

Anpassung der Binnenhäfen der Oberrheinregion an den Klimawandel

Leitfaden und Erkenntnisse aus dem CRANE-Projekt



Studienbericht

Juni 2026

Cerema¹, eine öffentliche Referenzstelle für Raumplanung, unterstützt den Staat, die Gebietskörperschaften und Unternehmen bei der Anpassung der Gebiete an den Klimawandel.

Das Cerema spielt eine Schlüsselrolle bei der Ausarbeitung und Umsetzung nationaler politischer Maßnahmen und territorialer Projekte, die auf das Klima der Zukunft ausgerichtet sind, in sechs Tätigkeitsbereichen: Raumplanung und territoriale Strategien, Bauwesen, Mobilität, Verkehrsinfrastruktur, Umwelt und Risiken, Meer und Küstengebiete.

Mit multidisziplinären Teams und 27 Standorten in Frankreich und den Überseegebieten verfügt das Cerema über einen ganzheitlichen Ansatz, um zu beraten, innovativ zu sein und zusammenzuführen.

www.cerema.fr

¹ Cerema ist eine öffentliche Einrichtung, die den für Raumordnung und ökologischen Wandel zuständigen Ministerien untersteht

Climate Resilience and Adaptation for Upper Rhine ports (CRANE)

Anpassung der Häfen der Oberrheinregion an den Klimawandel

Auftraggeber: Port Autonome de Strasbourg

Autoren: David LUTTENAUER, Léo THOMAS

Verantwortliche für den Bericht

David LUTTENAUER und Léo THOMAS – Abteilung für Raumordnung, Mobilität und Infrastruktur – Gruppe „Territoires et Villes en Transition“

Direction Territoriale Est – Promenade du Saulcy, 57000 Metz, FRANCE

Versionshistorie des Dokuments

Version	Datum	Kommentar
V1	16/06/2026	Version initiale

Referenzen

Aktenzeichen / NOVA: 23-ET-0466

Nom	Service	Rôle et fonction	Date et Visa
David LUTTENAUER	DTerEst/DTMI/TVT	Autor und Projektleiter	
Léo THOMAS	DTerEst/DTMI/TVT	Autor und Projektleiter	24/04/2026 - LT
Edouard WOLFF	DTerEst/AS/VPI	Mitwirkender	28/05/2026 - EW
Kamila BENZAADI	DTerEst/AN/ERA	Mitwirkender	04/06/2026 - KB
Kevin SIEBERT	DTerEst/AN/OA	Mitwirkender	28/05/2026 - VR
Koffi KOUASSI	DTecREM/DPN/IP	Mitwirkender	01/06/2026 - KK
Léa GAROT	DTerEst/DTMI/TVT	Mitwirkender	30/06/2026 - LG
Marie GEORGES	DTerEst/DTMI/TVT	Mitwirkender	30/06/2026 - MG
Vincent REMY	DTerEst/AN/ERA	Mitwirkender	28/05/2026 - VR
Jeanne-Marie GOUIFFES	DTecREM/DPN	Lektorin	01/06/2026 - JMG
Karine DREYER	DTerEst/DTMI/TVT	Valideur : Gruppenleiterin	
Jean-Luc BAUER	DTerEst/DTMI	Valideur : Produktionsleiter	

Zusammenfassung der Studie

Climate Resilience and Adaptation for Upper Rhine ports (CRANE)

Anpassung der Häfen der Oberrheinregion an den Klimawandel

Das Projekt CRANE (Climate Resilience and Adaptations for Upper Rhine Ports) ist ein grenzüberschreitendes Projekt, das in französischer und deutscher Sprache durchgeführt wurde und es ermöglichte, die Auswirkungen des Klimawandels **zu antizipieren** und die Umsetzung eines **Anpassungskonzepts** in **sieben Binnenhäfen** der Oberrheinregion vorzubereiten: Basel, Karlsruhe, Kehl, Ludwigshafen, Mannheim, Mulhouse und Straßburg. Diese Arbeit wurde im Rahmen einer Partnerschaft zwischen deutschen **Fraunhofer-Institut IAIS** und dem **Cerema** durchgeführt. Das Projekt wurde vom **Port Autonome de Strasbourg** geleitet und im Rahmen des Programms **INTERREG Oberrhein** zu 60 % von der Europäischen Union kofinanziert.

Das Projekt ermöglichte es, **den Anpassungsprozess** der beteiligten Häfen **zu strukturieren** (im Rahmen eines partizipativen Ansatzes und die gemeinsame Entwicklung von Anpassungsstrategien), dessen Umsetzung zu konkretisieren, **die Basis der** verfügbaren **Maßnahmen** zu **erweitern** und **deren** Umsetzungsmodalitäten **zu präzisieren**, während gleichzeitig die verschiedenen Hafenakteure **sensibilisiert wurden**. Dieses Projekt hat zudem dazu beigetragen, die durch den Klimawandel bedingten **Unsicherheiten** hinsichtlich des Betriebs der Hafengebiete zu verringern. Der verbleibende Unsicherheitsgrad, der sich aus der Verwendung von Klimasimulationen ergibt, wurde **vollständig in die angewandte Methode integriert** und wird bei den mit jedem Hafen festgelegten Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt.

5 bis 10 Schlüsselbegriffe aus der Studie

Klimawandel	Wasserressourcen
Anpassung	Gebiet
Anpassungspfad	Binnenhäfen
Hafenterminals	Wasserstraßen
Infrastruktur	Resilienz

Veröffentlichungsstatus der Studie

Alle im Rahmen der SCSP (Subvention für öffentliche Dienstleistungen) erstellten Ergebnisse müssen im OPEN ACCESS veröffentlicht werden.

Nur die im CRPA (Gesetz über die Beziehungen zwischen der Öffentlichkeit und der Verwaltung) aufgeführten Ausnahmen können diese Offenlegung einschränken.

Auf der Grundlage dieser Informationen wird gebeten, den Veröffentlichungsstatus der Studie unten anzugeben:

- ☒ **Freier Zugang:** Dokument im Internet öffentlich zugänglich
- ☐ **Eingeschränkter Zugang:** Dokument, das nur für Mitarbeiter des Cerema zugänglich ist

Hintergrund und Ziel der Studie

Das Projekt **CRANE** (Climate Resilience and Adaptations for Upper Rhine Ports) stand im Kontext eines immer deutlicher werdenden **Klimawandels**, der mit einer Zunahme und Verschärfung extremer Wetterereignisse einhergeht. Der Rheinschifffahrt wurden insbesondere durch besonders starke **Niedrigwasserperioden** in den Jahren 2018 und 2022 erhebliche Auswirkungen zugefügt. Diese Niedrigwasserperioden führten zu Unterbrechungen der Schifffahrt, was erhebliche Störungen der Logistikketten zur Folge hatte, mit negativen Auswirkungen auf die Wirtschaftsakteure der Region. Gleichzeitig können extreme Wetterereignisse (Hitzewellen, Starkniederschläge, Stürme usw.) auch den **Hafenbetrieb** selbst beeinträchtigen, indem sie die Infrastruktur und die Arbeitsbedingungen des Personals beeinträchtigen.

Das Projekt zielte daher darauf ab, diesen Schwierigkeiten vorzugreifen und einen **Ansatz zur Anpassung** an den Klimawandel zu entwickeln, um die **Kontinuität der Hafenaktivitäten** zu gewährleisten. **Sieben Binnenhäfen** der Oberrheinregion waren beteiligt: Basel, Karlsruhe, Kehl, Ludwigshafen, Mannheim, Mulhouse und Straßburg. Das Projekt wurde vom **Port Autonome de Strasbourg** geleitet und im Rahmen einer Partnerschaft zwischen dem deutschen **Fraunhofer-Institut IAIS** und dem **Cerema** durchgeführt. Es wurde zudem zu 60 % von der Europäischen Union im Rahmen des Programms **INTERREG Oberrhein** kofinanziert.

SOMMAIRE

1	METHODIK DES PROJEKTS CRANE	8
1.1	Identifizierung und Analyse von Klimarisiken	8
1.2	Anpassung der Häfen an den Klimawandel	10
1.2.1	Identifizierung von Anpassungsmaßnahmen	10
1.2.2	Die gemeinsame Entwicklung von Anpassungspfaden	12
1.2.3	Fazit zur angewandten Methode	13
2	WICHTIGSTE ERKENNTNISSE DES PROJEKTS	14
2.1	Hafenterminals	14
2.1.1	Umschlag: Anlegen und Stabilität der Schiffe am Kai	14
2.1.2	Umschlag: Kräne und Umschlaggeräte	16
2.1.3	Lagerung: Containerterminals, überdachte und Freilager	18
2.1.4	Fazit zu den Hafenterminals	20
2.2	Infrastrukturen	20
2.2.1	Wasserseitige Infrastruktur	20
2.2.2	Eisenbahninfrastruktur	22
2.2.3	Straßeninfrastruktur	25
2.2.4	Fazit zur Infrastruktur	27
2.3	Wasserressourcen	27
2.3.1	Niedrigwasserstände und sinkende Wasserstände des Rheins	27
2.3.2	Hochwasser und Starkniederschläge	29
2.3.3	Dürre – Wasserverbrauch der Hafenunternehmen	31
2.3.4	Schlussfolgerungen zur Wasserressource	32
2.4	Einbindung der Häfen in ihr Umland	32
3	FAZIT	34
4	ANHÄNGE	35
4.1	Literaturverzeichnis	35
4.1.1	Methodik	35
4.1.2	Terminals	35
4.1.3	Infrastruktur	36
4.1.4	Wasserressourcen	37
4.1.5	Territorium	38

EINLEITUNG

Dieses Dokument ist ein Leitfaden, der die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Projekt CRANE (Climate Resilience and Adaptations for Upper Rhine Ports) zusammenfasst und Ansätze zur Anpassung an den Klimawandel für die Binnenhäfen der Oberrheinregion aufzeigt.

Das **CRANE-Projekt** stand im Kontext eines immer deutlicher werdenden Klimawandels, der eine Zunahme und Verschärfung extremer Wetterereignisse mit sich bringt. Dieser Kontext führt zu Störungen in **den Logistikketten**, von denen auch Binnenhäfen und Wasserstraßen nicht verschont bleiben. Extreme Wetterereignisse (Hitzewellen, Starkniederschläge, Stürme usw.) können den **Hafenbetrieb** direkt beeinträchtigen, indem sie die Infrastruktur und die Arbeitsbedingungen des Personals beeinträchtigen. Ferner können sich auch die **Schifffahrtsbedingungen** auf dem Rhein verschlechtern. Bei starken Überschwemmungen wird die Schifffahrt unterbrochen. Ebenso schränken besonders starke Niedrigwasserperioden die Beladungsraten der Schiffe ein und können zu Unterbrechungen der Schifffahrt führen. Der Klimawandel stellt somit eine Herausforderung für die Binnenhäfen dar, doch **es gibt Anpassungslösungen**. Das Projekt CRANE hatte zum Ziel, diesen Schwierigkeiten vorzugreifen und einen **Ansatz zur Anpassung** an den Klimawandel zu entwickeln, um die **Kontinuität der Hafenaktivitäten** zu gewährleisten.

Methodisch stützte sich die Analyse der Anfälligkeiten und Klimarisiken insbesondere auf den Austausch in partizipativen Workshops, an denen die sieben beteiligten Häfen teilnahmen. Die Empfehlungen zur Anpassung wurden hingegen auf der Grundlage von Expertenmeinungen, Benchmark-Analysen, Interviews mit Akteuren der Binnenschifffahrt sowie dem interdisziplinären Fachwissen des Cerema formuliert.

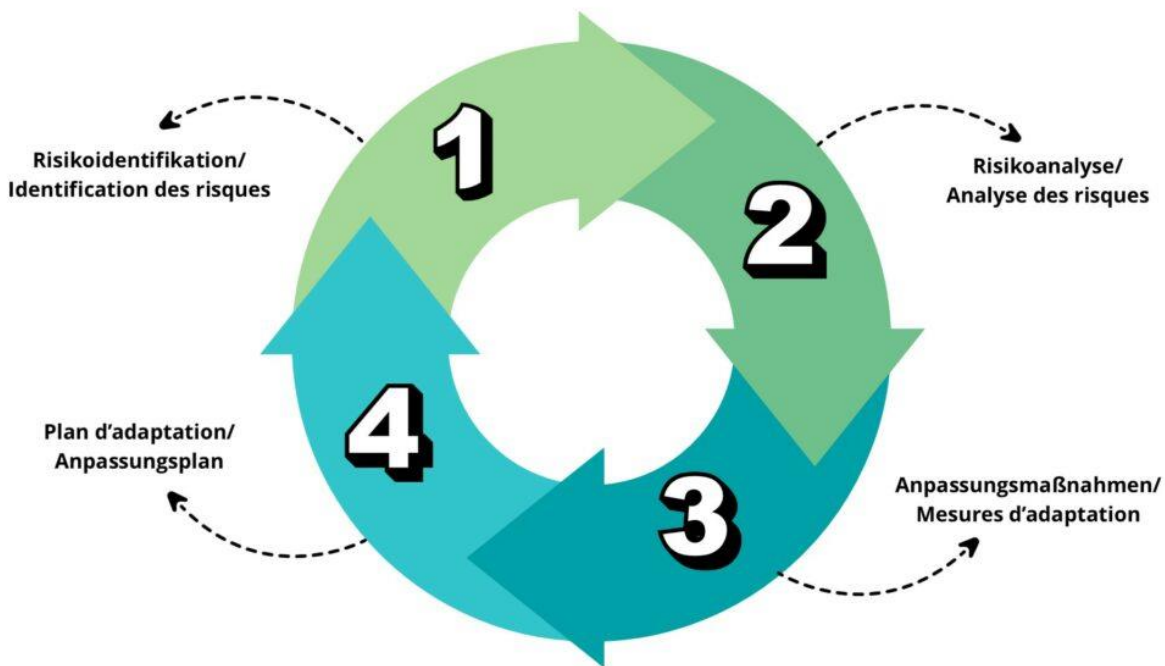
Die Binnenhäfen der Oberrheinregion sind zudem **wirtschaftliche und multimodale Knotenpunkte**. Sie sind mit zahlreichen anderen Akteuren vernetzt, die von den im Hafengebiet ansässigen Unternehmen bis hin zu den verschiedenen Behörden reichen, die an der Verwaltung von Wasserstraßen, Eisenbahnstrecken und Straßenverbindungen beteiligt sind. Was die Wasserstraße betrifft, muss insbesondere der Begriff **der Route** berücksichtigt werden: Störungen an einem bestimmten Punkt der Wasserstraße können sich auf alle Akteure entlang des Rheins auswirken, da dies die Schifffahrtsroute unterbrechen oder sich auf die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen diesen Akteuren auswirken kann. Das CRANE-Projekt hat sich daher darauf konzentriert, die Häfen an den Klimawandel anzupassen und dabei diese Konzepte **der Vernetzung** im Blick zu behalten.



Quelle: Upper Rhine Ports

1 METHODIK DES PROJEKTS CRANE

Das CRANE-Projekt verlief in verschiedenen Phasen, die eine **partnerschaftliche Zusammenarbeit** zwischen dem Fraunhofer-Institut IAIS und dem Cerema erforderten. Das Fraunhofer-Institut IAIS arbeitete zunächst gemeinsam mit den Häfen an **der Ermittlung** und anschließenden **Analyse klimabedingter Risiken**. Auf dieser Grundlage erarbeitete das Cerema anschließend **Anpassungsmaßnahmen** zur Bewältigung dieser Risiken und entwickelte gemeinsam mit den Häfen **Anpassungspläne** in Form von „Anpassungspfaden“. Um den Austausch während der verschiedenen organisierten Workshops zu erleichtern, wurden die sieben am Projekt beteiligten Häfen zudem in zwei Gruppen unterteilt: die Häfen des „Nordens“ (Karlsruhe, Ludwigshafen, Mannheim) und die Häfen des „Südens“ (Basel, Kehl, Mulhouse, Straßburg).

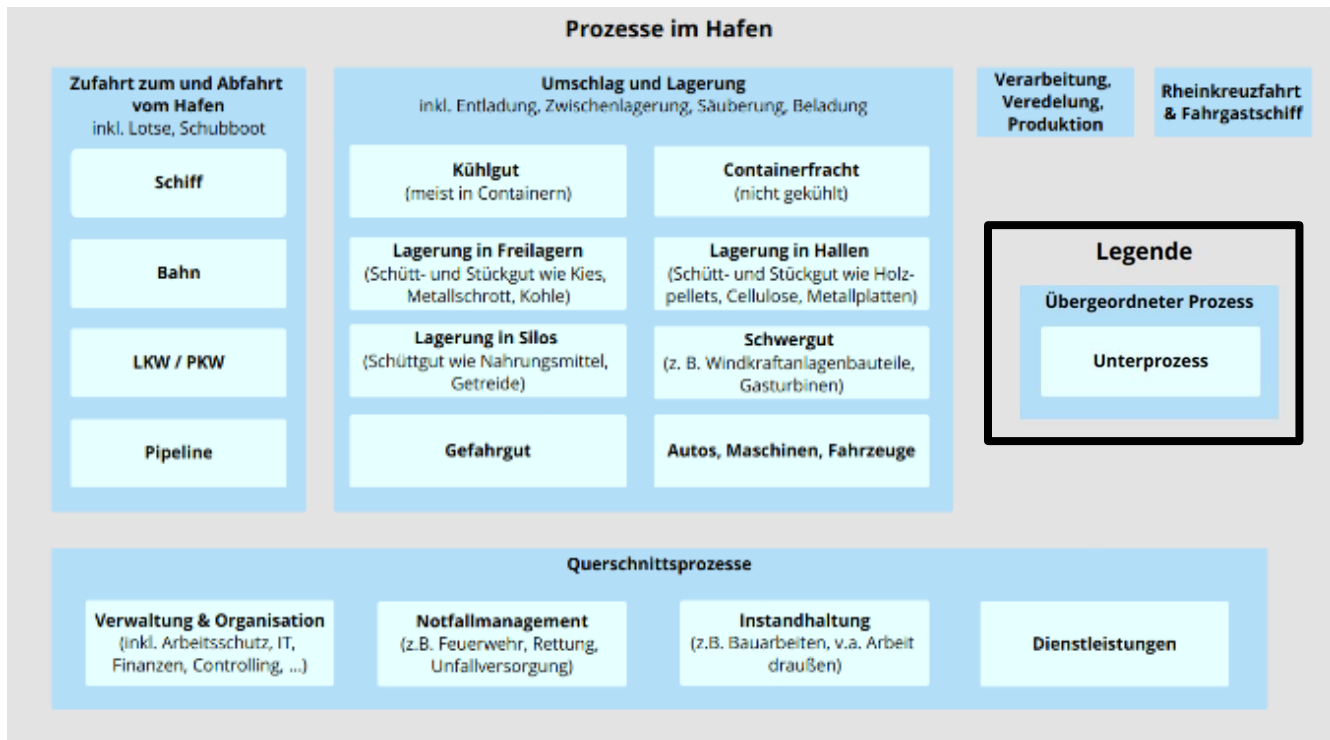


Quelle: Upper Rhine Ports

1.1 Identifizierung und Analyse von Klimarisiken

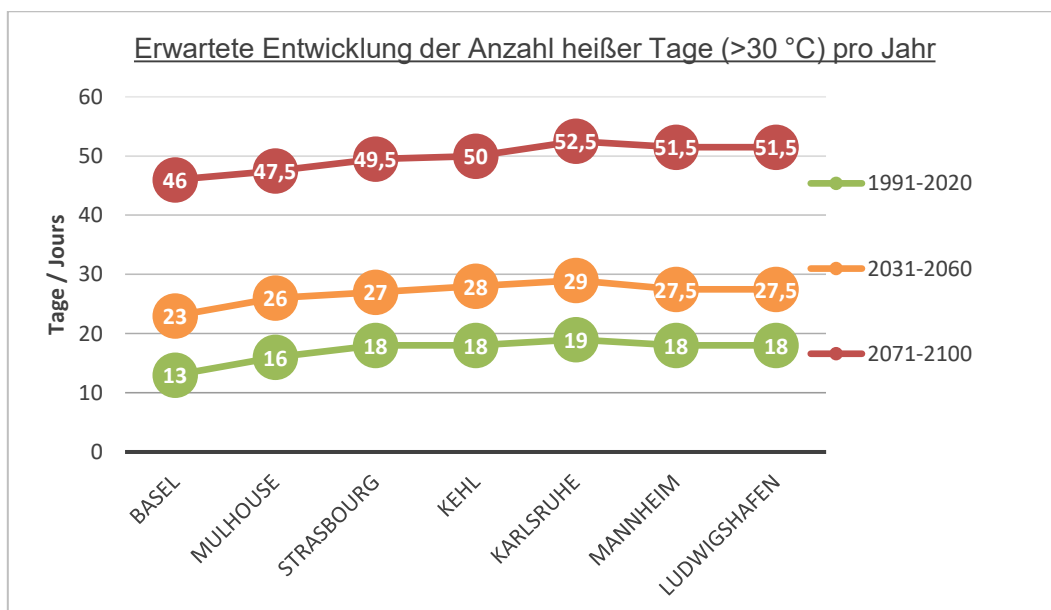
Die Phasen der Identifizierung und Analyse der Klimarisiken wurden vom Fraunhofer-Institut IAIS geleitet. Der erste Schritt bestand darin, die **Hauptmerkmale** der Hafengebiete zu definieren, um anschließend die Klimarisiken sachgerecht analysieren zu können:

- Identifizierung der wichtigsten „**Systemelemente**“, aus denen sich ein Hafengebiet zusammensetzt: zum Beispiel Kräne, Lagerhallen, Hafenbecken, Straßen und Zufahrtswege, Gleise und Weichen sowie Telekommunikationsanlagen.
- Hervorhebung der wichtigsten **Prozesse**, die in den Häfen ablaufen: Zu- und Abfahrt aus dem Hafen, Umschlag und Lagerung, Verarbeitungs-, Veredelungs- und Produktionsaktivitäten, Kreuzfahrt- und Passagierschiffe sowie übergreifende Prozesse.
- Anschließend wurde für jeden Hafen eine Gegenüberstellung vorgenommen, um **den Kritikalitätsgrad** (gering, mittel, hoch, sehr hoch) jedes Systemelements für jeden Hafenprozess zu ermitteln.



Quelle: Im Rahmen des CRANE-Projekts identifizierte Hauptprozesse in Häfen, Fraunhofer IAIS

Im Rahmen des CRANE-Projekts wurden die folgenden **acht Klimarisiken** auf der Grundlage des Referenzrahmens der Europäischen Grünen Taxonomie als relevant eingestuft: Hitzewellen, Dürre, Temperaturschwankungen, Starkniederschläge, Überschwemmungen, Stürme, sinkende Wasserstände und Bodenabsenkungen. Für jeden Hafen und jedes Systemelement ermöglichte das Projekt die Ermittlung eines **Risikoniveaus** (gering, mittel, hoch) für **jeden Zeithorizont** (Gegenwart, nahe Zukunft 2030–2060, ferne Zukunft 2060–2100) unter Verwendung von Klimaprognosen auf Basis des **RCP-8.5-Szenarios**. Zudem wurden **Wirkungsketten** erstellt, um die potenziellen Kettenreaktionen jedes Risikos auf den Ablauf der Hafenaktivitäten zu ermitteln.



Quelle: Erwartete Entwicklung der Anzahl heißer Tage (>30 °C) pro Jahr für die sieben am CRANE-Projekt beteiligten Häfen, Fraunhofer IAIS

Durch die Kreuzung des Kritikalitätsgrades jedes Systemelements (niedrig, mittel, hoch, sehr hoch) für jeden Prozess mit dem Risikograd (niedrig, mittel, hoch) für jeden Zeithorizont (Gegenwart, nahe

Zukunft, ferne Zukunft) konnten die **Hauptrisiken** identifiziert werden. Diejenigen Systemelemente, die in mindestens einem Prozess einen

Kritikalitätsgrad von mindestens „mittel“ und in mindestens einem Zeithorizont einen Risikograd von mindestens „mittelaufwiesen, wurden für die „Anpassungsphase“ des Projekts berücksichtigt.

Da jeder Hafen unterschiedlich ist (geografische Lage des Hafens, Hafentyp, vorhandene Infrastruktur im Hafengebiet usw.), variieren die Ergebnisse der Risikoanalysen zwischen den sieben, die am CRANE-Projekt beteiligt waren. Dennoch lassen sich einige gemeinsame Tendenzen erkennen, und im Rahmen des Projekts wurden **wiederkehrende Risiken** identifiziert:

- Die Auswirkungen von Hitzewellen und Starkniederschlägen auf die verschiedenen **Eisenbahnanlagen** in den Häfen (Gleise, Weichen, Signalanlagen usw.) sind ein kritischer Punkt, der von den Häfen angegangen werden muss;
- **Kräne und Portalkrane** sind in jedem Hafen klimatischen Risiken ausgesetzt (Hitze, Stürme oder Starkniederschläge) und stellen zentrale Elemente im Kern der Umschlagaktivitäten dar;
- Das **Personal** spielt eine unverzichtbare Rolle bei den Hafenaktivitäten. Klimatische Ereignisse (insbesondere Hitzewellen, Stürme, Überschwemmungen oder Starkniederschläge) können ihre Arbeitsbedingungen stark beeinträchtigen;
- Die **Wasserstraßen** stehen natürlich im Mittelpunkt der Binnenschifffahrt. Die Navigationsbedingungen werden bei Hochwasser oder Niedrigwasser beeinträchtigt;
- Allgemeiner betrachtet sind Häfen ein wesentlicher Bestandteil der Logistikketten; ihre verschiedenen **Verbindungen zum Hinterland** (über Schiene oder Straße) sind ebenfalls entscheidend für den Güterverkehr und können je nach Kontext zahlreichen klimatischen Unwägbarkeiten ausgesetzt sein (Stürme, Überschwemmungen, Hitzewellen, Starkniederschläge usw.).

Diese verschiedenen Themen standen daher im Mittelpunkt des Anpassungsprozesses, der gemeinsam mit den sieben am CRANE-Projekt beteiligten Häfen umgesetzt wurde.

1.2 Anpassung der Häfen an den Klimawandel

Nach der Ermittlung der wichtigsten Klimarisiken konnte die Phase „Anpassung an den Klimawandel“ des CRANE-Projekts eingeleitet werden. Das Cerema leitete diese Phase, die in zwei Teilphasen gegliedert war:

- Identifizierung von **Anpassungsmaßnahmen** als Reaktion auf die vom Fraunhofer IAIS identifizierten Klimarisiken
- Die gemeinsame Entwicklung von **Anpassungsstrategien** mit den sieben am CRANE-Projekt beteiligten Häfen

Die in jeder dieser beiden Phasen durchgeführten Arbeiten werden im Folgenden näher erläutert. Sie orientieren sich an verschiedenen zuvor definierten methodischen Rahmenwerken und stützen sich auf diese: die von der ADEME entwickelte **TACCT-Methode**, die vom Cerema definierte **ASAIT-Methode** (Systemischer Ansatz zur Anpassung der Verkehrsinfrastruktur) sowie die **von der Weltvereinigung für See- und Binnenschifffahrtsinfrastrukturen (AIPCN) vorgeschlagene Methodik** zur Anpassung von Häfen.

1.2.1 Identifizierung von Anpassungsmaßnahmen

Ziel dieser ersten Arbeitsphase war es, Anpassungsmaßnahmen zu identifizieren, mit denen den für jeden Hafen ermittelten verschiedenen Klimarisiken begegnet werden kann. Der erste Schritt bestand daher darin, im Rahmen eines **Benchmarks** eine Reihe von Anpassungsmaßnahmen zusammenzustellen. Diese stützte sich auf drei Hauptquellen:

Zunächst wurden **Gespräche** mit verschiedenen Akteuren der Binnenschifffahrt geführt. Diese Gespräche boten die Gelegenheit zum Austausch mit verschiedenen europäischen **Binnen- und Seehäfen** (Rotterdam, Duisburg, Antwerpen-Brügge usw.) sowie mit **Akteuren, die an der Climate Resilience and Adaptation for Upper Rhine ports (CRANE)**

Bewirtschaftung des Rheins beteiligt sind (Electricité de France, Voies navigables de France oder auch die Zentralkommission für die Rheinschifffahrt). Diese Arbeit ermöglichte es, eine Bestandsaufnahme der ersten von diesen Akteuren durchgeführten Anpassungsmaßnahmen vorzunehmen und relevante Maßnahmen für die am CRANE-Projekt beteiligten Häfen zu identifizieren. Eine **Zusammenfassung dieser Gespräche** wurde verfasst und an die Projektakteure weitergeleitet.

- Verschiedene **Experten des Cerema** haben ebenfalls an der Ermittlung von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel mitgearbeitet. Ein **elfköpfiges** Team mit unterschiedlichen Fachkenntnissen (Hafenbetrieb, Wasserressourcen, Straßen- und Schienenverkehr, Ingenieurbauwerke, Raumplanung usw.) wurde während der gesamten Projektlaufzeit mobilisiert, und verschiedene **weitere Mitwirkende** konnten ihr Wissen zu bestimmten Schlüsselthemen einbringen.
- Schließlich ermöglichten **Recherchen** (wissenschaftliche Studien, Leitfäden zu Anpassungsmaßnahmen, Anpassungspläne usw.) die Vervollständigung der Maßnahmenliste.

Im Rahmen dieser Benchmark-Phase konnten vom Cerema fast **fünfhundert Anpassungsmaßnahmen** identifiziert werden. Diese wurden zur Erleichterung des Austauschs mit den Häfen vorläufig in **fünf Kategorien** unterteilt: Asset management, Betriebsplan, Krisenmanagement, Planung und sonstige Maßnahmen. Alle diese Maßnahmen wurden in einem

„**Maßnahmenkatalog**“ **zusammengefasst**, der den Häfen zur Verfügung gestellt wurde.

Parallel zu dieser Arbeit ermöglichte der Erhalt der Ergebnisse der vom Fraunhofer IAIS durchgeführten Analysen die Identifizierung der **wichtigsten klimabedingten Risiken** für jeden der sieben am CRANE-Projekt beteiligten Häfen. Anschließend wurden Gespräche organisiert, um mit den Häfen die wichtigsten **Herausforderungen ihres Anpassungsprozesses zu bestätigen**.

Die im Rahmen des Benchmarks identifizierten Anpassungsmaßnahmen konnten anschließend mit den für jeden Hafen relevanten Klimarisiken abgeglichen werden. **Für jedes identifizierte Klimarisiko konnten mehrere Anpassungsmaßnahmen vorgeschlagen werden.**

Da die sieben am CRANE-Projekt beteiligten Häfen unterschiedliche Merkmale aufweisen, sind die Risiken und damit auch die für jeden Hafen relevanten Anpassungsmaßnahmen nicht einheitlich. Ein „**maßgeschneiderter**“ **Ansatz**, der auf die Situation jedes einzelnen Hafens zugeschnitten ist, war erforderlich. Daher wurden **Workshops** organisiert, um die identifizierten Maßnahmen mit dem jeweiligen Hafenkontext abzugleichen. Ein Workshop fand mit den Häfen des „Nordens“ (Karlsruhe, Ludwigshafen, Mannheim) statt, ein weiterer wurde mit den Häfen des „Südens“ (Basel, Kehl, Mulhouse und Straßburg) organisiert.



Quelle: Auszug aus dem vom Cerema am 29. April 2025 in Karlsruhe organisierten Workshop, Fotos von Manfred RAUSCH (Port Autonome de Strasbourg)

Diese Workshops ermöglichten es, **Feedback zu den identifizierten Anpassungsmaßnahmen** zu erhalten und auf fachlicher Ebene **die für jeden Hafen relevantesten Maßnahmen auszuwählen**. Diese gemeinsamen Arbeitssitzungen boten den Häfen zudem die Gelegenheit, **gemeinsame Herausforderungen** hervorzuheben und **bewährte Verfahren** untereinander **auszutauschen**, dank der Organisation von **hafenübergreifenden Austauschrunden** im Laufe des Tages.

Die Ergebnisse dieser Workshops bestehen somit aus einer Liste von Anpassungsmaßnahmen, die von jedem Hafen ausgewählt wurden, um den verschiedenen von Fraunhofer IAIS identifizierten Risiken zu begegnen. Diese Ergebnisse wurden **geteilt** und anschließend von jedem Hafen von fachlicher Seite **validiert**.

1.2.2 Die gemeinsame Entwicklung von Anpassungspfaden

Ziel dieser zweiten Arbeitsphase war es, für jeden Hafen eine **Strategie zur Anpassung** an den Klimawandel in Form von „**Pfaden**“ zu formulieren. Der hier angewandte Ansatz orientiert sich direkt an der von der ADEME entwickelten **TACCT-Methode**.

Der erste Schritt dieser Arbeit bestand darin, verschiedene Maßnahmen vorzubereiten, um diese Anpassungspfade gemeinsam mit den Häfen zu erarbeiten. Diejenigen Maßnahmen, die von jedem Hafen im Rahmen des ersten Workshops ausgewählt wurden, wurden somit in Form von **zweisprachigen Karten** (Französisch-Deutsch) festgehalten. Auf diesen Karten sind aufgeführt:

- Eine **Beschreibung** jeder Anpassungsmaßnahme;
- die **Klimarisiken**, denen sie entgegenwirkt;
- Eine Einschätzung der **Wirksamkeit** und der **Kosten** der Maßnahme auf einer Skala von 1 bis 5. Diese Einschätzung der Kosten und der Wirksamkeit wurde von Experten des Cerema vorgenommen und dient lediglich als Anhaltspunkt, da der spezifische Kontext, in dem sich jedes Element des Systems in jedem Hafen befindet, einen großen Einfluss auf diese beiden Kriterien hat.

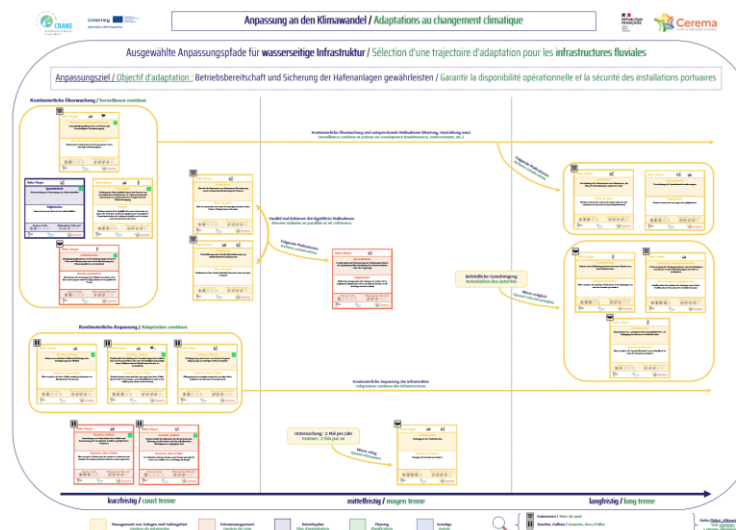
Anschließend fand mit jeder Hafengruppe ein **Workshop** statt. Den Teilnehmern wurde zunächst eine Prognoseübung vorgeschlagen, die auf der Methode der „**rosa**“ und „**schwarzen**“ **Szenarien** basierte. Diese Übung in Form eines Austauschs zwischen den Häfen ermöglichte es den Teilnehmern, sich anhand eines pessimistischen und eines optimistischen Szenarios die **Schlüsselfaktoren** für den **Erfolg** ihres Anpassungsprozesses vorzustellen.

In einem zweiten Schwerpunkt des Workshops wurden **gemeinsam mit jedem Hafen** Anpassungspfade für die verschiedenen Systemkomponenten (Umschlag- und Logistikinfrastrukturen, Eisenbahninfrastrukturen, interne Ressourcen usw.) **erarbeitet**.

Für jeden Pfad hatten die Häfen daher folgende Ziele:

- ein **Anpassungsziel** für die betreffende Systemkomponente festzulegen, um den Denkprozess zu strukturieren;
- die **Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen in drei Zeiträumen zu gliedern**: kurz-, mittel- und langfristig;
- die **Wechselwirkungen** zwischen den Maßnahmen, eventuelle **Vorbereitungen**, die bei bestimmten Maßnahmen zu berücksichtigen sind, sowie die **Maßnahmen zu identifizieren, die kontinuierlich über mehrere Zeithorizonte hinweg umgesetzt werden müssen**.

Während dieser Workshops wurden **gemeinsam mit jedem Hafen** zwischen **acht und zehn Anpassungspfade** (einer pro Systemelementgruppe, entsprechend den vom Fraunhofer IAIS identifizierten Risiken) **erarbeitet**.



Während des Workshops wurden die Häfen zudem dazu aufgefordert, einige zentrale Anpassungsmaßnahmen auszuwählen, zu denen sie weitere Details erhalten wollten. Anschließend wurden von den Cerema-Teams **detaillierte Merkblätter** erstellt, in denen diese Maßnahmen genauer beschrieben wurden. Diese wurden den Häfen dann zur Verfügung gestellt, um sie bei der Umsetzung dieser Maßnahmen zu unterstützen.

Um die Umsetzung der Ergebnisse zu erleichtern, wurde zudem ein operatives **Monitoring Tool** entwickelt, mit dem die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen verfolgt werden kann. Dieses Tool präsentiert sich in Form einer Excel-Übersicht, die alle in den Anpassungsszenarien enthaltenen Informationen zusammenfasst, insbesondere:

- die von jedem Hafen ausgewählten Anpassungsmaßnahmen;
- die Merkmale jeder einzelnen Maßnahme;
- die für ihre Umsetzung festgelegten Zeiträume.

Das Format dieses Überwachungsinstruments ist somit für alle beteiligten Häfen gleich, die darin enthaltenen Daten sind jedoch für jeden Hafen spezifisch.

1.2.3 Fazit zur angewandten Methode

Das Fraunhofer-Institut IAIS hat gemeinsam mit den Häfen im Rahmen partizipativer Workshops an der Ermittlung und anschließenden Analyse von Klimarisiken gearbeitet.

Partizipation und gemeinsame Gestaltung stehen im Mittelpunkt des Ansatzes, den Cerema zur Umsetzung des Teils „Anpassung“ des CRANE-Projekts verfolgt. Durch die Einbindung der technischen Mitarbeiter und der Führungsteams der Häfen konnten **die vorgeschlagenen Maßnahmen kontextualisiert** und **der gewählte Ansatz an jeden einzelnen Hafen angepasst** werden.

Die Festlegung einer Anpassungsstrategie unter Berücksichtigung des durch die Anpassungspfade vorgeschlagenen Rahmens ist ebenfalls ein zentraler Punkt des in diesem Projekt angewandten Ansatzes. Dies ermöglicht insbesondere:

- **Anpassungsmaßnahmen** zu identifizieren, um auf jedes von Fraunhofer identifizierte Klimarisiko zu reagieren, sowie anschließend einen Schritt zurückzutreten und **in einem größeren Maßstab zu denken**;
- die von jedem Hafen bereits umgesetzten Maßnahmen zu **würdigen** und sie in einen **ganzheitlichen Anpassungsansatz** zu integrieren;
- daran zu erinnern, dass bestimmte Maßnahmen **Voruntersuchungen, Diagnosen oder Modellierungen** entsprechen, die unerlässlich sind, **bevor** umfangreichere **Arbeiten oder Investitionen** in Angriff genommen werden
- im Rahmen eines **integrierten Ansatzes** zu denken und die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Anpassungsmaßnahmen hervorzuheben;
- **Flexibel** zu bleiben dank einer sogenannten „adaptiven“ Methode, die es ermöglicht, auf zukünftige Klimaveränderungen zu reagieren.

Ergänzend dazu bieten alle weiteren Ergebnisse, die die Entwicklungspfade begleiten, eine **theoretische Grundlage**, die als Referenz für die Anpassung an den Klimawandel dienen kann (das Maßnahmenreferenzsystem, die detaillierten Datenblätter, die Zusammenfassung der Gespräche mit verschiedenen externen Akteuren usw.) und stellen ein **operatives Überwachungsinstrument** zur Verfügung, um die konkrete Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen zu verfolgen.

2 WICHTIGSTE ERKENNTNISSE DES PROJEKTS

Im Rahmen des CRANE-Projekts wurden für jeden Hafen die wichtigsten Klimarisiken und die entsprechenden Anpassungsmaßnahmen ermittelt. Aus den durchgeführten Arbeiten lassen sich große **Trends** ablesen, die es ermöglichen, **Schlüsselp Prinzipien** für die Anpassung der Binnenhäfen an den Klimawandel zu identifizieren. Das Projekt konzentrierte sich insbesondere auf folgende Themen:

- **Hafenterminals**
- **Infrastruktur** (Binnenwasserstraßen, Schienen- und Straßenverkehr)
- **Wasserressourcen**
- Einbindung der Häfen in ihr **Umland**

Das Projekt lieferte zu jedem dieser Themen verschiedene Erkenntnisse, insbesondere zu den wichtigsten Herausforderungen, die damit verbunden sind, und zu den Anpassungsmaßnahmen, die zur Bewältigung dieser Herausforderungen umgesetzt werden müssen. Diese Erkenntnisse werden im Folgenden näher erläutert.

2.1 Hafenterminals

Die Hafenterminals bilden das **operative Herzstück** der Rheinhäfen. Sie vereinen neben dem Vor- und Nachlauf zwei untrennbare Funktionen: den **Umschlag** (Be- und Entladevorgänge mit Kränen und Umschlaggeräten) und die **Lagerung** (Containerterminals, überdachte Lagerhallen und Freiflächen). Diese kritischen und zugleich exponierten Infrastrukturen sind allen im CRANE-Projekt identifizierten klimatischen Gefahren ausgesetzt: Hitzewellen, Stürme, Starkniederschläge, Überschwemmungen, Niedrigwasserstände und Temperaturschwankungen.

Die Anfälligkeit der Lagerbereiche hat direkte Auswirkungen auf die Wertschöpfungskette des Hafens: Beschädigung der gelagerten Güter, Verlust nutzbarer Flächen und das Risiko der Kontamination der Hafenbecken und des Rheins durch das Abfließen von Schadstoffen (Kohlenwasserstoffe, Schwermetalle...). Die ökologischen und wirtschaftlichen Herausforderungen sind daher eng miteinander verflochten.

Risikoanalysen haben somit gezeigt, dass die Terminals einer Anfälligkeit gegenüber vielfältigen Gefahren ausgesetzt sind, die durch die Dichte der Anlagen, das Vorhandensein von hitze- und feuchtigkeitsempfindlichen Materialien sowie die erforderliche Betriebskontinuität noch verstärkt wird. Der Zugang der Schiffe zu den Kais und der Transport der Güter sowohl bei der Ein- als auch bei der Auslagerung beeinflussen ebenfalls direkt die Effizienz der Terminals.

2.1.1 Umschlag: Anlegen und Stabilität der Schiffe am Kai

2.1.1.1 Hintergrund und Herausforderungen

Das Anlegen von Schiffen am Kai ist eine wesentliche Funktion der Binnenhafeninfrastrukturen und bestimmt die **Sicherheit der Umschlagvorgänge** sowie die **Kontinuität der Logistikketten**. Die **Stabilität der Schiffe** während der Be- und Entladephasen hängt direkt von der Fähigkeit der Hafenanlagen und der Anlegesysteme ab, die auf die Schiffe einwirkenden hydraulischen und mechanischen Belastungen aufzunehmen.

Vor dem Hintergrund des Klimawandels erhöht die **Zunahme extremer Wetterereignisse** im Rheingebiet (starke Winde, heftige Niederschläge, häufigere Hochwasser und starke Schwankungen des Wasserstands) die Belastungen für die Anlegesysteme und die Kaianlagen. Diese Phänomene können die Positionierung der Schiffe beeinträchtigen, den Einsatz von Umschlaggeräten gefährden und zu Betriebsunterbrechungen oder sogar **zu Risiken für die Sicherheit von Personen, Gütern und Hafenanlagen** führen.

2.1.1.2 Wichtigste Risiken und Anpassungsmaßnahmen

2.1.1.2.1 Stürme und starke Winde

Unter dem Einfluss starker Winde kann es in den Hafenbecken zu erheblicher Unruhe auf der Wasseroberfläche kommen, die umso stärker ist, je offener und exponierter das Gewässer ist. Gleichzeitig können am Kai liegende Schiffe aerodynamischen Kräften ausgesetzt sein, die durch den Windwiderstand ihrer Aufbauten und Ladungen entstehen, ebenso wie die an Land installierten Umschlaggeräte (Portalkrane, Kaikrane), deren hohe und breite Strukturen große Angriffsflächen für den Wind bilden. Diese kombinierten Belastungen führen zu Bewegungen des Schiffes sowohl in Querrichtung als auch in Längsrichtung, die dessen Positionierung beeinträchtigen können. Dies führt zu einer Erhöhung der dynamischen Kräfte in den Festmacherleinen und an den Verankerungspunkten (Poller) sowie zu einer Fehlausrichtung gegenüber den Umschlaggeräten, was zu einer Unterbrechung der Umschlagvorgänge führen kann. Die folgenden Maßnahmen tragen dazu bei, dieses Risiko zu verringern:

- Auf den Hafenterminals: **Vorzeitiger Abbau** der obersten Lagen von im Freien gelagerten Containern, um deren Windangriffsfläche und das Risiko des Umkippens oder Verrutschens zu verringern.
- **Vorbeugende Einstellung von Hebevorgängen** und **Sicherung** der an Land installierten Fördergeräte, um ein Entgleisen durch Winddruck zu verhindern.

2.1.1.2.2 Starke Niederschläge

An Umschlagsanlagen, die direkt am Rhein liegen, können starke Niederschläge zu einem plötzlichen Anstieg der Flusströmung führen, wodurch erhebliche hydrodynamische Kräfte auf die Schiffsrümpfe einwirken. Dieses Phänomen gilt nicht für geschlossene Hafenbecken, in denen die Schiffe am Kai aufgrund der fehlenden Strömung vor diesen hydrodynamischen Belastungen geschützt sind. Diese erhöhte Strömung übt einen konstanten Druck aus, der dazu neigt, das Schiff vom Kai wegzudrücken oder es abtreiben zu lassen, wodurch die Verankerungsvorrichtungen weit über ihre Nennbetriebsbedingungen hinaus beansprucht werden.

Maßnahmen: Die Anordnung der Poller entlang des Kais muss ein optimales Festmachschemata ermöglichen. Ferner muss die Dimensionierung der Poller überprüft werden, um den durch die Fließgeschwindigkeit verstärkten horizontalen Zugkräften standzuhalten.

2.1.1.2.3 Überschwemmungen

Bei Hochwasser kann der steigende Wasserstand dazu führen, dass das Wasser über den Kai läuft, was die Stabilität der Wasserfront und die Unversehrtheit der Anlagen gefährdet. Der Anstieg des Wasserspiegels verändert die Geometrie der Anlegestellen radikal: Der von den Festmacherleinen gebildete vertikale Winkel wird zu groß, was zu übermäßigen Auftriebskräften auf das Boot oder zu extremen Spannungen führt, die die Festmacherleinen abreißen oder einen Kabelbruch verursachen können.

Um diesen Risiken entgegenzuwirken, muss der Kai über unterschiedliche Anlegehöhen verfügen, die durch die Installation von Hochwasserpollern oder Anlegepfählen unterschiedlicher Höhe gewährleistet werden. Wenn der Wasserstand kritische Schwellenwerte erreicht, die das Liegen am Kai gefährlich machen, ist ein Rückzugsverfahren in Schutzzonen wie geschützten Hafenbecken oder strömungsarmen Altarm unerlässlich, um zu verhindern, dass das Schiff abtreibt oder sich an der Krone des Bauwerks verfängt.

2.1.1.2.4 Wichtige Erkenntnisse

Der reibungslose Ablauf von Umschlagvorgängen hängt von der **Stabilität der am Kai liegenden Schiffe** ab, eine unverzichtbare Voraussetzung die **Sicherheit der** und **die Unversehrtheit der Infrastruktur** (Kai, Anlegeeinrichtungen, Kräne). Diese Stabilität wird direkt von den **hydrometeorologischen Bedingungen** beeinflusst.

Ziel ist es, **die Unbeweglichkeit des Schiffes** im Verhältnis zum Portalkran **zu gewährleisten**, um die Kontinuität der Umschlagarbeiten sicherzustellen und **strukturelle Schäden** am Kai oder am Schiffsrumpf **zu verhindern**.

2.1.2 Umschlag: Kräne und Umschlaggeräte

2.1.2.1 Hintergrund und Herausforderungen

Krane und Umschlaggeräte (Portalkrane, Stapler, Reachstacker...) bilden das Rückgrat der Umschlagvorgänge. Sie sind den Unwägbarkeiten des Wetters stark ausgesetzt: Da sie im Freien auf den Vorplätzen oder am Kai aufgestellt sind, sind sie Hitzewellen, starken Winden, starken Niederschlägen und Überschwemmungen direkt ausgesetzt. Ihr Ausfall hat sowohl betriebliche als auch materielle Folgen: Stillstand der Be- und Entladevorgänge, Unterbrechung der Logistikketten, Risiken für die Sicherheit des Personals, aber auch Beschädigung oder Zerstörung der Maschinen selbst, was kostspielige Reparaturen oder einen zeitaufwendigen Austausch erforderlich machen kann.

Diese Anlagen zeichnen sich durch ihre **technische Komplexität** aus: Hydrauliksysteme, eingebaute elektronische Komponenten, Verbrennungs- oder Elektromotoren, freiliegende Kabel und Seilrollen. Diese Heterogenität bringt je nach Gefahrenquelle spezifische Schwachstellen mit sich. Kranbahnen und Fundamente von Portalkranen sind zudem anfällig für Bodensenkungen, ein Phänomen, das durch Trocken- und Rehydrierungszyklen von Tonböden (Schrumpfen und Quellen von Ton) oder durch Verformungen der Kaianlagen aufgrund von Schwankungen des Wasserstands verstärkt wird.

2.1.2.2 Wichtigste Risiken und Anpassungsmaßnahmen

2.1.2.2.1 Hitzewellen

Der Klimawandel führt zu einer Zunahme der Häufigkeit von Temperaturspitzen (Szenarien bei +45°C/+48°C), wodurch Maschinen außerhalb ihres Standard-Auslegungsbereichs betrieben werden:

- **Ausfall** der Steuerungs- und Kontrollsysteme durch Überhitzung der Schaltschränke, die direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, was zu ungewollten Sicherheitsabschaltungen der Steuerungen führt;
- **Beschleunigte Alterung** von Dichtungen, Schläuchen und Polymerkabeln, die wiederholt hohen Temperaturen ausgesetzt sind;
- **Thermische Ausdehnung** der Metallkonstruktionen der Kräne mit der Gefahr übermäßiger Belastungen auf Schienen und Verankerungen sowie der Gefahr einer Verformung der Führungsschienen;
- **Menschlicher Faktor und Sicherheit:** Verschlechterung der Arbeitsbedingungen in der Kabine (Hitzestress), was die Reaktionszeit verlängert, die Zahl der krankheitsbedingten Ausfälle erhöht und das Unfallrisiko bei Präzisionsmanövern steigert.

Die wichtigsten Maßnahmen zur Bewältigung dieser Risiken sind:

- **Ersatz** von Dichtungen, Schläuchen, Kabeln und Flüssigkeiten durch für „hohe Temperaturen“ zertifizierte Ausführungen;
- Aufbringen **von Beschichtungen oder Lacken** mit hohem Sonnenreflexionsgrad (Albedo) auf Motorhauben und Kabinen zur Verringerung der thermischen Belastung;
- Einbau spezieller **Kühlaggregate** für Schaltschränke und automatisierte **Belüftung** der Motorräume;
- Umstellung auf **Fernsteuerung**: Der Bediener arbeitet von einem klimatisierten Kontrollzentrum aus, wodurch Gesundheitsrisiken vermieden und die Produktivität gewährleistet werden;
- **Anpassung der Betriebszeiten** (Hitzewellenplan: Die heißesten Stunden werden vermieden).

2.1.2.2.2 Stürme und starke Winde

Kräne und die Be- und Entladung von Schiffen durch diese Kräne gehören aufgrund ihrer Höhe, ihrer Windangriffsfläche und ihres Gewichts zu den Anlagen, die am anfälligsten für starken Wind sind. Das Umkippen eines Krans ist ein katastrophales Ereignis, sowohl für die Infrastruktur als auch für die Sicherheit von Personen und Gütern. Das Wegfliegen oder Herabfallen von Gütern stellt ebenfalls ein Sicherheits-, Wirtschafts- und Umweltrisiko dar.

Die gewählten Maßnahmen kombinieren bauliche Prävention und betriebliches Management:

- Installation von **Windsensoren** in Verbindung mit einem **automatischen Sicherheitsverfahren**: Bremsunterstützung und mechanische Parkverriegelung (Schienenklemmen), die bei vollständigem Stillstand der Maschine aktiviert werden;
- Verstärkung der **Befestigungen** und **Verankerungen** mobiler Anlagen sowie Überprüfung ihres Zustands nach jedem Ereignis;
- **Betriebsunterbrechung** und Sicherung der Anlagen bei Auslösung eines Sturmwarnungsalarms.

2.1.2.2.3 Starke Niederschläge

Starkregen wirkt sich auf Umschlaggeräte auf verschiedene Weise aus: **Eindringen von Wasser** in elektronische Komponenten, Bildung von Pfützen unter den Geräten, die den Verkehr behindern, sowie **beschleunigte Verschleißerscheinungen** durch Bodenerosion im Bereich der Kranbahnen und der Fahrwege von Fördergeräten bei unzureichender Entwässerung. Die wichtigsten im Leitfaden genannten Anpassungsmaßnahmen sind:

- **Verstärkung der Fundamente** von Kranbahnen, Portalkranen und des Verkehrsbereichs der Förderfahrzeuge, um Bodensenkungen und Erdrutsche zu verhindern;
- Einrichtung oder Verstärkung von **Entwässerungssystemen** unter den Anlagen;
- **Ersatz der Dichtungen** an Schaltschränken durch Modelle mit hoher Witterungsbeständigkeit;
- **Systematische Inspektion** nach dem Ereignis zur Feststellung von Feuchtigkeit in den elektrischen und hydraulischen Kreisläufen.

2.1.2.2.4 Überschwemmungen

Bei Hochwasser sind die auf den Freiflächen und in den Lagerbereichen (Waren und Container) abgestellten Umschlaggeräte unmittelbar gefährdet. Die Einrichtung einer **Rückzugslogistik** (vorbeugende Verlegung) durch die Umsetzung eines systematischen Evakuierungsprotokolls in identifizierten „**Sicherheitszonen**“ außerhalb der prognostizierten Hochwassermarke gehört zu den an den häufigsten gewählten Lösungen.

2.1.2.2.5 Temperaturschwankungen und kombinierte Gefahren

Das erweiterte Temperaturspektrum beansprucht die Anlagen über ihre Nennbetriebsbereiche hinaus. Die Anpassung beruht auf der Fähigkeit von Flüssigkeiten und Metallen, ihre physikalisch-chemischen Eigenschaften unter variablen Belastungen beizubehalten. Die winterlichen Frost-Tau-Zyklen und die durch den Klimawandel verstärkten saisonalen Temperaturschwankungen haben fortschreitende Auswirkungen auf mechanische Anlagen; daher ermöglichen folgende Maßnahmen eine Anpassung dieser Anlagen:

- **Auswahl von Komponenten**, die Temperaturschwankungen über einen erweiterten Bereich hinweg standhalten;
- **Vorwärmung** der hydraulischen und elektronischen Systeme vor der Inbetriebnahme bei kalten Temperaturen;
- Verwendung von **Hydraulikölen**, die für Temperaturschwankungen geeignet sind.

2.1.2.2.6 Wichtige Erkenntnisse

Kräne und Umschlaggeräte erfordern einen zweistufigen Anpassungsansatz: **verstärkte vorbeugende Wartung** (Austausch empfindlicher Komponenten, regelmäßige Inspektion) und **Maßnahmen zum Betriebsschutz** (Sensoren, automatische Systeme, Pläne Hitzewelle/Sturm). Alle Häfen sind sich einig, dass **bewährte Praktiken** an die Betreiber im Hafengebiet weitergegeben werden müssen, die ihre eigenen Maschinen bedienen.

2.1.3 Lagerung: Containerterminals, überdachte und Freilager

2.1.3.1 Hintergrund und Herausforderungen

Die Lagerflächen in Häfen bilden ein **funktionales Mosaik**: Containerterminals (betonierte Bodenbeläge, spezielle Umschlaggeräte ...), überdachte Lagerhallen (Schutz empfindlicher Güter ...) und Freilagerflächen (feste Schüttgüter, Schrott, Holz, Zuschlagstoffe ...). Jede dieser Einrichtungen weist spezifische Anfälligkeiten gegenüber klimatischen Risiken auf, während sie gleichzeitig gemeinsame Herausforderungen teilt: Umgang mit verschmutztem Oberflächenwasser, Unversehrtheit der Oberflächen, Schutz der Güter.

2.1.3.2 Wichtigste Risiken und Anpassungsmaßnahmen

2.1.3.2.1 Hitzewellen

Extreme Hitze wirkt sich über verschiedene Mechanismen auf Lagerbereiche aus: Beschädigung von Betonbelägen (Rissbildung durch Ausdehnung), Temperaturanstieg der gelagerten Güter (Kühlcontainer, Chemikalien, brennbare Schüttgüter...) und Brandgefahr für die Lagerbestände. Zudem verstärken asphaltierte Flächen die Auswirkungen von Hitzeinseln erheblich. Im Rahmen des CRANE-Projekts wurden von den Häfen insbesondere folgende Anpassungsmaßnahmen herausgearbeitet:

- **Verbesserung der Belüftungs- und Kühlsysteme** in Lagerhallen und Kühlcontainern;
- Einrichtung von **schattigen Lagerbereichen** oder überdachten Hallen für temperaturempfindliche Güter;
- Optimierung des **Lagerplans**: Isolierung wärmeempfindlicher Güter, Zusammenfassung von Kühlcontainern usw.
- **Überwachung** von Rissen auf Asphalt- und Betonflächen, Erhöhung der **Wartungshäufigkeit** (Überbrücken von Rissen, Fräsen);
- Anbringung **reflektierender Materialien** auf den Oberflächen, um die Wärmeaufnahme zu begrenzen;
- **Vermeidung längerer Lagerung** auf asphaltierten Flächen, die die Wärme verstärken;
- Installation automatischer **Sprühsysteme**, die mit aufgefangenem Regenwasser betrieben werden und die Kühlung der Lagerbestände sowie die Staubbindung ermöglichen;
- Installation von **Brandschutz- und Brandbekämpfungssystemen** sowie Wärmeüberwachung **durch Sensoren** (zur Früherkennung von Hotspots in Freilagerbeständen).

2.1.3.2.2 Stürme und starke Winde

Freilager sind bei **starkem Wind** der Gefahr ausgesetzt, dass Gegenstände verschoben werden, umkippen oder weggfliegen. Auch die Gebäude und Tragwerke von überdachten Lagerhallen können strukturelle Schäden davontragen. Auf technischer Ebene wurden mehrere Handlungsansätze identifiziert:

- Einbau von verstärkten **Befestigungen und Verankerungssystemen** für Container und Güter;
- **Lagerung** empfindlicher Güter in **geschlossenen oder geschützten Bereichen** vor Sturmwarnungen;
- **Optimierung des Lagerplans** im Freien: Verringerung der Stapelhöhe, Unterteilung der Bereiche zur Minimierung des Windangriffs;
- Bau von Hallen und Lagerhäusern mit Dächern und **Konstruktionen, die starken Winden standhalten**;
- Anbringen von **temporären Schutzvorrichtungen** (Planen, Netze, Geotextilien) an im Freien gelagerten Materialien;
- Einführung eines Plans **zur Einstellung der Umschlagarbeiten an Land** im Falle einer Sturmwarnung.

2.1.3.2.3 Starke Niederschläge und Oberflächenabfluss

Starke Regenfälle stellen für Lagerbereiche eine doppelte Herausforderung dar: Erosion der Untergründe durch unkontrollierte Versickerung und Überlastung der Kanalisation mit der Gefahr des Einleitens von verschmutztem Wasser in die Hafenbecken. Angesichts dieser Risiken können konkrete Maßnahmen ergriffen werden, um die Anfälligkeit zu verringern oder die Folgen abzumildern:

- **Strategische teilweise Entsiegelung** (Lagerflächen, Parkplätze, Pufferzonen) der Terminals, um die Versickerung zu fördern und die Überlastung der Kanalisation zu begrenzen;
- Instandhaltung und Verstärkung der **Entwässerungssysteme** (Gefälle, Rinnen, Gitterroste usw.) in allen Terminals und Freilagerhallen;
- **Regenwasserauffangseinrichtungen** für Lagerhallen;
- **Rückhalte- und Speicherbecken** zur Kontrolle des Oberflächenabflusses und der Qualität der Einleitungen in die Hafenbecken;
- **Drainagepflasterung**, je nach den Eigenschaften der gelagerten Güter.

2.1.3.2.4 Überschwemmungen

Überschwemmungen stellen ein plötzliches und schädliches Risiko für Lagerbereiche dar. Der Schutz von Waren und Ausrüstung sowie die rasche Wiederaufnahme des Betriebs haben oberste Priorität:

- **Erhöhung** kritischer Lagerbereiche oder Warenbestände;
- Investition in **mobile Schutzvorrichtungen** (Kofferdamm, aufblasbare Barrieren) im Falle einer Hochwasserwarnung oder Bau von umlaufenden **Schutzmauern** um strategische Lagerflächen;
- **Überarbeitung des Lagerplans**: Vermeidung der Lagerung empfindlicher Güter auf „tief“ gelegenen Flächen;
- **Verstärkte Sicherung** der Container, um deren Verschiebung bei steigendem Wasserstand zu verhindern.

2.1.3.2.5 Bodenabsenkungen

Das **Schwellen und Schrumpfen von Tonböden**, verstärkt durch Zyklen von Austrocknung und Wiederbefeuchtung in Verbindung mit Schwankungen des Grundwasserspiegels, führt zu unterschiedlichen Bewegungen der tragenden Böden und gefährdet die Integrität von stark belasteten Bodenbelägen. Unebenheiten der Fahrflächen können bestimmte Maschinen unbrauchbar machen und die Sicherheit der Containerstapel gefährden. Folgende Maßnahmen ermöglichen es, diesem Risiko zu begegnen:

- Einbau von Plattformen auf **behandelten Untergründen** oder **verstärkten Verteilungsplatten**, um die Auswirkungen des Schwind- und Quellverhaltens der Tragböden auszugleichen;
- **Vorübergehende Begrenzung der Stapelhöhen von Containern** in als „instabil“ identifizierten Bereichen;
- **Überwachung der Grundwasserpegel** zur Vorhersage von unterschiedlichen Setzungen, die durch den Grundwasserspiegelabfall in Trockenperioden verursacht werden.
- **Piezometrische Überwachung** zur Vorhersage von unterschiedlichen Setzungen, die durch den Grundwasserspiegelabfall in Trockenperioden verursacht werden.

2.1.3.2.6 Wichtige Erkenntnisse

Die nachhaltige Bewirtschaftung von Lagerflächen basiert auf drei sich ergänzenden Säulen: dem **physischen Schutz der Güter** (Erhöhung, Beschattung, Befestigung), der **Bewältigung von Oberflächenabfluss** (Entwässerung, Entsiegelung, Rückhaltung oder Verzögerung) und der **Anpassung der Betriebsabläufe** (überarbeitete Lagerpläne, Überprüfung der Betriebsgrenzen). Die Maßnahmen mit den größten **positiven Auswirkungen auf die Umwelt** (Entsiegelung, Rückhaltebecken) sind gleichzeitig diejenigen, die der größten Anzahl von Risiken gleichzeitig begegnen.

2.1.4 Fazit zu den Hafenterminals

2.1.4.1 Anlagen, die zahlreichen klimatischen Gefahren ausgesetzt sind

Die Vulnerabilitätsanalyse der Hafenterminals zeigt, dass Umschlag- und Lageranlagen gegenüber allen klimatischen Gefahren (Hitzewellen, Dürre, Starkniederschläge, Überschwemmungen, Stürme, sinkende Wasserstände und Bodenabsenkungen) anfällig sind. Diese Mehrfachanfälligkeit erfordert eine **systemische Anpassungsstrategie**, bei der die Maßnahmen **synergetisch** wirken und keine widersprüchlichen Effekte hervorrufen dürfen.

Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Widerstandsfähigkeit der Kais und der Betriebsfähigkeit der Terminals: Ein Ausfall der Kais führt unmittelbar zur Einstellung des Umschlagbetriebs. Diese Wechselbeziehung erfordert eine integrierte Planung beider Bereiche.

2.1.4.2 Die prägende Rolle der Betreiber

Eine Besonderheit der Rheinhafenterminals ist die große Anzahl von Unternehmen, die ihre eigenen Anlagen auf dem Hafengelände betreiben. Die Hafenbehörden können nicht alle Anlagen allein anpassen: Die **Verbreitung bewährter Verfahren unter den Betreibern** wird als ein Hebel mit sehr gutem Kosten-Nutzen-Verhältnis angesehen.

Diese Dynamik der **Verantwortungsübernahme sowohl durch die Häfen als auch durch die Betreiber** zeigt sich auch in der Festlegung eines akzeptablen Mindestdienstleistungsniveaus, das die Kriterien für den eingeschränkten Betrieb der Terminals in Klimakrisenformalen festlegt.

2.2 Infrastrukturen

Über die Umschlag- und Logistikaktivitäten hinaus sind Häfen auch **multimodale Knotenpunkte**, an denen zahlreiche Logistikströme zusammenlaufen. Daher sind sie über verschiedene Infrastrukturen mit dem Hinterland verbunden, die für die Aufrechterhaltung dieser Logistikströme und damit der Aktivitäten innerhalb des Hafengebiets von entscheidender Bedeutung sind:

- Die **wasserseitige Infrastruktur** (im Rahmen des Projekts insbesondere Hafenbecken, Kais, Ufer sowie Schleusen und Schleusentore) ermöglicht den reibungslosen Schiffsverkehr auf den Wasserstraßen bis zu den Hafenbecken und Kais, wo die Umschlagaktivitäten beginnen.
- Die **Straßeninfrastruktur** (Straßen und Brücken) und die **Schieneninfrastruktur** (Gleise, Weichen, Rangierbahnhof usw.) ermöglichen anschließend die Weiterverteilung der Güter innerhalb der Regionen mittels Züge und Lkw oder umgekehrt die Zusammenführung der Güter im Hafen-Hub vor dem Versand per Schiff, wodurch der Handel gebündelt werden kann.

Die Verwaltung dieser Infrastrukturen gehört zu den laufenden Aufgaben, die von den Häfen oder ihren Partnern (Tochtergesellschaften, externen Unternehmen, Behörden usw.) entsprechend dem jeweiligen Zuständigkeitsbereich der einzelnen Akteure wahrgenommen werden. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel **erweitert sich das Spektrum der Bedingungen**, denen diese Infrastrukturen ausgesetzt sind: größere Temperaturschwankungen (Frost- und Tauwetterphänomene im Winter und extreme Hitze im Sommer), Wechsel von Dürreperioden und starken Niederschlägen, Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Hochwasserereignissen, aber auch von Niedrigwasserereignissen, usw.

Diese neuen klimatischen Bedingungen können sich auf **den Zustand der Infrastrukturen** in den Häfen (geschwächte Strukturen, vorzeitige Alterung, beschleunigter Materialverschleiß usw.) und auf deren ordnungsgemäßen **Betrieb** (unbenutzbare Infrastruktur, vorübergehende Betriebsunterbrechung oder Betrieb im Notbetrieb usw.) auswirken.

2.2.1 Wasserseitige Infrastruktur

2.2.1.1 Hintergrund und Herausforderungen

Im Rahmen des Klimawandels stellen insbesondere die Zunahme und die Intensivierung von **Hochwasser-** und **Niedrigwasserereignissen** eine Herausforderung für das Management der wasserseitigen Infrastrukturen dar. Denn diese Infrastrukturen sind für den Betrieb unter bestimmten

Rahmenbedingungen und Gleichgewichten ausgelegt, die sich mit dem Klimawandel verändern können.

Zunächst einmal können häufiger auftretende oder intensivere Hochwasserereignisse die verschiedenen Flussinfrastrukturen *durch* den erhöhten **Druck** auf die Bauwerke destabilisieren. Die **Funktionsfähigkeit** der Infrastrukturen kann zudem **eingeschränkt oder unterbrochen** werden: überflutete Kais, unbrauchbar gewordene Anlegestellen, unmögliches Anlegen, unterbrochener Schiffsverkehr usw.

Die Zunahme und Intensivierung von Niedrigwasserereignissen wirken sich insbesondere auch auf die **Stabilität** von Kais und Ufern aus (dies führt zu Veränderungen im Kräftegleichgewicht). Bestimmte **Infrastrukturen** können in diesem Zusammenhang ebenfalls **ungeeignet** werden: feste Treppen, die zu kurz geworden sind, um funktionsfähig zu sein, Pontons oder Anlegesysteme, die für Niedrigwasser ungeeignet sind usw.

In geringerem Maße trägt auch die Zunahme von **Hitzewellen** oder **Starkniederschlägen** zur beschleunigten Verschlechterung der wasserseitigen Infrastrukturen bei. So kann beispielsweise eine besonders intensive Hitzewelle zum Auftreten von **Rissen** im Beton der Kaimauern beitragen. Auch wärmeempfindliche Bauteile in bestimmten Infrastrukturen können davon betroffen sein. Bei Schleusen kann dies beispielsweise zu einer **Ausdehnung** von Metallteilen, einem vorzeitigen Verschleiß der Dichtungen oder auch zu Funktionsstörungen bestimmter elektromechanischer Anlagen führen. Starke Niederschläge belasten die Infrastruktur ebenfalls erheblich. Der Anstieg von Oberflächenabfluss und Abflussmengen kann zu **Ufererosion**, **Unterspülungen** am Fuß von Bauwerken, **Sedimentablagerungen** oder **Verkläuerungen** sowie zu einer erhöhten Beanspruchung der Entwässerungs- und Regenwasserableitungssysteme. Diese Phänomene können die Strukturen mittelfristig schwächen.

Um die wasserseitigen Infrastrukturen funktionsfähig zu halten, ist es daher wichtig, diese neuen klimatischen Gegebenheiten zu berücksichtigen. Die Vorwegnahme dieser Entwicklungen erfordert **eine Anpassung der Instandhaltung** dieser Infrastrukturen, aber auch **Investitionen** zur Verstärkung bestimmter Bauwerke. Die wichtigsten Anpassungsmaßnahmen, die von den Häfen im Rahmen des CRANE-Projekts herausgearbeitet wurden, werden im Folgenden vorgestellt.

