

ZAR CO₂ Kompetenzzentrum

Tätigkeitsbericht 2024

Erarbeitung

D. Marxer, S. Ringmann, C. Schriber, W. Furgler

Erstellungsdatum

18.02.2025

Änderungsnachweis

Version	Datum	Bezeichnung der Änderung	Verteiler
01	29.11.2024	Erstellung 1. Entwurf	BAFU
02	18.02.2025	Angepasste Version zur Veröffentlichung	Homepage

Abkürzungen

AMP	2-Amino-2-methylpropanol
AWP	Absorptionswärmepumpe
ARC	Kehrichtverwertungsanlage in Kopenhagen, Dänemark
AVR	Kehrichtverwertungsanlage in Duiven, Niederlande
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BDU	Brownian Demister Unit (auch Brownian Diffusion Filter) – Filter zur Abscheidung von kleinen Aerosolen/Partikeln aus dem Abgas.
CCS	Carbon Capture and Storage – CO ₂ Abscheidung und Speicherung
CCU	Carbon Capture and Use – CO ₂ Abscheidung und Nutzung. Falls Nutzung für ein Produkt / Material, wo es für einen klimarelevanten Zeitraum gebunden bleibt, dann auch CCUS genannt.
COP	Coefficient of Performance / Leistungszahl einer Wärmepumpe
ELPI	electrical low-pressure impactor – elektrostatischer Niederdruck-Impaktor
FEED	Front-End Engineering Design
FTIR	Fourier-Transform-Infrarotspektrometer
HPC	Hot Potassium Carbonate
KVA	Kehrichtverwertungsanlage
KWP	Kompressionswärmepumpe
LRV	Luftreinhalte-Verordnung
MEA	Monoethanolamin
NET	Negativemissionstechnologien
PCC	Post-Combustion Carbon Dioxide Capture - CO ₂ -Abscheidung nach dem Verbrennungsprozess
TCM	Technology Centre Mongstad
TRL	Technology Readiness Level / Technologie-Reifegrad
USG	Umweltschutzgesetz
ZAR	Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Zusammenfassung Aktivitäten 2024, Erkenntnisse, Ausblick	2
3. AP 2.3 – Verfahrensmonitoring	6
4. AP 2.2 – Umweltmonitoring	9
4.1. Emissionen	9
4.2. Dispersionsmodellierung	11
4.3. Immissionen	12
5. AP3 – Optimierung Abgasreinigung	18
5.1. Vor der Abscheidung	18
5.2. Nach der Abscheidung	20
6. AP 4.1 – Wärmeintegration	21
7. AP 4.3 und AP 6 – internationale Logistik und Lagerung	25
7.1. Aktivitäten im Jahr 2024	25
7.2. Erkenntnisse aus dem Jahr 2024	25
7.3. Ausblick auf das Jahr 2025	28
8. AP 5 – Vorprojekt	30
9. AP 2.1 Risikoanalyse	33
10. AP 7 – Rechtliches und Bewilligungen	35
11. AP 8 – Finanzierung	36
12. Literaturverzeichnis	37

1. Einleitung

Das CO₂-Kompetenzzentrum der Stiftung ZAR am Standort der KVA Linth ist seit ca. 2.5 Jahren operativ in Betrieb und die Bearbeitung der Arbeitspakete, welche im März 2022 zwischen BAFU und ZAR vertraglich vereinbart wurden, schreitet planungsgemäss voran. Die Pakete werden parallel bearbeitet und das Vorgehen wird in regelmässigen Sitzungen mit der Begleitgruppe des Kompetenzzentrums abgestimmt. Der Fortschritt in den Arbeitspaketen Stand November 2024 ist in Abbildung 1 dargestellt. Im vorliegenden Statusbericht wird eine Zusammenfassung der diesjährigen Tätigkeiten, der wichtigsten Erkenntnisse sowie der geplanten weiteren Aktivitäten gegeben. Als Basis dient der letzjährige Statusbericht aus dem Jahr 2023. Ein Schlussbericht, der alle Erkenntnisse zusammenfasst, wird im Jahr 2025 erstellt. Zum heutigen Zeitpunkt scheint es realistisch, dass alle Arbeitspakete wie geplant Ende 2025 abgeschlossen werden können.

Arbeitspaket	Fortschritt	Tätigkeiten 2024
1 Aufbau Kompetenzzentrum	100%	
2.1 Risikoanalysen	80%	High-Level Risikoanalyse mit der Firma Neosys AG
2.2 Umweltmonitoring	60%	Emissionsmessungen Pilot Kopenhagen, Immissionsmessungen CH, Ausbreitungsmodellierung, Austausch Behörden
2.3 Verfahrensmonitoring	80%	HPC/Amin vertieft (Lieferantenstudien Vorprojekt), Planung Pilotierung, Literatur, GHGT-Konferenz
3 Optimierung AGR	80%	Literatur, GHGT-Konferenz, Pilotprojekt Kopenhagen
4.1 Wärmeintegration	90%	Detaillierte Wärmeintegration inkl. Wärme pumpen für 2 Abscheideverfahren (Vorprojekt)
4.2 Verwendung	100%	Einsitz ReFuel.ch; keine weitere Aktivität CO2 Kompetenzzentrum geplant (abgestimmt mit Begleitgruppe)
4.3 Lagerung	50%	Vertiefte Gespräche mit zahlreichen Speicheranbietern
5 Vorprojekt	90%	Vorprojekt mit Planerfirmen tbf und Ramboll sowie zahlreichen Technologiefirmen durchgeführt
6 int. Logistik	60%	diverse Gespräche CO ₂ -Hubs, Richtpreisangebote Transport in Arbeit; Gespräche 'Shipper'
7 Rechtliches / Bewilligungen	60%	Austausch Behörden (insb. Umweltthemen), Teilnahme nat. AG CCS/NET. Begleitung Bewilligungsprozess KVA Horgen.
8 Finanzierung	50%	Einsitz TaskForce VBSA zur Erarbeitung einer Finanzierungslösung. Design Sprints im Rahmen der nat. AG CCS/NET
9 Kommunikation	60%	div. Präsentationen, Tätigkeitsbericht (in Arbeit)

Abbildung 1: Fortschritt in den Arbeitspaketen Stand November 2024

2. Zusammenfassung Aktivitäten 2024, Erkenntnisse, Ausblick

Die folgende Tabelle fasst die Tätigkeiten in den einzelnen Arbeitspaketen im Jahr 2024, die wichtigsten Erkenntnisse daraus und die noch ausstehenden Schritte im Jahr 2025 zusammen.

	Aktivitäten 2024	Erkenntnisse 2024	Nächste Schritte - 2025
2.3 Verfahrensmonitoring	<ul style="list-style-type: none">• Fokus: vertiefte Analyse Aminwäsche und HPC im Rahmen des Vorprojekts KVA Linth. Zusammenarbeit mit mehreren Lieferanten je Verfahren.• Literaturrecherche, Besuch GHGT-17 Konferenz Calgary.• Gespräche mit Technologielieferanten und Betreibern verschiedener Verfahren.• Planung Pilotanlage HPC KEZO.	<ul style="list-style-type: none">• Aminwäsche und HPC nach wie vor beides interessante Verfahrenskandidaten.• HPC hat höhere Investitionskosten und einen höheren Platzbedarf. Dafür sind keine krebszerregenden/giftigen Substanzen in der Waschlösung (ohne Additive). Pilotbetrieb vor Inbetriebnahme einer Grossanlage ist sinnvoll aufgrund limitierter Erfahrung an Abgasen. HPC ist aufgrund des Abgasverdichters weniger flexibel bezüglich Teillastverhalten.• Aminwäsche ist anlagentechnisch einfacher als HPC, jedoch chemisch komplexer. Aufwändiger ist das Verfahren auch in den Bereichen Nachreinigung, Handling und Management der Waschlösung, Monitoring, Bewilligung. Vorhersagen der Emissionen und des Lösungsmittelverbrauchs ohne Langzeit-Pilotversuche inkl. Reclaiming sind schwierig und die Lieferanten sind diesbezüglich mit Angaben sehr zurückhaltend.• Grosse Unterschiede bei den eingesetzten Aminen. Einsatz von sekundären Aminen kann zu hohen Nitrosamin-Konzentrationen in der Waschlösung führen. Dies erschwert das Handling und die Emissionen müssen noch besser unter Kontrolle sein, als wenn nur primäre Amine eingesetzt werden.• Membranverfahren werden rasch weiterentwickelt und können interessant werden. Grosse Testanlage an Kohlekraftwerk in den USA soll Ende 2024 in Betrieb gehen.	<ul style="list-style-type: none">• Verfahrensentscheid für das CCS Projekt bei der KVA Linth (2025).• Bau einer Pilotanlage für das HPC-Verfahren bei der KEZO in Hinwil (Inbetriebnahme 2026) (optional – nicht in den Arbeitspaketen des Kompetenzzentrums enthalten).• Weiterbeobachten anderer vielversprechender Abscheideverfahren (Membranen, Feststoff-Adsorption, Oxyfuel, ...).• Besuch neuer Anlagen (z.B. KVA Twence – Aminwäsche SLB Capturi).

	Aktivitäten 2024	Erkenntnisse 2024	Nächste Schritte - 2025
2.2 Umweltmonitoring	<p>Emissionen</p> <ul style="list-style-type: none"> Teilnahme Projekt ACCEPT – Pilotanlage an KVA in Kopenhagen (ARC). Emissionsmessungen während des Betriebs mit verschiedenen Aminen und mit verschiedenen Messverfahren. Versuche zur Einbindung eines Massenspektrometers in die Abgasanalytik (Tofwerk). <p>Immissionen</p> <ul style="list-style-type: none"> Immissions-Testmessungen in Wasserfassungen / Gewässer bei KVA Linth und KVA Horgen mit EPFL. Immissions-Testmessungen Luft in Raum- und Aussenluft bei KVA Linth mit Airmes AG. <p>Ausbreitungsmodellierung</p> <ul style="list-style-type: none"> Entwicklung Ausbreitungsmodell, das für CH-Topografie geeignet ist, mit TU-Graz. Durchführung der Modellierung für KVA Horgen. <p>Bewilligung</p> <ul style="list-style-type: none"> Begleitung des Bewilligungsprozesses der KVA Horgen. Austausch Kantone GL und ZH sowie BAFU-Luftreinhaltung. Literaturrecherche, Gespräche mit diversen Stakeholdern. 	<p>Emissionen</p> <ul style="list-style-type: none"> Pilotversuche in Kopenhagen zeigten durchwegs zu hohe Emissionen (Amine und Reaktionsprodukte) Grosser Unterschied zwischen Aminen: Piperazin verursachte höhere Nitrosamin-Emissionen als MEA. Aerosolbasierte Emissionen konnten mit Waschstufen (neutral + sauer) sowie eingesetztem Tropfenabscheider nicht vermieden werden. Bildung von Aerosolen muss vermieden werden und ist schwer vorherzusagen. <p>Immissionen</p> <ul style="list-style-type: none"> Wasser: keine Nitrosamine nachgewiesen. Detektionsgrenze für Einzelverbindungen ca. 1 ng/L. Luft: bislang erreichte Detektionsgrenze 0.24 ng/m³ für Einzelverbindungen. Nitrosamine bei bestehenden Prozessen innerhalb der KVA bereits vorhanden und messbar. <p>Ausbreitungsmodellierung / Bewilligung</p> <ul style="list-style-type: none"> Risikowert BAFU Immissionen Summe Nitramine und Nitrosamine: 0.03 ng/m³ (Jahresmittel). Fraglich, ob dieser Risikowert einhaltbar ist → Bewilligungsfähigkeit mit aktuellen Vorgaben unsicher. 	<p>Emissionen</p> <ul style="list-style-type: none"> Versuche mit Massenspektrometer (Tofwerk) an Abgas und (belasteter) Prozessluft (2024/2025). <p>Immissionen</p> <ul style="list-style-type: none"> Evtl. weitere Immissions-Testmessungen in Luft zur Optimierung der Nachweisgrenzen (2024/2025). Evtl. Tests zu online-Messungen im Innenbereich der KVA mit Massenspektrometer. <p>Ausbreitungsmodellierung / Bewilligung</p> <ul style="list-style-type: none"> Fortsetzung Begleitung Bewilligungsverfahren KVA Horgen. Durchführung Ausbreitungsberechnungen KVA Linth (2024/2025). Fortsetzung Austausch Kantone + BAFU. Eventuell Workshop mit Experten aus Norwegen in der Schweiz.

	Aktivitäten 2024	Erkenntnisse 2024	Nächste Schritte - 2025
3 Optimierung AGR	<ul style="list-style-type: none"> Literaturrecherche, Gespräche mit Experten, Besuch GHGT-17 Konferenz Calgary. 	<ul style="list-style-type: none"> Feine Partikel / Aerosole im Abgas werden mit standardmässigen Messungen nicht erfasst. Falls sie vorhanden sind, können sie zu sehr hohen aerosolbasierten Emissionen nach der Abscheidung führen. Nass-Elektrofilter in der Abgasreinigung haben einen ähnlichen Effekt (Bildung von feinen Aerosolen) und sollten vermieden werden. Neuanlagen sollten auf möglichst hohe CO₂-Konzentration im Abgasstrom ausgelegt werden, um die Abscheidung effizienter zu machen. 	<ul style="list-style-type: none"> Vertiefung des Verständnisses durch Begleiten der Pilotierung Aminwäsche an KVA in Kopenhagen (ARC). Weitergehende Messungen an mehreren Schweizer KVA (z.B. Partikelanzahl / Partikelgrössenverteilung).
4.1 Wärmeintegration	<ul style="list-style-type: none"> Teilnahme am Projekt 'Process Integrated Carbon Capture – PICC' der Hochschule Luzern. Vorprojekt KVA Linth: Fallstudie mit konkreter Integration der zwei Verfahren Aminwäsche und HPC und unterschiedlichen Konfigurationen. 	<ul style="list-style-type: none"> Einbindung der beiden Verfahren unterschiedlich (Fall KVA Linth): Aminwäsche benötigt Kompressionswärmepumpen wegen limitierter Dampfverfügbarkeit; HPC benötigt Absorptionswärmepumpen wegen limitierter Stromverfügbarkeit. Aminwäsche und HPC-Verfahren schneiden im Fall der KVA Linth bzgl. Gesamtenergiebilanz ähnlich ab. Die Abscheidung kann ganzjährig auf Volllast betrieben werden, während gleichzeitig die geplante Fernwärmemenge eingespeist werden kann. Der Stromverkauf wird um 60-80% sinken. 	<ul style="list-style-type: none"> Auswertung der Resultate und Berichtstellung. Evtl. Prüfung weiterer Verfahren (Membran, Feststoff-Adsorption) hinsichtlich der energetischen Einbindung.
4.2 Verwendung	<ul style="list-style-type: none"> LOI Projekt ReFuel.ch 	<ul style="list-style-type: none"> Noch keine Erkenntnisse aus dem Projekt ReFuel.ch. 	<ul style="list-style-type: none"> Teilnahme round-table Sitzungen ReFuel.ch keine weiteren Aktivitäten (abgestimmt mit Begleitgruppe).
4.3 Lagerung, 6. Logistik	<p>Fortführung Gespräche / Einholen von Richtpreisangeboten bei:</p> <ul style="list-style-type: none"> Logistikunternehmen (Transportstudie) CO₂-Hubs CO₂-Speicherstätten Anbietern der gesamten Prozesskette als Dienstleistung 	<ul style="list-style-type: none"> Der Markt ist schwer vorherzusagen. Der Transport, Umschlag (CO₂-Hub) und die langfristige Speicherung von Mengen im Bereich 100'000 tCO₂/a scheint bis 2030 realistisch. Konkrete Festlegung auf ein Projekt noch nicht erfolgt. Zieldestination hat einen signifikanten Einfluss auf die Kosten und die Lebenszyklusbetrachtung. Die für den Transport benötigte Energie verursacht relevante CO₂-Emissionen, die von der gespeicherten CO₂-Menge abgezogen werden müssen. Lange Transportstrecken und Transitländer mit CO₂-intensivem Strom (z.B. DE) erhöhen die Emissionen signifikant. 	<ul style="list-style-type: none"> Evtl. Festlegung auf Partner im Sinne einer Exklusivitätsvereinbarung mit Reservation der Kapazität in 2025/2026 denkbar (noch ohne Strafzahlungen bei Nichtlieferung, daher noch keine Finanzierung/Absicherung nötig).

	Aktivitäten 2024	Erkenntnisse 2024	Nächste Schritte - 2025
5 Vorprojekt	<ul style="list-style-type: none"> Durchführung Vorprojekt Abscheidung bis Bahnverlad. Zwei Abscheideverfahren untersucht (Aminwäsche und HPC), pro Verfahren jeweils mit mehreren Technologielieferanten und Betreibern. 	<ul style="list-style-type: none"> Beide Abscheideverfahren lassen sich in die KVA Linth integrieren bzgl. Technik, Platz/Layout, Energieverfügbarkeit. Investitionskosten Abscheidung bis Bahnverlad (noch in Ausarbeitung) ca. 160-175 Mio. CHF. 	<ul style="list-style-type: none"> Abschluss Vorprojekt (finaler Bericht und öffentlicher Bericht).
2.1 Risikoanalyse	<ul style="list-style-type: none"> Durchführung Risikoanalyse gemeinsam mit der Firma Neosys. Fokus auf übergeordneten Risiken, welche das Gesamtprojekt gefährden oder signifikant verzögern können. 	Die grössten Risiken wurden im Bereich der Projektfinanzierung (rechtzeitige Implementierung eines breit abgestützten Finanzierungsmechanismus und finanzielle Durchhaltefähigkeit bei Problemen) sowie im Bereich der Bewilligung für eine Aminwäsche (Emissionen) identifiziert.	<ul style="list-style-type: none"> Abschluss Risikoanalyse (Kurzbericht).
7 Rechtliches und Bewilligungen	<ul style="list-style-type: none"> Austausch Behörden (Kantonal / BAFU). Begeitung des CCU-Projekts der EZI in Horgen (insb. Bewilligungsaspekte Luftreinhaltung). Teilnahme nationale Arbeitsgruppe CCS/NET und daraus resultierende Sprint-Veranstaltungen. Bildung einer 'Pionierkoalition' für einen regelmässigen Austausch. 	<ul style="list-style-type: none"> Übergeordnete rechtliche Themen siehe nationale Arbeitsgruppe CCS/NET. Bewilligungsauflagen bzgl. Aminwäsche sind noch nicht ausreichend definiert. Aktueller immissionsseitiger Risikowert vorraussichtlich nicht einzuhalten. 	<ul style="list-style-type: none"> Regelmässiger Austausch mit nationaler Arbeitsgruppe CCS/NET. Begleitung CCU-Projekt der EZI in Horgen (insb. Bewilligungsaspekte Luftreinhaltung).
8 Finanzierung	<ul style="list-style-type: none"> Diskussionen, Teilnahme an der nationalen Arbeitsgruppe zu CCS/NET und dem Design Sprint zur Finanzierung. Einsitz in neuer Taskforce des VBSA zur Finanzierung innerhalb der Branche. 	<ul style="list-style-type: none"> Für Inbetriebnahme 2030: ca. 5-10 Mio. CHF im 2025-2026 für Planung und Zusicherung Restbetrag 2027 benötigt. 	<ul style="list-style-type: none"> Betriebskosten ganze Kette präzisieren. Finanzierung Pilotanlage(n). Unterstützung bei der Erarbeitung von Finanzierungsmöglichkeiten für Grossanlagen.

3. AP 2.3 – Verfahrensmonitoring

Im Jahr 2023 wurde ein Screening zu den verschiedenen Verfahrenstypen durchgeführt. Aufbauend auf dieser Untersuchung wurden die zwei Absorptionsverfahren Aminwäsche und Hot Potassium Carbonate ausgewählt, welche nun im Jahr 2024 vertieft betrachtet wurden. Für grundätzliche Erläuterungen zu diesen Verfahren verweisen wir auf den letztjährigen Statusbericht.

Zu den in Entwicklung befindlichen Verfahren mit niedrigem technologischem Reifegrad (TRL) haben sich in diesem Jahr keine grundlegend neuen Erkenntnisse oder eine andere Einschätzung als im Vorjahr ergeben. Die Entwicklung der Prozesse wird jedoch stark vorangetrieben und es gibt einige spannende Pilotprojekte.

Eine Auswahl an aktuellen, interessanten Projekten zu Gross- und Testanlagen mit unterschiedlichen Technologien wird im Folgenden aufgeführt:

- **Aminwäsche – Grossanlage – KVA:** Bei der KVA Twence in Hengelo (NL) wurde im Jahr 2023 eine Amin-Abscheideanlage der Firma SLB Capturi (ehem. Aker) gebaut. Sie hat eine Abscheideleistung von 100'000 t/a und das CO₂ soll für umliegende Gewächshäuser eingesetzt werden (CCU). Die Anlage hätte im Herbst 2023 in Betrieb gehen sollen, die Inbetriebnahme konnte aber bis heute (Nov 2024) noch nicht erfolgreich abgeschlossen werden. Was die Verzögerung verursacht, ist nicht öffentlich bekannt (gemäß Website befindet sich die Anlage in der Warm-Inbetriebnahme). Es war ein Besuch des Kompetenzzentrums im Frühjahr 2024 angedacht, welcher bis auf weiteres aufgeschoben ist.
- **HPC – Grossanlage – Stockholm:** an einem Holzheizkraftwerk in Stockholm plant die Firma Stockholm Exergi eine Full-Scale CO₂-Abscheidung mit dem HPC-Verfahren mit einer Kapazität von ca. 800'000 t_{CO₂}/a. Es konnten bereits in großem Umfang Negativ-emissionszertifikate an internationale Firmen verkauft werden. Der finale Bauentscheid ist für Ende 2024 geplant. Falls die Anlage zu Stande kommt, wäre es die erste Grossanlage für das HPC-Verfahren mit Rauchgasen als CO₂-Quelle.
- **Membran – Pilotanlage – Kohlekraftwerk¹:** Die Firma Membrane Technology Research (MTR) baut eine grosse Pilotanlage mit einer Kapazität von ca. 50'000 t/a am Dry Fork Kohlekraftwerk in Wyoming (USA) beim dortigen Wyoming Integrated Test Center. Sie soll noch dieses Jahr in Betrieb gehen und wird dann weltweit die grösste Membran-anlage für diese Anwendung sein.
- **Membran – Pilotanlage – KVA²:** Die Firma Andritz hat eine containerbasierte Membran-Testanlage mit einer Kapazität von 0.8 t_{CO₂} pro Tag gebaut und testet diese an der KVA in Wuppertal. Die Anlage ist installiert, aber noch nicht in Betrieb.
- **Adsorption – Pilotanlage – Fluid Catalytic Cracker³:** die Firma Svante testet ihre Feststoffadsorber-Technologie (MOF) ab Oktober 2024 am Technology Center in Mongstad. Diese Technologie könnte für KVA in Zukunft interessant werden, ist jedoch vom technologischen Reifegrad noch nicht einsatzbereit. An Kehrichtverwertungsanlagen wurde sie noch nicht getestet.
- **Enzyme+Kaliumcarbonat – Pilotanlage – Kalkofen:** die Firma Saipem betreibt eine Pilotanlage mit einer Kapazität von 30 tpd an einem Kalkofen in Quebec (CA). Das Verfahren basiert wie das HPC-Verfahren auf Kaliumcarbonat, jedoch wird ein Enzym von Novonesis zugegeben, welches die Reaktion mit CO₂ stark beschleunigt. Dazu muss der

Prozess bei tiefen Temperaturen betrieben werden, um die Zerstörung der Enzyme zu verhindern.

- **Aminwäsche – Pilotanlagen – Diverse:** Bei der Aminwäsche werden zahlreiche Pilotierungen durchgeführt. Da das Verhalten der Amine im Kontakt mit einem konkreten Abgasstrom schwer vorherzusagen ist, führen viele CO₂-Emittenten bzw. Technologie-lieferanten vorab Pilotkampagnen mit mobilen Testanlagen durch. Aktuelle Beispiele sind:
 - **Hitachi Zosen Inova – KVA Ferrybridge (UK)⁴**
 - **Andritz – KVA – Wuppertal (DE)²**
 - **Shell und Mitsubishi Heavy Industries – Zement – Edmonton (CA)⁵:** Shell und Mitsubishi Heavy Industries testen beide gleichzeitig ihre Amine am Zementwerk von Heidelberg Materials in Edmonton. Die beiden Lieferanten führen FEED-Studien im Wettbewerb durch und verwenden dazu die Daten aus den Pilotanlagen.
 - **Pentair – KVA – Kopenhagen (DK):** ARC betreibt eine 1000 t p.a. Pilotanlage an der KVA in Kopenhagen. Das CO₂-Kompetenzzentrum ist bei den Untersuchungen zu den Emissionen involviert (siehe Kapitel 4.1 Emissionen)
- **HPC – Pilotanlagen – Diverse:** auch beim HPC-Prozess gibt mehrere Pilotierungen:
 - **Stockholm Exergi – Holzheizkraftwerk:** die Pilotanlage ist seit mehreren Jahren in Betrieb und soll auch noch weiter betrieben werden. Aktuell werden unterschiedliche Additive getestet.
 - **Capsol:** die mobilen Pilotanlagen CapsolGo® von Capsol Technologies wurden bereits an drei KVA in Deutschland und Schweden sowie an zwei Biomasse-Kraftwerken getestet. Es sind Kampagnen an einer weiteren KVA in Schweden und an Zementwerken in Litauen und Lettland geplant.

Vergleich Amin-HPC

Aktuelle Erkenntnisse zum Amin- und HPC-Verfahren sind über den gesamten Bericht verteilt. Die energetische Performance wird im Kapitel 6 AP 4.1 – Wärmeintegration diskutiert, die Emissions- und Umweltthematik bei der Aminwäsche im Kapitel 4 AP 2.2 – Umweltmonitoring und Platzbedarf und Kosten im Kapitel 8 AP 5 – Vorprojekt. Die Charakteristik der beiden Verfahren ist in Abbildung 2 anhand eines Spinnenplots zusammenfassend dargestellt.

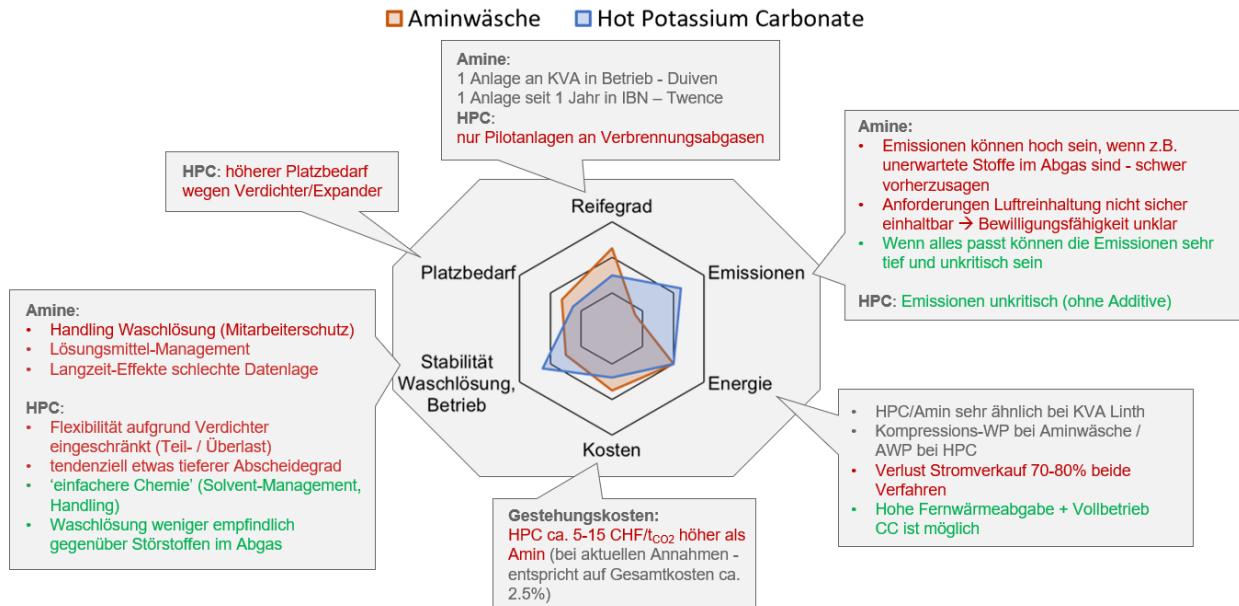


Abbildung 2 - Spinnenplot zur Charakterisierung der beiden Abscheideverfahren Aminwäsche und HPC.

4. AP 2.2 – Umweltmonitoring

4.1. Emissionen

Eine Übersicht über grundsätzlich geeignete Verfahren zur direkten Messung typischer Emissionen von PCC-Anlagen auf Basis der Aminwäsche wurde bereits im Jahresbericht 2023 gegeben. Der Schwerpunkt im Jahr 2024 lag nun auf der Begleitung der Pilotversuche an der Verbrennungsanlage ARC in Kopenhagen. Um die dort ermittelten Daten einordnen zu können, erfolgte zusätzlich eine Literaturrecherche zu Emissionen von PCC-Anlagen. Am Standort der KVA Linth konnten zudem im Rahmen einer Kampagne zur Messung von PFAS im Abgas wichtige Erkenntnisse zur Beprobung des Abgasstroms und zur Einbindung eines Massenspektrometers in den analytischen Prozess gewonnen werden.

Pilotversuche am ARC Kopenhagen:

Die Datenlage zu Emissionen aus Aminwäsche-Anlagen ist beschränkt und bezieht sich weitestgehend auf Anlagen im Pilotmassstab. Ein grosser Teil der Daten betrifft zudem nicht die CO₂-Abscheidung aus KVA-Abgas und vielfach bleibt unklar, wie die Anlagen betrieben wurden und in welcher Weise die Emissionsmessung erfolgte. Auffällig ist auch die grosse Spannweite an publizierten Emissionen, welche a priori keine seriöse Prognose für die Planung einer Neuanlage und die erforderlichen Bewilligungsverfahren zulassen. Werte für die direkten Emissionen der eingesetzten Amine reichen von tiefen Werten⁶⁻⁸ <1ppm bis hin zu inakzeptabel hohen Konzentrationen⁹⁻¹¹.

Um das Verständnis für das Thema zu vertiefen, hat sich das CO₂-Kompetenzzentrum am Projekt ACCEPT an der Verbrennungsanlage ARC in Kopenhagen beteiligt. Dort wurde über einen Zeitraum von 1 Jahr eine Amin-basierte Pilotanlage (Abscheidekapazität: 1'000 t CO₂ pro Jahr) anteilig mit dem Abgasstrom einer Ofenlinie betrieben. Im Rahmen von zwei Pilotierungsphasen wurden die Amine Monoethanolamin (MEA) und ein Gemisch aus 2-Amino-2-methylpropanol (AMP) und Piperazin (PZ), auch bekannt unter dem Namen CESAR1, getestet.

Nach der Absorberstufe sind zur Nachreinigung zwei Wasser-Waschstufen vorhanden, wobei die zweite davon versuchsweise unter Zugabe von Schwefelsäure als saure Waschstufe betrieben werden konnte. Zusätzlich wurde ein Tropfenabscheider eingesetzt. Die Details zum Setup und zu den Messergebnissen werden dem noch ausstehenden Projektbericht zu entnehmen sein.

Emissionen nach der Absorberstufe wurden mittels ELPI («Electrical Low Pressure Impactor», Partikel und Aerosole), FTIR («Fourier-Transformations-IR-Spektroskopie», Ammoniak) und PTR-TOF-MS («Protonentransfer-Flugzeit-Massenspektrometrie», organische Verbindungen) im Rahmen von jeweils mehrtägigen Kampagnen online gemessen. Erweitert wurden diese Daten durch die Ergebnisse von «Compliance-Tests», die seitens der Genehmigungsbehörden gefordert wurden. Hierbei wurden Abgas-Inhaltsstoffe in klassischer Weise mittels Waschflaschen (Impinger) absorbiert und die resultierenden wässrigen Fraktionen extern analysiert (zahlreiche organische Verbindungen, diskrete jeweils einstündige Messungen). Für den Anlagenbetrieb mit MEA und CESAR-1 wurden pro Waschflüssigkeit jeweils 2 Compliance Tests durchgeführt, wobei Mitarbeiter des ZAR-Kompetenzzentrums bei einer Kampagne vor Ort zugegen waren.

Bezüglich der gemessenen Emissionen lassen zusammenfassend folgende Punkte hervorheben:

- Bei allen Messkampagnen (2 x MEA, 2 x CESAR-1) waren die Emissionen der jeweils eingesetzten Amine in einem Bereich, der für eine kommerzielle Anlage nicht akzeptabel

wäre. Auch mit einer versuchsweisen Säuredosierung in die zweite Waschstufe liess sich keine signifikante Reduktion der Amin-Emissionen erreichen.

- Beim Einsatz von MEA und ohne saure Fahrweise der zweiten Waschstufe lagen die Ammoniakemissionen um ca. eine Grössenordnung über dem in der Schweiz geltenden LRV-Grenzwert. Mit Säurezugabe in der letzten Waschstufe liessen sich die NH₃-Emissionen in den gesetzlich zulässigen Bereich senken.
- Beim Einsatz der Piperazin-haltigen Waschflüssigkeit wurden signifikante direkte Emissionen von N-Nitrosopiperazin beobachtet. Für eine kommerzielle Anlage wären diese Emissionen nicht in einem akzeptablen Bereich.
- Der Grund für die beobachteten Emissionen ist noch unklar. Es wird aktuell davon ausgingen, dass die Amin- und Nitrosamin-Emissionen zum grossen Teil in Form von Aerosolen vorliegen. Dies würde erklären, warum sich diese Emissionen (im Gegensatz zu gasförmigen NH₃-Emissionen) auch nicht durch einen sauren Betrieb der zweiten Waschstufe reduzieren liessen. Die aktuelle Arbeitshypothese geht davon aus, dass feine Partikel/Aerosole im Abgas der KVA Auslöser einer weitergehenden Aerosolbildung im Absorber sind. Ein vergleichbares Phänomen wurde auch bei anderen Anlagen beobachtet und wird im Kapitel 5 diskutiert.

Abgeleitete Massnahmen zur Reduktion von Emissionen:

Gasförmige Emissionen: gasförmige Emissionen von Aminen und deren Reaktionsprodukte lassen sich nach der Absorptionsstufe über neutrale und saure Waschstufen relativ effizient entfernen. Dennoch sollte bereits deren Entstehung nach Möglichkeit vermieden werden. Dazu können folgende Faktoren beitragen:

- Wahl der Amine: Weniger flüchtige Amine führen zu tieferen gasförmigen Emissionen. Auch ist nicht nur die emittierte Menge relevant, da die Amine als unterschiedlich kritisch hinsichtlich ihrer Toxizität und der Bildung problematischer Reaktionsprodukte zu beurteilen sind.
- Temperaturabsenkung im Absorber (tieferer Dampfdruck von flüchtigen Verbindungen bei tieferen Temperaturen). Es kann allerdings gegenläufige Effekte hinsichtlich der Aerosolbildung infolge einer lokalen Übersättigung der Gasphase geben.
- Qualitätsmanagement der Amin-Waschlösung: Laboranalytik (Beladungskapazität, Zersetzungspunkte) und darauf basierendes, bedarfsgerechtes Reclaiming zur effizienten Entfernung von Reaktions- und Zersetzungspunkten.

Aerosole:

Um tiefe Emissionswerte zu erreichen, scheint es weiterhin zentral zu sein, die Bildung von Aerosolen im Absorber zu vermeiden, da sich diese nachträglich nur schwer wieder entfernen lassen. Ein wichtiger Aspekt dabei ist, dass sich im Absorber keine starken Temperaturschwankungen finden und sich ein gleichmässiges Temperaturprofil einstellt, so dass Zonen mit lokaler Übersättigung der Gasphase minimiert werden. Dieses Ziel kann über die Abgastemperatur, die Temperatur der Waschflüssigkeit am Eintritt in den Absorber sowie über allfällige Zwischenkühlstufen erreicht werden.

Sehr wichtig scheinen zudem die Abgasparameter am Eintritt in den Absorber zu sein. Basierend auf der Literatur und den Resultaten der Messungen in Kopenhagen zeigt sich, dass feine Aerosole/Partikel im KVA-Abgasstrom zu hohen Amin-Emissionen führen können, selbst wenn

ansonsten optimale Betriebsparameter der Absorberstufe eingehalten werden und neutrale sowie saure Waschstufen und Tropfenabscheider vor dem Kamin zur Anwendung kommen. Weitergehende Ausführungen hierzu sind dem Kapitel 5 mit einer Übersicht der Arbeiten im Rahmen des AP3 (Optimierung Abgasreinigung) zu entnehmen.

Vorversuche Emissionsmessung in der KVA Linth mittels Flugzeit-Massenspektrometer

Online-Messungen werden zukünftig mit voraussichtlich sowohl bei der Inbetriebnahme und Parametrierung von Abscheideanlagen als auch bei der Bestimmung von Stunden- und Tagesmittelwerten im Rahmen des Umweltmonitorings eine wichtige Rolle spielen. Die alleinige Anschaffung eines Messgeräts reicht aber nicht aus, um hier belastbare Daten zu generieren. Auf Grundlage der in Kopenhagen gemachten Erfahrungen wird deshalb angestrebt, für PCC-online-Messungen das spezifische Fachwissen auch in der Schweiz aufzubauen.

Eine erste Zusammenarbeit mit der Tofwerk AG im September 2024 hatte die Anbindung eines tof-MS an den Abgasstrom der KVA Linth zum Ziel. Im Rahmen der Kampagne wurden anstelle von Nitrosaminen die ebenfalls umweltrelevanten PFAS mittels Massenspektrometer im Rauchgas untersucht. Die hierbei gemachten Erfahrungen werden sich (mit Anpassungen) zu einem späteren Zeitpunkt auf allfällige erforderliche Messungen von Nitrosaminen im Abgasstrom nach CO₂-Abscheidung übertragen lassen.

Prof. Armin Wisthaler von der Universität Oslo hat bereits viel Erfahrung mit der quantitativen online-Messungen von Nitrosaminen mittels Massenspektrometrie gesammelt und bietet diese mit der Firma 'Advanced Monitoring Solutions AS' auch kommerziell an.

Ausblick und geplante Arbeiten

Der elektrostatische Niederdruck-Impaktor (ELPI) hat sich bei den Pilotversuchen in Kopenhagen als Verfahren zur Charakterisierung von Aerosolen im Abgas gut bewährt und wurde auch bei anderen Anlagen bereits eingesetzt. In Abstimmung mit der Begleitgruppe wird das ZAR-Kompetenzzentrum im Jahr 2025 Messungen in den Abgasströmen verschiedener KVA mit diesem Gerät organisieren. Ziel der Untersuchungen ist es, in Echtzeit Partikelgrößenverteilungen als Funktion des Partikeldurchmessers im Bereich von 6 nm bis 10 µm zu erfassen und so ein Bild von der spezifischen Aerosolcharakteristik verschiedener KVA zu bekommen und einen Zusammenhang zu den eingesetzten Abgasreinigungsverfahren herzustellen.

Betreffend online-Messungen von Aminen und Nitrosaminen in KVA-Abgas mittels Massenspektrometrie ist ein weiterer Informationsaustausch mit den Industriepartnern vorgesehen.

4.2. Dispersionsmodellierung

Entsprechend den Ausführungen im letztjährigen Bericht wurde die TU-Graz mit der Durchführung der Dispersionsmodellierung für die Standorte der KVA Horgen und KVA Linth unter Verwendung des mesoskaligen Modells GRAMM/GRAL beauftragt.

Für die KVA Horgen lagen der TU-Graz zu Beginn des Jahres alle benötigten Daten wie Anlagenparameter, Windfelder für die Region Horgen, digitales Höhenmodell, meteorologische Daten und Luftschatstoffkonzentrationen (Ozon, Stickoxide) vor. Bei den Emissionen von Aminen, Nitrosaminen und Aldehyden konnten die Angaben des Lieferanten auf Basis des Pilotversuchs in Kopenhagen (ARC) mit MEA teilweise plausibilisiert bzw. präzisiert werden.

Zwischenzeitlich ist die Modellierung für Horgen nahezu abgeschlossen und der Abschlussbericht in Bearbeitung.

Die Resultate werden die Immissionen (Sommer-/Winter- und Jahresmittelwerte) unter Berücksichtigung von trockener und nasser Deposition für folgende Verbindungen umfassen:

- Monoethanolamin, Monoethanolamin-Radikal (MEA*) als Proxy für Imine und MEA-Nitramin
- Dimethylamin (stellvertretend für sek. Amine) und Dimethylamin-Radikal
- Direkt emittierte Nitrosamine und Nitramine
- Aldehyde, separat betrachtet als Formaldehyd und Acetaldehyd

Ammoniakemissionen werden nicht simuliert, da diese Verbindung ohnehin in der LRV reguliert ist. Die mechanistischen Grundannahmen sollen stets konservativ sein. So wird beispielsweise keine atmosphärische Zersetzung von Nitrosaminen/Nitraminen und Aldehyden angenommen. Details zu den zugrunde gelegten atmosphärischen Reaktionspfaden der einzelnen Verbindungen bzw. Verbindungsklassen können dem Abschlussbericht der TU-Graz entnommen werden.

Für einzelne (mit dem AWEL abgestimmte) Rezeptorpunkte mit hoher infrastruktureller oder soziökologischer Bedeutung (Ortszentrum, Kindergärten und Schulen etc.) sollen auch zeitaufgelöste Konzentrationsverläufe der untersuchten Verbindungen berechnet werden.

Ausblick und geplante Arbeiten

- Eine unabhängige Stellungnahme zum verwendeten Modell und der zugrundeliegenden Atmosphärenchemie wurde vom BAFU und dem AWEL Zürich (Genehmigungsbehörde für das Projekt der KVA Horgen) gewünscht und wird auch vom Kompetenzzentrum als sinnvoll erachtet. Hierzu hat sich Prof. Armin Wisthaler von der Universität Oslo freundlicherweise bereiterklärt. Die Stellungnahme wird nach Vorlage des Abschlussberichts der TU-Graz zeitnah in Auftrag gegeben.
- Die Ausbreitungsmodellierung für die KVA Linth wurde bei der TU-Graz bestellt. Alle erforderlichen Daten und Angaben für den Start der Berechnungen liegen dort vor. Erste Resultate sind aus heutiger Perspektive im Frühjahr 2025 zu erwarten.
- In Norwegen entwickelt das NILU ein neuartiges Lagrange-Ausbreitungsmodell (LAA), dass auch für die Topografie der Schweiz geeignet sein sollte und atmosphärische Reaktionen der relevanten Spezies sowie Misch- und Transportprozesse (CTM, Chemie-Transportmodelle) besser als bisherige Modelle abbildet. Es sollte ab 2027 verfügbar sein.

4.3. Immissionen

Immissionen (Trink-) Wasser

Nitrosamine in der Umwelt und insbesondere in Abwässern industrieller Betriebe finden in der Schweiz zusehends Beachtung, nachdem Untersuchungen der EPFL (F. Breider) und EAWAG (U. von Gunten) erhebliche Konzentrationen dieser kanzerogenen Stoffe in den Zuläufen zu verschiedenen Kläranlagen (ARA) nachweisen konnten. Es wurden u.a. die beiden Verbindungen N-Nitrosodimethylamin und Nitrosomorpholin mit 975 µg NDMA/L resp. 710 µg NMOR/L in Konzentrationen nachgewiesen, die um zwei bis fünf Größenordnungen über den typischen Werten kommunaler Abwässer liegen¹².

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des AP 2 mehrere Wasserproben aus der Umgebung der beiden KVA Horgen und Linth auf Nitrosamine untersucht, um eine allfällige Grundbelastung mit Nitrosaminen von möglicherweise später hinzukommenden Einträgen infolge einer aminbasierten CO₂-Abscheidung abgrenzen zu können.

Die Probenahme erfolgte an folgenden Stellen:

- Kniebrecherbach (kleines Fliessgewässer in unmittelbarer Nähe der KVA Horgen)
- Pumpwerk Feld Niederurnen (Grundwasser-Pumpstation) vor der Behandlung mit UV-Licht
- Reservoir Bleiche Niederurnen (Quellfassung) vor der Behandlung mit UV-Licht

Die Probenahme erfolgte am Kniebrecherbach durch die Mitarbeiter des ZAR-Kompetenzzentrums. Bei der Probenahme in Niederurnen konnte auf die Unterstützung des Brunnenmeisters der Gemeinde Glarus Nord zurückgegriffen werden.

Alle Wasserproben wurden in Braunglasflaschen mit Schliffstopfen per Post an das beauftragte Labor (EPFL in Lausanne) geschickt (Anm.: Weitere Laboratorien wie die Labor Veritas AG in Zürich bieten einen vergleichbaren Analysenumfang an). Der Sendung wurde zudem eine leere Probenflasche beigefügt, die im Labor mit Reinstwasser befüllt und deren Inhalt dann ebenfalls analysiert wurde. Auf diese Weise sollten allfällige Kontaminationen der Probenflaschen, aber auch im Laufe der Probenvorbereitung und Messung eingeschleppte Verunreinigungen erkannt werden.

Die Resultate der Messungen sind in nachfolgender Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 – Ergebnisse der Bestimmung von Nitrosaminen in Quell- bzw. Trinkwasserproben aus der Umgebung der KVA Horgen (HO) bzw. KVA Linth (LI). Verfahren: LVI-GC-MS/MS. NG: Nachweisgrenze, BG: Bestimmungsgrenze.

		NG	BG	HO_01_rep	LI_03	LI_04	LI_05
				Kniebrecherbach Horgen	Pumpwerk Feld Niederurnen vor UV-Behandlung	Reservoir Bleiche Niederurnen vor UV-Behandlung	Leere Probenflasche Blindprobe
		ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L
NDBA	N-nitrosodibutylamine	0.7	2.2	<0.7	<0.7	<0.7	<0.7
NDEA	N-nitrosodiethylamine	0.7	2.2	<0.7	<0.7	<0.7	<0.7
NDMA	N-nitrosodimethylamine	1.8	5.3	<1.8	<1.8	<1.8	<1.8
NDPhA	N-nitrosodiphenylamine	0.9	2.6	<0.9	<0.9	<0.9	<0.9
NDPA	N-nitrosodi-n-propylamine	0.8	2.3	<0.8	<0.8	<0.8	<0.8
NMEA	N-nitrosomethylethylamine	1.8	5.3	<1.8	<1.8	<1.8	<1.8
NMOR	N-nitrosomorpholine	0.7	2.2	<0.7	<0.7	<0.7	<0.7
NPIP	N-nitrosopiperidine	0.8	2.3	<0.8	<0.8	<0.8	<0.8
NPYR	N-nitrosopyridine	0.7	2.1	<0.7	<0.7	<0.7	<0.7
SUMME		8.8	26.4	0.0	0.0	0.0	0.0

Im Analysenumfang berücksichtigt wurden typische Vertreter der Verbindungsklasse, die sich bislang als relevant bei industriellen Emissionen erwiesen haben. Der grundsätzlich interessante Summenparameter TONO, mit dem alle Nitroso-Verbindungen unspezifisch erfasst werden, konnte aus labortechnischen Gründen bislang noch nicht in den Proben bestimmt werden.

In den untersuchten Wasserproben lag die Konzentration aller gemessenen Nitrosamine erfreulicherweise unterhalb der Nachweisgrenze (NG) des eingesetzten analytischen Verfahrens. Das-selbe gilt für die im Labor vorbereitete Blindwert-Probe. Hieraus lässt sich jedoch nicht a priori ableiten, dass in den Wasserproben «keine Nitrosamine enthalten sind». Im Falle einer vorgesehenen Anwendung von Piperazin (z.B. im Amin-Mix CESAR1 oder im Lösungsmittel von Shell Cansolv) müsste beispielsweise das dazugehörige Nitrosopiperazin zwingend in das vorgängige Umweltmonitoring einbezogen werden.

Die Resultate der Messkampagne verdeutlichen allerdings ein Problem bei der Festlegung und Überwachung eines Grenzwerts, der als Summenparameter aus einer Vielzahl von Verbindungen berechnet wird, deren Konzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) liegen und damit nicht quantitativ messbar sind:

- Liegen einzelne Messwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze, wird bei der Bildung von Summenparametern in gängiger Praxis eine Konzentration von $0.5 \times \text{BG}$ je Einzelverbindung als Wert berücksichtigt. Diese Vorgehensweise soll «konservativ» die Tatsache abbilden, dass eine Konzentration unterhalb der Bestimmungsgrenze nicht zwingend bedeuten muss, dass die jeweilige Verbindung nicht in der Probe enthalten ist. Bereits mathematisch ist dieses Vorgehen allerdings fragwürdig, da Messwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze in der Regel keine Gauss-Verteilung aufweisen, die oft als Argument für ein solches Prozedere herangezogen wird.
- Im vorliegenden Fall ist die Nachweisgrenze für jedes einzelne Nitrosamin kleiner als die halbe Bestimmungsgrenze. Auch dieser Umstand verdeutlicht, dass eine Aufsummierung von $0.5 \times \text{BG}$ einer jeden Einzelverbindung nicht plausibel wäre.
- Die Grösse des Summenparameters hängt bei einer Umrechnung von Nachweis- oder Bestimmungsgrenzen in Konzentrationen mit Werten > 0 auch von der Anzahl der untersuchten Verbindungen ab. Dies steht möglicherweise der Bereitschaft von Antragstellern zu einem breit angelegten «Screening» von Umweltproben entgegen, da dann Grenz- bzw. Zielwerte nur erschwert oder gar nicht eingehalten werden können.
- Die unterschiedliche Toxizität verschiedener Nitrosamine wird bei der Bildung des Summenparameters bislang ebenfalls nicht berücksichtigt.
- Im vorliegenden Untersuchungsfall würde selbst bei einer Gewichtung von $0.5 \times \text{NG}$ die resultierende Gesamtkonzentration von 4.4 ng/L zu einer Überschreitung des norwegischen Grenzwertes von 4 ng/L als zulässige Summe aller Nitrosamine in Trinkwasser führen.

Fazit und Ausblick:

- In den untersuchten Wasserproben lag die Konzentration aller untersuchten Nitrosamine unterhalb der Nachweisgrenze des Verfahrens.
- Zukünftige Bewilligungsverfahren für eine Aminwäsche werden in Abstimmung mit den Genehmigungsbehörden voraussichtlich wesentlich umfangreichere Messkampagnen erfordern. Die zeitliche Abfolge der Probenahmen und der Prüfumfang der durchzuführenden Messungen werden dann u.a. vom geplanten Standort der Abscheideanlage und den eingesetzten Aminen in der Waschflüssigkeit abhängen.
- Seitens des ZAR-Kompetenzzentrums sind in Abstimmung mit der Begleitgruppe keine weiteren Arbeiten zu dieser Thematik vorgesehen.

Immissionsmessungen Luft

Immissionsmessungen von Nitrosaminen und Nitraminen in Umgebungsluft wären sehr hilfreich. Damit könnten im Idealfall Vorbelastungen vor Inbetriebnahme einer Aminwäsche bestimmt werden, während dem Betrieb allfällige Anstiege der Belastung detektiert werden, und die Ausbreitungsmodellierung überprüft und validiert werden. Messungen im Bereich des tiefen Immissions-Zielwerts von 0.03 ng/m^3 scheinen allerdings in Ermangelung ausreichend empfindlicher Messverfahren Stand heute nicht möglich zu sein. Die im Idealfall online erfolgende Messung derart

tiefer Konzentrationen mittels Massenspektrometrie dürfte nach Mitteilung des Gerätetherstellers Tofwerk AG auch in den kommenden Jahren nicht zu erwarten sein.

Für die Bestimmung von Nitrosaminen in Raumluft bietet die Firma Ellutia zur Arbeitsplatzüberwachung ein System an, das eine hohe Empfindlichkeit durch Voranreicherung auf einem spezifischen Adsorbens (ThermoSorb®-N Kartuschen) erreicht. Hinsichtlich der maximal zulässigen Luftfeuchtigkeit und Beladungszeit bestehen allerdings Restriktionen. Die adsorbierten Verbindungen werden anschliessend mit Dichlormethan/Methanol eluiert und in der flüssigen Phase mittels GC-TEA quantitativ analysiert. Auf diese Weise können mit dem Standardverfahren pro Nitrosamin adsorbierte Mengen von 1 ng (absolut) nachgewiesen werden. Mittels empfindlicherer analytischer Verfahren (GC-MS/MS) konnten im Technology Centre Mongstad (TCM) nach Beladung im Aussenbereich der Anlage nochmals tiefere Nachweigrenzen erreicht werden¹³. Das dortige Vorgehen entspricht allerdings nicht mehr der Spezifikation des Lieferanten. Es gab dadurch auch Blindwertprobleme je nach Alter und Lagerungszeit der verwendeten Kartuschen.

Mit einem Beladungsversuch im Aussenbereich der KVA Linth sollten nun erste eigene Erfahrungen hinsichtlich erreichbarer Nachweigrenzen und auftretender Probleme gesammelt werden. Mit der Durchführung der Messungen wurde die Firma Airmes AG beauftragt, die vorgängig bereits Nitrosamin-Messungen im Innenbereich gemäss der Spezifikation des Lieferanten durchgeführt hatte.

Abbildung 3 zeigt die ausgewählten Messstandorte:

- Standort A, Innerer Verbindungsgang im Containerdorf (regengeschützt, gute Durchlüftung entlang der Hauptwindrichtung im Tal)
- Standort B, Bühne im Hang-zugewandten Aussenbereich der KVA (Aussenbereich FLUWA, Ammoniaklager)

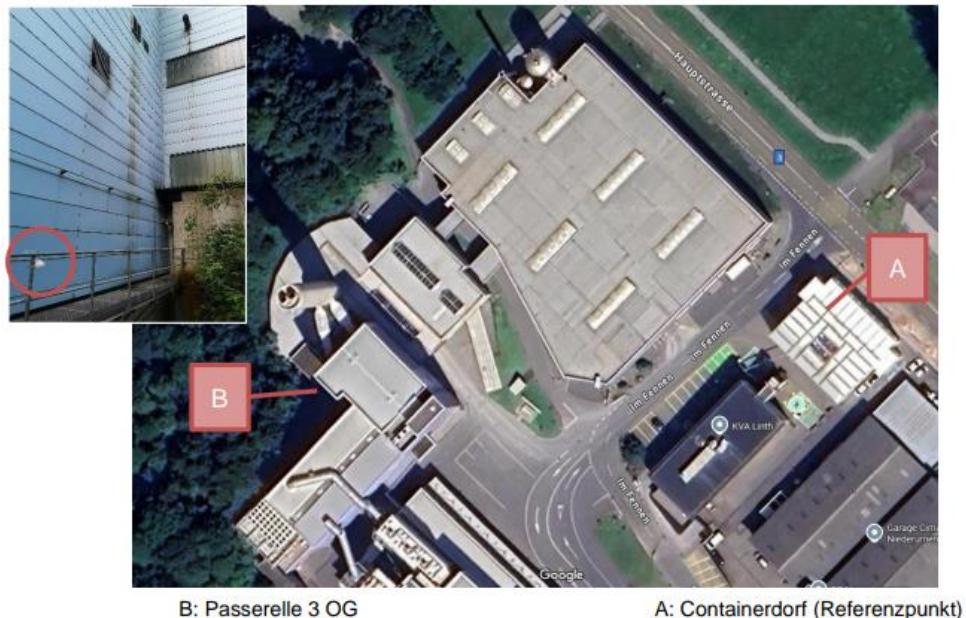


Abbildung 3 – Messstandorte für Tastversuch zur Nitrosamin- Immissionsmessung mittels Thermosorb-Kartuschen.

Die Probenahme erfolgte im Zeitraum 10.-12. September 2024 auf Grundlage der DGUV Information 213-523 (Verfahren zur Bestimmung von Nitrosaminen, September 2021) und BGI-

Richtlinie 505.23 mit jeweils zwei hintereinander geschalteten ThermoSorb®-N Kartuschen. Die Probenahmedauer wurde gegenüber dem Standardverfahren bewusst erhöht, um eine tiefere Bestimmungsgrenze zu erreichen. Vorgaben des Lieferanten zur maximal zulässigen Luftfeuchtigkeit (60%) konnte aufgrund der vorherrschenden meteorologischen Bedingungen nicht eingehalten werden. Mit der externen Laboranalytik wurde die Labor Veritas AG in Zürich beauftragt.

Resultate der Messungen

In der folgenden Tabelle 2 sind die gefundenen Konzentrationen für alle untersuchten Nitrosamine an den beiden Messorten A und B zusammengefasst. Am Standort B musste die Probenahme wegen einsetzenden Regens vorzeitig abgebrochen werden, woraus ein geringeres erfasstes Gasvolumen und eine höhere Bestimmungsgrenze (geringere Empfindlichkeit) des Verfahrens resultiert.

KVA Linth, Aussenbereich		
Messort	A	B
Probenahmeintervall	10.09.2024 13:34 12.09.2024 10:10	10.09.2024 14:20 11.09.2024 18:20
Probenahmedauer [h]	44.6	28.0
Probenahmenvolumen [m ³ n]	4.0965	2.8497
Temperatur [°C]	16 ± 4	18 ± 2
relative Feuchte [% ,]	72 ± 7	70 ± 7
Nitrosamine	ng/m ³ n	ng/m ³ n
NDMA (N-Nitrosodimethylamin)	< 0.24	< 0.35
NMEA (N-Nitrosomethylamin)	< 0.24	< 0.35
NDEA (N-Nitrosodiethylamin)	< 0.24	< 0.35
NEIPA/NIPNA (N-Nitrosoisopropylethylamin)	< 0.24	< 0.35
NDIPA/DIPNA (N-Nitrosodisopropylamin)	< 0.24	< 0.35
NDPA (N-Nitrosodipropylamin)	< 0.24	< 0.35
NDBA (N-Nitrosodibutylamin)	< 0.24	< 0.35
NPIP (N-Nitrosopiperidin)	< 0.24	< 0.35
NPYR (N-Nitrosopyrrolidin)	< 0.24	< 0.35
NMOR (N-Nitrosomorpholin)	< 0.24	< 0.35
Akzeptanzkonzentration (TRGS 552)	75	
Toleranzkonzentration (TRGS 552)	750	
MAK-Wert SUVA	1'000	

Tabelle 2 – Messbedingungen und Konzentrationen von Nitrosaminen (bezogen auf trockene Luft, 20°C, 1'013 mbar) im Aussenbereich der KVA Linth. Messort A Containerdorf, Messort B Bühne FLUWA-Ammoniaklager

An beiden Messorten konnten keine Nitrosamine oberhalb der Bestimmungsgrenze (BG) des angewandten Verfahrens (1 ng absolut in der Kartusche) nachgewiesen werden.

Fazit gemäss dem Abschlussbericht der Airmes AG:

Gemäss dem norwegischen Institut für öffentliche Gesundheit sollte die Gesamtmenge an Nitrosaminen und Nitraminen in der Aussenluft eine Konzentration von 0.3 ng/m³ nicht überschreiten. Bei einer Probenahmedauer von ca. 45 Stunden kann dieser Wert für ein einzelnes Nitrosamin überprüft werden. Sobald Summen gebildet werden, liegt die Bestimmungsgrenze jedoch entsprechend höher. Wird für die Summenbildung bei Konzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze jeweils die halbe Bestimmungsgrenze eingesetzt, beträgt die Summe der zehn untersuchten Nitrosamine 1.22 ng/m³ beim Messort A, resp. 1.75 ng/m³ beim Messort B. Ein Nachweis der Einhaltung von 0.3 ng/m³ (Gesamtmenge) wurde im vorliegenden Fall daher nicht erbracht. Seitens des Bundesamts für Umwelt (BAFU) wird ein Zielwert in der Aussenluft von 0.03 ng/m³ angestrebt.

Um eine Summenkonzentration (10 Nitrosamine, Summenbildung mit BG/2) von 0.3 ng/m³ resp. 0.03 ng/m³ zu überprüfen, müsste die Probenahmedauer auf ca. 7 resp. 70 Tage verlängert oder auf empfindlichere nachgeschaltete Messverfahren ausgewichen werden. Beide Varianten unterscheiden sich aber signifikant vom lieferantenseitig vorgegebenen Prozedere. Somit müssen die diskutierten Immissions-Zielwerte als derzeit nicht direkt mess- und überprüfbar beurteilt werden.

Ausblick

Ein Informationsaustausch mit SINTEF hinsichtlich der Anwendung empfindlicherer Analysenverfahren ist für 2025 vorgesehen.

5. AP3 – Optimierung Abgasreinigung

Der letztjährige Bericht befasst sich mit den Eigenschaften und Inhaltsstoffen des Abgases und deren Auswirkungen auf die beiden Abscheideverfahren Aminwäsche und HPC. Der diesjährige Bericht knüpft an diese Ausführungen an und legt dabei den Schwerpunkt auf die neuen Erkenntnisse. Die Thematik der Abgasreinigung wird im nachfolgenden unterteilt in Massnahmen, die vor der Abscheidung und Massnahmen, die nach der Abscheidung zum Einsatz kommen.

5.1. Vor der Abscheidung

Wie in Kapitel 4.1 Emissionen erläutert, scheint es bei einer Aminwäsche unter Anderem entscheidend, dass der Abgasstrom vor dem Eintritt in den Absorber eine möglichst geringe Konzentration an feinen Aerosolen/Partikel aufweist. Die Abgasparameter hinsichtlich dieser Bedingung zu analysieren und zu optimieren ist Gegenstand diverser aktueller Untersuchungen. Zusammengefasst scheint sich abzuzeichnen:

- Die Abgasströme enthalten sehr unterschiedlich hohe Partikelkonzentrationen (auch bei KVA)
- Hohe Partikelkonzentrationen führen in den gefundenen Beispielen zu hohen Emissionen
- Werden die Partikel vor der Abscheidung mittels einer BDU entfernt, lassen sich dadurch auch die Emissionen nach der Abscheidung stark reduzieren

Im Folgenden finden sich einige Beispiele aufgeführt, welche zu dieser Aussage zugrunde liegen:

AVR Duiven:¹⁴

AVR Duiven ist eine KVA in den Niederlanden, die seit dem Jahr 2019 eine Aminwäsche im industriellen Massstab betreibt. In einer Messkampagne der Jahre 2020 und 2021 wurden in Duiven unter anderem auch die Aerosol-/Partikel-Konzentration im Abgas vor der Abscheidung mit einem ELPI+ untersucht. Die Graphen der entsprechenden Messungen sind in Abbildung 4 gezeigt. Auffallend ist der im Vergleich zur KVA in Twence (siehe Abbildung 5) sehr geringe Anteil der Aerosole im Abgas der KVA.

Bezüglich der Emissionen nach der Abscheidung gibt es von Duiven zwar nur sehr beschränkt verfügbare Messdaten (Messung über wenige Stunden mittels FTIR und somit hoher Detektionsgrenze) ¹⁴, jedoch gibt es dabei keinen Hinweis auf übermäßig hohe Emissionen.

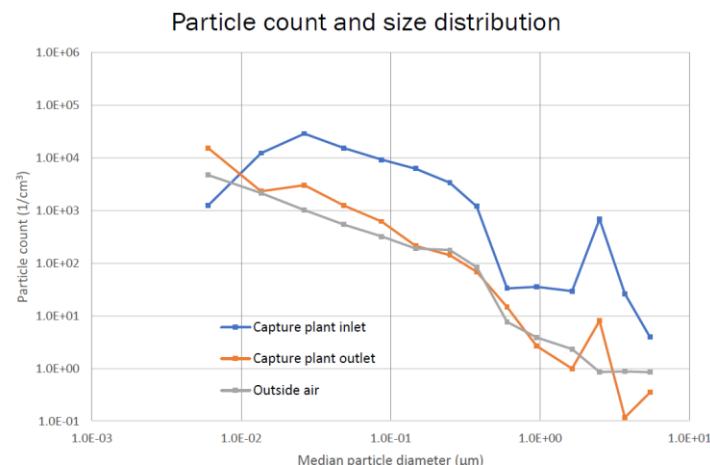


Abbildung 4 - Duiven: Konzentration der im Abgas vorhandenen Aerosole/Partikel in Bezug zu ihrem Durchmesser.

Twence^{10,15}: Twence ist eine KVA in Hengelo, in den Niederlanden. Die KVA betreibt seit einem Jahrzehnt eine Pilotanlage zur CO₂-Abscheidung, die auf dem Aminverfahren basiert. Die Messungen haben gezeigt, dass bei dieser Anlage hohe Partikelkonzentrationen im Abgas enthalten sind. Dies hat zu sehr hohen Emissionen nach der Abscheidung im Bereich von mehreren hundert mg/m³ geführt. Deshalb wurde im Jahr 2021 eine BDU vor den Absorber installiert. Der Graph in Abbildung 5 zeigt, dass dadurch die Konzentration der feinen Aerosole/Partikel im Abgas um gut zwei Größenordnungen reduziert werden konnte. Diese Maßnahme hat geholfen, die Amin-Emissionen stark zu senken auf <5mg/Nm³.

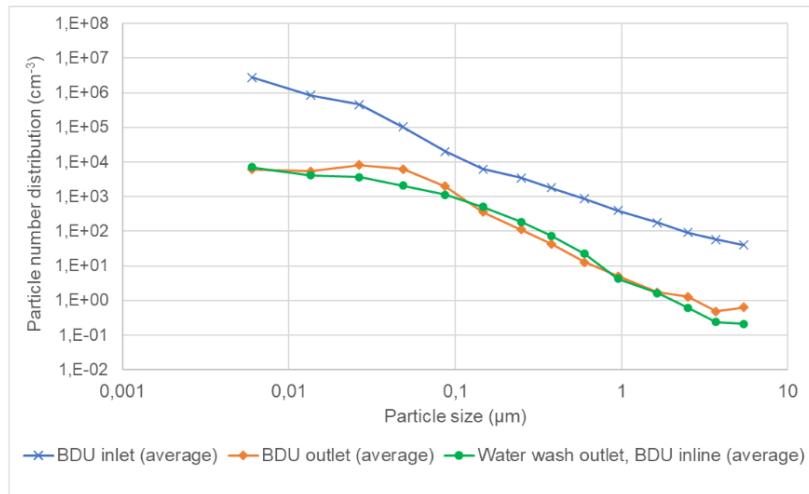


Abbildung 5 – Twence: Partikelkonzentration im Abgas der KVA vor / nach der BDU und nach der Abscheidung. Graph aus¹⁵.

Technology Centre Mongstad⁹: Wie bei der KVA Twence haben auch beim TCM hohe Partikelkonzentrationen im Abgas zu inakzeptablen Emissionen nach der Abscheidung geführt, was einen Betrieb im Rahmen der Betriebsbewilligung verunmöglichte. Auch dort wurde der Ansatz gewählt, die Partikel im Abgas mit dem Einsatz einer BDU vor dem Absorber zu reduzieren. Auch wenn das für die Untersuchung verwendete Abgas nicht aus einer KVA stammt, zeigen die Messungen eine Reduktion der Konzentration der feinen Aerosole/Partikel im Abgas in der gleichen Größenordnung wie in Twence. Die Amin-Emissionen konnten dadurch auf ein tolerierbares Mass reduziert werden.

ARC Kopenhagen:

Die Resultate der Messkampagne aus der KVA ARC in Kopenhagen sind im Kapitel 4.1 Emissionen detailliert erläutert. Zusammenfassend zeigen die dortigen Messungen hohe Amin-Emissionen. Gemäss den Erkenntnissen aus den Messungen in Twence und dem TCM könnten hierfür feine Aerosole/Partikel im Abgas vor der Absorptionsstufe ursächlich sein. Die entsprechenden Messungen befinden sich in der Auswertung.

Es zeigt sich, dass sich mittels einer BDU vor dem Absorber feine Aerosole/Partikel aus dem Abgas entfernen lassen. Die Technologie wird mit einem technologischen Reifegrad TRL von 7 bewertet, es fehlen daher die Erfahrungen aus dem industriellen Einsatz. Nachteilig wirkt sich auf jeden Fall der hohe Druckverlust aus, der einen erhöhten elektrischen Energiebedarf der Saugzugventilatoren verursacht.

5.2. Nach der Abscheidung

Um die gasförmigen Emissionen von Aminen und deren Reaktionsprodukten zu minimieren, werden nach der Absorptionsstufe standardmäßig eine neutrale und eine saure Waschstufe eingesetzt:

- Wasser-Washstufe. Nach Verwendung wird das Wasser aus der neutralen Waschstufe in die wässrige Aminlösung geführt. Damit kann der Verbrauch der Waschlösung gesenkt werden
- Saure Waschstufe. Im Gegensatz zur neutralen Waschstufe kann die Waschlösung der sauren Waschstufe nicht wieder verwendet werden und muss als Abfallstrom abgeführt werden. Für Anlagen mit einer nassen Abgasreinigung (AGR, auch «Rauchgaswäsche») und nachgeschalteter Abwasserbehandlung (ABA) besteht ggf. die Option, die saure Wäscherausschleusung zusammen mit anderen Abwässern der AGR zu behandeln und einzuleiten. Ein besonderes Augenmerk muss dabei organischen Verunreinigungen im Spurenbereich und entsprechender Überwachung der Abwasserqualität gelten.

Da sich durch die Waschstufen nur die gasförmigen Emissionen effizient verringern lassen, braucht es weiterhin den Einsatz eines Tropfenabscheiders um Aerosole/ Partikel zu entfernen. Zu beachten ist hier jedoch, dass ein Standard-Tropfenabscheider die Emissionen kleiner Aerosole/Partikel mit Durchmessern im Bereich unterhalb von 10 µm nicht zu reduzieren vermag.

Während neutrale und saure Waschstufen sowie Tropfenabscheider schon in der konventionellen Abgasreinigung seit langem Stand der Technik sind, werden weitere Verfahren für diesen Einsatz diskutiert, die sich jedoch noch nicht im industriellen Betrieb für diesen Zweck befinden (z.B. Ringjet, Dry bed / trickle bed, Wasser-Spray, Einsatz einer BDU nach dem Abscheideprozess¹⁶)

Ausblick

Für ein besseres Verständnis der in schweizerischen KVA eingesetzten Verfahren zur Abgasreinigung, insbesondere hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Konzentration und Größenverteilung von Aerosolen/Partikeln, sind im kommenden Jahr eigene Messungen mit einem ELPI vorgesehen.

6. AP 4.1 – Wärmeintegration

Im Rahmen des Vorprojekts wurde am Fallbeispiel der KVA Linth die energetische Integration von CCS in die KVA und das Fernwärmennetz detailliert untersucht. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

1) Definition von Fernwärmeszenarien

Das Fernwärmennetz der KVA Linth befindet sich derzeit in einem starken Ausbau und wird in den kommenden Jahren weiterhin wachsen. Da es nicht möglich ist, genaue Prognosen über die Fernwärmemengen in der Zukunft zu machen, wurde mit zwei Fernwärmeszenarien gearbeitet. Das erste entspricht dem Minimum-Fall mit einer jährlichen Fernwärmeabgabe von 70 GWh/Jahr. Basierend auf den Prognosen wird davon ausgegangen, dass diese Fernwärmemenge bis zur Inbetriebnahme der CO₂-Abscheidung erreicht wird. Das zweite Maximum-Szenario geht von einer Fernwärmeabgabe von 190 GWh/Jahr aus, was dem maximalen zukünftigen Abnahmepotential entspricht. Es stellt die Obergrenze dar.

2) Integration verschiedener Abscheidekonfigurationen

Es wurden zwei unterschiedliche Abscheideverfahren gemeinsam mit 2 Lieferanten pro Verfahren untersucht. Für diese 4 Varianten wurde separat eine Konfiguration für die Wärmeintegration für beide Fernwärmeszenarien erarbeitet. Die Konfigurationen sind so ausgelegt, dass die Anlage vom Fernwärmeszenario 70 GWh/a durch nachträgliches hinzufügen von Wärmepumpen auf das Szenario 190 GWh/a erweitert werden kann.

Die Angaben, welche Wärme- und Elektrizitätsströme zur CO₂-Abscheidung fliessen und insbesondere, welche Wärmeströme auf welchen Temperaturniveaus davon abgeführt werden können oder müssen, stammen von den Verfahrenslieferanten. So wird sichergestellt, dass realistische Annahmen verwendet werden, was bei Werten aus der Literatur stets schwierig einzuordnen ist und oft zu sehr optimistischen Annahmen führt.

3) Jahresgangsimulationen

Für die verschiedenen Anlagenkonfigurationen und Fernwärmeszenarien wurden im Anschluss Jahresgangsimulationen durchgeführt. Dabei wurde mit dem stündlichen Fernwärmebedarf anhand eines Modells der thermischen Anlagen der KVA Linth ein ganzes Jahr simuliert, um das Verhalten des Gesamtsystem über das ganze Jahr zu bestimmen.

Ergebnisse:

Stark vereinfacht dargestellt wurde die Integration bei allen Verfahrensvarianten ähnlich bewerkstelligt, siehe Abbildung 6. Bei beiden Verfahren wird Wärme an diversen Stellen bei unterschiedlichen Temperaturniveaus abgegeben. Auf die einzelnen Wärmeströme kann hier aufgrund von Geheimhaltungsverpflichtungen nicht eingegangen werden. Die Temperaturniveaus sind bei der Aminwäsche generell tiefer. Bei beiden Verfahren gibt es Wärmeströme, die direkt für die Fernwärme genutzt werden können. Diese wurden über einen Wärmetauscher direkt in den FW-Rücklauf eingebunden. Um die Abwärme, die sich auf einem zu tiefen Temperaturniveau für die direkte Nutzung befindet, trotzdem nutzen zu können, werden Wärmepumpen eingesetzt. Diese sind parallel zum Wärmetauscher in den Fernwärme-Rücklauf eingebunden. Nach Wärmetauscher und Wärmepumpe befindet sich ein Heizkondensator, welche das Fernwärmewasser unter Einsatz von Niederdruckdampf bei Bedarf noch weiter auf die Vorlauftemperatur aufheizt.

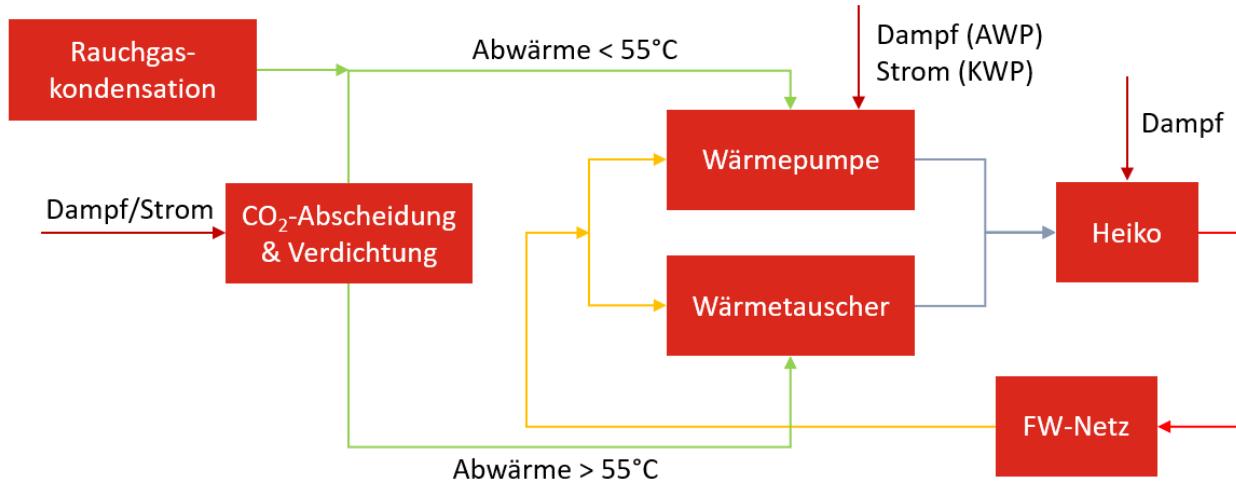


Abbildung 6 – Vereinfachte Integration der Abwärme aus dem CO₂-Abscheideprozess in das Fernwärmennetz, dargestellt anhand eines Blockdiagramms.

Bei der Erarbeitung der Wärmepumpen-Konfigurationen hat sich eine wichtige Erkenntnis ergeben. Bei den Varianten mit einer Aminwäsche müssen im Falle der KVA Linth elektrisch betriebene Kompressionswärmepumpen eingesetzt werden. Der Grund dafür ist, dass bei Betrieb der Abscheidung und hoher Fernwärmelast nicht genügend Niederdruckdampf vorhanden wäre, um noch dampfgetriebene Absorptionswärmepumpen zu betreiben. Umgekehrt sind beim HPC-Verfahren elektrische Kompressionswärmepumpen nicht optimal, da aus eigener Produktion nicht genügend elektrische Leistung zur Verfügung stehen würde, um sie zu betreiben. Dies, weil das HPC-Verfahren als Input mehr Strom benötigt.

Diese Ergebnisse sind spezifisch für die KVA Linth und können nicht direkt auf andere Anlagen übertragen werden. Die grundsätzliche Situation dürfte aber bei einigen Anlagen ähnlich sein, insbesondere wenn Fernwärme-Temperaturen und – Mengen ähnlich sind und eine Kondensationssturbine eingesetzt wird.

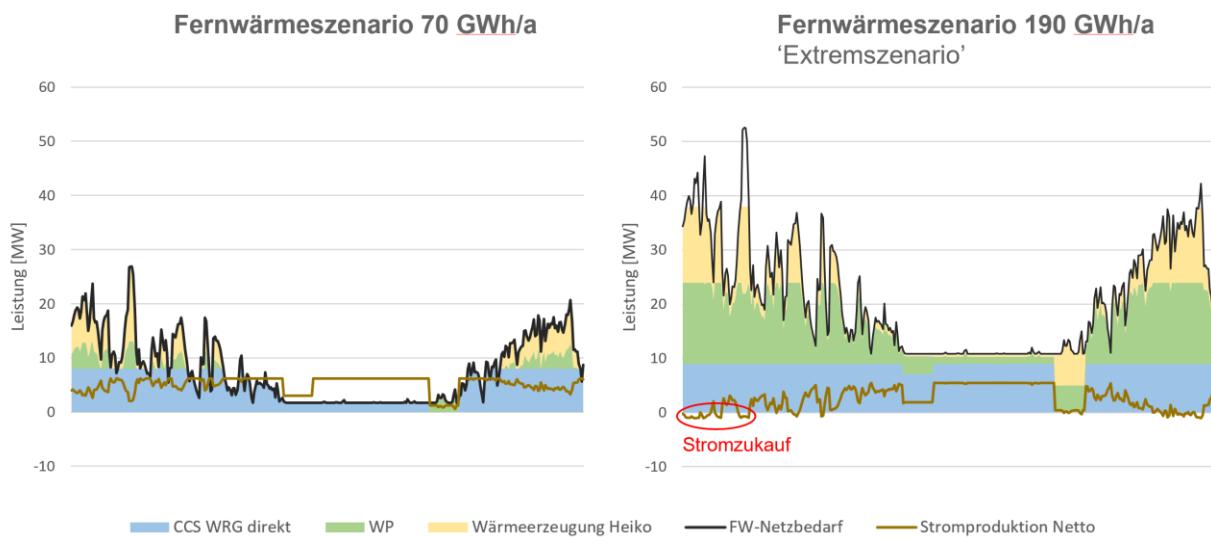


Abbildung 7 -Jahresgangkurven für die beiden Fernwärmeszenarien von 70 GWh/a und 190 GWh/a anhand einer exemplarischen Aminwäsche-Konfiguration.

Abbildung 7 zeigt exemplarisch für eine der Aminwäsche-Konfigurationen die Jahresgangkurven für die beiden Fernwärmeszenarien 70 und 190 GWh/a. Es ist der Fernwärmebedarf (schwarze

Linie) gezeigt. Die gefärbten Flächen zeigen auf, wie die Wärme bereitgestellt wird. Nicht ausgefüllte Bereiche können nicht bedient werden und müssen anderweitig gedeckt werden (Wärmespeicher, Spitzenlastkessel etc). In braun ist die Netto-Stromabgabe gezeigt. Sie berechnet sich aus der Stromproduktion in der Turbine, welche vom Dampfbezug durch CCS und Fernwärme abhängt, abzüglich des Bedarfs für KVA-Betrieb, Abscheidung, Verdichtung und Verflüssigung sowie Wärmepumpen.

Diese Art von Jahresgangsimulationen wurde für alle 8 Fälle (4 Abscheidekonfigurationen, 2 Fernwärmeszenarien) durchgeführt. In allen Fällen konnte die geforderte Fernwärme-Menge beinahe vollständig bereitgestellt werden. Dadurch lassen sich die Varianten anhand von nur einer Kennzahl vergleichen, da alles andere ungefähr konstant gehalten wird: die Menge an elektrischer Energie, die über ein Jahr nach Abzug aller Verbräuche (inkl. Wärmepumpe) und Produktionsverluste aufgrund der Dampfentnahme verkauft werden kann. In Abbildung 8 ist diese verkaufte Strommenge für alle 8 Fälle und für den Fall ohne CCS dargestellt. Abbildung 9 zeigt zudem die Aufteilung der Fernwärmebereitstellung nach Herkunft.

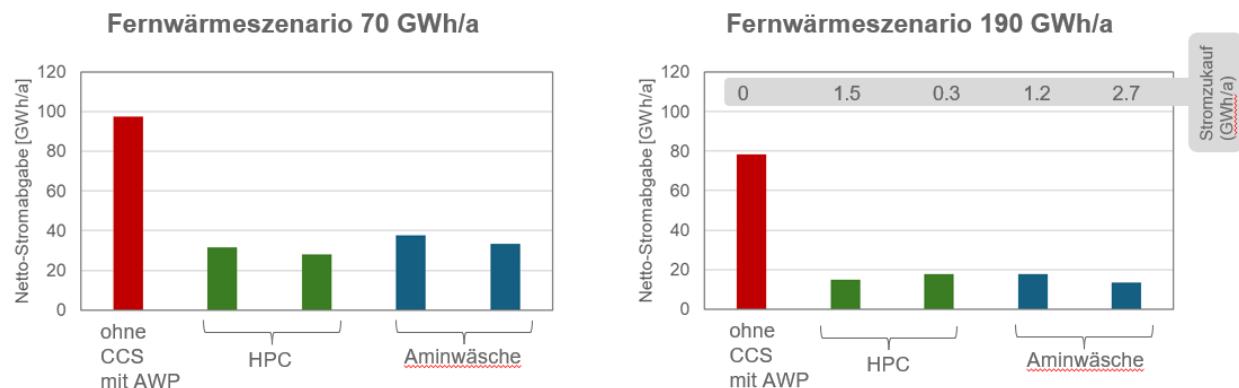


Abbildung 8 - Jährliche Stromabgabe für das Fernwärmeszenarios von 70 GWh/a (links) und für das Fernwärmeszenario von 190 GWh/a (rechts) und der gewählten Abscheidekonfiguration.

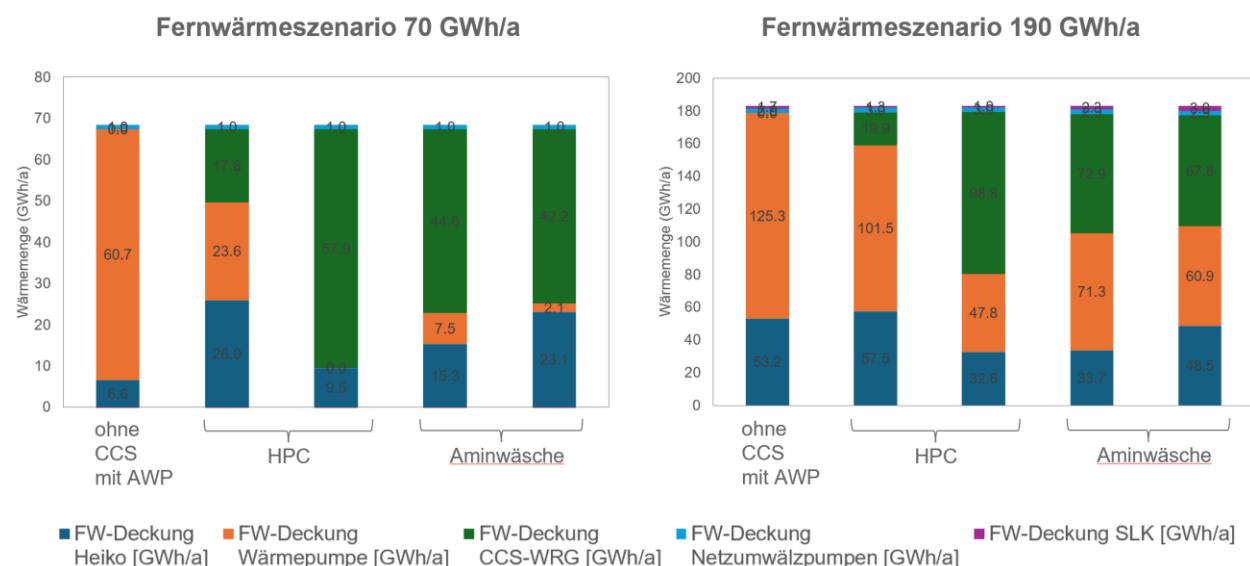


Abbildung 9 - Aufteilung der bereitgestellten Fernwärme nach Herkunft (Heizkondensator, Wärmepumpe, direkte Wärmerückgewinnung aus dem CO₂-Abscheideprozess, Netzumwälzpumpen, Spitzenlastkessel).

Folgende wichtige Erkenntnisse lassen sich aus dieser Betrachtung ziehen:

- Beim Szenario mit tiefer Fernwärmeauskoppelung schneidet die Aminwäsche bzgl. Gesamtenergiebilanz tendenziell etwas besser ab als das HPC-Verfahren. Beim Szenario mit hoher Fernwärmeauskoppelung schneiden die Verfahren praktisch gleich ab.
- Die Unterschiede zwischen den Abscheideverfahren sind gering und befinden sich innerhalb der Unsicherheiten. Auf die Kosten der gesamten Prozesskette bezogen sind diese Differenzen wenig relevant.
- Der Stromverkauf wird drastisch sinken. Zu Spitzenzeiten müssen eventuell sogar geringe Mengen aus dem Netz bezogen werden. Dieser Rückgang ist höher als bisher angenommen und als in der Literatur zu finden. Er beläuft sich auf ungefähr $500-570 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{tCO}_2\text{,flüssig}$.
- Die Abscheidung kann ganzjährig unter Vollast betrieben werden und es kann gleichzeitig die benötigte Fernwärme bereitgestellt werden.

Es ist wichtig zu betonen, dass diese Ergebnisse spezifisch für die KVA Linth gelten und nicht direkt auf andere Anlagen übertragen werden können. Es wurden zudem bei der Abscheidung eher konservative Annahmen getroffen; so wird bei der Aminwäsche das eher energieintensive MEA eingesetzt und beim HPC-Verfahren auf jegliche Zusätze verzichtet.

7. AP 4.3 und AP 6 – internationale Logistik und Lagerung

7.1. Aktivitäten im Jahr 2024

Im Bereich der internationalen Transportlogistik und Lagerung von CO₂ wurden Gespräche mit diversen Anbietern und Partnern geführt, um sich vertieft mit den verschiedenen Möglichkeiten auseinanderzusetzen. Die nachfolgende Auflistung gibt einen Überblick über die verschiedenen Anbieter, mit denen ein Austausch stattfand.

- **Bahnkesselwagen.** Gespräche mit Anbietern von Bahnkesselwagen für den Transport von flüssigem CO₂ zeigen, dass die technische und terminliche Machbarkeit gegeben ist. Bei stark steigender Nachfrage aufgrund eines grossflächigen CCS-Rollouts könnten sich jedoch die Lieferzeiten kritisch verlängern.
- **Transportdienstleistung.** Es fanden erste Abklärungen bezüglich des Transports und der Anlieferung der Bahnkesselwagen zu geeigneten CO₂-Hubs statt. Hierbei handelt es sich um Standarddienstleistungen für Logistikunternehmen und erste Richtpreisangebote liegen vor.
- **Hubs in Häfen und auf dem Festland.** Ein CO₂-Hub im Hafen nimmt das CO₂ entgegen und speichert es in Lagertanks, bevor das CO₂ entweder auf ein Schiff verladen oder in eine Unterwasser-Pipeline eingespeist wird.
Für Hubs, die sich weiter innen auf dem europäischen Festland befinden, sind grenzüberschreitende Pipelinesysteme in Planung. Der Zeithorizont dieser Projekte spannt sich jedoch über einen grösseren Zeitraum und mit einer Fertigstellung dieser Infrastruktur bis ins Jahr 2030 ist nicht zu rechnen.
- **Bahnentlad.** Diverse Gespräche mit Unternehmen, die den Bau und den Betrieb eines CO₂-Umschlagplatzes planen, zeigen, dass in vielen Projekten ein Bahnentlad nicht von Beginn an im geplanten Projektumfang enthalten ist. Oftmals sind die Planung und der Bau der Bahninfrastruktur erst in einem zweiten Ausbauschritt vorgesehen oder nur als Option berücksichtigt.
- **Speicherstätten.** Zurzeit ist in Europa nur eine kleine Anzahl von Onshore-Speicherstätten in Planung, die grosse Mehrheit der geplanten Speicherstätten befinden sich im Meergrund. Es gibt die Möglichkeit, dass ein Unternehmen oder eine Kollaboration von Unternehmen gleichzeitig die Speicherstätte und den Hub betreibt und den Teil dieser Wertschöpfungskette (Umschlag, Offshore-Transport und Speicherung) als Paket anbietet. Zum anderen gibt es die Möglichkeit, dass der CO₂-Umschlag als reine Dienstleistung angeboten wird. In diesem Fall liegt die Wahl der Speicherstätte und die entsprechende Koordination beim CO₂-Emittenten.
- **Transport- und Speicherung als Dienstleistung.** Es wurde auch die Möglichkeit betrachtet, die Planung und den Betrieb der gesamten Transport- und Speicherinfrastruktur einem einzelnen Anbieter zu übergeben. Es zeigte sich, dass diese Art der Dienstleistung erst im Aufbau begriffen ist.

7.2. Erkenntnisse aus dem Jahr 2024

Allgemein zeigt sich, dass es sich beim internationalen Transport und der Speicherung von CO₂ um einen Markt handelt, der sich erst in der Entwicklung befindet. Da sich die verschiedenen Glieder der CCS-Wertschöpfungskette gleichzeitig im Aufbau befinden, ist es schwierig vorherzusagen, wie sich der Markt in den nächsten Jahren gestalten wird. Da sehr viele Projekte in

Planung und auch schon weit fortgeschritten sind, scheint es realistisch, dass der Transport, der Umschlag in einem CO₂-Hub und die Speicherung von CO₂-Mengen im Bereich von 100'000 Tonnen für das Jahr 2030 umgesetzt werden können.

In der gegenwärtigen Projektphase fand noch keine Festlegung auf eine konkrete Transport- und Speicherstätte und damit auf konkrete Projektpartner statt. Da die Zieldestination einen signifikanten Einfluss auf die Transportkosten und die CO₂-Emissionen entlang der Wertschöpfungskette hat¹⁷, sollten die Erkenntnisse aus der geplanten Lebenszyklusbetrachtung in die Wahl der konkreten Projektpartner mit einfließen.

Die Tabelle 3 und die Tabelle 4 geben einen Überblick über Projekte, die im Zusammenhang mit dem Transport, dem Umschlag und der Speicherung von CO₂ von Interesse sind. Bislang konzentrieren sich in Europa die geplanten und betriebenen Speicherstätten auf die Nordsee und damit auf die Länder Norwegen, Dänemark, Niederlande und Grossbritannien. Für Länder im Süden Europas wirkt sich dies nachteilig aus, da die Speicherung des CO₂ in der Nordsee eine lange Transportdistanz bedingt.

	Start	Standort Hub	maritimer Transport	Speicherstätte	Kapazität 2030 (gemäss Homepage)
Norwegen					
Northern Lights	2024	Oeygarden	Pipeline	Johansen Fmn	5 Mtpa
Luna	2030	Zeebrugge, Wil- helmshaven, weitere	Pipeline	Johansen Fmn	5 Mtpa
Smeaheia	2028	Zeebrugge, Wil- helmshaven, weitere	Pipeline	Sognefjord Fmn	5 Mtpa
Dänemark					
Greensand	2026	Greenport Scandinavia, weitere	Schiff	Nini Fields	8 Mtpa
Greenport Scandinavia	2028/ 2029	Hirtshals	Schiff	Greensand	3 Mtpa
CO2RYLUS	2026	Stenlille	nicht benötigt	Stenlille (Fest- land)	2 Mt (10 Jahre)
Bifrost	2030	Esbjerg, weitere	Pipeline, Schiff	Harald Fields	5 Mtpa
Niederlande					
Aramis	2028	CO2next	Pipeline	L10, L04-A, K14-FA	5 Mtpa
CO2next	2028	Rotterdam	Pipeline, Schiff	Aramis, offen	5 Mtpa

Tabelle 3 - Überblick Hubs (orange) und Speicherstätten (blau) in Norwegen, Dänemark und den Niederlanden (nicht abschliessend).¹⁸

	Start	Standort Hub	maritimer Transport	Speicherstätte	Kapazität 2030 (gemäss Home-page)
Belgien					
Antwerp@C	2026	Antwerpen	Schiff	offen	10 Mtpa
Ghent Carbon Hub	2027	Ghent	Schiff	offen	4 Mtpa
Zeebrugge	2030	Zeebrugge	Schiff, Pipeline	Luna, Smeaheia, offen	30 Mtpa
VEPA	-	Antwerpen	Schiff	offen	-
Advario	-	Antwerpen	Schiff	offen	-
Deutschland					
Green Energy Hub	2029	Wilhelmshaven	Schiff	offen	11 Mtpa
CO2nnectNow	2029	Wilhelmshaven	Schiff, Pipeline	Luna, Smeaheia, offen	10 Mtpa
Frankreich					
D'Artagnan	2027	Dunkirk	Schiff	offen	1.5 Mtpa
Pycasso	2030	Bayonne	nicht benötigt	Lacq (Festland)	6 Mtpa (2035)
Italien					
Ravenna	2027	Ravenna	Pipeline	Porto Corsini Field	4 Mtpa

Tabelle 4 - Überblick Hubs (orange) und Speicherstätten (blau) in Belgien, Deutschland, Frankreich und Italien (nicht abschliessend).¹⁸

Norwegen, Dänemark und die Niederlande

Die Länder Norwegen, Dänemark und die Niederlande haben Speicherlizenzen zur Offshore-Sequestrierung an Unternehmen vergeben. Diese Unternehmen planen die Speicherstätte meist zusammen mit einem spezifischen Umschlagplatz.

In Dänemark verfolgen das Projekt Greensand mit der Speicherstätte Nini Fields und das Projekt Bifrost mit der Speicherstätte Harald Fields diesen Ansatz. Anders präsentiert sich das Projekt CO2RYLUS, das in Stenlille CO₂ auf dem Festland speichern wird.

Norwegen hat schon Speicherstätten wie zum Beispiel Northern Lights in Betrieb und weitere Speicherstätten wie Luna oder Smeaheia sind in Planung. Norwegen positioniert sich damit als Vorreiter hinsichtlich CO₂-Speicherung. Für die Schweiz erweist sich die lange Transportdistanz zu den norwegischen Speicherstätten jedoch als Nachteil.

In den Niederlanden plant das Projekt Aramis die Nutzung des Umschlagplatz CO2next mit anschliessendem Offshore-Transport zu den Speicherstätten.

Belgien und Deutschland

In der belgischen Nordsee sind keine CO₂-Speicherstätten in Planung. Belgien plant jedoch diverse CO₂-Umschlagplätze in den Häfen Antwerpen, Ghent und Zeebrugge mit Zugang zur Nordsee. Auch Deutschland hat Zugang zur Nordsee, jedoch keine Offshore-Speicherstätten geplant.

Frankreich und Italien

Im Mittelmeerraum finden sich geplante Speicherstätten in Frankreich und Italien. Diese Speicherstätten sind im Vergleich zu den nordischen Speicherstätten näher an der Schweiz gelegen. Dies ist ein grosser Vorteil hinsichtlich der zu erwartenden Kosten und CO₂-Emissionen aus dem Transport.

Das Projekt Pycasso plant im Süden Frankreichs zwei Speicherstätten auf dem Festland. Die beiden Speicherstätten Meillon und Lacq befinden sich in den französischen Pyrenäen. Des Weiteren ist im Norden Frankreichs mit dem Projekt D'Artagnan ein Umschlagplatz im Hafen von Dunkerque in Planung.

Das Projekt Callisto ist ein mediterranes CO₂-Netzwerk, das die beiden Länder Frankreich und Italien überspannt. Das CO₂ von Emittenten im Mittelmeerraum soll zum einen über bestehende und neu gebaute Leitungen auf dem Festland und zum anderen mit Schiffen nach Ravenna in Italien gebracht werden. In Ravenna befindet sich der Umschlagplatz und die nachfolgende Unterwasser-Leitung zur Speicherstätte Porto Corsini Platform im adriatischen Meer.

7.3. Ausblick auf das Jahr 2025

In der nächsten Projektphase wird eine Festlegung auf konkrete Partner im Bereich der internationalen Logistik und Speicherung angestrebt. Diese Festlegung könnte im Sinne einer Exklusivitätsvereinbarung erfolgen. Diese Vereinbarung kann z.B. im Gegenzug zu einer Exklusivität die Reservation der benötigten Kapazitäten im Verlad und in der Speicherung enthalten, enthält jedoch noch keine Strafzahlungen bei Nichtlieferung aufgrund eines verzögerten Projektstands oder Abbruch des Projekts. Daher werden für diese Exklusivitätsvereinbarung noch keine finanziellen Absicherungen benötigt. Weitere geplante Tätigkeiten im Jahr 2025 sind nachfolgend erläutert.

Untersuchung über den Einfluss der Zieldestination auf die Lebenszyklusanalyse

Innerhalb Europas sind die meisten Speicherstätten im Norden in der Nordsee geplant. Damit besitzen die Länder des Mittelmeerraums einen Standortnachteil. Der lange Transportweg wirkt sich nachteilig auf die Kosten der Wertschöpfungskette aus, denn er führt zu höheren Transportkosten und damit zu höheren Kosten pro vermiedener Tonne CO₂. Zudem verursacht die Produktion der für den Transport benötigten Energie relevante CO₂-Emissionen, die von der gespeicherten CO₂-Menge abgezogen werden müssen¹⁷.

Leider fällt auch die Schweiz auf Grund ihrer geographischen Lage unter die Länder mit nachteiligem Zugang zu einer Speicherstätte im Norden. Aus diesem Grund soll in der nächsten Projektphase eine Lebenszyklusanalyse (LCA) durchgeführt werden. Diese LCA soll aufzeigen, wie sich die Transportdistanz auf die effektiv gespeicherter Menge CO₂ pro Tonne Abfall auswirkt. Bei effektiv gespeicherter Menge CO₂ pro Tonne bezeichnet das Wort effektiv dabei die Berücksichtigung aller direkten und indirekten CO₂-Emissionen entlang der gesamten CCS-Wertschöpfungskette. Auch die Emissionen des Transports und der Speicherung fallen darunter. Diese Emissionen sind zum Beispiel abhängig von der Transportdistanz und den benötigten Transportmitteln und deren Energieträgern (Diesel, Strommix des jeweiligen Landes).

Weiterführung und Ausdehnung der Gespräche mit den Betreibern von Speicherstätten

Im Jahr 2024 lag der Fokus auf der Gesprächsaufnahme und -weiterführung mit Betreibern von Umschlagplätzen. Im nächsten Jahr sollen nun die Gespräche mit den Betreibern von Speicherstätten weitergeführt und ausgedehnt werden. Norwegen hat neben Northern Light auch weitere Speicherstätten wie Trudvang, Luna und Smeaheia in Planung. Es ist sicherlich lohnend, die

Entwicklung dieser Projekte zu verfolgen.

Im Vergleich zum europäischen Festland liegt Grossbritannien sehr weit vorne, was die vorgesehenen Speicherkapazitäten anbelangt. Gemäss Cavanagh et al¹⁸ liegt die angestrebte Kapazität der Speicherstätten in Grossbritannien (22.5 Mtpa bis 2030 erwartet) über der Speicherkapazität von Norwegen (15 Mtpa bis 2030 erwartet). Dabei ist Norwegen der Spitzenreiter auf dem europäischen Festland. Da lange Transportkosten einen beachtlichen Anteil der Gesamtkosten für die Speicherungen einer Tonne CO₂ ausmachen und die Distanzen zwischen den norwegischen Speicherstätten und der Schweiz grösser sind als die Entfernung zwischen einigen britischen Speicherstätten und der Schweiz, könnte es sich lohnen, die Entwicklung dieser Speicherstätten im Auge zu behalten. Nicht bekannt sind in diesem Zusammenhang die länderübergreifenden Abkommen und regulatorischen Bedingung zwischen der Schweiz und Grossbritannien, die es möglicherweise erschweren, als nicht britischer CO₂-Emittent eine Speicherkapazität zu erhalten. Dies im Gegensatz zu Norwegen, das mit der Schweiz eine Absichtserklärung unterschrieben hat¹⁹.

8. AP 5 – Vorprojekt

Im Jahr 2024 wurde das Vorprojekt für die CO₂ Abscheidung bis zum Verlad auf Bahnwagen durchgeführt. Das CO₂ soll bei der KVA Linth aus dem Abgasstrom abgeschieden und verdichtet werden. Dann soll es über eine Pipeline im gasförmigen Zustand zum Bahnhofsareal in Weesen transportiert werden, wo es verflüssigt, zwischengespeichert und auf Bahnkesselwagen für den internationalen Transport verladen wird, siehe Abbildung 10.

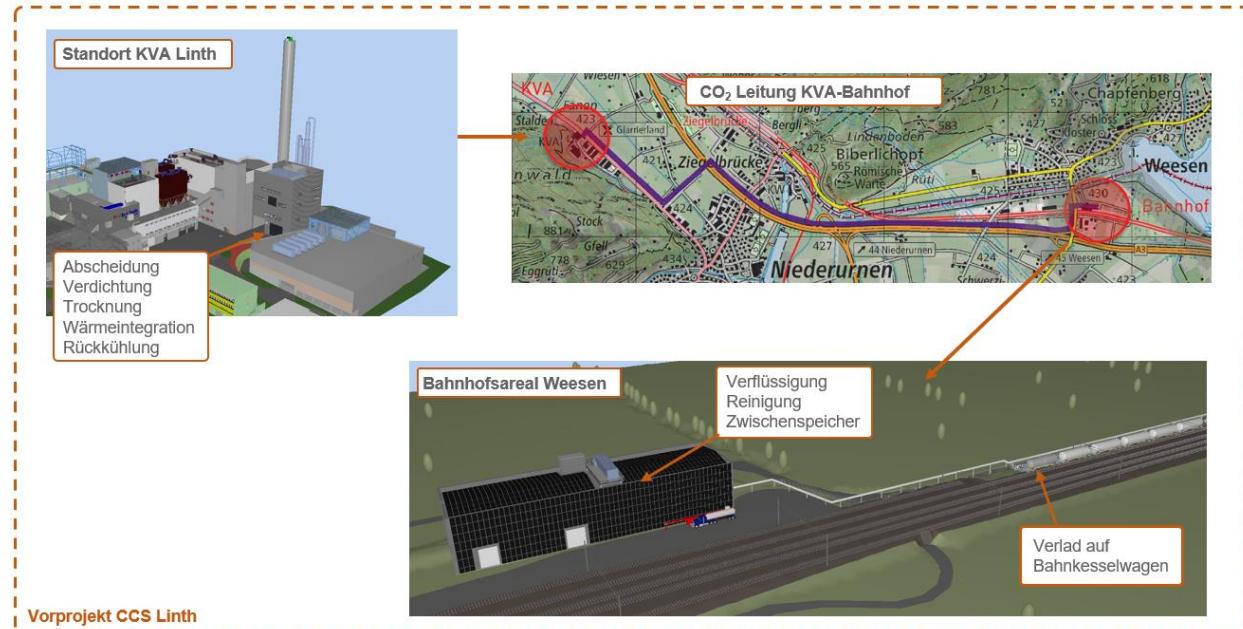


Abbildung 10 - Das Vorprojekt umfasst den Standort der KVA, die erdverlegte CO₂-Leitung zum Bahnhofsareal Weesen und die Anlage beim Bahnhof Weesen.

Das Vorprojekt wurde gemeinsam mit den Firmen tbf+Partner, Ramboll, Oehrli Engineering und Marty Ingenieure erarbeitet. Die verfahrenstechnischen Details wurden direkt durch Technologie-lieferanten erarbeitet. Damit die Ergebnisse trotz der Neuartigkeit der Technologien breit abgestützt sind, wurde zu allen Prozessschritten mit mehreren Lieferanten zusammengearbeitet. Bei der Abscheidung wurden zwei Anbieter für das HPC-Verfahren und drei für die Aminwäsche berücksichtigt.

In diesem Tätigkeitsbericht wird nicht vertieft auf das Vorprojekt eingegangen. Es wird dazu auf den Vorprojekts-Bericht verwiesen, welcher noch in Arbeit ist. Einige Erkenntnisse sind hier zusammengefasst:

Platzbedarf/Layout Abscheidung: beide Abscheideprozesse (HPC und Aminwäsche) inklusive CO₂-Verdichtung, Trocknung sowie Wärmepumpen zur Integration ins Fernwärmennetz lassen sich auf der vorgesehenen Grundfläche von ca. 1100 m² unterbringen. Je nach Kühlungssystem und Verfahren sind zusätzliche Dachflächen für die Rückkühlung nötig. Diese kompakte Bauweise ist nur bei mehrstöckiger Anordnung zahlreicher verfahrenstechnischer Komponenten innerhalb eines Gebäudes möglich. Das HPC-Verfahren braucht aufgrund der benötigten Abgaskompression mehr Platz als die Aminwäsche. Dadurch wird beim geplanten Gebäude für die HPC-Variante ein Stockwerk mehr benötigt und die Platzreserven sind geringer als bei der Aminwäsche-Variante, siehe Abbildung 11.

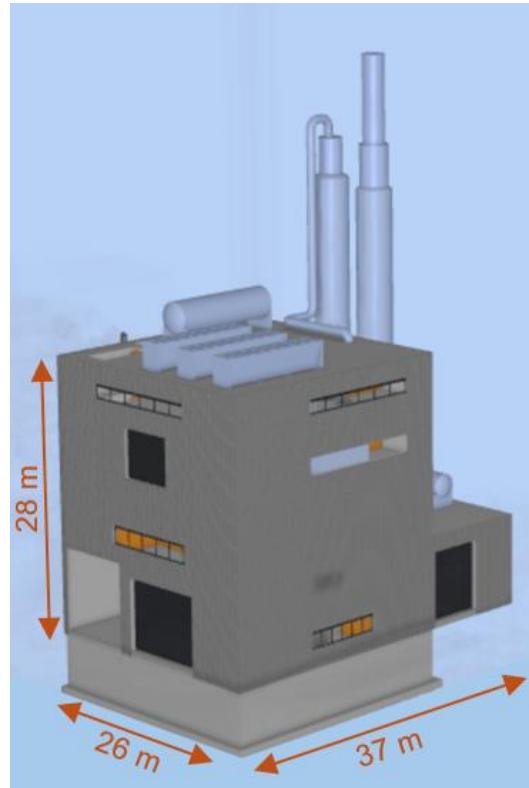


Abbildung 11 - Layout der Abscheideanlage beim Standort der KVA Linth. Gezeigt ist eine HPC-Variante. Bei der Aminwäsche kann ein Stockwerk eingespart werden.

Platzbedarf/Layout Verflüssigung, Speicher, Verlad: Abbildung 12 zeigt das Layout des Gebäudes im Bahnhof Weesen. Für die Verflüssigung, Reinigung sowie die Zwischenspeicherung des CO₂ in Tanks wurde eine Stahlbau-Halle mit einer Grundfläche von 1400 m² vorgesehen. Die 6 Lagertanks sind dabei liegend in zwei Ebenen angeordnet. Von dort wird das flüssige CO₂ in die Bahnkesselwagen gepumpt.



Abbildung 12 – Geplante Infrastruktur beim Bahnhofsareal in Weesen. Die Lagertanks sind liegend auf zwei Ebenen innerhalb vom Gebäude (links) angeordnet. Von dort wird das flüssige CO₂ über eine Leitung zu den Verladestationen für die Bahnkesselwagen (rechts) geleitet.

Energie: die energetische Einbindung und die Auswirkung auf das Gesamtsystem mit KVA und Fernwärme ist im Kapitel 6 AP 4.1 – Wärmeintegration ausgeführt. Es steht genügend Energie aus eigener Produktion zur Verfügung, um die Abscheidung ganzjährig bei Volllast zu betreiben und die Fernwärme zu bedienen, jedoch wird der Stromabsatz um ca. 60-80% abnehmen.

Investitionskosten: Die Investitionskosten inkl. Gebäude, Verfahrenstechnik bis und mit Bahnverlad, Wärmepumpen für die Wärmeintegration für das 70 GWh/a Fernwärmeszenario, Abgas kondensation, Rückkühlung und 10% Unvorhergesehenes wurden wie folgt abgeschätzt:

159 Mio CHF für die Aminwäsche

175 Mio CHF für das HPC-Verfahren

Betriebskosten: Die Schätzung der Betriebskosten befindet sich noch in Bearbeitung.

