fessenheim

Bis 2024 gab es nur zwei akademische LCA-Studien, die sich speziell mit den Umweltauswirkungen der Stilllegung von Kernkraftwerken befassen und mehr als zehn Jahre alt sind (Wallbridge, Banford, Azapagic, 2013; Seier, Zimmermann, 2014). So modellieren die LCA-Studien zum gesamten Lebenszyklus der Branche den Rückbau analog zum Bau, eine Annahme, die jedoch nicht validiert ist. In Frankreich ist der Fall des 2020 stillgelegten Kernkraftwerks Fessenheim von besonderem Interesse: EDF plant bis 2035 bis zu 14 Rückbauten. Aufgrund der hohen Standardisierung der französischen Kraftwerke, die das Ergebnis eines zentralisierten Bauprogramms ist (Grubler, 2010), dient Fessenheim als „Labor“ für zukünftige Maßnahmen. Dieser Standort steht im Mittelpunkt des wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Interesses, insbesondere durch das ihm gewidmete Observatoire Hommes-Milieus (<https://ohm-fessenheim.fr/>).

Eine LCA-Studie zielt darauf ab, die umweltschädlichsten Aktivitäten zu identifizieren und das Recycling bestimmter Materialien (im Vergleich zur Lagerung von Abfällen) oder die Wiederverwendung von Infrastrukturen (im Vergleich zur Zerstörung) zu bewerten. Der Rückbau von Fessenheim steht somit im Zusammenhang mit dem Projekt „Technocentre Fessenheim“, dessen Ziel es ist, das Recycling von VLLW-Metallen in Frankreich zu entwickeln. Diese Abfälle mit geringem Gesundheitsrisiko machen den größten Teil der bei einem Rückbau anfallenden radioaktiven Abfälle aus, sowohl hinsichtlich der Masse als auch des Volumens. Im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern, die die Euratom-Richtlinien (1996, 2011, 2014) anwenden, die das Recycling oder die Freigabe bestimmter VLLW erlauben, hat sich Frankreich für eine bedingungslose Lagerung entschieden, eine weltweit einzigartige Entscheidung, die seit 30 Jahren diskutiert wird (Martinais, 2021). Die angekündigte Sättigung des CIREs hat die Frage, die in den aufeinanderfolgenden PNGMDR behandelt wurde, wieder aufleben lassen. Der letzte hat zu einer Änderung des Umweltgesetzbuches geführt, um das Recycling von VLLW-Metallen zu regeln (PNGMDR, 2022). Das Projekt Technocentre, das von Oktober 2024 bis Februar 2025 öffentlich diskutiert wird, wird von EDF als eine rationellere Lösung für die Entsorgung von VLLW und die Wiederverwendung des Standorts vorgeschlagen (CNDP, 2024). Nur prospektive LCA-Studien, die alle Behandlungsszenarien vergleichen, werden es jedoch ermöglichen, die Umweltkosten und -nutzen genau zu bewerten.

Um die öffentliche Entscheidungsfindung zu unterstützen und die fehlende gesetzliche Verpflichtung zur Veröffentlichung solcher Studien durch EDF auszugleichen, haben wir eine Ökobilanz der Stilllegung des Kernkraftwerks Fessenheim durchgeführt, um quantitative Antworten auf Fragen im Zusammenhang mit den Herausforderungen der Wiederaufbereitung (im Vergleich zur Lagerung) radioaktiver Abfälle zu liefern.

3) Auf dem Weg zu einer akademischen Beobachtungsstelle für die Auswirkungen des Rückbaus

Der Rückbau des Kernkraftwerks Fessenheim ist der erste Fall einer ganzen Reihe von Rückbauten dieser Art von Kraftwerken. Er bietet daher eine einmalige Gelegenheit, die sozioökologischen Auswirkungen eines solchen Rückbaus zu untersuchen, um daraus Lehren zu ziehen, Kompetenzen aufzubauen und die Auswirkungen eines Rückbaus auf andere sozioökologische Systeme besser vorhersagen zu können.

Ziel ist es, ein Weißbuch für eine künftige akademische Beobachtungsstelle für die Auswirkungen des Rückbaus zu verfassen, wobei insbesondere die Erfahrungen aus dem Projekt CO2InnO genutzt werden sollen. Da die potenziellen Auswirkungen vielfältiger Natur sind – von sozioökonomischen Auswirkungen im Zusammenhang mit der Stilllegung (z. B. Beschäftigung) bis hin zu Umweltauswirkungen (z. B. chemische Verschmutzung) –, besteht die Herausforderung darin, sich auf eine breite interdisziplinäre Gemeinschaft zu stützen, um diese Auswirkungen zu ermitteln und eine Methode zu ihrer Überwachung zu entwickeln. Dabei geht es darum:

- Indikatoren zur Überwachung der Auswirkungen zu definieren
- das Thema in einen zeitlichen und räumlichen Rahmen zu fassen: einen Zeitpunkt 0 zu beschreiben, ab dem die durch den Rückbau bedingten Umgestaltungen auf verschiedenen Ebenen abgelesen werden können
- die Reproduzierbarkeit der Methode an anderen Standorten zu Vergleichszwecken anzustreben
- die Besonderheiten jeder Stilllegungssituation zu erfassen, um die für den jeweiligen Fall spezifischen Verläufe und Determinanten zu ermitteln (z. B. Fall Fessenheim: Projekt Technocentre, grenzüberschreitende Aspekte)

Parallel dazu muss man sich mit den Aufgaben einer solchen Beobachtungsstelle befassen: Strukturierung der akademischen Gemeinschaft, Zusammenarbeit mit Partnern, Datenverwaltungspolitik (Erfassung, Speicherung, Zugriff), Animation und Verbindung zwischen Wissenschaft und Gesellschaft.

Mehrere Akteure interessieren sich für den Rückbau: öffentliche und private Institutionen aus dem Nuklearbereich (ANDRA, ASNR, CEA, EDF...), politische Akteure, Verbände. Diese Akteure führen bereits eine Reihe von Forschungsarbeiten und Maßnahmen durch. Die Herausforderung besteht daher darin, den spezifischen Beitrag der akademischen Forschung als Ergänzung zu den bestehenden Maßnahmen zu präzisieren.

### **VII.1.2. Das Neue vorwegnehmen: Bewertung einer auf Wasserstoff (H<sub>2</sub>) basierenden Energielösung**

Nach der Schließung des Kernkraftwerks Fessenheim haben die französische und die deutsche Regierung sowie die grenzüberschreitenden Gebietskörperschaften die Studie „Fessen-

heim Région Innovation” (EUCOR & URCforSR, 2022) in Auftrag gegeben. Diese empfiehlt mehrere Pilotprojekte für die regionale Energiewende, insbesondere im Bereich Wasserstoff in dezentralen Systemen. Wasserstoff stößt auf wachsendes Interesse, sowohl hinsichtlich der Dekarbonisierung seiner derzeitigen industriellen Produktion als auch hinsichtlich seiner Anwendungen in der Schwerlastmobilität, in Fernwärmenetzen oder bei der saisonübergreifenden Speicherung von Strom. Allerdings gibt es zwischen den beiden Ländern eine strategische Divergenz: Frankreich, dessen Strommix bereits kohlenstoffarm ist, konzentriert sich auf die Dekarbonisierung von industriellem Wasserstoff, während in Deutschland vielfältige industrielle Interessen eine breitere Nutzung fördern (Quitow & Zabanova, 2024).

Das grenzüberschreitende Projekt CO2InnO bewertet den Nutzen von Wasserstoff in einem dezentralen Energiesystem, das auf einem Blockheizkraftwerk basiert, mit Anwendungsszenarien, die gemeinsam mit der Stadt Offenburg (Deutschland) definiert wurden. Der Nutzen dieser Lösungen muss im Hinblick auf ihre Einbindung in die territoriale Strategie analysiert werden, insbesondere unter technisch-wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten. Der integrierte Ansatz, der den territorialen Metabolismus, die technisch-wirtschaftliche Analyse (TEA) und die Lebenszyklusanalyse (LCA) kombiniert, ist in der Forschung unerlässlich, um situative multikriterielle Bewertungen zu ermöglichen, bleibt jedoch schwierig umzusetzen, insbesondere aufgrund des mangelnden Zugangs zu Daten und operativen Instrumenten (Ferdous, Bensebaa, Pelletier, 2023; Mahmud et al., 2021; Ribon, 2020). Darüber hinaus basieren die vorgeschlagenen Lösungen häufig auf proprietärer Software (Sharma et al., 2023). Im Arbeitspaket Nr. 7 wurden daher mögliche Synergien der im Rahmen von CO2InnO entwickelten *Open-Source-Tools* untersucht, um der Gemeinde ein umfassendes Tool zur Verfügung zu stellen, mit dem verschiedene Energiekonfigurationen getestet werden können.

## **VII.2. Methoden und Material:**

### **VII.2.1. Stilllegung des Kernkraftwerks Fessenheim**

#### **VII.2.1.1. Rechtliche Analyse**

Wir stützten uns auf eine Analyse des geltenden Rechts und der Rechtsprechung auf EU-, französischer und deutscher Ebene. Die rechtlichen Perspektiven für die Wiederverwendung von Bestandsmaterialien im Rahmen der Stilllegung einer alten Kernkraftanlage wurden bewertet. Es wurde nach rechtlichen Möglichkeiten und Hindernissen für die Wiederverwendung von Materialien im Rahmen der Stilllegung einer Kernkraftanlage gesucht.

#### **VII.2.1.2. Lebenszyklusanalyse**

Auf der Grundlage der Daten zu den Abfällen pro Phase des Rückbaus aus dem ursprünglichen Plan von EDF (2020) haben wir eine Pilot-LCA-Studie mit der proprietären Software Simparo durchgeführt, um die Lücken in dieser Phase des Lebenszyklus eines französischen

Kernkraftwerks zu schließen (Anhänge, Abbildungen A.1-4). Um noch weiter zu gehen, wurde in Zusammenarbeit mit EDF auf der Grundlage des aktualisierten Stilllegungsplans und der Studie zu den regulatorischen Auswirkungen (EDF, 2024a; 2024b) eine annualisierte Bestandsaufnahme der Abfallströme erstellt. Ziel ist es, diese Bestandsaufnahme mit den neuesten Methoden der prospektiven Ökobilanzierung zu verknüpfen, die Datenbanken durch die Einbeziehung soziotechnischer Entwicklungen nach verschiedenen Szenarien „zukunfts-fähig“ machen (Arvidsson et al., 2024; Sacchi et al., 2022 – Anhänge, Abbildungen A.11-12) mithilfe von Open-Source-Tools wie Brightway (Mutel, 2017) zu „futurisieren“. Darüber hinaus wurden die radiologischen Auswirkungen in der Ökobilanz lange Zeit vernachlässigt, im Gegensatz zu ihrer Berücksichtigung im HERA-Ansatz (Paulillo et al., 2018). Unter Verwendung der Daten zu radioaktiven Emissionen aus der Umweltverträglichkeitsprüfung des Kernkraftwerks Fessenheim (EDF, 2024b) haben wir zwei Methoden zur Bewertung der Auswirkungen von Ökobilanzen verglichen: UCrad, das für globale Technologievergleiche konzipiert wurde, und CGM, das sich besser für spezifische Bewertungen von Industriestandorten eignet (Paulillo et al., 2020a; 2020b; 2023 – Anhänge, Abbildungen A.5-10).

#### Beobachtungsstelle für die Auswirkungen der Stilllegung

Um zu definieren, wie ein Observatorium für Stilllegungen aussehen könnte, haben wir eine qualitative Umfrage durchgeführt, die auf 70 halbstrukturierten Interviews mit verschiedenen Arten von Akteuren basiert. Zunächst haben wir Forscher befragt, die mit dem OHM zusammengearbeitet oder in Fessenheim gearbeitet haben. Anschließend wurde die Umfrage auf nationale und internationale Forscher ausgeweitet, die in den Bereichen Kernenergie, Stilllegung oder verwandten Themenbereichen tätig sind, die im Laufe der Gespräche identifiziert wurden.

Es wurden Wissenschaftler angesprochen, die in großen Netzwerken und Programmen engagiert sind (Projekt DEMAIN, Zone Atelier Territoire Uranifère, Réseau Becquerel...). Wir haben auch Vertreter akademischer Einrichtungen (CNRS Nucléaire et Particules, CNRS Écologie et Environnement, Labex DRIIHM) getroffen, um die aktuellen Finanz- und Forschungsstrategien zu präzisieren.

Außerdem haben wir Akteure aus dem Nuklearbereich (ANDRA, ASNR, EDF), nationale Verbände (ANCCLI – Association Nationale des Comités et Commissions Locales d’Information –, GSIEN – Groupement de Scientifiques pour l’Information sur l’Energie Nucléaire –, CRIIRAD – Commission de Recherche et d’Information Indépendantes sur la Radioactivité) und lokale Verbände (CLI - Commission Locale d’Information), politische Akteure und Techniker der Gebietskörperschaften und ihrer Ableger (Gemeindeverbände, Gemeinden, Agence de Développement d’Alsace (l’ADIRA), Industrie- und Handelskammer) befragt.

Der Interviewleitfaden umfasste folgende Themen:

- Vorstellung des Befragten (Profil, Forschungsgebiete, Verbindung zu Fessenheim und zum Rückbau)
- Indikatoren und Daten (Definition von Indikatoren, Zugänglichkeit der Daten, Datenerstellung)
- die Kollektive (Rollen einer Beobachtungsstelle, Art der Partnerschaften mit den verschiedenen Akteursbereichen).

Wir haben die Umfrage durch Besichtigungen vor Ort ergänzt (Kernkraftwerk Fessenheim, CIREs-Lagerstätte der ANDRA, Observatoire Pérenne de l'Environnement der ANDRA).

## VII.2.2. Auf H<sub>2</sub> basierende Energielösung

### VII.2.2.1. Lebenszyklusanalyse

Das modellierte Energiesystem wird im Bericht zum Arbeitspaket Nr. 2 beschrieben. Wir haben eine Reihe von *Python-Skripten* entwickelt, die in ein *Jupyter Notebook* integriert sind, um die Ergebnisse des Modells auszuwerten. Anhand der Kontrollsequenzen des Energiesystems können wir so die Strom-, Wärme- und Wasserstoffflüsse zwischen den Teilsystemen über ein ganzes Jahr hinweg rekonstruieren – Abbildung VII-1.

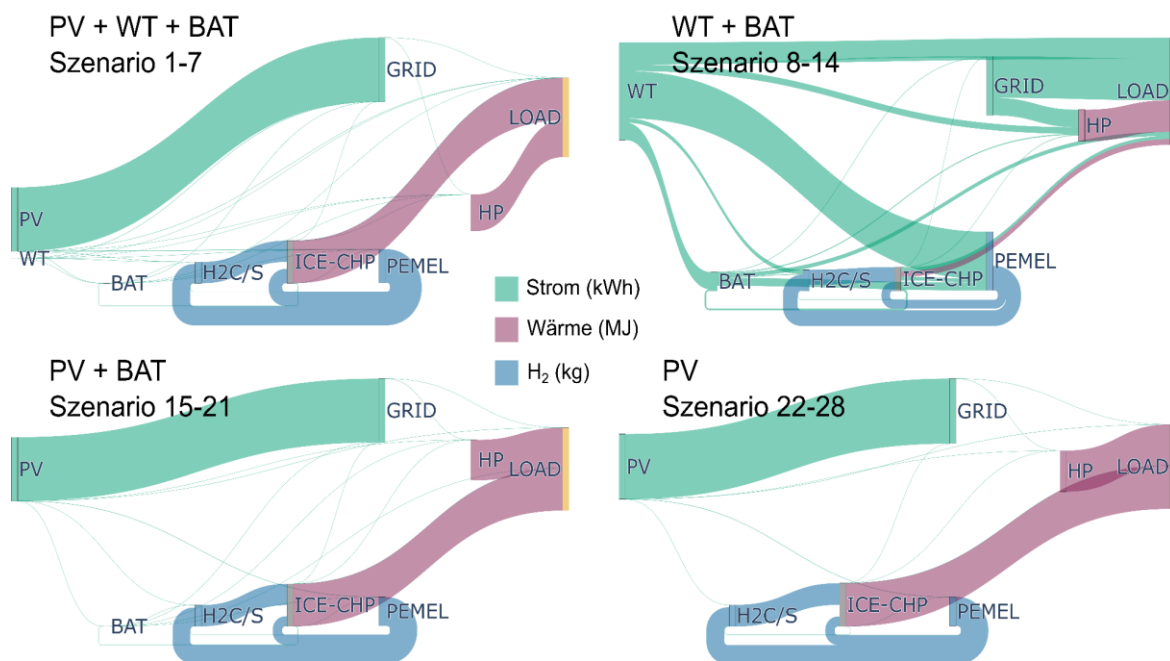


Abbildung VII-1: Überblick über das Gleichgewicht der Ströme im System für die verschiedenen Szenarienfamilien, basierend auf dem Fall H<sub>2</sub>S = 50 m<sup>3</sup>.

Die Breite der Ströme wird nach Strömungskategorien skaliert, um die Anteile innerhalb einer bestimmten Kategorie besser lesbar zu machen. PV: Photovoltaik, WT: Windkraft, BAT: Batterie, ICE-CHP: Verbrennungsmotor für die Kraft-Wärme-Kopplung, GSHP: Erdwärmepumpe, PEMEL: Protonenaustauschmembran-Elektrolyseur, H<sub>2</sub>C/S: Kompression und Speicherung von H<sub>2</sub>, LOAD: Bedarf von Gebäuden, GRID: Stromnetz.

Dieser Detaillierungsgrad ist für relevante Umweltverträglichkeitsberechnungen in der Ökobilanz unerlässlich und bietet gleichzeitig zusätzliche Einblicke in das in *OpenModelica* entwickelte TEA-Modell, insbesondere hinsichtlich der Schwankungen der Stromüberproduktion je nach Dimensionierung – Anhänge, Abbildung A.14. Die Produktions- und End-of-Life-Phasen der Infrastrukturen wurden durch Skalierung von Subsystemen aus der Datenbank ecoinvent (v3.10) modelliert. Die LCA-Modellierung und die Wirkungsberechnungen (LCIA) wurden über den Activity Browser (v2.11.1), die Schnittstelle des Open-Source-Frameworks Brightway2 (Steubing et al., 2020), durchgeführt. Die Auswirkungen wurden mit der von der EU empfohlenen EF-Methode (v3.1) bewertet, die 16 Umweltindikatoren umfasst (Andreasi Bassi et al., 2023). Wir haben fünf davon ausgewählt, da sie für das untersuchte System relevant sind und klar dargestellt werden können. Diese Indikatoren sind in Tabelle VII detailliert aufgeführt. Tabelle VII .1

Tabelle VII .1: Ausgewählte Umweltindikatoren für die Bewertung der wasserstoffbasierten Energielösung.

<b>Umweltkategorie</b>	<b>Indikator</b>
Klimawandel	Treibhauspotenzial (GWP100)
Ökotoxizität: Süßwasser	USEtox / Ökotoxizität: Süßwasser (ECOTOX-FW)
Toxizität für den Menschen: Karzinogene	USEtox / Toxizität für den Menschen: Karzinogene (HT-C)
Nutzung mineralischer Ressourcen	Abiotisches Erschöpfungspotenzial: endgültige Reserven (ADP-UR)
Wassernutzung	Nutzungsentzugspotenzial (UDP-WU)

### **VII.2.2.2.      Ansatz über den territorialen Metabolismus**

Der Ansatz über den territorialen Metabolismus untersucht Gebiete, Organisationen oder Projekte anhand der von ihnen mobilisierten Energie- und Materialflüsse sowie ihrer Wechselwirkungen mit dem Rest des Gebiets. Diese multidisziplinäre Methode verbindet wirtschaftliche (Wert der Ströme), logistische (Infrastrukturen, Transport), geografische (räumliche Organisation, Einzugsgebiete), ökologische (Umweltverschmutzung, Ressourcen), historische (Entwicklung der Volumina) und soziale (Akteure, politische Ausrichtung) Aspekte (Athanasiadis, 2025; Ribon, 2020). Sie beleuchtet die Faktoren, die zur territorialen Verankerung der Akteure und Projekte beitragen, und hilft bei der Ausarbeitung von Szenarien für eine nachhaltige Entwicklung.