2.2.1.2 Wichtigste Anpassungsmaßnahmen

► Organisatorische Maßnahmen

Bestimmte organisatorische Maßnahmen sind erforderlich, um die wasserseitigen Infrastrukturen an den Klimawandel anzupassen. Zunächst einmal ist es unerlässlich, **die Rollen** der einzelnen Akteure (Kommunen, institutionelle Partner, Häfen usw.) bei der Verwaltung dieser Infrastrukturen **zu klären**. Solange diesbezüglich noch Unklarheiten bestehen, ist dies eine unabdingbare Voraussetzung, bevor Anpassungsmaßnahmen eingeleitet werden können.

Eine verstärkte **Zusammenarbeit** zwischen diesen Akteuren und die **gemeinsame Nutzung von Infrastrukturen** zur besseren Krisenbewältigung können ebenfalls zahlreiche Vorteile mit sich bringen. Dies kann durch die Bereitstellung von Anlegeplätzen, Kais und Becken, die für Niedrigwasser geeignet sind, oder von „**Zufluchtsorten**“ für Boote im Falle von Überschwemmungen geschehen.

Ebenfalls im Bereich des Krisenmanagements ist es wichtig, geeignete Maßnahmen zum Schutz der Infrastruktur, der Schiffe und der Menschen sowie zur Aufrechterhaltung des Betriebs zu treffen, sofern dies möglich ist: **Anpassung der Anlegesysteme** im Falle von Überschwemmungen, **Sperrung** unbenutzbarer Kais, **vorübergehende Stilllegung** bestimmter Infrastrukturen (z.B. Schleusen) usw. Parallel dazu kann die **Verlagerung auf andere Verkehrsträger**, insbesondere auf die Schiene, dazu beitragen, die Kontinuität der Logistikströme aufrechtzuerhalten.

Ergänzend dazu stellen **regelmäßige Krisenmanagementübungen** sicher, dass die Akteure bereit sind, bei solchen Ereignissen angemessen zu reagieren (z.B. Übung zur Einrichtung einer mobilen Schutzbarriere).

► Maßnahmen zum Schutz der bestehenden Anlagen

Direkte Eingriffe an den Infrastrukturen sind ebenfalls erforderlich, um sicherzustellen, dass diese funktionsfähig bleiben. Insbesondere ist es wichtig, bei extremen Wetterereignissen **Inspektionen** der Infrastrukturen durchzuführen, um Risiken einer Beschädigung frühzeitig zu erkennen und zu beheben. Diese Inspektionen ermöglichen es, **die Instandhaltung gezielt zu verstärken**, um Risiken zu begrenzen (Reparatur von Rissen, geschwächten Verankerungen usw.). Eine angemessene Instandhaltung ermöglicht es nämlich, spätere größere Investitionen zu vermeiden, wenn der Verfall der Infrastruktur bereits zu weit fortgeschritten ist. Der Begriff der „Verstärkung“ der Instandhaltungsmaßnahmen wurde daher von der Mehrheit der Häfen im Rahmen des CRANE-Projekts übernommen.

Bei bestimmten Infrastrukturen kann es auch sinnvoll sein, einen Schritt weiterzugehen und **die empfindlichsten Komponenten** vorbeugend durch widerstandsfähigere Systeme **zu ersetzen**. Bei Schleusen oder festen Schiebetoren kann beispielsweise die Erhöhung der wichtigsten elektronischen Komponenten, wie des Steuerungssystems, für bestimmte Anlagen von Interesse sein.

Schließlich kann es in bestimmten Fällen erforderlich sein, **die Belastungen** der empfindlichsten Infrastrukturen **zu reduzieren**, um Risiken zu begrenzen. So kann es beispielsweise sinnvoll sein, die Lagerung und den Verkehr hinter geschwächten Kais einzuschränken.

► Höhere Investitionen zur Verstärkung bestimmter Infrastrukturen

Die Häfen müssen zudem Investitionen tätigen, um die wasserseitigen Infrastrukturen zu verstärken und das Risiko von Schäden und Brüchen zu begrenzen. Zunächst ist es notwendig, spezifische **Studien** für die empfindlichsten Infrastrukturen durchzuführen, um sicherzustellen, dass die ursprüngliche Dimensionierung trotz der im Zusammenhang mit dem Klimawandel zu erwartenden Entwicklungen weiterhin angemessen ist. Im Rahmen des CRANE-Projekts haben die meisten Häfen insbesondere Studien geplant, um **gefährdete Kais** innerhalb ihrer Hafengebiete **zu identifizieren** (weitere Einzelheiten finden Sie im detaillierten Datenblatt zu diesem Thema) und für die betroffenen Häfen zudem zu **überprüfen**, ob ihre **Schutzdämme** für die zu erwartenden stärkeren Überschwemmungen ausreichend sind.

Im Anschluss an diese Studien müssen bei Bedarf Maßnahmen zur Konsolidierung der Infrastruktur durchgeführt werden. Dies umfasst beispielsweise die **Verstärkung der Kaifundamente**, die **Konsolidierung der Spundwandverankerungen** oder auch Maßnahmen zur **Uferbefestigung** (Einbau von Gabionen, Geotextilien, Einsatz naturbasierter Lösungen usw.). Die **Neudimensionierung** bestimmter Infrastrukturen, wie beispielsweise **Anleger** oder **Wellenbrecher**, nach einer baulichen Begutachtung muss ebenfalls erfolgen, damit diese bei stärkeren Hochwasserereignissen oder Niedrigwasserphasen funktionsfähig bleiben. Bei Schleusentoren ist es für bestimmte Häfen zudem sinnvoll, mechanisch **betätigbare Schleusentore** zu installieren (als Ersatz für beispielsweise per Schiff angelieferte Tore) oder **die bestehenden Anlagen zu verstärken** (gemeinsame Verstärkung der Dichtungsfähigkeit und der strukturellen Integrität unter hohen hydraulischen Belastungen, insbesondere durch eine Modernisierung der Absperrvorrichtungen) entsprechend den zu erwartenden Abflussmengen, um sicherzustellen, dass der Hafen im Falle von Hochwasser geschützt bleibt.

2.2.1.3 Wichtige Erkenntnisse

Um die wasserseitigen Infrastrukturen im Kontext des Klimawandels funktionsfähig zu halten, gibt es verschiedene Lösungen. Insbesondere ist es notwendig, **die bestehenden Prozesse zur Verwaltung** dieser Infrastrukturen (Inspektion, Instandhaltung, geeignete Krisenmanagementmaßnahmen usw.) zu **stärken**, aber auch ihre Dimensionierung zu überprüfen und, falls erforderlich, in ihre **Verstärkung, Konsolidierung, Anpassung** oder **Erhöhung** zu investieren.

2.2.2 Eisenbahninfrastruktur

2.2.2.1 Hintergrund und Herausforderungen

Die Berücksichtigung klimatischer Risiken ist eine zentrale Herausforderung für die Widerstandsfähigkeit der Eisenbahninfrastrukturen. Dieses Thema ist bereits heute fester Bestandteil

der laufenden Betriebsabläufe im Schienennetz. Im Rahmen des Klimawandels müssen diese jedoch weiterentwickelt und durch Investitionen ergänzt werden, um ein zufriedenstellendes Serviceniveau aufrechtzuerhalten. Der Klimawandel bringt nämlich eine Reihe neuer Herausforderungen mit sich, die in Zukunft berücksichtigt werden müssen:

- Die Temperaturschwankungen, denen die Infrastrukturen ausgesetzt sein werden, werden zunehmen (mit teilweise sehr schnellen **Temperaturschwankungen**), und **Hitzewellen** werden häufiger und intensiver auftreten. Die Eisenbahninfrastrukturen in der Oberrheinregion sind derzeit nicht unbedingt dafür ausgelegt, diesen Temperaturen standzuhalten, was beispielsweise zu erheblichen thermischen Belastungen der Schienen führen kann, die eine Verwerfung der Gleise zur Folge haben oder den Betrieb der elektronischen Systeme (Signalgebung, Erkennung, Steuerung) beeinträchtigen können, die hohen Temperaturen ausgesetzt sind.
- Häufigere und intensivere **Starkniederschläge** stellen insbesondere ein Problem für die Stabilität der Infrastruktur dar (z.B. durch Unterspülungen).
- Zudem steigt das Risiko, dass **Hochwasserereignisse** die Eisenbahninfrastruktur beeinträchtigen. Insbesondere die Anzahl der gefährdeten Streckenabschnitte oder das Ausmaß der Auswirkungen dieser Hochwasserereignisse auf die Infrastruktur (heftigere Ereignisse verursachen größere Schäden) könnten zunehmen.
- Das Risiko im Zusammenhang mit **Stürmen** und den Auswirkungen starker Winde auf die Eisenbahnstrecken (insbesondere umstürzende Bäume) wird für die Betreiber von Eisenbahnstrecken ebenfalls ein Thema bleiben, das es zu berücksichtigen gilt. In diesem Punkt bleiben die Auswirkungen des Klimawandels jedoch ungewiss.
- **Vegetationsbrände:** Anhaltende Dürreperioden erhöhen das Risiko von Vegetationsbränden in der Nähe von Eisenbahnstrecken. Auch wenn dieses Risiko in erster Linie die nationalen Schienennetze betrifft, können bestimmte Hafenbahnstrecken, die durch bewachsene Gebiete führen, ebenfalls davon betroffen sein. Projekte zur Begrünung der Gleisränder – die im Übrigen vorteilhaft für das Wärmemanagement und den Oberflächenabfluss sind – müssen dieses Risiko bei der Auswahl der Pflanzenarten und der Pflegeverfahren berücksichtigen.

Die Eisenbahninfrastrukturen werden daher weniger stabilen und extremen klimatischen Bedingungen ausgesetzt sein. Dies wird Materialverschleiß verstärken, und das Auftreten von häufiger auftretenden und intensiveren Extremwetterereignissen muss berücksichtigt werden, um **Ausfälle** zu vermeiden. Eine Vorwegnahme dieser Phänomene und die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen sind daher notwendig, um ein stabiles Serviceniveau aufrechtzuerhalten.

Im Rahmen des CRANE-Projekts ist es zudem wichtig zu betonen, dass die traditionellen Anpassungsmaßnahmen des Eisenbahnsektors nicht unbedingt in gleicher Weise auf Hafenbahnnetze anwendbar sind. Diese Netze weisen aufgrund ihrer Größe und der Eigenschaften der Gleise in einem Hafengebiet nämlich Besonderheiten auf. Dies erfordert die Anpassung bestimmter klassischer Maßnahmen und schließt andere aus. Die **wichtigsten Anpassungsmaßnahmen**, die im Rahmen des Projekts als relevant identifiziert wurden, sind im Folgenden aufgeführt.

2.2.2.2 Wichtigste Anpassungsmaßnahmen

► Maßnahmen zum Krisenmanagement

Krisenmanagementmaßnahmen ermöglichen es, das Auftreten extremer Wetterereignisse gelassener zu bewältigen, und sind daher im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel unverzichtbar. Diese Maßnahmen wurden daher von der Mehrheit der am CRANE-Projekt beteiligten Häfen ausgewählt.

In diesem Zusammenhang ist es zunächst wichtig, die **kritischen Eisenbahnstrecken** innerhalb des Hafengebiets zu identifizieren und einen **Priorisierungsplan** für die für die Aufrechterhaltung des Betriebs wesentlichen Anlagen zu erstellen. Daraus ergibt sich die Festlegung eines **Krisenmanagementplans**, der Notfallverfahren umfasst und es ermöglicht, Einsatzteams mit spezifischer, der jeweiligen Krisensituation angepasster Ausrüstung rasch zu mobilisieren. Schließlich ermöglichen bestimmte punktuelle Maßnahmen die Aufrechterhaltung des Betriebs im Notbetrieb:

Einsatz von **Diesellokomotiven** bei Störungen der Stromversorgung, Rückgriff auf **manuelle Signalanlagen**, wenn elektronische Systeme ausfallen, oder **Geschwindigkeitsbegrenzungen** bei Hitzewellen.

► **Verstärkte Instandhaltung und Überwachung des Zustands der Infrastruktur**

Da der Materialverschleiß durch den Klimawandel beschleunigt wird, ist es notwendig, die Zustandsüberwachung der Eisenbahninfrastruktur und die damit verbundenen Instandhaltungsmaßnahmen zu verstärken. Die am CRANE-Projekt beteiligten Häfen haben sich insbesondere dafür ausgesprochen, die Überwachungsmaßnahmen der Infrastruktur zu intensivieren, wie z.B. **Sichtinspektionsrundgänge**, die **Installation von Sensoren** und die **elektronische Überwachung** des Zustands dieser Infrastrukturen, verbunden mit einer **verstärkten Beobachtung** der lokalen **Wetterbedingungen** und einem entsprechenden **Warnsystem**.

Die durch diese Überwachungsmaßnahmen gesammelten Informationen ermöglichen es anschließend, die Wartungsarbeiten zu intensivieren. Dies geschieht insbesondere durch die Festlegung eines **saisonalen** Infrastrukturmanagementplans zur Vorwegnahme von Risiken, die Einführung eines Plans für **vorbeugende Wartung** oder auch die Durchführung von **Baumschnittmaßnahmen** im Umfeld sensibler Infrastrukturen. Bei Bedarf kann es auch sinnvoll sein, bestimmte sensible Komponenten durch **widerstandsfähigere** (z.B. gegen starke Hitze) zu ersetzen.

► **Notwendige tiefgreifendere strukturelle Anpassungen zum Schutz der Infrastruktur**

Über Maßnahmen zum Krisenmanagement und zur verstärkten Instandhaltung hinaus müssen die Häfen auch in bestimmte umfangreichere Anpassungsmaßnahmen investieren, um die Aufrechterhaltung des Betriebs zu gewährleisten. Die Verstärkung und allgemeine Verbesserung der **Entwässerungssysteme** ist insbesondere eine wiederkehrende Maßnahme, die von den sieben Häfen des CRANE-Projekts herausgearbeitet wurde, um unter anderem die Eisenbahninfrastruktur zu schützen. Konkret ist es notwendig, einen **integrierten Ansatz** auf Ebene der Hafengebiete zu etablieren, um die Risiken von Starkniederschlägen und Überschwemmungen bereichsübergreifend zu bewältigen (siehe Abschnitt 2.3 Wasserressourcen, unten). Dies kann beispielsweise darin bestehen, detaillierte hydraulische Untersuchungen auf der Ebene des Hafengeländes durchzuführen, um sensible Tiefpunkte zu identifizieren und die Entwässerungsanlagen (Gräben, Rinnen, Rückhaltebecken) lokal neu zu dimensionieren, wobei Szenarien mit Extremniederschlägen berücksichtigt werden.

Was die Infrastruktur selbst betrifft, kann es auch sinnvoll sein, deren Stabilität durch den Einsatz von **Bodenstabilisierungstechniken** zu erhöhen. So ermöglicht beispielsweise der Einbau von Geogittern an der Schnittstelle zwischen Boden und Gleisunterbau eine Verbesserung der Tragfähigkeit der Bahnplattformen unter verschlechterten Bedingungen und eine Begrenzung von Verformungserscheinungen unter Verkehrsbelastung nach Wassersättigung. Es kann auch sinnvoll sein, die Gleise, sofern möglich, auf **Schotter** zu verlegen, um die Auswirkungen von Starkniederschlägen zu begrenzen. Lokal begrenzt kann auch die Anbringung von **wasserdichten Gehäusen** um die empfindlichsten Anlagen herum sinnvoll sein. Gegen eine unter Umständen recht hohe Investition haben sich einige Häfen des CRANE-Projekts zudem für Maßnahmen zur **Erhöhung** bestimmter kritischer Anlagen oder bestimmter, besonders hochwassergefährdeter Schienenabschnitte ausgesprochen.

Ergänzend zu diesen Maßnahmen zur Bewältigung der Risiken durch Hochwasser und Starkniederschläge wurden Maßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen von Hitzewellen ergriffen. Die am CRANE-Projekt beteiligten Häfen sprachen sich insbesondere für den Einsatz der Technik der **geschweißten Langschienen** aus. In bestimmten Fällen ist es möglich, **reflektierende Materialien** oder weiße Farbe zu verwenden, um die Erwärmung der Oberflächen zu begrenzen, die **Isolierung** um bestimmte empfindliche Komponenten zu verstärken oder eine **mechanische Redundanz** bei elektrischen Systemen (z.B. Weichen oder Signalanlagen) einzurichten, die einem Ausfallrisiko ausgesetzt sind.

2.2.2.3 Wichtige Erkenntnisse

Extreme Wetterereignisse, die sich auf die Eisenbahninfrastruktur auswirken, werden zunehmen; daher ist es von entscheidender Bedeutung, die **Fähigkeit der Häfen zur Bewältigung der** damit verbundenen **Krisen** zu stärken. Gleichzeitig muss die Widerstandsfähigkeit dieser Infrastrukturen durch **Überwachungs-** und **Instandhaltungsmaßnahmen** gestärkt werden, um das Ausfallrisiko zu begrenzen. Auch umfangreichere **Investitionen** sind unvermeidlich, um das Schienennetz an die neuen klimatischen Bedingungen anzupassen.

Schließlich darf nicht vergessen werden, dass die Eisenbahninfrastrukturen der Häfen mit **den nationalen Schienennetzen** (im Fall des CRANE-Projekts mit dem französischen, deutschen und schweizerischen) verbunden sind. Die logistischen Schienenströme sind somit vom reibungslosen Betrieb dieser Netze abhängig, und die Aspekte der Interoperabilität und der Schnittstellen zwischen den nationalen und den Hafen-Schienennetzen müssen ebenfalls berücksichtigt werden (weitere Einzelheiten finden Sie im ausführlichen Datenblatt zu diesem Thema).

