

Klyngesamarbejdet i hovedstaden om CO₂-infrastruktur og – transport

Tekniske og økonomiske analyser –

Konkretisering af scenarier

Rev. 9 – 30. december 2022

RAMBOLL

Bright ideas.
Sustainable change.

RAMBOLL

Bright ideas. Sustainable change.



INDHOLD

1.	Sammenfatning	3
2.	Introduktion til scenarier og tilgang	5
3.	Beskrivelse af scenarier	7
3.1	Scenarie 1: Peer-to-peer med optimeret kapacitet	7
3.2	Scenarie 2: Fælles planlægning og offentlige krav om tredjepartsadgang	7
3.3	Scenarie 3: Hovedstaden er hub for Nordeuropas CO ₂ -transport	8
3.4	Oversigt over scenarierne	10
4.	Fordele ved klyngesamarbejde	11
4.1	Anvendelse af større skibe som reducerer transportomkostninger	11
4.2	Fælles rørledning til lager på Sjælland – Havnsø/Stenlille	11
4.3	Aftaler med slutlagerselskab	11
4.4	Havneanlæg til udskibning kan deles – kun brug for én havn	11
4.5	Mellemlager vil følge skibsstørrelse og lastbiltransport	11
4.6	Fordråbningsanlæg kan reduceres, da der er stordriftsfordele og mindre behov for redundans end ved uafhængige anlæg	11
4.7	Rørledninger erstatter lastbiltransport	12
4.8	Oprensning af CO ₂ – kan evt. ske på fælles anlæg	12
5.	Forventede mængder CO₂ fra punktkilder på Sjælland	13
5.1	Store punktkilder på Sjælland	13
5.2	Input fra spørgeskema til punktkilder og sæsonvariabilitet	13
5.3	Import fra Sverige og Tyskland	14
5.4	Forventede mængder på tværs af scenarier	14
6.	Understøttende infrastruktur relateret til CO₂-transport	16
6.1	Oversigt over infrastruktur	16
7.	Havne for ind- og udskibning af CO₂	18
7.1	Omkostninger til skibstransport relativt til størrelsen på skibet	20
8.	Muligheder for lagring og anvendelse af CO₂	21
8.1	Lagring af CO ₂ – muligheder tæt på Hovedstaden	21
8.2	CCUS-anlæg tæt på Hovedstaden	22
9.	Transport af CO₂	24
9.1	Lastbiltransport af CO ₂	24
9.2	Rørledningstransport	24
10.	Økonomisk konkretisering af scenarier – cash flow-beregninger	32
10.1	Antagelser om kapacitet, rørlængder m.v.	32
10.2	Investeringsoverslag – top down – CAPEX	33
10.3	Driftsomkostninger – OPEX	35
10.4	Totalomkostninger gennemsnitlige	35
11.	Konklusioner og refleksioner	38
12.	Bilag 1	39

1. SAMMENFATNING

Hovedstadens klyngesamarbejde har beskrevet tre scenarier, som er grundlaget for denne konkretisering:

- Scenarie 1: Peer-to-peer med optimeret kapacitet
- