

OKTOBER 2021
KEFM

CCS - INTERNATIONALE ERFARINGER - SIKKERHED, NATUR OG MILJØ



COWI

OKTOBER 2021
KEFM

CCS - INTERNATIONALE ERFARINGER - SIKKERHED, NATUR OG MILJØ

PROJEKTNR.

A231499

DOKUMENTNR.

A231499-01

VERSION

04

UDGIVELSESDATO

15 oktober 2021

BESKRIVELSE

UDARBEJDET

NMSC, LOVGX,
LOKL, EMJT, PEFI,
MMK

KONTROLLERET

LNKR/CCRN

GODKENDT

MMK

INDHOLD

1	Baggrund og formål	7
2	Metode, afgrænsning og struktur	9
2.1	Metode og afgrænsning	9
2.2	Struktur	11
3	Opsummering og perspektivering	12
3.1	Summary	12
3.2	CO ₂ -fangstanlæg – sikkerhed, miljø og natur	15
3.3	CO ₂ -mellemlager - sikkerhed, miljø og natur	17
3.4	CO ₂ geologisk lagring – sikkerhed, natur og miljø	18
3.5	CO ₂ -transport infrastruktur	21
4	Oversigt over relevante internationale projekter	24
5	Sikkerheds- og miljømæssige forhold	30
5.1	Kuldioxid (CO ₂)	30
5.2	Aminer	34
5.3	Ammoniak (NH ₃)	34
5.4	Oxygen (O ₂)	35
6	CO ₂ -fangstanlæg - Vurdering af sikkerhed, natur og miljø	37
6.1	Sikkerhed	37
6.2	Miljø	38
6.3	Natur	43
7	Mellemlager faciliteter - Vurdering af sikkerhed, natur og miljø	44
7.1	Sikkerhed	44

7.2	Miljø	45
7.3	Natur	46
8	Geologisk lagring af CO ₂ på land og til havs - Vurdering af sikkerhed, natur og miljø	48
8.1	Sikkerhed	48
8.2	Miljø	49
8.3	Natur	53
9	Transport af CO ₂ på land og til havs - Vurdering af sikkerhed, natur og miljø	63
9.1	Sikkerhed	63
9.2	Miljø	64
9.3	Natur	66
10	Referencer	68

BILAG

Bilag A	Teknisk beskrivelse af CCS anlæg
A.1	CO ₂ -fangstanlæg
A.2	Mellemlager-faciliteter
A.3	Geologisk lagring af CO ₂ på land og til havs.
A.4	Transport af CO ₂ på land og til havs
Bilag B	Opsummering af CCS erfaringer med sikkerhed, miljø og natur
Bilag C	Longlist over litteratur gennemgået

1 Baggrund og formål

I klimaaftalen for energi og industri mf. (juni 2020) aftalte et bredt flertal af Folketingets partier, at der fremover skal være mulighed for fangst, transport og lagring af CO₂ i Danmark og for at transportere indfanget CO₂ på tværs af landegrænser under forudsætning af, at det foregår under forsvarlige sikkerheds- og miljømæssige forhold.

Dette er i juni 2021 fulgt op af en bred aftale mellem regeringen og en lang række partier i Folketinget om en køreplan for lagring af CO₂. En aftale, hvori det af parterne anerkendes, at Carbon Capture and Storage (CCS) er et centralt virkemiddel for at afbøde klimaforandringerne internationalt og som bakker op om, at CCS skal spille en væsentlig rolle i bestræbelserne for at nå de nationale klimamål. Aftalen understreger, at der skal skabes et grundlag for sikker og miljømæssig forsvarlig lagring af CO₂ i undergrunden, og at der skal sættes gang i yderligere undersøgelse af lagringsfaciliteter i Danmark [1].

Formålet med denne rapport er at beskrive internationale erfaringer med CCS med hensyn til sikkerheds-, natur- og miljømæssige forhold, således at dette kan indgå i det videre arbejde med sikring af disse forhold i forbindelse med dansk anvendelse af CCS som klimavirkemiddel. Rapporten skal dermed også forholde sig til, hvorvidt de internationale erfaringer er relevante i en dansk sammenhæng.

Rapporten skal indgå som baggrund og afgrænsning af det videre arbejde med udvikling af CCS i Danmark, hvilket vil omfatte strategisk miljøvurdering af udbud af arealer for injektion og geologisk lagring af CO₂ i undergrunden samt miljøvurdering og miljøgodkendelse af helt konkrete projekter for CCS.

CCS omfatter fangstanlæg på CO₂ punktkilder, infrastruktur til transport, mellem-lagerfaciliteter samt permanent geologisk lagring i undergrunden.

CO₂-fangst er velkendt teknologi som siden først i 1970'erne har været anvendt i olieindustrien specielt USA til at forbedre indvindingspotentiale i olielagre (enhanced oil recovery (EOR)).

Siden 1996 har CO₂-fangst og lagring været anvendt i Norge til at reducere CO₂-udledninger fra indvinding af gas i Nordsøen. Den opfangede CO₂ sendes til permanent lagring i strukturer tæt på gasindvindingsområderne i Sleipner og Snøhvitfeltene.

CO₂-fangst anvendes i Danmark i forbindelse med opgradering af biogas og har på forsøgsbasis være afprøvet på Esbjergværket. En mindre del af den opsamlende CO₂ anvendes i medicinal- og fødevarerindustri.

Transport af CO₂ mellem opsamlings- og anvendelsessted sker for nuværende i Danmark primært med tankvogne. Der er endnu ikke foretaget geologisk lagring af CO₂ i Danmark.

På globalt plan opererer der i dag 27 kommercielle CCS-faciliteter med en samlet kapacitet til at fange og lagre ca. 40 mio. tons CO₂ per år [2]. De er primært baseret i USA altovervejende som en del af øget olieindvinding (EOR).

Herudover eksisterer en række pilot- og demonstrationsprojekter verden over, med fokus på at udvikle og teste teknologi samt projekter i mere eller mindre moden udvikling. Blandt andet er man i Norge påbegyndt et feasibility- og konceptstudie for Longship projektet. Det er en realisering af et fuldskala CCS projekt med CO₂-fangst, skibstransport, mellemlagring og transport til offshore lager via rør.

2 Metode, afgrænsning og struktur

2.1 Metode og afgrænsning

Udgangspunktet for rapporten har været tilgængelig litteratur, forskningsrapporter, konsulentrapporter samt information fra diverse organisationer (f.eks.: Global CCS Institute, IEA, UK EPA) vedr. internationale CCS-projekter inkl. eventuelle pilot- og testprojekter.

En komplet litteraturliste fremgår af bilag C.

For at indkredse relevante anlæg og projekter er der indledningsvis lavet en oversigt over internationale CCS-anlæg inkl. pilot og testanlæg samt projekter på bedding, hvorfra erfaringer kunne være relevante.

Rapporten beskriver, i det omfang de foreligger, internationale erfaringer for alle de enkelte led i CCS-kæden, det vil sige: 1) CO₂-fangst, 2) mellemlagring og 3) lagring samt 4) infrastruktur til transport.

For hver af de forskellige led i kæden (1-4) er redegjort for erfaringer med hensyn til sikkerhed, miljø og natur ved forundersøgelser, anlæg og etablering, drift og afvikling.

Der hvor det ikke har været muligt at identificere eksplicite internationale erfaringer er det anført.

2.1.1 Relevans for danske forhold

Der er i erfaringsopsamlingen fokuseret på de anlægstyper/metoder, som vurderes at være relevante i dansk sammenhæng, det vil sige, der er ikke medtaget erfaringer fra brug af CO₂ til et øge olieudvinding (EOR), og der er fokuseret på CO₂ fangstmetoder, som dels er teknisk modne, kommercielle samt relevante for større danske punktkilder og biogasanlæg.

Yderligere er der i forbindelse med opsummering og perspektivering af de internationale erfaringer med sikkerhed, miljø og natur vurderet og taget stilling til relevans i en dansk kontekst. Det kan f.eks. være, hvorvidt de beskrevne miljøpåvirkninger er sammenlignelige eller hvorvidt påvirkede naturtyper og habitater er relevante og sammenlignelige.

2.1.2 Tekniske anlæg

CO₂-fangst vil kunne være relevant for større punktkilder, hvor der ønskes en reduktion af den direkte udledning af CO₂. Det kan være fra eksempelvis cementproduktion, kraftvarmeanlæg (inklusiv de affalds- og biomassefyrede anlæg) samt biogasanlæg.

CO₂-fangstteknologier afgrænses specifikt til anlæg med højteknologisk modenhed, som allerede er eller er tæt på at være kommercielt tilgængelige, det vil sige:

- > Rensning af røggas (post combustion) ved hhv. aminvask og nedkølet ammoniak (oftest benævnt chilled ammonia)
- > Dannelse af røggas med høj CO₂-koncentration ved forbrænding ved iltrige betingelser (oxyfuel).

Mellemlagerfaciliteter vil omfatte lagring i tanke samt med stor sandsynlighed kondensering / liquefaction-faciliteter.

Lagring af CO₂ finder sted i geologiske strukturer med stort porevolumen (f.eks. i sandsten) overlejret af et impermeabelt lag (f.eks. lersten). Lagring vil under danske forhold typisk skulle ske 1-2 km. under overfladen. Potentielt egnede strukturer til lagring i Danmark findes både offshore, tæt på land og på land. Der overvejes både CO₂-lagring i tidligere oliegasfelter og i nye uafprøvede strukturer.

I Bilag A fremgår en mere detaljeret beskrivelse af de forskellige tekniske anlæg. De er så vidt muligt beskrevet medhensyn til forundersøgelser, anlæg og etablering, drift og afvikling.

2.1.3 Sikkerhed

Sikkerhed omfatter de aspekter ved CCS, som knytter sig til pludselige hændelser, som specifikt har med håndteringen af CO₂ og tilknyttede hjælpestoffer at gøre, og som kan udgøre en fare for menneskers liv og helbred. Hændelserne medfører enten udsættelse for farlige stoffer, fysiske påvirkninger eller for begge dele. Påvirkning af natur og miljø ved pludselige hændelser behandles under henholdsvis natur- og miljøafsnittene.

Generelle arbejdsmiljømæssige farer fra aktiviteter som konstruktionsarbejde på store industriprojekter, herunder offshore installationer, transport af gods på landevej, jernbane og skib og transport af stoffer i rørledninger, er ikke behandlet, medmindre, der er forhold, som er specifikke for CCS.

2.1.4 Miljø

Under miljø indgår udledninger til luft, vand og jord. Herudover indgår energiforbrug og CO₂ aftryk, brug af ressourcer samt affald.

2.1.5 Natur

Under natur indgår vurdering af inddragelse af arealer samt påvirkninger af arter, habitater og økosystemer som følge fysisk aktivitet, støj, emissioner til luft, vand og jord og uheld med udledning af farlige stoffer. Der inkluderes både de midlertidige og de mere langsigtede påvirkninger.

2.2 Struktur

For at indkredse de internationale anlæg og projekter, hvorfra det vil være relevant at indhente erfaringer er der i afsnit 3 lavet en oversigt over internationale CCS-anlæg inkl. pilot og testanlæg samt projekter på bedding.

Med udgangspunkt i dels de projekter der findes internationalt samt de tekniske anlæg og de forskellige faser (forundersøgelser, anlæg etablering, drift og afvikling) beskrives ud fra relevante referencer og erfaringer de væsentligste sikkerheds-, miljø- og naturmæssige forhold.

De sikkerhedsmæssige forhold er for alle de enkelte led i CCS-kæden relateret til større udslip af farlige stoffer, f.eks. CO₂. For at undgå gentagelser er der i afsnit 5 udarbejdet en generel beskrivelse af de relevante stoffer samt de sikkerheds- og miljømæssige forhold i forbindelse med større udslip.

Rapporten er opbygget således, at der startes med erfaringer for CO₂ fangst, CO₂ mellemlager, CO₂ lagring og til sidst medtager CO₂ infrastruktur.

I Bilag A fremgår en beskrivelse af de tekniske anlæg fordelt på faserne forundersøgelser, anlæg og etablering, drift og afvikling.

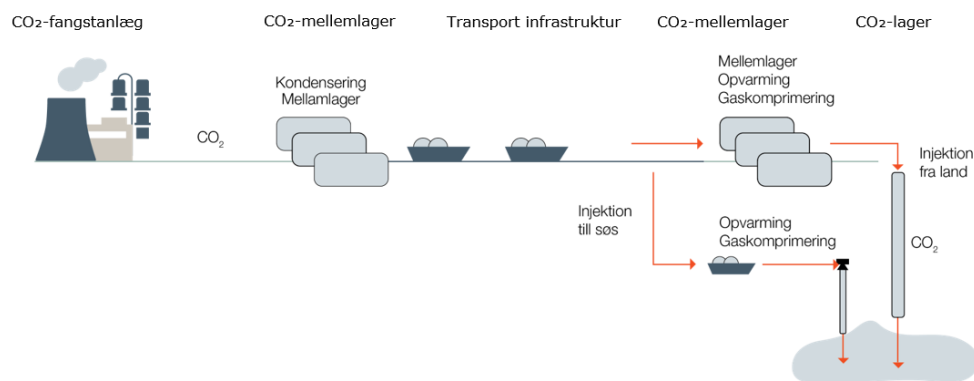
I Bilag B er lavet en opsummering af de væsentligste sikkerheds-, natur- og miljømæssige forhold identificeret i undersøgelsen.

I Bilag C fremgår en "longlist" over den samlede litteratur, der er gennemgået i forbindelse med udarbejdelse af rapporten.

3 Opsummering og perspektivering

Nedenfor præsenterer vi opsummeringen af de væsentligste erfaringer vedrørende sikkerhed, miljø og natur for CCS¹. Erfaringerne er identificeret ved en gennemgang af relevante internationale projekter og erfaringer. Erfaringerne er opsummeret dels meget overordnet i afsnit 3.1, dels lidt mere i detalje for hvert enkelt led i CCS-kæden i afsnit 3.2-3.5. Endvidere henvises til bilag B for en samlet oversigtlig opsummering af sikkerheds-, miljø- og naturmæssige forhold ved CCS.

Figur 1 giver et overblik over de enkelte led i CCS værdikæden. Den endelige konfiguration kan se ud på mange måder og vil afhænge af det konkrete projekt.



Figur 1: Illustration af de enkelte led i en CCS værdikæde

3.1 Summary

Helt generelt og på tværs af de enkelte led og projekter er erfaringerne med hensyn til CCS og sikkerheds-, miljø- og naturmæssige forhold:

- > Der er international erfaring med CCS omfattende både offshore og onshore geologisk lagring af CO₂
- > Langt de fleste kommercielle CCS projekter er etableret med henblik på Enhanced Oil Recovery
- > CO₂-fangst er en moden teknologi, og der er leverandører på markedet, der kan levere anlæg, som efterlever krav til sikkerhed, miljø og natur
- > Der anvendes meget energi til CO₂-fangst, konditionering og transport, og det er vigtigt at have fokus på energieffektivitet og optimering i hele kæden

¹ CCS: Carbon Capture and Storage

- > Internationale projekter for CO₂ lagring har tilknyttet et omfattende monitoreringsprogram både i forbindelse med forundersøgelse, drift og afvikling af lageret
- > Overvågning udført i forbindelse med de internationale lagre har vist, at CO₂ forbliver sikkert i lageret, og der er ikke konstateret CO₂-udslip fra nogen af de eksisterende geologiske lagre.

Desuden viser erfaringerne at anlæg, etablering samt afvikling af CO₂-fangstanlæg og mellemlagerfaciliteter sker som for andre typiske industri-/procesanlæg og at de ikke medfører væsentlige specifikke sikkerheds-, miljø- og naturmæssige påvirkninger. Påvirkningerne er primært relateret til et arealbehov og eventuel inddragelse af beskyttede eller sårbare naturtyper samt til forstyrrelser, som følge af fysiske indgreb, trafik og støj. Påvirkningerne af miljø og natur vil afhænge af den konkrete placering i forhold til beskyttede områder og nærhed til nærmeste naboer.

Under drift af CO₂-fangstanlæg er den væsentligste bekymring identificeret i de internationale referencer, de aminbaserede anlægs udledninger til luft. En målrettet indsats har ført til en udvikling af fangstanlæggene, de aminer der anvendes samt metoderne til at vurdere den miljømæssige påvirkning. I Norge er man langt fremme med etablering af større fangstanlæg på landbaserede kilder, som er godkendt af de norske myndigheder.

I drift af anlæggene skal der ved større oplag af CO₂ endvidere tages hensyn til de risikomæssige forhold ved placering af anlæggene.

I forhold til sikkerhed og geologisk lagring af CO₂ er erfaringerne positive. Der er ikke fundet eksempler på uheld og større udslip af CO₂ fra geologiske CO₂ lagre, ej heller store udsivninger på grund af migrering af den oplagrede CO₂.

Det vurderes, at godt kendskab til lageret og dets egenskaber, løbende monitorering samt placering i områder med lav tektonisk aktivitet betyder, at der er lav risiko for større udslip af CO₂.

Seismiske undersøgelser er en vigtig aktivitet i monitorering af lagrene og der er i de internationale referencer fokus på denne aktivitet og de afledte påvirkninger på fisk og marine pattedyr. Det er vurderet, at den skadelige påvirkning af fisk og pattedyr som følge af seismiske undersøgelser og overvågning typisk medfører en lokal, midlertidig påvirkning, som kan reduceres med passende afværgeforanstaltninger.

Påvirkningen skal dog ses i sammenhæng med øvrige aktiviteter og marine påvirkninger i samme influensområde. Afværgeforanstaltninger som medfører, at marine pattedyr skræmmes væk fra et område, forudsætter eksempelvis, at der er upåvirkede områder i nærheden.

Ved seismiske undersøgelser på land anvendes store og tunge køretøjer, der kan sætte aftryk i landskabet, beskadige vegetation og det øverste jordlag. Der kan

også være tale om forstyrrelser af fugle- og dyrevildt samt øvrige beskyttede arter. Påvirkningerne kan reduceres med afværgeforanstaltninger, som eksempelvis tidsmæssig planlægning af arbejdet for at undgå sårbare perioder, udlæg af køreplader m.m.

I forbindelse med forundersøgelser og anlæg af de geologiske lagre beskrives endvidere påvirkninger som fysiske forstyrrelser af havbund, udledninger til vand af kemikalier, boremudder, borespåner og cement samt støj, emissioner og energiforbrug fra skibe og borerig. Det er påvirkninger som er sammenlignelige med dem som identificeres og håndteres i forbindelse med olie- og gasudvinding i Nordsøen.

Påvirkningerne i forbindelse med anlæg og etablering af geologisk lager på land vurderes at være mindre end for offshore lagre. Specielt seismiske undersøgelser vil ikke have samme påvirkning på land, da lyd propagerer hurtigere og lænere i vand end i atmosfærisk luft [3]. På land vil der endvidere i langt større omfang være mulighed for at opsamle affald og udledninger.

Påvirkninger fra drift af et geologisk lager inkluderer diffus udledning af CO₂ fra ventilering, tryksatte koblinger mv, støj fra udstyr, udledning af kemikalier samt energiforbrug og emissioner.

Væsentligheden af de miljø- og naturmæssige påvirkninger både offshore og på land vil afhænge af den konkrete placering herunder nærheden til f.eks. § 3 lokaliteter, truede arter, beskyttede områder samt områder med beboelse.

I forbindelse med transport af CO₂ er påvirkningerne fra skibs-, tog- og lastbilstransport primært støj og emissioner. Ved etablering og placering af rørledninger, vil der være en permanent fysisk ændring og påvirkning langs tracé, både hvis det sker offshore og på land. Herudover vil der være en række mere midlertidige påvirkninger i anlægsfasen som støj, energiforbrug og emissioner samt lys. Etableres rørene til havs kan der endvidere opstå risiko for midlertidig spredning af sediment samt midlertidig forstyrrelse af vandsøjlen.

De natur- og miljømæssige påvirkninger vil afhænge af den konkrete placering af transportkorridoren herunder nærheden til f.eks. § 3 lokaliteter, truede arter, beskyttede områder og boliger.

Nedenfor gennemgås de væsentligste sikkerheds-, miljø- og natur forhold i hvert af de fire led i værdikæden vist i Figur 1: CO₂-fangst, mellemlager, geologisk lagring og CO₂-transport.

3.2 CO₂-fangstanlæg – sikkerhed, miljø og natur

CO₂ fangstanlæg vil typisk placeres i nærhed af en CO₂ punktkilde og er dermed en del af et større industrielt anlæg. Både rensning af røggas (post combustion) ved hhv. aminvask og nedkølet ammoniak samt oxyfuel processen kan etableres som en del af nye anlæg eller etableres som retrofit på eksisterende punktkilder.

CO₂ fangst er kendt teknologi og de internationale erfaringer med sikkerhed, miljø og natur vil kunne bruges i dansk sammenhæng, da teknologien i hovedtræk vil være ens.

For CO₂-fangstanlæg vil de tekniske forundersøgelser typisk skulle afdække muligheder for udnyttelse af overskudsvarme, afdækning af kølebehov samt integration med damp- og fjernvarmesystemer for at sikre høj energieffektivitet. Ved retrofit kan der være behov for, at der samtidig etableres yderligere rensning af røggas for at få fangstanlægget til at fungere.

Forundersøgelser knyttet til fangstanlæg forventes ikke i sig selv at have væsentlige sikkerheds-, miljø- og naturmæssige forhold. Det forventes, at CO₂ fangstanlæggene også i dansk sammenhæng typisk vil etableres som en del af et større industrieanlæg.

Det skal i forbindelse med planlægning sikres, at den valgte placering sker under hensyn til de risiko-, miljø- og naturmæssige forhold, som gælder på den enkelte lokalitet. Det nødvendige plangrundlag skal tilvejebringes, og de nødvendige tilladelser indhentes.

Anlæg og etablering af CO₂-fangstanlæg vil foregå som for andre typiske industri-/procesanlæg. På basis af de internationale erfaringer vurderes anlæggene ved anlæg og etablering ikke at omfatte væsentlige og specifikke sikkerheds-, miljø- og naturmæssige forhold.

Under drift er den væsentligste bekymring, som er identificeret i de internationale referencer, de aminbaserede anlægs udledninger til luft. Med røggassen kan der forekomme emissioner af amin, ammoniak (NH₃), flygtige organiske stoffer (VOC) samt toksiske nitrosaminer og nitraminer fremkommet ved reaktion med NO_x. For chilled ammonia processen er det primært udledning af ammoniak, der nævnes.

Der er erfaringer fra Norge og England, som man med fordel kan drage nytte af i en dansk sammenhæng.

I Norge har man udviklet en metode (toolbox) til at vurdere udledninger til luft, herunder både den direkte emission, koncentrationer af forurenende stoffer i omgivelserne (immissioner) samt deposition. Folkhelseinstituttet har i den forbindelse sat grænseværdier for koncentration af nedbrydningsprodukter i omgivelserne. Den løbende udvikling af CO₂-fangstmetoder og anlæg har betydet, at flere leverandører i dag er i stand til at levere anlæg, som lever op til de norske krav.

I Storbritannien har Environment Agency i 2021 udgivet et BAT Review og en vejledning for CO₂-fangst og i samme anledning defineret grænseværdier for luft for både aminen MEA og nedbrydningsproduktet NDMA.

I dansk sammenhæng er der allerede i forvejen defineret B-værdier for enkelte aminer, som kan bruges i forbindelse med godkendelse af anlæg. Der foreligger dog p.t. ikke B-værdier for nedbrydningsprodukterne Nitrosaminer og Nitraminer og ej heller for alle aminer, som erfaringsmæssigt anvendes til CO₂-fangstanlæg.

Der foreligger i dansk sammenhæng, som grundlag for godkendelser, generelle metoder for beregning af immission og også deposition af udvalgte stoffer. Det skal vurderes, hvorvidt disse er brugbare, eller om der skal udvikles nye metoder inkl. vejledninger. Der kan i den sammenhæng hentes inspiration i Norge, som allerede har godkendt anlæg og i Storbritannien som via BAT-Review for CO₂ fangstanlæg også har sat grænseværdier for udvalgte stoffer.

For fangstanlæg med chilled ammonia skal der tilsvarende være foranstaltninger, der reducerer udledning af ammoniak (NH₃), og som sikrer, at anlægget lever op til gældende grænseværdier. Ammoniak er et kendt stof, som der findes gængse metoder og grænseværdier til at vurdere på basis af.

Der vil være behov for i de konkrete tilfælde at vurdere, om de aminbaserede anlæg og anlæg med ammoniak bliver omfattet af Risikobekendtgørelsen.

Den primære problemstilling i forhold til et fangstanlæg baseret på oxyfuel er tilstedeværelsen af rent ilt, idet ilt er brandnærende. Ved oplag af ilt i mængder over 200 ton vil anlæg være kolonne 2 anlæg og dermed være omfattet af Risikobekendtgørelsen.

I de internationale referencer nævnes energiforbrug og det relaterede CO₂-footprint som faktorer, der potentielt kan udgøre en væsentlig miljøpåvirkning for CO₂ fangstanlægget. Energiforbruget vil afhænge dels af fangstmetoden, men også af integrationen med øvrige processer samt muligheden for at komme af med varme til f.eks. fjernvarme.

Der er ikke via de internationale referencer identificeret væsentlige påvirkninger på natur af CO₂-fangstanlæg. Og der er ikke fundet referencer, der meget specifikt har redegjort for den naturmæssige påvirkning af emissioner og eventuelle depositioner.

I en dansk sammenhæng vil anlæggets deposition af giftige stoffer skulle vurderes i forhold til en konkret placering, nærhed til sårbare naturområder samt eventuelle tålegrænser.

Der er ikke fundet eksempler i de internationale referencer for CO₂-fangstanlæg, der ved uheld har resulteret i et større udslip af CO₂, aminer eller andre forurenende stoffer.

Den stående mængde CO₂ i et fangstanlæg vurderes at være forholdsvis lille, da CO₂ først i forbindelse med mellemlagring komprimeres og evt. køles. Muligt udslip af CO₂ fra fangstanlæg i forbindelse med lækage vurderes derfor typisk at være begrænset. Det bør dog også vurderes for de konkrete anlæg.

For de fangstanlæg, hvor der sker en kondensering af CO₂, kan køleenheden indeholde ammoniak (NH₃), hvilket i dansk sammenhæng kan betyde, at anlægget bliver omfattet af Risikobekendtgørelsen.

Afvikling af et CO₂ fangstanlæg vil skulle forberedes og effektueres som for andre typiske industri-/procesanlæg, og der er ikke via de internationale erfaringer identificeret væsentlige specifikke sikkerheds-, miljø- og naturmæssige forhold.

3.3 CO₂-mellemlager - sikkerhed, miljø og natur

Mellemlager-faciliteter vil typisk skulle etableres i nærheden af CO₂-punktkilder og -fangstanlæg og på eller i umiddelbar nærhed af havne- og/eller industriområder, hvor transport med skib er mulig. Mellemlager-faciliteter vil formentlig omfatte kondensering / liquefaction-faciliteter og lagring i tanke.

Lagerkapaciteten på mellemlageret vil typisk afhænge af lastbilernes eller skibenes cyklustid.

Det skal i forbindelse med planlægning sikres, at den valgte placering sker under hensyn til de risiko-, miljø- og naturmæssige forhold, som gælder på den enkelte lokalitet. Det nødvendige plangrundlag skal tilvejebringes, og de nødvendige tilladelser indhentes.

Specielt de sikkerhedsmæssige forhold, det vil sige risiko for større udslip af CO₂, skal vurderes. I det norske Northern Lights projekt² er der for mellemlageret beregnet stedbunden risiko for området omkring, som er holdt op imod acceptkriterier for forskellig anvendelse. Det vil være relevant at udføre noget tilsvarende for fremtidige, større mellemlagre i Danmark.

Det skal anføres, at der ikke i de internationale referencer er fundet eksempler på uheld med større udslip af CO₂ fra CO₂-mellemlagre.

Anlæg, etablering, drift og afvikling af CO₂-mellemlagre vil foregå som andre typiske industri-/procesanlæg. I drift vurderes de væsentligste miljømæssige forhold at være støj og trafik til og fra anlægget.

² Northern Lights Projektet (NLP) er en del af det norske Langskip CCS projekt. NLP omfatter skibstransport af CO₂ fra punktkilder til mellemlager, CO₂-mellemlager i tanke, en offshore rørledning ud til en undersøisk satellit, hvor der sker injektion af CO₂ i undersøisk lager.

For de mellemlagre, hvor der sker en kondensering af CO₂, kan køleenheden indeholde ammoniak (NH₃), hvilket i dansk sammenhæng kan betyde at anlægget bliver omfattet af Risikobekendtgørelsen og at der herudover kan være risiko for spild, eller udslip af ammoniak.

Naturpåvirkningen ved etablering og drift af mellemlagerfaciliteter vil afhænge af anlæggets placering i forhold til eksisterende sårbar natur og vil primært være relateret til et arealbehov og eventuel inddragelse af beskyttede eller sårbare naturtyper samt til forstyrrelse af beskyttede arter, som følge af fysiske indgreb, trafik og støj.

3.4 CO₂ geologisk lagring – sikkerhed, natur og miljø

Et geologisk lager består af en række elementer:

- > et reservoir, dvs. et geologisk lag/ bjergart med en vis porøsitet, f.eks. en sandsten
- > en "cap rock"/forsegling, dvs. en impermeabel bjergart som f.eks. lersten og
- > en lukning, dvs. en afgrænsning af reservoiret i geologiske strukturer som f.eks. antiklinaler/ domer, forkastningsblokke (forskudte jordlag) eller stratigrafiske afgrænsede lag.

Når CO₂ injiceres i et reservoir, vil det presse formationsvandet væk og bevæge sig ind i porerummet på bjergarten.

For at sikre at CO₂ forbliver i væskefase må det opbevares ved tryk større end dets kritiske tryk som er 73,9 bar, hvilket vil sige i en minimumsdybde på ca. 800 m.

I reservoiret er der 4 mekanismer, der arbejder sammen for at "fange" CO₂.

- 1) en strukturel fælde,
- 2) kapillær fangst dvs. CO₂ bliver immobiliseret i porerummet,
- 3) opløsning af CO₂ i formationsvandet, samt
- 4) reaktion mellem opløst CO₂ og bjergartsminerallerne, hvorved nye mineraler dannes.

CO₂ lagrene ved Sleipner Vest og Snøhvit i Norge er eksempler på offshore CO₂ sandstenslagre, som er sammenlignelige med nogle af de potentielle danske lagre i Nordsøen.

Udtømte olie- og gasfelter kan potentielt også anvendes som kommende CO₂-lagre. Fordelen ved dem er, at det allerede er bevist, at forseglingen virker over geologisk tid, og at der eksisterer en stor mængde data og viden om reservoiret. Yderligere er der et potentiale for brug af eksisterende infrastruktur.

Indsamling af seismiske data og borer er en fundamental del af forundersøgelserne for at forstå tilstedeværelsen, udbredelsen og kvaliteten af geologiske lagre.

Offshore foregår seismisk dataindsamling med specialbyggede seismiske skibe. Til lands benyttes typisk vibratorlastbiler til at udsende lydbølger, som opsamles af geofoner på overfladen. For at påvise type af bjergart og undersøge egenskaberne af reservoir og forsegling kræves tillige boring af en brønd.

I forbindelse med injektion skal en ny brønd bores eller en eksisterende boring konverteres til CO₂-injektion.

CO₂ er korrosiv og internationale erfaringer viser, at den vigtigste grund til at injektionsbrønde fejler skyldes, at der er brugt konstruktionsmaterialer, som ikke er tilpasset CO₂. Bekymringerne er typisk rettet mod cementen og eventuel reaktion med CO₂.

Risikofaktorer ved boring er også, at man ved boring rammer lommer af kulbrinter i form af olie eller gas eller lommer af naturligt forekommende CO₂, som kan resultere i et blowout. Sandsynligheden vurderes som lav, og der er ikke identificeret internationale eksempler på sådanne uheld i forbindelse med boring til geologisk CO₂ lagring. Samtidig vil der i dansk sammenhæng forud for eventuelle borer skulle udføres seismiske undersøgelser, som vil give information om eventuel forekomst af olie, gas og CO₂ i undergrunden. Yderligere er der ikke kendskab til naturligt forekommende CO₂ i dansk undergrund.

Driften af selve CO₂ lageret består af injektion af CO₂ og monitorering af reservoiret både til havs og på land. For selve reservoiret og forseglingsbjergarten gøres det med seismiske undersøgelser. Også andre metoder benyttes, f.eks. mikrogravimetrisk undersøgelse, hvor ændringer af tyngdeforholdene måles, idet CO₂ er lettere end det saline vand.

På land er monitorering af CO₂'s mulige indtrængning i grundvandet også nødvendigt. Monitoreringen består typisk af et antal overvågningsboringer, hvorfra der kan indsamles flowdata og tages jævnlige vandprøver.

Der er ikke fundet eksempler på uheld og større udslip af CO₂ fra geologiske CO₂ lagre, ej heller store udsivninger på grund af migrering af den oplagrede CO₂. Det vurderes, at netop godt kendskab til lageret og dets egenskaber, løbende monitorering samt placering i områder med lav tektonisk aktivitet betyder, at der er meget lav risiko for større udslip af CO₂.

Internationale erfaringer rapporterer om fortsat overvågning efter injektionsbrønden er afviklet. Monitorering udført fra 1996 og frem til 2017 af CO₂ udledning fra Sleipner og også på andre lagre har alle vist, at CO₂ forbliver sikkert i lageret.

De væsentligste miljømæssige påvirkninger identificeret via de internationale erfaringer for geologisk lagring offshore omfatter udledninger til vand af kemikalier, boremudder, borespåner og cement mv. i forbindelse med boring og etablering af brønde samt støj, emissioner og energiforbrug fra skibe og borerig i forbindelse med forundersøgelser og anlæg og etablering.

De miljømæssige forhold i forbindelse med anlæg og etablering af geologisk lager på land vurderes ikke at være meget anderledes end de forhold, som er beskrevet for et offshore lager. Den store forskel er, at anlæg og etablering sker på land med landgående maskiner og transportmetoder. Det betyder, at der i langt højere grad vil være risiko for påvirkning af mennesker i umiddelbar nærhed af site. Samtidig vurderes f.eks. affald og spild at udgøre en mindre miljømæssig påvirkning, idet der på land kan ske en kontrolleret opsamling og håndtering.

Drift af geologisk lager indbefatter injektion af CO₂ i lageret, vedligehold af brønd samt monitorering af lageret. De væsentligste miljømæssige påvirkninger fra drift inkluderer: Diffus udledning af CO₂ fra ventilering, tryksatte koblinger mv, støj fra udstyr, udledning af kemikalier samt energiforbrug og emissioner.

I forhold til påvirkning af natur er der i de internationale referencer fokus på udførelse af seismiske undersøgelser, specielt offshore. På land anvendes store og tunge køretøjer, der kan sætte aftryk i landskabet, beskadige vegetation og det øverste jordlag. Der kan også være tale om forstyrrelser af fugle- og dyrevildt samt øvrige beskyttede arter. Påvirkningerne er midlertidige og kan undgås eller mindskes ved planlægning af undersøgelserne og passende afværgeforanstaltninger.

Seismiske undersøgelser på havet kan påvirke fisk og marine pattedyr i form af høreskader og forstyrrelser, som kan medføre undvigeadfærd eller påvirke fødesøgning. Det vurderes, at den skadelige påvirkning af fisk og pattedyr som følge af seismiske undersøgelser og overvågning medfører en lokal, midlertidig påvirkning, som kan reduceres med passende afværgeforanstaltninger.

Ud over de seismiske undersøgelser giver øvrig støjpåvirkning, f.eks. fra skibstrafik og anlægsarbejde en tilsvarende påvirkning af fisk og marine pattedyr. Påvirkningen fra seismiske undersøgelser i et konkret projekt, skal derfor vurderes kumulativt med øvrig støjpåvirkning og ses i sammenhæng med øvrige marine påvirkninger i samme influensområde. Afværgeforanstaltninger som medfører, at marine pattedyr skræmmes væk fra et område, forudsætter eksempelvis, at der er upåvirkede områder i nærheden.

Ved etablering og placering af anlæg, brønde og rørledninger, vil der yderligere være en permanent påvirkning af havbunden og mere midlertidige påvirkninger af marin natur som følge af sedimentspredning, støj, lys, udledning af kemikalier og andre fysiske forstyrrelser.

Herudover afhænger de naturmæssige påvirkninger både offshore og på land af en konkret vurdering og af lokaliteten. Herunder nærheden til f.eks. § 3 lokaliteter, truede arter og beskyttede områder.

Studier vedr. konsekvenser af CO₂-udslip i havet konkluderer, at CO₂ gasbobler opløses inden for et par meter og at forsuring/fald i pH-værdi forsvinder inden for 1 km. Fisk og skaldyr kan blive påvirket ved konstante udledninger og lav pH-værdi, som over tid kan opløse kalkskaller og muslinger. De natur- og miljø-mæssige påvirkninger af udslip vurderes samlet set som små, også ved potentielle udslip fra flere CO₂-lagre.

Det understøttes også af vurderinger lavet i forbindelse med norske projekter, hvor det er vurderet at et større udslip vil give en ubetydelig påvirkning af det marine miljø. Dette er begrundet i typen af uheld, hvor der er tale om et akut udslip med begrænset spredningsområde, og at CO₂ forventes at blive fortyndet hurtigt i vandmasserne.

I konkrete vurderinger af udsivning og udslip af CO₂ fra lagring eller transport til havs, vil det skulle indgå i vurderingen, at CO₂ i forvejen findes i havet i fluktuerende koncentrationer, og at de marine økosystemer derfor er forholdsvis robuste over for mindre udsving. Samtidig optages i havene fortsat CO₂ fra atmosfæren i så store mængder, at der sker en løbende forsuring. Vurderingen af et konkret projekt vil derfor både skulle indeholde en vurdering af risikoen for en lokal marin påvirkning og en vurdering af formålet og effekten af CO₂-lageret, som er med til at mindske stigningen af CO₂ i atmosfæren og dermed mindske omfanget af den generelle forsuring.

Ved udsivning og udslip af CO₂ på land kan det forventes, at der vil være den samme risiko for toksisk påvirkning af pattedyr, som for mennesker, ved indånding af høje koncentrationer af CO₂ som beskrevet i afsnit 5.1. Konsekvensafstandene er lokale, men kan dog variere afhængig af giftigheden for de enkelte arter. Ekstreme kuldepåvirkninger som følge af et uheld, kan også ramme andre levende organismer end mennesker og vil kunne medføre alvorlig skade og død. Kuldepåvirkninger vurderes ikke at være en relevant effekt ved udslip under vand.

3.5 CO₂-transport infrastruktur

Transport af CO₂ kan ske som en komprimeret gas eller på væskeform. CO₂ transporteres som gas under højt tryk i rørledninger, samt ved mellemtryk og nedkølet som væske i tanke.

Der findes mere end 3.000 km CO₂-rørledninger i Nordamerika, ca. 135 km fler-fase rørledning til Snøhvit feltet i den norske del af Nordsøen og ca. 80-100 km CO₂-rørledning på land mellem Rotterdam og Amsterdam. Rørledningstransport

af CO₂ og andre gasser under tryk er således en moden kommercielt tilgængelig teknologi.

Rørledninger vil være relevant ifm. transport af store mængder CO₂, f.eks. fra større punktkilder til eksportterminaler samt fra mellemlager videre til lagring i undergrunden. Der findes flere designstandarder for CO₂-rørledninger, se blandt andet DNV-RP-J202 og ISO 27913:2016.

Skibe vil være relevant for transport af større mængder CO₂ på flydende form, over længere afstande. Dette kan f.eks. være transport fra store punktkilder til mellemlagringsfaciliteter eller fra mellemlagringsfaciliteter videre til offshore lagring.

Transport af CO₂ på lastbil eller i godsvogne sker i flydende form svarende til skibstransportforholdene. Vej- og banetransport af CO₂ vil være relevant for små til mellemstore mængder, f.eks. fra små punktkilder til CO₂-anvendelsesfaciliteter eller eksportterminaler. Typisk kapacitet for en lastbil er 25–30 ton CO₂. Ved transport med lastvogn, tog eller skib gælder de internationale transportregler for CO₂ i henhold til ADR³, RID⁴ og IMDG⁵.

Der er via en artikel på en amerikansk nyhedsplatform identificeret et uheld med udslip fra en CO₂-rørledning i USA i februar 2020. Ud fra artiklen er der tilsyneladende tale om et rørbrud på en nedgravet rørledning forårsaget af forskydninger i jorden efter meget regn. Uheldet har angiveligt ikke forårsaget dødsfald.

Der er ikke fundet internationale referencer, der specifikt beskriver de miljømæssige påvirkninger under anlæg, etablering og drift af ny rørledning for CO₂. De miljømæssige forhold vurderes at være tilsvarende dem, som identificeres for typiske øvrige rørledninger anvendt til f.eks. transmission og distribution af naturgas.

Dette dækker følgende miljøpåvirkninger, der skal overvejes i de konkrete tilfælde: Støv og øvrige emissioner til luft knyttet til anlægsarbejdet, brug af ressourcer, eventuel udledning af overfladevand eller vand fra grundvandsænkning (kun på land), brug og udledning af kemikalier ved klargøring og drift, CO₂ aftryk samt generering af støj primært ved anlæg.

Ved etablering af CO₂-rørledninger til havs, kan der endvidere være en fysisk påvirkning af havbunden og mere midlertidige påvirkninger af marin natur som følge af sedimentspredning, støj, lys, udledning af kemikalier og andre fysiske forstyrrelser. Udledning af mindre mængder kemikalier i forbindelse med drift af rørledninger er vurderet som ubetydelig i de udenlandske referencer.

³ ADR: Konvention om International Transport af Farligt Gods ad Vej

⁴ RID: Reglementet for international jernbanetransport af farligt gods

⁵ IMDG: International Maritime Dangerous Goods Code

Miljø- og naturpåvirkninger fra skibstransport vil være relateret til støj og forstyrrelser samt energiforbrug og tilhørende forbrændingsemissioner og CO₂ aftryk. Herudover kan der være mindre diffus udledning af CO₂ fra tanke og koblinger.

Der er ikke identificeret referencer, der specifikt beskriver miljøforhold ved lastbil og godtogstransport af CO₂. Miljøpåvirkningen fra driftsfasen vil være relateret til støj og forstyrrelser samt energiforbrug og tilhørende forbrændingsemissioner og CO₂ aftryk. Herudover kan der forekomme mindre diffus udledning af CO₂ fra tanke, koblinger mv.

4 Oversigt over relevante internationale projekter

For at indkredse relevante anlæg og projekter, hvorfra erfaringer kunne være relevante er der nedenfor lavet en oversigt over internationale CCS-anlæg inkl. pilot og testanlæg samt projekter på bedding.

I Tabel 1 er listet 27 CCS projekter som er i fuldskaladrift i 2021 inklusiv ét som har været i drift, men er midlertidig nedlukket [2], [4], [5], [6]. I det omfang oplysninger foreligger, fremgår fangstanlæggets størrelse, type af punktkilde, fangstmetode samt transportmetode og lagertype af Tabel 1.

Tabel 1: Oversigt over fuldskala CCS-anlæg i kommerciel drift [2], [4], [5], [6], [7], [8]

Navn	Produktion/år	Beskrivelse
Al Reyadah Carbon Capture, Use, and Storage (CCUS) Project, Abu Dhabi, UAE	Jern og stålproduktion /2016	Separation af CO ₂ fra røggas fra jern- og stålproduktion. Separation sker vha. aminbaseret fangstmetode med aminen MDEA med en kapacitet på 0,8 Mtpa. CO ₂ transporteres via rørledninger til Abu Dhabi National Oil Company og bruges til EOR.
Air Products Steam Methane Reformer ved Valero Refinery i Port Arthur, Texas, USA	Hydrogen produktion /2013	Separation af CO ₂ fra syngas ved SMR (steam methane reforming) produktion af hydrogen. CO ₂ -fangst sker via ved hjælp af VSA (vacuum swing adsorption) med en kapacitet på 1 Mtpa. CO ₂ transporteres via rørledninger til EOR i Texas.
Quest (Shell), Alberta, Canada	Hydrogen produktion / 2015	Separation af CO ₂ fra HMU (hydrogen manufacturing unit) til produktion af hydrogen. CO ₂ -fangst sker via ADIP-X processen (amin absorption) med en kapacitet på 1 Mtpa. CO ₂ transporteres via rørledning til geologisk lagring onshore. I sommeren 2020 er 5 mill. ton injiceret.
Karamay Dunhua Oil Technology CCUS, Xinjiang, Kina	Methanol produktion / 2015	Separation af CO ₂ fra procesgas. CO ₂ -fangst sker angiveligt vha. oxyfuel-processen (oplysningerne er sparsomme), med en kapacitet på 0,1 Mtpa. CO ₂ transporteres med lastbil til et oliefelt og bruges til EOR.
Arkalon Ethanol, Kansas, USA.	Ethanol produktion / 2009	Separation af CO ₂ fra procesgas. CO ₂ -fangst sker sandsynligvis ved fysiske teknikker (kondensering/komprimering), men ingen sikre oplysninger, med en kapacitet på ca. 0,2 Mtpa. Transporteres via rørledning og anvendes til EOR.
Illinois Industrial Carbon Capture and Storage, Decatur, Illinois, USA	Ethanol produktion / 2017	Separation af CO ₂ fra procesgas. CO ₂ -fangst sker vha. aminbaseret metode (Alstom) med en kapacitet på ca. 1 Mtpa. CO ₂ injiceres i et onshore lager direkte under industriparken. Lager: salin sandstens reservoir, dybde 1.980 m
Bonanza BioEnergy, Kansas, USA	Ethanol produktion /2011	Separation af CO ₂ fra procesgas. CO ₂ -fangst sker sandsynligvis ved fysiske teknikker (kondensering/komprimering), men ingen sikre oplysninger, med en kapacitet på ca. 0,1 Mtpa.

Navn	Produktion/år	Beskrivelse
		CO ₂ anvendes til EOR i Stewart Oil Field. Transport via rørledning.
Core Energy, Otsego County, Michigan, USA.	Rensning af shale gas /2016	Separation af CO ₂ fra shale gas udvinding. CO ₂ -fangst sker via amin adsorption med en kapacitet på 0,5 Mtpa. CO ₂ injiceres i et onshore lager som tidligere var et EOR oliefelt (Niagaran Reef Complex). Transport via rørledning.
Qatar Petroleum, LNG CCS, Qatar	Naturgas opgradering /2019	Separation af CO ₂ fra naturgas. CO ₂ -fangst sker med en kapacitet på 2.1 Mtpa.
Petrobras Santos Basin Pre-Salt Oil Field CCS, Brasilien	Naturgas opgradering /2011	Separation af CO ₂ fra naturgas. CO ₂ -fangst sker vha. membranteknologi. CO ₂ -fangst sker på en flydende produktionsenhed og anvendes i EOR i Santos Basin Pre-Salt. Direkte injektion fra offshore produktionsfacilitet.
PCS Nitrogen, Louisiana, USA	Gødningsproduktion	Separation af CO ₂ fra procesgas. CO ₂ -fangst med en kapacitet på op til 0,3 Mtpa. CO ₂ anvendes til EOR. Transport er ikke oplyst.
Gorgon Carbon Dioxide Injection, Australien	Naturgas opgradering /2019	Separation af CO ₂ fra naturgas. CO ₂ -fangst med en kapacitet på 3,4-4 Mtpa. CO ₂ er lagret i et onshore lager på Barrow Island. Transport til lager sker i rør. Lager: salin sandstens reservoir, dybde 2.300m
Alberta Carbon Trunk Line (ACTL) with North West Redwater Partnership's Sturgeon Refinery CO ₂ Stream, Canada	Olieraffinering / 2020	Separation af CO ₂ fra naturgas mv. CO ₂ -fangst med en kapacitet på 1,3-1,6 Mtpa. CO ₂ anvendes til EOR. Transport til lager sker i rør ACTL.
Alberta Carbon Trunk Line (ACTL) with Nutrien CO ₂ Stream, Canada	Gødningsproduktion / 2020	Separation af CO ₂ fra procesgas. CO ₂ -fangst med en kapacitet på 0,3 Mtpa. CO ₂ anvendes til EOR. Transport til lager sker i rør ACTL.
Coffeyville Gasification Plant, Kansas, USA	Gødningsproduktion / 2013	Separation af CO ₂ fra procesgas. CO ₂ -fangst med en kapacitet på 1 Mtpa. CO ₂ anvendes til EOR på North Burbank oil unit, Oklahoma, US. Transport til lager ikke oplyst.
Enid Fertilizer, Oklahoma, USA	Gødningsproduktion / 2013	Separation af CO ₂ fra procesgas med en kapacitet på 0,7 Mtpa. CO ₂ anvendes til EOR i olieletter i Oklahoma. Transport til lager sker i rør.
Boundary Dam 3 Carbon Capture and Storage Facility, Saskatchewan, Canada	Kulfyret energianlæg/2014	Separation af CO ₂ fra røggas. CO ₂ -fangst sker vha. Shell Cansolv teknologi som er aminbase-ret med en kapacitet på 1 Mtpa. Hovedparten anvendes til EOR i Weyburn Oil Unit. En mindre dels sendes til geologisk lagring i det nærliggende onshore lager Aquistore Project.
Century plant, Denver, USA	Naturgas opgradering /2010	Separation af CO ₂ fra naturgas. Kapacitet på 5-8,4 Mtpa. CO ₂ anvendes til EOR i Permian Basin. Transport til lager sker i rør.

Navn	Produktion/år	Beskrivelse
Great Plains Synfuels Plant and Weyburn-Midale; Saskatchewan, Canada	Syntetisk naturgas/ 2000	Separation af CO ₂ fra naturgas/procesgas. CO ₂ -fangst sker vha. Rectisol, proces med en kapacitet på 3 Mtpa. CO ₂ anvendes til EOR i Weyburn Oil Unit og Midale Oil Unit. Transport til lager sker i rør.
Sinopec Zhongyuan Carbon Capture Utilization and Storage, China	Petrokemisk produktion/ 2006	Separation af CO ₂ fra naturgas/procesgas med en kapacitet på 0,1 Mtpa. CO ₂ anvendes til EOR Zhongyuan oil field. Transport er ikke oplyst.
Sleipner, Norge	Naturgas opgradering /1996	Separation af CO ₂ fra naturgas. Fangstanlægget er placeret på platform offshore. CO ₂ -fangst sker vha. aminbaseret metode (MDEA) med en kapacitet på 0,85 Mtpa. CO ₂ injiceres i et offshore geologisk sandstenslager ved Sleipner, ud for Norge I alt 17 Mt er injiceret til lageret siden 1996. Lager: salin sandstens reservoir på 1.000m dybde.
Snøhvit, Norge	Naturgas opgradering /2008	Separation af CO ₂ fra naturgas. Fangstanlægget er placeret på øen Melkøya, hvor der sker en opgradering af gas fra offshore installation. CO ₂ -fangst sker vha. aminbaseret metode med en kapacitet på 0,7 Mtpa. CO ₂ injiceres i et offshore geologisk lager ved Snøhvit feltet. Transport sker i rør. I alt 4 Mt er injiceret til lageret siden 2008. Lager: salin sandstens reservoir, dybde 2.550m
Terrell Natural Gas Processing Plant , USA	Naturgas opgradering /1970	Separation af CO ₂ fra naturgas med en kapacitet på 0,4-0,5 Mtpa. CO ₂ anvendes til EOR . Transport sker via rørledning Canyon Reef Carriers CRC pipeline og Pecos pipeline.
Uthmaniyah CO ₂ - EOR Demonstration, Kingdom of Saudi Arabia	Naturgas opgradering /2015	Separation af CO ₂ fra naturgas med en kapacitet på 0,8 Mtpa. CO ₂ anvendes til EOR ved Ghawar oil field. Transport sker via rørledning.
CNPC Jilin Oil Field CO ₂ -EOR, Kina	Naturgas opgradering /2018	Separation af CO ₂ fra naturgas. CO ₂ -fangst sker vha. aminbaseret metode med en kapacitet på ca. 1,2 Mtpa. CO ₂ anvendes til EOR i on-shore ved Jilin oil field i det nordøst lige Kina. Transport sker via rørledning.
Shute Creek Gas Processing Plant, Wyoming, USA	Naturgas opgradering /2018	Separation af CO ₂ fra naturgas. CO ₂ -fangst sker vha. Selexol med en kapacitet på ca. 7 Mtpa. CO ₂ anvendes til EOR i en række felter i Wyoming og Colorado. Transport sker via rørledning.
Petra Nova Carbon Capture, Texas USA	Kulfyret energianlæg/ midlertidig lukket i 2020	Separation af CO ₂ fra røggas. CO ₂ -fangst sker vha. aminbaseret metode med en kapacitet på 1,4 Mtpa. CO ₂ anvendes til EOR i West Ranch oil field nær Houston.

Som det fremgår af Tabel 1 sker CO₂-fangst både på industrielle kilder, i forbindelse med naturgasopgradering og på energianlæg. CO₂-fangst sker vha. mange

forskellige metoder. De projekter som anvender aminvask og chilled ammonia vil være relevante, at hente erfaring fra i denne sammenhæng.

I langt de fleste CCS projekter anvendes den opsamlede CO₂ til enhanced oil recovery (EOR) og bliver dermed sendt retur i eksisterende oliefelt med henblik på at øge udvinding af olie. En del af den CO₂ der er injekseret vil blande sig med råolien og dermed komme retur i forbindelse med den efterfølgende olieudvinding. Der er således ved EOR ikke tale om en permanent lagring af CO₂. Erfaring fra projekter med EOR kan dog være relevant i forhold til andre led i CCS kæden f.eks. i forhold til CO₂-fangst og -transport.

Transport af CO₂ sker i langt overvejende grad via rørledning på land. Det er ikke altid helt klart om rørene i de specifikke projekter er lagt specifikt til CO₂ transport, eller om det er rør, som tidligere har været anvendt til transport af f.eks. gas. Kun i et tilfælde (Snøhvit projektet) transporteres CO₂ vha. rørledning fra land til offshore lager.

Udover ovenstående fuldskala CCS projekter i kommerciel drift er der eller har der været en række pilot- og testprojekter. Nedenfor er kort beskrevet et uddrag af primært europæiske pilot- og test projekter.

Pilot- og testprojekter har oftest omfattet CO₂-fangst, for at eftervise egnethed af en specifik fangstmetode på en specifik kilde. I enkelte tilfælde har projekterne omfattet hele CCS kæden.

Pilot- og testprojekterne kan som de kommercielle anlæg bidrage med erfaringer omkring sikkerhed, miljø og natur selvfølgelig afgrænset i forhold til projekternes omfang, levetid og formål.

Tabel 2: Oversigt over pilot- og testanlæg [4], [9]

Navn	Produktion/år	Beskrivelse
Brindisi CO ₂ Capture Pilot Plant, Brindisi, Italien	Kulfyret kraftværk / 2010-2012	Et pilot CO ₂ -fangstanlæg til test af amin absorption. Kapacitet 2,5 t CO ₂ per time. CO ₂ lagres i tanke med henblik på brug i et andet pilot-forsøg med oplagring i Norditalien.
Buggenum Carbon Capture (CO ₂ Catch-up) Pilot Project, Buggenum, Holland	Energianlæg /2011 og 2013.	Et pilot CO ₂ -fangstanlæg til test af pre-combustion CO ₂ -fangst. Der bruges water-gas shift efterfulgt af CO ₂ -absorption i DPEG (dimethylæter polyethylene glykol).
CASTOR, Danmark	Kulfyret energianlæg / 2006 and 2007	Et pilot CO ₂ -fangstanlæg til test af forskellige aminer.
CESAR, Danmark	Energianlæg, 2008	Opfølgning på CASTOR projektet med modifikation af pilotanlægget og test af to nye aminer.
CO ₂ Capture Test Facility at Norcem Brevik, Norge	Cement produktion	Test af CO ₂ -fangst på røggas fra cement produktion på Norcem Brevik med tre forskellige post combustion teknologier. Testprogrammet

Navn	Produktion/år	Beskrivelse
		blev udført med det formål at udvælge og beslutte egentlig fuldskala projekt.
Schwarze Pumpe Oxy-fuel Pilot Plant, Tyskland	Kulfyret energianlæg	Test af oxyfuel CO ₂ -fangst på kulfyret energianlæg. Anlægget blev startet op i 2008 og stoppede i 2014. En lille del af den opfangede CO ₂ blev injiceret i Ketzin storage site.
Drax bioenergy carbon capture pilot plant, UK	Biomassefyrede energianlæg	Test af CO ₂ -fangst anlæg på det 100% biomasse fyrede Drax energianlæg. Pilotanlægget startede i 2019.
Technology Centre Mongstad (TCM), Norge	Diverse	Technology Centre Mongstad TCM er lokaliseret ved raffinaderiet i Mongstad, ikke langt fra Bergen og har været i drift siden 2012. Faciliteten har testanlæg for CO ₂ -fangst med både chilled ammonia og amin.
Lacq CCS Pilot Project, Pau, Frankrig	CO ₂ lager onshore	Omkring 51.000 tons CO ₂ blev over en periode på 39 måneder opsamlet og injiceret ved brug af et oxyfuel anlæg. Monitorering af lager blev udført både under og 3 år efter injektion. Lager :dolomitisk udtømt gas reservoir, dybde 4.500m
Ferrybridge Carbon Capture Pilot (CCPilot100+); UK	Energianlæg, biomasse og kulfyret	Test af post combustion aminbaseret CO ₂ -fangstanlæg på røggas fra energianlæg. Testprogram var fuldført i december 2013.
Renfrew Oxy-fuel (Oxycoal 2) Project, UK	Energianlæg	Test af en 40-MWth oxy-fuel burner på energianlægget Renfrew, Scotland.
Mountaineer Validation Facility, USA	Energianlæg	CO ₂ -fangst vha. af chilled ammonia metoden fra et kulfyret anlæg. CO ₂ blev lageret i permanent geologisk lagring onshore. ca. 37.000 ton CO ₂ er injiceret i lageret. Injektion til lageret stoppede i 2017 og følges op af 6 års post-injektions monitorering.
Preem raffinaderi i Lysekil, Sverige	Raffinaderi	Største testanlæg i Sverige. CO ₂ -fangst sker på Preems hydrogen gas anlæg med amin baseret anlæg fra Aker . Det er meningen at CO ₂ skal transporteres til lager i Norge som en del af Northern Lights projektet.

Nedenfor fremgår CCS-projekter på bedding, som giver et godt indblik i forestående projekter. I forhold til erfaringer ligger der for nogle af projekterne forundersøgelser og, eller miljøvurderinger, som kan bidrage til det samlede erfaringsbillede indenfor sikkerhed, miljø og natur.

Tabel 3: Oversigt over kommercielle projekter i udvikling [4]

Navn	Projektstadie	Beskrivelse
ACT Acorn, Skotland	Tidlig udvikling	Ideen med projektet er at opsamle CO ₂ fra en naturgasterminal ved St. Fergus og sende CO ₂ retur til udtømte gasfelter i Nordsøen ved brug af eksisterende gasledninger. CO ₂ kilden i St. Fergus er udstødningsgas fra kompressorer til drift af naturgasnettet. CO ₂ opsamling ved absorption (sandsynligvis amin).
Caledonia Clean Energy, Skotland	Tidlig udvikling	Idéen med projektet er at Caledonia Clean Energy etablerer et CO ₂ -fangstanlæg i forbindelse med et nyt gasfyret energianlæg. CO ₂ -fangst vil være omkring 3 Mtpa. Den opsamlede CO ₂ vil skulle transporteres til tømte gaslagre i Nordsøen via eksisterende gasledninger.
HyNet North West, UK	Tidlig udvikling	Idéen med projektet er at etablere CO ₂ -fangstanlæg i forbindelse med hydrogenanlæg. Den opfangede CO ₂ skal sammen med CO ₂ -fangst fra andre anlæg transporteres til de tømte gasfelter ved Hamilton og Lennox i Liverpool bay.
Langskip CCS - Fortum Oslo Varme, Norge	Moden udvikling	CO ₂ -fangst på Fortum Oslo Varme affaldsforbrændingsanlæg i en størrelse på 0.4 Mtpa er planlagt til 2024. Den opsamlede CO ₂ forventes at blive sejlet med skib til et mellemlager på Norges vestkyst ikke langt fra Bergen og herfra med rør ud til endelig offshore geologisk lager.
Langskip CCS - Northern Lights projektet	Moden udvikling	NLP er en del af Langskip CCS projektet. Projektet omfatter skibstransport fra punktkilder til mellemlager, mellemlager i tanke, en offshore rørledning ud til en undersøisk satellit, hvor der sker injektion i undersøisk lager. Satellitten vil styres af monitorerings- og kontrolfunktioner fra Oseberg platformen.
Drax BECCS Project, UK	Tidlig udvikling	Idéen med projektet er at etablere et CO ₂ -fangstanlæg på Drax 660 MW biomassefyrede energianlæg i 2027. Kapacitet på 4,3 Mtpa. Den opsamlede CO ₂ planlægges at blive transporteret via rør til endelige geologisk lagring i den sydlige del af Nordsøen.
Ervia Cork CCS, Irland	Tidlig udvikling	Ervia Cork CCS er i undersøgelsesfasen for CO ₂ -fangst fra punktkilder i Cork, blandt andet to gasfyrede energianlæg og et raffinaderi. Den opsamlede CO ₂ skal transporteres via eksisterende rørledninger til Kinsale Gas Field.

5 Sikkerheds- og miljømæssige forhold

Sikkerhed knytter sig til pludselige hændelser, som specifikt har med håndteringen af CO₂ og tilknyttede hjælpestoffer at gøre, og som kan udgøre en fare for menneskers liv og helbred. Hændelserne er på tværs af CCS-kæden i stor udstrækning knyttet til større udslip af kuldioxid CO₂. Herudover kan også udslip af ammoniak, aminer og ilt være relevant for specifikke anlæg. Nedenfor gennemgås de farer som generelt er identificeret ved CCS aktiviteter. I afsnittene 8 - 9 er der anført forhold som er specifikke for de forskellige faser og anlæg.

5.1 Kuldioxid (CO₂)

5.1.1 Indånding af CO₂

CO₂ er en naturlig bestanddel af atmosfærisk luft med en koncentration på ca. 400 ppm eller 0,04%. CO₂ findes i menneskers udåndingsluft i en koncentration på ca. 38.000 ppm eller 3,8%.

CO₂ har en lav akut giftighed for mennesker, men som for alle andre stoffer er CO₂ giftig, hvis koncentrationen er høj nok. Ved udsættelse for en koncentration på mere end 5% stiger blodets CO₂ koncentration og der opstår acidose (faldende pH i blodet). Ved koncentrationer på mere end 10% CO₂ kan der opstå kramper, koma og ved længerevarende udsættelse, i nogle tilfælde død. Ved udsættelse for koncentrationer på mere end 30% CO₂ kan der opstå næsten øjeblikkelig bevidstløshed og død [10]. Udover giftvirkningen vil CO₂ ved et udslip også kunne sænke iltkoncentrationen i et område, så personer kvæles. Ved kendte tilfælde af personer der er døde som følge af udsættelse for CO₂, vil der som regel være tale om en kombination af CO₂ giftvirkning og kvælning på grund af iltmangel.

Faren ved udslip af CO₂ er især kendt fra udslip i lukkede rum, men der er også eksempler på massive udslip fra minegange, hvor personer i almindelige boliger i nærområdet er blevet dødeligt påvirket (Menzengraben, DDR, 1953) [11]. En særlig situation var et massivt udslip af CO₂, anslået 1,6 millioner tons CO₂, fra en bundvending (limnisk udbrud) af søen Lac Nyos i Cameroun i 1986. Der omkom ca. 1.700 mennesker og 3.500 stk. husdyr, i en afstand på op til 25 km fra søen [12].

UK Health and Safety Executive har i flere publikationer estimeret konsekvensafstande for henholdsvis store momentane udslip af CO₂ og for store kontinuerte udslip fra lækager [12], [13], [14]. For momentane udslip blev der studeret udslipstørrelser på 50 – 2.000 tons. Disse udslipstørrelser svarer til variationen i oplagsstørrelse fra tankvogne til større tanklagre.

For de største momentane udslip blev der fundet en konsekvensafstand på 120 – 300 meter. Ved kontinuerte udslip fra en lækage blev der fundet en konsekvensafstand på 100 – 200 meter. Konsekvensafstanden er defineret som den

afstand, inden for hvilken, der er en risiko for død på 1-5%. Ved længere afstande fra udslipspunktet er risikoen for død mindre.

Det er rimeligt at antage, at disse afstande er repræsentative for uheld på transportsystemer og lagre fra fangst af CO₂ og indtil injektion i slutlageret.

Et geologisk lager ligger typisk i en dybde på mere end 800 meter under jordoverfladen/havbunden og den eneste direkte forbindelse med atmosfæren/havet er et borerør med en række ventiler. Det er derfor vanskeligt at forestille sig, at store mængder CO₂ fra et geologisk lager kan undslippe momentant og forårsage dødsfald i flere kilometers omkreds, som det har været tilfældet ved de før omtalte udslip fra minegange og fra bundvending af søer. Det kan dog ikke udelukkes at et voldsomt jordskælv eller et vulkanudbrud i et område med geologisk lagring af CO₂ kan frigive store mængder CO₂ til atmosfæren over kort tid. Det må antages, at der ikke placeres geologiske lagre i risikoområder for jordskælv og vulkanudbrud, herudover er der ikke vulkanaktivitet i Danmark og sandsynligheden for større jordskælv er endvidere meget lille grundet placering i forhold til geologiske pladegrænser.

Derimod er store CO₂ udslip fra injektion i geologiske formationer mulige – og kendte – i forbindelse med blowouts [15]. Konsekvensafstanden⁶ på 100 meter fra et kontinuert udslip fra en lækage på 50 mm er i førnævnte publikationer fra UK HSE anset for repræsentativ for et blowout, forudsat at udslippet sker til luften. Hvis udslippet sker lige over havbunden, er der ikke umiddelbar fare for mennesker, da den CO₂ der stiger op til overfladen vil fortyndes/optages i vand søjlen, inden den når atmosfæren [16].

Der er ikke identificeret blowouts fra underjordiske lagre, som er anlagt som deciderede CO₂ lagre.

I ovennævnte kilde [15] anføres fire tilfælde af blowouts i forbindelse med boring i geologiske formationer med henblik på udnyttelse af den naturligt forekommende CO₂ (Sheep Mountain, CO, USA; Crystal and Tenmile Geysers, Paradox Basin, UT, USA; Florina Basin, Grækenland; Torre Alfina geotermisk felt, Italien). I kilden argumenteres for at disse hændelser lige så godt kunne være opstået i forbindelse med anlæg af deciderede CO₂ lagre, og at der bør drages lære af dem.

De ovennævnte konsekvensafstande er udregnet ved hjælp af kommercielt tilgængelige programmer. Der er stillet spørgsmålstejn ved, om disse programmer på tilfredsstillende vis modellerer de komplicerede forhold, når tryksat CO₂ slipper ud i atmosfæren og spredes i omgivelserne, specielt hvad angår effekten af sublimering af dannet tøris [10]. Det kan derfor ikke udelukkes, at der i fremtiden opnås ny viden om spredningsforholdene som vil revidere de konsekvensafstande, der er anført i denne rapport, og som kan få indflydelse på planlægningen omkring installationer med store mængder CO₂.

⁶ Konsekvensafstanden er den afstand, ved hvilken risiko for dødsfald er 1-5%

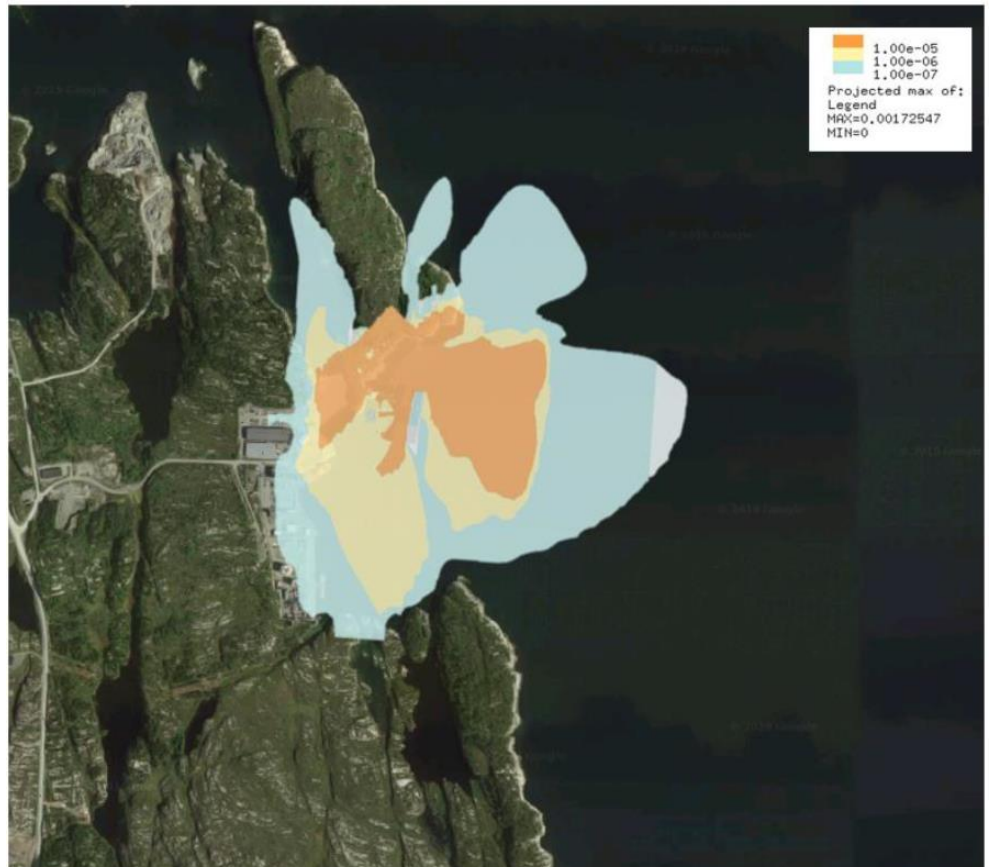
I forbindelse med Northern Lights projektet er der udarbejdet en kvantitativ risikovurdering (QRA) for mellemlageret på land [17].

Ved en QRA sættes de mulige konsekvenser i forhold til sandsynligheden for at de identificerede hændelser indtræffer. Et af resultaterne af en QRA er et kort med konturer omkring den undersøgte facilitet, som viser afstande med den samme risiko for dødsfald for personer, der befinder sig i det pågældende område.

I nedenstående Figur 2 er gengivet et kort for landanlægget ved Northern Lights. I det inderste orange område er der en risiko for dødsfald på 10^{-5} per år (svarende til et dødsfald per 100.000 år), i det gule 10^{-6} per år (svarende til et dødsfald per 1.000.000 år) og i det blå område 10^{-7} per år (svarende til et dødsfald per 10.000.000 år). Disse værdier svarer til de værdier, der anvendes af de danske myndigheder til at afgøre, om risikoen er acceptabel.

Det inderste orange område må som udgangspunkt ikke strække sig ud over virksomhedens matrikel. Ud til grænsen for det gule område må der ikke placeres boliger eller anden følsom anvendelse, og ud til grænsen for det blå område må der ikke placeres institutioner, der indgår i det offentlige beredskab eller findes institutioner med svært evakuerbare personer.

I det aktuelle tilfælde er det vurderet, at de norske myndigheders acceptkriterier, som på mange måder er de samme som de danske, er overholdt. Resultaterne kan dog ikke direkte overføres til et andet projekt, da omgivelsernes topografi er afgørende for udbredelsen af et CO₂ udslip, da der er tale om en kold, tung gas.



Figur 2 Risikokonturer for et landanlæg i Northern Lights projektet [17]. Den blå markering har en udstrækning på ca. 1 km i øst vestlig retning.

Store momentane udslip af CO₂ vil også have en effekt på dyre- og planteliv både i vandmiljøet og på land. Konsekvenserne af sådanne udslip på natur og miljø er behandlet i afsnittene om natur og miljø.

5.1.1 Fysiske påvirkninger fra uheld med CO₂

Udover udsættelse for høje koncentrationer af CO₂ kan der ved større udslip også opstå alvorlige skader som følge af ekstreme kuldepåvirkninger. I CCS sammenhæng vil CO₂ efter fangst blive komprimeret og evt. afkølet, før det transporteres og oplagres. Hvis der sker et udslip af komprimeret/afkølet CO₂ fra en rørledning, beholder eller et reservoir, opstår der risiko for ekstreme kuldepåvirkninger for personer eller udstyr som påvirkes af udslippet. Ramte personer kan få alvorlige og livstruende forfrysninger, mens udstyr kan påvirkes, så det mister sin integritet.

Da CO₂ efter fangsten håndteres under tryk, er der mulighed for farlige trykstigninger, som kan føre til sprængning af rør og beholdere med udslyngning af sprængstykker til følge. På denne måde adskiller CO₂ sig ikke fra andre trykbærende systemer, bortset fra at CO₂ ikke kan brænde. Interne eksplosioner på grund af indtrængning af atmosfærisk luft eller brand og eksplosion i undsluppet CO₂, er ikke mulige.

I litteraturen findes oplysninger om en ulykke i Ungarn i 1969, med en 30 m³ tank indeholdende CO₂, som pludseligt brød sammen [18]. Fragmenter med en vægt på 1 – 3 tons blev slynget væk i en afstand på op til 300 meter og mindre fragmenter op til 400 meter. Ulykken kostede 9 mennesker livet, hvoraf de 5 dødsfald skyldtes forfrysninger. De øvrige dødsfald antages at skyldes de fysiske påvirkninger fra eksplosionen.

I en publikation for det engelske HSE Executive [19] konkluderer forfatterne, at fartøjer i nærheden af et gasudslip ikke kan synke på grund af manglende opdrift. Hvor der er forekommet forlis, skyldes det, at fartøjer har taget vand ind på grund af urolig sø forårsaget af udslippet. Desuden kan et udslip skabe strømninger i overfladen, som kan få opankrede fartøjer ud af position. Publikationen nævner ikke specifikke eksempler, eller hvor ofte det er sket.

Ekstreme kuldepåvirkninger kan også ramme andre levende organismer end mennesker og vil i lighed med påvirkning på mennesker kunne medføre alvorlig skade og død. Kuldepåvirkninger vurderes ikke at være en relevant effekt ved udslip under vand.

5.2 Aminer

Ved nogle fangstmetoder (se også afsnit A.1) bruges forskellige blandinger af aminer. Der er nævnt ethanolamin (MEA), diethanolamin (DEA), metyldietanolamin (MDEA), piperazin (PZ), 2-Amino-2-metylpropanol (AMP), diglykolamin (DGA) og diisopropanolamin (DIPA). Ingen af de nævnte aminer udgør en akut fare for mennesker i vandig opløsning, ved et udslip. Dampene har en lav akut giftighed og aminerne er ikke klassificerede som brandfarlige. Aminerne er generelt irriterende at få på huden og i øjnene, og nogle er klassificeret som ætsende. Håndtering følger de normale arbejdsmiljøregler, og ved udslip vurderes der ikke at være akut fare for mennesker, udover de personer i umiddelbar nærhed af udslippet, som kan blive ramt og få ætsninger, afhængig af aminblandings karakter, samt evt. forbrændinger, afhængig af temperaturen på udslippet.

De anvendte aminer er ikke klassificeret som miljøfarlige, og der forventes derfor ikke akutte virkninger på natur eller miljø ved udslip.

Nedbrydningsprodukter af aminer, herunder nitrosaminer, afhængig af hvilken aminblanding der benyttes (se også afsnit A.1.3) kan udledes fra CO₂-fangstanlæg. Nitrosaminer har en lav akut giftighed, og der er ved de koncentrationer som forventes ikke fare for akut forgiftning med nitrosaminer. Nitrosaminer og andre nedbrydningsprodukter anses for at være kræftfremkaldende og derfor farlige ved langvarig og gentagen påvirkning. Dette aspekt er behandlet under afsnittet om miljø.

5.3 Ammoniak (NH₃)

NH₃ i form af ammoniakvand kan også bruges til CO₂-fangst. Koncentrationen af NH₃ i ammoniakvandsopløsningen er typisk mindre end 25%. Hvis koncentrationen af NH₃ er højere end 25% skal ammoniakvand betragtes som et risikostof i

henhold til Risikobekendtgørelsen, på grund af akut miljøfare. Hvis oplaget af ammoniakvand > 25% er på mere end 100/200 tons skal der derfor udarbejdes sikkerhedsdokument/sikkerhedsrapport. I det følgende forudsættes det, at koncentrationen af NH₃ i ammoniakvand er mindre end 25%.

I brugskoncentrationer på mindre end 25% er ammoniakvand klassificeret som ætsende på hud og øjne og som irriterende for luftvejene og skal håndteres jf. de normale arbejdsmiljøregler for sådanne stoffer. Ved uheld er der ikke akut fare for mennesker, udover de personer i umiddelbar nærhed af udslippet, som kan blive ramt og få ætsninger.

I delstrømme i CO₂-fangstprocessen med ammoniak er der høje koncentrationer af NH₃, i området 2.000 – 15.000 ppm. Disse koncentrationer er livsfarlige for mennesker, idet en udsættelse for 2.700 ppm i 10 minutter (AEGL 3, 10 min) eller længere, anses for livstruende. Processtrømmene findes i lukkede rørsystemer og beholdere, men ved udslip vil der være akut fare for personer der udsættes for høje koncentrationer af NH₃. Umiddelbart vurderes det, at der kun er fare for personer på virksomheden, men hvis denne proces etableres, bør der udføres spredningsberegninger for uheld ved den konkrete anvendelse, for at fastlægge de specifikke konsekvensafstande. NH₃ lukkes ikke urensset ud i atmosfæren, da der typisk indføres et vasketrin, som bringer NH₃ koncentrationen i afkastet ned til under 200 ppm.

Gasformig ammoniak er akut toksisk for levende organismer, der rammes af et udslip, afhængig af koncentrationen. På grund af fortynding vil virkningen være begrænset til områder med høj koncentration af ammoniak. Vandlevende organismer påvirkes ikke af et udslip af gasformig ammoniak. Ammoniakvand i de koncentrationer der typisk anvendes i et fangstanlæg, er ikke klassificeret som miljøfarlig, men der må alligevel forventes lokale akutte effekter, hvis ammoniakvand finder vej til vandmiljøet, ligesom lokal svidning af vegetationen må forventes, hvis ammoniakvand løber ud på jorden.

5.4 Oxygen (O₂)

I forbrændingsanlæg kan oxyfuel processen anvendes i stedet for almindelig forbrænding med atmosfærisk luft. Ved oxyfuel processen tilføres ren O₂ til forbrændingsprocessen i stedet for atmosfærisk luft, som indeholder ca. 80% nitrogen. Herved fås en CO₂-rig røggas som efter tørring har en CO₂ koncentration på 70 – 90% CO₂, som kan komprimeres og anvendes til f.eks. lagring. Til oxyfuel processen er der behov for et lager af O₂, som opbevares i en tryktank. Hvis oplaget af O₂ er større end 200 (kolonne 2) hhv. 2000 tons (kolonne 3), falder oplaget ind under Risikobekendtgørelsens bestemmelser og der skal udarbejdes sikkerhedsdokument/sikkerhedsrapport.

O₂ er en naturlig bestanddel af atmosfærisk luft, hvor den findes i en koncentration på ca. 21%. Som udgangspunkt er O₂ derfor ikke farlig for mennesker. Stiger koncentrationen af O₂ til 25% eller derover er der en stærkt stigende risiko for brand og eksplosion. O₂ er ikke i sig selv brandfarlig, men er en nødvendig forudsætning for en brand, sammen med en passende (høj) temperatur og et

brandbart materiale. Visse materialer kan bryde spontant i brand ved normal omgivelsestemperatur, blot O₂ koncentrationen øges.

Indånding af høje koncentrationer af O₂ op til 100% er ikke akut farlig for mennesker og bruges sågar terapeutisk i nogle sammenhænge. Langvarig udsættelse for høje koncentrationer af O₂ er dog sundhedsskadelig, men er ikke relevant i denne sammenhæng.

Uanset om oplaget af O₂ er større end tærskelmængden for risikovirksomhed, bør der i konkrete tilfælde udføres analyser af risikoen for udslip af O₂ og konsekvenserne af disse, i forbindelse med planlægningen.

Udslip af O₂ vurderes ikke at udgøre en fare for natur og miljø.

6 CO₂-fangstanlæg - Vurdering af sikkerhed, natur og miljø

6.1 Sikkerhed

6.1.1 Forundersøgelser

Der er ikke identificeret relevante referencer med omtale af sikkerhedsforhold specifikt relateret til forundersøgelser til etablering af CO₂-fangstanlæg.

6.1.2 Anlæg og etablering

Der er ikke identificeret relevante referencer med omtale af sikkerhedsforhold specifikt relateret til anlæg og etablering af CO₂-fangstanlæg.

6.1.3 Drift

Almindelige farer ved drift af trykbærende udstyr i form af operationelle forhold der kan føre til farlige trykstigninger, er også gældende for CO₂-fangstanlæg.

I forhold til større uheld skal der ved oxyfuel-anlæg være opmærksomhed på risikoen for lækage på tanke og rørsystemer indeholdende store koncentrationer af O₂ og deraf følgende udslip af store mængder O₂ med brand- og eksplosionsfare til følge. Ved chilled ammonia anlæg skal der være opmærksomhed på risikoen for lækage på rørsystemer indeholdende store koncentrationer af NH₃ med forgiftningsfare til følge.

I afsnit 5.3 og 5.4 er der en beskrivelse af de mulige farer og konsekvenser ved håndtering og udslip af O₂ og NH₃.

Udover O₂ og NH₃ som har potentiale til store uheld med lang rækkevidde, skal der også være opmærksomhed på lækager af aminholdige systemer, som kan forårsage ætsninger på personer der rammes af et udslip. I afsnit 5.2 er der en beskrivelse af de mulige farer og konsekvenser ved håndtering og udslip af aminer.

Den stående mængde ren CO₂ i et fangstanlæg er forholdsvis lille, da CO₂ først i forbindelse med mellemlagring komprimeres og evt. køles. Udslip af CO₂ fra fangstanlæg vil derfor være begrænset.

Der er ikke fundet eksempler på uheld med CO₂-fangstanlæg i de undersøgte referencer.

6.1.4 Afvikling

Ved afvikling (nedrivning) af CO₂-fangstanlæg skal der udover de almindelige arbejdsmiljøregler være fokus på, at der ikke findes ansamlinger af stoffer og

materialer i anlæggene, som kan udgøre en fare for medarbejderne i forbindelse med nedrivningsaktiviteterne. Ansamlinger af aminer og ammoniakvand udgør her en potentiel risiko. Det vurderes at disse ansamlinger ikke udgør en fare for natur og miljø, forudsat at det vaskevand der anvendes til rengøring af udstyret, håndteres forsvarligt.

Der er ikke fundet eksempler på uheld under afvikling af CO₂-fangstanlæg, i de undersøgte referencer.

6.2 Miljø

6.2.1 Forundersøgelser

Der er ikke identificeret referencer der specifikt beskriver miljøforhold ved forundersøgelser af CO₂-fangstanlæg.

De miljømæssige forhold ved forundersøgelser vurderes at være sammenligneligt med hvad der findes i forbindelse med forundersøgelser ved andre industrielle anlæg.

Det skal i forbindelse med planlægning sikres, at den valgte placering sker under hensyn til de risikomæssige og miljømæssige forhold. Det nødvendige plangrundlag skal sikres, og de nødvendige tilladelser være indhentet.

6.2.2 Anlæg og etablering

Der er ikke identificeret referencer, der specifikt beskriver miljøforhold ved anlæg og etablering af CO₂-fangstanlæg.

De miljømæssige forhold ved anlæg og etablering vurderes at være sammenligneligt med, hvad der findes i forbindelse med forundersøgelser ved andre industrielle anlæg.

Det omfatter typisk: Støv og øvrige emissioner til luft knyttet til anlægsarbejde, brug af ressourcer, eventuel udledning af overfladevand eller vand fra grundvandssænkning, CO₂ aftryk i anlægsfase samt generering af støj.

6.2.3 Drift

Drift af CO₂-fangstanlæg har en række miljømæssige forhold.

Emissioner til luft

Emission og deposition af aminer og specielt nedbrydningsprodukter af aminer har været en af de primære bekymringer ved udvikling af fuldskala aminbaserede fangstanlæg [20].

De aminbaserede fangstmetoder (se også afsnit A.1) bruger forskellige aminer eller blandinger af aminer. Der er i litteraturen blandt andet nævnt ethanolamin

(MEA), diethanolamin (DEA), metyldietanolamin (MDEA), piperazin (PZ), 2-Amino-2-metylpropanol (AMP), diglykolamin (DGA) og diisopropanolamin (DIPA) [21] [22]. Redegørelse for de enkelte kemiske stoffer kan findes vha. ECHAs hjemmeside [23].

Emissioner til luft og vand samt affald kan indeholde varierende mængder af aminer samt nedbrydningsprodukter af aminer, herunder nitrosaminer og nitraminer, afhængig af hvilken aminblanding der benyttes [24] [22] [25].

Det anføres som en af de væsentligste konklusioner fra Longship projektet, at det er vigtigt have metoder og data på plads for at kunne vurdere emissioner og immissioner af farlige stoffer fra fangstprocessen inklusiv aminer samt eventuelle nedbrydningsprodukter heraf [26].

I Norge har man på CO₂ Technology Center Mongstad (TCM) siden 2012 haft faciliteter til at teste forskellige aminbaserede og chilled ammonia fangst teknologier, og der har været en række leverandører som her har testet, optimeret, modnet og eftervist deres fangst teknologi og valg af solvent. Arbejdet på TCM har også inkluderet udvikling af metoder til bestemmelse og vurdering af emission og deposition fra de aminbaserede fangstmetoder, udover at det har givet bedre forståelse af de toksikologiske effekter af aminer og deres nedbrydningsprodukter til luft, vand og via affald [24] [27].

Der rapporteres om stor variation i emission af aminer, nitrosaminer og andre stoffer fra forskellige anlæg og afhængig af den specifikke proces og hvilke aminer der anvendes. Emission af aminer i røggassen er målt i afkast på forskellige pilotanlæg i koncentrationer op til 4 mg/Nm³. Nitrosaminer og nitraminer er blevet målt i røggassen i koncentrationer op til 5 µg/m³. Der er en tendens til at nyere anlæg har en mindre emission [28].

Reaktion af aminer med specielt NO_x er i søgelyset i forhold til dannelse af nedbrydningsprodukter i form af nitrosamin og nitraminer [28].

Aker, der leverer CO₂-fangstanlæg, beskriver at spredningsberegninger udført for Norcem Brevik viser at koncentrationer af nitrosaminer med deres løsning med et specifikt amin og med brug af anti misting teknologi ligger væsentlig under gældende norske grænseværdier [29].

Forsøg fra amin baseret CO₂-fangst på testanlæg i Japan med blandt andet to forskellig aminer viser at en stor del af amin emissionen foreligger som aerosoler (mist) [30]. Også en anden kilde referer til, at aerosoler har en effekt på emissionen af amin [28].

Der har være udført test på Fortum Oslo Varme med et pilotanlæg med Shell capture technology og brug af DC-103 solvent. Resultaterne herfra viser at Fortum Oslo Varme med den teknologi kan leve op til de norske krav for udledning til luft [26].

Det konkluderes i rapport fra det norske Olje- og energidepartement fra 2016 at der er sket en stor udvikling og opnået meget viden og erfaring om de forskellige CO₂-fangstteknologier og de HSE relaterede risici, samt at der er leverandører der er i stand til at levere fuldskalaanlæg [31].

I Norge har Folkhelseinstituttet sat grænseværdier for nitrosaminer og nitraminer i luft (immission) og vand, hvilke har været anvendt i godkendelser af aminbaserede fangstanlæg [32].

I Storbritannien er der Environmental Assessment Levels (EAL's) for nogle aminer men ikke for alle, der anvendes til CO₂-fangst. Arbejdsmiljøgrænseværdier (OEL) findes for aminen "MEA," og det anføres, at den vil kunne bruges til at udvikle en EAL for "MEA" mellem 5 µg/m³ (long-term) and 15,2 µg/m³ (15 minute short-term). Foreslåede sundhedsbaserede grænseværdier for Nitrosaminer ligger mellem 0,07 ng/m³-10 ng/m³.

Det er også på tale at bruge et reference amin (NDMA) på linje med f.eks. hvordan benzo(a)pyrene anvendes som reference i forbindelse med polyaromatiske hydrocarboner (PAH'er).

Det nævnes i samme rapport at den norske EAL på 0,3 ng/m³ (maks værdi) for nitrosaminer og nitraminer (NDMA) ikke kan bruges direkte, da Storbritannien har en anden måde at vurdere kræftfremkaldende stoffer [28].

Der er endvidere i Storbritannien i 2021 udarbejdet et review af Best Available technology (BAT) af aminbaserede fangst teknologier til anvendelse på gas og biomassefyrede energianlæg [21] som har resulteret i en BAT-vejledning til brug for anlægsoperatører og myndigheder [33]. I samme forbindelse er der også fastsat EALs for mono-ethanolamine (MEA) og N-nitrosodimethylamine (NDMA).

- > MEA EAL for luft: 24 h gennemsnit: 0,1 mg/m³, 1h gennemsnit 0,4 mg/m³
- > NDMA EAL for luft: Årligt gennemsnit: 0,2 ng/m³

For chilled ammonia processen er det primært udledning af ammoniak, der skal undgås og kontrolleres. Det anføres, at der findes tilgængelige renseteknologier i tilfælde af eventuelle høje udledningskoncentrationer [25].

Oxyfuel processen vil typisk have en reduceret NO_x emission sammenlignet med forbrændingsprocesser med atmosfærisk luft [34].

I rapport fra anlæg i Lacq anføres ingen væsentlige miljøpåvirkninger fra oxyfuel fangstanlægget [35].

Ved et retrofit af CO₂-fangst på et eksisterende anlæg skal man være opmærksom på, at der vil ske en ændring af røggastemperatur, flow og vandmætning, der influerer emissionskoncentrationer og spredning af røggassen.

I rapport fra International Energy Agency IEA fra 2011 er konklusionen at afhængig af valg af capture teknologi og synergier kan være tradeoffs, hvad angår emission af NO_x, NH₃, SO₂ and PM [20]. Det påpeges at der fra anlæg med

CO₂-fangst ved brug af aminer kan opstå en øget direkte udledning af NO_x og PM, idet effektiviteten af anlægget vil falde. SO₂ emissionen fra anlæg med CO₂-fangst vurderes at falde, idet der er høje krav til SO₂ indhold i røggassen forud for fangstprocessen. NH₃ emission kan forventes at stige for de amin baserede fangst teknologier. For de øvrige fangstteknologier forventes ligeledes tradeoffs.

Udledning af procesvand

Der kan også ske emission af amin og nedbrydningsprodukter via spildevand specielt amintab via spildevand fra scrubbersystemet vurderes at være et opmærksomhedspunkt. Der refereres til målte værdier af nitrosaminer i spildevand i koncentrationer op til 6,79 g/l. Nedbrydelighed af nitrosaminer i vand varierer betydeligt [28].

I Storbritannien foreligger der ikke en grænseværdi for nitrosaminer i vand, idet der ikke foreligger tilstrækkelig data for de økotoksikologiske effekter [28].

For oxyfuel udkondenseres større mængder vand fra røggassen, hvilket dog er tilsvarende ved normal forbrænding. Dette vand skal renses som typisk røggaskondensat.

Støj

Støjklender på fangstanlæg vil være kompressor, booster sugetræksblæser samt cirkulationspumper på anlægget. CO₂-kompressoren vil skulle placeres i en lyd-isoleret og ventileret bygning. Der er ikke fundet kilder som nævner støj som en væsentlig miljøpåvirkning fra CO₂-fangstanlæg.

Arker, der leverer CO₂-fangstanlæg, beskriver at der i forbindelse med CO₂-fangstanlæg skal laves passende støjreducerende tiltag [29].

Affaldsprodukter

Reclaimer processen for både aminbaserede og chilled ammonia anlæg vil resultere i affald der skal bortskaffes. Affaldets sammensætning og indhold af farlige stoffer og form vil afhænge af specielt reclaimer processen [36].

Aminaffald er nævnt som en væsentlig miljømæssig påvirkning. Der estimeres 1 kg amin affald per 1 ton CO₂.

Energiforbrug til processen

Amin baseret CO₂-fangst nævnes som en meget energikrævende proces specielt til regenereringsprocessen [29] og tilstedeværelse og brug af "overskudsenergi" fra øvrige processer er vigtig for at holde det samlede energiforbrug nede.

En energianalyse udført på forskellige scenarier for CO₂-fangst på affaldsforbrændingsanlæg i DK nævner ligeledes, at CO₂-fangst kræver en betydelig mængde varme i form af damp til stripperen og det er vigtigt for at få en høj samlet effektivitet at så meget af varme fra CO₂-fangstprocessen genvindes til fjernvarmeproduktion. Ved introduktion af varmepumper kan fjernvarmeproduktionen øges med op til 20 % i forhold til et anlæg uden CO₂-fangst, men til gen-

gæld falder elproduktionen fra ca. 15 MW til ca. 6,5 MW for et anlæg med en affaldsbehandlingskapacitet på 30 ton/h. Det konkluderes, at der er et behov for en afvejning mellem reduktion i produceret elektricitet og en øget varmegenvinding og fjernvarmeproduktion i det konkrete projekt [37].

I rapport fra Det Europæiske Miljøagentur nævnes, at der for det enkelte projekt er behov for at se på hele CCS kæden i et livscyklus perspektiv for at vurdere CO₂ fodaftryk og øvrige emissioner [38].

Det er i samme rapport nævnt at CO₂-fangst på energianlæg samlet set vil betyde et øget energiforbrug på 15-25% til energiproduktion, transport, konditionering og mellemlagring.

Det norske Longship CCS projekt har vurderet, at der skal anvendes ca. 1,2-1,5 MWh/ton CO₂. Omkring 2/3 af energiforbruget er til varme, det øvrige er til el og til brændstof til skibe. Den største andel af energiforbruget bruges til CO₂-fangst og liquefaction.

En livscyklus analyse (LCA) af samme projekt viser at for "worst case" scenariet er CO₂ footprint 0,099 ton CO₂ udledt / ton CO₂ til lager.

I rapport fra IASS [25] nævnes et højt energiforbrug som en miljøpåvirkning for både oxy-fuel og chilled ammonia teknologierne. Herudover nævnes indirekte energiforbrug til NH₃ produktion anvendt i chilled ammonia fangst processen.

I Bref dokumentet (Best Available Techniques (BAT) Reference Document) for store fyringsanlæg er det estimeret, at energiforbruget til CCS vil give anledning til at netto el-effektiviteten reduceres med 8-12% [39].

Øvrige påvirkninger

Aker, der leverer CO₂-fangstanlæg, beskriver at der i forbindelse med CO₂-fangstanlæg skal laves passende tiltag i forhold til reduktion af udledning af varmt vand til recipient [29].

6.2.4 Afvikling

Der er ikke identificeret referencer der specifikt beskriver miljøforhold ved afvikling af CO₂-fangstanlæg.

De miljømæssige forhold ved afvikling vurderes at være sammenlignelige med, hvad der findes i forbindelse med afvikling af andre industrielle anlæg.

Det omfatter typisk: Støv og øvrige emissioner til luft knyttet til afviklingen, affaldsgenerering, eventuel udledning af overfladevand, CO₂-aftryk under afvikling samt generering af støj.

6.3 Natur

6.3.1 Forundersøgelser

Der er ikke identificeret referencer, hvor der fremgår en naturpåvirkning som følge af de undersøgelser, som er nødvendige forud for etablering af CO₂-fangstanlæg.

De naturmæssige forhold ved forundersøgelser vurderes herudover at være sammenligneligt med hvad der findes i forbindelse med andre tilsvarende industrielle anlæg.

6.3.2 Anlæg og etablering

For Lacq fangstanlæg, er der tale om CO₂-fangst fra en eksisterende naturgasproduktion. Det er derfor vurderet i forbindelse med miljøvurdering af projektet, at der ikke er en påvirkning på omgivende flora, fauna og jordbund, da installationerne til CO₂-fangst etableres inden for det eksisterende anlæg [35].

De naturmæssige forhold ved anlæg og etablering vurderes herudover at være sammenligneligt med hvad der findes i forbindelse med andre tilsvarende industrielle anlæg.

6.3.3 Drift

For Lacq fangstanlæg, er det vurderet i forbindelse med miljøvurdering af projektet, at der ikke sker en yderligere påvirkning på omgivende flora, fauna og jordbund eller emissioner, støj og trafik. Overvågning af flora og fauna over en 5-årig periode har ikke vist ændringer i området [35].

Der er ikke identificeret referencer, hvor der fremgår en naturpåvirkning som følge af eventuelt udslip af aminer fra et CO₂-fangstanlæg.

6.3.4 Afvikling

Der er ikke identificeret referencer, som omhandler naturpåvirkningen ved afvikling af et CO₂-fangstanlæg. Det forventes dog, at naturpåvirkningen ved afvikling af fangstanlæg generelt vil svare til påvirkningerne i anlægsfasen og sammenligneligt med tilsvarende industrielle anlæg.

7 Mellemlager faciliteter - Vurdering af sikkerhed, natur og miljø

7.1 Sikkerhed

7.1.1 Forundersøgelser

Der er ikke identificeret relevante referencer med omtale af sikkerhedsforhold specifikt relateret til forundersøgelser til etablering af CO₂-mellemlagre.

7.1.2 Anlæg og etablering

Der er ikke identificeret relevante referencer med omtale af sikkerhedsforhold specifikt relateret til anlæg og etablering af CO₂-mellemlagre.

7.1.3 Drift

Almindelige farer ved drift af trykbærende udstyr i form af operationelle forhold der kan føre til farlige trykstigninger, er også gældende for CO₂-mellemlager.

Det antages at mellemlagre etableres på land. Der skal her være opmærksomhed på etablering af sikkerhedszoner omkring faciliteterne som følge af risikoen ved udslip af CO₂. I afsnit 5.1.1 er det vurderet, at der kan være afstande til en dødelighed på 1 – 5% på op til 300 meter for et stort momentant udslip og op til 200 meter for et kontinuert udslip fra en stor lækage. I Northern Lights projektet er der for mellemlageret udarbejdet konturer for stedbunden risiko, som indikerer at de gældende danske acceptkriterier kan overholdes, hvis der i en afstand på ca. 500 meter ikke placeres institutioner, der indgår i det offentlige beredskab eller findes institutioner med svært evakuerbare personer og i en afstand på ca. 200 meter ikke placeres boliger eller anden følsom anvendelse. Det vil være nødvendigt med lignende analyser for konkrete projekter.

I afsnit 5 er der en beskrivelse af de mulige farer og konsekvenser ved håndtering og udslip af CO₂.

Der er ikke fundet eksempler på uheld med CO₂-mellemlagre i de undersøgte referencer.

7.1.4 Afvikling

Ved afvikling (nedrivning) af CO₂-mellemlagre skal der udover de almindelige arbejdsmiljøregler være fokus på, at der ikke findes ansamlinger af stoffer og materialer i anlæggene, som kan udgøre en fare for medarbejderne i forbindelse med nedrivningsaktiviteterne. Umiddelbart er der ikke identificeret hjælpestoffer, som kan udgøre en fare ved nedrivning af mellemlagre. Undtagelse kan være ammoniak i køleanlæg.

Der er ikke fundet eksempler på uheld med CO₂-mellemlagre i de undersøgte referencer.

For mellemlagre vurderes der ikke at være fare for forurening af faciliteterne med farlige stoffer, som der skal tages hensyn til i forbindelse med nedrivningen.

7.2 Miljø

7.2.1 Forundersøgelser

Der er ikke fundet referencer der specifikt beskriver miljøforhold ved forundersøgelser for mellemlagre for CO₂.

De miljømæssige forhold ved forundersøgelser af mellemlagre vurderes at være sammenlignelige med hvad der findes i forbindelse med forundersøgelser for andre industrielle oplag af gas.

Det skal i forbindelse med planlægning sikres, at den valgte placering sker under hensyn til de risikomæssige og miljømæssige forhold. Det nødvendige plangrundlag skal sikres og de nødvendige tilladelser være indhentet.

7.2.2 Anlæg og etablering

Der er kun fundet få referencer der specifikt beskriver miljøforhold ved anlæg og etablering af mellemlager for CO₂.

De miljømæssige påvirkninger under anlæg og etablering af mellemlager for CO₂ vurderes at være tilsvarende dem som identificeres for typiske øvrige industrielle lagre af gas og kemikalier.

Dette dækker følgende væsentligste påvirkninger der skal overvejes i de konkrete tilfælde: Støv og øvrige emissioner til luft knyttet til anlægsarbejde, brug af ressourcer, eventuel udledning af overfladevand eller vand fra grundvands-sænkning, CO₂ aftryk i anlægsfase samt generering af støj.

I miljøkonsekvensrapporten for Northern Lights projektet nævnes at et tankanlæg med 12 tanke, hvor toppen af tankene vil nå op i ca. kote +45 har en stor visuel betydning i det åbne landskab og vil ændre landskabets karakter [40].

7.2.3 Drift

Der er kun identificeret få referencer der specifikt beskriver miljøforhold ved drift af mellemlager for CO₂.

De miljømæssige påvirkninger under drift af mellemlager for CO₂ vurderes at være meget tilsvarende dem som identificeres for typiske øvrige industrielle lagre af gas, olie og kemikalier.

Dette dækker følgende væsentligste påvirkninger der skal overvejes i de konkrete tilfælde: Støj fra pumper, kompressorer og andet industrielt udstyr, eventuelle diffuse emissioner af CO₂, brug af kemikalier til konditionering, korrosionsbeskyttelse mv. eventuelle udledninger via overfladevand og risiko for spild. Herudover eventuelle planlagte udledning af CO₂ og evt. N₂ i forbindelse med vedligehold.

I miljøkonsekvensrapporten for Northern Lights projektet nævnes, at anlægget vil kunne efterleve støjkrav.

Endvidere nævnes at der ikke er planlagt udledning af CO₂ under normale driftsforhold. Kun i den unormale driftssituation, hvor anlægget ikke kan injicere gas i en længere periode, og der sker en trykforøgelse i anlægget, vil der kunne være behov for trykaflastning og udledning af CO₂ [17].

Herudover nævnes, at der ikke er risiko for forurening af overfladevand fra mellemlageret, idet der ikke vurderes at være kilder til en sådan forurening. Alt udstyr, som indeholder olie til køling, smøring, hydraulik mv. vil blive etableret således at eventuelle spild opsamles [17].

7.2.4 Afvikling

Der er ikke fundet referencer der specifikt beskriver miljøforhold ved afvikling af mellemlager for CO₂.

De miljømæssige forhold ved afvikling vurderes at være sammenlignelige med, hvad der findes i forbindelse med afvikling af andre industrielle anlæg.

Dette dækker følgende væsentligste påvirkninger der skal overvejes i de konkrete tilfælde: Affald i form af ikke genanvendelige anlægsdele, støj fra demontering og nedtagning, energiforbrug og emissioner fra transport og maskineri, eventuel udledning af CO₂ fra tømning af anlæg, eventuel brug af kemikalier til rensning af anlægsdele forud for nedtagning.

7.3 Natur

Naturpåvirkningen ved etablering af mellemlagerfaciliteter vil primært afhænge af anlæggets placering i forhold til den eksisterende natur. Arealbehov og anlægsfase vil medføre de samme naturpåvirkninger som ved etablering af andre anlæg, f.eks. inddragelse af beskyttede eller sårbare naturtyper og forstyrrelse af beskyttede arter som følge af fysiske indgreb, trafik og støj.

7.3.1 Forundersøgelser

Forud for etablering af mellemlagerfaciliteter vil der typisk blive foretaget feltundersøgelser (som for Northern Lights [41]), som ikke i sig selv har en påvirkning på flora og fauna.

7.3.2 Anlæg og etablering

Øget trafik og støj fra anlægsarbejdet kan forstyrre fugle og pattedyr især i yngleperioden om foråret, hvor særligt større rovfuglearter er følsomme for forstyrrelse [41].

For Northern Lights CO₂-lager er det vurderet, at skibstrafikken i anlægsfasen til og fra selve anlægget ved Ljøsøyna vil forårsage mest støj for fisk, da anlægsarbejdet vil foregå over et par år. De fleste studier viser, at skader på fisk fra støjeksposering ikke fører til negative effekter på fiskebestande. [40]

7.3.3 Drift

For mellemlager facilitet for Northern Lights, placeret ved kysten ca. 30 km nordvest for Bergen, er det potentielle influensområde for naturpåvirkninger afgrænset til op til 500 meter fra anlægget [41].

For det konkrete projekt, er det vurderet, at arealbehovet har den største påvirkning i form af forringelse af naturområder med lokal landskabsøkologisk funktion [41] [40].

På grund af den konkrete placering, er der ikke en øget støjpåvirkning eller en væsentlig påvirkning af vigtige naturtyper eller rekreative aktiviteter i form af trekking- og vandreruter [41].

Uheld på mellemlagerfaciliteter er beskrevet i afsnit 7.1.3 og konsekvensen ved indånding af CO₂ er beskrevet i afsnit 5.1.1.

Påvirkningen på natur ved et uheld/udslip af CO₂, herunder kuldepåvirkning, er ikke vurderet i forbindelse med Northern Lights.

7.3.4 Afvikling

Naturpåvirkningen ved afvikling af mellemlagerfaciliteter er ikke vurderet specifikt for Northern Lights projektet. Det forventes dog, at naturpåvirkningen ved afvikling af mellemlagerfaciliteter generelt vil svare til påvirkningerne i anlægsfasen og er endvidere sammenligneligt med, hvad der findes for andre industrielle oplag af gas.

8 Geologisk lagring af CO₂ på land og til havs - Vurdering af sikkerhed, natur og miljø

8.1 Sikkerhed

8.1.1 Forundersøgelser

Ved forundersøgelser er der mulighed for, at man under boringer offshore rammer lommer af kulbrinter i form af olie eller gas, som kan resultere i et blowout. Blowouts af kulbrinter medfører risiko for brand og eksplosion, samt forurening af havmiljøet i tilfælde af udslip af olie. Sandsynligheden vurderes som lav, da der forud for boringerne er udført seismiske undersøgelser, som vil kunne give information om eventuel forekomst af olie og gas i undergrunden.

Der er rapporteret om blowouts fra boringer i naturlige forekomster af CO₂, f.eks. ved geotermi og ved udvinding af CO₂ fra naturlige kilder [15], se også afsnit 5.1.1. Mest prominent i Sheep Mountain, CO, USA i 1982, hvor det tog en uge at stoppe udslippet. Der er fra de nævnte uheld ikke blevet rapporteret om alvorlig skade på mennesker eller miljø.

CO₂ i undergrunden findes typisk i områder med vulkansk aktivitet og der er ikke kendskab til naturlige forekomster af CO₂ i den danske undergrund. Det vurderes med den danske geologi, således meget lidt at sandsynligt at ramme naturlige forekomster af CO₂ ved boringer i forbindelse med forundersøgelser.

Der er ikke fundet eksempler på uheld med større udslip i forbindelse med forundersøgelser for geologisk CO₂ lagring.

8.1.2 Anlæg og etablering

Som for forundersøgelser gælder det, at der er mulighed for blowouts ved boringer i forbindelse med etableringen, med de samme farer som nævnt for forundersøgelser.

Der er ikke fundet eksempler på uheld med større udslip i forbindelse med anlæg og etablering af geologisk CO₂ lagring.

8.1.3 Drift

Ved driften af et geologisk lager injiceres der CO₂ i et reservoir i undergrunden. Dette sker under tryk og hvis man mister kontrollen med processen eller får en stor lækage på udstyret, er der risiko for et stort udslip til omgivelserne.

Hvis den oplagrede CO₂ af en eller anden grund migrerer mod overfladen kan der ske forholdsvis store udslip af CO₂.

Der er i flere tilfælde rapporteret om dødsfald og skader på vegetationen ved udsivning fra naturlige forekomster af CO₂ [15]. I referencen nævnes f.eks.: Uheld ved Mammoth Mountain, CA, USA: én person er død, uheld ved Solfatara i Italien: skader på vegetation i et areal af 0,5 km², uheld i Albani Hills i Italien: død af husdyr, uheld ved Clear Lake, CA, USA: 4 personer døde, uheld ved Lartera caldera, Italien: skader på vegetation og uheld i Dieng, Indonesien: 145 personer døde.

Der er ikke fundet eksempler på uheld specifikke for drift af geologiske CO₂ lagre i de undersøgte referencer, herunder store udsivninger på grund af migrering af den oplagrede CO₂.

De mulige konsekvenser af et stort momentant udslip af CO₂ er beskrevet i afsnit 5.

8.1.4 Afvikling

For lagre der er velanalyserede, hvor der sker løbende monitorering og er placeret i områder, hvor den tektoniske aktivitet er lav, vurderes risikoen for store momentane udslip af CO₂ for værende meget lille.

Som nævnt i det forrige afsnit er der kendte eksempler på udsivning fra naturlige forekomster af CO₂ i undergrunden.

Der er ikke fundet eksempler på uheld specifikke for geologiske CO₂ lagre, hvor der ikke længere injiceres CO₂, i de undersøgte referencer, herunder store udsivninger på grund af migrering af den oplagrede CO₂.

De mulige konsekvenser af et stort momentant udslip af CO₂ er beskrevet i afsnit 5.

8.2 Miljø

8.2.1 Forundersøgelser

Offshore og kystnære geologiske lagre

Der er kun fundet én referencer der decideret forholder sig til den miljømæssige påvirkning ved forundersøgelser i forbindelse med geologisk lagring af CO₂.

Specifikke CCS projekt referencer angiver primært, hvilke tekniske metoder der har været anvendt i forundersøgelserne. Metoder som er tilsvarende dem som er beskrevet under 10A.3.1.

Metoderne vurderes endvidere at være meget tilsvarende dem som bruges i forbindelse med kortlægning og undersøgelse af lagre til olie og gas, hvorfor der kan hentes erfaring fra f.eks. miljøvurderingsrapporter for oliegas projekter.

I miljøkonsekvensrapport for Northern Lights projektet [40] er nævnt følgende miljømæssige påvirkninger fra forundersøgelserne:

- > Udledninger til vand af kemikalier, boremudder, borespåner og cement mv. i forbindelse med boring og etablering af brønd.
- > Støj og emissioner fra undersøgelseskibe og borerig i forbindelse med hhv. undersøgelser, boring, transport og energiforbrug

I Northern Lights projektet forventes primært brug og udledning af kemikalier klassificeret jf. OSPAR klassificeringen⁷ som "grønne" og kun enkelte gule i forbindelse med brøndboring og etablering.

Herudover nævnes et gennemsnitlig dieselforbrug for en borerig (West Hercules) til 44 ton per døgn, og at boringen har en estimeret varighed på 75 døgn inklusive brøndtest.

Tilsvarende miljømæssige påvirkninger ses i forbindelse med boring og seismiske undersøgelser udført i forbindelse med oliegasproduktion som f.eks. beskrevet i Redegørelse for miljømæssige og sociale virkninger ESIS-Tyra, september 2017 [42].

Energistyrelsen har udarbejdet en række standardvilkår for forundersøgelser til havs samt en vejledning vedrørende boring, som også må forventes at dække forundersøgelser og boringer i forbindelse med geologisk lagring [43] [44].

Onshore geologiske lagre

Typen af forundersøgelser på land vurderes ikke at være meget anderledes end dem som er beskrevet for offshore. Den store forskel vil være at forundersøgelserne sker med maskiner og udstyr på land. Det betyder, at de miljømæssige påvirkninger vil ske på land i mindre afstand til mennesker, beboelse og naturarealer på land. Affald og spild vurderes at udgøre en mindre miljømæssig påvirkning idet der på land kan ske en kontrolleret opsamling og håndtering.

8.2.2 Anlæg og etablering

Offshore og kystnære geologiske lagre

Der er kun identificeret få referencer der decideret forholder sig til den miljømæssige påvirkning ved anlæg og etablering af et geologisk lager af CO₂.

⁷ Kemikalier klassificeres jf. OSPAR i grupperne: PLONOR (grønne), Ranking (gule), Substitution (røde). Typisk gives tilladelse til anvendelse af grønne og gule kemikalier hvorimod røde kun kan avendes efter en særskilt tilladelse fra Miljøstyrelsen. Sorte kemikalier er de mest skadelige for havmiljøet, og en udskiftning har højt prioriteret. De er optaget på en særlig liste over miljøskadelige stoffer.

I anlægs- og etableringsfasen skal der bores en brønd til injektion af CO₂ og de permanente installationer til injektion på land hhv. på offshore installation skal etableres.

I miljøkonsekvensrapport for Northern Lights projektet [40] er nævnt følgende miljømæssige påvirkninger fra anlæg og etablering:

- > Udledninger til vand af kemikalier, boremudder, borespåner og cement mv. i forbindelse med boring og etablering af brønd. Herudover nævnes anvendelse af mindre mængde radioaktiv materiale samt udledning af formationsvand i forbindelse med brøndtest.
- > Støj og emissioner fra supportskibe og borerig i forbindelse med hhv. transport og energiforbrug

Tilsvarende miljømæssige påvirkninger ses i forbindelse med boring og seismiske undersøgelser udført i forbindelse med oliegasproduktion beskrevet i f.eks.: Redegørelse for miljømæssige og sociale virkninger ESIS-Tyra, september 2017 [42].

Onshore geologiske lagre

Anlæg og etablering af geologisk lager på land vurderes ikke at være meget anderledes end som er beskrevet for et offshore lager. Den store forskel er at anlæg og etablering sker på land med landgående maskiner og transportmetoder. Det betyder, at der i langt højere grad vil være risiko for påvirkning af mennesker i umiddelbar nærhed af site. Samtidig vurderes f.eks. affald og spild at udgøre en mindre miljømæssig påvirkning idet der på land kan ske en kontrolleret opsamling og håndtering.

8.2.3 Drift

Drift af geologisk lager indbefatter injektion af CO₂ i lageret, vedligehold af brønd samt monitorering af lageret.

Offshore og kystnære geologiske lagre

De miljømæssige påvirkninger nævnt for Northern Lights projektet inkluderer [40]:

- > Anvendelse og udledning af nitrogen til spuling og test af anlægget.
- > Risiko for ventilering af et overskudsvolumen af CO₂ ved opstart og ventilering.
- > Udledning af hydraulikvæske fra åbning af fjernstyrede ventiler på subsea-installationer. Der estimeres en udledning på ca. 2.000 liter pr brønd pr år. Udledningen forventes at være højere i starten på grund af hyppigere test.
- > Mulig udledning af kemikalier i forbindelse med brøndtest

- > Mindre diffuse udledninger af CO₂ fra tryksatte koblinger, flanger og ventiler
- > Øget energiforbrug inkl. tilhørende emissioner til drift af ventiler mv. ved brønden

Det estimeres at drift af modtageanlæg og permanent geologisk CO₂ lager vil medføre en CO₂ udledning på 0,1 % af modtage kapaciteten for lageret [40].

Monitorering udført fra 1996 og frem til 2017 af CO₂ udledning fra Sleipner viser, at der ikke sker udledning af CO₂ [45]. Konklusionen fra den løbende monitorering af dette projekt er blandt andet at CO₂ forbliver sikkert i lageret og at seismiske undersøgelser er vigtige i monitorering af lageret både i forhold til udslip og i forhold til CO₂'ens opførsel i lageret [45].

Onshore geologiske lagre

Drift af et onshore lager for CO₂ vurderes ikke at have væsentlige anderledes miljømæssig påvirkning end et offshore lager for CO₂. Herudover kan et onshore lager for CO₂ sammenlignes med onshore lager for naturgas f.eks. Stenlille.

I miljøvurdering hhv. miljøgodkendelse for Stenlille gaslager [46] [47] nævnes følgende miljømæssige påvirkninger:

- > Røggasemissioner fra kedler og nødgeneratorer ved test og eventuelle strømudfald.
- > Risiko for udslip af gas ved trykaflastning af udstyr
- > Støj fra ventiler, kompressorer og andet udstyr
- > Risiko for lækage af gas til grundvandsmagasin eller øvre jordlag
- > Risiko for lækage af forurenende stoffer fra f.eks. olietank og fra lager og håndtering af formationsvand

Det anføres at drift og indretningen af lageret skal tilrettelægges på en sådan måde, at muligheden for grundvandsforurening i praksis kan udelukkes. Det er endvidere vurderet at mulighederne for at monitorere et eventuelt gasudslip, før end det kan medføre nogen skade i området, er særdeles gunstige ved Stenlille.

I dokumentationen fra pilotanlægget i Lacq, Frankrig anføres det, at der ikke er detekteret tilfælde af CO₂ lækage og at der ikke har været påvirkning af økosystemet [48]. Miljøvurdering fra samme projekt konkluderer endvidere, at der ikke er påvist væsentlige miljøpåvirkninger [35] af projektet.

Også data fra Illinois Basin, Decatur projektet viser at CO₂ bliver i det geologiske lager. Det anføres at der ikke er identificeret CO₂ lækager eller andre væsentlige påvirkninger [49].

Ovenstående erfaringer fra de enkelte CO₂ lagre underbygges af en opsummerende artikel fra The Electricity Journal. Her anfører at de seneste 50 års erfaring med geologisk lagring af CO₂ viser at sandsynligheden for større udsivning af CO₂ er meget lav [50].

8.2.4 Afvikling og monitorering

Afvikling af en geologisk lagring for CO₂ vil bestå af brøndlukning – eventuel de-comissionering af installationer og rør. Herudover vil fortsat ske monitorering af lageret.

I Northern Lights projektet anføres det, at ved afslutning af injektion og lukning af lageret vil brønde lukkes og anlæg på havet vil blive fjernet jf. OSPAR-beslutning 98/3. Rørledninger og kabler vil blive håndteret jf. gældende retningslinjer på lukningstidspunkt. Det anføres, at det forventes at rør og kabler efterlades såfremt de ikke udgør en risiko for bundfiskeri [40].

Det er endvidere for det projekt aftalt, at der forud for lukning skal udarbejdes en afviklingsplan, som i detalje beskriver lukning og nedtagning af anlægsdele, samt hvordan overvågning af lageret tænkes udført efter afslutning af injektion.

Miljøforhold ved monitorering af det geologiske lager efter lukning vil svare til dem som er beskrevet under forundersøgelser.

Miljøforhold ved lukning og afvikling af permanente installationer inkl. rørledninger vurderes endvidere at være de samme, som ses ved tilsvarende anlæg anvendt til udvinding af olie og gas. Dog med den væsentlige fordel at anlæg og anlægsdele ikke er forurenede med kulbrinter, og at der efter afvikling/lukning skal fortsættes med løbende monitorering af det geologiske lager.

8.3 Natur

8.3.1 Forundersøgelser

Som en del af de indledende forundersøgelser gennemføres seismiske undersøgelser, som kan påvirke natur og levende organismer både på land og på vand.

Seismiske undersøgelser på land

Ved seismiske undersøgelser på land i Danmark, afhænger påvirkningen på naturen af, hvilket materiel og køretøjer, som anvendes og om undersøgelsen foretages fra veje eller ubebyggede arealer. Vilkkårene for undersøgelsen reguleres gennem tilladelser til de enkelte forundersøgelser.

For seismiske undersøgelser på land i Grønland, er det i en rapport fra 2020 vurderet, at påvirkninger på naturen afhænger af, hvilke metoder der anvendes og hvornår på året undersøgelserne udføres. Der anvendes meget store og tunge køretøjer, der sætter store aftryk i landskabet ved at beskadige vegetation og

det organiske lag, hvorved permafrost og vandafstrømningsforhold ændres. Der er også ofte tale om kraftige forstyrrelser af fugle- og dyrevildt. [51]

Af afværgeforanstaltninger, som kan være relevante for andre områder end de arktiske, nævnes i undersøgelsen:

- > Forhindre nedsivning af brændstof og andre skadelige stoffer, f.eks. ved placering af spildbakker, som vil kunne opsamle miljøfarlige væsker.
- > Planlægge hvornår og hvor, der køres med tunge køretøjer, for at forhindre skade på vegetation og sårbare områder.
- > Mindske forstyrrelse af fugle- og dyrevildt, ved at undgå sårbare perioder og områder som er udpeget som vigtige habitater for dyrevildt. [51]

I Danmark vil de samme typer af afværgeforanstaltninger være relevante at overveje, især inden for arealer med naturbeskyttelse eller i områder, hvor der findes beskyttede arter, som er sårbare overfor fysisk påvirkning og forstyrrelser.

Marine seismiske undersøgelser

Ved seismiske undersøgelser til søs inden for dansk territorium, afhænger påvirkningen på naturen af, hvilke fartøjer og metoder, som anvendes og i hvilket konkret område undersøgelsen foretages. Vilklårene for undersøgelsen reguleres gennem tilladelser til de enkelte forundersøgelser.

Seismiske undersøgelser på havet kan påvirke fisk og marine pattedyr [52] [53] [40] [42]. Niveaue af påvirkningen fra undervandsstøj kan overordnet opdeles i:

- > Hørbart niveau, som afhænger af arter
- > Maskering af øvrige lyde, f.eks. kommunikation
- > Påvirkning af adfærd, f.eks. fødesøgning
- > Fysiske skader på høreorganerne, i form af hørenedsættelse eller høretab.

Den konkrete påvirkningen vil afhænge af, hvilke arter der udsættes for undervandsstøj. Der er potentielt en direkte påvirkning af det enkelte individ i form af høreskader eller -tab og en indirekte påvirkning af bestande, hvis fødesøgning og navigation forstyrres. I miljøvurdering af Tyra, henvises der til et studie af marsvin under en 2D-seismisk undersøgelse i Moray Firth, hvor det blev konstateret, at dyr udviste kortvarig undvigeadfærd inden for 5-10 km omkring området for seismisk dataindsamling. Samlet set kan risikoen for virkninger på havpattedyr være lokal (hørenedsættelse) eller regional (adfærdsmæssig). [42]

I forbindelse med Northern Lights, er der gennemført grundige miljøvurderinger af påvirkningen ved at gennemføre marine seismiske undersøgelser. Northern

Lights CO₂-lager er placeret i den norske del af Nordsøen og forholdene er derfor sammenlignelige med danske forhold, selvom der er specifikke arter og naturtyper, som ikke findes inden for den danske del af Nordsøen.

Dyrelivet i havet vurderes at påvirkes kraftigere af støj og på større afstande end arter på land ved f.eks. seismiske undersøgelser, da lyd propagerer hurtigere og længere i vand end i atmosfærisk luft [3].

Seismiske luftkanoner kan påvirke fisks adfærd i området tæt på det seismiske fartøj. I redegørelse for miljømæssige virkninger af opgradering af eksisterende anlæg på Tyra-feltet, forventes det dog, at seismiske undersøgelser generelt ikke vil føre til langvarige ændringer i fiskebestandenes størrelser og at virkningen vurderes at være af lille intensitet, af lokalt omfang og af kort varighed [42].⁸

For hørenedsættelse og adfærdsmæssige virkninger på marine pattedyr vurderes påvirkningen at være af lille intensitet, da sandsynligheden for, at undersøgelsesfartøjer støder på havpattedyr og andre havarter i et område med risiko for virkning, er lille. Det vurderes, at populationerne af havpattedyr i Nordsøen ikke vil blive påvirket af seismiske aktiviteter ved TYRA-projektet. Virkningen vurderes at være af lille intensitet, af lokalt eller regionalt omfang og mellem-langvarige eller langvarige. Den overordnede virkning på havpattedyr af under-vandstøj fra seismiske undersøgelser vurderes at være af moderat negativ overordnet betydning. [42]

For Northern Lights CO₂ lager, vil der før opstart af injektion blive gennemført en baseline seismisk undersøgelse, som danner et sammenligningsgrundlag for den senere overvågning af CO₂. Området som dækkes vil være i størrelsesorden 550 km², og undersøgelsen varer ca. to måneder og kan påvirke yngel og larver af fisk, hvis undersøgelsen gennemføres i gydeperioden og umiddelbart efter [40].

I Northern Lights projektet er det anført, at der gennem driftsperioden vil gennemføres seismiske undersøgelser af det geologiske lager i en størrelsesorden 200 km². Her er det ligeledes anført at de seismiske undersøgelser kan give skade på fisk og pattedyr. Det anføres, at påvirkningen er afhængig af metoden der anvendes. En "soft start" angives som mulig afværgeforanstaltning således at lydfølsomme fisk og pattedyr skræmmes bort. Det anføres at seismiske undersøgelser med års mellemrum vil have midlertidige effekter på fiskebestande i det berørte områder. [40]

For Northern Lights CO₂ lager er det vurderet, at omfanget af direkte skade på dyrenes hørelse er begrænset til nærområdet nogle hundrede meter fra kilden, og at der ikke vil være en påvirkning på populationsniveau. Marsvin, spækhugger og vågehval undviger ved lavere støjniveauer end mange andre arter, og det

⁸ I VVM-redegørelse for Tyra, henvises til følgende kilde: Norwegian Oil Industry Association (OLF). 2003. Seismic surveys impact on fish and fisheries by Ingebret Gausland.

kan derfor ikke udelukkes, at seismiske undersøgelser kan påvirke de marine pattedyr i området, hvor de seismiske undersøgelser gennemføres. Påvirkningen er vurderet til noget forringet⁹ [40].

Undervandsstøj er en form for energi, der i ekstreme tilfælde kan påvirke plankton, f.eks. på grund af nedbrydning af celler (cellelyse). Undervandsstøj som beskrevet for Tyra-projektet, som omfatter olie-/gasindvinding i Nordsøen, kan genereres fra seismiske aktiviteter (luftkanoner, multibeam-ekkolod og sidesøgende sonar), spunsramning under konstruktion af nye platforme, ramning af konduktorer, boring, afvikling og forskellige fartøjer. På grundlag af planktonpopulationernes meget tætte bestandtæthed og deres høje reproduktion forventes plankton at genoprette sig selv efter forstyrrelsen [42].

Skadelige påvirkninger af fisk og pattedyr som følge af seismiske undersøgelser og overvågning, medfører en lokal, midlertidig påvirkning, hvor det er muligt at undgå skadelige påvirkninger med afværgeforanstaltninger [52], f.eks. afværgetiltag som "soft-start" og brug af fiskerikyndigt mandskab ombord [40].

Af miljøvurderingen af Tyra-projektet, fremgår det, at risikoen for, at undervandsstøj påvirker havpattedyr i forbindelse med geofysiske aktiviteter og anlægsprojekter, generelt afværges ved hjælp af følgende tiltag:

- > På steder, hvor det må forventes, at der vil ske en påvirkning af havpattedyr, vurderes den bedste tilgængelige teknologi.
- > Planlægning og effektiv udførelse af geofysisk dataindsamling og anlægsprojekter, så den samlede varighed af arbejdet forkortes, og følsomme arters eksponering for støj minimeres.
- > Overvågning af havpattedyrenes tilstedeværelse inden iværksættelse af støjende aktiviteter og i forbindelse med geofysisk dataindsamling eller anlægsarbejde.
- > Der etableres en eksklusionszone, hvor arbejdet bliver udsat, hvis der viser sig at være havpattedyr til stede inden arbejdets påbegyndelse.
- > Procedurer til "soft" opstart, også kaldet ramp-up, skal benyttes i de områder, hvor der er påvist aktivitet af havpattedyr. Det betyder, at lydsignalniveauet gradvist forøges til fuldt operationelt niveau, så dyret har mulighed for at fjerne sig fra de generende lyde. Derved reduceres risikoen for eventuelle påvirkninger fra den genererede undervandsstøj. [42]

I Danmark vil de samme typer af afværgeforanstaltninger være relevante at overveje, især inden for arealer med naturbeskyttelse eller i områder, hvor der findes beskyttede arter, som er sårbare over for støj og forstyrrelser. Afværge-

⁹ Efter vurderingsmetode i miljøvurdering af Northern Lights.

foranstaltninger vil blive fastlagt efter en konkret vurdering af et projekts påvirkning og vil typisk omfatte foranstaltninger, som reducerer eller undgår væsentlige, negative påvirkninger.