Der Begriff des territorialen Metabolismus kann somit als systemisches und systematisches Analyseraster verwendet werden, um die Ströme, ihre Merkmale und ihren Kontext zu untersuchen. In diesem Sinne wurde er verwendet, um das Projekt der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zu hinterfragen.

Diese Studien erfordern einen hohen Datenbedarf und eine gute Beherrschung der Informationskette, um territoriale Strategien zu unterstützen. Um dazu beizutragen, haben wir die verfügbaren Datensätze zu Energie und Mobilität im Oberrheingebiet inventarisiert und eine öffentlich zugängliche Visualisierungsplattform auf Basis der Open-Source-Bibliothek *Sinamet* (Ribon 2018) entwickelt. Diese Plattform strukturiert und analysiert die Flussdaten nach zeitlichen, räumlichen, quantitativen und qualitativen Dimensionen und macht die territorialen Informationen visuell besser zugänglich. Diese Arbeit hat auch den Teil 3 des Projekts bereichert, der sich mit nachhaltiger Mobilität und Ladeinfrastrukturen befasst.

## **VII.3. Ergebnisse**

### **VII.3.1. Stilllegung des Kernkraftwerks Fessenheim**

#### **VII.3.1.1. Rechtlicher Rahmen**

##### **VII.3.1.1.1. Möglichkeiten der Wiederverwendung bestehender Anlagen beim Rückbau eines Kernkraftwerks**

Die Wiederverwendung steht im Einklang mit dem Vorsorgeprinzip und entspricht dem Abfallrecht, das vorsieht, „der Vermeidung und Verringerung der Abfallerzeugung Vorrang einzuräumen“ (Umweltschutzgesetz, Art. L541-1). Rechtlich gesehen besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem Vorsorgeprinzip, der Wiederverwendung und der Erhaltung von Ressourcen, was die Wiederverwendung von Bestandmaterialien begünstigt.

Die Wiederverwendung ist auch im Recht für kerntechnische Anlagen verankert. Unter den Vorschriften für den Rückbau und die Stilllegung von kerntechnischen Anlagen (INB) gibt es keine Verpflichtung, die Gebäude einer kerntechnischen Anlage, die rückgebaut wird, zu zerstören. Die Wiederverwendung eines alten Gebäudes kann im Rückbauplan einer kerntechnischen Anlage vorgesehen werden, wenn sie mehr Vorteile als Risiken mit sich bringt (Russo, 2024).

Die Notwendigkeit der Risikokontrolle stellt jedoch ein Hindernis für die Wiederverwendung bestimmter Elemente einer ehemaligen kerntechnischen Anlage dar. Die Entscheidung, ein Gebäude zu erhalten, kann jedoch im Falle versteckter oder vergessener Radioaktivität ein zusätzliches Risiko mit sich bringen. Das Umweltgesetzbuch schreibt darüber hinaus den sofortigen Rückbau vor (Umweltgesetzbuch Art. L593-25) vor, was ein Hindernis für die Wiederverwendung darstellen kann, da die Vorbereitung eines Gebäudes für die Wiederverwendung länger dauern kann als ein Abriss.

**Fazit:** Die Umnutzung von Gebäuden einer ehemaligen kerntechnischen Anlage ist möglich, wenn sie an sich kein zu hohes Risiko darstellt und mit vertretbaren Kosten und innerhalb eines angemessenen Zeitraums durchgeführt werden kann.

#### **VII.3.1.1.2. Das Recycling von sehr schwach radioaktiven Abfällen: ein Gleichgewicht zwischen Risikoprävention und Ressourcenschonung**

Das von EDF auf dem Gelände von Fessenheim geplante Technocentre-Projekt (Recycling von sehr schwach radioaktiven Abfällen (TFA), die insbesondere aus stillgelegten Kernkraftwerken stammen) geht mit einer Rechtsänderung einher, die auf ein neues Gleichgewicht zwischen Risikoprävention und Ressourcenschonung abzielt.

Das Problem der TFA-Abfälle im Hinblick auf das französische Recht. In Frankreich gilt ein Abfall als radioaktiv, sobald er in einem Gebiet erzeugt wurde, in dem die Produktion von nuklearen Abfällen möglich ist (Louis, Deproit, 2018). Dieses räumliche Kriterium (Martinais, 2021) ist aus Sicht der Risikoprävention das strengste, hat jedoch den Nachteil, dass es zu erheblichen Abfallmengen führt.

Die Entwicklung des Rechtsrahmens für das Recycling von TFA-Abfällen. Die am 14. Februar 2022 verabschiedeten Dekrete Nr. 2022-174 und Nr. 2022-175 sehen die Einführung einer Ausnahmeregelung innerhalb des CSP vor, die es der Verwaltung ermöglicht, von Fall zu Fall die Verwertung von TFA-Materialien aus der Nuklearindustrie in der konventionellen Industrie zu genehmigen.

Die Bestätigung dieses ausnahmerechtlichen Rahmens durch die Justiz. Diese neue Regelung wurde am 27. März 2023 vom Staatsrat auf der Grundlage des Rechtfertigungsprinzips bestätigt, wodurch das Interesse an der Wiederverwendung von Materialien und damit an der Erhaltung von Ressourcen im Namen der Kreislaufwirtschaft bekräftigt wurde (Staatsrat, 27.03.2023, *Réseau sortir du nucléaire*, Nr. 463186)..

Rechtlich gesehen darf die Wiederverwendung von Materialien jedoch nicht zu Lasten der Kontrolle des Strahlenrisikos erfolgen. Aus diesem Grund legt die neue Regelung die Modalitäten für die Kontrolle radioaktiver TFA-Stoffe beim Ein- und Ausgang des künftigen Verwertungsstandorts, die Höchstwerte für die Radioaktivität der recycelten Stoffe und die Grenzwerte für die Exposition von Personen sowie eine Verpflichtung zur Rückverfolgbarkeit der ausgehenden verwerteten Stoffe fest (CSP Art. R1333-6-3).

#### **VII.3.1.2. Lebenszyklusanalyse**

Die Aktivitäten vor Ort (elektromechanischer Rückbau, Sanierung, Abriss) und der Transport von Abfällen wurden separat bewertet, um den Fall radioaktiver Abfälle herauszugreifen. Obwohl sie nur 5 % der Gesamtmasse ausmachen, ist die Auswirkung radioaktiver Abfälle 1,8- bis 6,6-mal höher als die konventionellen Abfälle – Anhänge, Abbildungen A.3. Dies lässt sich durch ihre spezielle Verpackung erklären, die die Transportlasten erhöht, sowie durch die gesetzlich vorgeschriebenen langen Transportwege: VLLW zum CIRES (~300 km), ILLW-SL zum CSA (~300 km), ILW-LL zum ICEDA (~400 km).

Im Gegensatz zu früheren Studien haben wir die Beiträge zu den Auswirkungen der Aktivitäten vor Ort detailliert analysiert und dabei die wichtige Rolle des Metallschneidens aufgezeigt –

Anhänge, Abbildung A.2. Ursprünglich zu 100 % durch thermisches Schneiden (Sauerstoff und Acetylen) modelliert, macht es je nach Umweltkategorie zwischen 62,6 % und 99,5 % der Auswirkungen aus – Anhänge, Abbildung A.4. Dieser vorrangige Schwachpunkt kann gemildert werden: Unsere Sensitivitätsstudie (Abbildung VII-2 ) zeigt, dass eine 50-prozentige Umstellung auf mechanisches Schneiden die Auswirkungen um 45 bis 48 % reduziert und eine vollständige Umstellung auf mechanisches Schneiden die Auswirkungen um 89 bis 96 % verringern würde.

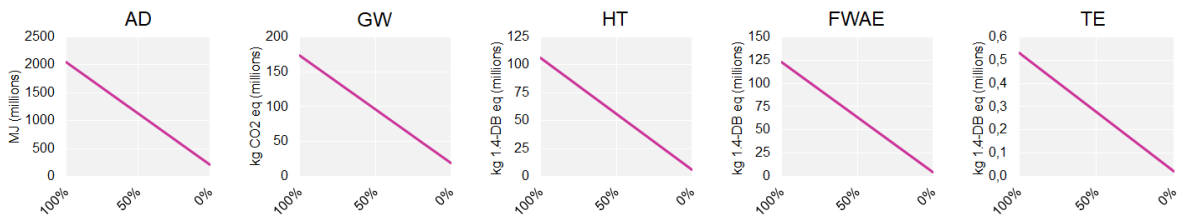


Abbildung VII-2: Darstellung der Verringerung der Auswirkungen (alle bewerteten Kategorien) durch den Ersatz des thermischen Metallschneidens durch mechanisches Schneiden. Die Prozentsätze auf der Abszisse stellen den Anteil des thermischen Schneidens dar. Indikatoren: (AD) abiotische Erschöpfung, fossile Brennstoffe; (GW) globale Erwärmung; (HT) Humantoxizität; (FWAE) ökotoxische Wirkung auf Süßwasserorganismen; (TE) ökotoxische Wirkung auf Landorganismen.

Abbildung VII-3 die beiden Aspekte dieser Arbeit zusammen.

- Der Vergleich der Ergebnisse und die Interpretation ihrer Unterschiede auf *Midpoint*-Risikoniveau in Sievert (Sv)
- Der Nachweis der Notwendigkeit einer dynamischen Modulation der Charakterisierungsfaktoren auf *Endpunktniveau* – Schaden, in Disability-Adjusted Lost Years (DALYs)

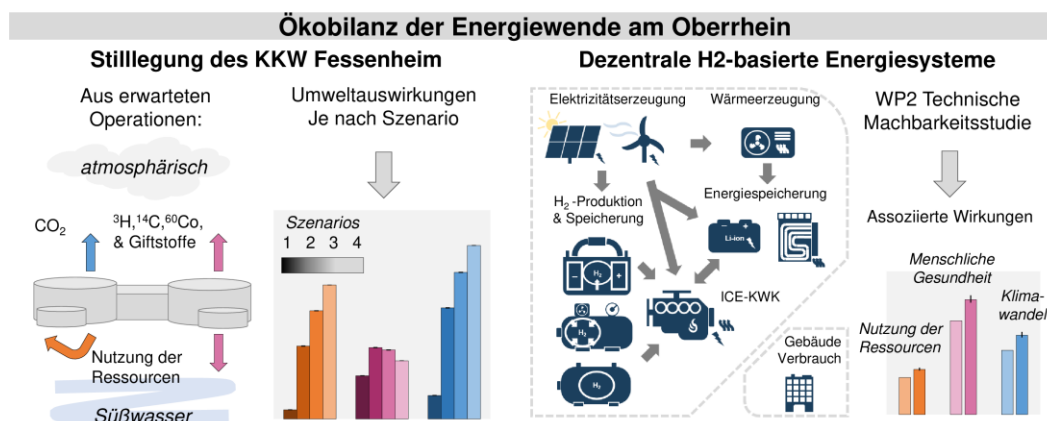


Abbildung VII-3: Grafische Zusammenfassung der Vergleichsstudie zu den radiologischen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit beim Rückbau des Kernkraftwerks Fessenheim.

Auf der Ebene des Mittelpunkts überschätzt die CGM-Methode die Auswirkungen systematisch, wobei CGM 1 km Ergebnisse liefert, die 6,5-mal höher sind als die HERA-Studie von

EDF, die genauer lokalisiert ist (Anhänge, Abbildungen A.6-7). Etwa 40 % dieser Abweichung sind auf die Behandlung der Emissions-Expositions-Entfernung zurückzuführen, wobei HERA die Auswirkungen auf die lokale Bevölkerung in 2-3 km Entfernung vom Kernkraftwerk bewertet. Trotzdem schätzt CGM 1 km ein Gesamtrisiko von 11  $\mu\text{Sv}$ , was 400-mal niedriger ist als die durchschnittliche jährliche Exposition in Frankreich (4,5 mSv) (IRSN, 2021). Die beiden LCA-Methoden und der HERA-Ansatz identifizieren dieselben wichtigen Radionuklide (Tritium-3, Kohlenstoff-14, Kobalt-60), wobei die Beiträge je nach Modellierung des Verbleibs der Radionuklide nach der Emission variieren (Anhänge, Abbildung A.9).

Auf Endpunktniveau zeigen wir, dass es für eine lang andauernde Aktivität wie den Rückbau von Kernkraftwerken (mindestens 15 Jahre) entscheidend ist, die zeitliche Variation der Exposition der Bevölkerung zu berücksichtigen – Anhänge, Abbildung A.8. Dieses Ergebnis hat allgemeine methodische Bedeutung, da alle LCIA-Methoden für die menschliche Gesundheit einen ähnlichen Formalismus aufweisen. Wir haben mehrere Annahmen zur Bevölkerungsverteilung verglichen (Anhänge, Abbildung A.10) und vorgeschlagen, kontinuierliche räumliche Charakterisierungsfaktoren als potenziell relevantere Lösung zu verwenden. Die zugehörige Datenbank ist in den Anhängen der veröffentlichten Artikel verfügbar.

### **VII.3.1.3. Observatoire des Impacts du Démantèlement**

Im Allgemeinen zeigt die Umfrage zur Charakterisierung eines Observatoriums für die Auswirkungen der Stilllegung ein gemeinsames Interesse an Interdisziplinarität, der Vernetzung von Forschern, der Vernetzung mit anderen Akteursbereichen, der Sichtbarmachung von Forschungsarbeiten, der Unterstützung bei der Suche nach Finanzmitteln und dem Zugang zu Daten und Informationen.

Aus der Umfrage gehen zwei wichtige Ideen hervor, die wir im Folgenden näher erläutern:

- Forschungsbereiche (Birnbaum *et al.*, 2025), um die herum die Gemeinschaft organisiert werden kann
- Förderung des Zugangs zu bestehenden Daten anstelle der Erhebung neuer Daten

#### **VII.3.1.3.1. Die Forschungsbereiche**

Wir identifizieren fünf große, miteinander verbundene „Bereiche“, die Forscher und andere Akteure rund um den Rückbau mobilisieren:

- Bereich „Sozio-territoriale Auswirkungen“ (wo es um Fragen des territorialen Metabolismus, die Bewertung öffentlicher Politiken, die Untersuchung der lokalen Besteuerung usw. geht)
- Bereich „Gesundheit“ (von der Soziologie der Arbeit im Kontext von Unsicher-

heit und Strahlen- und Schadstoffbelastung bis hin zur Untersuchung chemischer und radioaktiver Schadstoffe in der Umwelt)

- Bereich „Erinnerungen und Kulturerbe“ (Erinnerungen in der Arbeitsorganisation zur Förderung der Ergonomie beim Rückbau bis hin zu militanten Erinnerungen)
- Bereich „Techniken des Rückbaus“ (einschließlich LCA, Vergleich von Methoden zur Messung der Radioaktivität im Zusammenhang mit dem Rückbau)
- Bereich „Endings“: übergreifende Überlegungen zum Ende von Organisationen, zum Erbe, zum Umgang mit „negativen Gemeingütern“ (Joly, Barbier und Turnheim, 2022; Landivar, Bonnet und Monnin, 2021)).

#### **VII.3.1.3.2. Daten: Zugänglichkeit und Erstellung**

Die Überwachung von Variablen und die Datenverwaltung ist ein Thema, das wir in unserer Umfrage ausführlich behandelt haben. Eine Beobachtungsstelle kann die Aufgabe haben, eine Reihe von Indikatoren zu identifizieren, die zur Charakterisierung von Phänomenen im Zeitverlauf herangezogen werden können, in diesem Fall die Auswirkungen des Rückbaus. Dabei gibt es zwei sich ergänzende Ansätze: die Nutzung vorhandener Daten und die Erhebung neuer Daten. Die Umfrage zeigt, dass der Bedarf in erster Linie in der Zugänglichkeit zu bestehenden Daten und weniger in der Erfassung neuer Daten liegt.

Die Forscher äußern in der Tat den Wunsch nach einem leichteren Zugang zu Daten, die von anderen Akteuren erstellt wurden und sich in deren Besitz befinden. Dabei kann es sich um Daten handeln, die von Akteuren erhoben wurden, die deren Verbreitung vermeiden wollen (z. B. Daten von EDF, die die Genauigkeit von LCA-Modellen verbessern könnten), oder um öffentliche Daten, deren Zugang für Nicht-Fachleute jedoch schwierig ist (z. B. Grundstücksdaten des CEREMA). Diese beiden Arten von Hindernissen (Zurückhaltung und Komplexität) können durch den Einsatz geeigneter Instrumente beseitigt werden. So könnte sich zunächst jeder Akteur an die Beobachtungsstelle für die Auswirkungen der Stilllegung wenden, um den Zugang zu Daten zu erleichtern, über die er nicht verfügt.

Das Problem der Datenretention lässt sich teilweise überwinden, indem eine gegenseitige Akkulturation zwischen Akteuren verschiedener Institutionen gefördert wird, insbesondere durch die Kommunikation über laufende Forschungsarbeiten und die Formulierung von Bedürfnissen. Das Problem des komplexen Zugangs zu Daten lässt sich durch die Entwicklung einer internen Technik innerhalb der Beobachtungsstelle lösen. Die Aufgabe bestünde darin, die verfügbaren Daten, die Betreiber, die sie produzieren, und die Bedingungen, unter denen diese Daten von der akademischen Gemeinschaft und anderen Akteuren genutzt werden können, zu erfassen. Eine Annäherung ist möglich mit den dedizierten Forschungsinfrastrukturen (IR) (z. B. IR\* PROGEDO für INSEE-Daten), mit öffentlichen und halböffentlichen Institutionen (z. B. Handelskammern), mit thematischen Observatorien (z. B. AtmoGrandEst für Daten zum

Bereich Luft) und mit Laboratorien für Messtechnik (z. B. LEREN – Laboratoire d'étude et d'expertise sur la radioactivité de l'environnement – der ASNR) hergestellt werden.

Mehrere Befragte erwähnen auch eine Arbeit zur Sammlung von Erinnerungen, die in Form eines „Archivs der Erinnerungen“ erfolgen könnte. Das Ziel wäre, alle Arten von Erinnerungen (bevor sie verschwinden) in Form von Audioaufnahmen und/oder Transkripten für verschiedene Formen zukünftiger quantitativer und qualitativer Analysen zu speichern. Dies ist ein Beispiel für ein Thema, für das technische Lösungen und die Unterstützung durch spezielle Dienste (z. B. Dienste des CNRS) erforderlich sind und um das sich die interessierte Gemeinschaft im Rahmen von gemeinsamen Diskussionen mobilisieren könnte.

### **VII.3.2. Auf H<sub>2</sub>basierende Energielösung**

#### **VII.3.2.1. Lebenszyklusanalyse**

Das Open-Source-Tool zur Erstellung und Visualisierung von Flüssen ist auf GitHub verfügbar. Die Visualisierung der Szenarien dieser Studie ist auf einer speziellen Seite der Website CO2InnO integriert. Alle LCIA-Ergebnisse können auch über ein bereitgestelltes Jupyter-Notebook eingesehen werden – siehe Anhänge.

Abbildung VII-3 fasst die Ergebnisse der berechneten Auswirkungen für die verschiedenen Szenarien zusammen. Es sei daran erinnert, dass sich die H<sub>2</sub>-Speicherkapazitäten innerhalb jeder Szenariofamilie entsprechend diesen Werten entwickeln: [1000, 500, 100, 50, 30, 10, 1] m<sup>3</sup>.