2.2.3 Straßeninfrastruktur

2.2.3.1 Hintergrund und Herausforderungen

Die klimatischen Risiken, die sich auf das Straßennetz der Häfen auswirken können, ähnelt weitgehend denjenigen, die die Eisenbahninfrastruktur betreffen, auch wenn letztere empfindlicher ist (z.B. aufgrund elektrischer Komponenten). Die wichtigsten Risiken, die im Zusammenhang mit dem Klimawandel zu berücksichtigen sind, sind daher folgende:

- Die Zunahme und Intensivierung von **Hitzewellen**, was zu einer beschleunigten Abnutzung der Straßenbeläge führen kann.
- Die zunehmende Intensität von **Starkniederschlägen**, die die Infrastruktur destabilisieren oder Probleme bei der Befahrbarkeit der Straßen verursachen können.
- Ebenso steigt das **Hochwasserrisiko**, und die Anzahl der diesem Risiko ausgesetzten Straßenabschnitte kann in bestimmten Gebieten zunehmen.
- Schließlich bleibt das Risiko von umstürzenden Bäumen auf den Fahrbahnen infolge von **Sturmereignissen** ein Risiko, das von den Straßenbetreibern berücksichtigt werden muss, auch wenn noch große Unsicherheit hinsichtlich der Entwicklung dieses Risikos im Rahmen des Klimawandels besteht.

Die Straßeninfrastruktur wird daher extremen und weniger stabilen klimatischen Bedingungen ausgesetzt sein. In diesem Zusammenhang wird es insbesondere notwendig sein, robuste Krisenmanagementverfahren einzuführen und die Instandhaltung zu verstärken, um **die Befahrbarkeit** der Infrastruktur **aufrechtzuerhalten**. Die wichtigsten Maßnahmen zur Anpassung der Straßeninfrastruktur, die von den Häfen im Rahmen des CRANE-Projekts ausgewählt wurden, sind im Folgenden detailliert aufgeführt.

2.2.3.2 Wichtigste Anpassungsmaßnahmen

► Krisen antizipieren und bewältigen

Die **Priorisierung** kritischer Straßenabschnitte, die innerhalb der Hafengebiete befahrbar gehalten werden müssen, ist eine Schlüsselmaßnahme. Diese Maßnahme wurde von der Mehrheit der am CRANE-Projekt beteiligten Häfen ausgewählt und muss den Ausgangspunkt des Anpassungsprozesses bilden.

Ergänzend dazu und nach dem gleichen Prinzip wie bei der Schieneninfrastruktur ist es notwendig, einen **Krisenmanagementplan** zu erstellen. Dieser muss es ermöglichen, im Krisenfall **schnelle Einsatzteams** zu entsenden, **Umleitungsstrecken** einzurichten und **gesperrte Straßen** dynamisch zu **kennzeichnen**. Die Teams müssen zudem über **geeignete Ausrüstung** zur Krisenbewältigung verfügen (z.B. Kettensägen, Hubarbeitsbühnen oder auch Häcksler, um sturmbedingte Baumstürze auf den Fahrwegen zu beseitigen).

Schließlich kann es sinnvoll sein, bestimmte punktuelle Maßnahmen zu ergreifen, um die Risiken in Krisenzeiten zu begrenzen. So kann beispielsweise die Einführung **vorübergehender Geschwindigkeitsbegrenzungen** bei Hitzewellen in Betracht gezogen werden, um die Belastung von Fahrbahnen mit verminderter Tragfähigkeit zu verringern. Diese Maßnahme dient in erster Linie der Sicherheit. Unter bestimmten Verkehrsbedingungen kann sie zudem geringfügig zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen beitragen, indem sie einen gleichmäßigeren Verkehrsfluss fördert.

► Instandhaltung verstärken und Materialien anpassen

Im Rahmen des Klimawandels wird die Straßeninfrastruktur einem stärkeren Druck ausgesetzt sein. Es ist daher notwendig, dem vorzugreifen, indem die verwendeten Materialien angepasst und die Instandhaltungsmaßnahmen verstärkt werden.

Zunächst ist es wichtig, **den Zustand der Infrastruktur** durch regelmäßige Inspektionen zu überwachen und bei Bedarf Technologien zur Erkennung von Senkungen einzusetzen. Diese Überwachung ermöglicht es, angemessene Instandhaltungsmaßnahmen durchzuführen, die zwangsläufig häufiger erfolgen müssen und zu einer zentralen Herausforderung für die Erhaltung des Netzes in gutem Zustand werden. Dazu gehören insbesondere regelmäßige Straßenreparaturen, **vorbeugende Instandhaltung** und die **Erneuerung von Belägen** im Vorfeld der intensivsten Hitzewellen, **Baumschnittpläne** oder auch eine Erhöhung der **Schmierhäufigkeit** der mechanischen Elemente von Drehbrücken.

Um die Widerstandsfähigkeit des Straßennetzes zu erhöhen, hat die Mehrheit der Häfen zudem Maßnahmen **zur Anpassung der verwendeten Beläge an starke Hitze**, vorausgewählt =, kombiniert mit dem Einsatz heller Farben oder reflektierender Materialien, um die Erwärmung bestimmter Flächen (z. B. Gehwege) zu verringern. Weitere Einzelheiten zu den technischen Möglichkeiten dieser Lösungen finden Sie in dem zu diesem Thema verfassten detaillierten Datenblatt.

Was schließlich die am CRANE-Projekt beteiligten Häfen betrifft, so sind im Rahmen ihrer Anpassungsmaßnahmen spezifischere Anpassungen an den Brücken vorgesehen, insbesondere die Verwendung **von Asphalt mit geringer Ausdehnung** und die **Neudimensionierung der Fahrbahnfugen**, um die Auswirkungen von Hitzewellen auf diese Infrastrukturen zu begrenzen.

► Investitionen zum Schutz der Straßeninfrastruktur

In einigen Fällen sind auch umfangreichere Investitionen erforderlich, um die Befahrbarkeit der Straßeninfrastruktur langfristig zu gewährleisten. Ähnlich wie bei der Eisenbahninfrastruktur wird eine Neudimensionierung der Entwässerungsnetze auf Ebene der Hafengebiete dazu beitragen, die Risiken im Zusammenhang mit Starkniederschlägen und Hochwasser zu begrenzen (siehe Abschnitt 2.3 Wasserressourcen, unten).

Ferner ist es wichtig, genauere **Studien** durchzuführen, um zu ermitteln, welche Straßen und Brücken im Hafengebiet aufgrund der im Rahmen des Klimawandels zu erwartenden Wasserständen einem erhöhten Hochwasserrisiko ausgesetzt sein werden. Je nach den Ergebnissen dieser Studien kann es sinnvoll sein, einige dieser Infrastrukturen **anzuheben** oder **bestimmte Brücken** beispielsweise *durch* den Einsatz von **Steinschüttungen** oder **Spundwänden** zu **verstärken**.

Schließlich kann sich der sinkende Wasserstand auch auf die Fundamente bestimmter Brücken in den Hafengebieten auswirken. Diese Auswirkungen müssen von Fall zu Fall untersucht werden, und gegebenenfalls müssen die **Fundamente** der betroffenen Brücken **verstärkt** oder sogar **ersetzt** werden.

2.2.3.3 Wichtige Erkenntnisse

Grundlage für die Anpassung der Straßeninfrastruktur in den Häfen muss die **Priorisierung** der wichtigsten Verkehrsachsen sein. Daraus ergeben sich verschiedene Anpassungsmaßnahmen, die von der Formalisierung des **Krisenmanagements** über eine **verstärkte Überwachung** des Zustands der Infrastruktur bis hin zur Anpassung der verwendeten **Materialien** reichen, um den zunehmenden Belastungen durch den Klimawandel standzuhalten. In bestimmten Fällen und je nach der spezifischen Gefährdung jedes Hafens sind zudem **größere Investitionen** erforderlich, um bestimmte

Infrastrukturen insbesondere vor den Auswirkungen von Überschwemmungen und sinkenden Wasserständen zu schützen.

Schließlich ist es ebenso wie beim Schienennetz notwendig, die **Anbindungen** des Hafenstraßennetzes an die von Dritten (Städte, Departements, Bundesländer, Staaten usw.) verwalteten Straßennetze zu berücksichtigen. Im Rahmen der Anpassungsmaßnahmen der am CRANE-Projekt beteiligten Häfen ist eine verstärkte Koordination und Zusammenarbeit mit diesen Akteuren erforderlich (siehe Abschnitt 2.4 Einbindung der Häfen in ihr Umland, unten).

2.2.4 Fazit zur Infrastruktur

Im Bereich „Infrastruktur“ besteht die Anpassung an den Klimawandel darin, das Spektrum der Bedingungen zu erweitern, denen diese Infrastruktur standhalten kann (größere Temperaturschwankungen, Wechsel von Dürre und starken Niederschlägen, Hochwasserereignisse, aber auch häufiger auftretende und intensivere Niedrigwasserstände usw.), um ihren guten **Zustand** und ihre **Funktionsfähigkeit** zu gewährleisten.

Dazu müssen die Häfen an drei Hauptschwerpunkten arbeiten. Die Formalisierung eines angemessenen **Krisenmanagements** und von Verfahren zur raschen Wiederherstellung der Dienste oder zum Betrieb im Notbetrieb ist ein erster wichtiger Schritt. Parallel dazu ermöglicht die Verstärkung der **Instandhaltung** und der **Überwachung des Zustands** der Infrastrukturen, das Ausfallrisiko zu begrenzen. Schließlich sind auch **umfangreichere Investitionen** erforderlich, um die Widerstandsfähigkeit der Infrastrukturen zu verbessern, indem die verwendeten Materialien angepasst, die Strukturen verstärkt oder neue Schutzinfrastrukturen errichtet werden.

Generell ist es zudem wichtig, dass die Häfen offen für **Innovationen** bleiben und diese Themen aufmerksam verfolgen, um die an den besten geeigneten Anpassungsmaßnahmen umzusetzen.

2.3 Wasserressourcen

Die **Wasserressourcen** sind eines der zentralen Themen bei der Anpassung der Rheinhäfen an den Klimawandel. Der Rhein und seine Auen stellen eine lebenswichtige Ressource für die Hafenaktivitäten dar – Schifffahrt, Wasserversorgung der Unternehmen, Brandbekämpfung, industrielle Kühlung, Regenwassermanagement –, doch diese Ressource ist zunehmenden und gegensätzlichen Belastungen ausgesetzt: einerseits immer häufiger auftretenden und intensiveren Hochwasserereignissen und Starkniederschlägen; andererseits anhaltenden Niedrigwasserperioden und Dürren, die den Wasserstand und die Verfügbarkeit der Ressource verringern.

Im Rahmen des CRANE-Projekts hat das Cerema gemeinsam mit den sieben Partnerhäfen (Karlsruhe, Ludwigshafen, Mannheim, Basel, Kehl, Mulhouse, Straßburg) Anpassungsmaßnahmen identifiziert, bewertet und ausgewählt, die drei zentralen Herausforderungen im Zusammenhang mit der Wasserressource abdecken:

- **Niedrigwasser:** sinkende Wasserstände und Einschränkung der Schifffahrtskapazitäten;
- **Hochwasser** und **Starkniederschläge:** Überlastung der Kanalisationsnetze, Überschwemmungen und Schäden an der Infrastruktur;
- **Dürre** und Wasserverbrauch: Versorgungsengpässe für Hafenunternehmen und Herausforderungen im Hinblick auf einen sparsamen Umgang mit Wasser.

2.3.1 Niedrigwasserstände und sinkende Wasserstände des Rheins

2.3.1.1 Hintergrund und Herausforderungen

Niedrigwasserstände stellen für die Rheinhäfen eine der unmittelbaren klimatischen Bedrohungen dar. Die Klimaprognosen für das Rheingebiet deuten auf eine Zunahme der Häufigkeit, Dauer und Intensität von Niedrigwasserereignissen hin, die auf das Zusammenspiel von heißeren Sommern, der Abnahme der alpinen Schneedecke und einer erhöhten Evapotranspiration zurückzuführen sind (BAFU, 2021; IKSR/IKSR, 2020). Während der außergewöhnlichen Niedrigwasserstände in den Jahren 2018 und 2022 erreichten die Pegelstände an einigen Rheinabschnitten historische Tiefststände, wodurch die

gewerbliche Schifffahrt für mehrere Wochen unmöglich wurde und den Verladern und Reedern wirtschaftliche Verluste entstanden.

Über die direkten Beeinträchtigungen der Schifffahrt hinaus stellen Niedrigwasserstände die Hafeninfrastruktur vor besondere Herausforderungen: Auswirkungen auf die Stabilität bestimmter Infrastrukturen oder auch eine Verringerung der Kapazität von Brandschutzsystemen, die auf Wasserentnahmen aus dem Fluss angewiesen sind.

2.3.1.2 Wichtigste Anpassungsmaßnahmen

Im Rahmen des CRANE-Projekts konnten mehrere Kategorien von Maßnahmen zur Bewältigung von Niedrigwasserständen identifiziert werden, die von institutioneller Lobbyarbeit bis hin zur Anpassung der Schiffsflotten und der Betriebspraktiken reichen.

► Interessenvertretung und territoriale Koordination

Die meisten Häfen haben sich für Lobbyarbeit bei den Wasserbehörden ausgesprochen, um die Steuerung der Wasserstände am Rhein zu verbessern. Diese Maßnahmen sind insbesondere Teil des „**Aktionsplans Niedrigwasser Rhein**“, der darauf abzielt, durch Maßnahmen zur Flussbettgestaltung, Speicherung und Rückhaltung von Wasser zuverlässige Schifffahrtsbedingungen in Niedrigwasserzeiten zu gewährleisten.

Die **Koordination** zwischen Hafenakteuren und Wasserbehörden steht ebenfalls ganz oben auf der Prioritätenliste: Einrichtung von Krisenstäben in Niedrigwasserzeiten (Planung von Mindestabflussmengen, abgestimmte Reduzierung der Wasserentnahmen...). Dieser kooperative Ansatz, für den sich mehrere Häfen ausgesprochen haben, verdeutlicht die Notwendigkeit einer Multi-Akteurs-Governance der Flussressourcen.

► Anpassung der Wasserstraße

Auf technischer Ebene wurden mehrere Handlungsansätze zur Aufrechterhaltung der Befahrbarkeit der Wasserstraße und des Brandschutzes identifiziert. Das regelmäßige **Ausbaggern** der Hafenbecken und des Rheingrunds ermöglicht insbesondere die Aufrechterhaltung der erforderlichen Tiefgänge. Dies wirft jedoch negative ökologische Herausforderungen auf (Aufwirbelung des Gewässergrundes, Mobilisierung potenziell verschmutzter Sedimente), die vorweggenommen werden müssen. In einigen Häfen ist zudem eine **Neugestaltung der Brandschutzvorrichtungen** erforderlich. Dies geschieht durch die Anpassung der Wasserentnahmestellen an niedrige Wasserstände, aber auch, falls erforderlich, durch die Inbetriebnahme von Puffertanks oder die unternehmensübergreifende gemeinsame Nutzung von Wasserspeichersystemen.

Im Rahmen des CRANE-Projekts wurden auch ergänzende Maßnahmen an der **wasserseitigen Infrastruktur** selbst beschlossen, die im vorangegangenen Abschnitt näher erläutert werden (siehe Abschnitt **Erreuer ! Source du renvoi introuvable**. Wichtige Erkenntnisse, oben).

► Anpassung der Flotten und der Betriebsabläufe

Die Anpassung der Schiffe an die Herausforderungen des Niedrigwassers ist ein zentrales Thema, um die Schifffahrt auf dem Rhein zu gewährleisten. Investitionen in Schiffe mit geringem Tiefgang (leichtere Materialien, Optimierung der Propeller, angepasstes Design) sind zwar mit hohen Kosten verbunden, aber äußerst effizient. Punktuelle Anpassungslösungen, wie das europäische Projekt Novimove (Erhöhung des Auftriebs bestehender Schiffe), gehören ebenfalls zu den Lösungen, die eine pragmatische und schrittweise Antwort auf diese Herausforderung bieten. Ein **Dialog** zwischen den Häfen und den Transportunternehmen ist notwendig, um die Umsetzung dieser Maßnahmen zu konkretisieren.

Die Anpassung der **Betriebsabläufe** erfordert auch eine Weiterentwicklung der Lagerverwaltungsmethoden durch die im Hafengebiet ansässigen Unternehmen, die Bereitstellung zusätzlicher Lagerflächen für Waren, die während der Stillstandszeiten der Schifffahrt warten, sowie die Verbesserung der Multimodalität (Verlagerung auf den Schienenverkehr) als Ausweichlösung im Krisenfall.

2.3.1.3 Wichtige Erkenntnisse

Das Management von Niedrigwasserständen verdeutlicht die **Grenzen rein hafenbezogener Maßnahmen**: Die Häfen haben weder Einfluss auf den Abfluss des Rheins noch auf die Wasserbaupolitik des Flusses. Deswegen werden **institutionelle Lobbyarbeit** und die **Koordination mit den Wasserbehörden** (nationale Behörden, IKSR) als unverzichtbare Hebel identifiziert, kombiniert mit **internen technischen Anpassungen**.

2.3.2 Hochwasser und Starkniederschläge

2.3.2.1 Hintergrund und Herausforderungen

Der Klimawandel äußert sich nicht nur in häufigeren Dürreperioden, sondern auch in einer Zunahme **extremer Niederschlagsereignisse**. Für die Rheinhäfen zeigt sich dies auf zwei Ebenen: potenziell stärkere **Hochwassereignisse** am Rhein und eine **zunehmende Überlastung der Entwässerungsnetze** bei Starkregenereignissen (kurzzeitige, intensive Niederschläge).

Es ist jedoch zwischen zwei Überschwemmungsmechanismen mit deutlich unterschiedlichen Dynamiken zu unterscheiden:

- **Hochwasser durch Regenabfluss**, verstärkt durch die Versiegelung der Hafengebiete, die die natürliche Aufnahmefähigkeit des Bodens verringert und das Wasser schnell an der Oberfläche konzentriert;
- **Überschwemmungen durch Flussübertritte**, die durch einen Dammbruch oder eine lokale Überlastung des Flussbettes entstehen und sich in einer Strömung mit teilweise starker Fließgeschwindigkeit sowie einem möglicherweise langsamen, aber anhaltenden Anstieg des Wasserspiegels äußern.