Visse foranstaltninger for at mindske eller undgå en påvirkning af marine pattedyr og fisk er allerede standardprocedure i Danmark og/eller en del af de tilladelser, som gives [43]. Der kan være identificerede påvirkninger, som forstyrrelse af marine pattedyr i et større område, som ikke afværges med de foranstaltninger, som typisk anvendes.

8.3.2 Anlæg og etablering til havs

Under anlæg og etablering kan der være behov for seismiske undersøgelser – se påvirkning på natur under forundersøgelser i afsnit 8.3.1.

I anlægsfasen til havs kan marine pattedyr og fisk potentielt påvirkes af anlæg af installationer [53], herunder støj fra skibstrafik, øget turbiditet¹⁰ og risiko for spredning af sedimenter, næringssalte og miljøgifte/kemikaliesammensætning [40] [42].

Arealbehov

Afhængigt af det konkrete projekts placering og arealbehov, kan der være en permanent påvirkning af natur- og miljøbeskyttelsesområder [3], herunder Natura 2000-områder [54] [53], vigtige marine naturtyper samt gydeområder [40].

I forbindelse med arealbehovet, kan der være et tab af områder for fisk der gyder på bunden (tobis) og reduceret fiskeri omkring anlæg og ikke nedgravede rørledninger pga. fiskerifri zoner og sikkerhedszoner [53].

Havbund

Ved etablering og placering af anlæg, brønde og rørledninger, vil der være en påvirkning af havbunden [3] [42], herunder permanent ødelæggelse af havbund/habitater og midlertidig påvirkning som følge af sedimentspredning [52] samt ændring af havbunden ved akkumulering af bore-mudder [53]. Boring af brønde medfører ophobning af materiale med kemikalier bundet til sedimentet. Sedimentet spredes hurtigt af vandstrømmen, men der er observeret lokale effekter i overvågningsprogrammer [52].

Fysisk forstyrrelse på havbunden kan forekomme under "site undersøgelser", 4D-seismiske undersøgelser, boring, installation af platforme og rørledninger samt afvikling. De fysiske forstyrrelser fra disse aktiviteter forventes ikke at forekomme samtidig. [42]

¹⁰ Turbiditet anvendes om vandets klarhed/renhed og er et mål for suspenderet stof i vandet, f.eks. fine partikler som mineraler, organiske stoffer og bakterier.

For Northern Lights CO₂ lager forventes en lille spredning af partikler og dermed miljøgifte i forbindelse med etablering af rørledningen og kun begrænset op-hvirvling som følge af udlæg af sten langs rørledningen. Der forventes ingen på-virkning på bundfaunaen som følge af sedimentspredning [40]. For projektet er det desuden vurderet, at der vil ske en ændring af habitater, hvor der udlægges sten langs rørledningen. Da det konkrete område ikke rummer sjældne arter eller unik bundfauna og der samtidig er tale om et begrænset areal, er den samlede påvirkning af bundfauna vurderet til ubetydelig [40].

I miljøvurdering af Tyra, er det vurderet, at den mest intense virkning på havbunden forårsages af tracering, hvor nye rørledninger nedgraves til en dybde på ca. 1.5-2 m under havbundsoverfladen. Tracering af rørledningen i havbunden foregår ved hjælp af pløjning, nedspuling eller mekanisk skæring. Under denne proces suspenderes havbundssediment ind i vandsøjlen. Baseret på erfaringer fra andre rørledningsprojekter¹¹ vurderes det, at det suspenderede sediment bundfældes inden for nogle få hundrede meter fra det forstyrrede område [42].

Støj og lys

Støjpåvirkning i forbindelse med seismiske undersøgelser/monitorering er behandlet i afsnit 8.3.1.

For Northern Lights CO₂ lager vil installation af rørledning og kabler, samt etablering af stenfyld i rørledningstracéet medføre støj. Det er vurderet, at der ikke er nogen negativ påvirkning af marine pattedyr fordi arbejdet vil flytte sig og foregå over en begrænset periode, hvor dyrene vil have mulighed for at trække væk fra området under anlægsarbejdet. For den konkrete lokalitet, er der allerede en høj grad af skibstrafik i området, og det forventes derfor ikke at skibstrafik i anlægsfasen vil påvirke marine pattedyr i nævneværdig grad. [40]

I det omfang, der anvendes belysning på fartøjer og faste installationer over vandet, kan det have en påvirkning på arter over og under vandet [52]. Fugles navigation kan blive forstyrret og de tiltrækkes især af lys på offshore olie-gasplatforme, hvor belysningen har en effekt på store afstande [55]. I forbindelse med Tyra, er det vurderet, at den potentielle forstyrrelse af fisk fra lys på rigge,

¹¹ I VVM-redegørelsen for Tyra henvises til følgende kilder:

Neff, J.M., Anderson, J.W. 1981. Response of marine animals to petroleum and specific petroleum hydrocarbons. Halsted Press. New York.

Nord Stream. 2009. Environmental Impact Assessment: Documentation for Consultation under the Espoo Convention Nord Stream Espoo Report: Key Issue Paper Seabed Intervention: Works and Anchor Handling.

Todd VLG, Todd IB, Gardiner JC, Morris ECN, MacPherson NA, DiMarzio NA, Thomsen F, 2015. Review of impacts of marine dredging activities on marine mammals. ICES Journal of Marine Science 72, 328–340.

platforme og fartøjer forventes at være lokal og sprede sig 90-100 m fra kilden [42].

Vandkvalitet

Boring af brønd vil medføre støj og øget turbiditet i vandmasserne, som kan føre til at marine pattedyr undviger området. For Northern Lights CO₂ lager forventes det ikke at marine pattedyr bliver påvirket af boringen i nævneværdig grad [40].

Fisk påvirkes under anlægsarbejdet af øget turbiditet i vandsøjlen, som vil kunne medføre dårligere sigt under fødesøgning og potentiel undvigelse af området [40]. Havfugle kan ligeledes påvirkes af øget turbiditet, som kan gøre fødesøgningen mere udfordrende for fuglene, hvis anlægsarbejdet gennemføres i sårbare perioder som yngleperioden [40].

Fisk er følsomme over for lydtryk og partikelbevægelse. Voksne fisk er meget mobile og kan svømme væk fra områder, som er forstyrrende, i modsætning til larver og yngel som er mindre mobile. Rørlægningsarbejdet flytter sig langs tracéet med ca. 4 km i døgnet, dvs. at støj og forstyrrelser i forbindelse med arbejdet dermed vil foregå i en meget begrænset periode i det enkelte område [40].

I miljøvurdering af Tyra, er det vurderet, at virkningen på vandkvalitet, som følge af suspenderet materiale ved anlæg af rørledningen, vurderes at være af lille intensitet, af lokalt omfang og af kort varighed. [42]

Udledning af vandbaseret boremudder og vandbaserede borespåner under de planlagte boreaktiviteter kan påvirke vand- og sedimentkvaliteten omkring bore-riggen.

Når vandbaseret mudder og vandbaserede spåner, der er slam af partikler af forskellige størrelser og tætheder i vand, der indeholder opløste salte og organiske kemikalier, udledes til havet, dannes der en fane, som hurtigt fortyndes, da den driver væk fra udledningsstedet med de dominerende vandstrømme. Feltundersøgelser af koncentrationen af suspenderede stoffer i faner af boremudder og -spåner i forskellige afstande fra boreaktiviteten har bekræftet dette mønster, og det kan konkluderes, at koncentrationen af suspenderede borespåner og -mudder falder meget hurtigt på grund af materialets sedimentation og fortynding [56] [57].

Kemikalier og næringsstoffer

Udslip af kemikaliebehandlet vand ved brønden fra klargøringen af rørledningen før drift, er for Northern Lights planlagt gennemført i juli og august måned. Makrel gyder i perioden maj-juli, mens nordsøsilde gyder i perioden august-februar. Begge arter har gydeområder langt fra brøndområdet, og det vurderes at udslip af kemikalieholdigt vand hurtigt vil fortyndes og vil medføre ubetydelig påvirkning på drivende æg og yngel. [40]

For Northern Lights CO₂-lager er det vurderet, at rørlægning og udlægning af sten kan give en lokal spredning af mindre mængder partikler og næringsstoffer

nær havbunden, samt eventuelle miljøgifte i sedimenterne i Hjeltefjorden. Dette vil relativt hurtigt sedimentere igen. [40]

Udledningerne af vand, olie og kemikalier indeholder stoffer, der kan fungere som næringsstoffer for fytoplankton og bakterier i vandet [42].

Plankton

For Northern Lights CO₂ lager forventes ingen påvirkning på plankton ved etablering af rørledning, da arbejdet medfører meget begrænset resuspension¹² af sediment og kun på dybt vand. Der kan være miljøfarlige stoffer i det sediment, som ophvirvles fra havbunden, men det forventes ikke, at det vil være i så høje koncentrationer, at det har en negativ påvirkning af det marine miljø. Det vurderes, at der er en ubetydelig påvirkning, som er kortvarig, hurtigt reversibelt og kun påvirker et meget begrænset område. [40]

Forskellige aktiviteter ved Tyra-projektet forventes at medføre sedimentresuspension, og det kan føre til øget vandturbiditet og tilførsel af næringsstoffer (primært ammonium og fosfat), der kan stimulere bakterie- og fytoplanktonvækst i vandet [42].

8.3.3 Drift

Under drift og injektion kan der være behov for seismiske undersøgelser/monitorering – se påvirkning på natur under forundersøgelser i afsnit 8.3.1.

Offshore og kystnære geologiske lagre

Et EU-forskningsprojekt fra 2011-2015, ECO2, opsummerede påvirkninger på marin natur ved CO₂-lagring ved de aktive lagre, Sleipner og Snøhvit, samt et kommende lager i Polen. Studiet undersøgte konsekvenser af CO₂-udslip ved laboratorieforsøg, et kontrolleret forsøgsudslip ved Sleipner og undersøgelse af lokaliteter med naturlig CO₂-udsivning. Forskningsprojektet konkluderer, at CO₂ gasbobler opløses inden for et par meter, og at forsuring/fald i pH-værdi forsvinder inden for 1 km. Studiet refererer til forsøg, som har vist, at fisk og skaldyr kan blive påvirket ved konstante udledninger og lav pH-værdi, som over tid kan opløse kalkskaller og muslinger. De miljømæssige påvirkninger af udslip vurderes samlet set som små, også ved potentielle udslip fra flere CO₂-lagre. [58]

I forbindelse med fysiske anlæg på havbunden, som ikke-nedgravede rørledninger, kan der opstå revlignende effekter [53]. Ved udlægning af sten langs rørledningen og ved krydsninger, vil habitater i området ændres. For Northern Lights er der tale om et område på 5.500 m², hvor det dog vurderes, at bundfaunaen i området ikke er unik for området og at arterne findes flere steder langs kysten. Områderne som dækkes til af sten er begrænsede. Der forventes

¹² Opblanding af partikler/sediment i vandet, som f.eks. ophvirvles ved forstyrrelse af havbunden under anlægsarbejde.

ingen påvirkning på ansvarsarterne eller at biodiversiteten i området vil reduceres. Påvirkningen vurderes derfor som ubetydelig, med *ingen konsekvenser*¹³ for bundfauna. [40]

Rørledninger kan få vandet til at strømme hurtigere foran rørledningen og dermed erodere havbunden og/eller skabe aflejringer bag den. Vandbevægelsen kan også bevirke, at bunden under rørledningen eroderer. Rørledninger med tilknytning til Tyra-projektet nedgraves ved tracering eller dækkes med sten, hvilket minimerer erosionsvirkningerne. [42]

Med hensyn til svampeorganismer, der lever på faste undervandskonstruktioner, vil disse fungere som filtre for den plankton, der findes i de gennemstrømmende vandmasser. Dette vil ændre den lokale fødekæde og dermed den lokale biologiske produktion og nedbrydning af organisk stof i området. Selv om dette vil påvirke økologien i et område, der er flere gange større end det område, der optages af felterne, er det stadig en mindre påvirkning af det regionale økosystem. [42]

I miljøvurdering af Danmarks havplan, er det vurderet for de to udlagte områder til CO₂-lagring i Nordsøen, at der vil være en forstyrrelse af kyst- og havfugle på grund af skibstrafik i løbet af driftsfasen [53].

I forbindelse med EU's CO₂-lagringsdirektiv, er det vurderet, at der i tilfælde af meget usandsynlige mindre CO₂-lækager, kun vil være lille lokal marin påvirkning. Dette skyldes, at de marine økosystemer er robuste over for mindre udsving i CO₂ koncentration. Selv ekstremt usandsynlige større lækager vil have en begrænset og midlertidig effekt på marine økosystemer [59].

Den lille risiko for lokale marine økosystemer, som følge af CO₂-lagring, skal opvejes med de omfattende påvirkninger, som klimaforandringer og relateret forurening af havene medfører i dag [59].

I forbindelse med eventuel lækage fra Northern Lights CO₂ lager, er det vurderet, at der vil være en ubetydelig påvirkning af det marine miljø. Dette er begrundet i typen af uheld, hvor der er tale om et akut udslip med begrænset spredningsområde og at CO₂ forventes at blive fortyndet hurtigt i vandmasserne [40].

Onshore geologiske lagre

I driftsfasen for geologisk lagring på land, vil der være behov for at overvåge lageret og de eventuelle påvirkninger på jord, luft, flora og fauna samt grundvand og overfladevand. Overvågningen kan have samme påvirkninger på naturen, som for de indledende forundersøgelser i form af seismiske undersøgelser, besigtigelser og opsætning af måleudstyr.

¹³ Jf. vurderingsmetode i miljøvurdering af Northern Lights projektet.

For lagringsområdet ved Lacq har der været gennemført et overvågningsprogram gennem 5 år, baseret på et baseline studie i 2009. Overvågningen bestod blandt andet af forskellige målestationer og regelmæssige registreringer. For påvirkningen på flora og fauna er der påvist mindre fluktuationer over årene, som kan tilskrives øvrige påvirkninger end CO₂-lageret. Det er dog samtidig vurderet, at de 5 år er for kort en overvågningsperiode til at afskrive påvirkninger fra CO₂-lageret [35].

CO₂ anses ikke i sig selv som forurenende i vand, men ved opløsning danner CO₂ en svag syre, kulsyre, som kan medføre udvaskning af andre forurenende metaller eller mineraler, som arsenik, bly og organiske forbindelser, som kan forurene grundvand og drikkevand. [60]

8.3.4 Afvikling

Under afvikling kan der være behov for seismiske undersøgelser/monitorering – se påvirkning på natur under forundersøgelser i afsnit 8.3.1.

9 Transport af CO₂ på land og til havs - Vurdering af sikkerhed, natur og miljø

9.1 Sikkerhed

9.1.1 Forundersøgelser

Der er ikke identificeret relevante referencer med omtale af sikkerhedsforhold specifikt relateret til forundersøgelser for etablering af transport infrastruktur for CO₂.

9.1.2 Anlæg og etablering

Hvad angår transport med lastvogn, tog eller skib antages det, at der vælges eksisterende standardmateriel, som er indrettet i henhold til de internationale transportregler for CO₂ (ADR, RID og IMDG). Derfor ingen specifikke forhold for transport af CO₂.

Ved lægning af rørledninger er der en række fysiske farer (håndtering af tungt udstyr, klemfare, druknefare og lign.), både til havs og på land, som ikke er relateret specifikt til anlæg af CO₂-rørledninger. I anlægsfasen er der ikke CO₂ i rørledningerne og derfor ingen fare for udslip af CO₂.

9.1.3 Drift

Ved transport med lastvogn, tog eller skib gælder de internationale transportregler for CO₂ i henhold til ADR, RID og IMDG.

I estimerne nævnt i afsnit 5.1.1 er der udregnet konsekvensafstande på ca. 30 meter til 1 – 5% dødelighed, for momentane udslip på 50 tons CO₂, hvilket antages at repræsentere et udslip fra en lastvogn eller en togvogn. For skibstanke, som må formodes at være større, kan konsekvensafstanden være op til 300 meter.

Almindelige forholdsregler for drift af trykbærende rørledninger er også gældende for drift af rørledninger med CO₂.

I estimerne nævnt i afsnit 5.1.1 er der udregnet konsekvensafstande¹⁴ på ca. 200 meter, for et stort kontinuert udslip, som antages at repræsentere et stort udslip fra en rørledning. Et fuldstændigt rørbrud vil give større konsekvensafstande, men vi har ikke kendskab til modellering af sådanne udslip. Det må antages at konsekvensafstanden i sådan et tilfælde er mindst 300 meter, svarende til et momentant udslip på 2.000 tons. De nævnte konsekvensafstande gælder

¹⁴ Konsekvensafstanden er defineret som den afstand, inden for hvilken, der er en risiko for død på 1-5%

for udslip til atmosfæren. Ved udslip til havs vil den undslupne CO₂ fortynnes/optages i vandsøjlen, når den stiger op til overfladen, så den ikke udgør en fare for mennesker.

I afsnit 5 er der en beskrivelse af de mulige farer og konsekvenser ved håndtering og udslip af CO₂.

Der er fundet forskellige artikler i aviser og tidsskrifter om et uheld med udslip fra en rørledning i USA i februar 2020. Der foreligger endnu ikke resultater af officielle undersøgelser af uheldet. Ud fra hvad der kan udledes af artiklerne, er der tale om et totalt rørbrud på en nedgravet rørledning som følge af forskydninger i jorden efter heftige regnskyl. Gasskyen var angiveligt grønlig og stærkt stinkende, hvilket indikerer at der ikke var tale om ren CO₂. Angiveligt var der også H₂S i rørledningen. Ingen mennesker kom alvorligt til skade [61]. Der er ikke fundet eksempler på uheld med CO₂-transport i de undersøgte referencer.

9.1.4 Afvikling

Ved demontering af rørledninger skal der udover de almindelige arbejdsmiljøregler være fokus på, at der ikke findes ansamlinger af stoffer og materialer i rørledningerne, som kan udgøre en fare for medarbejderne i forbindelse med demonteringen. Umiddelbart er der ikke identificeret hjælpe-stoffer, som kan udgøre en fare ved nedrivning af rørstrækninger.

Skrotning af lastvogne, togvogne og skibe til transport af CO₂ vurderes ikke at være relevant i denne sammenhæng.

Der er ikke fundet eksempler på uheld ved demontering af rørledninger i de undersøgte referencer.

9.2 Miljø

9.2.1 Forundersøgelser

Rørledninger, Lastbil, godstog, skib

Der er ikke fundet referencer, der specifikt beskriver miljøforhold ved forundersøgelser for infrastruktur til transport af CO₂.

De miljø- og naturmæssige forhold ved forundersøgelser for infrastruktur til transport af CO₂ vurderes at være sammenlignelige med hvad der findes i forbindelse med forundersøgelser for infrastruktur til transport af naturgas, LPG, LNG og andre industrielle gasser.

Det skal i forbindelse med planlægning sikres, at det valgte tracé hhv. transportruter sker under hensyn til de risikomæssige og natur- og miljømæssige forhold.

Det nødvendige plangrundlag skal sikres for rørledninger, og de nødvendige tilladelser være indhentet.

9.2.2 Anlæg og etablering

Rørledning

Der er kun identificeret få referencer der specifikt beskriver miljøforhold ved anlæg og etablering af rør til transport af CO₂.

De miljømæssige påvirkninger under anlæg og etablering af ny rørledning for CO₂ vurderes at være tilsvarende dem, som identificeres for typiske øvrige rørledninger anvendt til f.eks. transmission og distribution af naturgas.

Dette dækker følgende væsentligste miljøpåvirkninger der skal overvejes i de konkrete tilfælde: Støv og øvrige emissioner til luft knyttet til anlægsarbejdet, brug af ressourcer, eventuel udledning af overfladevand eller vand fra grundvandsænkning (kun på land), brug og udledning af kemikalier ved klargøring, CO₂ aftryk i anlægsfase samt generering af støj.

I miljøkonsekvensvurderingen for Northern Lights projektet er det nævnt at transportsystemet skal rengøres, tryktestes og fyldes med flydende CO₂ forud for drift og injektion af CO₂ i brønden. Tryktestning sker med kvælstof. Der forventes brug af "grønne" (inkl. MEG) og "gule" kemikalier under klargøring af rørledning. Både kvælstof og kemikalier vil udledes til havet ved injektionsbrønden [40].

Lastbil, godstog, skib

Ej relevant.

9.2.3 Drift

Rørledning

Der er kun identificeret få referencer der specifikt beskriver miljøforhold ved drift af rørledning til transport af CO₂.

De miljømæssige påvirkninger under drift af ny rørledning for CO₂ vurderes at være tilsvarende dem som identificeres for typiske øvrige rørledninger anvendt til f.eks. transmission og distribution naturgas.

Der kan ved vedligeholdelses- eller reparationsarbejde skulle foretages en kontrolleret nedblæsning af sektioner med udledning af CO₂.

For rørledningen til Northern Lights gennem Hjeltefjorden, er det vurderet, at der ikke er nogen landskabelig påvirkning, da rørledningstracéet ikke er synligt [40].

I USA har der været transporteret CO₂ i over 35 år og det estimeres at over 50 millioner ton CO₂ transporteres hvert år i knap 6.000 km rørledning. Transport via rørledning ses som den mest "cost" effektive løsning, og der vurderes ikke at være barriere, hverken i forhold til design eller sikkerhed som vil kunne stå i vejen for yderligere etablering i forbindelse med udvikling af CCS [60].

Skib

Der er ikke identificeret referencer der specifikt beskriver miljøforhold ved skibstransport af CO₂.

Miljøpåvirkningen fra skibstransport i driftsfasen vil være relateret til støj samt energiforbrug og tilhørende forbrændingsemissioner og CO₂ aftryk. Herudover kan være mindre diffus udledning af CO₂ fra tanke og koblinger.

Der sker allerede i dag transport af flydende naturgas (LNG) samt af flydende petroleum gas (LPG).

Lastbil, godstog

Der er ikke identificeret referencer der specifikt beskriver miljøforhold ved lastbilstransport af CO. Miljøpåvirkningen fra lastbilstransport i driftsfasen vil være relateret til støj samt energiforbrug og tilhørende forbrændingsemissioner og CO₂ aftryk. Herudover kan være mindre diffus udledning af CO₂ fra tanke og koblinger.

Transport af CO₂ via lastbil foregår allerede i dag, og CO₂ sættevogne er derfor sikkerhedsmæssigt godkendt til vejtransport.

9.2.4 Afvikling

Rørledning

Se afsnit 8.2.4

Lastbil, godstog, skib

Ikke relevant.

9.3 Natur

9.3.1 Forundersøgelser

Se afsnit 9.2.1.

9.3.2 Anlæg og etablering

Ved etablering af CO₂-rørledninger til havs, vil der være en fysisk påvirkning af havbunden samt forstyrrelser i anlægsperioden. Se marine påvirkninger i afsnit 8.3.2.

Ved etablering af rørledninger på land, vil der være fysiske påvirkninger ved anlægsarbejde, nedgravning, trafik og øvrige påvirkninger, som kendes fra etablering af f.eks. ledninger og gasrør.

Ved Lacq pilot projekt anvendes en ca. 30 meter rørledning på land mellem fangstanlæg og onshore lagring. Rørledningen er en eksisterende gasledning, og der har derfor ikke været anlægsarbejde [48].

9.3.3 Drift

For Northern Lights projektet, er det vurderet, at CO₂-rørledningen har en relativt lille dimension og derfor ikke medfører hindringer eller påvirker fiskebestande i området. Under driftsperioden vil der årligt forekomme udslip af ca. 2 m³ hydraulikvæske (klassificeret som "gult" kemikalie) fra ventilanlægget pr. brønd. Injektionsbrønden ligger ikke i nærheden af registrerede gydeområder, og mindre udslip af brugt vandbaseret ikke-toksisk hydraulikvæske ved test og operation af ventiler medfører ubetydelig negativ påvirkning og konsekvens for fiskeæg og yngel. [40]

Som et hørings svar til Northern Lights projektet, er det påpeget at væske i rør vil medføre støj, som bør overvåges. Operatøren henviser til, at der er et betydeligt antal og længde af væsketransporterende rørledninger af varierende dimension på norsk sokkel, og at der ikke er planer om at starte støjmålinger fra CO₂-væskestrømmen i rørledningen. [62]

Ved nedgravede rørledninger på land, kan der være servitutregulerede begrænsninger af arealanvendelsen over og omkring rørledningen, som kan påvirke natur og biodiversitet.

9.3.4 Afvikling

Se afsnit 9.2.4.

10 Referencer

[1]	KEFM, »Principaftale mellem regeringen (Socialdemokratiet), Venstre, Dansk Folkeparti, Radikale Venstre, Socialistisk Folkeparti, Enhedslisten, Det Konservative Folkeparti, Liberal Alliance og Alternativet om En køreplan for lagring af CO ₂ ,« Juni 2021 2021. [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKE-wiQ3-Pky_HyAhWiz4sKHWjmD5sQFnoECAYQAQ&url=https%3A%2F%2Fkefm.dk%2FMedia%2F637606718216961589%2FPrincipaftale%2520om%2520CO2-lagring.pdf&usg=AOvVaw1y6rm60I85JFg7tfo1qR0P . [Senest hentet eller vist den September 2021].
[2]	Global CCS Institute, »Global status of CCS 2020,« 2020. [Online]. Available: https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/ . [Senest hentet eller vist den August 2021].
[3]	Energistyrelsen, »Leverance 5.1: Miljø- og sikkerhedsaspekter i CCS-kæden,« København V, 2021.
[4]	Global CCS Institute, »Global CCS Institute facilities database,« 2021. [Online]. Available: https://co2re.co/ClimateChange .
[5]	C. Bofeng og e. al, »China Status of CO ₂ Capture, Utilization and Storage (CCUS) 2019,« Center for Climate Change and Environmental Policy, Chinese Academy of Environmental Planning. 2020, 2019.
[6]	K. M. Novak, N. Gaurina- Medimurec og L. Herncevic, »Significance of enhanced oil recovery in CO ₂ emission reduction,« Sustainability, årg. 13, 2021.
[7]	A. Hosa, M. Esentia, J. Stewart og S. Haszeldine, »Benchmarking worldwide CO ₂ saline aquifer injections,« March 2010. [Online]. Available: https://www.sccs.org.uk/images/expertise/reports/working-papers/wp-2010-03.pdf .
[8]	Scottish Carbon Capture & Storage (SCCS), »Global CCS Map,« [Online]. Available: https://www.sccs.org.uk/expertise/global-ccs-map .
[9]	ArkerSolutions, »Arker Solutions starts CCS test program at Preem Refinery in Sweden,« may 2020. [Online]. Available: https://www.akersolutions.com/news/news-archive/2020/aker-solutions-starts-ccs-test-program-at-preem-refinery-in-sweden/ . [Senest hentet eller vist den August 2021].
[10]	Det Norske Veritas, »Design and operation of CO ₂ pipelines,« 2010.
[11]	F. H. Hedlund, »The extreme carbon dioxide outburst at the Menzengraben potash mine 7 July 1953,« Elsevier, 2011.
[12]	P. Harper, »Assessment of the major hazard potential of carbon dioxide (CO ₂),« Health and Safety Executive, 2011.
[13]	S. Gant, M. Pursell, A. McGillivray, J. Wilday, M. Wardman og A. Newton, »Overview of carbon capture and storage (CCS) projects at HSE's Buxton Laboratory,« Health and Safety Executive, 2017.
[14]	A. McGillivray og J. Wilday, »Comparison of risks from carbon dioxide and natural gas pipelines,« Health and Safety Laboratory , 2009.
[15]	J. L. Lewicky, J. Birkholzer og C.-f. Tsang, »Natural and industrial analogues for leakage of CO ₂ from storage reservoirs: identification of features, events, and processes and lessons learned,« Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory , 2006.
[16]	C. Oldenbrug og L. Pan, »Major CO ₂ blowouts from offshore wells are strongly attenuated in water deeper than 50 m,« Energy Geosciences Division - Lawrence Berkeley National Laboratory, 2019.
[17]	Equinor, »Northern Lights FEED Report,« Equinor, 2020.

[18]	F. H. Hedlund, »Past explosive outbursts of entrapped carbon dioxide in salt mines provide a new perspective on the hazards of carbon dioxide,« Intelligent Systems and Decision Making for Risk Analysis and Crisis Response, 2013.
[19]	P. J. Rew, P. Gallagher og D. M. Deaves, »Dispersion of subsea releases, review of prediction methodologies,« HSE BOOKS, HSE Executive- offshore technology report, 1995.
[20]	IEAGHG, »Environmental impacts of amine emissions during post combustion capture - Workshop 2010/11,« International Energy Agency Environmental Projects Ltd., Cheltenham, UK, 2010.
[21]	J. L. M. Gibbins, »BAT Review for New-Build and Retrofit Post-Combustion Carbon Dioxide Capture Using Amine-Based Technologies for Power and CHP Plants Fuelled by Gas and Biomass as an Emerging Technology under the IED for the UK,,« 2021. [Online]. Available: https://ukccsrc.ac.uk/best-available-technology-bat-information-for-ccs/ . [Senest hentet eller vist den august 2021].
[22]	M. Bui, C. S. Adjiman, A. Bardow, E. J. Anthony, A. Boston, S. Brown, P. S. Fenell, S. Fuss, A. Galindo, L. A. Hackett, J. P. Hallett, H. J. Herzog, G. Jackson, J. Kemper, S. Krevor, G. C. Maitland, M. Matuszewski, I. S. Metcalfe, C. Petit, G. Puxty, J. Reimer, D. M. Reiner, E. S. Rubin, S. A. Scott, N. Shah, B. Smit, J. P. M. Trusler, P. Webley, J. Wilcox og N. M. Dowell, »Carbon capture and storage (CCS): the way forward,« Energy and Environmental Science, årg. 11, pp. 1062-1176, 2018.
[23]	ECHA (europa.eu), »Information om kemikalier - ECHA (europa.eu),,« 2021. [Online]. Available: https://echa.europa.eu/da/information-on-chemicals .
[24]	E. Gjernes, L. I. Helgesen og Y. Maree, »Health and environmental impact of amine based post combustion CO ₂ capture,« Energy Procedia, årg. 37, pp. 735-742, 2013.
[25]	G. Dautzenberg og T. Bruhn, »Environmental impacts from CCS technologies,« Institute for Advanced Sustainability Studies, Potsdam, 2013.
[26]	Gassnova, »Developing longship - Key lessons learned,« 2020.
[27]	L. I. Helgesen og E. Gjernes, »A way of qualifying Amine Based Capture Technologies with respect to Health and Environmental Properties,« Elsevier, Energy Procedia, p. 13, 2016.
[28]	Scottish Environment Protection Agency, »Review of amine emissions from carbon capture (version 2.01),« Natural Scotland - Scottish Government, 2015.
[29]	Aker Carbon Capture, »Experience-based approaches to lower carbon cement production - How the Brevik CCS project opens up new possibilities for other cement producers,« Aker Carbon Capture Norway AS, Lysaker, 2021.
[30]	K. Fujita, Y. Kato, S. Saito, H. Kitamura, D. Muraoka, M. Udatsu, Y. Handa og K. Suzuki, »The effect of aerosol characteristics in coal- and biomass-fired flue gas on amine emissions,« 14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-14, pp. 1-10, 2018.
[31]	Ministry of Petroleum and Energy, »Feasibility study for full-scale CCS in Norway,« Gassnova & Gassco, 2016.
[32]	NIPH, »Health effects of amines and derivatives associated with CO ₂ capture: Nitrosamines and nitramines,« 2011. [Online]. Available: https://www.fhi.no/publ/2011/health-effects-of-amines-and-deriva/ .
[33]	UK Environmental Agency, »Guidance, Post-combustion carbon dioxide capture: best available techniques (BAT),« july 2021. [Online]. Available: https://www.gov.uk/guidance/post-combustion-carbon-dioxide-capture-best-available-techniques-bat#who-this-guidance-is-for . [Senest hentet eller vist den August 2021].
[34]	M. N. Toftegaard, »OxyFuel combustion of coal and biomass,« 2011.
[35]	Total, »Carbon capture and storage, the Lacq pilot, project and injection period 2006-2013,« 2014.