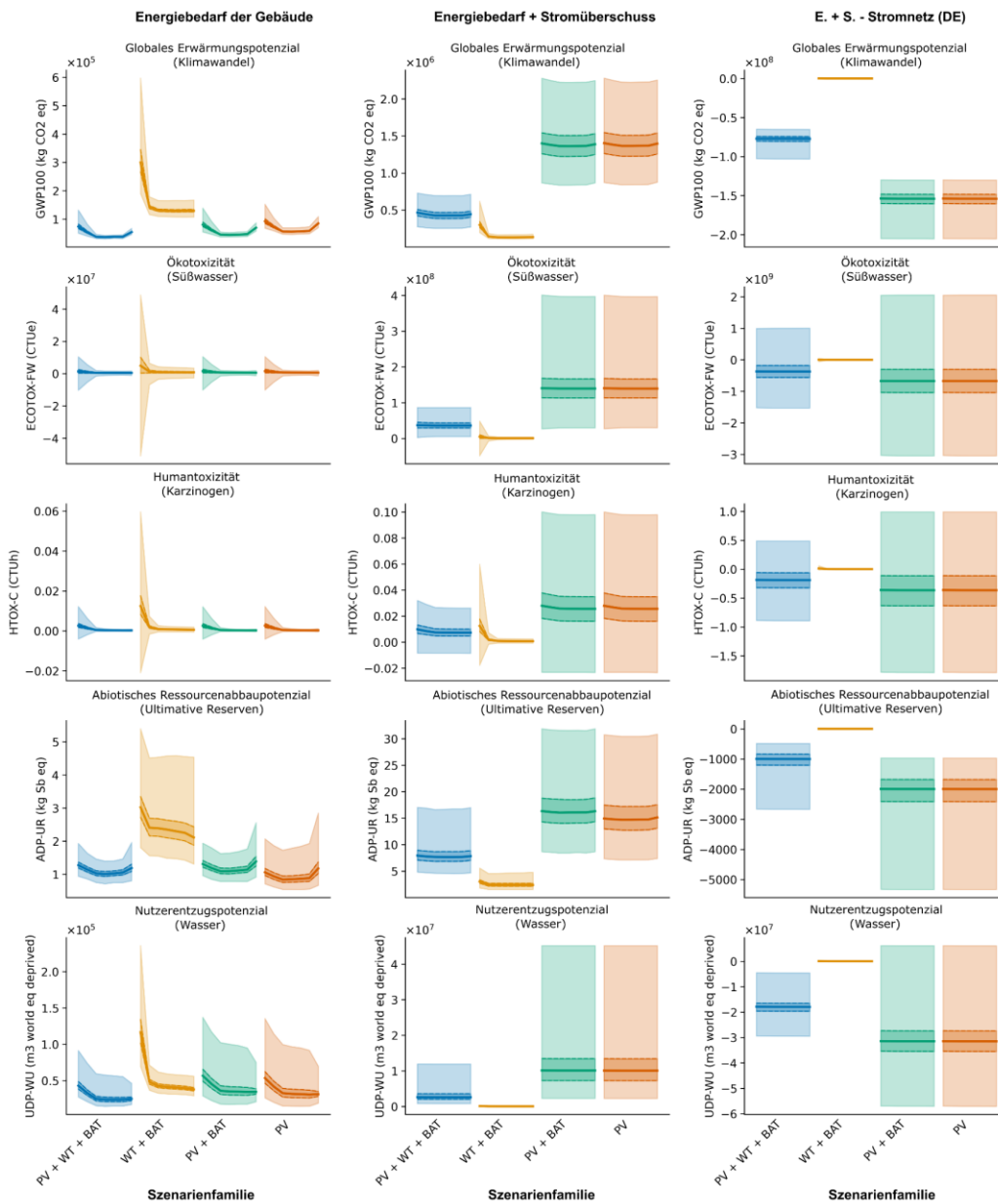


Abbildung VII-3: Umweltauswirkungen mit Unsicherheiten des wasserstoffbasierten Energiesystems, nach Szenariofamilien. In jeder Familie erfolgt die Progression nach abnehmender H<sub>2</sub>-Speicherkapazität. Die Linien stellen die getestete Umweltkategorie dar. Die Spalten stellen die Grenze für die Berücksichtigung der Auswirkungen dar. Die durchgezogene Linie stellt den Medianwert der Monte-Carlo-Simulationen dar. Die gepunktete Linie begrenzt die Quartile ± 25 % um den Median.

Innerhalb der Bewertungsgrenze „Last“ werden nur die Ströme berücksichtigt, die den Wärme- und Strombedarf der Gebäude in Offenburg decken. Aufgrund der Unsicherheiten lassen sich unabhängig vom Szenario keine Schlussfolgerungen hinsichtlich der Toxizität oder Ökotoxizität (Süßwasser) ziehen. Bei den anderen Indikatoren zeigen die WT + BAT-Szenarien eine höhere Auswirkung auf den Klimawandel. Die geringsten Auswirkungen ergeben sich bei H<sub>2</sub>-Speicherkapazitäten zwischen 10 und 100 m<sup>3</sup>, ohne nennenswerte Unterschiede innerhalb dieses Bereichs. Da diese Werte realistisch sind, lässt sich daraus schließen, dass die H<sub>2</sub>-Speicherkapazität nur geringe Auswirkungen auf die Bilanz hat, da die Szenariofamilien aus-

schlaggebender sind. Im Fall „Load + Excess“ kommt die nicht für Gebäude genutzte Stromüberproduktion hinzu. Hier kehrt sich die Rangfolge um: Die WT + BAT-Szenarien haben über alle Kategorien hinweg die geringsten Umweltauswirkungen.

Abbildung 5, die die Analyse nach Beiträgen zu den Auswirkungen darstellt, erklärt dieses Phänomen. Tatsächlich sind diese WT + BAT-Szenarien diejenigen, bei denen die Überproduktion von Strom am geringsten ist und maximal 20-25 % der Auswirkungen ausmacht. Die anderen Szenariengruppen, die durch das Vorhandensein einer Photovoltaikanlage definiert sind, produzieren sehr große Mengen an Strom, die für den direkten Bedarf der Gebäude nicht benötigt werden und aus dieser Perspektive bis zu 99 % der Auswirkungen ausmachen können.

Diese Überproduktion von Strom wird als in das Netz eingespeist betrachtet. Man kann davon ausgehen, dass sie die Produktion aus dem deutschen Strommix ersetzt, wodurch sich die vermiedenen Auswirkungen berechnen lassen, indem man die Auswirkungen dieser Strommenge, wenn sie aus dem nationalen Mix stammt, von der Bilanz „Load + Excess“ abzieht. Der Fall „Load + Excess – Grid (DE)“ kehrt die Rangfolge der Szenarien erneut um: Aufgrund der aktuellen Umweltauswirkungen des deutschen Strommixes führen Szenarien, die PV und damit eine starke Überproduktion beinhalten, *letztendlich* zu vielen vermiedenen Auswirkungen. Abbildung VII-4 zeigt schließlich ein Verhältnis von Systemauswirkungen zu vermiedenen Auswirkungen von 120 bis 200 für den Klimawandel, 4 bis 10 für die Ökotoxizität von Süßwasser, 14 bis 23 für die krebserregende Toxizität für den Menschen, 130 bis 160 für mineralische Ressourcen und 3 bis 7 für den Wasserverbrauch.

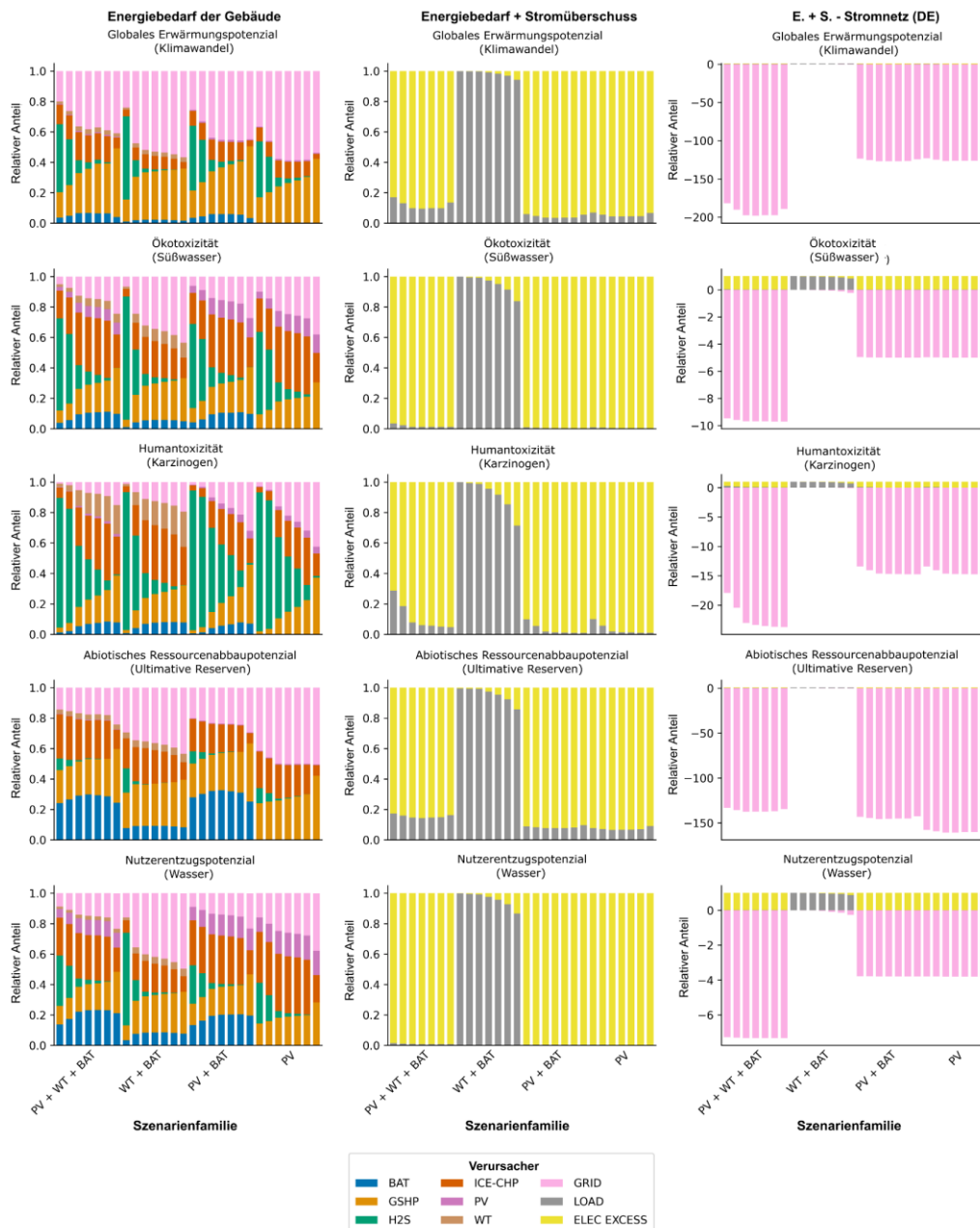


Abbildung VII-4: Beiträge der Teilsysteme zur Auswirkung des wasserstoffbasierten Energiesystems, nach Szenariofamilien. In jeder Familie erfolgt die Progression nach abnehmender Speicherkapazität von H<sub>2</sub>. Die Zeilen stellen die getestete Umweltkategorie dar. Die Spalten stellen die Grenze für die Berücksichtigung der Auswirkungen dar. In der Spalte „Load + Excess - Grid (DE)“ werden die vermiedenen Auswirkungen (negative Werte) von GRID im Verhältnis zur Summe „Load + Excess“ normiert. PV: Photovoltaik, WT: Windkraft, BAT: Batterie, ICE-CHP: Verbrennungsmotor für die Kraft-Wärme-Kopplung, GSHP: Erdwärmepumpe, PEMEL: Protonenaustauschmembran-Elektrolyseur, H<sub>2</sub>C/S: Kompression und Speicherung von H<sub>2</sub>, LOAD: Bedarf von Gebäuden, GRID: Stromnetz.