Diese beiden Arten von Überschwemmungen erfordern teilweise spezifische Anpassungsmaßnahmen. Ergänzend zu den Lösungen für das Regenwassermanagement müssen Häfen, die unmittelbar dem Risiko eines Rheinüberlaufs ausgesetzt sind, spezielle Schutzmaßnahmen in Betracht ziehen: Hochwasserschutz- und Hochwasserrückhalteanlagen, Koordination mit den Deichverwaltern und den für die Abflusssteuerung zuständigen Behörden sowie die Einrichtung mobiler Schutzvorrichtungen (Spundwände, Sandsäcke...) für Zugänge und sensible Anlagen.

2.3.2.2 Wichtigste Anpassungsmaßnahmen

► Entsiegelung und Regenwassermanagement an der Quelle

Im Rahmen des CRANE-Projekts wurde die **Entsiegelung** als eine der wirksamsten und ökologisch vorteilhaftesten Maßnahmen zur Bewältigung hydrologischer Probleme identifiziert. Sie wurde von allen Häfen für die Bereiche ausgewählt, in denen sie technisch machbar ist. Sie umfasst:

- **Ersetzen undurchlässiger Beläge** (Verwendung von Drainagepflastersteinen, porösem Beton, der für die hohen Belastungen im Hafenbereich geeignet ist, usw.);
- Einrichtung von **Versickerungsmulden** (begrünte oder unbeplante), um die Versickerung an der Quelle zu fördern;
- **Richtungs-** und Absetzbecken zur vorübergehenden Speicherung von Regenwasser und zur Filterung von Schadstoffen vor der Einleitung in die Umwelt anlegen;
- Entwicklung multifunktionaler **Grünflächen**, die zur Biodiversität und zur Temperaturregulierung beitragen (naturbasierte Lösungen).

Hafengebiete zeichnen sich dadurch aus, dass sie zahlreiche kontaminierte Böden aufweisen, was die Einrichtung zusätzlicher Maßnahmen erforderlich macht: Vorbehandlung des Wassers durch Ölabscheider, Abdichtung durch Geomembranen usw.

Die folgenden Bilder zeigen Beispiele für Lösungen zur Regenwasserbewirtschaftung an der Quelle.



Drainagepflastersteine mit begrünten Fugen (links), begrünter Parkplatz mit Hohlraumpflaster in der Mitte (Ecovégétal), Drainageasphalt rechts (Applied Technologies)



Versickerungsrinne an einem Gebäude (Cerema)

► Verstärkung der Entwässerungssysteme und des Schutzes der Infrastruktur

Parallel zum Regenwassermanagement an der Quelle sind Maßnahmen zum Schutz der bestehenden Infrastruktur vor Hochwasserrisiken und starken Niederschlägen unerlässlich:

- **Neudimensionierung** und regelmäßige Wartung der Kanalisation und der Dachrinnen;
- Einbau von **Absperrschiebern und Rückschlagventilen**, um bei Überlastung des Netzes einen Rückstau von Abwasser in die Gebäude zu verhindern;
- Einrichtung von **Rückhaltebecken**, um Abflussspitzen vor der Ableitung in das Netz oder zur Kläranlage abzufangen;
- Investitionen in **mobile Deiche oder temporäre Schutzsysteme** (modulare Dämme, aufblasbare Dämme usw.) für gefährdete Gebäude und Keller;
- **Erhöhung** kritischer Anlagen und Ausrüstungen in Risikogebieten.

► Resiliente Urbanisierung und Raumplanung

Wasserresilienz in künftigen Raumplanungsprojekten ist ein integraler Bestandteil der Anpassungsstrategien für Häfen. Sie muss in die Überarbeitung von Planungsdokumenten wie den lokalen Bebauungsplänen und den Hochwasserrisikopräventionsplänen einbezogen werden. Dieser Ansatz steht im Einklang mit den Leitlinien der Wasserrahmenrichtlinie und den Hochwasserrisikomanagementplänen. Er äußert sich insbesondere in der Einrichtung von **wasseraufnehmenden Pufferzonen** und **Regenrückhaltebecken** sowie in Koordinierungsmaßnahmen mit den Kommunen im Rahmen der Überarbeitung ihrer Stadtplanungsdokumente.

► Krisenmanagement

Das Krisenmanagement bei Naturgefahren (Überschwemmungen, Stürme, extreme Hitzewellen) fällt in erster Linie in die Zuständigkeit der Behörden – Präfektur in Frankreich, Bundesländer in Deutschland,

Climate Resilience and Adaptation for Upper Rhine ports (CRANE)

Anpassung der Häfen der Oberrheinregion an den Klimawandel

Kanton in der Schweiz –, die die Warnsysteme, den Schutz der Bevölkerung und die Wiederherstellung normaler Verhältnisse koordinieren. Die Häfen sind an diesen Maßnahmen beteiligt, ohne sie jedoch zu leiten. In diesem Zusammenhang müssen die internen Krisenmanagementverfahren der Hafenbetreiber mit den Notfallplänen der zuständigen Behörden abgestimmt und regelmäßig ausgearbeitet, verstärkt und aktualisiert werden:

- **Pläne zur Evakuierung** des Personals und zum Schutz sensibler Anlagen;
- Mobile **Pumpen** zur Entlastung überlasteter Abwassernetze;
- **Krisenmanagementteams** und Frühwarnsysteme (hydrologische Vorhersagen usw.);
- **Kommunaler Katastrophenschutzplan**
- **Schutzzonen** und Verfahren zur Sicherung von Schiffen im Hochwasserfall.

2.3.2.3 Wichtige Erkenntnisse

Das Hochwassermanagement im Rhein-Hafengebiet erfordert einen **kombinierten Ansatz auf zwei Ebenen**: **Regenwassermanagement** innerhalb des Hafengebiets (Entsiegelung, Entwässerung, Rückhaltung) und die **Koordination mit den Akteuren der Region** für das Hochwassermanagement an Flüssen. **Naturbasierte Lösungen** werden regelmäßig als Maßnahmen mit vielfältigen positiven Nebeneffekten (Biodiversität, Temperaturregulierung, Wasserqualität...) identifiziert.

2.3.3 Dürre – Wasserverbrauch der Hafenunternehmen

2.3.3.1 Hintergrund und Herausforderungen

Dürre stellt eine wachsende Bedrohung für die Verfügbarkeit der Wasserressourcen dar, die von den in den Rheinhafengebieten ansässigen Unternehmen genutzt werden. Wasser ist zwar für zahlreiche industrielle und logistische Zwecke unverzichtbar – Kühlung, Reinigung, Brandbekämpfung, Trinkwasser –, doch führen anhaltende und wiederholte Dürreperioden zu Einschränkungen und zu Nutzungskonflikten zwischen den verschiedenen Akteuren im Einzugsgebiet.

Die Klimaprognosen für den Rhein sagen einen Rückgang der Sommerniederschläge und einen Anstieg der Evapotranspiration voraus, was zu einer Verringerung der Grundwasserneubildung in den Auen führt, die die wichtigste Trink- und Brauchwasserquelle der Region darstellen. Unternehmen mit hohem Wasserverbrauch (chemische Industrie, Raffinerien, Kühlanlagen) sind diesem Risiko besonders ausgesetzt.

2.3.3.2 Wichtigste Anpassungsmaßnahmen

► Wassersparsamkeit und Wassereffizienz

Die im Rahmen des CRANE-Projekts identifizierte erste Reaktionslinie ist die Reduzierung des Verbrauchs an der Quelle:

- Einführung von **Wassersparmaßnahmen**: Technologien zur Wiederverwendung und zum Recycling von Brauchwasser, Regenwassernutzung für nicht trinkbare Zwecke (Bewässerung, Reinigung, Toiletten);
- **Sensibilisierung** des Personals für einen bewussten Umgang mit Wasserressourcen, einschließlich der Einführung von Priorisierungsplänen für die Wassernutzung in Zeiten von Einschränkungen;

► Sicherung der Wasserversorgung

Mehrere Häfen haben Maßnahmen erarbeitet, um ihre Wasserversorgung unabhängig von den Trinkwasserversorgungsnetzen und der Durchflussmenge des Rheins zu sichern:

- Einrichtung eines **Regenwassersammelsystems** im Hafengebiet zur Förderung der Selbstversorgung (Maßnahme, die von allen Häfen gemäß dem Referenzrahmen erarbeitet wurde);

- Für Häfen mit eigenen Brunnen oder Bohrungen: Einrichtung von **Schutzzonen** für die Wassergewinnung, Installation von Sensoren, um das Abpumpen bei festgestellter Verschmutzung zu verhindern;
- Entwicklung von **Wasserspeicherlösungen**: Zisternen, Löschwasserbehälter für nicht trinkbares Wasser, Rückhaltebecken, die für Dürreperioden ausgelegt sind;
- **Koordination** mit externen Wasserversorgern zur Ausarbeitung von Managementplänen für den Fall einer Wasserknappheit.

► **Bewirtschaftung von Hafenbecken in Zeiten von Hitze und Trockenheit**

In Zeiten von Hitzewellen und niedrigem Wasserstand verschlechtert sich die Wasserqualität in den Hafenbecken: steigende Temperaturen, Vermehrung von Cyanobakterien, Sauerstoffmangel am Grund. Hier sind einige spezifische Maßnahmen, die im Rahmen des CRANE-Projekts ausgewählt wurden, um dem entgegenzuwirken:

- **Belüftungs- und Mischsysteme** in den Hafenbecken;
- Einrichtung von „**schwimmenden Sümpfen**“ zur natürlichen Reinigung des Wassers;
- **Reinigungsmaßnahmen** zur Beseitigung abgestorbener Flora und Fauna.

2.3.3.3 *Wichtige Erkenntnisse*

Die Dürre macht die starke **Abhängigkeit** der Hafengebiete von Wasserressourcen deutlich, die aus Trinkwasserversorgungssystemen, Grundwasserentnahmen oder dem Rhein stammen. Maßnahmen zur **Wassereinsparung** und **Selbstversorgung** (Regenwassernutzung, Recycling) sind kurzfristige Prioritäten für die Häfen. Sie haben den Vorteil, dass sie kostengünstig und schnell umsetzbar sind und zusätzliche ökologische Vorteile mit sich bringen.

2.3.4 **Schlussfolgerungen zur Wasserressource**

Die übergreifende Analyse der drei Problemstellungen im Zusammenhang mit den Wasserressourcen offenbart ein für den Klimawandel in gemäßigten Zonen charakteristisches **Paradoxon**: Die Rheinhäfen müssen sich gleichzeitig **vor Wasserüberschuss** (Überschwemmungen, Oberflächenabfluss) und **Wassermangel** (Niedrigwasser, Dürre) **schützen**. Dieser doppelte Druck erfordert Anpassungslösungen, die miteinander vereinbar sind und Synergieeffekte mit sich bringen.

Die Entsiegelung veranschaulicht diese Synergie perfekt: Sie reduziert den Oberflächenabfluss bei starken Regenfällen, fördert die Grundwasserneubildung und erhöht den thermischen Komfort durch die Schaffung von Kühlinseln. **Naturbasierte Lösungen** stehen somit im Mittelpunkt der Anpassungsstrategien der Rheinhäfen.

2.4 **Einbindung der Häfen in ihr Umland**

Eine der wichtigsten Erkenntnisse des CRANE-Projekts ist, dass **die Anpassung von Hafengebieten nicht allein auf der Ebene des Hafengeländes betrachtet werden kann**. Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten zeigen vielmehr, dass Häfen als offene Systeme betrachtet werden müssen, die in ständiger Wechselwirkung mit ihrer unmittelbaren Umgebung, ihren Zufahrtswegen, den von ihnen genutzten Netzwerken und Logistikketten, den dort ansässigen Unternehmen und den Behörden stehen, die ihre Entwicklung begleiten. Im Rahmen des Benchmarkings bestätigen die Gespräche mit einer Vielzahl von Häfen und Instituten diese Sichtweise: **Klimakatastrophen decken kritische Abhängigkeiten auf, sei es in Bezug auf die Zufahrt zum Hafen, die Versorgungsnetzwerke, die logistischen Schnittstellen oder strategische Anlagen**.

In diesem Zusammenhang erweisen sich die **Verbindungen zum Hinterland** als zentrales Thema. In den Workshops betonten die Häfen, dass die Aufrechterhaltung des Betriebs weitgehend von der Robustheit der Straßen- und Schienenanbindungen sowie von deren Anbindung an Infrastrukturen abhängt, die sich teilweise außerhalb ihrer direkten Kontrolle befinden. Die Gespräche haben zudem gezeigt, dass diese Themen häufig in den Bereich der geteilten Governance fallen: Bestimmte Straßen gehören den Häfen, andere den Gemeinden/Kommunen, bestimmte Maßnahmen erfordern das

Eingreifen öffentlicher Behörden, und die Lösungen erfordern oft Intermodalität, Krisenkoordination, enge Zusammenarbeit mit den Netzbetreibern und, im weiteren Sinne, mit den öffentlichen und privaten Akteuren, die an den Verbindungsräumen tätig sind. Die Anpassung der Häfen besteht also nicht nur darin, eine Anlage zu verstärken, sondern auch darin, **die funktionale Kontinuität an der Schnittstelle zwischen dem Hafen und seinem Umland zu sichern**.

Das Projekt unterstreicht zudem die Bedeutung der **Schnittstelle zwischen Hafen und Stadt**. Im Austausch mit den Häfen wurde betont, dass bestimmte Anfälligkeiten der Häfen außerhalb des Hafens selbst entstehen, in Verbindung mit bestimmten raumplanerischen Entscheidungen, wie der Bebauungsdichte und -verteilung, der Bodenversiegelung, der Organisation der Zufahrten oder der Überlastung gemeinsamer Infrastrukturen. Umgekehrt wirken sich auch Entscheidungen zur Hafenplanung auf ihre unmittelbare Umgebung aus. Die Diskussionen zeigen somit, dass bestimmte Anpassungsmaßnahmen die Zusammenarbeit mit Dritten, insbesondere mit lokalen Behörden, erfordern, was die Anpassungsprozesse zwar verkomplizieren, aber auch bereichern kann. Über eine rein technische Logik hinaus setzt die Anpassung der Häfen somit die **Fähigkeit zum Dialog mit den angrenzenden Gebieten sowie die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Hafenbetrieb und städtischem Leben** voraus.

Diese Tatsache verweist unmittelbar auf die Stellung des Hafens in seinem **städtebaulichen und regulatorischen Umfeld**. Die Workshops haben gezeigt, dass mehrere Hebel der Anpassung von Rahmenbedingungen abhängen, die über die alleinige Zuständigkeit der Hafenverwaltung hinausgehen: städtebauliche Vorschriften, lokale Raumplanungspolitik, Risikoprävention, Wasserwirtschaft, Grundstücksentscheidungen oder sektorale Vorgaben. Die Häfen haben zudem betont, dass bestimmte gesetzliche Auflagen mit anderen Anpassungszielen in Konflikt geraten können (beispielsweise zwischen der Installation von Solaranlagen und der Dachbegrünung). Ebenso stellt die Verfügbarkeit von Flächen eine erhebliche Einschränkung dar: Die Begrünung oder Entsiegelung bestimmter Flächen kann Lagerflächen verringern oder mit der Präsenz Dritter kollidieren. Daher erfordert die Anpassung der Häfen eine bessere **Verankerung in den Dokumenten und Rahmenbedingungen, die die Raumplanung dieser Gebiete, die Mobilität, das Wassermanagement und die Risikoprävention regeln**.

Die Erkenntnisse aus dem Projekt weisen zudem auf eine stärkere Einbeziehung von **Themen** hin, die **mit Natur, Biodiversität, Umwelt, Überhitzung und ganz allgemein mit der ökologischen Wende zusammenhängen**. Die gemeinsam mit den Häfen durchgeführten Workshops und erarbeiteten Strategien haben die Grenzen einer zunehmenden Versiegelung der Hafengebiete aufgezeigt: Zunahme der befestigten Flächen, Verschärfung der Überhitzung und des Hitzebelastung, geringere Versickerung von Regenwasser sowie negative Auswirkungen auf den Gesamtbetrieb der Standorte. Umgekehrt haben die Gespräche gezeigt, wie wichtig es ist, sparsamere und „grünere“ Lösungen zu entwickeln, die ökologische Mehrwerte bieten können, sei es durch **Begrünung, Entsiegelung, integriertes Regenwassermanagement** oder stärker naturbasierte Maßnahmen. Allerdings zeigen die Gespräche, dass naturbasierte Lösungen im Hafenbereich **kontextbezogen und von Fall zu Fall konzipiert** werden müssen, insbesondere wenn die Böden kontaminiert sind oder wenn logistische Anforderungen den Spielraum für Umgestaltungen einschränken. Die getroffenen Entscheidungen hängen auch von den Merkmalen der Infrastrukturen und Gebäude, ihrer Struktur, ihrer Nutzung und den betrieblichen Einschränkungen ab.

Die Einbindung der Natur in die Häfen muss daher im Sinne der technischen Vereinbarkeit und der betrieblichen Effizienz angestrebt werden.

Schließlich zeigt das Projekt, dass die territoriale Integration von Häfen über die Maßnahmen selbst hinaus auf einer **erweiterten Governance** und der **Entwicklung einer gemeinsamen Risikokultur** beruht. Die Interviews und Workshops haben gezeigt, dass der Reifegrad je nach Akteur variiert, aber in einem Punkt übereinstimmt: Zusammenarbeit, Vernetzung der Beteiligten und ein gemeinsames Verständnis der Schwachstellen sind entscheidend für den Erfolg der Anpassung.