[36]	IEAGHG, »Evaluation of reclaimer sludge disposal from post combustion CO2 capture,« 2014.
[37]	Rambøll, »CO2 fangst på danske affaldsenergianlæg,« København, 2020.
[38]	European Environment Agency, »Air pollution impacts from carbon capture and storage (CCS),« 2011.
[39]	T. Lecomte, J. F. F. d. I. Fuente, F. Neuwahl, M. Canova, A. Pinasseau, I. Jankov, T. Brinkmann, S. Roudier og L. D. Sancho, »Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants,« 2017.
[40]	Equinor, »EL001 Northern Lights - Mottak og permanent lagring af CO2. Plan for udbygning, anlegg og drift. Del II - Konsekvensutredning.,« Oktober 2019.
[41]	L. Eilertsen, »Northern Lights. Konsekvensvurdering med hensyn på naturmiljø og biologisk mangfold på land,« Rådgivende Biologer AS, 2018.
[42]	MAERSK OIL DBU, »Redegørelse for miljømæssige og sociale virkninger - ESIS-Tyra,« Rambøll, 2017.
[43]	Energistyrelsen, »Standard vilkår for forundersøgelser til havs,« 2017.
[44]	Energistyrelsen, »Guidelines for drilling, exploration,« 1988,2009.
[45]	A.-K. Furre, O. Eiken, H. Alnes, J. N. Vevatne og A. F. Kier, »20 years of monitoring CO2-injection at Sleipner,« Elsevier, p. 3916 – 3926, 2017.
[46]	Erhvervsministeriet, »Cirkulære om naturgaslager ved Stenlille,« Erhvervsministeriet , 1991.
[47]	M. Roskilde, »Revurdering af miljøgodkendelser Stenlille gaslager,« Miljøministeriet, 2009.
[48]	Total, »Carbon capture and storage, The Lacq pilot - results and outlook,« 2013.
[49]	S. E. Greenberg, »Illinois Basin Decatur Project,« 2015.
[50]	M. Batres, F. M. Wang, H. Buck, R. Kapila, U. Kosar, R. Licker, D. Nagabhushan, E. Rekhiman og V. Suarez, »Environmental and climate justice and technological carbon removal,« The Electricity Journal, nr. 34, 2021.
[51]	L. A. Kyhn, S. Wegeberg, D. Boertmann, P. Aastrup, J. Nymand og A. Mosbech, »Onshore Seismic Surveys in Greenland,« Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 2020.
[52]	M. Hjorth, L. D. Kristensen, C. J. Murray, J. H. Andersen, S. Brooks og K. Sørensen, »Effects of oil and gas production on marine ecosystems and fish stocks in the Danish North Sea,« WSP Denmark, NIVA, Teknologisk Institut, 2021.
[53]	Søfartsstyrelsen, »Miljøvurdering af Danmarks Havplan,« COWI, 2021.
[54]	A. D. Nielsen, N. P. Christensen, P. Jørgensen og E. L. Lundsteen, »Catalogue of geological storage of CO2 in Denmark, Danish Energy Agency,« Rambøll, Copenhagen, 2021.
[55]	P. Deda, M. Elbertzhagen og M. Klussmann, »Light Pollution and the Impacts on Biodiversity, Species and their Habitats,« Everglades, nr. Secretariat of the Convention on the Conservation of Migratory Species of Wild Animals (UNEP-CMS), pp. 133-138, 2007.
[56]	J. M. Neff, »Fate and effects of water based drilling muds and cuttings in cold water environments.,« Review prepared for Shelle exploration an Production Company Houston Texas, 2010.
[57]	T. Bakke, J. Klungsøyr og S. Sanni, »Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the Norwegian offshore petroleum industry,« Marine Environmental Research, årg. 92, pp. 154-169, 2013.
[58]	K. Wallmann, M. Haeckel, P. Linke, L. Haffert og M. Schmidt, »Best Practice Guidance for Environmental Risk Assessment for offshore CO2 geological storage,« EU: ECO2 - Sub-seabed CO2 Storage: Impact on Marine Ecosystems, 2015.

[59]	ZEP, »CO2 Storage Safety in the North Sea: Implications of the CO2 Storage Directive - TWG Collaboration across the CCS Chain,« European Zero Emission Technology and Innovation Platform, 2019.
[60]	US Office of Fossil Energy and Carbon Management, »Report of the Interagency task force on Carbon Capture and Storage,« 2010.
[61]	EcoWatch, »How the World's First CO2 Pipeline Explosion Turned a Mississippi Town Into 'a Zombie Movie',« August 2021. [Online]. Available: https://www.ecowatch.com/co2-pipeline-explosion-mississippi-2654814127.html .
[62]	Equinor , »EL001 Northern Lights: Plan for utbygging, anlegg og drift - Del II: Konsekvensutredning - Oppsummering av høringsuttalelser og tilsvaer til disse,« Equinor ASA, Stavanger, 2020.
[63]	Energistyrelsen og Energinet, »Technology Data - Industrial process heat,« 2020.
[64]	Energistyrelsen og Energinet, »Technology data - Energy transport,« 2017.
[65]	EIGA, »MINIMUM SPECIFICATIONS FOR FOOD GAS APPLICATIONS, Doc 126/20,« EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION, 2020.
[66]	H. J. Herzog, Carbon Capture, 2018.
[67]	S. Flude. [Online]. Available: https://theconversation.com/carbon-capture-and-storage-has-stalled-needlessly-three-reasons-why-fears-of-co-leakage-are-overblown-130747 .
[68]	The Danish Hydrocarbon Research and Technology Centre, »CO2 storage in Danish Oil & Gas fields,« DTU, Kongens Lyngby, 2020.
[69]	Project Greensand, »Project Greensand,« [Online]. Available: https://statics.teams.cdn.office.net/evergreen-assets/safelinks/1/atp-safelinks.html .
[70]	Søfartsstyrelsen, »Danmarks havplan,« 2021. [Online]. Available: https://havplan.dk/da/page/info . [Senest hentet eller vist den 23 august 2021].
[71]	Maersk Drilling, »MaerskDrilling,« [Online]. Available: https://www.maerskdirilling.com .
[72]	EU, »Directive 2009/31/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament and Council Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006,« 2009. [Online].
[73]	T. Dahl-Jensen, R. Jakobsen, T. B. Bech, C. M. Nielsen, C. N. Albers, P. H. Voss og T. B. Larsen, »Monitoring for seismological and geochemical groundwater effects of high-volume pumping of natural gas at the Stenlille underground gas storage facility, Denmark,« GEUS Bulletin, p. 8, 2021.
[74]	Energistyrelsen, »Technology Data - Energy transport,« 2020.

Bilag A Teknisk beskrivelse af CCS anlæg

Afsnittet indeholder en teknisk beskrivelse af de forskellige anlæg, der indgår i CCS omfattende 1) geologisk lagring, 2) CO₂-fangst, 3) mellemlagring samt 4) transport infrastruktur. For hvert anlæg indgår en teknisk beskrivelse af faserne a) forundersøgelser, b) anlæg og etablering, c) drift og d) afvikling.

A.1 CO₂-fangstanlæg

CO₂-fangstteknologier afgrænses specifikt til følgende typer anlæg med høj teknologisk modenhed, som allerede er eller er tæt på at være kommercielt tilgængelige:

- > Rensning af røggas (post combustion) ved hhv. aminvask og nedkølet ammoniak (oftest benævnt chilled ammonia)
- > Dannelse af røggas med høj CO₂ koncentration ved forbrænding ved iltrige betingelser (oxyfuel).

Det forudsættes desuden, at der etableres liquefaction-anlæg samt mellemlager-faciliteter ved efterfølgende transport med lastbil, tog eller skib, alternativt kompressortrin og dehydrering ved transport via rørledning.

Følgende tekniske beskrivelse af disse anlæg og transportkæder dækker forundersøgelser, anlæg, drift og afvikling. Der henvises desuden til Energistyrelsens teknologikataloger for hhv. procesvarme og carbon capture samt transport af energi og CO₂ [63], [64].

A.1.1 Forundersøgelser

Specifikt for selve fangstanlægget vil der for alle de beskrevne procestyper skulle foregå forundersøgelser som for typiske industri-/procesanlæg. Desuden skal der pga. det høje energiforbrug til selve CO₂-fangsten foretages undersøgelse af udnyttelse af evt. eksisterende spildvarme fra hovedprocessen, samt integration med damp- og fjernvarmesystemer for at sikre høj energieffektivitet. Herunder skal behovet for køleeffekt afdækkes, idet processen vil kræve en del kølevand og/eller -luft. Da røggassen indeholder en række stoffer, som er uhenigtsmæssige i CO₂-fangstprocessen, skal der afhængigt af koncentrationsniveauer muligvis etableres yderligere rensesrin såsom røggaskondensering med lud og / eller deNOx.

Ved et retrofit af CO₂-fangst på et eksisterende anlæg vil der desuden ske ændring af røggastemperatur, flow og vandmætning, der influerer på spredning af røggassen.

A.1.2 Anlæg og etablering

Anlæg og etablering vil for alle de beskrevne procestyper skulle foregå som for typiske industri-/procesanlæg.

Konstruktion af kemikalietanke mv. skal sikre at der ikke kan se forurening af jord, grundvand og overfladevand ved eventuelt spild. Specielt for aminvask bemærkes, at de typisk anvendte aminer er skadelige for vandmiljøet.

Konstruktion af lagertanke mv. for CO₂ skal sikres mod eventuelle lavpunkter og lukkede miljøer, hvor CO₂ kan opkoncentreres ved eventuel lækage

Der skal desuden sikres tilstrækkelig rumventilation samt CO₂-detektorer/alarmer i bygninger og lavpunkter i terrænet, hvor der er risiko for ophobning.

A.1.3 Drift

Beskrivelse af teknologier – CO₂-fangst

Aminvask

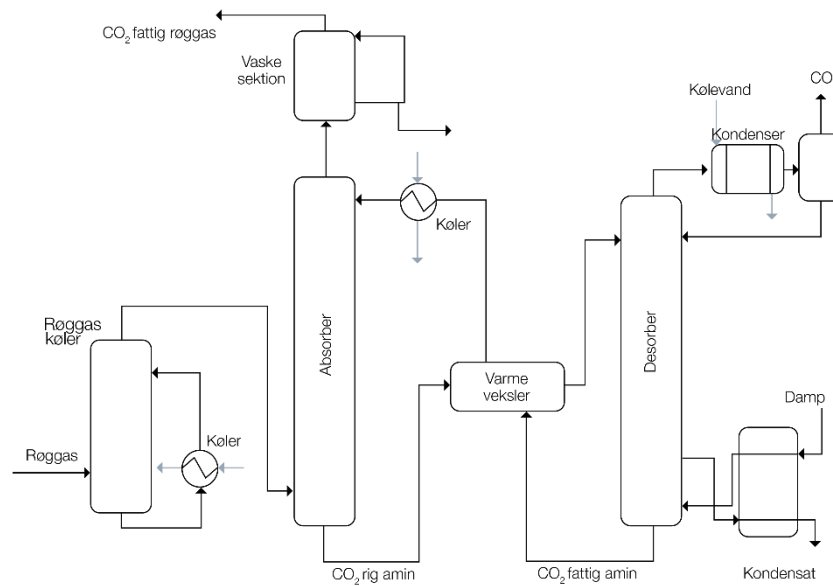
Aminvask hører under post combustion typen, hvor CO₂ adskilles fra en gasstrøm. Metoden benyttes f.eks. ved produktion af CO₂ til fødevarer samt til opgradering af biogas og naturgas, og vil være relevant til fangst af CO₂ fra røggassen efter forbrænding i kedler/ovne. Et procesdiagram ses i Figur 3 nedenfor.

Røggassen fra forbrændingsprocessen eller anden CO₂-holdig gas renses, køles og ledes til en absorber, hvor den skrubbes med en vandig amin-opløsning. CO₂ i røggassen optages af aminen under frigivelse af varme, hvorefter den CO₂-fattige røggas passerer en vaskesektion og et dråbefang for at fjerne amin samt nedbrydningsprodukter fra aminen, inden røggassen udledes via skorstenen. Der opnås typisk en gennemsnitlig effektivitet på 90 %, dvs. 90 % af CO₂-indholdet i den indgående røggas opfanges.

Den CO₂-rige amin ledes herefter til en desorber, hvor den opvarmes vha. damp, og CO₂ frigives i koncentreret form. Den CO₂-fattige, varme amin veksles med den køligere CO₂-rige amin, køles yderligere og returneres til absorbereren til fornyet optagelse af CO₂. Selve den koncentrerede CO₂-strøm køles, herved dannes kondensat som ledes tilbage til processen.

Dampkilden findes på hovedanlægget ved udnyttelse af evt. overskudsvarme, samt udtag fra turbine eller hoveddampsystem. Alternativt etableres en hjælpekedel, hvis der ikke er tilstrækkelig til rådighed. Varme fra produceret i CO₂-fangstprocessen vil i nogen grad kunne anvendes i fjernvarmenettet.

Aminen vil over tid ophobe en række affaldsprodukter. Disse kan i nogen udstrækning fjernes ved destillation eller ionbytning i en reclaimere. Der vil herunder dannes hhv. en slamfraktion eller spildevand. Den termisk destillation danner en slamfraktion, der må forventes at blive klassificeret som farligt affald [36]. Tilsvarende giver ionbytteren anledning til spildevand, når resinerne regenereres med opløsninger af lud (NaOH) og svovlsyre (H₂SO₄.)



Figur 3: Processkitse af aminvask. Reclaimeren er ikke vist.

Ved retrofit af CO₂-fangst på en eksisterende punktkilde muliggør en post combustion løsning kortere driftsstop af det eksisterende anlæg i anlægsfasen, da der primært er behov for ændringer af røggaskanaler samt damp- og varmeintegration. Udfordringer for aminvask er primært følsomheden over for forurenende stoffer i røggassen såsom svovldioxid (SO₂), nitrogendioxid (NO₂), saltsyre (HCl) og partikler, samt det høje energibehov. Teknologien er moden og kommercielt tilgængelig – dog primært for kapaciteter på 1-15 ton/h CO₂ indfanget.

Enkelte større anlæg er bygget i hhv. USA og Canada:

- > Kulfyret anlæg, Petra Nova, USA, 1.600.000 ton pr år. 200 ton/h (MHI)
- > SaskPower Boundary Dam, Canada (Shell CanSOLV), 400.000 ton/år (50 ton/h)

De enkelte leverandører af aminbaserede CO₂-fangstanlæg benytter i stor udstrækning egne, hemmeligholdte aminblandinger med forskellige forbedrede egenskaber såsom lavere degradering og energiforbrug. Den kommercielt tilgængelige amin monoetanolamin (MEA) er kendetegnet ved et højt energiforbrug, der ligger 50% over, hvad flere leverandører har angivet at kunne opnå med deres egne blandinger. Andre typisk anvendte aminer er bl.a. dietanolamin (DEA), metyldietanolamin (MDEA), piperazin (PZ), 2-Amino-2-metylpropanol (AMP), diglykolamin (DGA) og diisopropanolamin (DIPA).

Chilled ammonia

Chilled ammonia processen er også af post combustion typen og ligner aminvask i udformningen. Processen er demonstreret i relativt stor skala, 110.000 ton pr.

år, på Mountaineer demoanlægget i USA. Den er dermed tæt på kommerciel lancering.

Der benyttes en vandig ammoniakopløsning i stedet for amin typisk i en opløsning under 25%. Da reaktionsoptimum er mellem 5 °C og 15 °C, skal røggassen køles til dette temperaturinterval. Fordele er angiveligt reduceret energiforbrug, CO₂-produkt ved relativt høje tryk (5-25 bar) samt fravær af amin og nedbrydningsprodukter i røggassen. Imidlertid har varmebehovet vist sig at være højere end forventet, og problemstillinger såsom langsom absorptionskinetik, øget proceskompleksitet samt udfordringer med håndtering af udfældninger af salte er også identificeret, hvilket giver ustabil drift og korrosion. Desuden skal der udføres yderligere afkøling af røggassen sammenlignet med en aminproces.

Oxyfuel

Oxyfuel er en væsentligt anderledes teknologi, idet der foretages forbrænding i ilt fortyndet med recirkuleret røggas. Dette giver en røggas bestående hovedsageligt af CO₂ og vand. Efter kedlen renses røggassen for vanddamp og andre urenheder, og den resulterende gas med høj CO₂-koncentration kan herefter komprimeres. På grund af luftindtrængning i systemet, behov for iltoverskud, kvælstof i brændslet mv. vil den resulterende, tørre CO₂-koncentration ligge på 70 - 90%.

Ilt til forbrænding produceres ved adskillelse fra atmosfærisk luft med en luftseparationsenhed, hvilket er kendt teknologi. For at sikre ilt til opstart og løbende forbrænding vil der være behov for en buffertank med flydende ren ilt.

Ved retrofit med oxyfuel kræves væsentlige ændringer af det eksisterende anlæg, herunder ombygning af ovn/kedel og tætning af røggassystemet. Dette er nødvendigt, da gassens egenskaber og de termodynamiske betingelser ændres, hvilket blandt andet påvirker forbrændingszonen og varmeoverføringen. Den største udfordring ved retrofit er dog at reducere luftlækager ind i systemet mest muligt.

Der eksisterer ikke egentlige anlæg på kommerciel skala, men en række demoanlæg på kul (Schwarze Pumpe, 30 MW_{th} og Callide i Australien, 120 MW_{th}) har tidligere været i drift. Der er desuden en række eksperimentelle fluid bed kedler (CFB'er) på typisk få MW_{th} - dog et enkelt på 30 MW_{th} i Spanien.

Beskrivelse af teknologier – CO₂-konditionering

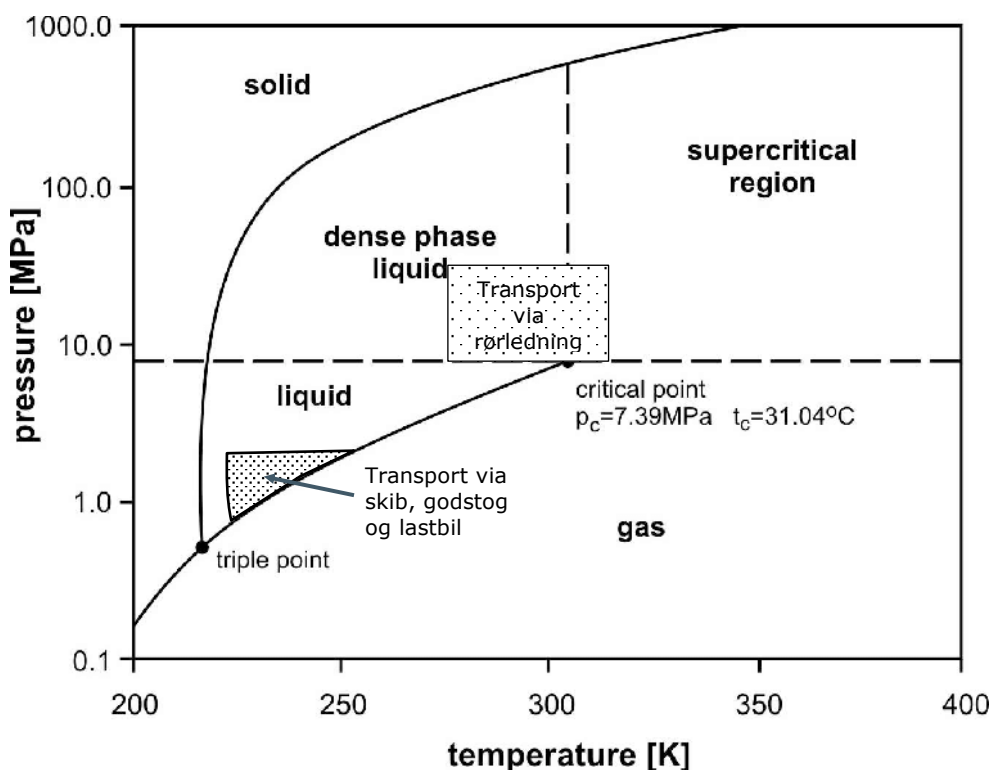
Efter fangst og dannelsen af en koncentreret CO₂-strøm skal der alt efter den valgte transportmetode ske komprimering og evt. kondensering/liquefaction, se Figur 4.

Komprimering

Ved transport via rørledning skal CO₂ komprimeres vha. en flertrinskompressor med intercooling, hvor den genererede varme kan udnyttes andre steder i processen. Typiske CO₂-rørledningstryk på længere strækninger er 80-150 bar for at undgå tofase-regionen af fasediagrammet, samt opnå en tilfredsstillende den-

sitet. Ved transport på kortere strækninger (såsom 10-20 km) kan lavere tryk- og temperaturer være fordelagtige. Over jord vil det være ca. 10 bar for at undgå CO₂-kondensation ved lave omgivelsestemperaturer. For nedgravede rør, hvor der er frostfrit, kan der gås op til 30 bar.

CO₂ er korrosiv ved tilstedeværelse af fugt, da der dannes kulsyre, og i kombination med høje tryk kan der desuden ske udfældning af gashydrater. Derfor er dehydrering af gassen til et fugtindhold under 50-400 ppmv nødvendigt. Dehydrering sker typisk som en kombination af to forskellige kølesystemer – vandkøling og en flydende glykolproces. Et mekanisk filter er monteret efter absorptionskolonnen for at fjerne eventuelle partikler, der rives med i CO₂-strømmen. Tørring installeres ved et mellemliggende trin i kompressoren.



Figur 4: Fasediagram for CO₂. Områder for transport med skib, godstog og lastbil i flydende form, samt transport via rørledning i komprimeret tilstand er angivet med skraverede områder. 1 MPa = 10 bar. 250 K = -23 °C.

Kondensering / liquefaction

Ved kondensering (også kaldt liquefaction) komprimeres og afkøles CO₂-strømmen til ca. 15-18 bar og -21 til -27 °C.

CO₂-produktstrømmen ledes først gennem en køler og separator for at fjerne vand, før gassen komprimeres i kompressoren. CO₂-gassen afkøles derefter yderligere og vaskes i en skrubbersektion for at fjerne vandopløselige urenheder og tilbageværende amin. Vasketrinet kræver vand som efterfølgende skal håndteres ved f.eks. recirkulering til fangstanlægget, internt procesvand eller behandling i renseanlæg. Yderligere tørring sker vha. en absorptionskolonne til

meget lavt niveau (<50 ppm) for at undgå korrosionsproblemer i rør og lager-
tanke, samt dannelse af iskrystaller. Afhængig af kravene til renheden af CO₂-
produktet, kan forskellige adsorbere og filtre installeres nedstrøms, f.eks. et ak-
tivt kulfilter. Den tørre CO₂-gas køles derefter, inden den kommer ind i destilla-
tionskolonnen, hvor inerte / ikke-kondenserbare gasser, såsom kvælstof, ilt og
argon fjernes, mens CO₂ kondenseres med en ekstern køler (typisk ammoniak).
Flydende CO₂ sendes til opbevaring i isolerede tryktanke.

Et standard kondenseringsanlæg er normalt designet til at producere CO₂ i føde-
varekvalitet, hvilket betyder, at forskellige rensetrin er inkluderet, såsom aktivt
kulfilter, NO_x-fælde osv., for at fjerne sporkomponenter fra aminvask eller lig-
nende. Den producerede CO₂ har typisk en renhed over 99,9 vol%.

Overordnet drift af fangst og konditionering

Under drift overholdes de gængse sikkerhedsregler for de øvrige anlæg. Ved
kondenseringsanlægget er der desuden risiko for forfrysninger ved direkte kon-
takt. Ved arbejde hvor der kan ske kontakt med CO₂, anvendes sikkerhedsbriller
og kuldeisolerende handsker.

For aminvask skal der under påfyldning af aminer samt håndtering af kemiske
restprodukter fra aminvask-processen anvendes personlige værnemidler samt
sørges for tiltag til at undgå spild og udledning til omgivelserne. Affaldet fra re-
claimer-processen vil skulle bortskaffes som farligt affald eller afbrændes på ho-
vedanlægget, såfremt der er tale om den termiske type. Ionbyttertypen vil
kræve spildevandsbehandling.

For chilled ammonia skal der tilsvarende være foranstaltninger ved påfyldning af
ammoniak (NH₃), der er giftig. Mht. oxyfuel skal der sikres mod lækager af ilt,
da gassen er stærkt brandnærende.

Aminvasken medfører emissioner til luft. De specifikke emissioner vil være af-
hængig af den valgte metode, hvilke aminer som anvendes og af røggassen fra
den specifikke punktkilde.

I røggassen kan der forekomme emissioner af amin samt nedbrydningsproduk-
ter som ammoniak (NH₃) og flygtige organiske stoffer (VOC).

Nogle aminer kan desuden danne toksiske nitrosaminer ved reaktion med NO_x.

Ved tilstedeværelse af høje koncentrationer af f.eks. svovlsyre og submikrone
partikler i røggassen kan der desuden dannes aminholdige aerosoler. Vasketrin
og dråbefang efter absorberer mindsker disse emissioner, men evt. aerosoler
fjernes dog ikke effektivt.

Tilsvarende er det for chilled ammonia processen primært udledning af ammo-
niak, der skal undgås.

Mht. spildevand dannes det ved post combustion typerne ved vandoverskud i
systemet. Ligeledes haves vaskevand fra absorberens røgvasketrin og rensning

af CO₂-strømmen. Vandet vil skulle behandles i et renseanlæg før udledning eller anvendes som internt procesvand. For oxyfuel udkondenseres større mængder vand fra røggassen, hvilket dog er tilsvarende ved normal forbrænding. Dette vand skal renses som typisk røggaskondensat.

Specielt for kondenseringen af CO₂, kan køleenheden indeholde ammoniak (NH₃), hvilket kræver sikkerhedsudstyr og potentielt andre sikkerhedsmæssige forholdsregler.

Beskrivelse af teknologier - CO₂-kvalitet

Den følgende specifikation for CO₂ i forbindelse med lagring i undergrunden, er blevet defineret for Northern Lights projektet [17]. I kilden anføres, at såfremt CO₂ kvaliteten afviger fra det angivne, skal der udføres en risikovurdering for installationerne.

Tabel 4: Specifikation for CO₂ i forbindelse med lagring i undergrunden på Northern Lights projektet [17]

Komponent	Max. koncentration vppm	Årsag
Vand, H ₂ O	30	Undgå dannelse af hydrater og udfældning af frit vand i anlægsdele til transport og mellemlagring. Minimere risikoen for blokering og korrosion.
Oxygen, O ₂	10	Sat for at opfylde kravene til renhed ved slutlagring. O ₂ kan forårsage korrosion, når det reagerer med klorider (Cl).
Svovl oxider, SO _x	10	SO _x accelerer korrosion i nærvær af vand.
Nitrogen oxider, NO _x	10	NO _x accelerer korrosion i nærvær af vand.
Hydrogen sulfid, H ₂ S	9	Giftig ved indånding. Niveau indstillet til at reducere risikoen for mulig lækage.
Carbon monoxid, CO	100	Giftig ved indånding. Niveau indstillet til at reducere risikoen for mulig lækage.
Amin	10	Har potentiale til at reagere med og nedbryde ikke-metalliske materialer
Ammoniak, NH ₃	10	-
Hydrogen, H ₂	50	H ₂ kan forårsage korrosion i form af brintskørhed.
Formaldehyd, HCHO	20	Kan reagere med ilt til myresyre.
Acetaldehyd	20	Kan reagere med ilt til eddikesyre.
Kviksølv, Hg	0,03	Giftig for personalet. Kan forårsage skørhed i metalliske materialer.
Cadmium, Cd + Thallium, Tl	0,03 (sum)	Giftig for personalet. Kan forårsage skørhed i metalliske materialer.

Til sammenligning kan f.eks. nævnes fødevarekvalitet standard for CO₂ (E290) ifølge EU og EIGA [65].

Tabel 5 Fødevarekvalitet standard for CO₂ (E290) er ifølge EU og EIGA [65]

Komponent	CO ₂ (E290)
Analyse CO ₂ (v/v)	>99 v%
Vand	<52 vppm
CO	<10 vppm
Totale hydrocarboner	<50 vppm
Olie-indhold	<5 mg/kg
Surhed og reducerende stoffer	Bestå test

A.1.4 Afvikling

Afvikling vil skulle forberedes og effektueres som for andre typiske industri-/procesanlæg. Anlæggene skal tømmes og demonteres, eventuelle bygninger skal nedrives og området eventuelt genetableres. Der er tale om velkendte operationer og anlægsdele som i nogen udstrækning kan afsættes kommercielt.

A.2 Mellemlager-faciliteter

Mellemlager-faciliteter etableres typisk i nærheden af CO₂ punktkilderne og på eller i umiddelbar nærhed af havne- og/eller industriområder, hvor transport med skib eller lastbil er mulig. Mellemlager-faciliteter vil formentlig omfatte kondensering / liquefaction-faciliteter (beskrevet tidligere) og lagring i tanke.

A.2.1 Forundersøgelser

Der forudses ikke særlige tekniske forundersøgelser i forbindelse med et mellemlager. Sikkerhedsforanstaltninger for at forhindre læk, samt minimering af udslip ved uheld skal vurderes.

A.2.2 Anlæg og etablering

Anlæg og etablering skal foregå som typisk for industrilagre. Dog skal der for CO₂ lagertanke ikke opstilles spildbarrierer som for andre kemikalietanke. Der er her behov for at undgå lavpunkter og lukkede miljøer.

A.2.3 Drift

Mellemlageret er nødvendig som buffer mellem den kontinuerte produktion af CO₂ og den diskontinuerte lastbils- og skibstransport. Der kan være behov for mellemlagre både ved CO₂-fangstanlægget og ved eventuelt udskibningssted.

Lagerkapaciteten vil afhænge af lastbilernes eller skibenes cyklostid sat i forhold til produktionen. Den maksimale størrelse af tankene vil være begrænset af, hvad der er praktisk at transportere fra tankleverandør til installationsstedet. For mindre kapaciteter under 100 m³ fås isolerede standardtanke. Kugletanke kan fremstilles med en enhedsstørrelse på 1.000 m³ eller mere, men disse er for store til vejtransport og kræver derfor adgang til en havn eller konstruktion af de store tanke på selve stedet. Ved CO₂-terminaler med lagerkapacitet på flere 1.000 m³ vil mellemlageret bestå af flere tanke. Det vil dog primært afhænge af det enkelte projekt, hvad der er hensigtsmæssigt.

Lagertanke til flydende CO₂ vil være udstyret med et import- / eksportrør samt et gasreturrør. Det vil dog være muligt at isolere hver enkelt tank fra systemet ifm. vedligehold, men der skal dog ske overvejelse omkring forringelse af tankenes levetid ved store temperaturgradienter. Typisk tages kryogene lagertanke ikke ud af drift. For at holde lagertankene afkølede, fordampes en lille del af den flydende CO₂ kontinuerligt. Gassen returneres derefter til kondenseringsanlægget, eller udledes til omgivelserne såfremt liquefaction-anlægget er ude af drift eller der ikke er tilknyttet kondensering til det pågældende mellemlager. En CO₂ udluftningsventil installeres for at muliggøre kontrolleret udluftning fra lagertankene og dermed fastholde trykket, når kondenseringsanlægget ikke er i drift. Eksportsystemet består af en hovedrørledning til et antal pumper. Rørledningen føres til en lastestation til enten skib, tog eller lastbil. Parallelt med påfyldningssystemet kan der installeres et retursystem til at føre fortrængte CO₂-gas fra skibene tilbage til lagertankene. Derudover ledes rørledningen tilbage til kondenseringsanlægget, hvilket muliggør rekondensering af den fortrængte CO₂-gas. Systemet skal udstyres med sikkerhedsventiler. Der vil skulle være fokus på vedligehold og korrosionsovervågning for at sikre mod utilsigtede udslip af CO₂ fra mellemlageret.

A.2.4 Afvikling

Afvikling vil skulle forberedes og effektueres som for andre typiske industrilagre. Anlæg og tanke skal tømmes og demonteres, eventuelle bygninger skal nedrives og området eventuelt genetableres. Der er tale om velkendte operationer og anlægsdele som i nogen udstrækning kan afsættes kommercielt.

