



Feasibility Report

Machbarkeitsbericht CO₂-Hub Basel



Disclaimer on Intellectual Property Rights and Legal Aspects

This document, including but not limited to texts, images, diagrams, graphs, and technical content, is protected by copyright and other intellectual property laws. All rights are reserved. The document has been prepared exclusively for internal use and may not be reproduced, distributed, modified, or disclosed to third parties without the prior written consent of the rights holder.

The information contained in this document is provided for informational purposes only and does not constitute contractual obligations unless explicitly stated otherwise. Although every reasonable effort has been made to ensure the accuracy of the information, no responsibility is assumed for any errors or omissions. Unauthorized or improper use of the content of this document may result in violations of applicable laws and could lead to civil and/or criminal liability. Swiss law applies, and civil and/or criminal liability shall extend internationally.

For any clarification or authorization request regarding this document, please contact the author or the rights holder indicated in the document.

This document and the information it contains, or may be extracted from it, is subject to the terms and conditions of the agreement or contract under which the document was supplied to the recipient's organisation. None of the information contained in this document shall be disclosed outside of the recipient's own organisation without prior written permission of Volenergy AG, unless the terms of such agreement expressly allow.

Copyright © 2024 Volenergy AG. All rights reserved.

Use of Language

Throughout this document, the words 'may', 'should', and 'shall', when used in the context of actions by Volenergy or others, have specific meanings as follows:

- (a) 'May' is used where alternatives are equally acceptable.
- (b) 'Should' is used where a provision is preferred.
- (c) 'Shall' is used where a provision is mandatory.

Note that alternative or preferred requirements may be qualified by Volenergy AG in another referenced document.

Who we are

volenergy: Empowering the Future of Energy

volenergy is a key member of the Volare Group, a privately held, family-run conglomerate renowned for its diverse portfolio of trading and manufacturing companies, along with strategic investments in real estate. Guided by a long-term, entrepreneurial vision, the group emphasizes sustainable growth and innovation.

Diverse Industries and Strategic Operations

The Volare Group operates across multiple sectors, with significant investments in the wood industry. It owns seven independent timber companies in central Switzerland, a manufacturer of high-quality leather furniture, and modern bitumen storage and mixing plants. It also offers construction services, covering traditional and timber construction, as well as renovation and conversion projects. The group's IT companies are focused on developing innovative apps, mobility solutions, and cloud services, alongside operating as a full-service IT provider. Smaller ventures within the group include businesses in the meat processing industry specializing in niche products, as well as a service provider dedicated to sustainable building protection, pest control, and mold remediation. In the real estate sector, the group invests in and develops projects across Switzerland, Europe, and Asia.

Energy Trading and Mobility

volenergy manages two proprietary brands alongside two major international brands in the energy trading and mobility sectors. In fuel retail, the company owns two car wash brands and operates five fuel retail companies across Switzerland. In the midstream and downstream energy supply sectors, volenergy holds shares in four Swiss tank storage facilities. Its supply and logistics operations include a specialized businesses managing wholesale, secondary transport, and gas station logistics, handling over 700 gas stations and millions of tons of liquid fuels annually, ranging from traditional to new energy sources.

Engineering Excellence

volenergy excels in the design and construction of energy supply facilities, fuel storage systems, and handling plants. The company delivers comprehensive solutions for both conventional and new energy technologies, serving either as an engineering firm or as an EPC (Engineering, Procurement, and Construction) contractor.

Our Core Values and Vision

At volenergy, an entrepreneurial spirit drives our approach. We are decisive, open to innovation, and committed to creating long-term value. By taking balanced risks and maintaining strong, personal relationships with partners and customers, we ensure sustainable growth. Performance remains at the core of our operations. We prioritize margins, cost efficiency, and profitability to secure independence and achieve long-term goals for our own capital and that of our investors. Team spirit is integral to our success. We foster an open environment where diverse opinions are valued, and transparent, need-based communication motivates employees to achieve their best. Responsibility defines every aspect of what we do. We prioritize the safety, health, and well-being of our employees and the environment, ensuring legal compliance and continually enhancing our safety protocols, health standards, and sustainability practices.

Our Ambition: Shaping the Future of Energy

Looking ahead, volenergy aims to continue its growth and become the leading partner for liquid energy in heating and mobility. Our name, logo, and slogan, «Empowering Tomorrow,» reflect this vision. The term «Vol» symbolizes development, performance, and our connection to the Volare Group, while «Energy» signifies liquid energy from both traditional and sustainable sources. The red in our logo represents expertise in the oil sector and dedication to energy security. Turquoise underscores our focus on sustainable fuels and ecological awareness, while orange conveys our personal energy, enthusiasm, passion, and vitality.

Together, let's build the future with volenergy!

Kurzfassung

DE - Betreiber von Kehrichtverwertungsanlagen, die Zementindustrie, Fernwärmeanlagen sowie alle anderen grossen Emittenten benötigen eine Infrastruktur, die es ihnen ermöglicht, CO₂ vorübergehend zu lagern und es anschliessend zu Standorten zu transportieren, an denen es entweder in unterirdischen Kavernen gespeichert oder zur Herstellung chemischer Produkte verwendet werden kann.

Zu diesem Zweck ist ein CO₂-Terminal (CO₂-Hub) erforderlich, das über eine ausreichende Kapazität verfügt, um das Produkt zwischenzulagern und es anschliessend per Schiff oder Zug zu den Häfen Nordeuropas oder des Mittelmeers zu transportieren. Diese Anlage muss den Umschlag von mindestens 3 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr ermöglichen. Die Verflüssigungsanlage für CO₂ aus den grossen Emittenten der Region Basel muss eine Kapazität von 1 Million Tonnen pro Jahr aufweisen. Die Aufteilung des CO₂-Massenstroms für den Export sieht vor, dass 1/3 per Bahn und 2/3 per Schiff transportiert werden.

EN - Operators of waste treatment plants, the cement industry, district heating plants, as well as all other major emitters, require an infrastructure that enables them to temporarily store CO₂ and subsequently transport it to locations where it can either be stored in underground caverns or used for the production of chemical products.

For this purpose, a CO₂ terminal (CO₂ hub) with sufficient capacity is needed to temporarily store the product and then transfer it by ship or rail to the ports of Northern Europe or the Mediterranean. This facility must enable the handling of at least 3 million tonnes of CO₂ per year. The CO₂ liquefaction plant, processing emissions from major emitters in the Basel region, must have the capacity to liquefy 1 million tonnes per year. The distribution of the CO₂ mass flow for export is designed to transport 1/3 by rail and 2/3 by ship.

FR - Les exploitants d'installations de valorisation des déchets, l'industrie du ciment, les installations de chauffage urbain ainsi que tous les autres grands émetteurs ont besoin d'une infrastructure qui leur permette de stocker temporairement le CO₂ et de le transporter ensuite vers des sites où il pourra être soit stocké dans des cavernes souterraines, soit utilisé pour la production de produits chimiques.

À cet effet, un terminal de CO₂ (CO₂-Hub) est nécessaire, disposant d'une capacité suffisante pour entreposer le produit et le transférer ensuite par navire ou par train vers les ports d'Europe du Nord ou de la Méditerranée. Cette installation doit permettre la manutention d'au moins 3 millions de tonnes de CO₂ par an. L'installation de liquéfaction du CO₂ provenant des grands émetteurs de la région de Bâle doit avoir une capacité de 1 million de tonnes par an. La répartition du flux massique de CO₂ destiné à l'exportation prévoit que 1/3 soit transporté par rail et 2/3 par bateau.

IT - I gestori degli impianti di valorizzazione dei rifiuti, l'industria del cemento, gli impianti di teleriscaldamento, così come tutti gli altri grandi emettitori, hanno la necessità di disporre di un'infrastruttura che permetta loro di stoccare temporaneamente il CO₂ per poi trasferirlo verso siti in cui potrà essere immagazzinato in caverne sotterranee o utilizzato per la produzione di prodotti chimici.

A questo scopo, è necessario un terminale di CO₂ (CO₂-Hub) con una capacità sufficiente per stoccare il prodotto e successivamente trasferirlo via nave o treno verso i porti dell'Europa del Nord o del Mediterraneo. Questo impianto deve permettere la movimentazione di almeno 3 milioni di tonnellate di CO₂ all'anno. L'impianto di liquefazione del CO₂ proveniente dai grandi emettitori della regione di Basilea deve avere una capacità di 1 milione di tonnellate all'anno. La ripartizione del flusso di massa del CO₂ esportato prevede che 1/3 sia trasportato per ferrovia e 2/3 per nave.

Inhalt

1	MANAGEMENT-ZUSAMMENFASSUNG	8
1.1	Projektübersicht	8
1.2	Wichtige Erkenntnisse und Schlussfolgerungen	8
1.3	Empfehlungen	9
2	EINFÜHRUNG	10
2.1	Zweck und Ziele	10
2.2	Hintergrund des Projektentwicklers	10
2.3	Umfang der Studie	12
2.4	CO ₂ -Logistik	12
3	UMFANG DES SYSTEMS	31
3.1	Standortbeschreibung	31
3.2	Geographische und klimatische Bedingungen	31
3.3	Flächenbedarf und Zugänglichkeit	33
4	TECHNISCHE MACHBARKEIT	36
4.1	Fortschritt und Zeitplan	36
4.2	Hintergrund zu Lagerung und Handhabung	37
4.3	Verantwortlichkeitsaufteilung und Schnittstellen (Battery Limits)	38
4.4	Umfang der Einrichtungen	38
4.5	Verfahrenstechnik, Massenbilanz und Energiebilanz	40
4.6	Konstruktionsgrundlagen	42
4.7	Prozessequipment	43
4.8	Grundlayout und Modell	44
4.9	Equipment-Definition und Kostenschätzung	45
5	GESUNDHEIT, SICHERHEIT UND UMWELTASPEKTE	46
5.1	Geltende Umweltschutz- und Energiegesetze	46
5.2	Störfallrisiken	47
5.3	Energieeffizienz und Nachhaltigkeit	50
5.4	Anlagen- und Personensicherheit	50
5.5	G.S.U Fazit	51
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN	52
6.1	Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	52
6.2	Machbarkeitsentscheidung	52
6.3	Nächste Schritte und erforderliche weitere Studien	52
6.4	Lessons Learned	52

Änderungshistorie

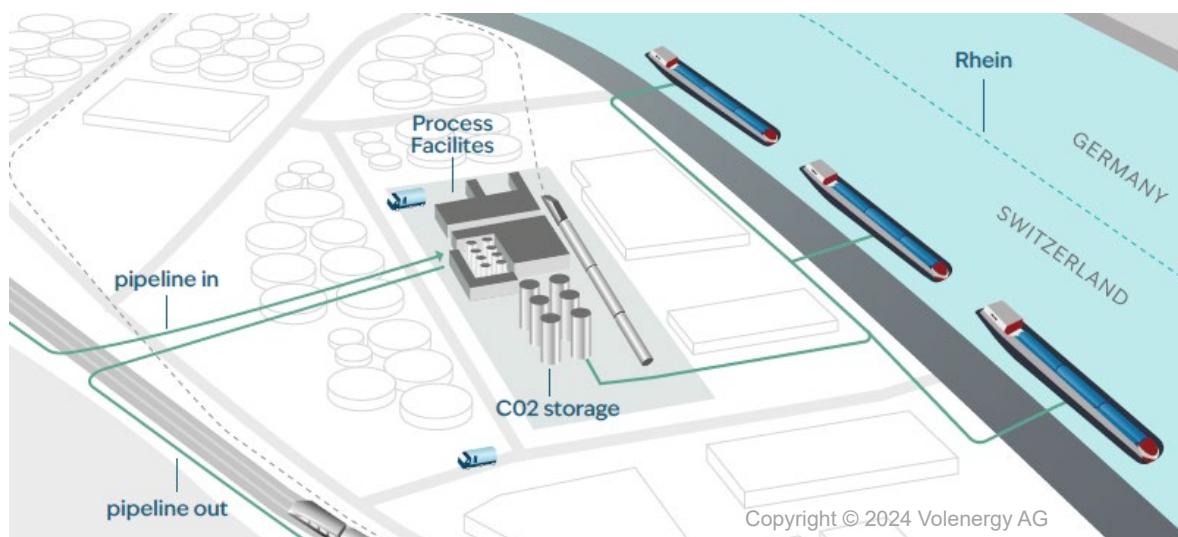
Datum	Version	Autor	Änderung
03.04.2025	0.1	Mauro Forni	<ul style="list-style-type: none">• Dokument erstellt
07.05.2025	0.2	Mauro Forni	<ul style="list-style-type: none">• Review mit VBSA, SRH, ChemSuisse
15.06.2025	0.4	Mauro Forni	<ul style="list-style-type: none">• Final report
12.12.2025	0.5	Mauro Forni	<ul style="list-style-type: none">• Public version

1 Management-Zusammenfassung

Dieses Kapitel definiert den Rahmen für die Machbarkeitsstudie und die Projektentwicklung und dient als Grundlage für alle weiteren Untersuchungen und Planungen. Hauptziel ist es, mit einer umfassenden Analyse die technische, wirtschaftliche und rechtliche Machbarkeit des geplanten CO₂-Zwischenlagers in Muttenz zu beurteilen und eine fundierte Entscheidung über die Realisierung eines CO₂ Tanklagers zu treffen.

Das Hauptziel des Projekts ist der Bau einer CO₂-Speicheranlage, die in der Lage ist, Kohlenstoffdioxid (CO₂) sicher und effizient aus industriellen Prozessen zu speichern. Dies soll dazu beitragen, die CO₂-Emissionen zu reduzieren und zur Bekämpfung des Klimawandels beizutragen. Die Anlage soll den Anforderungen an Umweltschutz, Sicherheit und Effizienz entsprechen und eine nachhaltige Lösung zur CO₂-Umschlag und Speicherung bieten.

1.1 Projektübersicht



Das CO₂-Terminal im Auhafen Muttenz kann nach dem aktuellen Stand der Studien und Informationen am vorgesehenen Standort realisiert werden. Die Investitionskosten belaufen sich auf 440 Millionen Schweizer Franken, wobei die Beträge noch ohne Mehrwertsteuer angegeben sind. Die Bauzeit beträgt etwa 28 Monate nach Erhalt der Baugenehmigung.

Die Anlage verfügt über eine umfassende Umschlagsinfrastruktur. Dazu gehören vier Anlegestellen für die Beladung von Binnenschiffen, zwei Umschlagstellen für Tankkraftwagen sowie zwei Umschlagstellen für Blockzüge mit einer Kapazität von insgesamt 40 Kesselwagen. Zudem sind zwei Pipelines sowie 32 Bullettanks mit einer Gesamtkapazität von 32'000 m³ vorgesehen.

Mit dieser Ausstattung kann die Anlage jährlich mehr als 3 Millionen Tonnen CO₂ umschlagen, was ihre zentrale Rolle im Logistiknetzwerk unterstreicht.

1.2 Wichtige Erkenntnisse und Schlussfolgerungen

Die angewandten Technologien sind seit geraumer Zeit auf dem Markt etabliert, jedoch noch nicht in dieser Größenordnung umgesetzt worden. Vergleichbare Referenzprojekte mit ähnlicher Dimension sind derzeit nicht verfügbar. Die Verflüssigungsanlage benötigt etwa 25 MWe elektrische Leistung, um den Betrieb sicherzustellen.

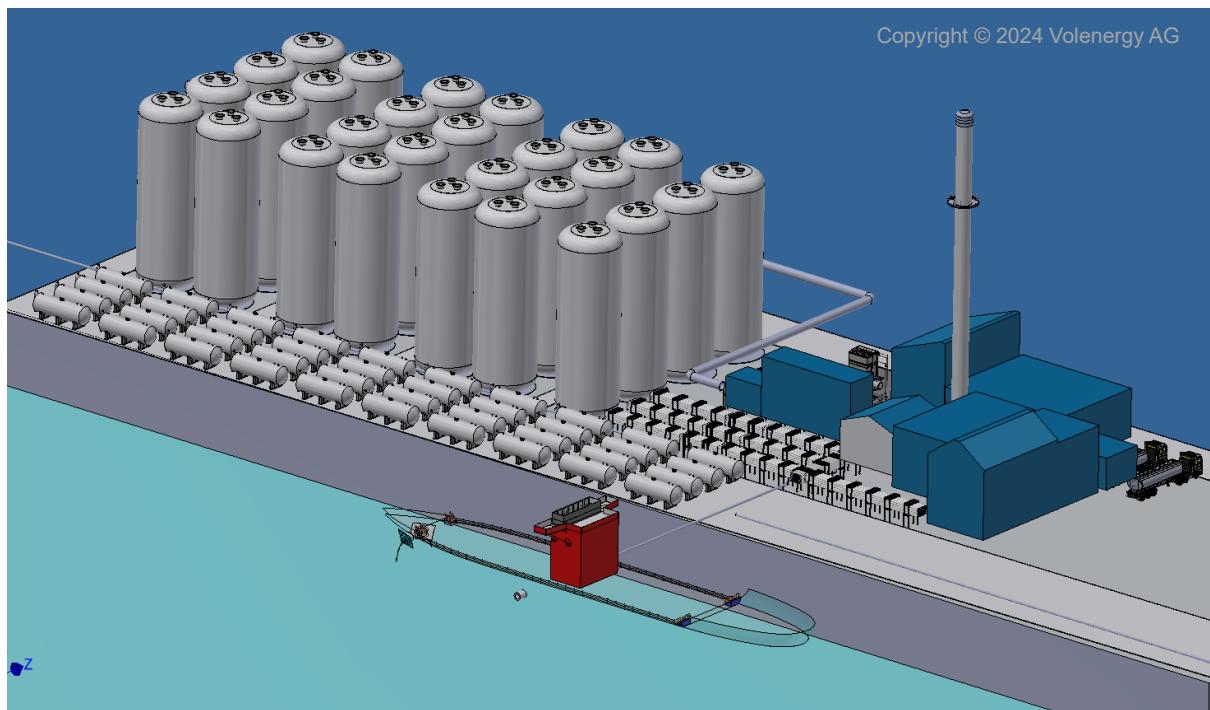
Die Effizienz der CO₂-Rückgewinnung liegt bei 98,5 %, was einen hohen Wirkungsgrad gewährleistet und die Wirtschaftlichkeit des Prozesses unterstützt. Dennoch ist der Markt aktuell stark ausgelastet,

da zahlreiche ähnliche Projekte gleichzeitig umgesetzt werden. Dies führt dazu, dass die verfügbaren Ressourcen bei Lieferanten und Planungsbüros stark beansprucht sind.

Um Verzögerungen zu vermeiden und die Projekte zügig voranzutreiben, empfiehlt es sich, frühzeitig die erforderlichen Ressourcen zu reservieren. Dies stellt sicher, dass die Planung und Umsetzung reibungslos verlaufen, trotz der angespannten Marktsituation.

1.3 Empfehlungen

Um eine reibungslose Projektumsetzung zu gewährleisten, sollten die erforderlichen Ressourcen bei den Lieferanten so bald wie möglich gesichert werden. Angesichts der hohen Nachfrage und der stark beanspruchten Kapazitäten ist eine frühzeitige Reservierung entscheidend, um Verzögerungen im weiteren Projektverlauf zu vermeiden.



Falls die Anlage im Auhafen Muttenz realisiert werden soll, ist die Umnutzung der bestehenden Parzellen, derzeit verpachtet und für die Lagerung von Trockengütern genutzt, rechtzeitig zu übernehmen und entsprechend zurückzubauen.

2 Einführung

2.1 Zweck und Ziele

Das Hauptziel des Projekts ist der Bau einer CO₂-Speicheranlage, die Kohlendioxid (CO₂) sicher und effizient aus industriellen Prozessen speichern kann. Die Speicheranlage (Terminal) soll den Umschlag von CO₂ für Tankkraftwagen, Kesselwagen, Binnenschiffe und Pipelines ermöglichen. Durch den Betrieb der CO₂-Speicheranlage sollen die CO₂-Emissionen der Schweiz reduziert und ein Beitrag zur Bekämpfung des globalen Klimawandels geleistet werden.

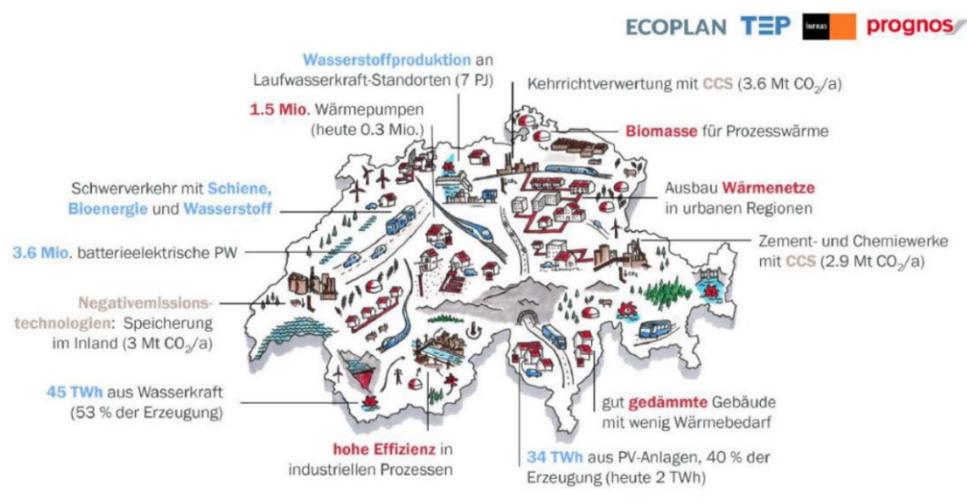
Die Anlage soll gemäss den anerkannten Regeln der Technik konzipiert und die geltenden Anforderungen an Umweltschutz, Sicherheit und Effizienz erfüllen. Zudem bietet sie eine nachhaltige Lösung für den Umschlag und die Zwischenspeicherung von CO₂.

In dieser Projektphase prüft der Auftraggeber die technische Machbarkeit der CO₂-Speicheranlage am Standort Auhafen in der Gemeinde Muttenz (Basellandschaft), Schweizerische Rheinhäfen. Der Standort wurde als Referenz gewählt und dient als möglicher Standort für den Bau eines CO₂-Terminals. Vorrangig wird er für die realistische Beurteilung von Störfallszenarien sowie die Dimensionierung der Logistik für den CO₂-Export genutzt.

2.2 Hintergrund des Projektentwicklers

Der Projektentwickler ist ein Unternehmensverband, der die grössten CO₂ Emittenten der Schweiz vertritt, darunter jährlich rund 3.6 Millionen Tonnen aus Kehrrichtverwertungsanlagen sowie 2.9 Millionen Tonnen aus Zement und Chemiewerken.

Zusätzlich gehören die Schweizerischen Rheinhäfen zum Kreis der Mitentwickler. Sie sind für die Entwicklung des Areals verantwortlich und vertreten die Interessen der Kantone Basel Stadt und Basel Landschaft.



Der Projektentwickler verfolgt das Ziel, ein Netzwerk für Transport und Lagerung von CO₂ zu entwickeln, um das in den angeschlossenen Anlagen produzierte CO₂ effizient und nachhaltig entsorgen zu können. Dafür soll eine geeignete Infrastruktur aufgebaut werden, die den zuverlässigen Transport grosser Mengen CO₂ zu Schiffsverladestellen an der Nordsee und am Mittelmeer ermöglicht.

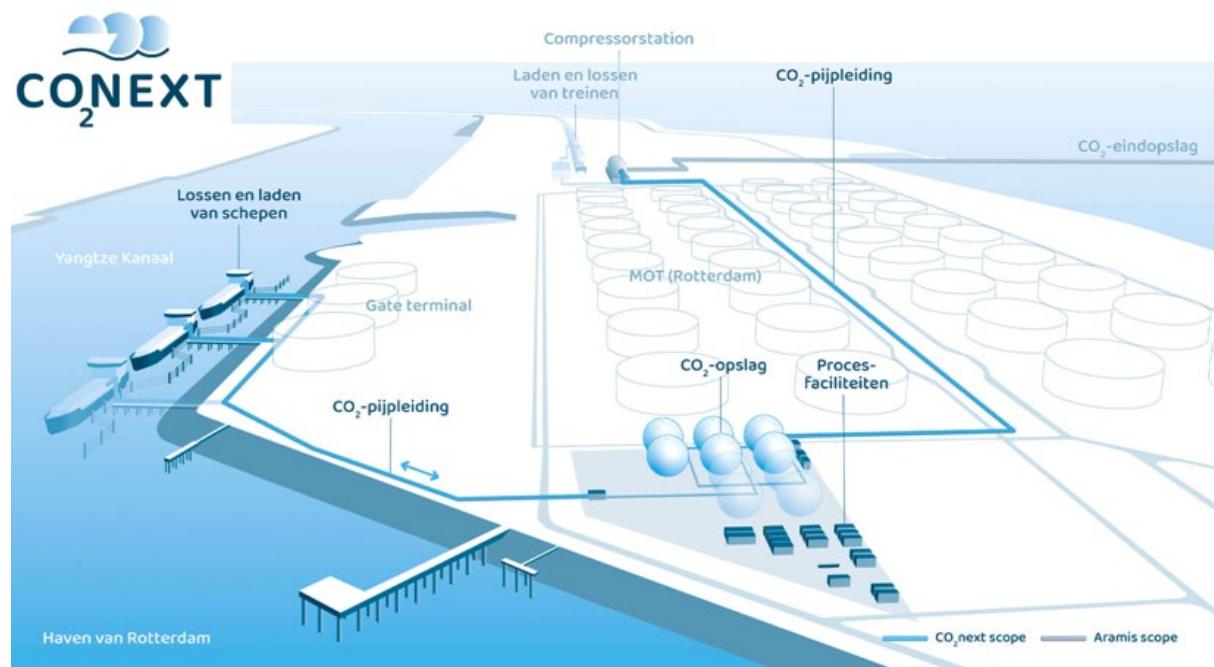
Voraussetzung dafür ist eine leistungsfähige Infrastruktur für Verladung und Umschlag in der Region Basel. Zudem muss eine solche CO₂ Speicheranlage mit den strategischen Entwicklungsplänen für das Hafengebiet der Kantone Basel Landschaft und Basel Stadt übereinstimmen.

Neben CO₂ will der Projektentwickler auch andere Produkte wie Ammoniak, Wasserstoff (H₂), Dimethylether (DME) und ähnliche Stoffe in die Transportlogistik integrieren. Ziel ist es, die Versorgung mit CO₂ wirtschaftlich und effizient zu gestalten.

Um die Aussagekraft der Machbarkeitsstudie sicherzustellen, sollen die Bedürfnisse und Rahmenbedingungen der wichtigsten europäischen Anspruchsgruppen im Bereich CO₂ Logistik berücksichtigt und in die Projektentwicklung eingebunden werden.

In diesem Zusammenhang wurden miteinander vernetzt die Projekte CO₂-Hub Basel, CO₂Next und Ravenna CCS.

Das CO₂Next Terminal ist Teil der Wertschöpfungskette der Aramis Initiative. In der Anfangsphase können dort 5.4 Millionen Tonnen pro Jahr verarbeitet werden. Diese Kapazität kann auf 10 Millionen Tonnen pro Jahr anwachsen (eine entsprechende Bewilligung wurde bereits beantragt). In der Endphase kann das Terminal bis zu 15 Millionen Tonnen pro Jahr verarbeiten, abhängig von der Nachfrage am Markt.



Das Ravenna CCS Terminal ist Teil der Wertschöpfungskette der Initiativen Eni und Snam. In der Anfangsphase können dort 4 Millionen Tonnen pro Jahr verarbeitet werden. In der Endphase kann das Terminal bis zu 16 Millionen Tonnen pro Jahr verarbeiten, ebenfalls abhängig von der Marktnachfrage.

Ravenna CCS



2.3 Umfang der Studie

Die Machbarkeitsstudie stützt sich auf vom Projektentwickler definierte Rahmenbedingungen und Annahmen bezüglich der Massenflüsse zum und vom CO₂ Terminal sowie der vorgesehenen Prozessschritte.

Bei den maximalen Anliefermengen wird davon ausgegangen, dass jährlich bis zu eine Million Tonnen gasförmiges, nicht gereinigtes CO₂ über eine Pipeline zum Standort gelangt. Ergänzend dazu sind Anlieferungen von flüssigem CO₂ vorgesehen, mit einem jährlichen Volumen von rund 1.5 Millionen Tonnen per Bahnwagen sowie weiteren 100'000 Tonnen pro Jahr per Tanklastwagen.

Auf der Seite der Auslagerung wird erwartet, dass pro Jahr bis zu zwei Millionen Tonnen flüssiges CO₂ per Binnenschiff abgeführt werden können. Zusätzlich sollen jährlich bis zu eine Million Tonnen flüssiges CO₂ mit Bahnwagen sowie rund 250'000 Tonnen gasförmiges CO₂ über Pipeline in Richtung Schweizerhalle transportiert werden. Die beteiligten CO₂ Emittenten befinden sich in einem Umkreis von weniger als hundert Kilometern um den Standort Auhafen.

Der gesamte Prozess umfasst mehrere Schritte. Zu Beginn erfolgt eine Qualitätskontrolle des angelieferten CO₂. Anschliessend wird das flüssige CO₂ sowohl aus den Bahnwagen als auch aus den Lastwagen entladen. Das angelieferte gasförmige CO₂ wird zunächst verflüssigt und gleichzeitig gereinigt. Das verflüssigte CO₂ wird danach zwischengelagert, bevor es entweder auf Schiffe oder auf Bahnwagen verladen wird.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wird vom Projektentwickler ein schematisches Prozessdiagramm verlangt, das die Handhabung von sowohl gasförmig als auch flüssig angeliefertem CO₂ darstellt. Die CO₂ Mengenströme werden zudem in einem Sankey Diagramm grafisch visualisiert. Auch die erwarteten Energieverbräuche werden abgeschätzt und gemeinsam mit den entsprechenden Energieflüssen in einem weiteren Sankey Diagramm dargestellt.

Zusätzlich wird eine dreidimensionale Darstellung aller relevanten Gebäude, Lagertanks sowie der Infrastruktur für die Bahnverladung und die Schiffsverladung erstellt. Dabei sind auch alle geltenden Sicherheitsanforderungen zu berücksichtigen, wie beispielsweise die maximal zulässigen Lagermengen oder erforderliche Abstände zu anderen Gebäuden und Werke.

Abschliessend beinhaltet die Studie eine Grobschätzung der Investitionskosten gemäss der Klassifizierung nach Class 4/5 der AACE. Weiter wird eine Komponentenliste mit den wichtigsten technischen Angaben erstellt, darunter Abmessungen, Energieverbräuche und Investitionskosten.

2.4 CO₂-Logistik

Der Kanton Basel-Stadt hat das Ziel, bis 2037 klimaneutral zu werden. Das bedeutet, die Treibhausgasemissionen sollen auf Netto-Null reduziert werden. Der Projektentwickler, der Kanton Basel-Landschaft, verfolgt das Ziel, die CO₂-Emissionen bis 2050 auf Netto-Null zu senken. Diese Zielsetzungen stehen im Einklang mit dem Klimaschutzgesetz und der nationalen Klimapolitik der Schweiz.

Um diese Ziele zu erreichen, ist der zeitnahe Aufbau einer funktionierenden CO₂-Logistik notwendig. Da sich die grenzüberschreitende Pipelineinfrastruktur zwischen der Schweiz, Deutschland und Frankreich noch im Aufbau befindet, stellt der CO₂-Transport über Strasse, Schiene und

Binnenschifffahrt einen wichtigen ersten Schritt dar. Solange keine durchgehenden Pipelineverbindungen bestehen, bleibt diese Lösung unerlässlich.

Gleichzeitig ist es entscheidend, eine robuste und leistungsfähige Logistikinfrastruktur für CO₂ zu schaffen, die auch unabhängig vom zukünftigen Pipelinebetrieb funktioniert. Die Sicherstellung und Weiterentwicklung der Bahn- und Schiffsverbindungen spielt dabei eine zentrale Rolle.

Eine besondere Herausforderung besteht darin, dass CO₂ je nach Transportmittel in unterschiedlichen Aggregatzuständen befördert wird. Im Pipelinebetrieb erfolgt der Transport in der Regel gasförmig oder in bestimmten Regionen im überkritischen Zustand. Beim Transport über Schiene und Wasser wird CO₂ hingegen in flüssiger Form gehandhabt. Damit diese Verkehrsträger effizient genutzt werden können, muss die gesamte Transportkette auf flüssiges CO₂ ausgelegt sein.

Es ist deshalb davon auszugehen, dass sich künftig eine gemischte Infrastruktur entwickeln wird, in der sowohl gasförmiges als auch flüssiges CO₂ transportiert wird. Die Wahl des Aggregatzustands richtet sich nach den jeweiligen Anforderungen der eingesetzten Transportmittel und Marktsituation.

2.4.1 CO₂ Hub Basel

Für die Simulation des CO₂-Terminals in Basel werden alle relevanten Transportmittel berücksichtigt. Im Detail umfasst die Analyse einen möglichen Pipelineanschluss zur Zuführung von CO₂ in das Terminal, mit dem Ziel, die in der Region emittierten Gase zentral zu sammeln, zu verflüssigen und zu reinigen. Ebenfalls geprüft wird eine Pipelineleitung für den Abtransport des gereinigten CO₂ zu einem Produktionsstandort, an dem das Medium weiterverwertet werden kann.

Zusätzlich ist eine Entladeeinrichtung für Tanklastwagen vorgesehen, um CO₂ von Emittenten aufzunehmen, die nicht ans Schienennetz angeschlossen sind. Für die Bahnlogistik wird eine leistungsfähige Anlage zur Entladung und Beladung von Bahnkesselwagen untersucht. Diese soll sowohl der Sammlung von CO₂ aus dem Inland als auch der Verladung für den Export in Richtung ARA-Region oder Mittelmeer dienen.

Weiter wird eine leistungsfähige Beladungseinrichtung für Binnenschiffe evaluiert, welche den Export von CO₂ über den Rhein in Richtung ARA-Häfen ermöglicht. Ergänzend dazu ist eine Entladeeinrichtung für Binnenschiffe Teil der Simulation, um auch CO₂ aus der Region im Terminal übernehmen zu können. Diese Einrichtung wird als nachrangig betrachtet und eher als optionale Anlagenerweiterung beurteilt.

Für die Dimensionierung des Terminals wurden folgende Massenstrommaßnahmen getroffen, basierend auf den Angaben des Projektentwicklers. Gemäss den Angaben des Projektentwicklers ergeben sich im Rahmen des Projekts die folgenden Transportkapazitäten für CO₂:

Die Pipeline für unreines CO₂ hat eine Eingangsmenge von 1'150'000 Tonnen pro Jahr. Davon werden 250'000 Tonnen pro Jahr in reiner Form über eine Pipeline zur Weiterverwertung von CO₂ weitergeleitet.

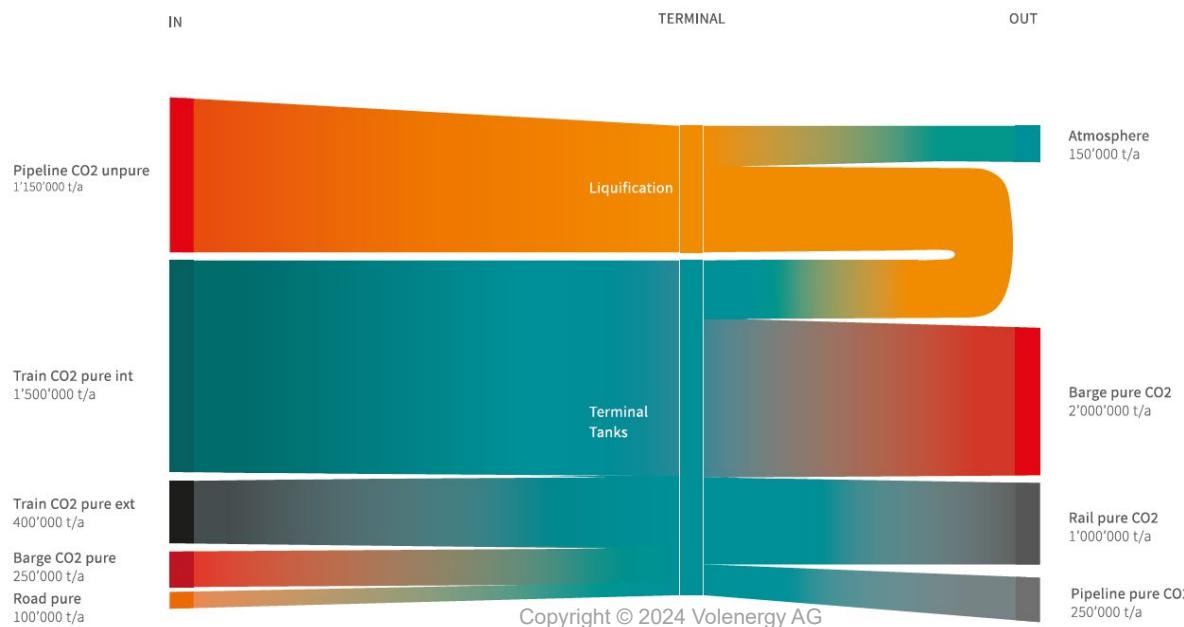
Beim Transport von reinem CO₂ auf der Schiene im Inland werden jährlich 1'900'000 Tonnen aufgenommen. In der Simulation sind davon 1'500'000 Tonnen für die Projektsparten reserviert, während die restlichen 400'000 Tonnen als Kapazität für externe CO₂-Emittenten vorgesehen sind. Insgesamt werden 1'000'000 Tonnen pro Jahr per Zug weitertransportiert.

Die Verflüssigungsanlage verarbeitet pro Jahr 1'150'000 Tonnen unreines CO₂. Davon werden jährlich 150'000 Tonnen als Restgas in die Atmosphäre emittiert. Dabei handelt es sich um das Gasgemisch, das nach der CO₂-Abscheidung aus der Verflüssigungsanlage austritt.

Der Transport von reinem CO₂ auf dem Wasserweg erfolgt über Binnenschiffe (Barges) mit einer Eingangsmenge von 250'000 Tonnen pro Jahr. Dabei werden jährlich 2'000'000 Tonnen reines CO₂ per Barge zu den Seehäfen Amsterdam, Rotterdam und Antwerpen (ARA-Häfen) weitertransportiert.

Der Strassentransport für reines CO₂ umfasst eine Eingangsmenge von 100'000 Tonnen pro Jahr.

Insgesamt ergibt sich sowohl bei den Eingängen als auch bei den Ausgängen eine Summe von 3'400'000 Tonnen pro Jahr in der Massenbilanz.



2.4.2 CO₂ Transport

Für den Transport von flüssigem CO₂ ist der Aufbau eines neuen Fahrzeugparks erforderlich. Der heute verfügbare Bestand an Rollmaterial genügt den technischen und sicherheitsrelevanten Anforderungen für die automatische Befüllung und Entleerung von flüssigem CO₂ nicht. Es braucht daher die Entwicklung neuer, druckfester Bahnkesselwagen, die speziell für den Umschlag in Hochdurchsatz-Befüll- und Entladeanlagen konzipiert sind und für den Transport von flüssigem CO₂ bei tiefen Temperaturen ausgelegt werden.

Sicherheitsrelevante Komponenten wie Überfüllsonden und Temperaturfühler sind grundlegende Voraussetzungen für eine sichere, effiziente und resiliente Bottom-Loading-Kesselwagen-Füllanlage.

Ebenso ist der Bau neuer Binnenschiffe mit isolierten Tanks sowie eine grösere Anzahl moderner Tanklastwagen erforderlich. Diese Transportmittel müssen hohe Anforderungen an thermische Isolation, Druckbeständigkeit und Betriebssicherheit erfüllen, um einen zuverlässigen und effizienten CO₂-Transport entlang der gesamten Logistikkette sicherzustellen.

Bezüglich des Transports von CO₂ auf dem Rhein wurden in Zusammenarbeit mit den Reedereien folgende Kennzahlen definiert. Moderne Binnenschiffe, die auch bei niedrigen Wasserständen einsatzfähig sind, können bis zu 2'300 Tonnen flüssiges CO₂ (LCO₂) transportieren. Für die Simulation

wird jedoch von einer minimalen Beladung von 1'800 Tonnen ausgegangen, was dem durchschnittlichen Jahresmittelwert des gesamten Transports entspricht.

Die eingesetzten Binnenschiffe sollen mit sechs bis acht isolierten Tanks für die Lagerung von LCO₂ ausgerüstet sein. Sie verfügen über eine Breite von rund 11 Metern und sind in der Regel 125 Meter lang.

Ein Binnenschiff mit guter Auslastung fährt durchschnittlich 50 Mal pro Jahr die Strecke Basel–Rotterdam–Basel. Um die Anforderungen des CO₂-Terminals zu erfüllen, wären rund 25 solcher Schiffe erforderlich. Dies entspricht etwa 1'111 Transporten pro Jahr beziehungsweise rund 21,5 Transporten pro Woche. Die Beladungszeit ist ungefähr 6-7 Stunden pro Binnenschiff.

Die Schiffe sollen in der Lage sein, das CO₂ während bis zu drei Tagen ohne nennenswerte Verdampfung an Bord zu lagern. Die meisten aktuellen Projekte im Bereich der Binnenschifffahrt setzen auf Lösungen mit mittlerem Druck. Es gibt jedoch auch Anbieter auf dem Markt, die Hochdrucklösungen anbieten und in diesem Bereich aktiv weiterforschen.

Der Transport im Niederdruckbereich ist primär für den Hochseeverkehr vorgesehen. In diesem Kontext sollen grosse Mengen an LCO₂ über lange Distanzen zwischen den Kontinenten transportiert und über mehrere Tausend Seemeilen hinweg zwischengelagert werden können. Solche Anwendungen finden insbesondere in maritimen Exportprojekten mit globaler Ausrichtung Anwendung.

Unsere Simulation wird auf Basis eines mittleren Druckniveaus durchgeführt, sowohl für die Beladung als auch für die Entladung der Binnenschiffe. Aufgrund der derzeit sehr hohen Reinheitsanforderungen an das CO₂, das per Binnenschiff transportiert wird, ist eine Mehrfachnutzung der Tanks für andere Medien aktuell nicht vorgesehen. Nach dem heutigen Stand der Technik bietet kein Anbieter eine Lösung an, bei der ein Wechseltransport von CO₂ und anderen Flüssigmedien ohne vorgängige, gründliche Reinigung der Tanks möglich wäre. Eine solche Reinigung dauert in der Regel zwei Tage.

Dieser zusätzliche Reinigungsaufwand würde die Anzahl möglicher Fahrten pro Jahr deutlich reduzieren und die Transportkapazität pro Schiff um rund 30 Prozent einschränken. In diesem Fall müsste die Flottengröße von ursprünglich 25 auf etwa 32 Binnenschiffe erhöht werden. Wenn bei jedem Produktwechsel eine Tankreinigung notwendig wäre, würde die Transportleistung sogar um rund 60 Prozent sinken, was einen Ausbau der Flotte auf rund 40 Schiffe erforderlich machen würde.

Trotzdem wäre eine kombinierte Nutzung unter bestimmten Voraussetzungen denkbar. Eine Effizienzsteigerung wäre jedoch nur dann realistisch, wenn beide transportierten Medien vergleichbare logistische Abläufe und Anforderungen aufweisen.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts verfügt nur eine einzige Reederei über ein Binnenschiff für den Transport von flüssigem CO₂ in den niederländischen Seehäfen. Das Schiff hat eine begrenzte Lagerkapazität, dient jedoch als gutes Referenzbeispiel für die Beurteilung des Reifegrads dieser Transporttechnologie, die als TRL 4/5 eingestuft werden kann. Derzeit ist jedoch noch kein Binnenschiff in der Grösse verfügbar, die für den Transport grosser Mengen CO₂ erforderlich wäre. Die Produktion eines solchen Schiffs dauert in der Regel rund eineinhalb Jahre.

Beim Transport von flüssigem CO₂ zwischen Basel, den ARA-Häfen oder Ravenna kommen ausschliesslich dafür geeignete Kesselwagen zum Einsatz, die für den Betrieb im mittleren Druckbereich ausgelegt sind. Eine vollständige Zugkomposition mit 20 Kesselwagen erreicht ein Gesamtgewicht von rund 1'800 Tonnen und verfügt über eine maximale Transportkapazität von 1'280 Tonnen CO₂, was 64 Tonnen pro Kesselwagen (exklusive Eigengewicht) entspricht.

Eine solche Zugkomposition legt die Strecke Basel–Rotterdam oder Ravenna–Basel im Durchschnitt etwa 70 Mal pro Jahr zurück. Für den Inlandtransport ist die Frequenz deutlich höher und beträgt rund 120 Fahrten pro Jahr.

Die Kesselwagen sind in der Lage, flüssiges CO₂ während bis zu drei Tagen zu lagern, ohne dass über die Sicherheitsventile Druck abgebaut werden muss. Die erforderliche Unterkühlung des CO₂ muss dabei an die jeweilige Entsorgungsstrecke angepasst werden, um Transportstabilität und Sicherheit über die gesamte Logistikdauer hinweg zu gewährleisten.

Kesselwagen für den Transport von tiefgekühlten Flüssigkeiten wie LNG sind bereits heute im Einsatz. Die Technologie für den Transport und Umschlag von flüssigem CO₂ in hochautomatisierten Befüll- und Entladeanlagen – mit integrierten Überfüllsonden und Temperaturmessung – befindet sich hingegen noch in der Entwicklung und kann derzeit dem Reifegrad TRL 5/6 zugeordnet werden. Obwohl aktuell keine Flotte von LCO₂-Kesselwagen in dieser Ausführung existiert, lässt sich die technologische Grundlage dank der bestehenden Erfahrungen im LNG-Bereich auf einen höheren Reifegrad übertragen. Die Be- und Entladezeit beträgt rund sechs Stunden für eine Komposition mit 20 Kesselwagen. Der Umschlag kann von Montag bis Samstag jeweils zwischen 06:00 und 22:00 Uhr erfolgen. Rangiermanöver unterliegen den Bestimmungen der Hafenordnung der Schweizerischen Rheinhäfen beider Basel.

Die Tankkraftwagen kommen hauptsächlich für die regionale Logistik zum Einsatz, typischerweise in einem Umkreis von 60 bis 90 Kilometern. Aufgrund gesetzlicher und technischer Einschränkungen liegt das maximale Transportgewicht bei rund 20 Tonnen pro Fahrt.

Die täglich mögliche Umschlagsmenge pro Fahrzeug hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dazu gehören insbesondere die Distanz zwischen Abholort und CO₂-Terminal, die Fahrzeit, allfällige Wartezeiten an den Umschlagstellen, die gesetzlich vorgeschriebenen Lenk- und Ruhezeiten sowie die aktuelle Verkehrslage. In der Schweiz gilt für LKW ein generelles Nacht- und Sonntagsfahrverbot, das von 22 Uhr bis 5 Uhr gilt. Die Rheinhäfen beider Basel sind für den Lastwagenverkehr an Werktagen von 06.00 bis 19.00 Uhr geöffnet und in den übrigen Zeiten geschlossen, sofern das Rheinschiffahrtsamt keine Ausnahmen bewilligt.

Der Betrieb der Pipeline für unreines CO₂ im gasförmigen Zustand, das zur Einlagerung bestimmt ist, orientiert sich am Erdgasnetzbetrieb. Dies liegt daran, dass keine bestehende CO₂-Pipeline-Infrastruktur als Referenz verfügbar ist. Um den Anforderungen gerecht zu werden, wurde am Übergabepunkt im CO₂-Terminal ein Nenndruck von 25 bar festgelegt. Diese Entscheidung berücksichtigt die Tatsache, dass die Pipeline durch dicht besiedelte Regionen verläuft und die Entfernung zwischen den Emittenten und dem Terminal gering ist. Die Pipeline verbindet die Hauptemittenten der Stadt Basel und des Kantons Basellandschaft und gewährleistet einen kontinuierlichen Betrieb (24/7).

Im Rahmen dieser Studie wurde die Pipeline mit einem Durchmesser von 20 Zoll und einer Länge von etwa 10 km konzipiert. Um den kontinuierlichen Betrieb sicherzustellen, wurde ein maximaler Massenstrom von 150'000 kg/h festgelegt.

Das Rohgas, das in der Pipeline transportiert wird, weist eine CO₂-Massenkonzentration von 85 % auf. Als Ausgangstechnologie für die CO₂-Abscheidung bei den Emittenten wurde das Membranverfahren gewählt, da es im Vergleich zu anderen Verfahren ein geringeres Risikoprofil im Hinblick auf potenzielle Störfallszenarien aufweist – insbesondere vor dem Hintergrund, dass sich die Emittentenstandorte in dicht besiedelten Gebieten mit Wohnnutzung befinden. Um den Herausforderungen durch Massestromschwankungen im kontinuierlichen Betrieb bei der Auslegung der CO₂-Verflüssigungsanlage gerecht zu werden, wurden die minimalen und maximalen Durchflussraten mit

einer Schwankungsbreite von $\pm 15\%$ berücksichtigt. Die CO₂-Konzentration liegt bei allen gängigen Carbon-Capture-Technologien üblicherweise bei über 95 %. In der vorliegenden Simulation wurde bewusst eine geringere Reinheit angenommen, um sicherzustellen, dass die Resilienz der Verflüssigungsanlage auch bei nicht optimalem Betrieb der Abscheidungsanlage im Design gewährleistet bleibt.

Auch der Betrieb der Pipeline für hochreines CO₂ im gasförmigen Zustand, das zur Weiterführung als Rohstoff für die Produktion synthetischer Rohstoffe dient, richtet sich nach den bewährten Standards des Erdgasnetzbetriebs. Der Nenndruck am Übergabepunkt im Produktionswerk wurde auf 10 bar festgelegt. Die Pipeline verbindet das CO₂-Terminal mit dem Chemiepark Schweizerhalle und dient zur Simulation einer Testproduktionsanlage, die für Forschungszwecke genutzt wird. Im Gegensatz zur Einlagerungspipeline befindet sich diese Anlage nicht im kontinuierlichen Betrieb, sondern arbeitet mit einer angenommenen Produktionszeit von 50 % pro Jahr.

Für diese Studie wurde die Pipeline für hochreines CO₂ mit einem Durchmesser von 16 Zoll und einer Länge von etwa 2 km ausgelegt. Der maximale Massenstrom beträgt hierbei 65'000 kg/h. Da auch bei hochreinem CO₂ Schwankungen im Massenstrom zu erwarten sind, wurden die minimalen und maximalen Durchflussraten mit einer Toleranz von +/- 15 % berücksichtigt.

Mit dieser Kombination aus robustem Pipeline-Design und flexibler Betriebsweise soll eine sichere und zuverlässige Versorgung sowohl für die Einlagerung als auch für die Weiterverarbeitung von CO₂ gewährleistet werden.

Der Rhein ist eine der wichtigsten Wasserstrassen Europas und spielt eine zentrale Rolle im Gütertransport. Allerdings ist die Schifffahrt auf dem Rhein mit erheblichen Herausforderungen konfrontiert, die durch variierende Wasserstände entstehen. Diese Schwankungen sind sowohl auf natürliche Einflüsse als auch auf menschliche Faktoren zurückzuführen. Sowohl Hochwasser als auch Niedrigwasser können den Schiffsverkehr auf dem Rhein beeinträchtigen.

Bei erhöhten Wasserständen werden bestimmte Pegelmarken überschritten, was zu Einschränkungen oder sogar zur Einstellung der Schifffahrt führen kann. Am Pegel Basel-Rheinhalle gilt beispielsweise eine Hochwassermarke I bei 700 cm (ca. 1'800 m³/s Abfluss). Wird dieser Wert überschritten, sind die Schiffe verpflichtet, ihre Geschwindigkeit zu reduzieren und besondere Fahrregeln einzuhalten. Ab der Hochwassermarke IIa bei 820 cm (ca. 2'750 m³/s Abfluss) wird die Schifffahrt zwischen Rheinfelden und der Schleuse Kembs vollständig eingestellt.

Auch niedrige Wasserstände können den Schiffsverkehr beeinträchtigen, da die Schiffe gezwungen sind, ihre Ladekapazität zu reduzieren. Dies führt zu erhöhten Transportkosten und kann die Versorgungssicherheit beeinträchtigen. Ein prägnantes Beispiel dafür war das Jahr 2018, als aufgrund aussergewöhnlich niedriger Wasserstände die Schifffahrt auf mehreren Abschnitten des Rheins zeitweise eingestellt werden musste.

Im Jahr 2024 war der Rhein bei Basel von mehreren Hochwasserereignissen betroffen. Besonders im Juni kam es zu intensiven Niederschlägen, die zu erhöhten Wasserständen führten. So wurden beispielsweise am 13. Juni 2024 Abflüsse von bis zu 5'085 m³/s gemessen, was auf ein bedeutendes Hochwasserereignis hinweist. Historische Daten zeigen jedoch, dass extreme Hochwasser in Basel selten auftreten und meist nur von kurzer Dauer sind. Im Gegensatz dazu treten Niedrigwasserperioden häufiger und variabler auf, insbesondere in trockenen Sommermonaten, und dauern in der Regel deutlich länger als die Hochwasserperioden. Während Hochwasserereignisse in der Regel nur wenige Tage andauern, können Niedrigwasserphasen mehrere Wochen oder sogar Monate umfassen.

Zusätzlich zu den Herausforderungen des Flussverkehrs beeinflussen auch die infrastrukturellen Bedingungen auf der Schiene den CO₂-Transport. Beim Schienentransport wird davon ausgegangen, dass die Transportstrecken für flüssiges CO₂ sowohl in Richtung ARA-Gebiet als auch nach Ravenna grundsätzlich vorhanden sind. Es ist jedoch bekannt, dass die Bahninfrastruktur, ähnlich wie der Rhein, plötzliche Herausforderungen in der CO₂-Logistik verursachen kann. Dieser Aspekt sollte ebenfalls bei der Planung der Bahnlogistik berücksichtigt werden, um zukünftige Bahnstrecken für den Transport von flüssigem CO₂ besser planen zu können.

2.4.3 CO₂ Lagerung

Die üblichen Öffnungszeiten für einen Terminal im Bahn- und Strassenbetrieb in der Region liegen zwischen 5:00 und 22:00 Uhr. Man geht davon aus, dass die Verflüssigungsanlage im kontinuierlichen Betrieb läuft und das Rohgas aus der Pipeline verarbeitet. Der Schiffsverkehr könnte im Drei-Schicht-Betrieb aufrechterhalten werden.

Um die Betriebssicherheit zu gewährleisten, ist eine Mindestanforderung an die Speicherkapazität von drei Tagen Vollbetrieb vorgesehen. Damit soll sichergestellt werden, dass kurzfristige Änderungen in der Logistikkette flexibel aufgefangen werden können. Zusätzlich müssen bei der Prozessgestaltung auch die Wartezeiten für die Überprüfung der Qualität des flüssigen CO₂ berücksichtigt werden, die eine Vorlaufzeit von bis zu drei Tagen erfordern.

Für die Dimensionierung der Lagerreserve verwendet man üblicherweise die Auslagerungsleistung als Referenz. Der CO₂-Terminal ist in der Lage, täglich 11'600 Tonnen flüssiges CO₂ auszulagern. Dies ergibt eine Nutzreserve von 34'800 Tonnen, wenn dabei die drei Tage Betriebssicherheit bei möglichen Logistikengpässen berücksichtigt werden.

Die Rezertifizierung und Qualitätssicherung des gelagerten CO₂ sollte fest eingeplant werden, da vor der Auslagerung eine umfassende Analyse des Stoffes erforderlich ist. Dies gewährleistet, dass die gelagerten CO₂-Mengen die geforderten Qualitätskriterien erfüllen und den vorgeschriebenen Standards entsprechen.

Bei der Auslagerung soll pro Entsorgungsstrecke die erforderliche Unterkühlung des flüssigen CO₂ berücksichtigt werden. Dies führt zu zusätzlichen Kostenvariablen und beeinflusst die Kalkulation der allgemeinen Frachtkosten.

Um die Beladungs- und Entladeprozesse sicher abzuwickeln, soll pro Vorgang jeweils nur ein Tank betrieben werden. Dadurch werden die notwendigen Sicherheitsvorkehrungen getroffen, um Überfüllungen zuverlässig zu verhindern. Die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen während der Tankbeladung und -entladung ist von zentraler Bedeutung, um Betriebsrisiken zu minimieren. In diesem Zusammenhang spielen die Konzepte Safe Operating Limits (SOL) und Safe Design Limits (SDL) eine wesentliche Rolle.

Safe Operating Limits definieren die Betriebsgrenzen, innerhalb derer eine Anlage sicher und stabil betrieben werden kann. Im Kontext des Tankbetriebs bedeutet dies, dass während der Beladung und Entladung der Füllstand, der Druck und die Temperatur kontinuierlich überwacht werden müssen, um die festgelegten Betriebsgrenzen nicht zu überschreiten. Sollte ein Parameter den zulässigen Bereich verlassen, sind unverzüglich sicherheitsrelevante Massnahmen einzuleiten, um den Zustand zu stabilisieren.

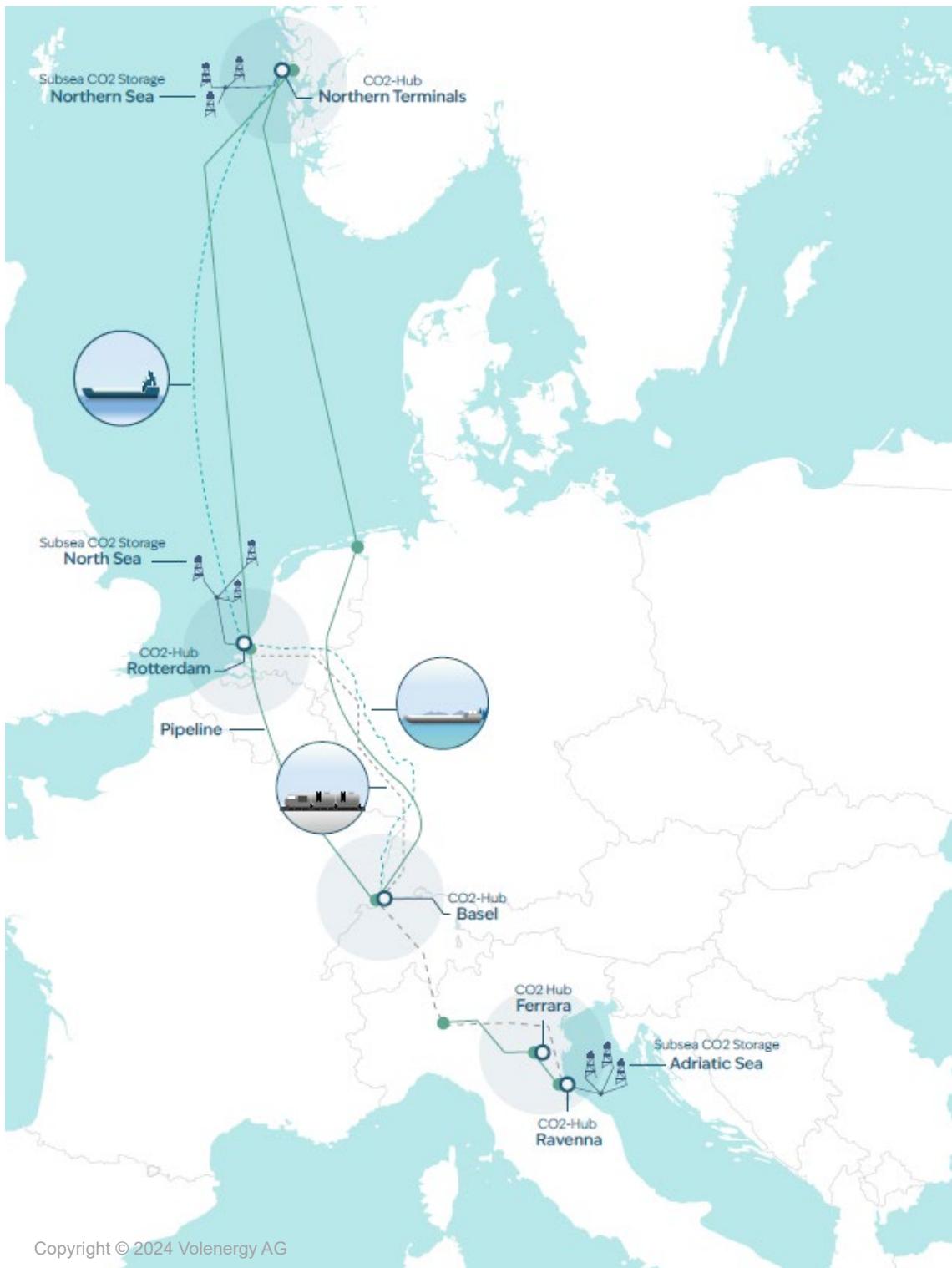
Safe Design Limits hingegen sind die technisch festgelegten Grenzwerte, die ein System ohne Schaden oder Funktionsverlust bewältigen kann. Bei der Planung von Tanks und deren Betrieb müssen diese Grenzwerte sorgfältig berücksichtigt werden, insbesondere bei der Auswahl von Komponenten wie Ventilen, Druckreglern und Überwachungseinrichtungen. Ein Überschreiten der

SDL kann zu irreversiblen Schäden an der Anlage führen und stellt ein erhebliches Sicherheitsrisiko dar.

Im Tankbetrieb selbst wird zur Einhaltung der SOL- und SDL-Anforderungen bewusst darauf geachtet, dass während des Beladungs- oder Entladevorgangs immer nur ein Tank gleichzeitig betrieben wird. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine gezielte Überwachung und Steuerung des jeweiligen Prozesses. Durch die konsequente Trennung der Vorgänge können Fehlbedienungen und unkontrollierte Druck- oder Füllstandserhöhungen vermieden werden. Jeder Tank ist zudem mit einem Überfüllschutz und mit automatischen Abschaltvorrichtungen ausgestattet, die bei Überschreitung der festgelegten Werte sofort eingreifen. Eine kontinuierliche Überwachung der Prozessparameter ermöglicht es, potenzielle Abweichungen frühzeitig zu erkennen und gezielte Gegenmassnahmen einzuleiten.

Durch die Kombination aus einem gezielten Tankbetrieb pro Vorgang und der strikten Einhaltung der festgelegten SOL- und SDL-Vorgaben wird ein sicherer, kontrollierter und zuverlässiger Betrieb gewährleistet. Dies ist insbesondere in hochsensiblen CO₂-Anlagen von entscheidender Bedeutung, um Betriebsunterbrechungen und sicherheitskritische Ereignisse zu vermeiden.

2.4.4 CO₂ Logistik



Um den Betrieb der CO₂-Versorgungskette zum oder vom Terminal sicherzustellen, ist die folgende logistische Transportinfrastruktur erforderlich.

Für den Transport zwischen Basel und den Nord- bzw. Südseehäfen werden 14 Blockzüge mit jeweils 20 Kesselwagen benötigt. Zwei dieser Blockzüge sind als Redundanz bereits einkalkuliert.

Für den Transport zwischen den Emittenten innerhalb der Schweiz und dem CO₂-Terminal in Basel werden ebenfalls 12 Blockzüge mit jeweils 20 Kesselwagen benötigt. Auch hier sind zwei Blockzüge als Redundanz eingeplant.

Für den Transport zwischen Basel und ARA-Häfen werden 25 Binnenschiffe benötigt. Dabei sind zwei Binnenschiffe als Redundanz bereits einkalkuliert.

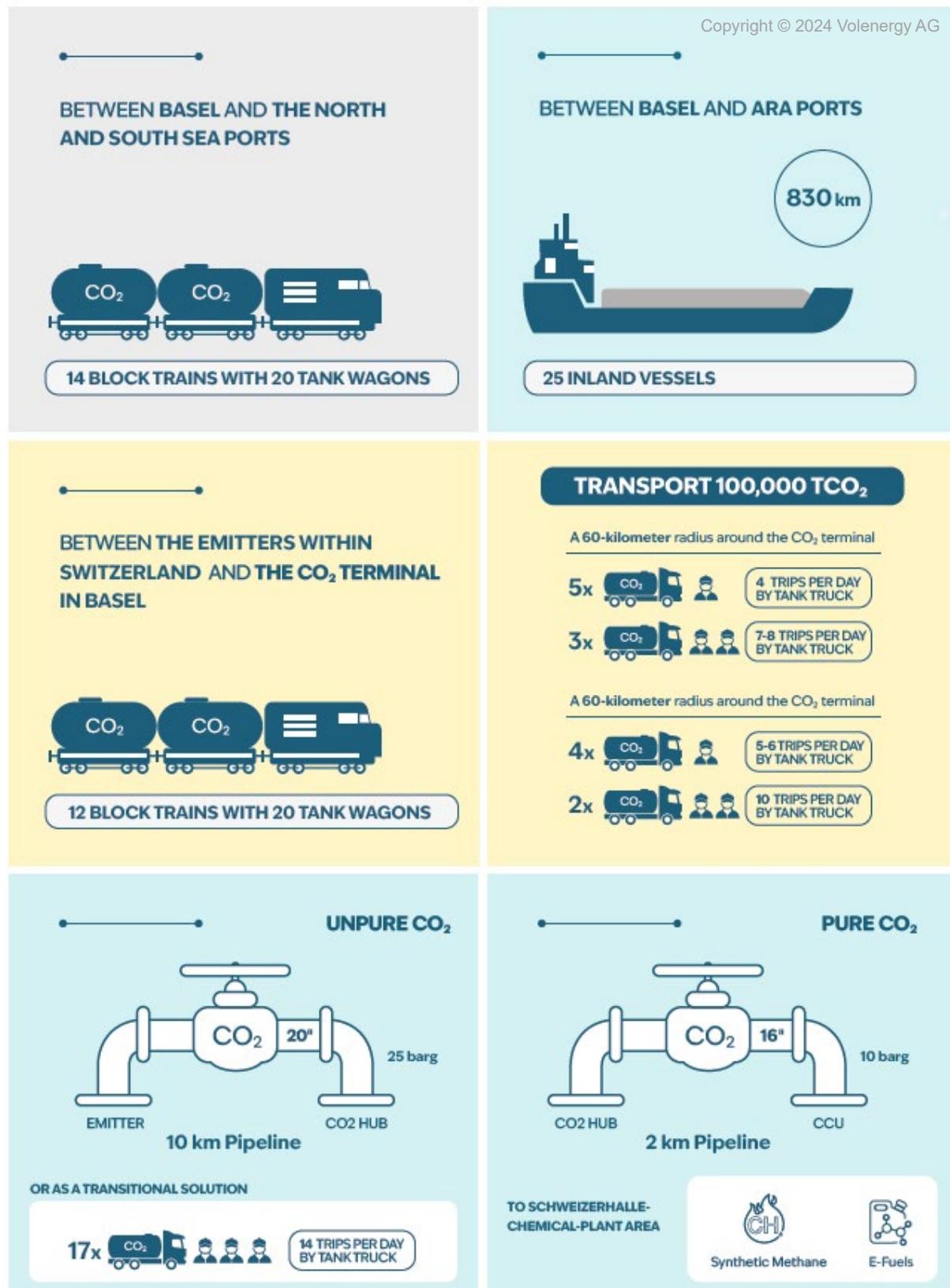
Die Berechnungen zur Bestimmung der Anzahl an Tankkraftwagen, die für den Transport benötigt werden, hängen von verschiedenen Faktoren ab. Dazu zählen die Distanz zwischen den Emittenten und dem CO₂-Terminal, die Fahrzeit, die in den jeweiligen Regionen erlaubten Zeitfenster für den Transport (in der Schweiz beispielsweise 17 Stunden) sowie die Anzahl der Fahrer, die die Tankkraftwagen lenken (in der Schweiz beispielsweise 9 Stunden pro LKW-Fahrer).

Um den Transport von 100'000 Tonnen flüssigem CO₂ von den Emittenten zum CO₂-Terminal in Basel effizient zu gestalten, wurden verschiedene Logistikkonzepte entwickelt, die sich an der Entfernung und der Anzahl der Fahrer orientieren.

Für den Transport innerhalb eines Umkreises von 60 Kilometern um das CO₂-Terminal werden insgesamt 5 Tankkraftwagen benötigt, die jeweils mit 1 Fahrer besetzt sind. Pro Tag sind 4 Fahrten eingeplant, wobei sowohl Ausfall- als auch Reparaturzeiten bereits berücksichtigt wurden. Alternativ kann dieselbe Transportleistung auch mit 3 Tankkraftwagen und jeweils 2 Fahrern erbracht werden. In diesem Fall sind 7 bis 8 Fahrten pro Tag vorgesehen, um die erforderliche Menge umzuschlagen.

Bei kürzeren Distanzen von bis zu 30 Kilometern um das CO₂-Terminal bietet sich eine leicht angepasste Logistiklösung an. Hier kommen 4 Tankkraftwagen zum Einsatz, die jeweils mit 1 Fahrer besetzt sind. Die Planung sieht 5 bis 6 Fahrten pro Tag vor, wobei auch hier Ausfall- und Reparaturzeiten berücksichtigt sind. Alternativ kann der Transport innerhalb dieses Radius auch durch 2 Tankkraftwagen mit jeweils 2 Fahrern erfolgen. In diesem Fall sind 10 Fahrten pro Tag vorgesehen, um die Transportmenge zuverlässig abzuwickeln.

Das CO₂-Pipeline-Netz bleibt für diese Studie auf die Region Basel begrenzt. Es umfasst eine 10 km lange 20" Pipeline vom Emittenten in der Stadt Basel zum CO₂-Terminal sowie eine 2 km lange 16" Pipeline vom CO₂-Terminal bis zum Chemiepark Schweizerhalle

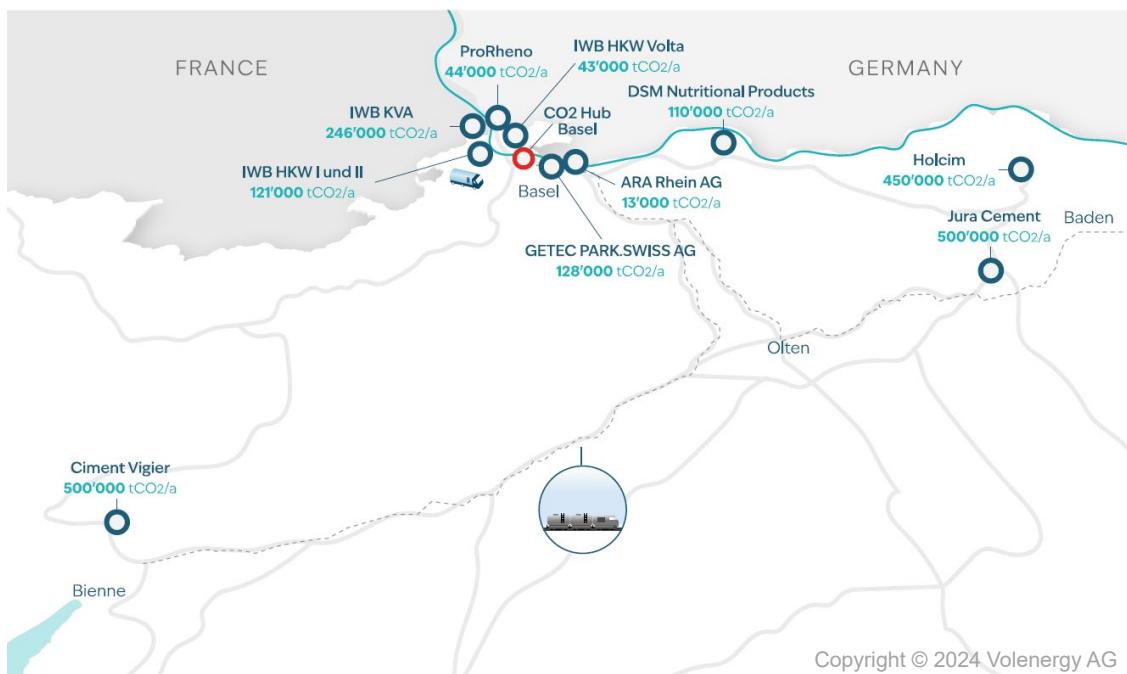


2.4.5 Verfügbarkeit und Auswahl der Quellen

Der Projektentwickler betreibt Kehrichtverwertungsanlagen, Verbrennungsöfen für die Chemieparks, Zementproduktionsstandorte, Holzheizkraftwerke und Klärschlammverbrennungsanlagen. Diese Anlagen gehören zu den grössten CO₂-Emittenten und sollen mit Carbon-Capture-Abscheideanlagen ausgerüstet werden.

Für die Produktionsstandorte ausserhalb der dicht besiedelten Regionen sieht die Simulation in dieser Studie die Lieferung von CO₂ in reiner und flüssiger Form vor. Diese Produktionsstandorte sollen über eine CO₂-Verflüssigungsanlage verfügen, damit das CO₂ mit der erforderlichen Reinheit im CO₂-Terminal umgeschlagen werden kann.

Die Produktionsstandorte innerhalb einer dicht besiedelten Region oder in einem Umkreis von 10 Kilometern werden in der Simulation als direkt an die Einlagerungspipeline des CO₂-Terminals angeschlossen dargestellt. In diesem Fall erfolgt die Verflüssigung und Aufbereitung des CO₂ direkt im CO₂-Terminal.



In Abstimmung mit dem Projektentwickler wird in dieser Projektphase die CO₂-Produktion als konstant und gleichmässig angenommen. Dies dient als Grundlage für die Dimensionierung des CO₂-Terminals. Dennoch ist es von grosser Bedeutung, die tatsächlichen Produktionszyklen und die Produktionsleistung jedes Standorts detailliert zu protokollieren. Nur so kann die Umschlagstelle und die Prozessanlage optimal dimensioniert und effizient betrieben werden.

Der Pipelinebetrieb ist kontinuierlich ausgelegt, wobei eine Verfügbarkeit der Pipeline-Infrastruktur von 98 bis 99 % realistisch angenommen werden kann. Ausgehend von einer jährlichen Gesamtmenge von 1'150'000 Tonnen, die dem CO₂-Terminal zugeführt wird, ergibt sich ein mittlerer Massenstrom von 140 Tonnen pro Stunde und ein maximaler Massenstrom von 160 Tonnen pro Stunde. Die Verflüssigungsanlage wird entsprechend diesen Kennwerten ausgelegt, um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten.

Beim Aufbau der Pipeline-Infrastruktur in der Region Basel müssen jedoch einige Herausforderungen berücksichtigt werden. Der begrenzte Platz für die Verlegung des neuen Netzes sowie die betriebliche Risikobewertung erschweren die Installation erheblich. Selbst bei einer beschleunigten Umsetzung

erscheint eine zeitnahe Realisierung herausfordend. Realistisch betrachtet könnten die Bauprojekte, bis zur endgültigen Bewilligung und Verlegung der Pipeline, mehr als fünf Jahre dauern.

Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, zunächst eine regionale Tanklastwagen Logistikstruktur aufzubauen, die den CO₂-Transport aus einem Umkreis von 30 Kilometern um das CO₂-Terminal sicherstellt. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine raschere Umsetzung und gewährleistet eine zuverlässige Versorgung, selbst wenn es zu Verzögerungen beim Pipelinebau kommen sollte.

Mit den erforderlichen Fahrfreigaben könnte der Transport rund um die Uhr (24/7) mit Tankkraftwagen organisiert werden. Um die jährliche Menge von 1'150'000 Tonnen flüssigem CO₂ von den Emittenten zum CO₂-Terminal zu befördern, wäre eine Flotte von 17 Fahrzeugen notwendig. Jedes Fahrzeug würde dabei von drei Lenkern abwechselnd gefahren, um den Dauerbetrieb sicherzustellen.

Falls dies nicht erlaubt wäre, müsste die Flotte auf 22 Fahrzeuge aufgestockt werden, wobei jedes Fahrzeug von zwei Lenkern gefahren würde. Diese Variante würde die Emittenten dazu zwingen, ihre Lagerkapazitäten vor Ort zu erweitern, um die nächtliche Versorgungslücke zu überbrücken.

Im CO₂-Terminal selbst wären sechs Fahrspuren für die Entladung des CO₂ erforderlich, um die kontinuierliche Anlieferung und Entladung effizient abzuwickeln. Durch den Transport mit Tankkraftwagen könnte das flüssige CO₂ bereits im Hochdruckbereich direkt bei den Emittenten eingelagert und anschliessend bis zum CO₂-Terminal transportiert werden. Im Terminal würde das flüssige CO₂ dann stark heruntergekühlt und in Lagertanks gespeichert. Diese Variante der CO₂-Logistik hätte den Vorteil, dass die Emittenten keine eigene Kälteverflüssigung durchführen müssten, was die lokale Infrastruktur deutlich vereinfacht, und Kosten reduziert. Es ist empfehlenswert, diese Variante der Logistik in der nächsten Phase des Projekts detailliert zu analysieren, um die potenziellen Vorteile und die Umsetzung umfassend zu bewerten.

Die Anlieferung und Abholung von CO₂ per Kesselwagen sollte analog zum Pipelinebetrieb kontinuierlich erfolgen, um die begrenzten Platzverhältnisse auf dem Areal optimal zu nutzen und Lieferstaus zu vermeiden. Damit der Umschlag über den Tag gleichmässig verteilt werden kann, ist ein kontinuierlicher Betrieb wünschenswert. Allerdings sind die Betriebszeiten des Terminals für die Entladung und Beladung von Kesselwagen aufgrund der Vorgaben auf dem Areal auf die Zeitspanne von 5:00 bis 22:00 Uhr beschränkt.

An den Bahn-Umschlagstellen werden bei einer Gesamtumschlagsmenge von 2'500'000 Tonnen jährlich rund 1'953 Beladungs- und Entladevorgänge durchgeführt. Dies entspricht umgerechnet etwa 8'960 Tonnen Umschlag pro Tag beziehungsweise der Handhabung von sieben Blockzügen pro Tag.

Bei einem 24-Stunden-Betrieb, in dem der Kesselwagenumschlag geglättet werden kann, beträgt das Zeitbudget pro Blockzug rund 3 Stunden und 25 Minuten. Dieses umfasst die Rangierarbeiten, die Vorbereitung der Beladung beziehungsweise Entladung sowie den eigentlichen Füll- beziehungsweise Entleerungsvorgang.

Bei einem 17-Stunden-Betrieb, in dem der Kesselwagenumschlag geglättet werden kann, beträgt das Zeitbudget pro Blockzug etwa 2 Stunden und 25 Minuten, einschliesslich Rangierarbeiten, Beladungs- und Entladungsvorbereitung sowie Füll- und Entleerungsvorgang.

2.4.6 CO₂ Qualität

Aktuell sind noch keine Industriestandards festgelegt, welche CO₂-Qualität für den Transport produziert werden muss. Als empfohlene Praxis betrachten wir die DNV-RP-F104 – Design and operation of carbon dioxide pipelines, die Spezifikationen des CCS-ARAMIS-Projekts sowie die Spezifikationen des Antwerp@C-Terminals für den Transport und die Lagerung von CO₂.

Bezüglich der im CO₂-Terminal eingehenden unreinen CO₂-Mengen per Pipeline wurde ein Screening der erzeugten Rohgase aus den Emissionsquellen durchgeführt. Auf Basis der effektiven Zusammensetzungprofile wurden Referenztabellen für die Dimensionierung der Verarbeitungsprozesse des unreinen CO₂ erstellt.

Anschliessend wurde der Emittent mit dem komplexesten chemischen Zusammensetzungprofil als Referenz ausgewählt, und es wurde ein Prozess zur CO₂-Anreicherung simuliert, um einen ausreichend hohen Reinheitsgrad zu erreichen.

Die nachfolgend aufgeführte Zusammensetzung des unreinen CO₂ wurde für die Simulation der Verflüssigung verwendet. Wir möchten klarstellen, dass die hier aufgeführte Zusammensetzung nicht das Ergebnis einer spezifischen Messkampagne für dieses Projekt ist, sondern eine Zusammenführung von mehreren Informationsquellen darstellt. In einigen Fällen mussten die Daten durch Schlussfolgerungen ergänzt werden.

Mit dieser Angabe möchten wir betonen, dass die hier dargestellte Zusammensetzung ausschliesslich zur Simulation des Prozesses im CO₂-Terminal Basel dient.

Waste treatment plant. Typical values can vary by approximately ±15%		Impurities on the Terminal battery limits
CO ₂	875'000.00 ppm	SPM (Particles) 0.50 ppm
H ₂ O	7.50 ppm	CO 0.00 ppm
H ₂	50.00 ppm	HCl 1.00 ppm
N ₂	17'500.00 ppm	HF 0.30 ppm
Ar	9'000.00 ppm	SOX as SO ₂ 0.00 ppm
CH ₄	5.00 ppm	SOX as SO ₃ 0.70 ppm
CO	8.00 ppm	NOX (NO + NO ₂) 175.00 ppm
O ₂	90'000.00 ppm	
H ₂ S	5.00 ppm	other impurities on the Terminal battery limits
SO ₂	0.40 ppm	PCDD / PCDF 0.00 ppm
SOX	0.40 ppm	HAP 0.22 ppm
Nitric oxide / nitrogen dioxide, NO _x	53.00 ppm	CH ₄ equivalent C 3.74 ppm
C ₂ + (hydrocarbons)	30.00 ppm	N ₂ O 2.55 ppm
Aromatic hydrocarbons (incl. BTEX)	3.00 ppm	Benzene 0.82 ppm
Total volatile organic compounds	4.00 ppm	Toluene 0.61 ppm
Ammonia (NH ₃)	1.30 ppm	Ethylbenzene 0.60 ppm
Amine	0.00 ppm	Xylene 0.53 ppm
Formaldehyde	0.04 ppm	Organic carbon total equivalent C 22.40 ppm
Acetaldehyde	0.03 ppm	
Hg	0.00 ppm	
Cadmium, Thallium	0.00 ppm	
Rest	- ppm	

Die Qualitätsanforderungen für die Lagerung von flüssigem CO₂ sind wie folgt.

Component	Limit	NO	incl. in Nox
CO ₂	95-100 % mol	NO ₂	incl. in Nox
H ₂ O	0-30 ppm mol	NOx	0-10 ppm mol
H ₂	0-50 ppm mol	NH ₃	0-10 ppm mol
N ₂	< 0.1 % mol	Total volatile organic compounds	0-10 ppm mol (excl methane, total aliphatic hydrocarbons (C ₂ -C ₁₀), methanol, ethanol, aldehydes
Ar	< 0.2 % mol	Ethanol	0-1 ppm mol
CH ₄	< 0.5 % mol	Methanol	0-40 ppm mol
C ₂ - 10	0-1200 ppm mol	Acetaldehydes	0-20 ppm mol
CO	0-100 ppm mol	Formaldehydes	0-20 ppm mol
O ₂	0-10 ppm mol	Mercury (Hg)	0 - 0.03 ppm mol
H ₂ S	0-9 ppm mol	Cadmium (Cd) + Thallium (Tl)	0 - 0.03 ppm mol
SO _x	0-10 ppm mol	Amine	0-10 ppm mol
Sulfur total (COS, DMS, H ₂ S, SO _x , Mercaptan)	0-20 ppm mol	MEG	0-2 ppm mol
		TEG	0 ppm mol
		Heavy metals	0

Die Zusammensetzung des CO₂, das für die CCU-Anwendung in den Chemiepark Schweizerhalle transportiert werden soll, ist wie folgt:

Parameter	Unit	Value	Designation	Unit	Specification
Carbon dioxide	vol.%	> 99.98	Sulfur as H ₂ S	ppm	< 0.10
Carbon monoxide	ppmv	max. 100	Sulfur in other forms (COS, CS ₂ ,...)	ppm	
Water	ppmv	50	Chlorine	ppm	Chlorine in any form, e.g. Cl ₂ , HCl or R-Cl, is a strong poison as copper chloride sinters quickly. Chlorine content in the synthesis gas should be at a non-detectable level.
Oxygen	ppmv	max. 20	Oxygen (O ₂)	ppm	< 10 If oxygen gets into contact with the reduced catalyst, it will cause partial re-oxidation followed by a subsequent reduction by the process gas. This process can cause loss of the catalysts' crush strength.
Nitrogen	ppmv	max. 60	Oil	mg/Nm ³	< 0.1 Oil carry over should be as low as possible
Methan	ppmv	-	Particulates	mg/Nm ³	< 0.1
Temperature	°C	-25	Heavy metals	ppb	< 5
Pressure	barg	17	Other components which act as a catalyst poison but for which no exact limits are known		
			Component		Description
			Inorganic salts (i.e. Na)		Reduces catalyst activity
			HCN		Reacts with the active Cu centers of the catalyst
			Ammonia		Can lead to the formation of trimethylamine, which has a very intense smell and will contaminate the product
			Ethene/Alkene		Will lead to carbon formation on the catalysts' surface
			Ethene/Alkine		Will lead to carbon formation on the catalysts' surface
			Elementary C		Will cover and block the catalysts' active centers
			Iron		Iron in the form of iron carbonyls, carried onto the catalyst, catalyzes the Fischer-Tropsch reaction and increases by-product formation. Iron and other heavy metals also block the active sites of the catalyst, thus reducing activity.
			Nickel, Arsenic, Phosphorus, Fluorine		The gas should be free of these elements
			Liquids		The presence of liquids on the catalyst during operation will lead to reduced performance

Bei der Verflüssigung von CO₂ werden Reststoffe aus dem unreinen CO₂, das über die Pipeline angeliefert wird, freigesetzt. Die Zusammensetzung dieser Reststoffe kann durch die Stoffanalyse des gelieferten CO₂-Gases bestimmt werden. Während des Verflüssigungsprozesses reagieren Stickoxide (NOx) und bilden salpetrige Säure (Nitric Acid), die sich im Kondensat ansammelt. Diese Rückstände müssen bei der Qualitätskontrolle berücksichtigt und entsprechend behandelt werden, um die Betriebssicherheit und die Einhaltung der Umweltvorschriften zu gewährleisten.

Aktuell sind die Standards für die CO₂-Qualität im Zusammenhang mit Transport und Lagerung noch nicht ausreichend definiert. Um fundierte Entscheidungen bezüglich des Qualitätsmanagements im CO₂-Terminal treffen zu können, ist es entscheidend, ein genaues Verständnis des Betriebs der Lagerstätte zu haben.

Neben der Frage des Standorts und dem Verständnis des Qualitätsmanagements ist die Geschwindigkeit der Analyseergebnisse ein weiterer entscheidender Faktor. Je nach Projektanforderung können die Zeitfenster erheblich variieren. Diese reichen von 24 Stunden für eine schnelle Analyse bis zu 48/72 Stunden für eine umfassende Vollanalyse. Insbesondere bei der Auslagerung eines CO₂-Batches ist eine vollständige Analyse unerlässlich, um sicherzustellen, dass die CO₂-Qualität den Anforderungen des Empfangsstandorts entspricht.

Dies hat erhebliche Auswirkungen auf die Prozessplanung, da vor allem eine Präzision der Analyseergebnisse gefordert ist, die die Zeitlichen Anforderungen im Labor klar zu definieren. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Qualitätskontrolle verlässlich durchgeführt wird, ohne den Betriebsfluss unnötig zu beeinträchtigen.

Um den Qualitätsicherungsprozess von Anfang an auf eine solide Grundlage zu stellen, wurden bereits erste Gespräche mit einem renommierten Labor und einer Qualitätsaufsichtsfirma geführt. Trotz eingehender Recherchen zu wissenschaftlichen Studien über flüssiges CO₂ erwiesen sich die bisher erzielten Ergebnisse als nur teilweise nutzbar. Dennoch waren die Diskussionen lehrreich. Einige wertvolle Erkenntnisse konnten gewonnen werden und fliessen nun in die weitere Planung ein.

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden zahlreiche Informationen zu Geräten und Technologien für das Labor gesammelt, um die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen besser einschätzen zu können. Das Ziel war es, einen soliden Geschäftsplan mit einer Amortisationsdauer von zehn Jahren zu erstellen. Es hat sich gezeigt, dass für die Entwicklung eines neuen Labors in diesem Bereich ein Jahr erforderlich ist, um den Analyseprozess zu entwickeln und festzulegen, welche Laborgeräte angeschafft werden müssen. Ein weiteres Jahr wird benötigt für die Bestellung, Installation der Geräte und die Ausbildung des Personals. Inzwischen könnten neue Technologien erhebliche Kosteneinsparungen ermöglichen, eine Chance, die in den bisherigen Bewertungen noch nicht berücksichtigt wurde.

Bezüglich der Entwicklungskosten des Labors ist die Standortwahl von entscheidender Bedeutung. Der Bau eines neuen Labors am Auhafen würde monatliche Betriebskosten von etwa 40'000 CHF verursachen. Eine deutlich kostengünstigere Option wäre die Nutzung der bestehenden Laborinfrastruktur am aktuellen Standort des Dienstleisters. In diesem Fall könnten die monatlichen Kosten auf etwa 12'000 CHF reduziert werden, vorausgesetzt, es wird kein zusätzliches Personal benötigt. Diese Kalkulation basiert auf einem Laborbetrieb von Montag bis Freitag ohne Arbeit an Wochenenden oder während der Nacht. Diese Option ist jedoch für den CO₂-Terminal in Basel nicht akzeptabel, da der Betrieb rund um die Uhr an sieben Tagen in der Woche läuft.

Gemäss den aktuellen Spezifikationen kostet eine Vollanalyse pro Batch oder pro ausgelagerten Tank etwa 8'000 CHF, wenn die Proben ins Ausland geschickt werden. Eine erste Einschätzung der Anzahl erforderlicher Analysen pro Jahr liegt zwischen 1'250 und 1'750. In diesem Fall beträgt die Analysedauer ungefähr eine Woche, was bei zeitkritischen Projekten eine erhebliche Verzögerung darstellen kann. Solche Wartezeiten sind insbesondere in dynamischen Projektszenarien problematisch, da sie die Betriebsplanung und Entscheidungsfindung beeinträchtigen können.

Im Gegensatz dazu sind die Kosten für die Durchführung der Analysen im Labor des CO₂-Terminals in Basel deutlich niedriger, da die Laborkosten bereits gedeckt sind. Wir schätzen die Kosten pro Analyse auf etwa 2'500 CHF. Diese Einsparung ergibt sich insbesondere durch die Nutzung der bestehenden Infrastruktur und die direkte Verfügbarkeit des Labors vor Ort. Dadurch kann nicht nur die

Wirtschaftlichkeit gesteigert, sondern auch die Prozesszeit erheblich verkürzt werden, was die betriebliche Flexibilität erhöht.

Unter Berücksichtigung der im Rahmen der Studie ermittelten Volumen ergeben sich jährliche Laborkosten von rund 4'855'000 CHF, sofern ein eigenes Labor am Standort Auhafen eingerichtet wird. Diese Kosten resultieren hauptsächlich aus dem Aufwand für Probenanalysen (Vollanalysen), die pro Beladungs-Batch durchzuführen sind. Die Kosten pro Analyse liegen indikativ zwischen 6'000 und 10'000 CHF.

Synergien mit zusätzlichen CO₂-Speicher- oder Emittentenstandorten sowie eine Optimierung der Qualitätssicherungsprozesse können die Laborkosten jedoch wesentlich beeinflussen und potenziell deutlich senken.

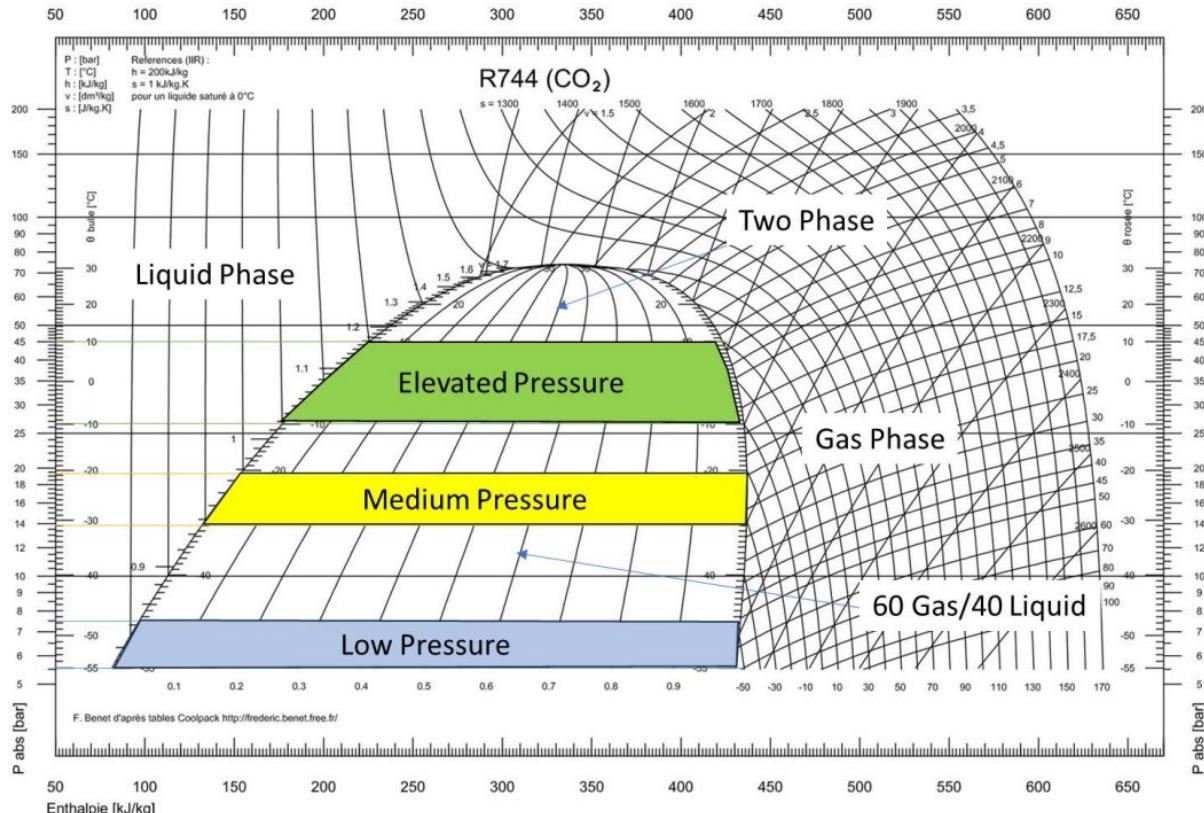
Eine alternative Option wäre die Zentralisierung der Geräte am Standort des Dienstleisters mit einer Durchführung der Analysen im 24/7-Betrieb. Dadurch könnten die Kosten um etwa 15 % reduziert werden. Diese Einsparung bringt jedoch einige Herausforderungen mit sich: Die dauerhafte Verfügbarkeit des Personals und die effiziente Logistikgestaltung sind nicht selbstverständlich und erfordern eine detaillierte Planung. Zudem kann die notwendige Anpassung der Arbeitszeitmodelle zu einer geringeren Effizienz im Zeitmanagement führen.

Angesichts dieser Überlegungen ist es entscheidend, die Wahl des Laborstandorts und die Nutzung vorhandener Infrastrukturen sorgfältig zu prüfen. Kostensenkungen müssen immer im Kontext der betrieblichen Effizienz und organisatorischen Machbarkeit betrachtet werden. Die Verlagerung von Laborleistungen ins Ausland mag zwar finanziell attraktiv erscheinen, bringt jedoch operative Risiken mit sich, die im Vorfeld abgewogen werden müssen.

Um die Herausforderungen rund um die CO₂-Analyse und -Lagerung erfolgreich zu bewältigen, braucht es nicht nur technische Präzision, sondern auch wirtschaftliche Weitsicht. Eine fundierte Abwägung zwischen Kosten, Standort und Betriebskonzept ist von zentraler Bedeutung, um langfristig effiziente und wirtschaftlich tragfähige Lösungen zu gewährleisten. Entscheidend ist es, die richtigen Prioritäten zu setzen: Kostenoptimierung darf nicht auf Kosten der Betriebssicherheit und der zeitlichen Flexibilität gehen. Letztlich muss eine Lösung gefunden werden, die sowohl wirtschaftlich nachhaltig als auch operativ effizient ist.

2.4.7 Lagerung und Handhabung

Die Speicherung von CO₂ spielt eine zentrale Rolle, insbesondere wenn es darum geht, die geeignete Betriebskonfiguration festzulegen. Dabei gibt es grundsätzlich drei Betriebsarten, die sich durch unterschiedliche Druck- und Temperaturanforderungen sowie durch ihre spezifischen Anwendungen unterscheiden: Niederdruck (LP - Low Pressure), Mitteldruck (MP - Medium Pressure) und Hochdruck (EP - Elevated Pressure).



Der Niederdruckbetrieb (LP) zeichnet sich durch einen Druckbereich von 5,6 bis 7,5 barg aus. Unter diesen Bedingungen liegt das CO₂ in flüssiger Form vor und wird in kryogenen Tanks oder stark isolierten Lagertanks gelagert. Diese Betriebsweise eignet sich besonders für die Speicherung grosser CO₂-Mengen über längere Zeiträume, insbesondere im Zusammenhang mit interkontinentalem Transport per Schiff.

Der Mitteldruckbetrieb (MP) umfasst einen Druckbereich von 14 bis 19 barg. Die Speicherung erfolgt meist in Drucktanks mit geringerer Isolierung, was die Flexibilität bei Temperaturschwankungen erhöht. Der MP-Betrieb hat sich beim Fluss- und Bahntransport weitgehend als Standard durchgesetzt.

Der Hochdruckbetrieb (EP) bewegt sich im Bereich von 27 bis 45 barg und erfordert die Lagerung in robusten Druckbehältern mit sehr geringer Isolierung. Dieser Betriebsmodus eignet sich besonders für die direkte Einspeisung in Pipelines, die zur unterirdischen Speicherung im Nordseegebiet führen. Eine Temperatur von 5 °C am Bohrlochkopf ist dabei erforderlich.

Die Nutzung des Hochdruckbereichs (EP) für den Flusstransport wurde bereits geprüft, und es gibt tatsächlich Betreiber, die diesen Ansatz verfolgen. Ihr Hauptziel besteht darin, das CO₂ direkt in eine Pipeline zur unterirdischen Speicherung einzuspeisen. Diese Strategie ist vor allem dann sinnvoll, wenn eine direkte Verbindung zu einem CO₂-Speicher besteht und die erforderliche Temperatur von 5 °C am Bohrlochkopf eingehalten werden kann.

Eine alternative Anwendung des EP-Betriebs ist die Nutzung von Tanklastwagen, die mit Bündeln von Hochdruckflaschen ausgestattet sind. Diese Lösung bietet sich insbesondere für lokale Transporte an, wenn sich die Emittentenstandorte in dicht besiedelten Gebieten befinden oder kein Platz für eine Verflüssigungsanlage zur Verfügung steht. In solchen Fällen bietet die Nutzung von EP die Möglichkeit, auch unter schwierigen infrastrukturellen Bedingungen einen sicheren Transport zu gewährleisten.

Eine vergleichende Analyse der verschiedenen Betriebsarten zur Überprüfung der Wirtschaftlichkeit am Standort Basel wurde nicht durchgeführt, da die Fachliteratur bereits umfassende Analysen und Dokumentationen bietet. Stattdessen wurden die Prozesse mit den bestehenden Anlagen von CO2Next und CCS Ravenna harmonisiert, wie es vom Projektentwickler gefordert wurde. Diese Anlagen befinden sich derzeit im FEED-Prozess (Front-End Engineering Design). Es wird empfohlen, den Hochdruckbetrieb (EP) als möglichen Teilprozess zu integrieren, insbesondere für den lokalen Transport mit Tankkraftwagen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Wahl der Betriebsart stark von den spezifischen Rahmenbedingungen und der Transportlogistik abhängt. Die Planung zukünftiger Projekte sollte daher eine gewisse Flexibilität bei der Auswahl der Betriebsweise vorsehen, um die betrieblich und wirtschaftlich sinnvollste Lösung zu finden. Nur durch eine fundierte Abwägung der technischen und logistischen Anforderungen kann eine effiziente CO₂-Transportstrategie entwickelt werden, die den unterschiedlichen Szenarien gerecht wird.

Diese Studie bewertet, harmonisiert mit den Standorten in Rotterdam und Ravenna den Umschlag und die Lagerung von CO₂ im mittleren Betriebsdruckbereich (MP) und stellt damit die Grundlage für die weitere Planung und Umsetzung dar.

3 Umfang des Systems

Der CO₂-Hub Basel ist ein Terminal mit umfassender Infrastruktur für die Verflüssigung, Reinigung, Lagerung und den Umschlag von CO₂. Die zentrale Prozessanlage dient der Verflüssigung und Bereinigung von gasförmigem CO₂, während flüssiges CO₂ in einer Speicheranlage zwischengelagert wird. Der Umschlag erfolgt über verschiedene Transportwege, darunter Verladeeinrichtungen für Tankkraftwagen, Umschlagstellen für Zugkompositionen mit bis zu 20 Kesselwagen sowie Anleger am Rheinufer für Binnenschiffe. Eine Pipeline-Empfangsstation bindet das Terminal an das regionale CO₂-Netz an. Eine Vergasungsanlage transportiert gereinigtes CO₂ zum Chemiepark Schweizerhalle. Stromversorgung, Fernwärmeanschluss und Luftemissionskontrolle gewährleisten den sicheren Betrieb.

3.1 Standortbeschreibung

Muttenz liegt im Kanton Basel-Landschaft in der Nordwestschweiz und gehört zur wichtigen Verkehrs- und Wirtschaftsregion Rheintal. Im Norden der Gemeinde befindet sich der Auhafen, ein zentraler Binnenhafen am Rheinufer, der als bedeutender Umschlagplatz für Gütertransporte dient. Durch die direkte Lage am Rhein bietet der Hafen eine optimale Anbindung an die internationale Binnenschifffahrt und ermöglicht einen effizienten Warentransport in die Schweiz und nach Europa.

Der Auhafen ist Teil der Schweizerischen Rheinhäfen (SRH), die für den Güterumschlag und die Logistik in der Schweiz eine zentrale Rolle spielen. Die SRH umfassen die Hafenanlagen in Basel-Kleinhüningen, Birsfelden und Muttenz-Auhafen und bilden den wichtigsten Zugang zur internationalen Seeschifffahrt über den Rhein. Diese Häfen verbinden die Schweiz direkt mit den grossen Nordseehäfen und sichern die logistische Anbindung an globale Handelsrouten. Als unverzichtbarer Bestandteil der schweizerischen Import- und Exportlogistik unterstützen die Rheinhäfen den Transport von Massengütern, Stückgütern und Gefahrstoffen und tragen zur internationalen Vernetzung und Versorgung der Schweiz bei.

3.2 Geographische und klimatische Bedingungen

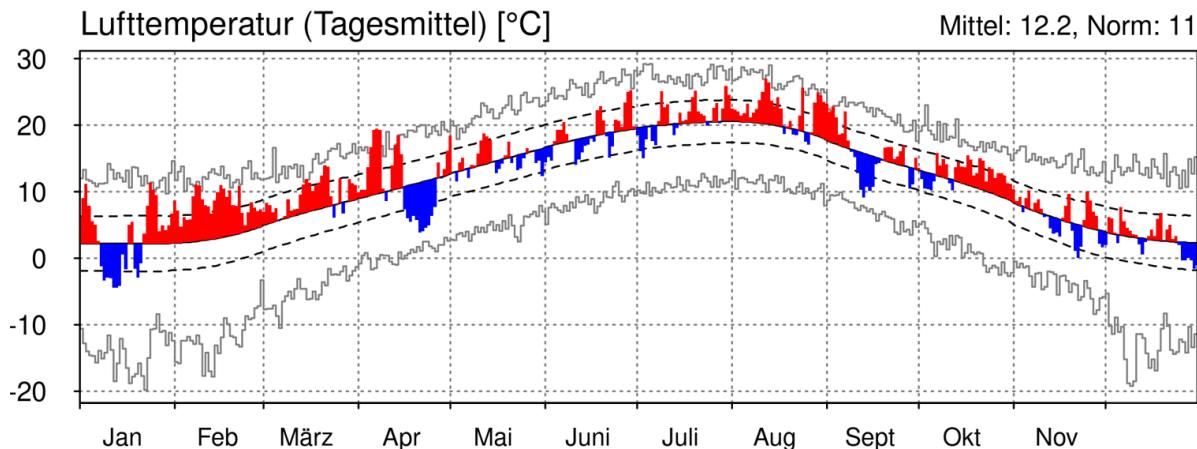
Geographisch befindet sich Muttenz im Rheintal. Die Topographie begünstigt die Ansiedlung von Industrie und Gewerbe, die von der guten Erreichbarkeit und der flachen Landschaft profitieren. Muttenz liegt in unmittelbarer Nähe zur Stadt Basel und ist über ein dichtes Verkehrsnetz hervorragend angebunden, was den Standort besonders attraktiv für industrielle und logistische Nutzungen macht.

Für die Dimensionierung der Verflüssigungsanlage sind die klimatischen Bedingungen am Standort Basel/Binningen entscheidend. Die Klimadaten aus dem Jahr 2024 umfassen Temperatur, Niederschlag und Windrichtung. Die durchschnittliche Jahrestemperatur betrug 12,2 °C und lag damit leicht über dem langjährigen Mittelwert von 11 °C.

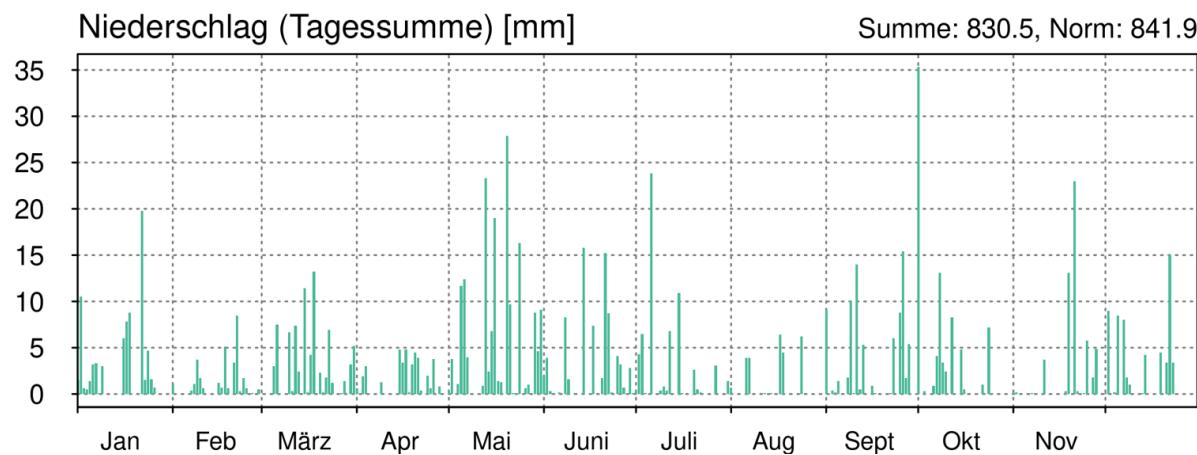
Die saisonalen Temperaturschwankungen waren deutlich ausgeprägt. Im Winter lagen die Durchschnittstemperaturen um den Gefrierpunkt, mit Minima bis -10 °C, insbesondere im Januar und Februar. Der Frühling zeigte eine kontinuierliche Erwärmung: Während der März noch kühl war, wurden im April erste warme Tage mit bis zu 20 °C verzeichnet. Der Mai erreichte Temperaturen zwischen 15 und 20 °C.

Der Sommer war die wärmste Jahreszeit, insbesondere im Juli und August mit Höchstwerten zwischen 25 und 30 °C und einzelnen Hitzetagen über 30 °C. In Extremfällen stiegen die Temperaturen auf bis zu 35 °C. Der Herbst brachte eine schrittweise Abkühlung: Im September lagen die Temperaturen noch bei 20 bis 25 °C, im Oktober bei 10 bis 15 °C, während der November kühler war mit 5 bis 10 °C.

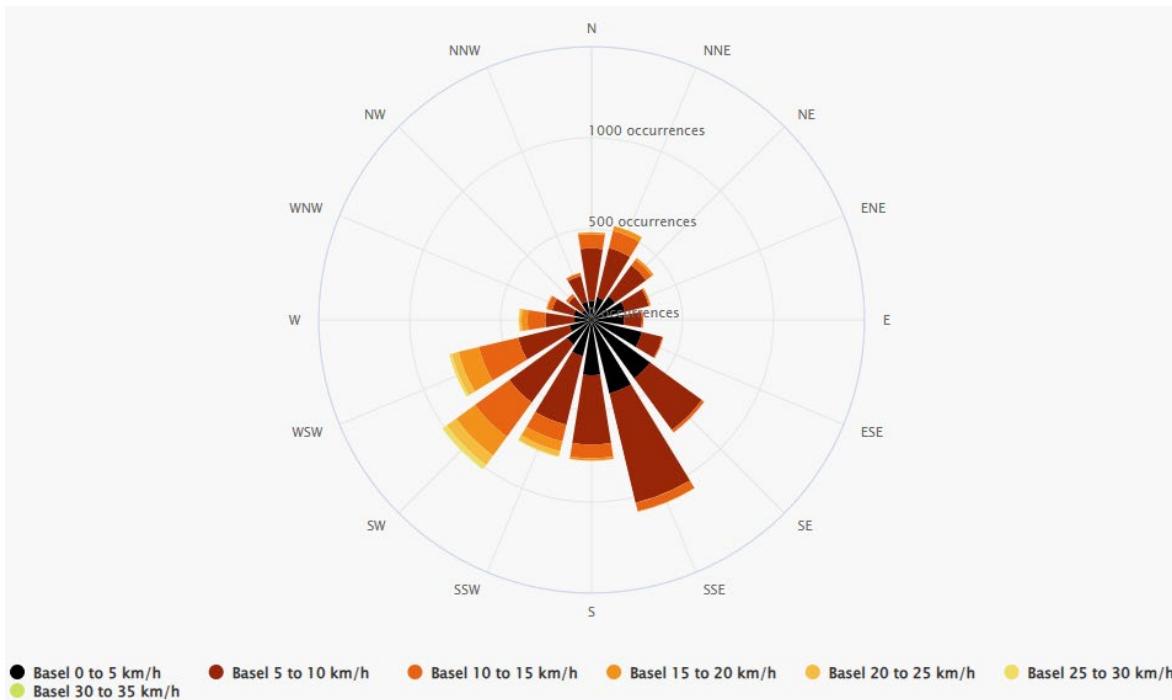
Diese klimatischen Bedingungen beeinflussen die Planung und den Betrieb der Verflüssigungsanlage erheblich. Hohe Sommertemperaturen und kalte Winterphasen müssen bei der technischen Auslegung berücksichtigt werden, um eine stabile Betriebsführung über das ganze Jahr sicherzustellen. Besondere Aufmerksamkeit erfordern die Temperaturkontrolle und die Systemanpassungen, um Effizienzverluste in den warmen Monaten zu vermeiden und die Frostsicherheit im Winter zu gewährleisten.



Die jährliche Niederschlagsmenge in Basel/Binningen betrug 830,5 mm und lag damit knapp unter dem langjährigen Durchschnitt von 841,9 mm. Trotz dieser leicht unterdurchschnittlichen Jahresmenge war die Verteilung der Niederschläge relativ ausgewogen. Besonders auffällig waren die feuchten Frühjahrsmonate sowie die lokal intensiven Sommerregen. Die Niederschlagsereignisse waren überwiegend kurz und kräftig, wodurch sich die Trockenphasen dazwischen deutlich bemerkbar machten.



Die Windrose von Basel/Binningen zeigt eine vorherrschende Windrichtung aus dem Westen (W) und Südwesten (SW), was typisch für die Region ist. Die häufigsten Windgeschwindigkeiten liegen zwischen 10 und 20 km/h, wobei Winde von 5 bis 15 km/h am stärksten vertreten sind. Stärkere Winde mit Geschwindigkeiten von 20 bis 30 km/h treten ebenfalls aus westlicher Richtung auf, während sehr starke Winde über 30 km/h selten sind. Die Windverteilung bestätigt den Einfluss atlantischer Luftmassen, die typischerweise aus westlichen Richtungen nach Basel strömen.



3.3 Flächenbedarf und Zugänglichkeit

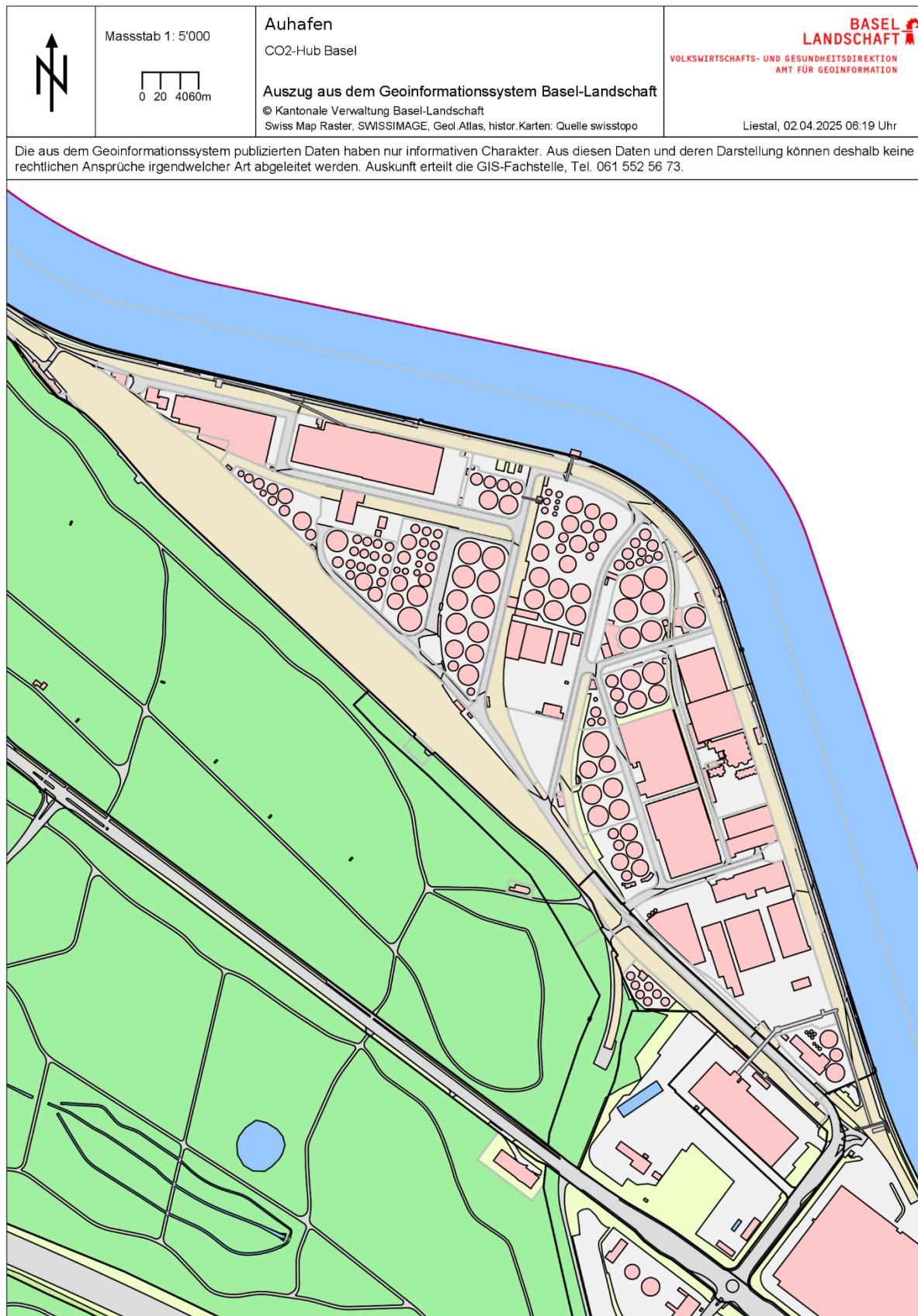
Der Auhafen in Muttenz ist ein bedeutender logistischer Knotenpunkt mit hervorragender Verkehrsanbindung, die den effizienten Umschlag grosser Gütermengen ermöglicht. Er ist sowohl per Schiene, Strasse als auch Wasserweg optimal erreichbar. Der Hafen liegt auf der linken Rheinseite und dient vorwiegend dem Umschlag und der Lagerung von flüssigen Treib- und Brennstoffen. Darüber hinaus werden auch Schwergut, Speiseöl, Dünger und Getreide umgeschlagen. Die Nutzfläche für gewerbliche Zwecke beträgt rund 285'000 m².

Mit der Inbetriebnahme der "Südanbindung Auhafen–Schweizerhalle". Diese Gleisverbindung zwischen dem Hafenbahnhof Birsfelden und dem Industriegebiet Schweizerhalle verbessert die Erreichbarkeit der südlichen Hafengebiete und bietet eine zusätzliche Anbindung an das Streckennetz. Die Kombination aus "Südanbindung" und "Nordanbindung" erhöht die logistische Flexibilität und gewährleistet den effizienten Gütertransport per Zug.

Der Auhafen Muttenz profitiert von seiner verkehrsgünstigen Lage nahe der Autobahn A2, die eine schnelle Anbindung nach Basel und weiter nach Deutschland im Norden sowie nach Luzern und Italien im Süden bietet. Über das nahe gelegene Autobahnkreuz Pratteln sind die Hauptverkehrsachsen der Region Basel gut erreichbar. Die Zufahrtswege zum Hafen sind so ausgelegt, dass auch Schwertransporte problemlos abgewickelt werden können. Für den lokalen Güterverkehr sorgt die Hauptstrassenverbindung über Muttenz für eine gute Erreichbarkeit.

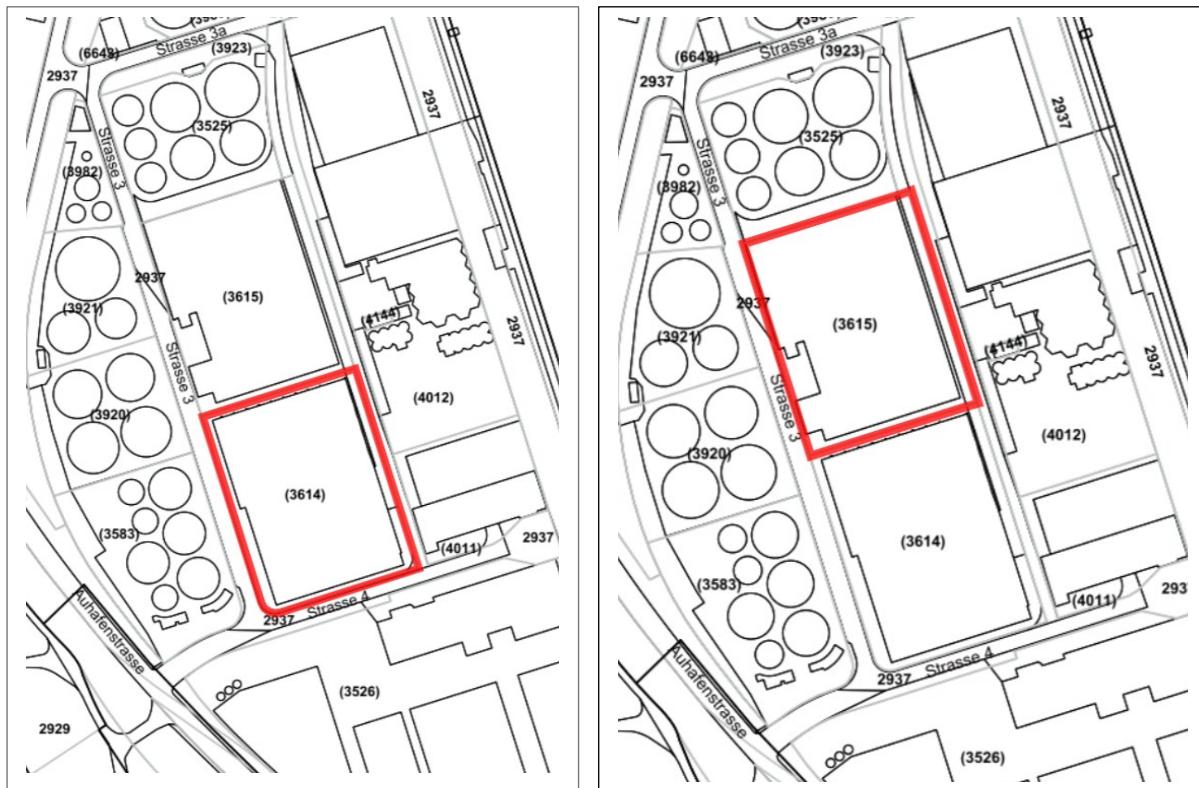
Durch die direkte Lage am Rhein ist der Auhafen Muttenz Teil der Schweizerischen Rheinhäfen und somit optimal an die internationalen Wasserwege angebunden. Dies ermöglicht eine direkte Verbindung zu den Nordseehäfen. Der Hafen verfügt über mehrere Umschlagstellen für Flüssiggüter, Stückgüter und Schüttgüter, was ihn zu einem zentralen Dreh- und Angelpunkt im Güterverkehr macht. Der Rhein als Wasserstrasse bietet die Möglichkeit, grosse Mengen an Rohstoffen und Industrieprodukten über weite Strecken kosteneffizient zu transportieren.

Die Kombination aus Strassen-, Schienen- und Wasseranbindung macht den Auhafen Muttenz zu einem wichtigen Logistikzentrum in der Region Basel und darüber hinaus. Die infrastrukturellen Erweiterungen sowie die multimodale Erreichbarkeit gewährleisten eine hohe logistische Flexibilität und tragen zur strategischen Bedeutung des Hafens im schweizerischen und internationalen Güterverkehr bei.



Für den Bau des CO₂-Terminals wurden zwei Parzellen geprüft, die sich in unmittelbarer Nähe des Rheinufers befinden und eine optimale Anbindung per Schiff, Bahn und Strasse bieten.

Die Gesamtfläche der Parzellen beträgt 11'970 m². Dabei umfasst die Parzelle 3615 eine Fläche von 6'083 m² und die Parzelle 3614 eine Fläche von 5'887 m².



Die beiden Parzellen werden derzeit für die Lagerung und den Umschlag von Trockengütern genutzt. Um den CO₂-Umschlag zu ermöglichen, müssen die Flächen entsprechend vorbereitet werden. Dazu gehören der Abriss bestehender Gebäude und die Erweiterung der Geländeanschlüsse, um die notwendige Infrastruktur für die CO₂-Verarbeitung, -Umschlag und -Lagerung zu schaffen.

4 Technische Machbarkeit

4.1 Fortschritt und Zeitplan

Das Projekt befindet sich in einer Machbarkeitsprüfungsphase, die dem Projektentwickler ermöglicht zu beurteilen, ob die technische Lösung am Standort Auhafen-Muttenz umgesetzt werden kann und welche Platzanforderungen bestehen, falls die Anlage an einem anderen Standort platziert werden soll.

Nach der Machbarkeitsanalyse, wenn der Projektentwickler das Projekt weiterverfolgen möchte, beginnt der FEED-Prozess (Front-End Engineering Design).

Es wurden vier Workstreams identifiziert:

1. Arealplanung:

Allgemeine Projektorganisation, wie Vorbereitungsmassnahmen, Bewilligungsverfahren, Rückbau, Aushub und Baumeisterarbeiten.

2. Handling-Anlagen:

Alle Infrastrukturen für den Umschlag von CO₂ (flüssig und gasförmig).

3. Speicherung:

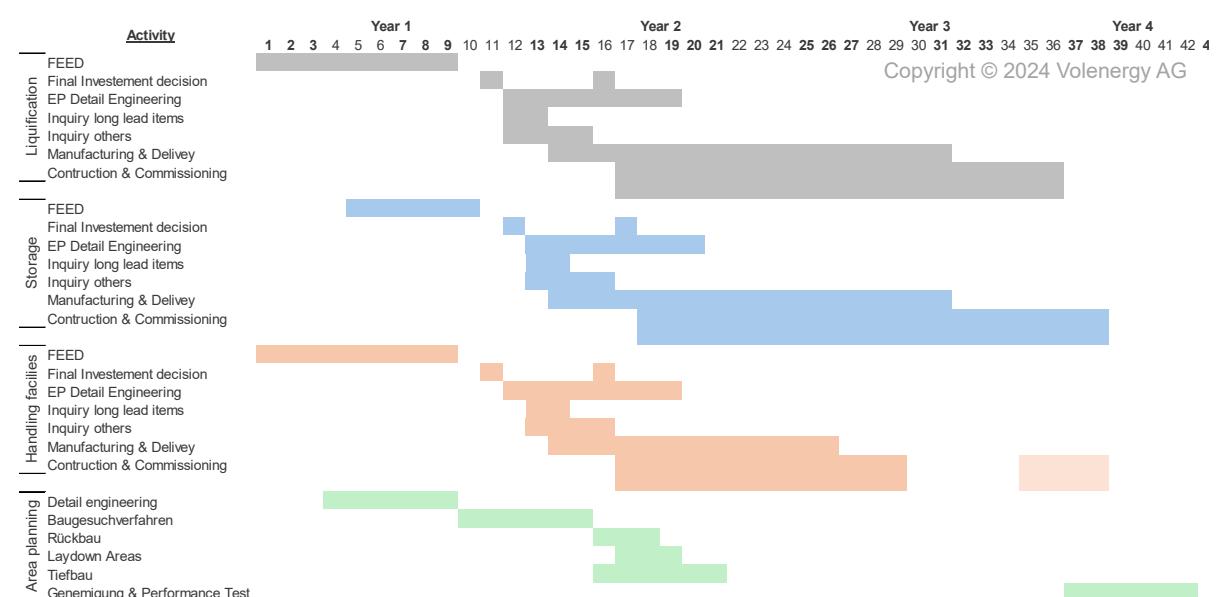
Alle Infrastrukturen im Zusammenhang mit der Lagerung von CO₂ (flüssig und gasförmig).

4. Verflüssigung:

Alle Infrastrukturen im Zusammenhang mit der Verflüssigung und Reinigung von CO₂.

Die Gesamtbauzeit wird nach aktuellem Wissensstand auf 38 Monate geschätzt. Im Rahmen der Detailplanung können die Umsetzungszeiten optimiert werden.

Im Projekt nicht berücksichtigt sind Verzögerungen aufgrund der Etappierung des Projekts, Verzögerungen infolge von Einsprachen, Verlängerungen von Baubewilligungsverfahren sowie Fälle von höherer Gewalt (Force Majeure). Die Bauzeit ist zudem abhängig von den Auftragsbestätigungen der beteiligten Unternehmen.



Mit diesem Bericht möchte der Projektentwickler ermitteln, welchen Platzbedarf (Footprint) die Anlage hat, ob die technische Realisierung möglich ist, welche Energieverbräuche und Emissionen zu erwarten sind, welche Infrastruktur für den Betrieb der Anlage erforderlich ist und welche Investitionskosten anfallen.

Der Projektentwickler plant, den Standort sofort mit der Volllast der Anlage zu betreiben. Dennoch ist beim Aufbau der Logistikinfrastruktur zu berücksichtigen, die passende Leistung des CO₂-Terminals zu installieren.

Auch wenn die Logistikinfrastruktur nicht im Umfang dieser Studie enthalten ist, geben wir hier unverbindliche Richtwerte bezüglich Lieferzeiten und Budgetkosten für die Beschaffung der Transportmittel an. Dabei handelt es sich um reine Investitionskosten ohne Berücksichtigung von Betriebs-, Unterhalts- und Personalkosten.

Für Tankkraftwagen beträgt die Lieferzeit für ein neues Fahrzeug bis zu 18 Monate. Die Kosten für eine Kältetransportausführung betragen etwa 500 TCHF.

Binnenschiffe mit einer Ladekapazität von 3.000 Tonnen haben eine geschätzte Lieferzeit von bis zu 36 Monaten. Die Investitionskosten belaufen sich auf etwa 10'000 TCHF für eine Ausführung zum kryogenen Transport.

Bei Kesselwagen ist für die Lieferung eines neuen Blockzugs (20 Kesselwagen) eine Lieferzeit von bis zu 18 Monaten zu erwarten. Die Kosten für eine Kältetransportausführung betragen etwa 800 TCHF.

Der Bau von Pipelines erfordert einen längeren Vorlauf. Vom ersten Projektentwurf bis zur Baubewilligung sind mindestens 3 Jahre einzuplanen. Die Bauzeit selbst kann, je nach Länge der Rohrleitung, parallel zur Errichtung des CO₂-Terminals erfolgen.

Diese Angaben basieren auf Rückmeldungen der am Projekt beteiligten Unternehmen sowie auf Erfahrungswerten der Volenergy AG.

Angesichts der noch fehlenden CO₂-CCU/S-Infrastruktur ist eine Etappierung des Aufbaus des CO₂-Terminals ein notwendiger Schritt. Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass die Realisierung schrittweise erfolgen kann, ohne den Gesamtbetrieb zu gefährden. Voraussetzung dafür ist, dass die Parzelle bereits für die endgültige Version vorbereitet wird und langfristig zur Verfügung steht. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung an zukünftige Anforderungen und eine kontinuierliche Erweiterung des Terminals im Einklang mit der Entwicklung der CO₂-Infrastruktur.

4.2 Hintergrund zu Lagerung und Handhabung

Das CO₂-Terminal ist für den Umschlag und die Lagerung von CO₂ im mittleren Betriebsdruckbereich (MP) ausgelegt. Diese Betriebsweise ermöglicht eine optimale Harmonisierung des Anlagenbetriebs mit den Transportwegen per Schiene, Fluss und Strasse. Auch die maritimen CO₂-Terminals, die CO₂ aus der Schweiz empfangen, sind auf diesen Betriebsdruck ausgerichtet.

Eine Anpassung der Logistikstrategie bleibt jedoch weiterhin möglich, solange die Markakteure, Gesetzgeber und verantwortlichen Entscheidungsträger noch keine endgültigen Festlegungen zu diesen wichtigen Parametern getroffen haben. Dadurch bleibt die notwendige Flexibilität erhalten, um auf künftige Entwicklungen und regulatorische Anforderungen angemessen reagieren zu können.

4.3 Verantwortlichkeitsaufteilung und Schnittstellen (Battery Limits)

In der vorliegenden Studie wird der Betrieb der Anlage auf dem Areal Auhafen Muttenz untersucht. Alle Annahmen bezüglich der CO₂-Qualität, die dem CO₂-Terminal zugeführt oder von dort abgeholt wird, basieren auf aktuellen Marktinformationen und dem Stand der technologischen Entwicklung. Grundsätzlich erfolgt die Planung und Umsetzung der Anlage nach anerkannten Regeln der Technik. Dabei wird angestrebt, soweit möglich, auf Lösungen mit einem Technologiereifegrad (TRL) von 8 oder höher zurückzugreifen.

Der Betriebsdruck der Pipelines, die CO₂ zum und vom CO₂-Terminal transportieren, muss in der FEED-Phase (Front-End Engineering Design) präzise festgelegt werden. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da der Einlagerungsdruck massgeblich die Dimensionierung und den Energieverbrauch der Verflüssigungsanlage beeinflusst.

Ein Beispiel verdeutlicht den Zusammenhang: Bei einem Betriebsdruck von 25 bara führt eine Erhöhung auf 30 bara zu einer Einsparung von 6,6 % der elektrischen Leistung der Kälteanlage. Umgekehrt bewirkt eine Druckminderung auf 13 bara eine Erhöhung des Energieverbrauchs um 41,9 % der elektrischen Leistung der Kälteanlage. Diese deutlichen Unterschiede zeigen, wie entscheidend die Wahl des Betriebsdrucks für die Energieeffizienz am Standort der Verflüssigungsanlage ist.

Dennoch müssen die Energiekosten über die gesamte Supply Chain hinweg berücksichtigt werden. Je nach CCU/S-Konstellation bei den Emittenten und dem Standort sollte der Energieverbrauch umfassend bewertet werden, um die optimale Betriebsstrategie festzulegen. Die ganzheitliche Betrachtung ermöglicht eine fundierte Entscheidung, die sowohl technische als auch wirtschaftliche Aspekte einbezieht.

Diese Betrachtung zeigt, wie wichtig die genaue Bestimmung des Betriebsdrucks für die Energieeffizienz der Anlage ist.

4.4 Umfang der Einrichtungen

Das CO₂-Terminal umfasst verschiedene Anlagenteile, die für die Lagerung und den Umschlag von flüssigem und gasförmigem CO₂ ausgelegt sind.

Die zentrale Lagereinheit besteht aus 24 Drucktanks zur Lagerung von flüssigem CO₂ bei Temperaturen bis -45 °C und einem maximalen Betriebsdruck von 20 bar. Jeder Tank hat einen Durchmesser von 10 Metern, eine Höhe von 23,4 Metern und eine Bruttokapazität von 1'578 m³. Das nutzbare Volumen pro Tank beträgt 1'500 m³.

Zusätzlich stehen 4 Drucktanks zur Verfügung, die speziell für die Lagerung von gasförmigem CO₂ bei den gleichen Betriebsparametern ausgelegt sind. Auch diese Tanks weisen einen Durchmesser von 10 Metern, eine Höhe von 23,4 Metern, eine Bruttokapazität von 1'578 m³ und ein Nutzvolumen von 1'500 m³ auf.

Für den Umschlag von flüssigem CO₂ auf Binnenschiffe verfügt das Terminal über 4 Steiger, von denen einer mit Doppelbelegung ausgestattet ist. Diese sind mit 10"-Marineverladern für die Förderung von flüssigem CO₂ ausgestattet. Zudem verfügt jeder Steiger über einen 8"-Marineverlader zur Rückgewinnung der CO₂-Dämpfe, die zurückverflüssigt werden.

Die Bahnlogistik am CO₂-Terminal ist so konzipiert, dass eine effiziente Abwicklung von Umschlagsprozessen gewährleistet ist. Dazu stehen 4 Rangiergleise zur Verfügung, die speziell für die

Entladung von 40 Kesselwagen ausgelegt sind. Jedes Gleis ist 150 Meter lang und bietet ausreichend Platz, um die Kesselwagen effizient zu entladen.

Die Gleisanordnung ermöglicht eine flexible Nutzung, da sowohl die Entladung als auch die Beladung der Kesselwagen auf allen 4 Gleisen durchgeführt werden kann. Diese Flexibilität erhöht die logistische Kapazität und ermöglicht parallele Umschlagsprozesse, wodurch die Abfertigungszeiten deutlich verkürzt werden.

Dank dieser durchdachten Struktur kann die Bahnlogistik optimal in den Betrieb des CO₂-Terminals integriert werden, was die Effizienz beim Umschlag von CO₂ erheblich verbessert. 2 TKW Entladestellen

Für die regionale CO₂-Logistik sind 2 Tankkraftwagen-Umschlagstellen vorgesehen. Diese Standorte ermöglichen es, sowohl die Beladung als auch die Entladung gleichzeitig durchzuführen. Diese parallele Nutzung steigert die Flexibilität und Resilienz des gesamten Prozesses, da Umschlagsvorgänge unabhängig voneinander abgewickelt werden können. Dadurch wird die Effizienz der regionalen CO₂-Logistik erheblich verbessert.

Die Einlagerungspipeline ist mit einer Filterstation und einer Druckregelung ausgestattet, um einen stabilen und effizienten Verflüssigungsprozess sicherzustellen. Diese Komponenten gewährleisten die kontinuierliche hochqualitative Druckregelung des eingespeisten CO₂ und ermöglichen eine präzise Druckanpassung während der Verflüssigung.

Die Einrichtung zur Förderung von reinem CO₂ zum Chemieareal in Schweizerhalle umfasst 2 Verdampfer, die flüssiges CO₂ mittels der Wärme, die während des Verflüssigungsprozesses erzeugt wird, in gasförmigen Zustand überführen. Diese Nutzung der Abwärme trägt zur Energieeffizienz bei und ermöglicht eine bedarfsgerechte CO₂-Versorgung des Chemieareals.

Die Stromversorgung erfolgt über eine 25 MVA-Trafostation, die zusammen mit einer Schaltanlage in einem gebauten Gebäude untergebracht ist. Die Zuleitung erfolgt direkt aus dem Hochspannungsnetz, um eine stabile und leistungsfähige Energieversorgung sicherzustellen. Der Platzbedarf für die gesamte Infrastruktur beträgt etwa 800 m². Die Verflüssigungsanlage ist modular aufgebaut und besteht aus mehreren funktionalen Einheiten, die jeweils spezifische Aufgaben erfüllen.

Die Dehydration Section bildet die erste Stufe des Prozesses. Hier wird die Feuchtigkeit aus dem Rohgasstrom entfernt, um die nachfolgenden Verfahrensschritte effizient zu gestalten. Dieser Trocknungsschritt ist entscheidend, um Kondensation und Vereisung in den weiteren Prozessstufen zu vermeiden.

Anschliessend folgt die Cryogenic Section, in der die kryogene Destillation durchgeführt wird. In dieser Einheit wird das CO₂ bei tiefen Temperaturen abgetrennt und verflüssigt. Durch die Abkühlung auf sehr niedrige Temperaturen kann das CO₂ aus dem Gasstrom isoliert und in flüssiger Form bereitgestellt werden.

Ein weiteres Modul umfasst die Membranen, die zur Gasaufbereitung dienen. Diese Membraneinheiten trennen unerwünschte Gase wie Stickstoff und Sauerstoff aus dem CO₂-Strom. Dadurch wird die Reinheit des CO₂ erhöht und die Effizienz des Verflüssigungsprozesses gesteigert.

Die letzte zentrale Komponente ist die CO₂-Zykluskompression. Diese Einheit verdichtet das gereinigte CO₂, um es für die weitere Verarbeitung oder Verflüssigung vorzubereiten. Durch die Kompression wird der Druck auf das erforderliche Niveau gebracht, um die anschliessende Speicherung oder den Transport zu ermöglichen.

Die Pumpstationen sind mit Spaltrohrmotorpumpen in den Grössen 100 m³/h, 300 m³/h und 400 m³/h ausgestattet. Diese Pumpen eignen sich ideal für die Einlagerungs- und Auslagerungsprozesse von CO₂ und bieten aufgrund ihrer speziellen Bauweise eine Reihe von Vorteilen.

Spaltrohrmotorpumpen zeichnen sich durch ihre hermetisch dichte Konstruktion aus, bei der der Motor und die Pumpe in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht sind. Dies verhindert Leckagen und bietet eine hohe Betriebssicherheit, insbesondere bei flüssigem CO₂, das unter Druck steht. Ein weiterer Vorteil ist der Verzicht auf Gleitringdichtungen, die bei herkömmlichen Pumpen eine Schwachstelle darstellen. Durch die Spaltrohrtechnik werden potenzielle Undichtigkeiten vermieden, was die Zuverlässigkeit erhöht und den Wartungsaufwand reduziert.

Ein zusätzliches Plus ist die geringe Geräuschentwicklung im Betrieb, da die Spaltrohrmotorpumpe vibrationsarm arbeitet. Dies verbessert nicht nur die Arbeitsbedingungen, sondern trägt auch zur Minimierung von Lärmemissionen bei. Darüber hinaus sind diese Pumpen robust gegenüber wechselnden Betriebsbedingungen und zeichnen sich durch eine lange Lebensdauer aus.

Die hohe Energieeffizienz der Spaltrohrmotorpumpen trägt zur Reduzierung des Energieverbrauchs bei. Durch die direkte Anbindung des Motors an die Pumpe ohne mechanische Kupplung werden Übertragungsverluste minimiert. Diese Eigenschaft ist besonders vorteilhaft bei kontinuierlichen Einlagerungs- und Auslagerungsprozessen, die eine gleichmässige und zuverlässige Pumpenleistung erfordern.

Dank dieser Eigenschaften sind die Spaltrohrmotorpumpen bestens für den Einsatz im CO₂-Terminal geeignet, da sie eine sichere, emissionsfreie und energieeffiziente Förderung von verflüssigtem CO₂ gewährleisten.

4.5 Verfahrenstechnik, Massenbilanz und Energiebilanz

Der CO₂-Terminal umfasst vier Hauptbereiche: die Verflüssigungsanlage, die Speicheranlage, die Umschlagstelleninfrastruktur und die Arealeinrichtungen.

Die Verflüssigungsanlage bildet das Herzstück des CO₂-Terminals und übernimmt die Verflüssigung und Reinigung von gasförmigem CO₂. In mehreren Prozessstufen wird das CO₂ auf die erforderliche Reinheit gebracht und anschliessend verflüssigt. Dank der modularen Bauweise kann die Anlage flexibel an unterschiedliche Betriebsanforderungen angepasst werden.

Aufgrund von Patenten und Vertraulichkeitsvereinbarungen können die genauen Verfahrensdetails nicht offengelegt werden. Die Anlage basiert jedoch auf modernster Technologie und gewährleistet eine effiziente und zuverlässige Verarbeitung von CO₂.

Der Betrieb des CO₂-Terminals erfordert eine sorgfältige Kontrolle der Wasserkonzentration im Rohgas. Wasser in Kombination mit Stickoxiden (NOx) kann zu chemischen Reaktionen führen, die unter bestimmten Bedingungen zur Bildung von Salpetersäure (HNO₃) führen können. Dies kann insbesondere in geschlossenen Systemen und bei erhöhtem Druck zu unerwünschten Effekten führen.

Um die Bildung von Salpetersäure zu vermeiden, sollte das Rohgas möglichst in einem trockenen Zustand gehalten werden. Dies erfordert die kontinuierliche Überwachung der Wasserkonzentration sowie die Anwendung geeigneter Trocknungsverfahren.

Die Kombination von Feuchtigkeit im Rohgas und NOx kann die Materialbeständigkeit von Anlagenteilen beeinträchtigen und die Betriebssicherheit beeinflussen. Daher ist eine kontinuierliche

Entfeuchtung sowie eine Kontrolle der Gaszusammensetzung während des Umschlag- und Verflüssigungsprozesses empfehlenswert.

Die Speicheranlage umfasst speziell isolierte Tanks (Bullet-Tanks) zur Zwischenlagerung von flüssigem CO₂. Diese Tanks sind darauf ausgelegt, die gelagerten Mengen über einen längeren Zeitraum stabil und sicher zu halten. Die Tanks sind für einen Betrieb bei 14 bara und -31 °C ausgelegt.

Das flüssige CO₂ wird bei der ersten Befüllung der Tanks leicht unterkühlt, um die Verdampfung möglichst gering zu halten. Die Boil-Off-Rate (BOR) ist mit 0,1 % kalkuliert. Dies ermöglicht eine kompakte Isolierung der Tanks und eine ausreichende thermische Trägheit, um ein Entweichen von CO₂ in die Atmosphäre zu verhindern.

Die Verdampfung innerhalb der SOL erfolgt in einem kontrollierten Zustand, sodass das CO₂ im internen Verflüssigungskreislauf verbleibt. Ein kontrollierter Boil-Off bietet den Vorteil, dass die Verdampfungskälte genutzt werden kann, um die Flüssigkeit im Tank effizient zu kühlen. Dadurch bleibt die Temperatur im Tank stabil und es wird verhindert, dass die Flüssigkeit aufgrund von Wärmeaufnahme unkontrolliert verdampft.

Die Umschlagstelleninfrastruktur ist speziell darauf ausgelegt, den effizienten Transfer von CO₂ zwischen verschiedenen Transportmitteln zu gewährleisten. Zu diesem Zweck umfasst die Anlage Verladeeinrichtungen für Tankkraftwagen, Zugkompositionen und Binnenschiffe. Die Konstruktion der Anlage ermöglicht sowohl die Einlagerung als auch die Auslagerung von CO₂ an der Kesselwagen-Umschlagstelle.

Ein besonderer Vorteil der Infrastruktur liegt in der parallelen Beladung und Entladung der Kesselwagen. Alle 40 Kesselwagen können gleichzeitig am CO₂-Terminal angeschlossen werden, was die Effizienz erheblich steigert. Die Be- und Entladung erfolgen über eine moderne Bottom-Loading-Anlage. Während die Entladung über 4"-Anschlüsse erfolgt, wird die Befüllung über 3"-Anschlüsse realisiert. Diese sind mit zollkonformen Gewichts- und Volumenmesssystemen ausgestattet, um höchste Genauigkeit und Transparenz sicherzustellen. Jeder Kesselwagen wird dabei über eine eigens zugewiesene Messstrecke befüllt, was eine präzise und kontrollierte Abwicklung ermöglicht.

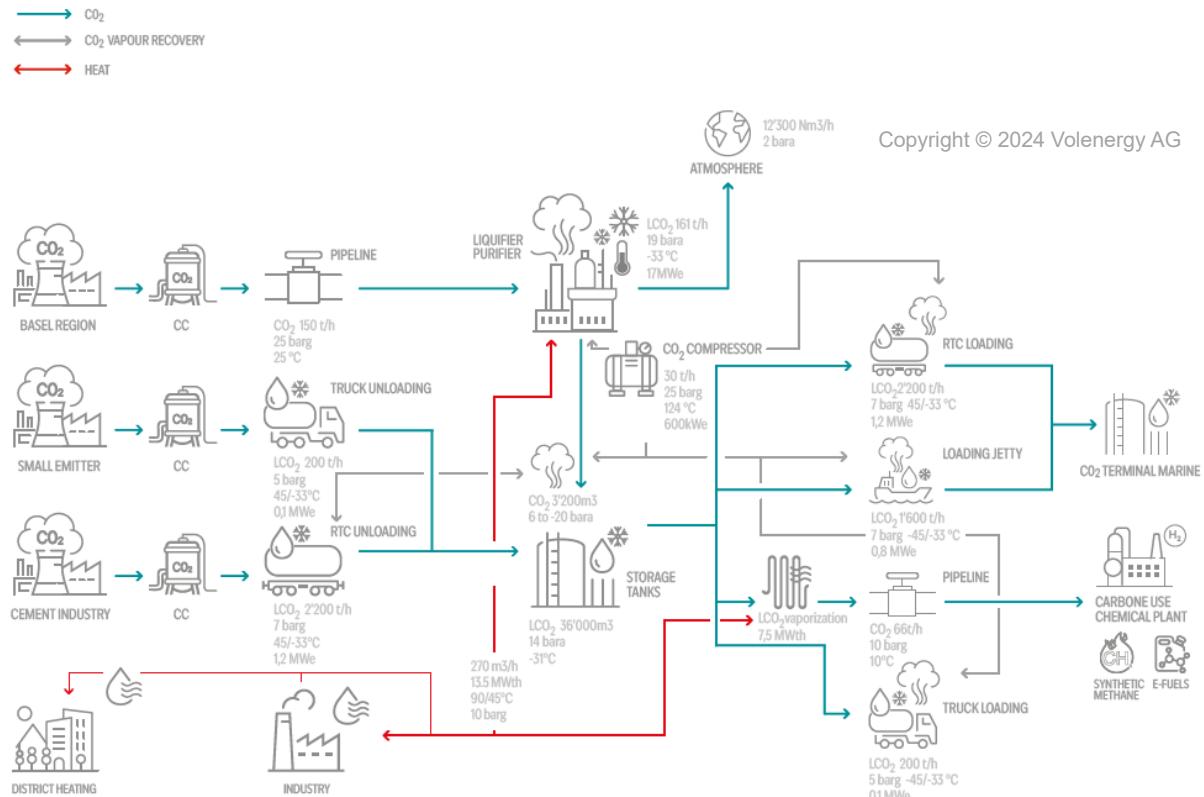
Sicherheitsaspekte spielen ebenfalls eine zentrale Rolle. Die Kesselwagen müssen zwingend mit einer Überfüllsicherung sowie einer zuverlässigen Erdungseinrichtung ausgestattet sein. Diese Maßnahmen gewährleisten einen sicheren Betrieb und minimieren das Risiko von Zwischenfällen während des Umschlags.