9. AP 2.1 Risikoanalyse

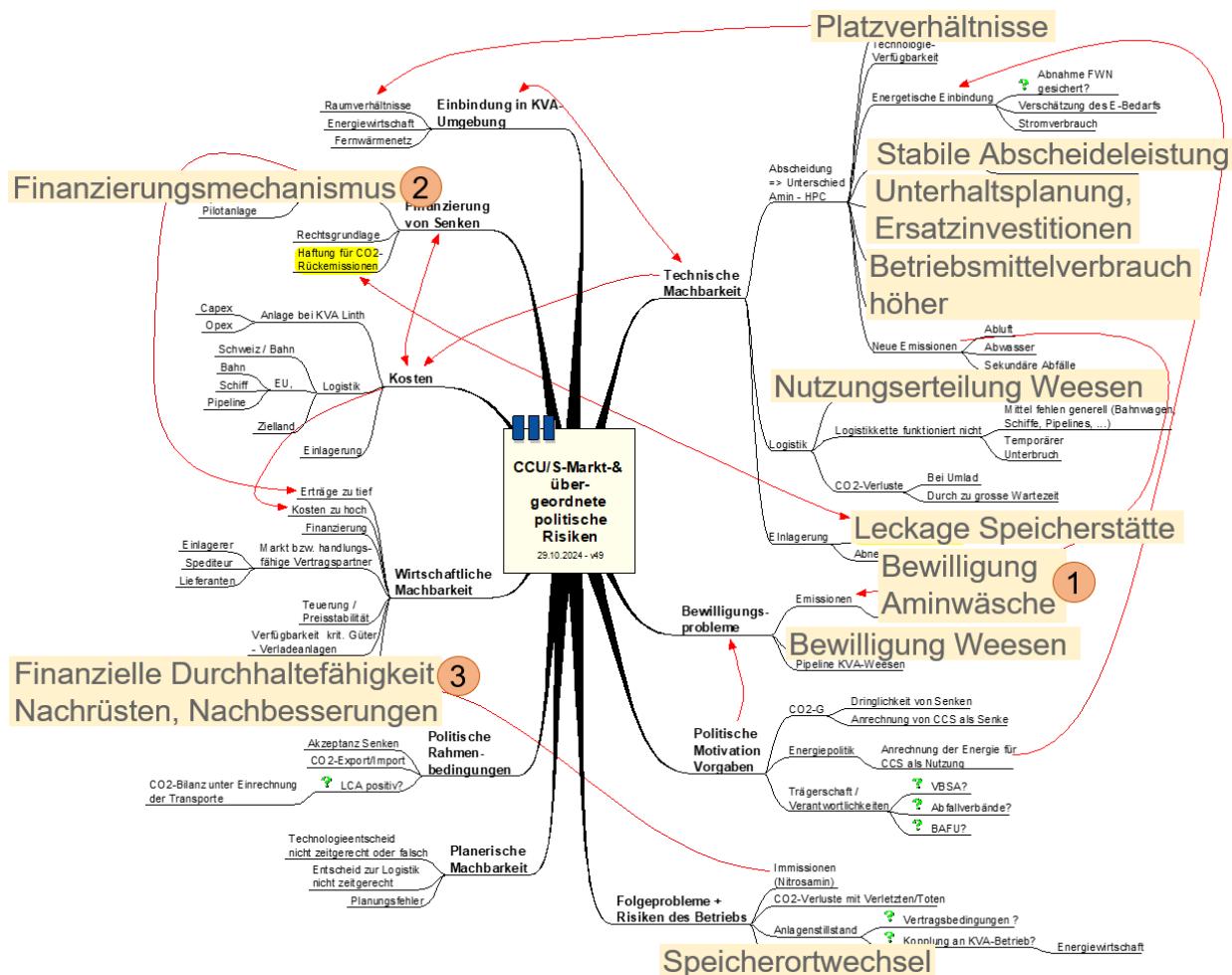


Abbildung 13 - Mindmap mit Überblick über die erfassten übergeordneten Risiken

In Zusammenarbeit mit Jürg Liechti von der Firma Neosys wurde im Rahmen zweier Workshops eine Risikoanalyse durchgeführt. Der Fokus lag dabei auf übergeordneten Risiken, welche das Gesamtprojekt gefährden oder signifikant verzögern können. Das Mindmap in der Abbildung 13 gibt einen Überblick über die erfassten übergeordneten Risiken. Die identifizierten Risiken liegen in den Bereichen:

- Projektkosten und -finanzierung
- wirtschaftliche, technische und planerische Machbarkeit
- politische Rahmenbedingungen und Vorgaben
- Bewilligungsverfahren
- Einbindung der CO₂-Abscheidung in den KVA-Betrieb
- Folgeprobleme und Risiken im Betrieb

Wie Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen, wurden drei Hauptrisiken mit akutem Handlungsbedarf identifiziert. Bei einem dieser drei Risiken handelt es sich um das Bewilligungsverfahren der Aminwäsche bezogen auf die Emissionsthematik. Die anderen zwei Risiken finden sich im Bereich der Projektfinanzierung. Das eine finanzielle Risiko betrifft die Implementierung eines breit abgestützten Finanzierungsmechanismus. Das andere finanzielle Risiko betrifft die finanzielle Durchhaltefähigkeit des Projekts in Bezug auf benötigte Massnahmen nach Inbetriebnahme wie zum Beispiel ein Nachrüsten von Filtern oder Nachbesserungen, die den Betrieb der Abscheideanlage über längere Zeit massiv einschränken oder gar verhindern.

Um die übergeordnete Risikoanalyse abzuschliessen, erstellt Neosys zurzeit einen Kurzbericht. Der Bericht fasst die aus dem Workshop gewonnenen Erkenntnisse und die identifizierten Risiken zusammen und beschreibt den Handlungsbedarf.



Risikomatrix

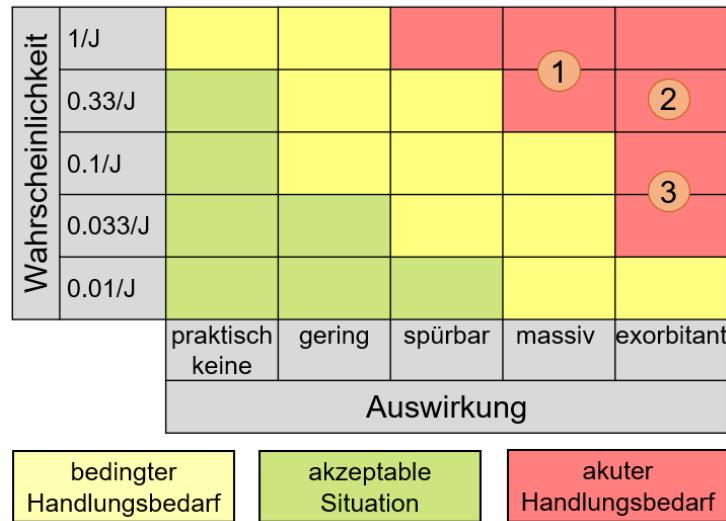


Abbildung 14 – Risikomatrix. Eingezeichnet die drei Hauptrisiken mit akutem Handlungsbedarf.

10. AP 7 – Rechtliches und Bewilligungen

Internationale und übergeordnete rechtliche Themen werden durch das BAFU und im Rahmen der nationalen Arbeitsgruppe zu CCS/NET behandelt.

Für die Bewilligungsthematik beim Projekt der KVA Linth wurde im Rahmen vom Vorprojekt bereits ein frühzeitiger, regelmässiger Austausch mit den zuständigen Stellen beim Kanton Glarus aufgenommen, um allfällige kritische Punkte rechtzeitig zu identifizieren.

Das ZAR-Kompetenzzentrum begleitet die KVA Horgen im Bewilligungsprozess ihres Abscheideprojekts im Bereich der Luftreinhaltung. Zu diesem Thema wurden zahlreiche Gespräche geführt.

Bei der Aminwäsche verbleiben Herausforderungen bei der Bewilligung in den Bereichen Luftreinhaltung und Gewässerschutz. Das BAFU hat einen immissionsseitigen Risikowert/Zielwert für die Luftkonzentration der Summe von Nitrosaminen und Nitraminen von 0.03 ng/m^3 berechnet (Jahresmittelwert). Dieser Wert ist etwa eine Grössenordnung tiefer als die Vorgaben in anderen Ländern, da ein zusätzliches akzeptables Krebsrisiko von 10^{-6} angewendet wurde, wobei in anderen Ländern oft 10^{-5} verwendet wird. Um die Einhaltung dieses Grenzwertes zu belegen, muss mittels einer Ausbreitungsmodellierung abgeschätzt werden, welche Emissionskonzentrationen am Kamin zulässig sind, und der Technologielieferant muss diese Werte garantieren. Da es kein verfügbares Ausbreitungsmodell mit Aminchemie für die Schweizer Topografie gibt, wird eine vereinfachte – und dadurch zusätzlich konservative – Atmosphärenchemie in ein bestehendes Modell implementiert (siehe Abschnitt 4.2). Es summieren sich daher konservative Annahmen in den folgenden Bereichen:

- **Emissionen:** die Lieferanten sind vorsichtig, tiefe Emissionswerte zu garantieren, da ihnen dazu die nötige Betriebserfahrung an KVA-Abgas fehlt.
- **Ausbreitungsmodellierung:** die Datengrundlage für die Modellierung ist beschränkt. Insbesondere die Zersetzung von Nitraminen ist schlecht untersucht. Im Modell der TU-Graz sind bisher zudem starke Vereinfachungen nötig, so wurde z.B. gar keine Zersetzung von Nitrosaminen/Nitraminen berücksichtigt. Überall, wo Daten fehlen, müssen Worstcase-Annahmen gemacht werden.
- **Immissionen:** die Berechnung des Immissions-Zielwerts des BAFU beruht auf der Toxizität von NDMA, eines der am stärksten kanzerogenen Nitrosamine. Dies ist konservativ, da davon auszugehen ist, dass viele der vorkommenden Verbindungen deutlich weniger kanzerogen sind.

Durch diese Summierung von vielen konservativen Annahmen scheint es Stand heute schwierig, die aktuellen Bewilligungsanforderungen im Rahmen eines Baugesuchs zu erfüllen. Auch basierend auf Ausbreitungsberechnungen von Projekten im Ausland mit weniger konservativen Modellen wird der Zielwert des BAFU nicht eingehalten. Messtechnisch lassen sich so tiefe Konzentrationen Stand Heute zudem nicht überprüfen.

Diese Situation ist daher als erhebliche Unsicherheit bei der Bewilligungsfähigkeit bzw. für die Dauer eines Bewilligungsprozesses bei Aminwäsche-Projekten zu beurteilen (siehe Kapitel 9 AP 2.1 Risikoanalyse).

11. AP 8 – Finanzierung

Um mit dem CCS-Projekt bei der KVA Linth die Inbetriebnahme im Jahr 2030 entsprechend der Branchenvereinbarung einhalten zu können, müssen bei der Finanzierung zwei wichtige Meilensteine eingehalten werden:

- i) In den Jahren 2025-2026 werden ca. 8-10 Mio. CHF für die weitere Planung benötigt. Damit die Lieferanten verlässliche Angebote abgeben können, sind in der nächsten Projektphase tiefergehende, sogenannte Front-End Engineering Design Studien, vorgesehen (FEED-Studien). Dieses Vorgehen ist aufgrund der Neuartigkeit der Technologien angezeigt. Damit die Lieferanten dabei im Wettbewerb bleiben, ist geplant, mit zwei Lieferanten solche FEED-Studien durchzuführen und erst danach einen davon für die Lieferung der Anlage auszuwählen.
- ii) 2027 muss für eine Inbetriebnahme im Jahr 2030 die Ausführung gestartet werden. Dazu muss zu diesem Zeitpunkt mindestens die Finanzierung der Investitionskosten zugesichert sein. Auch die Betriebskosten und die diversen Risikoabsicherungen sollten zugesichert sein, damit die langjährigen Verträge mit den diversen Vertragspartnern unterzeichnet werden können (Bahnwagenmiete, Transport, Hubs, Speicherstätte).

Die Finanzierungslösung muss insbesondere auch Risiken während und nach dem Bau der Anlage abdecken. Dies beinhaltet Szenarien, in denen die Prozesskette nicht, oder nur zu erhöhten Kosten betrieben werden kann. Auch allfällige Um- oder Nachrüstungen müssen dabei berücksichtigt werden.

Stand heute ist die Finanzierung nicht gesichert. Falls dies nicht rechtzeitig gelingt, ist die Einhaltung der Branchenvereinbarung gefährdet. Es wird dazu aktuell an einer Finanzierungslösung innerhalb der Branche im Rahmen einer Task-Force des VBSA gearbeitet. Das CO₂-Kompetenzzentrum ist über Walter Furgler in der Task-Force vertreten. Eine wichtige Voraussetzung für diese Lösung ist, dass ein einheitlicher Geldbetrag pro Tonne verbrannten Abfalls bei allen KVA in der Schweiz eingezogen werden kann, um die ersten Projekte zu finanzieren. Gemäß Antwort des Bundesrats auf eine aktuelle Interpellation von VBSA-Präsident und Nationalrat Bastien Girod ist dies zumindest rechtlich zulässig.²⁰

12. Literaturverzeichnis

1. Alicia Breen, Richard Baker, Phillip Behm, et al. Large pilot testing of MTR's membrane-based post-combustion CO₂ capture process. *GHGT-17 Calg*. Published online October 2024.
2. Martin Koller, Alexander Meister, Rüdiger Siebert. Comparison of two different carbon capture technologies (advanced amine and membrane) executed with multi-functional mobile test units at a WtE plant. *GHGT-17 Calg*. Published online October 2024.
3. Seite aus Internet. <https://www.svanteinc.com/press-releases/svante-to-test-groundbreaking-carbon-capture-filter-technology-at-tcm/>.
4. Seite aus Internet. <https://enfinium.co.uk/uk-first-carbon-capture-pilot-on-energy-from-waste-facility-goes-live/>.
5. Allen Lockwood, Corwyn Bruce, Pran Cheruvallath, Wayuta Srisang. Heidelberg Edmonton CCUS – On-Site Piloting Program Update. *GHGT-17 Calg*. Published online October 2024.
6. Morken AK, Pedersen S, Kleppe ER, et al. Degradation and Emission Results of Amine Plant Operations from MEA Testing at the CO₂ Technology Centre Mongstad. *Energy Procedia*. 2017;114:1245-1262. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.1379
7. Languille B, Mikoviny T, Nielsen CJ, Svendsen T, Tednes M, Wisthaler A. PPB-Level Monitoring of Amines and NO₂ at the Klemetsrud CO₂ Capture Pilot Plant. *SSRN Electron J*. Published online 2022. doi:10.2139/ssrn.4294587
8. Morken AK, Nenseter B, Pedersen S, et al. Emission Results of Amine Plant Operations from MEA Testing at the CO₂ Technology Centre Mongstad. *Energy Procedia*. 2014;63:6023-6038. doi:10.1016/j.egypro.2014.11.636
9. Gerard Lombardo, Muhammad Ismail shah, Berit Fostås, et al. Results from testing of a Brownian diffusion filter for reducing the aerosol concentration in a residual fluidized catalytic cracker flue gas at the Technology Centre Mongstad. *GHGT-14 Aust*. Published online October 2018.
10. Juliana Monteiro, Tanya Srivastava, Jasper Ros, et al. AEROSOL EMISSION AT A POST COMBUSTION CO₂ CAPTURE PLANT AT TWENCE (WTE FACILITY). *TCCS-11 Nor*. Published online June 2021.
11. Eirini Skylogiannia, Joost Kiewik, Mathijs Vos, Juliana Monteiro. Abstract-Experience from the 3-year BDU operation in Twence's CO₂ capture pilot plant. *GHGT-17 Calg*. Published online October 2024.
12. Breider F, Gachet Aquillon C, von Gunten U. A survey of industrial N-nitrosamine discharges in Switzerland. *J Hazard Mater*. 2023;450:131094. doi:10.1016/j.jhazmat.2023.131094
13. Reyes-Lingjerde A. Co₂ Capture and Work Environmental Sampling - Lessons Learned. *SSRN Electron J*. Published online 2021. doi:10.2139/ssrn.3813772
14. Ros J, Veronezi Figueiredo R, Srivastava T, et al. Results of the 2020 and 2021 campaigns of the commercial carbon capture plant at AVR Duiven. *SSRN Electron J*. Published online 2022. doi:10.2139/ssrn.4282665
15. Skylogianni E, Kiewik J, Vos M, Garcia Moretz-Sohn Monteiro J. Experience from the 3-year BDU Operation in Twence's CO₂ Capture Pilot Plant. Published online October 22, 2024. doi:10.2139/ssrn.5015948

16. Khakharia P, Kvamsdal HM, da Silva EF, Vlugt TJH, Goetheer E. Field study of a Brownian Demister Unit to reduce aerosol based emission from a Post Combustion CO₂ Capture plant. *Int J Greenh Gas Control*. 2014;28:57-64. doi:10.1016/j.ijggc.2014.06.022
17. Viola Becattini, Johannes Burger, Julian Nöhl, et al. Rolling-out pioneering carbon dioxide capture and transport chains from inland European industrial facilities: A techno-economic, environmental, and regulatory evaluation. *Renew Sustain Energy Rev* 205. Published online August 2024.
18. Andrew Cavanagh, Toby Lockwood. Carbon Capture & Storage 2030: As the market takes shape, can Europe's CO₂ storage projects meet growing demand? *GHGT-17 Calg*. Published online October 2024.
19. Declaration of Intent between the Ministry of Energy and the Ministry of Climate and Environment of Norway and the Swiss Federal Departement of Environment, Transport, Energy and Communications. Published online May 2024.
20. Seite aus Internet. <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefte?AffairId=20243958>. Published online November 2024.