Diese Ergebnisse sind jedoch mit Vorsicht zu interpretieren:

- Die vermiedenen Auswirkungen hängen vom derzeit starken Einfluss des deutschen Strommixes ab. Im Rahmen der Dekarbonisierungsstrategie soll dieser Einfluss im Laufe der Zeit abnehmen, wodurch gleichzeitig auch die Bedeutung der vermiedenen Auswirkungen abnimmt.
- Eine erhebliche Überproduktion von Strom kann zu Problemen hinsichtlich der

Stabilität des Stromnetzes führen, wenn zum Zeitpunkt der Übertragung keine entsprechende Nachfrage besteht. Da die hier vorgestellte Analyse eine jährliche Integration darstellt, geht sie von der Annahme aus, dass eine Übertragung über das gesamte Jahr hinweg möglich ist, ohne dies jedoch zu garantieren.

### **VII.3.2.2.      Ansatz über den territorialen Metabolismus**

Der Ansatz des territorialen Metabolismus ermöglicht es, mehrere Punkte hervorzuheben, die bei dem CHP-Projekt zu beachten sind. Mangels genauer Daten bleiben diese Analysen explorativ und lassen keine endgültigen Schlussfolgerungen zu.

#### **VII.3.2.2.1.    Herausforderungen der Speicherung in Energienetzen**

Die EUCOR-Studie URCforSR (2022) unterstreicht die Bedeutung der Kopplung der Wasserstoffherzeugung an kohlenstoffarmen Strom. Obwohl dies teilweise außerhalb des Rahmens des CHP-Projekts liegt, bleibt diese Anforderung entscheidend. Die Studie empfiehlt, vorrangig industrielle Anwendungen anzustreben, die ökologisch und wirtschaftlich effizienter sind, bevor man sich mit Schwerlastmobilität oder saisonübergreifender Speicherung befasst. Letztere ist zwar technisch mit Wasserstoff möglich, bleibt jedoch kostspielig und wird nur in stark intermittierenden Netzen entscheidend (Shirizadeh et al. 2022), was noch nicht auf den europäischen Kontext zutrifft. Es gibt weitere konkurrierende Optionen (Staudämme, thermische/chemische Speicherung, Methanisierung) mit unterschiedlichem Reifegrad.

#### **VII.3.2.2.2.    Wirtschaftliche Analyse**

Die wirtschaftliche Bewertung von Wasserstoff bleibt ungewiss. Während einige Studien optimistisch sind (Vartiainen et al., 2021), weisen andere (Gorbatko, 2023; Pécout, 2024) auf Grenzen hin. Die hohen Investitionskosten erfordern einen intensiven Betrieb der Anlagen ( $\approx 8000$  h/Jahr), was mit einer intermittierenden Nutzung unvereinbar ist. Die für die Bewertung von Wasserstoff als Flexibilitätsinstrument erforderlichen Marktdaten sind noch zu rar. Darüber hinaus ist die Elektrolyse nach wie vor drei- bis fünfmal teurer als die Dampfreformierung. Vor diesem Hintergrund erscheint die Verbreitung kleiner Anlagen verfrüht; es wäre wahrscheinlich besser, die Anstrengungen auf gut ausgestattete Demonstrationsanlagen zu konzentrieren und dabei die Kosten (Elektrolyseur-Ausgang, Kompression, Lieferung) zu klären.

#### **VII.3.2.2.3.    Logistische Analyse**

Für die Versorgung sind drei Konfigurationen möglich: Produktion vor Ort, Verteilung über ein Netz oder Lieferung auf der Straße. Die Produktion vor Ort maximiert die Autonomie, schränkt jedoch die gemeinsame Nutzung ein. Umgekehrt ermöglicht die zentralisierte Produktion Skaleneffekte, insbesondere ab einer bestimmten kritischen Größe (Vartiainen et al., 2021). Die logistische Entscheidung muss sich auf eine technisch-wirtschaftliche Analyse stützen, die

Nutzung, Standort und Grenzkosten berücksichtigt, die jedoch noch nicht ausreichend entwickelt ist.

#### **VII.3.2.2.4. Räumliche Analyse**

Die Installation der CHP-Engine mit einer Leistung von 1 MW pro Einheit unterliegt erheblichen Standortbeschränkungen. Diese Art von Anlage ist nur in Umgebungen sinnvoll, in denen die Wärme- und/oder Stromnachfrage ausreichend und stabil ist, wie z. B. in Industriegebieten oder bestimmten großen Dienstleistungszentren (Verwaltungszentren, Hochschulen, Schwimmbäder). Die Integration in Wärmenetze würde die territoriale Relevanz der KWK stärken, indem die im Rahmen der Kraft-Wärme-Kopplung erzeugte Wärme effizient genutzt wird. Eine räumliche Analyse, die Nachfrage, Zugänglichkeit und Verbundpotenzial miteinander verknüpft, ist daher unerlässlich.

#### **VII.3.2.3. Schlussfolgerungen**

Der Ansatz des territorialen Metabolismus zeigt die zahlreichen Hindernisse für die Wasserstoffbranche auf, insbesondere in wirtschaftlicher und infrastruktureller Hinsicht. Trotz seiner vielversprechenden Aussichten im Bereich der Dekarbonisierung bleibt die Verwendung von Wasserstoff in der dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung ungewiss. Vorrang sollte der Forschung und Entwicklung eingeräumt werden, und zwar durch gut ausgestattete Demonstrationsanlagen und eine bessere Verbreitung der technisch-wirtschaftlichen Daten. Die derzeitige mangelnde Transparenz behindert die Entwicklung solider territorialer Strategien und kann zu unangemessenen Investitionen führen.

#### **VII.3.2.4. Daten und Kenntnisse über Energie- und Mobilitätsströme im Oberrheinraum**

##### **Bestandsaufnahme der Datensätze**

Die Datenbestandsaufnahme ermöglichte es, 59 Datenquellen zu identifizieren, um die Herausforderungen im Bereich Energie und Mobilität im Oberrheingebiet zu beschreiben. Wie bereits in früheren Arbeiten (Ribon et al., 2021) hervorgehoben wurde, stellen wir auch eine starke Heterogenität der verfügbaren Daten auf beiden Seiten der Grenze fest. Dies macht die grenzüberschreitende Analyse besonders komplex. Letztendlich sind von den inventarisierten Quellen nur die Daten zu den Ladestationen für Elektrofahrzeuge wirklich nutzbar, um einen homogenen Datensatz zu erstellen, der das gesamte Gebiet des Oberrheins abdeckt. Diese Arbeiten werden im Arbeitspaket Nr. 3 näher beschrieben.

In einem anderen Zusammenhang erweisen sich neben den institutionellen Daten auch die Daten von OpenStreetMap (OSM) als besonders interessant. Diese freie, weltweite und kollaborative geografische Datenbank weist eine Qualität auf, die mit der von institutionellen Quellen vergleichbar ist. Im Oberrheingebiet sind bestimmte Ladestationen in OSM vorhanden,

aber nicht in den offiziellen Daten enthalten, und umgekehrt. Die von den Produzenten öffentlicher Daten anerkannten Grenzen der Zuverlässigkeit verstärken das Interesse an OSM als ergänzende, grenzüberschreitende und wiederverwendbare Ressource für die Analyse von Territorial- und Energiesystemen (Wided et al., 2017; Arderne et al., 2020; Xiong et al., 2024).

### **Sinamet-Webplattform**

Ergänzend zur Bestandsaufnahme haben wir eine Webplattform zur Datenvisualisierung eingerichtet, die auf der Open-Source-Softwarebibliothek *Sinamet* basiert. Die Plattform ist unter folgender Adresse zugänglich: <https://app.sinamet.tech/environ/co2inno/>. Einige Screenshots sind im Anhang zu finden.

Die Plattform wertet einige der im Inventar erfassten Datensätze durch verschiedene konfigurierbare Visualisierungen auf. Wie bereits erwähnt, war es aufgrund der Heterogenität der Daten nicht möglich, Visualisierungen zu erstellen, die das gesamte Gebiet des Oberrheins abdecken. Stattdessen haben wir eher ein Patchwork, das je nach Thema Teile des Gebiets abdeckt.

## **VII.4. Probleme & Risiken**

### **VII.4.1. Transversal**

#### **Prospektive Lebenszyklusanalyse**

Die für die „Zukunftsprognose“ der Ökobilanzdaten verwendeten IAM-Modelle verfügen nicht über eine nationale Auflösung, die jedoch von entscheidender Bedeutung ist, da der nationale Strommix den untersuchten Lebenszyklus stark beeinflusst. Das Tool „Premise“ ermöglicht die Integration nationaler Szenarien in prospektive Ökobilanzen, wie beispielsweise für die Schweiz (Hahn Menacho et al., 2025). RTE arbeitet an einer Anpassung für Frankreich, die jedoch noch nicht veröffentlicht wurde, und in Deutschland gibt es keine ähnliche Initiative. Um Frankreich und Deutschland in der Ökobilanz zu vergleichen, sind wir daher auf eine statische, nicht prospektive Studie mit den verfügbaren nationalen Strommischen beschränkt.