A.3 Geologisk lagring af CO₂ på land og til havs.

Geologisk CO₂ lager - grundlæggende forudsætninger

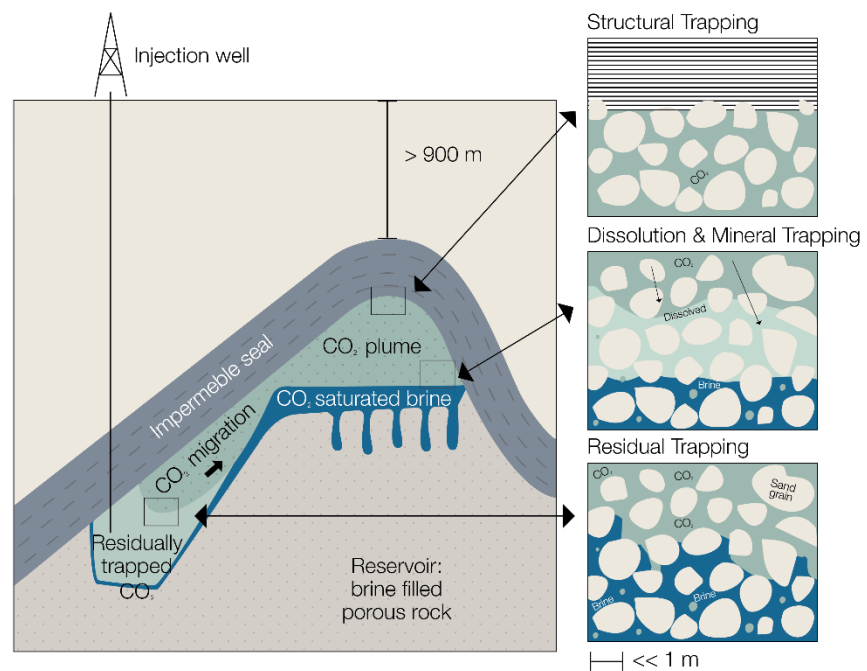
Et geologisk lager består af en række elementer; et reservoir dvs. et geologisk lag/ bjergart med en vis porøsitet f.eks. en sandsten, en "cap rock"/forsegling dvs. en impermeabel bjergart som f.eks. lersten og så en lukning dvs. en afgrænsning af reservoiret i geologiske strukturer som f.eks. antiklinaler/ domer, forkastnings blokke (forskudte jordlag) eller stratigrafiske afgrænsede lag. Olie, gas og saltvand findes i undergrunden i sådanne afgrænsede strukturer så som på dansk sokkel i Nordsøen, men i strukturer med potentiale for CO₂-lagring på land i Danmark er porevæsken oftest saltvand (også kaldet saline akviferer). La-

geret kan være mere eller mindre effektivt afhængig af graden af porøsitet, permeabilitet og tryk som har betydning for flow i reservoiret. Lignende parametre er gældende for styrken af forseglingsbjergarten.

For at sikre at CO₂ forbliver i væskefase må det opbevares ved tryk større end dets kritiske tryk som er 73,9 bar. Det gennemsnitlige tryk i 800 m dybde er 80 bar så lagre dybere end det opfylder kriteriet. Typisk er lagre på 2-3 km dybde med et tryk på 200-300 bar og en temperatur på 60-100 grader Celsius. Dette giver en densitet af CO₂ på 0,5-0,8 g/cm³. Sammenlignet med CO₂ gas, der har en densitet på 0,001 g/cm³, er CO₂ på væske form altså tungere og fylder meget mindre hvilket betyder, at meget mere CO₂ kan opbevares i porerummet. Sammenlignet med vand med en densitet på 1 g/cm³ er CO₂ lettere, hvilket betyder at det vil stige opad i reservoiret. Derfor er en impermeabel "cap rock"/forseglingsbjergarten vigtig.

Når CO₂ injiceres i et reservoir vil det presse formationsvandet væk og bevæge sig ind i porerummet på bjergarten og forme en "plume". I formationen/reservoiret vil ske en trykstigning, hvilket kan forårsage meget små forskydninger i undergrunden (mikrojordskælv). Hvis trykket er meget stort og ikke håndteret korrekt, kan det forårsage sprækker i forsegling og mulig lækage af CO₂.

I reservoiret er der 4 mekanismer der sammen bidrager til at "fange" og fastholde CO₂ i reservoiret (se Figur 5). En strukturel fælde, f.eks. en dome som tidligere diskuteret, men også kapillær fangst dvs. CO₂ bliver immobiliseret i porerummet, opløsning af CO₂ i formationsvandet samt reaktion mellem opløst CO₂ og bjergartsminerallerne, hvorved nye mineraler dannes [66].



Figur 5 Forskellige fangst mekanismer der immobiliserer CO₂ i jorden (Stephanie Flude, [CC BY \[67\]](#))

Udenlandske erfaringer danner et rimeligt fundament og sammenligningsgrundlag for danske lagringsforhold når der er tale om samme reservoirtype (sandsten, kalksten etc.), forseglingsstype og struktur. Sammenligningen er skal dog altid laves med forbehold idet forhold såsom lithologi, dybde, kvalitet mv. kan have en indflydelse lokalt.

Mulige danske lagringsforhold findes diverse steder på land og vand, i diverse størrelser, dybder og lithologier. CO₂-lagrene Sleipner Vest og Snøhvit i Norge er eksempler på offshore CO₂ sandstenslagre som er sammenlignelige med nogle potentielle danske lagre. På Sleipner Vest foregår injektionen i et salint sandstensreservoir på 1.000m dybde, i Utsira formationen der er 200-250m tyk.

Snøhvit er et salint sandstensreservoir i Tubasan formation på 2.550m dybde, reservoiret er 45-75m tyk. I Danmark er der erfaring med lagring af naturgas i underjordiske anlæg på land bl.a. i et akviferreservoir i Stenlille på Sjælland. Stenlille er en antiklinal struktur med et reservoir bestående af Triassisk Gassum Formation på 1.500 m dybde og en caprock af den Nedre Jurassiske Fjerritslev Formation.

CCS pilot projektet i Lacq bassinet i Frankrig er et eksempel på et kalkstensreservoir. Lagringen foregår i det udtømte Mano reservoir i Rouse feltet. Reservoiret er på 4.500m dybde, strukturen er Jurassisk.

I Danmark består en stor del af de kendte olie- og gasreservoirer af kalksten. Forståelsen af CO₂ lagring i kalksten i Danmark er ikke fuldt belyst. Kalkstens

bjergarter er kendt for lav permeabilitet og det kan være vanskeligt at forudsige kvaliteten af reservoiret.

Flere Europæiske CCS studier [68] indikerer, at der er større volumen kapacitet i de danske sandstensreservoarer end i kalksten.

De potentielle danske CO₂ lagre omfatter sandstensreservoarer, som f.eks. INEOS's opererede offshore Nini og Siri felter (Projekt Greensand, 1.500-2.000m dybde, 150-500 MT) [69], de store saline strukturer med triassisk Gassum formation reservoir Hanstholm (near-shore, antiklinal, ca. 1.000m dybde, kapacitet 2.753 MT) og reservoir Havnsø (onshore-near-shore, antiklinal, 1.500m dybde, kapacitet 926 MT) [70]).

GEUS gennemfører i 2021 en screening af forskellige potentielt velegnede lagringsstrukturer. Undersøgelserne vil tjene som grundlag for at vælge en eller flere formationer, der skal undersøges nærmere.

I forslag til Danmarks Havplan, er Hanstholm og et større område ved den vestlige grænse i Nordsøen udpeget som udviklingszoner for CO₂-lagring [70].

Fordelen ved udtømte olie- og gas felter er, at det allerede er bevist at forseglingen virker over geologisk tid, og at der eksisterer en stor mængde data og viden om reservoiret. Yderligere er der et potentiale for brug af eksisterende infrastruktur. Saline reservoirer har historisk ikke haft den samme fokus, og her vil der skulle indsamles en større mængde nye data.

Særlig er lagerpotentialet typisk ikke er eftervist med en boring, hvilket er nødvendigt for at kunne bekræfte om lageret er velegnet og sikkert.

Forundersøgelser, etablering, drift og afvikling af CO₂ lagre

Herunder følger en gennemgang af erfaringer for de forskellige stadier for CO₂ lagre, herunder forskelle og ligheder for henholdsvis lagring på land, offshore eller nearshore. En scenarieoversigt med beskrivelse af de væsentligste aktiviteter under faserne forundersøgelser, anlæg og etablering, drift og afvikling fremgår af Tabel 6.

Tabel 6 Scenarieoversigt med beskrivelse af væsentligste aktiviteter

Scenarier		Forundersøgelser	Anlæg og etablering	Drift	Afvikling
På land	Nyt lager	Lager ikke bevist. Behov for seismik og brøndata	Injektionsboringer etableres med brøndhoved, pumpe, casing, filtre.	Reservoir overvågning, regelmæssig seismik	Plug & abandon brønd, forsat periodisk seismisk overvågning
	Tidligere gaslager	Lager bevist og godt kendskab til	Injektionsboringer og	Reservoir overvågning,	Plug & abandon brønd,

		reservoir egenskaber. Begrænset behov for ny dataindsamling	etablering af permanente installationer	regelmæssig seismik	forsat periodisk seismisk overvågning
Offshore	Nyt lager	Lager ikke bevist. Behov for seismik og brøndata	Injektionsboringer og etablering af permanente installationer	Reservoir overvågning, regelmæssig seismik	Plug & abandon brønd, forsat periodisk seismisk overvågning
	Tidligere O&G	Lager bevist og godt kendskab til reservoir egenskaber. Begrænset behov for ny dataindsamling.	Injektionsboringer	Reservoir overvågning, regelmæssig seismik	Plug & abandon brønd, forsat periodisk seismisk overvågning
Nearshore	Nyt lager	Lager ikke bevist. Behov for seismik og brøndata	Injektionsboringer og etablering af permanente installationer	Reservoir overvågning, regelmæssig seismik	Plug & abandon brønd, forsat periodisk seismisk overvågning

A.3.1 Forundersøgelser

Seismik

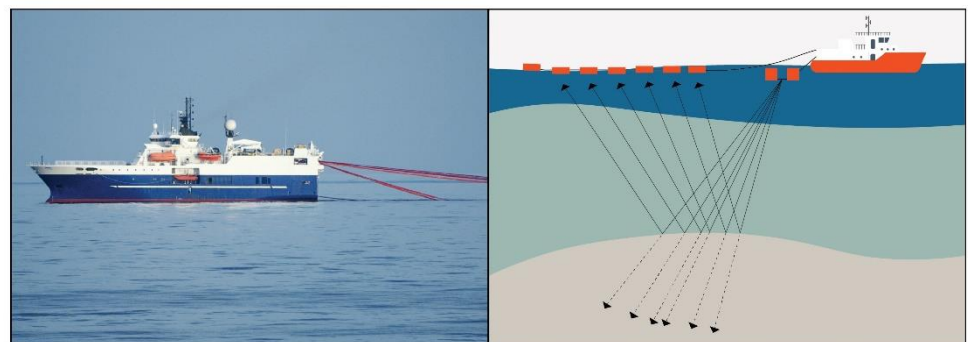
Indsamling af seismiske data og boringer er en fundamental del af forundersøgelserne for at forstå tilstedeværelsen, udbredelsen og kvaliteten af geologiske lagre. Den seismiske metode svarer til en stor-skala ultralydsskanning af undergrunden, hvormed det er muligt at identificere laggrænser og strukturer/forkastninger af sedimentære lag i undergrunden samt under visse forhold lithologi/ bjergarts type og tilstedeværelsen af gas, olie og vand. Seismiske undersøgelser kan udføres som 2D- eller 3D kortlægning. 2D kortlægningen består af en række udvalgte linjer, typisk planlagt i et grovmasket net, med afstande på 1-5+ km mellem de seismiske profiler. Dette giver en grundlæggende forståelse af undergrunden, men med større usikkerheder især for tynde lag, i forhold til dybden til toppen af lagene og for forkastninger. For med rimelig sikkerhed at kunne kortlægge laggrænser, strukturer, udbredelse af reservoiret, evt. interne forkastninger og sprækkesystemer, anvendes 3D seismik.

3D seismik er grundlæggende en 2D seismisk undersøgelse med større linjetæthed og større antal linjer, samt væsentligt forøget opløselighed vertikalt og horisontalt. En sådant datagrundlag kan muliggøre en detaljeret kortlægning af strukturen. Den forbedrede kortlægning gælder både en bedre opløselighed af tynde lag og til dybden til de enkelte lag samt en meget forbedret mulighed for kortlægning af forkastninger. For eftervisning af lithologien (typen af aflejring, f.eks. ler eller sand) og til undersøgelse af reservoir- og seglbjergarternes fysiske egenskaber kræves boring af en brønd.

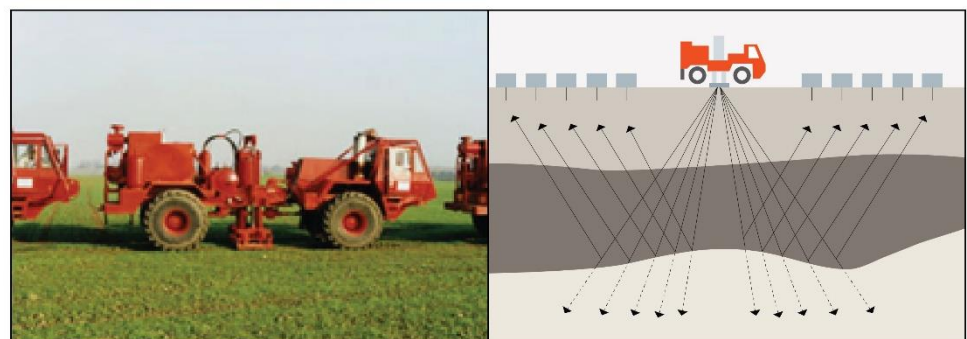
Der kræves forskelligt udstyr på land og på vand og det er særligt vanskeligt at dække kystområdet, hvor der er lavvandet og skal bruge en kombination af udstyr. Typisk indsamles og analyseres 2D som et første skridt for at afdække om fundamentale elementer, en struktur, er til stede og derefter følges op med 3D data samt en brønd for detalje kortlægning. Her er det "cost" effektivt at tænke langsigtet med hensyn til at sikre at 3D kortlægningen kan fungere som et baseline for senere monitorering af reservoiret.

Offshore foregår seismisk dataindsamling med specialbyggede seismiske skibe. Lydbølger sendes ned i jorden fra såkaldte "airguns"/luftkanoner som trækkes efter skibet. Disse signaler rammer jordens forskellige lag og reflekteres tilbage til havoverfladen, hvor de registres af trykfølsomme hydrofoner på et kabel som trækkes efter luftkanonerne. Dette er kendt som "streamer" seismik (Figur 6).

Til lands benyttes typisk vibratorlastbiler eller sprængladninger til at udsende lydbølger, som opsamles af geofoner på overfladen. Det er ofte mere besværligt at indsamle seismik på land end til havs pga. af flere obstruktioner. Landdata er ofte også mere påvirkelige af støj fra omgivelserne, hvilket kan betyde reduceret kvalitet af data.



Figur 6 Marin seismik data indsamling (Kilde GEUS efter Niels Ter-Borch, DONG Energy)



Figur 7 Land seismik dataindsamling (Kilde GEUS efter Niels Ter-Borch, DONG Energy)

Boringer

For at påvise type af bjergart og undersøge egenskaberne af reservoir og forsegling kræves boring af en brønd. Brøndata bestående af geofysiske logs, kerne data og tryk data er vigtige at indsamle. Geofysiske logs er vigtige for tolkning af geologi og kalibrering til seismik. Kernerdata er vigtige for forståelsen af bl.a. bjergarts styrke og mekanik i forsegling samt for reservoir porøsitet og permeabilitet. Tryk data indsamles gennem brøndtest for at vurdere forseglingsstyrken i forhold til trykket i reservoiret samt permeabilitet/flow i reservoiret.

Offshore bores brønde fra borerigs specificeret efter vanddybde samt dybde og tryk i reservoiret (Figur 8). Disse er typisk flytbare og med beboelse for mand-skabet. Nogle permanente produktionsplatforme er også udstyret til at bore brønde. På land er borerigge typisk noget mindre og kan flyttes med/på lastbiler.

Det er ikke en ufarlig proces at bore brønde, idet man har med tungt maskineri at gøre og under visse forhold brændbare hydrocarboner, kombineret med mulige overraskelser som f.eks. tryk, geologiske og vejrmæssige forhold. Det er dog en industri med stor erfaring og med et højt fokus på sikkerhed og på at processerne er optimeret og udføres sikkert.



Figur 8 Offshore Jack-up borerig (Kilde Maersk [71])

A.3.2 Anlæg og etablering

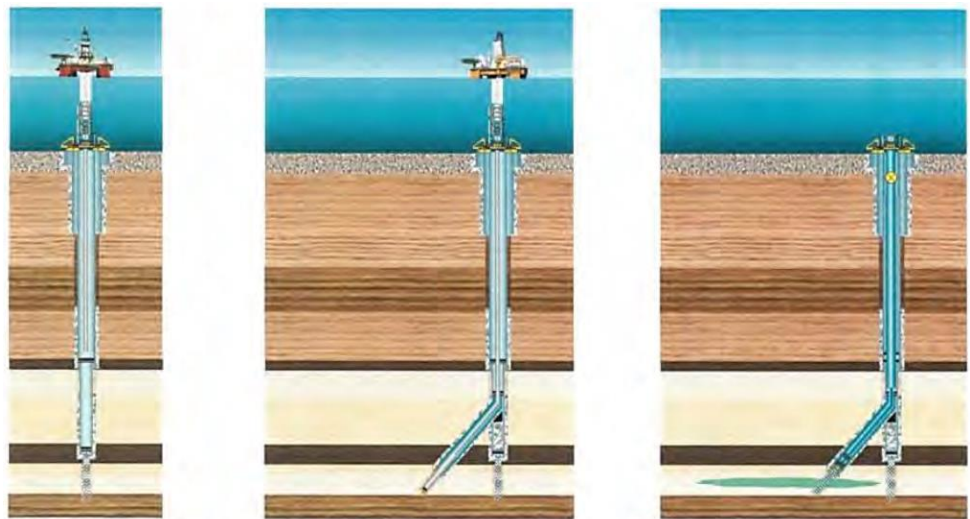
Injektion af CO₂ i undergrunden kræver som minimum én boring, hvor der bores igennem det valgte reservoir. En ny injektionsbrønd bores eller en eksisterende boring konverteres til CO₂-injektion.

På reservoirniveau udføres brønden med nødvendige filtre og det kan være nødvendigt at udføre injektionsforberedende test og oprensning f.eks. med kaliumklorid. Filtret giver adgang til reservoiret og sikrer, at uønskede partikler ikke injiceres og at reservoirets partikler ikke mobiliseres. Brønden fores (cases) for at sikre at CO₂ ikke kan undslippe ind til andre formationer. Der etableres et brøndhoved hhv. på jordoverfladen eller på havbunden. Det skal sikres at CO₂

injektionen udføres med et tryk og en temperatur der passer til forholdene i reservoiret og der placeres typisk anlæg enten i brønden eller ved brøndhovedet til tryksætning og opvarmning. Idet lækage kan ske direkte gennem brønden, bør den udstyres med instrumenter, der kan måle tryk- og temperaturændringer og derved overvåge evt. lækage. Det er også et krav i henhold til EU Direktiv 2009/31/EC [72].

CO₂ er korrosiv og studier konkluderer, at den vigtigste grund til at injektionsbrønde fejler skyldes, at der er brugt konstruktionsmaterialer som ikke er tilpasset CO₂, hvilket har ledt til korrosion af casing [68]. Ved brug af gamle brønde ved et eksisterende olie- og gasfelt, er det nødvendigt at renovere borerens opbygning så korrosion undgås. Det skal derfor dokumenteres og verificeres at brøndenes opbygning ikke udgør en risiko inden lageret tages i brug. Bekymringerne er typisk rettet mod cementen og eventuel reaktion med CO₂ [68].

På Sleipner Vest CO₂ projektet offshore Norge, sendes CO₂ ned i reservoiret via en dedikeret injektionsbrønd fra Sleipner A platformen. I Northern Lights projektet planlægges en undersøisk satellit, der forbindes med en rørledning til land mens monitorerings- og kontrolfunktioner planlægges udført fra Oseberg platformen (offshore [17]). Det planlægges endvidere at benytte forundersøgelsesbrønden til injektion efter re-design (Figur 9). På havbunden planlægges etablering af en undersøisk satellitfacilitet af størrelse 20,5x12,4x16 m.



*Figur 9 Illustration af den planlagte udvikling af Northern Lights injektionsbrønden [17].
Venstre: Boring af forundersøgelses brønd i 2019/2020. Midt: Genåbning, re-design og færdiggørelse til injektion planlagt i 2022. Højre: Færdig injektionsbrønd i 2023/2024.*

A.3.3 Drift

Driften af selve CO₂ lageret består af injektion af CO₂ og monitorering af reservoiret. Et omfattende monitoringsprogram er nødvendigt for at demonstrere og dokumentere at den lagrede CO₂ forbliver i reservoiret. De fleste metoder er anvendelige både offshore og på land.

Undersøgelser, der udføres som en del af monitoring skal kunne holdes op mod undersøgelser foretaget inden CO₂ injektion er påbegyndt. Dette refereres til som basisundersøgelser.

For selve reservoiret og forseglingsbjergarten udgør det 3D seismiske undersøgelser, der udføres for at kortlægge strukturen, den vigtigste baseline. Den kan benyttes til fremtidige, såkaldte 4D undersøgelser. 4D er ganske enkelt udførelse af to identiske 3D seismiske undersøgelser, forskudt i tid. Da udskiftningen af vand med CO₂ ændrer trykforholdene i reservoiret og dermed den seismiske respons, kan udbredelsen af CO₂ i reservoiret monitoreres ved hjælp af forskellen i det seismiske signal med f.eks. 5-10 års mellemrum. Også andre metoder benyttes f.eks. mikro-gravimetrisk undersøgelser, hvor ændringer af tyngdeforholdene måles, idet CO₂ er lettere end det saline vand.

Over 20 års erfaringer fra Sleipner CO₂ injektionsprojekt, verdens første industrielle offshore CCS projekt har netop vist, at gentagne seismiske undersøgelser (4D/ Timelapse) har været essentielle for at kunne overvåge CO₂ plumens indslutning i reservoiret (Figur 10). Kombineret med gravimetrisk data har det været muligt at kombinere CO₂ masseændringer og geometridata for derved at kunne estimere opløsning af CO₂ i vandet, hvilket er vigtigt for langtidsberegninger. Det er også vist, at tryk- og temperatursensorer ved brøndhoved og i reservoir er nødvendige for god kontrol af betingelser før og under injektion. Ved brug af disse overvågningsmetoder er det vist at CO₂ er forblevet sikkert nede i undergrunden [45]. Overvågningen følger krav jf. EU direktiv [72].

Mikro jordskælv (mikro-seismisitet) kan udløses ved injektion. Den geologiske risiko for betydende jordskælv er meget lille.

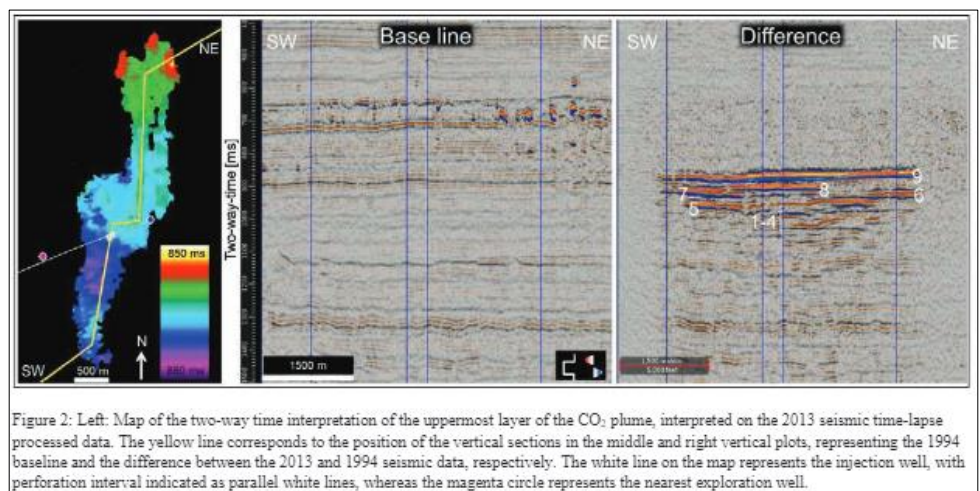
I Danmark er der erfaring med pumpning og lagring af naturgas i underjordiske anlæg på land bl.a. i et akviferreservoir i Stenlille på Sjælland. Der er 20 dybe brønde på Stenlille sitet, 14 injektions og produktions brønde og 6 overvågningsbrønde. Stenlille blev overvåget for seismiske events i perioden 2018-2020 og er ikke observeret seismiske events i den periode [73].

Monitoring af CO₂'s mulige indtrængning i grundvandet er også nødvendigt. Monitoreringen består typisk af et antal overvågningsboringer, hvorfra der kan indsamles flowdata og tages jævnlige vandprøver. Da CO₂ kan påvirke den kemiske sammensætning af grundvandet, bør der sammensættes et relevant laboratorieprogram. Data samles i en grundvandsmodel, der viser flowretning. I Stenlille gaslageret på Sjælland er grundvandet blevet overvåget via boringer siden anlægget blev anlagt i 1989. Kun et læk er blevet observeret, i 1995, relateret til et teknisk problem under injektion i St14 borigen [73].

Lækket blev hurtigt stoppet. Estimatet er at 5.000 m³ gas blev tabt til lavere liggende geologiske formationer. En uge efter lækket blev der observeret forhøjede gaskoncentrationer i K1 vandboring, 250m fra St14 borigen. Der var ingen fri gas i vandprøven, og det blev konkluderet at alt gassen var opløst på det tidspunkt. Efterfølgende er koncentrationen af opløst gas faldet og i 2012 til under 1mg/l. Der blev også målt en stigning i metan i oktober 2009 i vandboring 558 sydvest for Nyrup. På den baggrund blev det konkluderet af traces af gas fra

lækken i 1995 havde migreret ind og gennem et Paleocen sand lag til brønd 558. En begravet dal ved Nyrup har muligvis tilladt gassen at migrere til lavere dybder, hvor den blev gradvist opløst i grundvandet. Undersøgelserne viste også, at der var en meget lav pumpede rate i brønden som muliggjorde at detektere gas i vandet. Efter normal pumpede rate var etableret, kunne gas ikke længere måles [73].

Erfaringerne fra overvågningen af lageret ved Sleipner har givet input til fremtidige projekter. Læringen er at valget af overvågningsteknikker, hvornår og varigheden af overvågningsundersøgelser bør være projektspecifikke og risk baseret, samtidig med at den langvarige tidshorizont for CCS projekter også bør tages med i overvejelserne.



Figur 10 Sleipner seismisk CO₂ overvågning [45].

A.3.4 Afvikling

I afviklingsfasen forsegles brøndene med en cement plug og overflade installationer fjernes ligesom for olie- og gasinstallationer. Energistyrelsens boreretningslinjer [44] angiver, hvordan brønde bør tilproppes, før de efterlades i henhold til godkendte procedurer. Brøndstedet skal genetableres i overensstemmelse med den oprindelige tilstand, og brøndstedet skal verificeres inden det efterlades.

Reservoiret overvåges dog forsat i afviklingsfasen vha. seismik. Når injektionen stoppes, falder trykket i reservoiret og derfor anses risikoen for brud på forseglingen og induceret seismisitet mindre i denne fase end i driftsfasen.

A.4 Transport af CO₂ på land og til havs

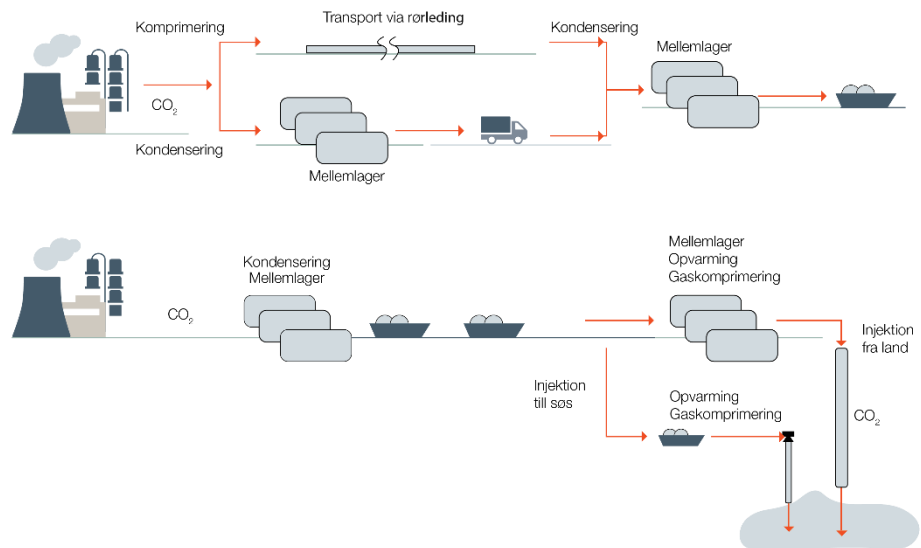
Transport af CO₂ kan ske som en komprimeret gas eller på væskeform. CO₂ transporteres som gas under højt tryk i rørledninger, samt ved mellemtryk og nedkølet som væske i f.eks. tanke. Rørledningstransport af CO₂ og andre gasser under tryk er en moden kommercielt tilgængelig teknologi.

Der transporteres globalt gas med tankskibe i LPG- og LNG-skibe (Liquified Petroleum/Natural Gas), hvor gassen ligesom CO₂ er hhv. under tryk eller nedkølet til væskeform. I Northern Lights projektet bygges i første fase to skibe til transport af flydende CO₂. Her er der specifikt tale om et tilpasset LPG skibsdesign med tilføjelse af et transportsystem til flydende CO₂ samt isolering. Hermed benyttes designs, som skibsværfter allerede kender.

Der findes mere end 3.000 km CO₂-rørledninger i Nordamerika, ca. 135 km flerfase rørledning til Snøhvit feltet i Norge og ca. 80-100 km CO₂-rørledning på land mellem Rotterdam og Amsterdam. Transport af gas i rørledninger eksisterer bl.a. som transportform af f.eks. naturgas i Danmark, mens CO₂ til fødevarerindustrien i dag typisk transporteres til søs og på lastbil. Transporten til søs foregår med relativt små gastankskibe.

Transport af CO₂ som væske vil kræve etablering af et mellemlager samt opvarmning og komprimering forud for endelig lagring i undergrunden. Terminalerne vil typisk være designet med lastepumper, overførselsrørledninger, marine lastearme, måle- og genfordampningsanlæg til håndtering af CO₂ gas fra lager-tanke osv. Ved destinationen til endelig lagring overføres CO₂ fra skib til injektionsfacilitet, hvor CO₂ opvarmes, komprimeres og injiceres.

Der er i det følgende anvendt informationer fra Energistyrelsens teknologikatalog for transport af energi og CO₂ [74].



Figur 11: Øverst: Transport af komprimeret CO₂ gas samt kondenseret CO₂. Nederst: Transport af CO₂ til injektion near-shore og offshore. En tredje mulighed er on-shore og near-shore injicering fra en landbaseret facilitet, hvor kondensering ikke er nødvendig.

A.4.1 Forundersøgelser

Rørledning, lastbil, godstog og skib

Der skal udføres forundersøgelser af tracé og transportmidler i forhold til teknisk egnethed.

Forundersøgelserne forventes ikke at afvige fra forundersøgelser i forbindelse med transport af f.eks. naturgas og LNG.

A.4.2 Anlæg og etablering

Rørledning

Metoder for anlæg og etablering af rørledninger vil være tilsvarende, hvad der ses for rørledninger til transport af f.eks. naturgas og LNG.