Die zusammenfassende Maßnahmenbeschreibung zur Risikokultur unterstreicht zudem, dass diese Dynamik über den internen Rahmen des Hafens hinausgehen und auch externe Partner einbeziehen muss. Die Anpassung von Hafengebieten erscheint somit als ein **zugleich räumlicher, organisatorischer und partnerschaftlicher Prozess, der eine nachhaltige Einbindung der Häfen in die Resilienzstrategien ihres Gebiets voraussetzt**.

3 FAZIT

Das CRANE-Projekt ist ein grenzüberschreitendes Projekt, das in deutscher und französischer Sprache durchgeführt wurde und es dank der partnerschaftlichen Zusammenarbeit zwischen dem Fraunhofer-Institut IAIS und dem Cerema ermöglichte, **die Auswirkungen des Klimawandels zu antizipieren und die Umsetzung eines Anpassungskonzepts** in den sieben Häfen der Oberrheinregion **zu planen**.

Die sieben am Projekt beteiligten Häfen befinden sich in **unterschiedlichen Kontexten**. Die **geografische Lage** jedes einzelnen bringt spezifische Herausforderungen mit sich, die **Infrastrukturen** in den einzelnen Hafengebieten sind vielfältig, und **das Verwaltungs- und Eigentumsmodell** jedes Hafens ist auf seine jeweilige Situation zugeschnitten. Dennoch zeichnen sich bei den wichtigsten Herausforderungen der Anpassung an den Klimawandel große **Trends** ab:

- Um den guten Zustand und den reibungslosen Betrieb der Hafeninfrastrukturen und -terminals zu gewährleisten, stehen den Häfen verschiedene Lösungen zur Verfügung. Zunächst können sie ihr **Krisenmanagementmodell** weiterentwickeln, um die **Geschäftskontinuität** zu sichern und auch im Notbetrieb weiterarbeiten zu können. Eine **Verstärkung der Instandhaltung** und der allgemeinen Überwachung des Zustands der Infrastrukturen wird es zudem ermöglichen, Risiken einer Verschlechterung vorwegzunehmen und präventiv zu beheben. Es werden auch **Investitionen** getätigt, um bestimmte Schlüsselstrukturen langfristig **zu schützen und zu stärken**, während gleichzeitig weiterhin **Innovationen** gefördert werden, damit die Häfen immer **widerstandsfähiger** werden.
- Das Hafen**personal** muss im Mittelpunkt des Anpassungsprozesses stehen. Die Mitarbeiter sind direkt in die Abläufe in den Hafengebieten eingebunden, und ihre Sichtweise ist entscheidend, um **die Herausforderungen** der Anpassung **zu erfassen, Lösungen dafür zu finden** und die **Kontinuität des Betriebs** zu gewährleisten. Das CRANE-Projekt hat dank einer auf **Partizipation** und **gemeinsamer Gestaltung** basierenden Arbeitsmethodik **eine Dynamik** in diesem Bereich **in Gang gesetzt**. Die Häfen möchten ihr Personal weiterhin in diesen Prozess einbeziehen, um diese positive Dynamik aufrechtzuerhalten.
- Schließlich hat das CRANE-Projekt deutlich gemacht, wie wichtig es für die Anpassung der Häfen an den Klimawandel ist, die **Verflechtungen** zwischen verschiedenen Akteuren zu berücksichtigen: die Verwalter von Wasserstraßen, Schienen- und Straßenverkehr, die lokalen Behörden, die Transportunternehmen, die Hafenunternehmen und natürlich die Häfen selbst. Letztere dürfen nicht isoliert angepasst werden; die **Zusammenarbeit** zwischen den Partnern und ihre abgestimmten Maßnahmen sind entscheidend, um die Widerstandsfähigkeit der Binnenschifffahrt zu gewährleisten. Insbesondere ist eine **gemeinsame Arbeit** erforderlich, um die Wasserstraßen, die Schiffe sowie die Schienen- und Straßenanbindungen an die einzelnen Hafengebiete anzupassen. Im Rahmen der Umsetzung ihrer Anpassungsmaßnahmen werden die am CRANE-Projekt beteiligten Häfen diesen Zusammenhängen daher besondere Aufmerksamkeit widmen und möchten auch **weiterhin gemeinsam** an diesen Themen **arbeiten**.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Klimawandel eine Herausforderung für die Binnenhäfen darstellt, **es jedoch Anpassungslösungen gibt**. In den sieben Häfen der Oberrheinregion sind bereits einige Maßnahmen umgesetzt. Das Ziel besteht daher darin, weiterhin **vorausschauend zu handeln** und **die Umsetzung von Maßnahmen fortzusetzen**. In diesem Zusammenhang hat das CRANE-Projekt dazu beigetragen, **den Anpassungsansatz der beteiligten Häfen zu strukturieren**, dessen Umsetzung zu **operationalisieren**, die **Basis der verfügbaren Maßnahmen zu erweitern** und **deren Umsetzungsmodalitäten zu präzisieren**, während gleichzeitig die verschiedenen Hafenakteure **sensibilisiert wurden**. Dieses Projekt hat zudem dazu beigetragen, die durch den Klimawandel verursachten **Unsicherheiten** für den Betrieb der Hafengebiete zu verringern. Der verbleibende Unsicherheitsgrad, der sich aus der Verwendung von Klimasimulationen ergibt, wurde **vollständig in die angewandte Methode integriert** und wird bei den mit jedem Hafen festgelegten Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt. Im Anschluss an dieses Projekt ist es weiterhin wichtig, dass die **Häfen ihre Anpassungsstrategie mit Leben füllen**, indem sie diese unter Einbeziehung künftiger Klimaveränderungen weiterentwickeln.

4 ANHÄNGE

4.1 Literaturverzeichnis

4.1.1 Methodik

- ADEME (2023). Méthodologie TACCT (Trajectoires d'Adaptation au Changement Climatique des Territoires). <https://tacct.ademe.fr/>
- Cerema (2020). Méthode Approche Systémique d'Adaptation des Infrastructures de Transport (ASAIT). Fiche technique.
- Union européenne (2020). RÈGLEMENT (UE) 2020/852 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 18 juin 2020 sur l'établissement d'un cadre visant à favoriser les investissements durables et modifiant le règlement (UE) 2019/2088. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj/eng?eliuri=eli%3Areg%3A2020%3A852%3Aoj&locale=fr>
- PIANC (2020). Climate Change Adaptation Planning for Ports and Inland Waterways. PIANC Report N°178. World Association for Waterborne Transport Infrastructure. <https://www.pianc.org/publication/climate-change-adaptation-planning-for-ports-and-inland-waterways-2>

4.1.2 Terminals

4.1.2.1 *Klimanpassung von Häfen und Terminals*

- PIANC (2020). Climate Change Adaptation Planning for Ports and Inland Waterways. PIANC Report N°178. World Association for Waterborne Transport Infrastructure. <https://www.pianc.org/publication/climate-change-adaptation-planning-for-ports-and-inland-waterways-2>
- PIANC (2023). Waterborne Transport, Ports and Waterways: A 2023 Update of Climate Change Drivers and Impacts. EnviCom Task Group 3. World Association for Waterborne Transport Infrastructure. <https://www.pianc.org/publication/waterborne-transport-ports-and-waterways-a-2023-update-of-climate-change-drivers-and-impacts/>
- PIANC (2014). Sustainable Ports – A Guide for Port Authorities. World Association for Waterborne Transport Infrastructure. <https://www.pianc.org/publication/sustainable-ports-a-guide-for-port-authorities/>
- Climate-ADAPT (2023). Adaptation des infrastructures portuaires au changement climatique. European Environment Agency. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/>

4.1.2.2 *Hitzewellen, städtische Wärmeinseln und Infrastruktur*

- ADEME (2024). Fiches solutions d'adaptation thermique et hydrique pour les aménagements industriels. Plusfraichemaville.fr. <https://plusfraichemaville.fr/fiche-solution>
- Poumadère, M., Mays, C., Le Mer, S., Blong, R. (2005). The 2003 Heat Wave in France: Dangerous Climate Change Here and Now. Risk Analysis, 25(6), 1483–1494. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00694>.

4.1.2.3 *Hochwasser, Oberflächenabfluss und Abwassermanagement*

- Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (Directive-Cadre sur l'Eau). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32000L0060>
- Directive 2007/60/CE relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32007L0060>

- BRGM (2023). Infiltration des eaux pluviales au droit d'anciens sites industriels et de friches polluées. <https://www.brgm.fr/fr/solutions/infiltration-eaux-pluviales-au-droit-anciens-sites-industriels-friches-polluees>
- Grand Est DREAL (2020). Doctrine pluviale Grand Est. Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement. https://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/doctrine_pluviale_grand_est-comprese.pdf

4.1.2.4 *Bodensenkungen und Widerstandsfähigkeit von Pflasterflächen*

- PNACC-3 — Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (2025). Mesure 30. Ministère de la Transition écologique, Paris. <https://www.ecologie.gouv.fr/dossiers/france-sadapte/3e-plan-national-dadaptation-changement-climatique>
- Note d'information Ouvrages d'art — Impact du changement climatique sur les ouvrages d'art en France : conseils aux gestionnaires et concepteurs. Cerema (2021). <https://www.cerema.fr/fr/actualites/impact-du-changement-climatique-ouvrages-art-france-conseils>

4.1.2.5 *Lagerung sensibler Güter und industrielle Sicherheit*

- Directive 2012/18/UE (SEVESO III) relative à la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32012L0018>

4.1.3 **Infrastruktur**

4.1.3.1 *Flussinfrastruktur*

- Cerema (2019). Analyse de risque des ponts en site affouillable : un guide du Cerema.
- Cerema (2020). Analyse des risques appliquée aux murs en maçonnerie.
- Cerema (2020). Méthode Approche Systémique d'Adaptation des Infrastructures de Transport (ASAIT). Fiche technique.
- Cerema (2021) Impact du changement climatique sur les ouvrages d'art en France : conseils aux gestionnaires et concepteurs.
- CETMEF (2001). ROSA 2000 : Recommandations pour le calcul aux états-limites des ouvrages en site aquatique.
- CETMEF (2005). Utilisation du béton précontraint en site aquatique : Éléments de réflexion.
- Grand Port Maritime de Bordeaux (2020). Analyse de risque dans un contexte de changement climatique et stratégie de résilience.
- Méthodologie VSC (2011). Application de la méthode Visite Simplifiée Comparée (VSC) à la gestion d'un parc d'ouvrages portuaires.
- Ministère de la Transition Écologique. Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC), volet infrastructures et systèmes de transport, action 1 – Adaptation des infrastructures et systèmes de transport au changement climatique.
- PIANC (2023). Waterborne transport, ports and waterways: a 2023 update of climate change drivers and impacts. EnviCom – Task Group 3, Climate Change and Navigation.
- PIANC (2020). Climate change adaptation planning for ports and inland waterways. Report N°178.
- Port Atlantique La Rochelle (2024). Adaptation au changement climatique du Port Atlantique de La Rochelle : Diagnostic et stratégie de résilience.

4.1.3.2 *Eisenbahninfrastruktur*

- UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE (2014). Climate Change Impacts and Adaptation for International Transport Networks-

- https://unece.org/DAM/trans/main/wp5/publications/climate_change_2014.pdf
- Jägare, V., Juntti, U. & Garmabaki, A.H.S. (2024). Roadmap for implementing climate adaptation innovations in railway. International Journal of System Assurance Engineering and Management. <https://doi.org/10.1007/s13198-024-02581-8>
- UIC, the Worldwide Railway Organization (2017). RAIL ADAPT Adapting the railway for the future - https://uic.org/IMG/pdf/railadapt_final_report.pdfx
- Cerema (2019) Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/32507>

4.1.3.3 Straßeninfrastruktur

- PIARC (2023). Measures for Improving Resilience of Pavements. <https://www.piarc.org/en/order-library/42341-en-Measuresfor%20improving%20resilience%20of%20pavements%20-%20Technical%20Report>.
- PIARC (2019). Reducing the Life Cycle Carbon Footprint of Pavements. <https://www.piarc.org/en/order-library/31426-en-Reducing%20the%20Life%20Cycle%20Carbon%20Footprint%20of%20Pavements%20-%20Technical%20Report>
- EPA (2005). Cool Pavement Report. https://rodoviasverdes.paginas.ufsc.br/files/2010/05/CoolPavementReport_Former-Guide_complete.pdf
- Global Cool Cities Alliance (2012). A Practical Guide to Cool Roofs and Cool Pavements. https://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/pdfs/CoolRoofToolkit_Full.pdf
- EUPAVE (2018). Achieving and Maintaining the Evenness of Concrete Pavements. <https://www.eupave.eu/resources/publication-achieving-and-maintaining-the-evenness-of-concrete-pavements/>

4.1.4 Wasserressourcen

4.1.4.1 Niedrigwasserstände und Niedrigwassermanagement

- IKS / CIPR (2020). Rapport sur les effets du changement climatique sur les étiages du Rhin. Commission Internationale pour la Protection du Rhin, Coblenz.
- BfG (2022). Aktionsplan Niedrigwasser Rhein — Maßnahmen und Bewertungen. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblenz.
- Novimove Project (2022). Novel Inland and Maritime Mobility. EU Horizon 2020. <https://www.novimove.eu>
- CCNR / CNRS (2022). The impact of low water levels on Rhine navigation: Lessons from the 2018 and 2022 events. Central Commission for the Navigation of the Rhine.
- Jonkeren, O., Rietveld, P., van Ommeren, J. (2007). Climate change and inland waterway transport: Welfare effects of low water levels on the River Rhine. Journal of Transport Economics and Policy, 41(3), 387–411.

4.1.4.2 Hochwasser und Regenwassermanagement

- CEREMA (2023). Techniques alternatives de gestion des eaux pluviales en milieu contraint. Guide méthodologique. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.
- European Commission (2015). Natural Water Retention Measures. Technical Report 2014-082. Publications Office of the EU.
- Rey F. (2025). Des Solutions fondées sur la Nature. Une réponse aux défis environnementaux et sociétaux. Versailles, éditions Quæ, 120 p. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4060-9>
- Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (Directive-Cadre sur l'Eau).

- Directive 2007/60/CE relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation.
- GRAIE (2020). Guide des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales. https://www.mavillepermeable.fr/uploads/resource/2016_graie_techniques-alternatives.pdf

4.1.4.3 Dürre und Wasserressourcen

- GIEC / IPCC (2022). Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- G. Laaha, T. Gauster, L. Tallaksen, Jean-Philippe Vidal, K. Stahl, et al.. The European 2015 drought from a hydrological perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21 (6), pp.3001-3024. <https://hal.science/hal-01586707/file/ly2017-pub00055094.pdf>
- FOEN (2021). Hydrological yearbook of Switzerland 2020 — Drought and low water analysis. Federal Office for the Environment, Berne.: https://scnat.ch/de/uuid/i/1a4359de-34c9-56b1-92fb-55f7fef71a37-Hydrologisches_Jahrbuch_der_Schweiz_2020
- Meissner, R. et al. (2020). Drought impacts on water quality and aquatic ecosystems in Rhine River catchments. *Environmental Science & Policy*, 112, 300–311. https://www.econstor.eu/bitstream/10419/222269/1/Pena_Guerrero_2020_Drought_impacts_Chile.pdf
- Programme INTERREG Rhin Supérieur (2021). Évaluation Stratégique Environnementale (ESE) du Programme INTERREG VI Rhin Supérieur 2021-2027. Rapport scientifique. <https://www.interreg-rhin-sup.eu/wp-content/uploads/rapport-ese-et-memoire-de-reponse.pdf#page=35&zoom=100,90,289>

4.1.4.4 Weitere Ressourcen

- Climate-ADAPT (2023). Adaptation des infrastructures au changement climatique. European Environment Agency. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/fr/metadata/publications/adapting-infrastructure-to-climate-change>
- CEREMA (2019). Recommandations pour la commande d'études d'infiltrabilité des sols. https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/17420/recommandations-pour-la-commande-d-etudes-d-infiltrabilite-des-sols?_lg=fr-FR
- Grand Est DREAL (2020). Doctrine pluviale Grand Est. Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement. https://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/doctrine_pluviale_grand_est-comprese.pdf
- Plusfraichemaville.fr. Fiches solutions d'adaptation thermique et hydrique pour les aménagements urbains. ADEME. <https://plusfraichemaville.fr/fiche-solution>

4.1.5 Territorium

- AIVP, Association internationale des villes portuaires (2015). Faire-la-ville-avec-le-port : guide de bonnes pratiques. https://www.aivp.org/wp-content/uploads/2021/01/AIVP-guide-de-bonnes-pratiques-faire-la-ville-avec-le-port_adherent.pdf
- DUCRUET, César (2008). Typologie mondiale des relations ville-port. *Cybergeo: European Journal of Geography* [Online], Space, Society, Territory, document 417. <http://journals.openedition.org/cybergeo/17332>
- BARIOL-MATHAIS, Brigitte (2021). Ports, villes et transition. FNAU Éditions Gallimard. Extrait : <https://fnau.org/wp-content/uploads/2021/10/extrait-point-fnau-13-1.pdf>
- DARRICAU, Maider (2025). Une interface ville-port plus perméable. Entretien avec Bruno Delsalle, directeur général de l'AIVP. *Urbanismen* n°443. <https://www.urbanisme.fr/bruits-de-ville/une-interface-ville-port-plus-permeable/>
- OECD/ITF (2017). Local Governments and Ports. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2017/05/local-governments-and-ports_3136b740/820a7ecb-en.pdf

- Hoyle, B. S. (1989). The port–city interface: Trends, problems and examples. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0016718589900262>
- Daamen, T. A. & De Vries, I. (2012). Governing the European port–city interface: institutional impacts on spatial projects between city and port. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692312000762>
- PIANC, EnviCom WG 178 (2020). Climate Change Adaptation Planning for Ports and Inland Waterways. <https://www.pianc.org/publication/climate-change-adaptation-planning-for-ports-and-inland-waterways-2/>
- World Bank (2025). Nature-Based Solutions for Ports: An Overview of NBS Implementation in Practice - Opportunities and Challenges. <https://hdl.handle.net/10986/43420>