### **VII.4.2. Stilllegung des Kernkraftwerks Fessenheim**

#### **VII.4.2.1. Erstellung des Material- und Energieflussinventars für die Lebenszyklusanalyse**

Die größte Schwierigkeit des Projekts bestand darin, eine zuverlässige Bestandsaufnahme der Material- und Energieflüsse während des Rückbaus zu erstellen. Dem ursprünglichen Bericht von EDF (2020) fehlten Zahlenangaben, sodass wir für unsere Pilot-LCA-Studie auf grobe Schätzungen zurückgreifen mussten. Die aktualisierte Fassung, die zusammen mit einer während der öffentlichen Anhörung zugänglichen Folgenabschätzung vorgelegt wurde, enthält zwar mehr Details, ist aber nach wie vor unzureichend. Die aktuelle annualisierte Bestandsaufnahme für die 15 Jahre dauernde Stilllegung basiert daher auf mehreren Annahmen, was

die Ergebnisse der bevorstehenden prospektiven Studie zusätzlich mit Unsicherheit behaftet.

#### **VII.4.2.2. Rechtliche Aspekte**

Da es keinen expliziten rechtlichen Rahmen für die Wiederverwendung von Bestandsmaterialien bei einem Rückbau gibt, mussten die Leitprinzipien verschiedener Rechtsordnungen und die Hinweise aus einer Vielzahl technischer Normen analysiert werden. Was das Recycling von radioaktiven Abfällen (TFA) betrifft, gibt es im französischen Recht nur wenig Erfahrung. Die Frage der Haftung der beteiligten Parteien im Falle von Schäden durch Radioaktivität im Rahmen der Wiederverwendung von Materialien wird Gegenstand einer künftigen Veröffentlichung sein.

#### **VII.4.2.3. Observatoire des Impacts du Démantèlement**

Die Rolle als Schnittstelle und Vertrauensbildner erfordert eine gewisse Organisation, um die Diskussionsräume, die entstehen können, zu moderieren. Dies wirft die Frage nach der Sicherung der Arbeitsplätze innerhalb der Beobachtungsstelle auf, die im Kontext der Haushaltslage im Bereich der Hochschulbildung und Forschung schwer zu garantieren ist. Allerdings haben die Befragten, die Mandate in Forschungsförderungsorganisationen innehaben, Interesse an einer Beobachtungsstelle für den Rückbau gezeigt.

#### **VII.4.2.4. Integration zwischen Lebenszyklusanalyse und technisch-ökonomischer Analyse**

Mehrere Hindernisse bremsen die Integration von LCA- und TEA-Ansätzen in Open Source. Einerseits gibt es technische Schwierigkeiten: *OpenModelica* hat Probleme mit der Verwaltung von Python-Frameworks oder Excel-Dateien, die aus LCA-Ergebnissen stammen, und die Optimierung des nichtlinearen Modells erfordert intensive Berechnungen. Andererseits gibt es praktische Hindernisse: Die LCA vergleicht oft einfache Funktionen (z. B. 1 kWh Strom, 1 MJ Wärme, 1 kg Wasserstoff) mit typischen Infrastrukturen, während die TEA ein bestimmtes lokales System analysiert. Die Verbindung von LCA und TEA erfordert daher eine erhebliche Anpassung zwischen den typischen Inventaren in der LCA und den tatsächlichen Dimensionierungen des Systems in der TEA.

#### **VII.4.2.5. Kenntnis des territorialen Stoffwechsels**

Die größte Schwierigkeit bei der Untersuchung des territorialen Stoffwechsels besteht darin, ausreichend detaillierte Daten zu den in den Gebieten mobilisierten Material- und Energieflüssen zu sammeln. Diese Daten werden von verschiedenen Akteuren (Kommunen, private Betreiber, staatliche Stellen) erstellt, sind in ihrem Format heterogen und teilweise vertraulich. Die verfügbaren Daten weisen in der Regel eine geringe räumliche und zeitliche Granularität auf und ermöglichen es nicht, die für die Analyse spezifischer Anlagen erforderliche Genauig-

keit zu erreichen. Dieser Mangel an Granularität beeinträchtigt nicht nur das genaue Verständnis der territorialen Wechselwirkungen, sondern auch die Möglichkeit, Transformationsszenarien zu simulieren oder die systemischen Auswirkungen der untersuchten Projekte zu messen.

## **VII.5. Abweichungen**

### **VII.5.1. Stilllegung des Kernkraftwerks Fessenheim**

#### **VII.5.1.1. Weiterentwicklung der Ökobilanzforschung auf der Grundlage der tatsächlich gewonnenen Daten**

Das Projekt zielte zunächst darauf ab, die beim Rückbau anfallenden VLLW/TFA-Abfälle und ihren Zusammenhang mit dem Technocentre de transition industrielle de Fessenheim (Technologiezentrum für industriellen Wandel in Fessenheim) im Detail zu untersuchen. Da jedoch keine aussagekräftigen Daten rechtzeitig vorlagen, konnte die LCA-Studie vor Projektende nicht abgeschlossen werden. Es selbst ist die Quantifizierung der durch die Wiederverwendung der Gebäude des Kernkraftwerks vermiedenen Auswirkungen aufgrund der Zeit, die für die Erstellung einer zuverlässigen jährlichen Bestandsaufnahme der Material-/Energieflüsse über 15 Jahre erforderlich ist, und der Schwierigkeiten bei der Zusammenarbeit mit EDF noch unvollständig. Diese Studien werden jedoch in den Monaten nach Abschluss des Projekts fertiggestellt werden.

Umgekehrt konnte die ursprünglich nicht vorgesehene Analyse der radiologischen Auswirkungen und deren Modellierung in LCA und HERA dank der Beschaffung relevanter Daten, die Fallstudien und methodische Fortschritte kombinieren, durchgeführt werden.

#### **VII.5.1.2. Beobachtungsstelle für die Auswirkungen der Stilllegung**

Die Schwierigkeit des Zugangs zu Daten für LCA-Studien sowie der Mangel an Fachliteratur zum rechtlichen Rahmen der Stilllegung haben im Laufe des Projekts Überlegungen zur Relevanz der Schaffung einer akademischen Beobachtungsstelle für Stilllegungen angeregt. Eine solche Einrichtung würde die – äußerst wichtige – Komplementarität zwischen den Akteuren (Wissenschaft, Industrie, Regulierungsbehörden, Kommunen usw.) stärken, um die mit der Stilllegung verbundenen sozioökologischen Veränderungen langfristig zu charakterisieren und die Strategien für den Übergang von Kernkraftwerksstandorten zu steuern. Dieser Teil ergänzt das ursprüngliche Projekt, ohne dessen ursprüngliche Ziele zu beeinträchtigen. Er ist als Meta-Analyse der im Rahmen von CO2InnO geleisteten Arbeit zu verstehen, die es ermöglicht, sowohl die im Laufe dieses Projekts gewonnenen Erkenntnisse zu valorisieren als auch dessen Kontinuität zu gewährleisten.

## VII.5.2. **Auf H<sub>2</sub> basierende Energielösung**

### VII.5.2.1. **Reduzierung des Umfangs der Lebenszyklusanalyse**

Dieser Teil unserer Arbeit ergänzt das ursprüngliche Projekt des Loses Nr. 7, das sich auf die Stilllegung des Kernkraftwerks Fessenheim konzentriert. Unser Ziel, das sich aus dem Austausch mit den anderen CO<sub>2</sub>InnO-Gruppen (insbesondere Los Nr. 2) ergab, war die Durchführung einer prospektiven parametrischen LCA-Studie, deren Ergebnisse in das *OpenModelica-Modell* einfließen könnten, um mehrere ökologische und technisch-wirtschaftliche Parameter zu optimieren. Letztendlich haben wir uns für den umgekehrten Ansatz entschieden: Berechnung der Umweltauswirkungen durch LCA in Python auf der Grundlage von Flusssimulationen aus dem TEA-Modell in *OpenModelica*. Diese Ergänzung hatte keinen Einfluss auf die Gesamtziele des Projekts, hat aber die Ziele von Los Nr. 2 in relevanter Weise bereichert.

## VII.6. **Perspektiven**

### VII.6.1. **Stilllegung des Kernkraftwerks Fessenheim**

#### VII.6.1.1. **Lebenszyklusanalyse**

Die Schlussfolgerung der prospektiven Ökobilanzstudie, die über das offizielle Ende des Projekts hinausgeht, dürfte eine erste Quantifizierung der vermeidbaren Auswirkungen liefern, die durch die Wiederverwendung der Gebäude des Kernkraftwerks Fessenheim für das Technocentre erzielt werden können. Diese Ergebnisse könnten während des Rückbaus jährlich verfolgt werden, wenn der Austausch mit EDF über das OHM Fessenheim intensiviert wird. Ein Aspekt, der hier nicht berücksichtigt wurde, ist die Phase vor dem Rückbau (2020-2025), einschließlich der Entsorgung abgebrannter Brennelemente und der Umgestaltung, deren Berücksichtigung einen blinden Fleck in der Umweltanalyse des Endes der Lebensdauer des Kernkraftwerks vermeiden würde.

#### VII.6.1.2. **Beobachtungsstelle für die Auswirkungen des Rückbaus**

Ziel ist die Entwicklung der Beobachtungsstelle für die Auswirkungen des Rückbaus innerhalb des OHM-Fessenheim, insbesondere durch den Aufbau einer internen Struktur für die Datenerfassung und -verwaltung und die Stärkung ihrer Rolle als Schnittstelle zwischen den verschiedenen Akteuren.

### VII.6.2. **Auf H<sub>2</sub>basierende Energielösung**

#### VII.6.2.1. **Lebenszyklusanalyse**

Angesichts der genannten Einschränkungen erscheint es sinnvoll, eine Optimierung unter Umweltgesichtspunkten in Betracht zu ziehen:

- Direkt über den LCA-Ansatz mit der kürzlich veröffentlichten Bibliothek PULPO

(Lechtenberg et al., 2024), einem linearen Ansatz, der den Rechenaufwand reduziert und gleichzeitig die Qualität gewährleistet, vorbehaltlich der Einschränkungen, die sich aus der Machbarkeitsstudie ergeben.