Lastbil, godstog, skib

Ikke relevant

A.4.3 Drift

Transport i rørledninger

Rørledninger vil være relevant ifm. transport af store mængder CO₂, f.eks. fra store punktkilder til eksportterminaler samt videre til lagring i undergrunden. Standarden p.t. for transport over længere strækninger (fx. over 30 km) er tryk på 80 - 150 bar, hvilket sikrer en margin til trykfald samtidig med, at tykkelsen af røret kan holdes på et rimeligt niveau ift. materialeomkostninger. For kortere strækninger kan der anvendes tryk på 10 eller 30 bar alt efter om rørene er nedgravede. Der findes flere designstandarder for CO₂-rørledninger, se herunder DNV-RP-J202 og ISO 27913:2016. Der kan være mulighed for at benytte eksisterende naturgasrørledninger til CO₂-transport. Dette vil afhænge af, hvorvidt røret er i en dimension der passer og i det hele taget lever op til kravene CO₂ transport. Det vil skulle undersøges i de konkrete tilfælde.

Som tidligere nævnt sker der komprimering af CO₂ op til 150 bar samt tørring inden transport. CO₂-kompressoren styrer trykket ved indløbssiden af rørledningen, og ved afbrydelser af kompressoren benyttes ventiler for at afspærre mod rørledningen, så trykket fastholdes der. På land vil der også blive indsat ventiler langs rørledningen, så rørsegmenter kan isoleres ved lækage. Længden af hvert segment vil afhænge af en risikovurdering. F.eks. må der i tætbefolkede områder forventes kortere segmenter end i landdistrikter. Offshore vil der typisk ikke være afspærringsventiler mellem land og selve brøndhovedet.

Målestationer vil placeres ved kompressionsanlægget i indløbet eller i slutningen af røret. Er der tale om et egentligt netværk, kan det dog være relevant at etablere flere målestationer. Pumpestationer kan være relevante langs ruten for at overvinde tryktab, hvis trykket falder til under det minimale rørledningsdriftstryk (80 bar). Typisk kan dette være for hver 70-140 km. Pumpene placeres i dedikerede stationer / huse langs ruten. For offshore-rørledninger er dette ikke en mulighed og dimensionen skal derfor vælges, så det resulterende trykfald kan

tolereret. I praksis betyder det, at diameteren øges med rørledningens længde ved fastholdt kapacitet.

Allerede eksisterende CO₂-rørledninger spænder vidt i kapacitet fra 0,06 til 27 mio. ton pr. år. I Danmark forventes behov for transport af 5-10 mio. ton pr. år, da dette vil dække mange af de største punktkilder. Det vil kræve en nærmere afdækning af de specifikke forhold i det enkelte projekt for at afgøre, om det er relevant med etablering af en rørledning ift. f.eks. lastbiltransport. Forventningen er, at kapaciteter under ca. 50-100 kton CO₂ pr. år vil blive kørt med lastbil.

Der forventes ikke nogen større miljøpåvirkning under almindelig drift, da der ikke vil være afgivelse af CO₂ fra rørledningen. Der kan ved vedligeholdelses- eller reparationsarbejde skulle foretages en kontrolleret nedblæsning af sektioner, hvorved en kort rørstrækning tømmes med udledning af en mindre mængde CO₂ til følge.

Under den daglige drift skal flow og tryk langs rørledningen overvåges kontinuerligt, herunder overføres aflæsningerne fra instrumenterne til et bemandet kontrolrum. Nedgravede rørledninger vil desuden normalt også være udstyret med katodisk beskyttelse ift. ekstern korrosion.

Rørledningen kan også være udstyret med interne inspektions- og rensefaciliteter i form af luger til en såkaldt "gris", der anvendes til overvågning af intern korrosion og tilsmudsning. Sammenholdt med naturgasrørledningerne forventes mindre intern rensning, da det er ren, tør CO₂-gas, der transporteres.

Hvor der er risiko for at CO₂ kan ophobes i farlige koncentrationer ved en læk (herunder CO₂-komprimerings- / pumpehuse, doseringshus, ventilhuller mv.), skal der være CO₂-detektorer og alarmer.

Flowet ind og ud af rørledningerne bestemmes ved måling som del af afregningen, når der er overføres mellem forskellige parter. Overvågning af CO₂-kvaliteten f.eks. fugtindhold, O₂-indhold og andre urenheder forventes at være et krav ved indløbet. Hermed sikres at CO₂-kvaliteten er tilstrækkelig ift. rørledningsmaterialer og produktspecifikationer.

For en CO₂-rørledning vil der være operationelle risici relateret til CO₂'s faseadfærd og belastningsudsving, f.eks. dannelse af væskefase eller tørre under pludselige trykfald, frysning af sikkerhedsventiler osv. Vedligeholdelsesstop med fuld trykafledning skal udføres i et langsomt tempo for at forhindre frysning.

Sikkerheden ved naturgasrørledninger og relaterede installationer vurderes af Arbejdstilsynet og Sikkerhedsstyrelsen. Endnu vides ikke, hvilken myndighed der vil evaluere fremtidige CO₂-rørledninger, og hvilke sikkerhedskrav der i så fald vil være.

Skibstransport

Skibe vil være relevant for transport af større CO₂ over længere afstande. Dette kan f.eks. være transport fra store punktkilder til offshore lagringsfaciliteter eller

havne terminaler. Skibene kan desuden sejle i rutefart mellem flere destinationer, hvor der indfanges mindre mængder CO₂. P.t. har de eksisterende skibe til CO₂ transport en forholdsvis lille lagerkapacitet på 1.000-2.000 m³, hvilket må forventes at stige på sigt. Ved behov for etablering af ny infrastruktur til skibstransport, såsom kajpladser ved industrianlæg og ved udvidelse af eksisterende havnefaciliteter, kan der forventes en betydelig projektkostning.

CO₂ transporteres i flydende form, og dette vil typisk ske ved mellemtryksbetin- gelser (15-18 bar og -27°C til -21°C). Der kan dog også anvendes lavtryksfor- hold (f.eks. 5-7 bar og ca. -50 ° C) eller højtryksforhold (40-50 bar og +5°C til +15°C). Forskellen ligger i CO₂ densiteten samt krav til trykbeholdere samt be- hovet for isolering af systemet.

Lastbilstransport

Transport af CO₂ på lastbil sker i flydende form svarende til skibstransportforholdene. Vejtransport af CO₂ vil være relevant for små til mellemstore mængder, f.eks. fra små punktkilder til CO₂-anvendelsesfaciliteter eller eksportterminaler. Typisk kapacitet for en lastbil er 25 – 30 ton CO₂.

CO₂-lastbiler fyldes fra mellemlagertankene. Terminalerne vil have dedikerede lastepladser med tankningsudstyr og gasreturlødnings til stede. En lastbil med en kapacitet på 30 ton CO₂ kan fyldes med flydende CO₂ på ca. 45 min, hvilket også forventes som aflæsningstid på destinationen. Tankene på lastbilen er ikke udstyret med køling, men er i stedet isoleret. Derfor vil temperaturen og trykket stige en smule under transport. Flydende CO₂ er en kølevare og transporten bør derfor minimeres for at undgå for stort varmeoptag. Står tankbilen for længe, slippes CO₂ ud i en sikkerhedsventil på tanken. Transporten skal derfor planlægges.

Miljøpåvirkningen pga. lastbilstransport vil som for skibe hovedsageligt være i driftsfasen pga. det høje energibehov (brændstof) samt emissioner fra lastbilen.

Transport af CO₂ via lastbil foregår allerede i dag, og CO₂ sættevogne er derfor sikkerhedsmæssigt godkendt til vejtransport. Da kapaciteten af lastbilen er begrænset, vil en ulykke med resulterende læk af CO₂ have ret lokal effekt. Såfremt ruten involverer veje med områder, hvor luftudskiftningen er mindre, f.eks. tunneler, vil der dog være større risiko for at nå farlige niveauer af CO₂ ved en lækage.

Godstog

CO₂-transport via jernbanen er teknisk muligt, og kryogene godsvogne benyttes nogle steder i verden til at distribuere flydende CO₂ til industrielle brugere. P.t. er der i Danmark ganske få punktkilder med forbindelse til jernbanenettet, hvorfor det primært vil være relevant ifm. transport fra f.eks. en havnefacilitet til industri med anvendelse af CO₂. Det vil her være et springende punkt, at infrastrukturen allerede er på plads. Desuden er planlægningen af transporten anderledes end f.eks. benzin, da vognene ikke kan henstilles i længere tid pga. fordamning af flydende CO₂.

A.4.4 Afvikling

Rørledning

Afvikling af en CO₂ rørledning stiller ingen specifikke krav eller udfordringer ift. andre typiske rørledninger til gastransport.

Lastbil, godstog, skib

Afvikling vil være som for andre tilsvarende transportere.

Bilag B Opsummering af CCS erfaringer med sikkerhed, miljø og natur

CO ₂ fangstanlæg inkl. konditionering	Sikkerhed/uheldsscenerier	Miljø	Natur
Forundersøgelser	Ingen særlige sikkerhedsmæssige forhold identificeret	Ingen særlige miljømæssige forhold identificeret	Ingen særlige naturmæssige forhold identificeret
Anlæg og etablering	Ingen særlige sikkerhedsmæssige forhold identificeret	Energiforbrug, ressourceforbrug, CO ₂ footprint, støj, affald, emissioner til luft og vand – kan sammenlignes med andre industrianlæg	Arealinddragelse samt afledte effekter af udledninger og emissioner. Tilsvarende andre industrianlæg
Drift	Udslip/større lækage af CO ₂ , O ₂ , NH ₃ eller aminer samt risiko relateret hertil	Energiforbrug, CO ₂ footprint, kemikalieforbrug, eventuelle spild, og emission af aminer og nedbrydningsprodukter via luft, vand og affald Støj, kølevand (varmt) Chilled ammonia: Udledning af ammoniak Oxy fuel – mindre Nox udledning fra forbrænding	Afledte effekter af udledning og emissioner. Herudover tilsvarende andre industrianlæg
Afvikling	Ingen særlige sikkerhedsmæssige forhold identificeret	Tilsvarende andre industrianlæg	Tilsvarende andre industrianlæg
Mellemlager	Sikkerhed/uheldsscenerier	Miljø	Natur
Forundersøgelser	Ingen særlige sikkerhedsmæssige forhold identificeret	Ingen særlige miljømæssige forhold identificeret	Ingen særlige naturmæssige forhold identificeret
Anlæg og etablering	Ingen særlige sikkerhedsmæssige forhold identificeret	Energiforbrug, CO ₂ footprint, ressourceforbrug, eventuelle spild, støj - Tilsvarende andre industrielle lagerfaciliteter	Arealinddragelse samt afledte effekter af udledninger og emissioner.
Drift	Udslip af CO ₂ , samt risiko relateret hertil	Energiforbrug, CO ₂ footprint, kemikalieforbrug, eventuel spild, støj, diffuse udledninger af CO ₂ - Tilsvarende andre industrielle lagerfaciliteter	Arealinddragelse og eventuelle afledte effekter af udledning og emissioner
Afvikling	Ingen særlige sikkerhedsmæssige forhold identificeret	Tilsvarende andre industrielle lagerfaciliteter	Tilsvarende andre industrielle lagerfaciliteter
Geologisk lagring	Sikkerhed/uheldsscenerier	Miljø	Natur
Forundersøgelser	Risiko for ved boring at ramme lagre af kulbrinter, CO ₂ og tilhørende risiko for blowout ved boring	Støj, emissioner, energiforbrug, udledning af kemikalier	Påvirkning af fisk og marine pattedyr af offshore seismiske undersøgelser Påvirkning af arealer og forstyrrelse af dyr ved onshore seismiske undersøgelser
Anlæg og etablering	Se forundersøgelser	Støj, emissioner, energiforbrug, ressourceforbrug, udledning af kemikalier	Fysisk forstyrrelse af havbund Tab af områder Ophobning af forurenende stoffer Forringet vandkvalitet
Drift	Risiko for udslip af CO ₂ i havmiljø eller på land via revner mv.	Energiforbrug, udledning af kemikalier, diffus emission af CO ₂	Forstyrrelse af kyst- og havfugle på grund af skibstrafik Mindre CO ₂ lækage fra offshore lager har kun lokal påvirkning Risiko for CO ₂ lækage til grundvand fra onshore lager
Afvikling inkl. monitoring	Risiko for udslip af CO ₂ i havmiljø eller på land via revner mv	Støj, energiforbrug, udledning af kemikalier, affald	Tilsvarende anlæg og etablering samt forundersøgelser

CO ₂ infrastruktur rør	Sikkerhed/uheldsscenerier	Miljø	Natur
Forundersøgelser	Ingen særlige sikkerhedsmæssige forhold identificeret	Ingen særlige miljømæssige forhold identificeret	Ingen særlige naturmæssige forhold identificeret
Anlæg og etablering	Ingen særlige sikkerhedsmæssige forhold identificeret	Støj, emissioner, energiforbrug, ressourceforbrug, eventuelle spild, emission under opstart af N ₂ , CO ₂ , MEG - Tilsvarende påvirkning som ved etablering af f.eks. gasrør	Fysisk forstyrrelse af havbund/areal Tab /ændring af områder Føringet vandkvalitet / sediment
Drift	Udslip af CO ₂ , samt risiko relateret hertil	Energiforbrug, CO ₂ footprint, kemikalieforbrug, eventuel spild, støj fra kompressorer, nedblæsning af CO ₂ . Tilsvarende drift af f.eks. Gasrør minus kulbrinter	Eventuelle afledte effekter af emissioner og udledning
Afvikling	Ingen særlige sikkerhedsmæssige forhold identificeret	Tilsvarende anlæg inkl. affald	Tilsvarende anlæg og etablering
Skib, lastbil, godstog	Sikkerhed/uheldsscenerier	Miljø	Natur
Forundersøgelser	Ingen særlige sikkerhedsmæssige forhold identificeret	Ingen særlige miljømæssige forhold identificeret	Ingen særlige naturmæssige forhold identificeret
Anlæg og etablering	Ingen særlige sikkerhedsmæssige forhold identificeret	Ingen særlige miljømæssige forhold identificeret	Ingen særlige naturmæssige forhold identificeret
Drift	Udslip af CO ₂ , samt risiko relateret hertil	Energiforbrug, CO ₂ footprint, emissioner, støj	Tilsvarende anden mobil transport inkl. eventuelle afledte effekter af udledninger
Afvikling	Ingen særlige sikkerhedsmæssige forhold identificeret	na	na

Bilag C Longlist over litteratur gennemgået

A. C. Rohr, J. D. McDonald, D. Kracko, M. Doyle-Eisele, S. L. Shaw og E. M. Knipping, »Potential toxicological effects of amines used for CCS and their degradation processes,« Energy Procedia, årg. 37, pp. 759-768, 2013.

A. D. Nielsen, N. P. Christensen, P. Jørgensen og E. L. Lundsteen, »Catalogue of geological storage of CO₂ in Denmark, Danish Energy Agency,« Rambøll, Copenhagen, 2021.

A. Hosa, M. Esentia, J. Stewart og S. Haszeldine, »Benchmarking worldwide CO₂ saline aquifer injections,« March 2010. [Online]. Available: <https://www.sccs.org.uk/images/expertise/reports/working-papers/wp-2010-03.pdf> .

A. M. Omar, M. I. García-Ibáñez, A. Schaap, A. Oleynik, M. Esposito, E. Jeansson, S. Loucaides, H. Thomas og G. Alendal, »Detection and quantification of CO₂ seepage in seawater using the stoichiometric Cseep method: Results from a recent subsea CO₂ release experiment in the North Sea,« International Journal of Greenhouse Gas Control, årg. 108, nr. 103310, pp. 1-17, 2021.

A. McGillivray og J. Wilday, »Comparison of risks from carbon dioxide and natural gas pipelines,« Health and Safety Laboratory , 2009.

A.-K. Furre, O. Eiken, H. Alnes, J. N. Vevatne og A. F. Kier, »20 years of monitoring CO₂-injection at Sleipner,« Elsevier, p. 3916 – 3926, 2017.

Aker Carbon Capture, »Experience-based approaches to lower carbon cement production - How the Brevik CCS project opens up new possibilities for other cement producers,« Aker Carbon Capture Norway AS, Lysaker, 2021.

ArkerSolutions, »Arker Solutions starts CCS test program at Preem Refinery in Sweden,« may 2020. [Online]. Available: <https://www.akersolutions.com/news/news-archiv/2020/aker-solutions-starts-ccs-test-program-at-preem-refinery-in-sweden/>. [Senest hentet eller vist den August 2021].

Batres, Maya; Wang, Frances; Buck, Holly et al.; Environmental and climate justice and technological carbon removal, The Electricity Journal 34 (2021)

C. Bofeng og e. al, »China Status of CO₂ Capture, Utilization and Storage (CCUS) 2019,« Center for Climate Change and Environmental Policy, Chinese Academy of Environmental Planning. 2020, 2019.

C. Oldenbrug og L. Pan, »Major CO₂ blowouts from offshore wells are strongly attenuated in water deeper than 50 m,« Energy Geosciences Division - Lawrence Berkeley National Laboratory, 2019.

COWI, »Carbon Capture Technology Catalogue,« Kongens Lyngby, 2020.

Department of Energy & Climate Change, »Government Response to the House of Commons Environmental Audit Committee Report: Carbon Capture and Storage (CCS),« Crown Copyright, 2009.

Det Norske Veritas, »Design and operation of CO₂ pipelines,« 2010.

E. Gjernes, L. I. Helgesen og Y. Maree, »Health and environmental impact of amine based post combustion CO₂ capture,« Energy Procedia, årg. 37, pp. 735-742, 2013.

ECHA (europa.eu), »Information om kemikalier - ECHA (europa.eu).,« 2021. [Online]. Available: <https://echa.europa.eu/da/information-on-chemicals>.

EIGA, »MINIMUM SPECIFICATIONS FOR FOOD GAS APPLICATIONS, Doc 126/20,« EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION, 2020.

- Energistyrelsen og Energinet, »Technology data - Energy transport,« 2017.
- Energistyrelsen og Energinet, »Technology Data - Industrial process heat,« 2020.
- Energistyrelsen, »Guidelines for drilling, exploration,« 1988,2009.
- Energistyrelsen, »Leverance 5.1: Miljø- og sikkerhedsaspekter i CCS-kæden,« København V, 2021.
- Energistyrelsen, »Standard vilkår for forundersøgelser til havs,« 2017.
- Energistyrelsen, »Technology Data - Energy transport,« 2020.
- Equinor, »EL001 Northern Lights: Plan for udbygning, anlegg og drift - Del II: Konsekvensutredning - Oppsummering av høringsuttalelser og tilsvær til disse,« Equinor ASA, Stavanger, 2020.
- Equinor, »EL001 Northern Lights - Mottak og permanent lagring af CO₂. Plan for udbygning, anlegg og drift. Del II - Konsekvensutredning.,« Oktober 2019.
- Equinor, »Miljørisiko for EL001, Northern Lights, mottak og permanent lagring af CO₂,« DNV GL AS Region Norway, 2019.
- Equinor, »Northern Lights FEED Report,« Equinor, 2020.
- Erhvervsministeriet, »Cirkulære om naturgaslager ved Stenlille,« Erhvervsministeriet, 1991.
- Erhvervsministeriet, Cirkulære om naturgaslager ved Stenlille (Til Vestsjællands Amtskommune og Stenlille Kommune), 1991.
- EU, »Directive 2009/31/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament and Council Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006,« 2009. [Online].
- Europakommissionen og Det Europæiske Råd, »BILAG: Statusrapport om klimaindsatsen, herunder rapporten vedrørende situationen på kvotemarkedet og rapporten vedrørende ændring af direktiv 2009/31/EF om geologisk lagring af kuldioxid,« Den Europæiske Unions Tidende, Årg. %1 af %2COM(2015) 576 final - Annex 2, pp. 1-8, 18 November 2015.
- European Environment Agency, »Air pollution impacts from carbon capture and storage (CCS),« 2011.
- F. H. Hedlund, »Past explosive outbursts of entrapped carbon dioxide in salt mines provide a new perspective on the hazards of carbon dioxide,« Intelligent Systems and Decision Making for Risk Analysis and Crisis Response, 2013.
- F. H. Hedlund, »The extreme carbon dioxide outburst at the Menzengraben potash mine 7 July 1953,« Elsevier, 2011.
- F. Harding, »D14 Outline Environmental Impact Assessment,« Pale Blue Dot, 2018.
- F. Schilling, G. Borm, H. Würdemann, F. Möller, M. Kühn og C. GROUP, »Status Report on the First European on-shore CO₂ Storage Site at Ketzin (Germany),« Elsevier, Energy Procedia, p. 7, 2009.
- G. Dautzenberg og T. Bruhn, »Environmental impacts from CCS technologies,« Institute for Advanced Sustainability Studies, Potsdam, 2013.
- G. Peridas, »Permitting Carbon Capture and Storage Projects in California,« Lawrence Livermore National Laboratory, 2021.

Gassnova, »Developing longship - Key lessons learned,« 2020.

GESAMP, »High level review of a wide range of proposed marine geoengineering techniques,« INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, London, 2019.

Global CCS Institute, »CCS Targeting Climate Change - Brief for Policymakers,« Global Carbon Capture and Storage Institute Ltd, 2019.

Global CCS Institute, »Global CCS Institute facilities database,« 2021. [Online]. Available: <https://co2re.co/ClimateChange>.

Global CCS Institute, »Global status of CCS 2020,« 2020. [Online]. Available: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>. [Senest hentet eller vist den August 2021].

Global CCS Institute, »Unlocking private finance to support CCS investments,« Global Carbon Capture and Storage Institute Ltd, 2021.

Gov, CA., »California Air Resources Abroad - CSS,« 2021. [Online]. Available: <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/carbon-capture-sequestration>.

IEA, »20 Years of Carbon Capture and Storage - Accelerating Future Deployment,« International Energy Agency & OECD, Paris, 2020.

IEAGHG, »Environmental impacts of amine emissions during post combustion capture - Workshop 2010/11,« International Energy Agency Environmental Projects Ltd., Cheltenham, UK, 2010.

IEAGHG, »Evaluation of reclaimer sludge disposal from post combustion CO₂ capture,« 2014.

IEAGHG, »The Process of Developing a Test Injection: Experience to Date and Best Practice,« International Energy Agency Environmental Projects Ltd., Cheltenham, UK, 2013.

IPCC, »IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage,« Cambridge University Press, 2005.

J. C. S. Long, »California's Energy Future: The View to 2050,« California Council on Science and Technology, Sacramento, California, 2021.

J. L. Lewicky, J. Birkholzer og C.-f. Tsang, »Natural and industrial analogues for leakage of CO₂ from storage reservoirs: identification of features, events, and processes and lessons learned,« Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2006.

J. L. M. Gibbins, »BAT Review for New-Build and Retrofit Post-Combustion Carbon Dioxide Capture Using Amine-Based Technologies for Power and CHP Plants Fuelled by Gas and Biomass as an Emerging Technology under the IED for the UK,« 2021. [Online]. Available: <https://ukccsrc.ac.uk/best-available-technology-bat-information-for-ccs/>. [Senest hentet eller vist den august 2021].

J. M. Neff, »Fate and effects of water based drilling muds and cuttings in cold water environments,« Review prepared for Shelle exploration an Production Company Houston Texas, 2010.

K. Fujita, Y. Kato, S. Saito, H. Kitamura, D. Muraoka, M. Udatsu, Y. Handa og K. Suzuki, »The effect of aerosol characteristics in coal- and biomass-fired flue gas on amine emissions,« 14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-14, pp. 1-10, 2018.

K. M. Novak, N. Gaurina- Medimurec og L. Hrnčević, »Significance of enhanced oil recovery in CO₂ emission reduction,« Sustainability, årg. 13, 2021.

K. Wallmann, M. Haeckel, P. Linke, L. Haffert og M. Schmidt, »Best Practice Guidance for Environmental Risk Assessment for offshore CO₂ geological storage,« EU: ECO₂ - Sub-seabed CO₂ Storage: Impact on Marine Ecosystems, 2015.

KEFM, »Principaftale mellem regeringen (Socialdemokratiet), Venstre, Dansk Folkeparti, Radikale Venstre, Socialistisk Folkeparti, Enhedslisten, Det Konservative Folkeparti, Liberal Alliance og Alternativet om En køreplan for lagring af CO₂,« Juni 2021 2021. [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiQ3-Pky_HyAhWiz4sKHWjmD5sQFnoECAYQAQ&url=https%3A%2F%2Fkefm.dk%2FMedia%2F637606718216961589%2FPrincipaftale%2520om%2520CO2-lagring.pdf&usq=AOvVaw1y6rm60I85JFq7tfo1qR0P. [Senest hentet eller vist den September 2021].

Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, »Bilag 4 - Udenlandske erfaringer,« København, 2020.

L. A. Kyhn, S. Wegeberg, D. Boertmann, P. Aastrup, J. Nymand og A. Mosbech, »On-shore Seismic Surveys in Greenland,« Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 2020.

L. Eilertsen, »Northern Lights. Konsekvensvurdering med hensyn på naturmiljø og biologisk mangfold på land,« Rådgivende Biologer AS, 2018.

L. I. Helgesen og E. Gjernes, »A way of qualifying Amine Based Capture Technologies with respect to Health and Environmental Properties,« Elsevier, Energy Procedia, p. 13, 2016.

Loria, Patricia and Bright, Matthew B.H, Lessons Captured from 50 years of CCS projects, The Electricity Journal 34 (2021)

M. Bui, C. S. Adjiman, A. Bardow, E. J. Anthony, A. Boston, S. Brown, P. S. Fenell, S. Fuss, A. Galindo, L. A. Hackett, J. P. Hallett, H. J. Herzog, G. Jackson, J. Kemper, S. Krevor, G. C. Maitland, M. Matuszewski, I. S. Metcalfe, C. Petit, G. Puxty, J. Reimer, D. M. Reiner, E. S. Rubin, S. A. Scott, N. Shah, B. Smit, J. P. M. Trusler, P. Webley, J. Wilcox og N. M. Dowell, »Carbon capture and storage (CCS): the way forward,« Energy and Environmental Science, årg. 11, pp. 1062-1176, 2018.

M. Hjorth, L. D. Kristensen, C. J. Murray, J. H. Andersen, S. Brooks og K. Sørensen, »Effects of oil and gas production on marine ecosystems and fish stocks in the Danish North Sea,« WSP Denmark, NIVA, Teknologisk Institut, 2021.

M. Myersa, C. White, B. Pejčić, A. Feitz, J. Roberts, Y.-Y. Oh, L. Xu, L. Ricard, K. Michael, A. Avijegon, P. K. Rachakonda, M. Woltering, A. Larcher, L. Stalker og A. Hortle, »CSIRO In-Situ Lab: A multi-pronged approach to surface gas and groundwater monitoring at geological CO₂ storage sites,« Elsevier, Chemical Geology, p. 18, 2020.

M. N. Toftegaard, »OxyFuel combustion of coal and biomass,« 2011.

M. Roskilde, »Revurdering af miljøgodkendelser Stenlille gaslager,« Miljøministeriet, 2009.

Maersk Drilling, »MaerskDrilling,« [Online]. Available: <https://www.maerskdirilling.com>.

MAERSK OIL DBU, »Redegørelse for miljømæssige og sociale virkninger - ESIS-Tyra,« Rambøll, 2017.

Ministry of Petroleum and Energy, »Feasibility study for full-scale CCS in Norway,« Gassnova & Gassco, 2016.

NIPH, »Health effects of amines and derivatives associated with CO₂ capture: Nitrosamines and nitramines,« 2011. [Online]. Available: <https://www.fhi.no/publ/2011/health-effects-of-amines-and-deriva/>.

P. Deda, M. Elbertzhagen og M. Klussmann, »Light Pollution and the Impacts on Biodiversity, Species and their Habitats,« Everglades, nr. Secretariat of the Convention on the Conservation of Migratory Species of Wild Animals (UNEP-CMS), pp. 133-138, 2007.

P. Harper, »Assessment of the major hazard potential of carbon dioxide (CO₂),« Health and Safety Executive, 2011.

P. J. Rew, P. Gallagher og D. M. Deaves, »Dispersion of subsea releases, review of prediction methodologies,« HSE BOOKS, HSE Executive- offshore technology report, 1995.

Project Greensand, »Project Greensand,« [Online]. Available: <https://statics.teams.cdn.office.net/evergreen-assets/safelinks/1/atp-safelinks.html> .

PTRC, »Aquistore: Leading the World in Deep Saline CO₂ Geological Storage,« 2021. [Online]. Available: <https://ptrc.ca/projects/co2-eor-and-storage/aquistore> .

Rambøll, »CO₂ fangst på danske affaldsenergianlæg,« København, 2020.

Rambøll, »LL. Torup Gaslager - Vedligeholdelsesprojekt,« 2016.

S. Benson og P. Cook, »Underground geological storage,« i Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage, 2018, pp. 195-276.

S. E. Greenberg, »Illinois Basin Decatur Project,« 2015.

S. Flude. [Online]. Available: <https://theconversation.com/carbon-capture-and-storage-has-stalled-needlessly-three-reasons-why-fears-of-co-leakage-are-overblown-130747>.

S. Gant, M. Pursell, A. McGillivray, J. Wilday, M. Wardman og A. Newton, »Overview of carbon capture and storage (CCS) projects at HSE's Buxton Laboratory,« Health and Safety Executive, 2017.

Scottish Carbon Capture & Storage (SCCS), »Global CCS Map,« [Online]. Available: <https://www.sccs.org.uk/expertise/global-ccs-map>.

Scottish Environment Protection Agency, »Review of amine emissions from carbon capture (version 2.01),« Natural Scotland - Scottish Government, 2015.

Søfartsstyrelsen, »Danmarks havplan,« 2021. [Online]. Available: <https://havplan.dk/da/page/info> . [Senest hentet eller vist den 23 august 2021].

Søfartsstyrelsen, »Miljøvurdering af Danmarks Havplan,« COWI, 2021.

T. Bakke, J. Klungsøyr og S. Sanni, »Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the Norwegian offshore petroleum industry,« Marine Environmental Research, årg. 92, pp. 154-169, 2013.

T. Dahl-Jensen, R. Jakobsen, T. B. Bech, C. M. Nielsen, C. N. Albers, P. H. Voss og T. B. Larsen, »Monitoring for seismological and geochemical groundwater effects of high-volume pumping of natural gas at the Stenlille underground gas storage facility, Denmark,« GEUS Bulletin, p. 8, 2021.

T. Lecomte, J. F. F. d. I. Fuente, F. Neuwahl, M. Canova, A. Pinasseau, I. Jankov, T. Brinkmann, S. Roudier og L. D. Sancho, »Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants,« 2017.

T. Nguyen, M. Hilliard og G. Rochelle, »Volatility of aqueous amines in CO₂ capture,« Energy Procedia, årg. 4, pp. 1624-1630, 2011.

The Danish Hydrocarbon Research and Technology Centre, »CO₂ storage in Danish Oil & Gas fields,« DTU, Kongens Lyngby, 2020.

Total, »Carbon capture and storage, The Lacq pilot - results and outlook,« 2013.

Total, »Carbon capture and storage, the Lacq pilot, project and injection period 2006-2013,« 2014.

UK Environmental Agency, »Guidance, Post-combustion carbon dioxide capture: best available techniques (BAT),« july 2021. [Online]. Available: <https://www.gov.uk/guidance/post-combustion-carbon-dioxide-capture-best-available-techniques-bat#who-this-guidance-is-for> . [Senest hentet eller vist den August 2021].

US National Energy Technology Laboratory; Overview of potential failure modes and effects associated with CO₂ injection and storage operations in saline formations; december 2020, DOE/NETL-2020/2634

US National Energy Technology Laboratory; Best practices manuals; <https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-storage/strategic-program-support/best-practices-manuals>

US Office of Fossil Energy and Carbon Management, »Report of the Interagency task force on Carbon Capture and Storage,« 2010.

W. Leiss og D. Krewski, »Environmental scan and issue awareness: risk management challenges for CCS,« Int. J. Risk Assessment and Management, pp. 234-253, 2019.

ZEP, »CO₂ Storage Safety in the North Sea: Implications of the CO₂ Storage Directive - TWG Collaboration across the CCS Chain,« European Zero Emission Technology and Innovation Platform, 2019.

ZEP, »Future CCS Technologies,« European Zero Emission Technology and Innovation Platform, 2017.