Zu den Arealeinrichtungen gehört der Stromanschluss ebenso wie die Kompressionsanlage zur Rückverflüssigung der CO₂-Dämpfe, die aus Produktion, Lagerung und Umschlag entstehen. Besonders erwähnenswert ist das Verfahren zur Kühlung von Transportmitteln und Apparaten. Bei der Erstbefüllung oder Wiederinbetriebnahme müssen die Apparate und Geräte auf die Betriebstemperatur gebracht werden. Dies erfolgt mit einem Temperaturgradienten von 1,5–2 °C pro Minute, um die thermischen Belastungen zu minimieren. In extremen Fällen, bei einem Temperaturunterschied von bis zu 60 °C, ist die Kühlung eines Binnenschiffs oder eines Blockzugs mit grossen Mengen an CO₂-Dämpfen für diesen Prozess zu berücksichtigen. Das Kühlverfahren muss im Rahmen des FEED-Prozesses (Front-End Engineering Design) detailliert analysiert werden, da die Auswirkungen auf den Betrieb und die Effizienz der Anlage erheblich sind. In der Projektstudie sind für diesen Zweck 30 t/h Verdampfung vorgesehen.

Als theoretisches Beispiel betrachten wir die Kühlung eines Kesselwagens. Um 10 Tonnen Stahl, der eine Ausgangstemperatur von 30 °C hat, auf -20 °C abzukühlen, benötigt man theoretisch etwa 0,43 Tonnen (430 kg) CO₂ bei -31 °C. Die Kühlung erfolgt mit einem Temperaturgradienten von 1,5 °C pro

Minute, um thermische Spannungen zu vermeiden. Unter diesen Bedingungen beträgt die benötigte Kühlzeit etwa 33 Minuten. Die Berechnung berücksichtigt die Energie, die durch die Verdampfung des CO₂ freigesetzt wird. Diese Energie wird genutzt, um die Stahlmasse effizient und kontrolliert auf die Zieltemperatur abzukühlen. Der kontrollierte Einsatz von CO₂ gewährleistet, dass die Temperaturänderung im Stahl gleichmäßig erfolgt und keine Materialschäden entstehen.

Als Grundlage für die Energie- und Massenbilanz dient das folgende Schema, welches die Hauptprozesse darstellt.



4.6 Konstruktionsgrundlagen

Der Betrieb im mittleren Druckbereich (MP) bietet wesentliche Vorteile für die Materialwahl und die technischen Anforderungen im CO₂-Terminal. Durch die Verwendung von Standard-C-Stahl und gängiger Tanklagertechnik mit herkömmlichen Baustoffen können sowohl wirtschaftliche als auch technische Aspekte optimal berücksichtigt werden. C-Stahl ist im Vergleich zu rostfreien Edelstählen oder speziellen Legierungen deutlich kostengünstiger. Dies liegt an den niedrigeren Materialkosten sowie an der breiten Verfügbarkeit auf dem Markt. Die standardisierte Produktion und einfache Verarbeitung führen zu geringen Beschaffungskosten, was die Gesamtinvestitionskosten des CO₂-Terminals positiv beeinflusst. Ein weiterer Vorteil von C-Stahl ist die einfache Reparier- und Schweißbarkeit, die insbesondere bei langfristigem Betrieb eine kostengünstige und schnelle Instandsetzung ermöglicht.

Trotz seiner Wirtschaftlichkeit ist C-Stahl anfällig für Korrosion. Dieses Risiko lässt sich jedoch durch geeignete Schutzmaßnahmen wirksam kontrollieren. Besonders wichtig ist die Trocknung des CO₂, da feuchtes CO₂ die Korrosionsanfälligkeit erheblich erhöht. Ein aktives Korrosionsmanagement ist unerlässlich, um die Integrität der Infrastruktur langfristig zu sichern. Dazu gehört die regelmäßige

Überprüfung auf Korrosionsschäden und die Umsetzung präventiver Massnahmen. Durch kontinuierliche Kontrolle und Wartung lässt sich die Lebensdauer der Anlagen verlängern und die Betriebssicherheit gewährleisten.

Die Rohrleitungen im CO₂-Terminal werden nach den Standards ANSI B36.10 & B36.19 in der Ausführung Sch40 gebaut. Diese Wahl stellt sicher, dass die Leitungen den Druckanforderungen entsprechen und eine lange Lebensdauer aufweisen. Für Rotationsmaschinen und Geräte ist eine Druckstufe von mindestens PN40 vorgeschrieben. Als Gehäusematerial kommen entweder GGG (Gusseisen mit Kugelgraphit) oder 304L Edelstahl zum Einsatz, um sowohl mechanische Festigkeit als auch Korrosionsbeständigkeit zu gewährleisten.

Die Apparate der CO₂-Anlage müssen mehrere technische Anforderungen erfüllen. Die Wärmetauscher sind mit einer Druckstufe von mindestens PN25 ausgelegt, wobei 316L Edelstahl empfohlen wird, da dieser Werkstoff eine hohe Beständigkeit gegenüber CO₂ und kondensierten Verunreinigungen bietet. Je nach Prozessanforderung kommen Rohrbündel- oder Plattenwärmeübertrager zum Einsatz. Die Pumpen sind für eine Druckstufe von PN40 ausgelegt. Das Gehäuse besteht aus GGG oder 304L Edelstahl, bei höheren Korrosionsanforderungen aus 316L. Um Leckagen zu minimieren, werden doppeltwirkende Gleitringdichtungen verwendet. Verdichter sind ebenfalls für eine Druckstufe von PN40 ausgelegt und bestehen je nach Anforderung aus 304L oder 316L Edelstahl.

Behälter und Separatoren sind für Hochdruckanwendungen mit PN40 ausgelegt, bei niedrigeren Drücken mit PN25. Das Material ist je nach Korrosionsanfälligkeit C-Stahl, 304L oder 316L Edelstahl. Für Armaturen wie Ventile und Absperrhähne ist ebenfalls eine Druckstufe von PN40 vorgesehen. Die Tanks sind für einen Betriebsdruck von 20 barg ausgelegt. Während der FEED-Phase wird die genaue Dimensionierung vorgenommen, um die Betriebssicherheit sicherzustellen. Je nach Prozessanforderung können auch Druckstufen bis PN25 berücksichtigt werden.

Die Sicherheits- und Überwachungseinrichtungen umfassen automatische Überdruckventile mit PN40 für den Hochdruckbereich. Gaswarnsysteme sind auf CO₂-Konzentrationen kalibriert und verfügen über akustische und visuelle Alarne, um im Gefahrenfall schnell zu reagieren. Zur Druck- und Temperaturüberwachung werden Sensoren mit hoher Messgenauigkeit eingesetzt, die auch in korrosiven Umgebungen zuverlässig arbeiten.

Da sich der Auhafen in der Erdbebenzone 3a befindet, müssen die baulichen und technischen Anlagen auch erdbebensicher ausgelegt sein. Die verwendeten Baustoffe entsprechen den geltenden Qualitätsanforderungen: Der Beton erfüllt die Festigkeitsklasse C 30/37 (NPK C) und der Betonstahl entspricht der Qualität B 500 B. Diese Materialwahl garantiert eine hohe Stabilität und Langlebigkeit der Baukonstruktionen.

Diese technischen Vorgaben garantieren die Betriebssicherheit, Langlebigkeit und Zuverlässigkeit der Anlage. Die Verwendung hochwertiger Materialien und die Einhaltung anerkannter Industriestandards minimieren das Risiko von Ausfällen und gewährleisten einen nachhaltigen Betrieb. Diese umfassenden Vorgaben gewährleisten die Betriebssicherheit, Langlebigkeit und Wirtschaftlichkeit der gesamten Anlage. Die Verwendung hochwertiger Materialien und die Einhaltung gängiger Industriestandards minimieren das Risiko von Ausfällen und garantieren eine nachhaltige Betriebsweise.

4.7 Prozessequipment

Europa und die Schweiz stehen vor der Herausforderung, eine umfassende CO₂-Wertschöpfungskette zu entwickeln, die von der Abscheidung über den Transport bis hin zur Speicherung und Nutzung von CO₂ reicht. Diese Infrastruktur ist derzeit unzureichend ausgebaut, was die Reduktion von Treibhausgasemissionen und die Einhaltung von Klimazielen erschwert.

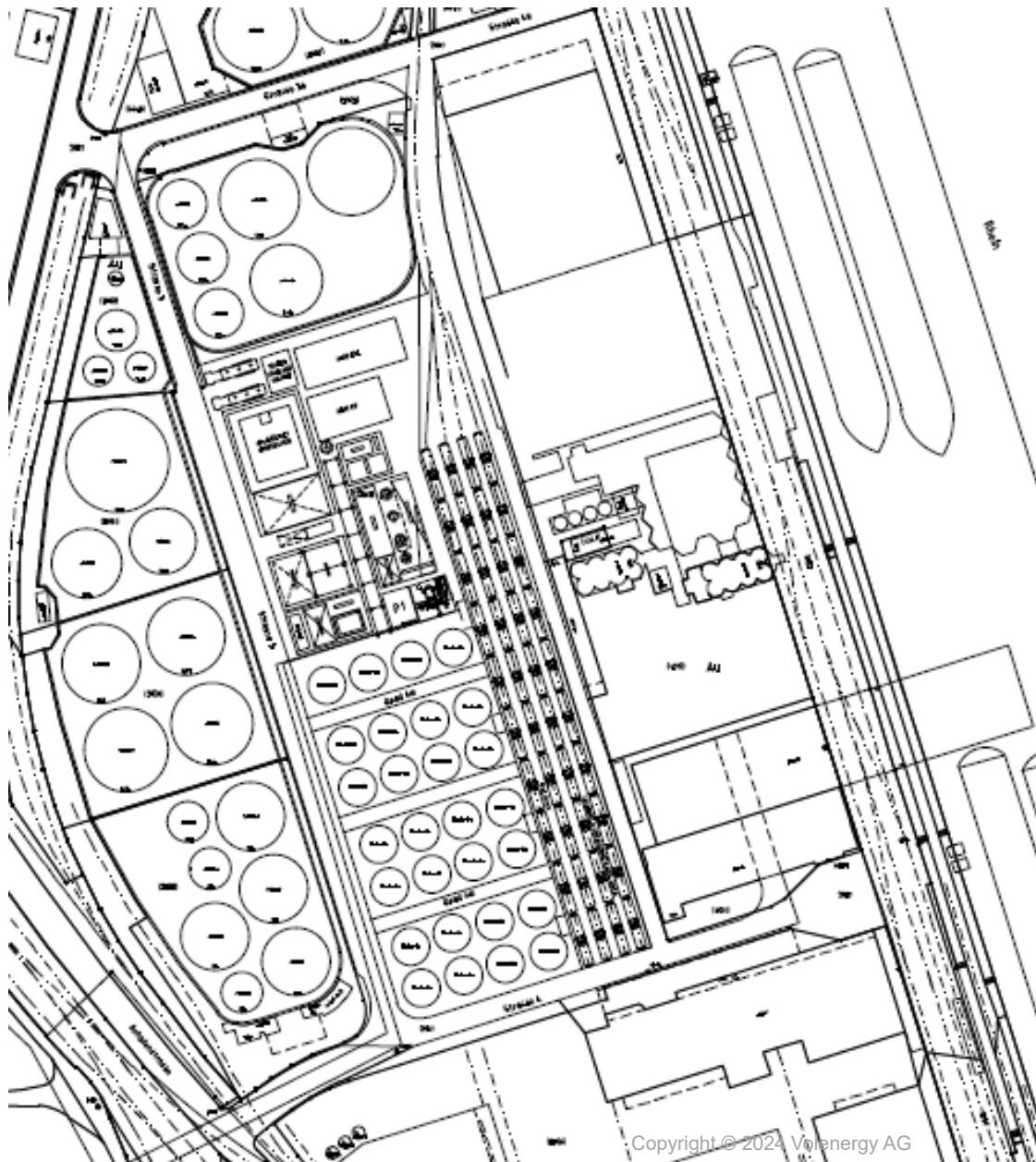
4.8 Grundlayout und Modell

Das CO₂-Terminal nutzt die gesamte Fläche der vorgesehenen Parzellen. Aufgrund der begrenzten Baufläche ist eine mehrstöckige Planung der Prozessanlage erforderlich, um die verfügbare Fläche effizient zu nutzen.

Die Steigeranlagen sind im Bereich des aktuellen Trockengüterumschlags vorgesehen. Bei der detaillierten Projektplanung werden auch die Bedürfnisse der angrenzenden Nachbarn berücksichtigt, um mögliche Nutzungskonflikte zu vermeiden und eine harmonische Integration in die bestehende Umgebung zu gewährleisten.

Der Bahnanschluss muss neu konzipiert werden, um eine optimale logistische Anbindung des Terminals sicherzustellen. Dabei ist es möglich, dass die Position der Tanklagerwände leicht angepasst werden muss, um die Fläche bestmöglich auszunutzen und die Verkehrsführung effizient zu gestalten.

Externe Anschlüsse des CO₂-Terminals sind in dieser Planung noch nicht berücksichtigt.



4.9 Equipment-Definition und Kostenschätzung

Für die Kostenberechnung wurden Angebote als Grundlage verwendet, insbesondere für die komplexeren und kostenintensiveren Einheiten. Da es sich bei den Angeboten für die anspruchsvolleren Prozesse weitgehend um Schätzungen (sogenannte "Ballpark Offers") handelt, befinden wir uns hinsichtlich der Kosteneinschätzung in der Klasse 4/5. Um verbindliche Angebote zu erhalten, muss ein FEED-Prozess (Front-End Engineering Design) gestartet werden.

Die angegebenen Gesamtkosten umfassen ausschliesslich die Investitionen. Wartung, Betriebskosten, Remediation und Verbrauchsmaterialien sind in diesem Projekt nicht berücksichtigt. ***

Volenergy AG	04.04.2025
Neubau Anlage zur Lagerung und Umschlag von CO2 im Auhafen Muttenz	Mauro Forni
Grobkostenschätzung	
Genauigkeit +/-50%	
Pos. Leistung	EP
Total Baukosten	326'055'780
Unvorhergesehenes	2'295'000
Zwischentotal	328'350'780
Übertrag	328'350'780
Planungskosten	39'402'094
EPC Fees	72'185'195
Total Tiefbaukosten exkl. MWSt.	439'938'069

Der Rückbau der Hallen an der Auhafenstrasse 117 und Auhafenstrasse 121 erfolgt auf früheren Projekten. Der Rückbau umfasst Bauteile bis zu einer Tiefe von -1,0 m unter Gelände. Tiefer liegende Gebäudefundamente können im Boden verbleiben, da ihre Entfernung nicht notwendig ist.

Auch der Rückbau der Gleisanlagen basiert auf Erfahrungswerten. Da keine detaillierten Informationen zu den Lasten der Anlagenbestandteile vorliegen, wurden die Fundamente als 1,0 m starke Betonplatten kalkuliert. Die Kostenberechnung erfolgte ebenfalls auf Basis von Einheitspreisen aus vergleichbaren Projekten.

Die Entladestelle und Gleiswanne wurden anhand von Einheitspreisen berechnet, die unlängst für ein ähnliches Projekt detailliert ermittelt wurden. Die Kosten wurden auf die für das CO₂-Projekt erforderliche Gleislänge hochgerechnet. Die Schottergleise und Weichen wurden ebenfalls auf Basis von Einheitspreisen und Erfahrungswerten kalkuliert.

Die Kosten für die Schiffsverladeanlage und die Steiger wurden aus einem realisierten Projekt aus dem Jahr 2012 abgeleitet, das drei Marineverlader umfasste. Auch hier wurde ein Teuerungsaufschlag berücksichtigt, um die aktuellen Kosten zu reflektieren.

Die Flächen rund um die Anlagen, die Stehtanks, den Bereich der Füllstelle sowie ein Streifen der Auhafenstrasse 3 werden mit Asphaltbelag befestigt. Die Ausführung umfasst eine 12 cm starke Asphalttragschicht und eine 3,5 cm starke Deckschicht. Alle Flächen werden mit Randsteinen eingefasst und entsprechend entwässert. Die Kostenkalkulation basiert auf Einheitspreisen aus früheren Projekten und berücksichtigt die spezifischen Anforderungen des Standorts.

5 Gesundheit, Sicherheit und Umweltaspekte

Der Bau und Betrieb des CO₂-Terminals im Auhafen-Muttenz erfordert eine sorgfältige Berücksichtigung umwelt- und sozialverträglicher Rahmenbedingungen. Neben der strikten Einhaltung der geltenden Umweltschutzvorgaben und der Sicherstellung von Anlagen- und Personensicherheit spielt auch der Energieverbrauch eine zentrale Rolle. Die Umsetzung energieeffizienter Lösungen ist von grosser Bedeutung, um den Betrieb nicht nur sicher, sondern auch nachhaltig zu gestalten. Durch den Einsatz moderner Technologien und die Optimierung der Energieflüsse soll der Ressourcenverbrauch möglichst gering gehalten werden. Dies gewährleistet einen langfristig umweltgerechten und wirtschaftlich tragfähigen Betrieb.

5.1 Geltende Umweltschutz- und Energiegesetze

Der Auhafen-Muttenz liegt im Kanton Basel-Landschaft und unterliegt sowohl nationalen als auch kantonalen Umweltschutz- und Energievorschriften. Zu den relevanten gesetzlichen Grundlagen gehören:

Umweltschutzgesetz (USG)

Regelt den Schutz von Mensch und Umwelt vor schädlichen oder lästigen Einwirkungen. Dies umfasst insbesondere Emissionen, Abfälle und Bodenbelastungen.

Luftreinhalteverordnung (LRV)

Vorschriften zur Reduktion von Luftschaadstoffen, insbesondere bei industriellen Anlagen. Die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte für CO₂ und andere Schadstoffe ist von besonderer Bedeutung.

Gewässerschutzgesetz (GSchG)

Richtlinien zum Schutz der Rheinwasserqualität, insbesondere bei potenziellen Kontaminationen. Die Lagerung und Handhabung von Flüssig-CO₂ erfordern Schutzmassnahmen gegen unkontrollierte Freisetzung.

Störfallverordnung (StFV)

Verlangt die Identifikation und Minimierung von Risiken durch gefährliche Stoffe, insbesondere in Anlagen, die mit verflüssigtem CO₂ arbeiten.

Lärmschutzverordnung (LSV)

Festlegung von Grenzwerten für industrielle Lärmemissionen, insbesondere bei Verladeprozessen und beim Betrieb von Verdichtern, Pumpen und Umschlagplätzen.

Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA)

Anforderungen an die Handhabung und Entsorgung von Reststoffen und Abfällen aus dem CO₂-Betrieb.

Energiegesetz (EnG)

Das Energiegesetz legt die Grundlagen für eine nachhaltige und effiziente Energienutzung fest. Für die CO₂-Verflüssigungsanlage sind Energieeffizienzmaßnahmen erforderlich, um den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen so gering wie möglich zu halten. Dies schliesst die Nutzung von Fernwärme und die Integration energieeffizienter Technologien ein.

Brandschutzgesetzgebung

Brandschutzrichtlinien (BSR) der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF).

Die VKF erarbeitet die Brandschutzrichtlinien, die in allen Kantonen gelten. Diese Richtlinien definieren die Anforderungen an bauliche, technische und organisatorische Brandschutzmassnahmen.

Schweizerische Brandschitzvorschriften (BSV).

Diese Vorschriften sind Teil der kantonalen Gesetzgebung und werden meist von der Gebäudeversicherung oder der kantonalen Feuerpolizei umgesetzt. Sie regeln den baulichen Brandschutz, Fluchtwege, Brandmeldeanlagen und die Verwendung von Baustoffen.

Arbeitsgesetz (ArG)

Beinhaltet Vorschriften zur Sicherheit am Arbeitsplatz, einschliesslich Brandschutzmassnahmen und Fluchtwegkonzepten.

Die Einhaltung dieser Vorschriften ist unerlässlich, um die Genehmigung und den störungsfreien Betrieb des CO₂-Terminals sicherzustellen. Regelmässige Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP) gewährleisten die Kontrolle der Auswirkungen der Anlage auf Luft, Wasser und Boden.

5.2 Störfallrisiken

5.2.1.1 Ausgangslage

Die Anlieferung des CO₂ erfolgt gasförmig in Pipelines und flüssig in Bahnkesselwagen (BKW) sowie Tanklastwagen (TKW). Das angelieferte CO₂ wird bei Bedarf in einem Prozessschritt für die Lagerung umgewandelt und in flüssiger Form in Tankanlagen zwischengelagert. Aufgrund der Eigenschaften von CO₂ erfolgt die Lagerung in einem flüssigen Aggregatzustand unter Druck (20 bar) und bei tiefen Temperaturen (-30°C). Der Abtransport erfolgt gemäss derzeitigen Planungen mittels Tankmotorschiffe (TMS) auf dem Rhein. Da der Abtransport auf dem Rhein für bestimmte Zeiten unterbrochen sein kann (z. B. bei Niedrigwasser), muss im Tanklager ausreichend Kapazität vorhanden sein, um entsprechende Zeiten zu überbrücken. Aktuell geht die Volenergy AG von einer Lagerkapazität im Bereich von 1 bis 3 Millionen Kubikmeter aus, was in etwa einem geplanten Jahresumschlag entspricht.

Das Gas CO₂ ist in geringen Mengen von 0.04% resp. 400 ppm (parts per million - Volumenanteil) Bestandteil der Umgebungsluft und als solches nicht als Gefahrstoff im Sinne der Störfallverordnung (StFV) [Lit. 1] zu betrachten. Bei hohen CO₂-Konzentrationen ab ca. 6% resp. 60'000 ppm (Volumenanteil) entsteht durch die Verdrängung des Sauerstoffs eine für den Menschen gefährliche Umgebung, da nicht mehr ausreichend Sauerstoff aufgenommen werden kann. Bei der Freisetzung von sehr grossen Mengen von CO₂ können daher Menschen im unmittelbaren Nahbereich gefährdet sein.

Für CO₂ ist in der StFV keine Mengenschwelle festgelegt. Betriebe, welche CO₂ Umschlagen und Lagern, unterstehen daher nicht a priori der Störfallverordnung. Der geplante CO₂-Hub stellt im Rahmen der Störfallvorsorge einen Sonderfall dar. Die geplante Lagermenge von flüssigem CO₂ mit total 1 bis 3 Millionen Kubikmeter oder mehreren 1'000 Kubikmeter je Lagertank ist sehr gross. Eine im Sinne der StFV relevante Gefährdung der Bevölkerung kann bei diesen Mengen nicht ausgeschlossen werden. Gemäss StFV können die Vollzugsbehörden Betriebe, welche die Mengenschwellen nicht überschreiten, aber gleichwohl ein relevantes Störfallrisiko darstellen, der StFV unterstellen und entsprechende Untersuchungen und Sicherheitsmassnahmen, bis hin zu einer Begrenzung des Gefahrenpotenzials, verfügen.

5.2.1.2 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung beinhaltet die Festlegung der massgebenden Beurteilungskriterien (Kriterien zur Beurteilung der Störfallsicherheit), die Identifikation der relevanten Szenarien (was kann passieren), die grobe Abschätzung von Wirkbereichen und Störfallrisiken sowie die Einschätzung der Machbarkeit des CO₂-Hubs am Standort Auhafen in Muttenz. Die Einschätzung der Machbarkeit beinhaltet auch die Festlegung von Randbedingungen und Voraussetzungen, welche die Machbarkeit

des Projektvorhabens am Standort ermöglichen. Die Ergebnisse bilden eine Grundlage für die weitere und detailliertere Projektplanung des CO2-Hubs.

5.2.1.3 Systemabgrenzung

Die Analyse bezieht sich auf den Arealteil des Tanklagers Auhafen Muttenz, der für den CO2-Hub in Frage kommt. Die Machbarkeit des Projektvorhabens ist zusätzlich zum Lagerbereich auch auf den Zu- und Abtransport von CO2 angewiesen. Dazu ist der Transport auf der Bahn, der Strasse, dem Rhein und in Pipelines auf dem Betriebsareal erforderlich. Die Analyse bezieht sich daher neben dem örtlich festgelegten Tanklager auch auf die Betrachtung von Transportwegen. Letztere werden hinsichtlich der groben Machbarkeit eingeschätzt.

Betrachtet werden ausschliesslich Katastrophenereignisse im Sinne der Störfallverordnung (Störfallrisiken). Ereignisse, welche nicht in diese Kategorie fallen, werden nicht betrachtet (z. B. Arbeitssicherheit).