- Durch den nachträglichen Vergleich einer größeren Anzahl von Szenarien aus dem TEA-Modell in *OpenModelica*, was eine vollständige Automatisierung der Konvertierung der TEA-Modellausgaben in Ströme erfordert, die den verschiedenen Ebenen der LCA-Modellstruktur zugeordnet sind.

Darüber hinaus hängt die Lebenszyklusanalyse auch von den Bedingungen für die Produktion und den Transport von Wasserstoff ab, was eingehende räumliche Analysen zur Optimierung der Dimensionierung und Standortwahl rechtfertigt.

## **VII.7. Empfehlungen für die Roadmap oder politische Maßnahmen:**

### **VII.7.1. Stilllegung des Kernkraftwerks Fessenheim**

#### **VII.7.1.1. Lebenszyklusanalyse**

Unsere Ergebnisse zeigen, dass LCA-Studien die regulatorischen Folgenabschätzungen im Nuklearbereich ergänzen. Der Zugang zu Daten bleibt jedoch schwierig und hängt oft vom Willen der Betreiber ab, die je nach Kontext (Untersuchung, öffentliche Debatte) selektiv kommunizieren. Es gibt zwei politische Optionen: entweder LCA-Studien gesetzlich vorschreiben, was ihre Durchführung, aber nicht unbedingt ihre Transparenz gewährleisten würde, oder den Austausch zwischen akademischen und industriellen Forschern zu verstärken, unterstützt durch Institutionen, um ihre Unabhängigkeit zu gewährleisten. Das OHM Fessenheim scheint ein geeignetes Instrument zu sein, um diesen zweiten Ansatz zu fördern.

#### **VII.7.1.2. Auf rechtlicher Ebene**

Es wäre angebracht, einen expliziten Rechtsrahmen zu schaffen, der an die verschiedenen Hypothesen der Wiederverwendung eines Kernkraftwerksstandorts angepasst ist und es den zuständigen Behörden ermöglicht, bestimmte Wiederverwendungsprojekte vorschreiben und nicht allein von der Entscheidung der Betreiber abhängig zu sein.

### **VII.7.2. Auf H<sub>2</sub>basierende Energielösung**

#### **VII.7.2.1. Verbreitung von Wissen über Energiesysteme**

Die Energiewende basiert auf der kollektiven Fähigkeit, komplexe Energiesysteme zu verstehen, zu steuern und umzugestalten. Diese Fähigkeit hängt vor allem von der Verfügbarkeit, Qualität und Verbreitung der territorialen Daten ab, die diese Systeme beschreiben. Um sie zu stärken, wurden mehrere politische Hebel identifiziert.

Förderung der Öffnung technisch-wirtschaftlicher Daten im Zusammenhang mit Wasserstoff und Energiesystemen

Die Entwicklung neuer Branchen wie der Wasserstoffbranche erfordert eine koordinierte strategische Steuerung zwischen öffentlichen und privaten Akteuren. Technisch-wirtschaftliche Daten (Kosten, Erträge, Abschreibungen, Auslastungsfaktoren) sind jedoch oft nicht zugänglich. Auch wenn der Schutz der Interessen der Industrie geltend gemacht wird, sollte die öffentliche Unterstützung auf der Transparenz der Schlüsseldaten beruhen.

### **Die politische Dimension von Daten anerkennen**

Daten sollten nicht nur als technische Ressource betrachtet werden, sondern als Gegenstand der öffentlichen Politik, der für die territoriale Kenntnis von wesentlicher Bedeutung ist und dessen Produktions- und Verbreitungsweisen die Gesellschaft strukturieren (Desrosières, 2008). Die Anerkennung dieser strategischen Dimension kann sich in der Schaffung spezieller territorialer Instanzen, einem rechtlichen Rahmen für Daten von allgemeinem Interesse, der Aufnahme von „Datenklauseln“ in öffentliche Aufträge, der Akkulturation von Beamten oder Maßnahmen zur Förderung der Aneignung von Informationen durch die Bürger niederschlagen.

Unterstützung digitaler Gemeingüter für das Wissen über Energiesysteme

Die offene und kollaborative Kartografie von Infrastrukturen spielt eine zentrale Rolle bei der Darstellung von Energiesystemen und der Verbreitung dieses Wissens unter Forschern, Unternehmen, Bürgern oder Institutionen. Das Projekt OpenStreetMap bietet als globale digitale Gemeingüter ein beispielloses Potenzial für die Kartierung von Energienetzen, insbesondere in Kontexten, in denen offizielle Daten fehlen, fragmentarisch oder unzugänglich sind. Die Unterstützung dieser Initiativen – durch Finanzmittel, Datenbeiträge oder die Integration in Ausbildungen – würde die Forschung zugunsten der ökologischen Wende stärken.

### **Auf territoriale Beobachtungsstellen zurückgreifen**

Die Analysen des territorialen Stoffwechsels und die Energiebilanzen mobilisieren eine wachsende Menge komplexer Daten, die spezielle Kompetenzen erfordern. Ihre Komplexität macht die Schaffung nachhaltiger Systeme erforderlich, um diese Informationen zu strukturieren, zu zentralisieren und zugänglich zu machen. Territoriale Beobachtungsstellen sind wichtige Instrumente, um die Kontinuität des Wissens zu gewährleisten, die Erhebung und Analyse zu bündeln und die Kompetenz der lokalen Akteure bei der Ausarbeitung von Energiekonzepten zu stärken.

## **VII.8. Tabelle zur Zielerreichung**

### **VII.8.1. Art der Maßnahme 2**

Maßnahme 6: Nutzung eines Informationssystems zur Analyse von Strömen (SINAMET) für Vergleiche und die territoriale Kontextualisierung

Ergebnis: Interaktive Webplattform; Analysebericht zum Gebiet unter Verwendung des Rahmens des territorialen Metabolismus.

Realisierung: Erstellung eines Inventars der Datensätze, die in die Webplattform eingespeist werden können; Einführung der Sinamet-Webplattform Anfang 2024 (<https://app.sinamet.tech/environ/co2inno/>) und Erstellung einer Reihe von Visualisierungen auf der Plattform; Koproduktion des Datensatzes zu den Ladestationen im Oberrhein; Analysebericht zu den Herausforderungen „Flux et Territoires“ für das CHP-Projekt.

#### VII.8.2. **Art der Maßnahme 4**

Maßnahme 5: Rechtlicher Rahmen für eine Strategie zur Umwandlung des Kernkraftwerks Fessenheim

Ergebnis: Bericht über den rechtlichen Rahmen für eine Strategie zur Umwandlung des Kernkraftwerks Fessenheim

Realisierung: Abschlussbericht im September nach Abschluss der noch laufenden Arbeiten.

#### VII.8.3. **Art der Maßnahme 7**

Maßnahme 1: Charakterisierung der Materialien und Infrastrukturen des Kernkraftwerks Fessenheim

Ergebnis: Bericht über die Bestimmung des Systems und der Daten zum Inventarfluss (Liste der Materialien und Infrastrukturen entsprechend dem Grad der Restkontamination).

Realisierung: 2 Lebenszyklusinventare (LCI) im Rahmen wissenschaftlicher Veröffentlichungen erstellt.

1. Eine erste liefert eine Rahmenschätzung auf der Grundlage des ursprünglich verfügbaren Stilllegungsberichts (EDF, 2020) im Rahmen der LCA-Pilotstudie (Iguider et al., 2024).
2. Eine zweite, annualisierte Schätzung, die zusätzlich die Emissionen von Radionukliden, die Freisetzung chemischer Substanzen und den Wasserverbrauch berücksichtigt, basierend auf der aktualisierten Fassung des Rückbauberichts (EDF, 2024a) und der dazugehörigen Studie zu den regulatorischen Auswirkungen (EDF, 2024b) im Rahmen der prospektiven LCA-Studie, die derzeit fertiggestellt wird (Fertigstellung bis zum Ende des CO2Inno-Projekts, wird zu einer zusätzlichen wissenschaftlichen Veröffentlichung führen).

Maßnahme 2: Lebenszyklusanalyse der Stilllegung

Ergebnis: 1 Veröffentlichung.

Realisierung: Mehrere wissenschaftliche Veröffentlichungen und Mitteilungen (siehe vollständige Liste im Anhang). Besonders hervorzuheben sind zwei bereits veröffentlichte Artikel in internationalen Fachzeitschriften mit Peer-Review: eine Pilot-LCA-Studie zur vollständigen

Stilllegung und eine prospektive LCA-Studie mit Schwerpunkt auf den radiologischen Auswirkungen. Ein dritter Artikel, der derzeit verfasst wird, befasst sich mit der Ausweitung des prospektiven LCA-Ansatzes auf den gesamten Rückbau.

Maßnahme 3: Umweltstudie zu verschiedenen Szenarien für den industriellen Wandel des Standorts Fessenheim

Ergebnis: Bericht über die Szenarien für den industriellen Wandel des Standorts Fessenheim mit Bewertung der Umweltauswirkungen in Abhängigkeit von der Recycling-/Wiederverwendungsquote für die Entwicklung neuer Energielösungen, 1 Veröffentlichung

Realisierung: Zusammenfassender Bericht über den aktuellen Stand der Entwicklungen am Standort Fessenheim.

## **VII.9. Zusätzliche Ziele**

### **VII.9.1. Analyse des Lebenszyklus des KWK-Systems**

Realisierung:

Eine Reihe von Python-Skripten für:

- die Ergebnisse des von der Arbeitsgruppe 2 entwickelten *OpenModelica-Models* zu verarbeiten (Bereinigung)
- die Strom-, Wärme- und Wasserstoffflüsse zwischen den Teilsystemen der modellierten Energielösung zu rekonstruieren
- Visualisierung der Ergebnisse in Form von interaktiven Flussdiagrammen, die für die Öffentlichkeit zugänglich sind

Mehrere wissenschaftliche Veröffentlichungen und Mitteilungen (siehe vollständige Liste im Anhang). Besonders hervorzuheben ist ein Artikel in einer internationalen Fachzeitschrift mit Peer-Review, der derzeit fertiggestellt wird.

### **VII.9.2. Akademisches Observatorium für Stilllegungen**

Realisierung: Verfassen eines Weißbuchs, in dem die Herausforderungen und Merkmale eines solchen Observatoriums hervorgehoben werden, um die Durchführung akademischer Forschungsarbeiten zum Rückbau zu fördern.