Die Analyse beschränkt sich auf Personenrisiken und somit den Schadenindikator «Todesopfer» resp. den Schutz der Bevölkerung vor einer schweren Schädigung im Sinne der StFV.

Im Fokus der Analyse stehen Szenarien im Zusammenhang mit der Lagerung, der Verarbeitung und dem Transport von CO2. Man geht davon aus, dass das CO2 zumindest teilweise verflüssigt werden muss. Die bisherigen Überlegungen gehen davon aus, dass dies mit einer Ammoniak-Anlage erfolgt. Da die Stoffmengen von Ammoniak deutlich über der Mengenschwelle liegen, werden neben der Untersuchung von CO2 auch Überlegungen zur Störfallsicherheit von Ammoniak mit einbezogen.

5.2.1.4 Szenarien und Wirkungen

Die Identifikation der möglichen Szenarien basiert auf einer Reihe von Diskussionen mit internationalen Fachexperten, die bereits Erfahrung mit Risikoanalysen für CO2-Anlagen haben.

Die Verflüssigung von CO2 bedarf einer weiteren Nebenanlage. Gemäss den derzeitigen Planungen wird hierfür eine Ammoniakanlage installiert. Die gesamte auf dem Betriebsareal gelagerte Stoffmenge von NH3 wird auf 1'000 – 2'000 Tonnen geschätzt. Die Stoffmenge von NH3 liegt in verschiedenen Anlagenkompartimenten vor. Die maximale Freisetzung ist daher auf 250 – 500 t begrenzt.

Die Lagerung erfolgt bei einer Temperatur von -33°C. Freisetzungen von NH3 werden lediglich im Sinne einer ergänzenden Betrachtung untersucht.

Im Hinblick auf die Risikoanalyse werden die einzelnen Wirkungen hinsichtlich der Relevanz beurteilt. Wirkungen mit untergeordneter Relevanz hinsichtlich der Risiken für die Bevölkerung werden nicht weiter berücksichtigt.

Die Freisetzung von sehr grossen Mengen an CO2 mit anschliessender Ausbreitung einer toxischen Gaswolke in der Umgebung wird als massgebende Gefahr eingestuft. Aus den Diskussionen mit Fachexperten, Unfallereignissen und Forschungsergebnissen kann abgeleitet werden, dass bei sehr grossen Mengen an freigesetztem CO2 letale Wirkungen bis in sehr grosse Distanzen (mehrere hundert Meter bis Kilometer) möglich sind. Die Ausbreitung und Wirkung einer toxischen Gaswolke wird als relevant eingestuft und entsprechend berücksichtigt.

Eine Temperaturänderungen von unter Druck stehendem CO2, insbesondere nahe dem kritischen Punkt, kann zu einem Überdruck im Inneren des Tanks führen. Beim Versagen des Tanks unter Druck entsteht eine explosionsartige Freisetzung des Inhalts, die eine Druckwelle und möglicherweise sogar Trümmerwurf zur Folge hat (Fragmente). Da diese katastrophalen Ereignisse sehr selten sind und die geplanten Stehtanks eine Sollbruchstelle besitzen, wird die Wirkung dieser Druckwelle als nicht relevant angesehen und nicht weiter berücksichtigt.

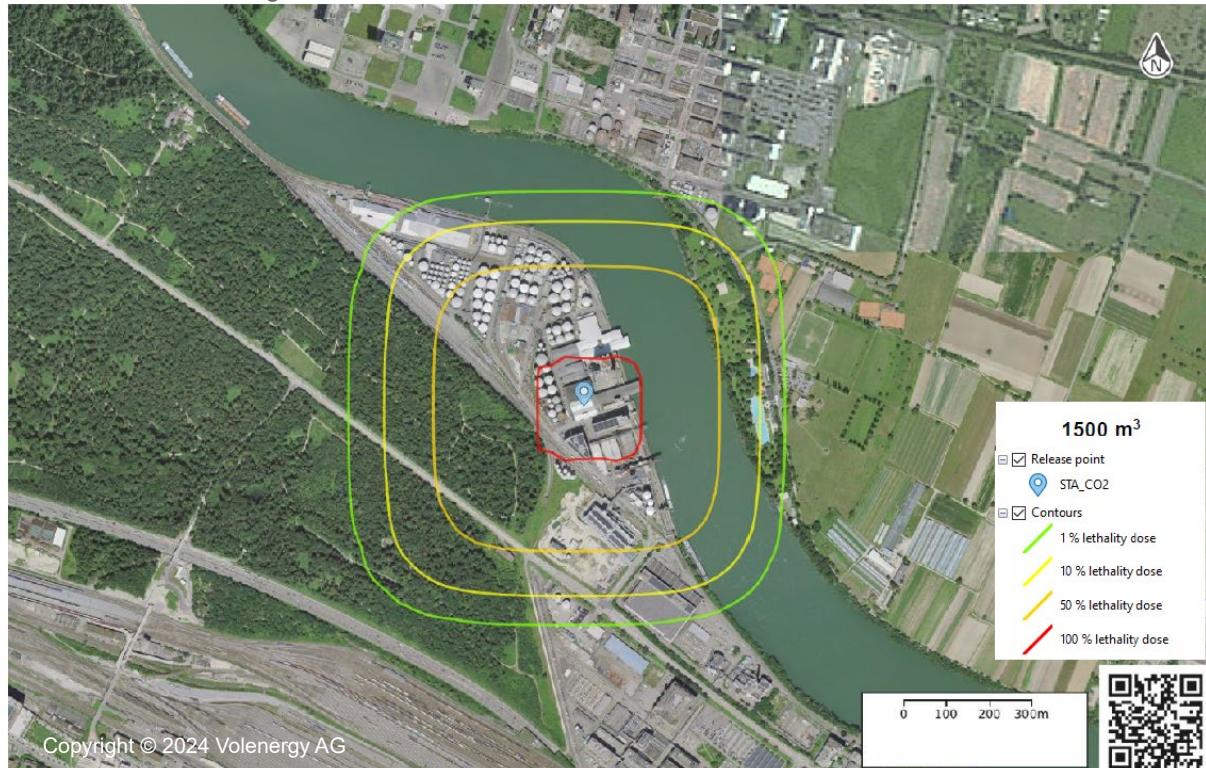
Die Druckentlastung von flüssigem oder überkritischem CO2 kann zu Temperaturen von -78°C oder weniger in der Gaswolke führen. Im Bereich der freigesetzten Gaswolke führt dies zu einem Abfall der Umgebungstemperatur sowie zur Bildung von Feststoffpartikeln (Trockeneis). Bei Haut-, Mund- oder Augenkontakt mit festem CO2 (Trockeneis) kann es zur Verwundung infolge von Hautverletzungen, schweren Erfrierungen oder Einfrieren des Gewebes (bei Einatmen) kommen. Da CO2 ein

Schwergas ist, fällt das Frei-gesetzte CO₂ rasch in Bodennähe ab und erwärmt sich. Die Wirkung eines Temperaturabfalls und die Gefahr von Kälteverbrennungen besteht somit nur anfänglich im unmittelbaren Gebiet der Gaswolke. Daher wird die Wirkung der Kälteverbrennung als nicht relevant angesehen und entsprechend nicht berücksichtigt.

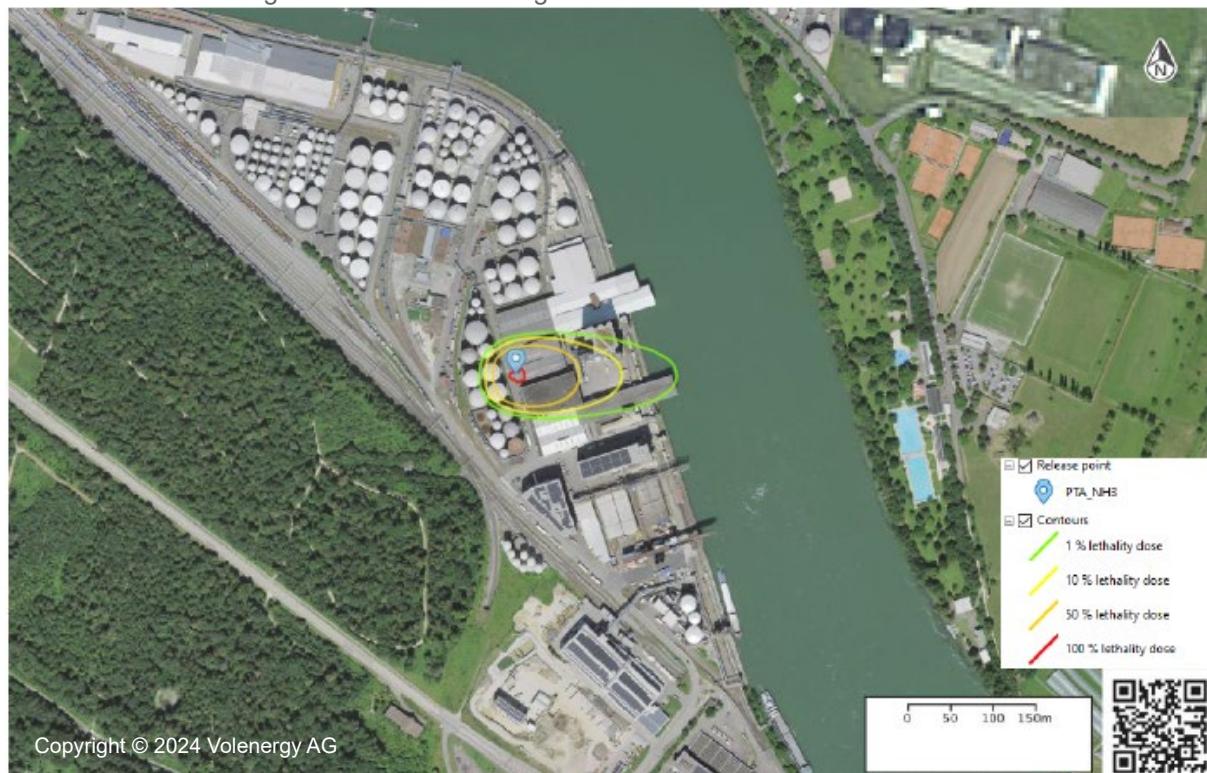
Die Freisetzung von unter Druck stehendem CO₂, z. B. aus einer unterirdischen Pipeline, kann, in Folge von freigesetzter Energie beim Versagen, ein Krater entstehen. Dabei ist die Grösse des Kraters abhängig von der tiefe der Pipeline (Erdüberdeckung) und dem Bodentyp. Kommt es zu einer Kraterbildung wird das CO₂ in Bodennähe und nicht vertikal freigesetzt, was sich auf die Ausbreitung und damit auf die letale Wirkung auswirkt. Da in diesem Fall nur in Bodennähe mit erhöhten Konzentrationen zu rechnen ist, geht verglichen mit einer Gaswolke eine geringere Wirkung aus. Entsprechend wird diese als nicht massgebend angesehen.

5.2.1.5 Wirkbereiche von CO₂ und NH₃

5.2.1.5.1 Freisetzung Stehtank mit 1500m³ Inhalt.



5.2.1.5.2 Freisetzung aus Prozesstankanlage mit Ammoniak



Das Ergebnis basiert auf der Annahme, dass NH₃ bei einer Temperatur von -33°C gelagert wird. Dieser Wert liegt nur geringfügig über dem Siedepunkt von NH₃ (-33.4°C), was zu einer entsprechend geringen Verdampfungsrate führt. Bei höheren Temperaturen resultieren rasch grössere Wirkbereiche. Bei einer Temperatur von beispielsweise -10°C liegt der 1%-Letalitätsbereich bereits bei rund 1'300 m.

5.3 Energieeffizienz und Nachhaltigkeit

Die CO₂-Verflüssigungsanlage erfordert eine hohe Energiezufuhr, insbesondere beim Betrieb von Kompressoren und Kühlsystemen. Um die Umweltbelastung zu minimieren, werden energieeffiziente Technologien eingesetzt. Dazu gehört die Nutzung von Fernwärme zur Unterstützung des Energiebedarfs sowie die Rückgewinnung von Abwärme aus dem Verflüssigungsprozess.

5.4 Anlagen- und Personensicherheit

Die Sicherheit von Anlagen und Personen ist ein zentraler Aspekt beim Betrieb des CO₂-Terminals. Da CO₂ in verflüssigter Form unter hohem Druck gehandhabt wird, sind besondere Schutzmassnahmen erforderlich.

Als Eigentümer und Betreiber eines Störfallbetriebs ist volenergy mit der damit verbundenen Pflichten und Risiken bewusst. Entsprechend legen wir höchsten Wert auf die Einhaltung der relevanten Sicherheitsvorgaben, die Umsetzung technischer Schutzmassnahmen sowie auf betriebliche Abläufe, die dem Stand der Technik und den Anforderungen gemäss Störfallverordnung (StFV) entsprechen.

5.4.1.1 Anlagensicherheit

Die Verflüssigungs- und Lageranlagen werden nach modernen Standards errichtet, um Leckagen und Druckabfälle zu vermeiden. Regelmässige Wartungen und Inspektionen gewährleisten die Betriebssicherheit.

5.4.1.2 Explosions- und Druckschutz

Obwohl CO₂ nicht brennbar ist, kann es bei Leckagen zur Erstickungsgefahr kommen. Daher sind Explosionsschutzkonzepte erforderlich, die den Druckaufbau durch Temperaturanstieg verhindern.

5.4.1.3 Personensicherheit

Sicherheitsunterweisungen und Schutzmassnahmen sind für alle Mitarbeitenden verpflichtend. In Risikobereichen ist das Tragen persönlicher Schutzausrüstung (PSA) vorgeschrieben.

5.4.1.4 Notfallmanagement

Ein umfassendes Notfallkonzept stellt sicher, dass bei Störungen, Leckagen oder Unfällen schnell und koordiniert gehandelt wird. Die Zusammenarbeit mit Feuerwehr und Behörden ist geregelt.

5.4.1.5 Soziale Aspekte

Der Bau und Betrieb des CO₂-Terminals erfordert eine transparente Kommunikation mit der Bevölkerung. Informationsveranstaltungen und ein kontinuierlicher Dialog schaffen Vertrauen und fördern die Akzeptanz.

5.4.1.6 Anwohnerinformation

Regelmässige Mitteilungen über den Betriebsstatus und Sicherheitsmassnahmen gewährleisten eine offene Kommunikation.

5.4.1.7 Arbeitsplatzsicherheit

Sicherheitsstandards am Arbeitsplatz werden durch Schulungen und Unterweisungen konsequent umgesetzt, um Unfälle zu vermeiden.

5.4.1.8 Brandschutz

Da CO₂ selbst nicht brennbar ist, jedoch in geschlossenen Räumen bei hohen Konzentrationen eine Erstickungsgefahr darstellen kann, sind spezielle Brandschutzmassnahmen erforderlich.

5.4.1.9 Akzeptanz in der Bevölkerung

Die Einbindung der lokalen Gemeinschaft sowie die Berücksichtigung sozialer Anliegen fördern die Unterstützung des Projekts.

5.5 G.S.U Fazit

Die Berücksichtigung von Umwelt-, Energie- und Sicherheitsaspekten ist entscheidend für die erfolgreiche Umsetzung des CO₂-Terminals im Auhafen-Muttenz. Durch die strikte Einhaltung gesetzlicher Vorgaben und den Einsatz energieeffizienter Technologien wird ein sicherer, umweltgerechter und nachhaltiger Betrieb gewährleistet. Gleichzeitig fördert der offene Dialog mit der Bevölkerung und den Entscheidungsträgern die gesellschaftliche Akzeptanz und Integration des Projekts.

Diese Studie dient als Referenzprojekt für die Weiterentwicklung zukünftiger Studien und CO₂-Terminal-Lösungen. Das Zonenreglement erlaubt den Bau einer solchen Infrastruktur und unterstützt damit die Realisierbarkeit am Standort.

Die Untersuchungen zu den Störfallrisiken des CO₂-Hubs haben ergeben, dass von Tanklastwagen und Bahnkesselwagen aufgrund der begrenzten Mengen an CO₂ je Transporteinheit keine Gefahr für die Bevölkerung ausgeht. Gleiches gilt auch für den Transport von CO₂ auf dem Betriebsareal in Pipelines.

Bei Tankanlagen ist das Volumen (Fassungsvermögen) je Lagertank auf wenige 1'000 Kubikmeter zu begrenzen. Damit kann sichergestellt werden, dass die Bevölkerung vor Störfallereignissen im Sinne der Störfallvorsorge geschützt ist.

Nach aktuellem Wissensstand gibt es keine gesetzlichen Bestimmungen, die der Umsetzung des Projekts im Auhafen-Muttenz entgegenstehen würden. Die bisherigen Prüfungen und Abklärungen bestätigen die rechtliche Machbarkeit unter Berücksichtigung aller geltenden Vorschriften.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

6.1 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse

Der Bau des CO₂-Terminals am Standort Auhafen ist grundsätzlich realisierbar, erfordert jedoch eine hohe Fachkompetenz, um die Arbeiten auf dem stark genutzten Gelände effizient zu koordinieren. Da der Standort bereits durch zahlreiche Infrastrukturen belegt ist, sind eine präzise Planung und eine strukturierte Organisation unerlässlich, um einen reibungslosen Bauablauf zu gewährleisten.

Wird ausreichend Zeit für die Bauausführung eingeplant, sind im vorgesehenen Zeitraum keine wesentlichen Hindernisse zu erwarten, die eine Änderung der Baustrategie erforderlich machen würden. Eine besondere Herausforderung stellt jedoch die potenzielle Bodenbelastung dar. Mögliche Kontaminationen könnten die Baukosten erheblich erhöhen, weshalb eine gründliche Voruntersuchung und eine sorgfältige Risikoabschätzung notwendig sind.

6.2 Machbarkeitsentscheidung

Aufgrund der vorliegenden Daten und Informationen können wir bestätigen, dass der Bau der geplanten CO₂-Anlage technisch machbar ist. Die bisherigen Analysen und Planungen zeigen, dass die infrastrukturellen und technischen Voraussetzungen am Standort erfüllt werden können. Darüber hinaus ist der Standort Auhafen zonenkonform für die Errichtung eines CO₂-Hubs. Unter der Hoheit des Kantons Basel-Landschaft und der Schweizerischen Rheinhäfen ist die Umsetzung eines solchen Projekts mit Unterstützung von Regierung und Politik sehr wahrscheinlich.

6.3 Nächste Schritte und erforderliche weitere Studien

Der nächste Schritt ist die Durchführung eines FEED (Front-End Engineering Design). Diese Planungsphase im Projektmanagement legt die technischen und wirtschaftlichen Grundlagen fest und dient dazu, die Machbarkeit präzise zu definieren, bevor die Detailplanung und der Bau starten. Durch die umfassende Planung werden Risiken minimiert und die Projektsicherheit erhöht.

Im Rahmen des FEED werden die technischen Anforderungen wie Prozessdiagramme, Layoutpläne und Prozessparameter detailliert erarbeitet. Das gewährleistet eine effiziente Umsetzung des Projekts und ermöglicht eine fundierte Budgetplanung durch genaue Kostenschätzungen.

Ein zentraler Bestandteil des FEED ist auch die Risikoanalyse. Dabei werden potenzielle Gefahren bewertet und die erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen festgelegt. Zudem verbessert der FEED die Kommunikation mit Stakeholdern und Behörden, da Berichte und Dokumentationen frühzeitig erstellt und abgestimmt werden.

Für das CO₂-Terminal umfasst der FEED die detaillierte Planung der Verflüssigungsanlagen sowie der Umschlaginfrastruktur. Ein erfolgreich abgeschlossener FEED reduziert das Risiko von Projektverzögerungen und schafft eine verlässliche Basis für die reibungslose Umsetzung.

6.4 Lessons Learned

Die Erfahrungen aus dieser Projektphase zeigen deutlich, dass die Ressourcen im Bereich CO₂-Verflüssigung und Apparatebau zunehmend knapp werden. Aufgrund des aktuellen Aufschwungs von CCU/S-Projekten gestaltet es sich sowohl bei Lieferanten als auch bei Planungsbüros äusserst schwierig, kurzfristig ein Projekt oder eine Studie zu starten.

Um Verzögerungen zu vermeiden und die Projektumsetzung zügig voranzutreiben, empfehlen wir daher, frühzeitig die benötigten Ressourcen zu reservieren. Dies gewährleistet eine planmässige Durchführung und reduziert das Risiko von Engpässen während der Realisierung.

7 Verlässlichkeit der Informationen

Dieser Bericht wurde mit höchster fachlicher Sorgfalt und unter Anwendung anerkannter wissenschaftlicher und technischer Methoden erstellt. Die enthaltenen Informationen und Aussagen basieren auf fundierten Daten und dem aktuellen Stand der Technik. Trotz sorgfältiger Prüfung können Abweichungen oder Unvollständigkeiten nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Die in diesem Bericht präsentierten Daten und Analysen dienen zu Informationszwecken und erfolgen ohne Gewähr. Wir übernehmen keine Haftung für direkte oder indirekte Schäden, die aus der Nutzung der bereitgestellten Informationen resultieren.

Die Inhalte beruhen auf den zum Zeitpunkt der Erstellung verfügbaren Erkenntnissen und Informationen. Sollten neue Daten oder Entwicklungen vorliegen, behalten wir uns das Recht vor, den Bericht entsprechend zu aktualisieren.

Die Anwendung und Interpretation der dargestellten Informationen erfolgen auf eigene Verantwortung des Nutzers

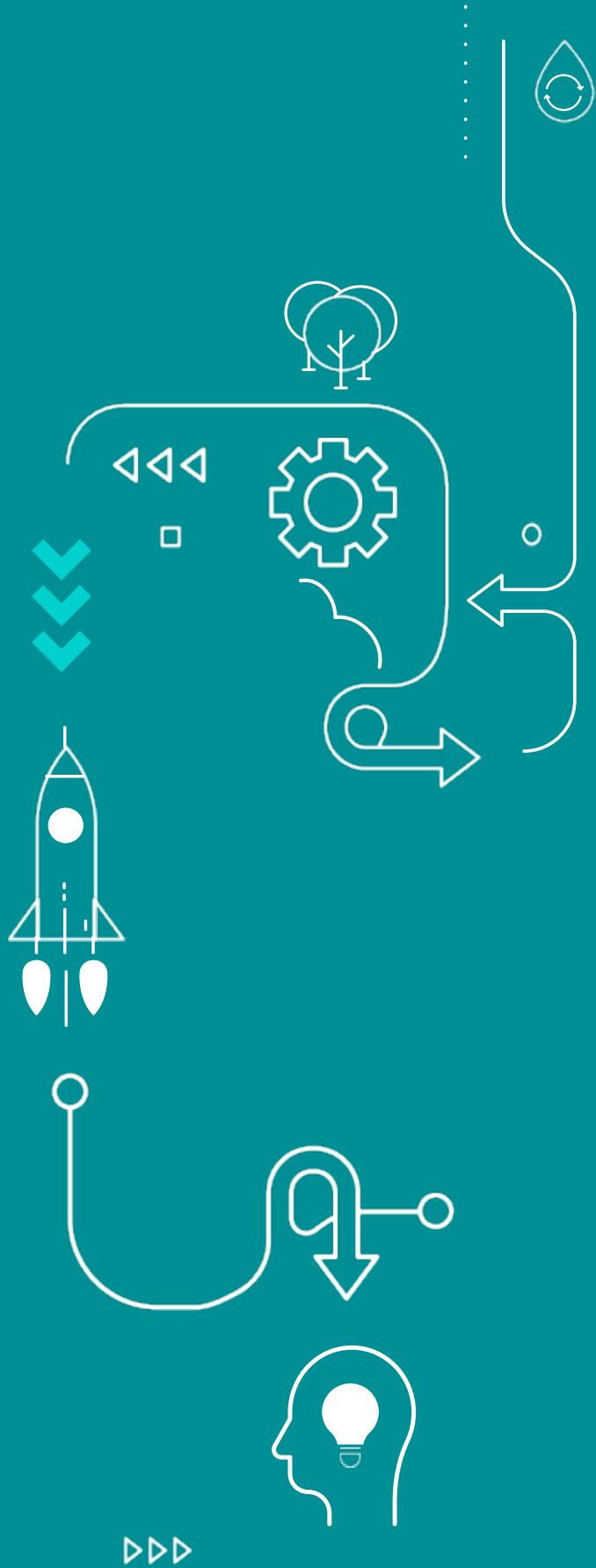
Ort und Datum: Suhr, 12.12.2025



Volenergy AG, Mauro Forni

Chief Engineer & PL Business Development

Supply, Wholesale and New Energies



volenergy AG | Spittelweg 1 | CH-5034 Suhr | +41 62 836 85 25 | info@volenergy.com | volenergy.com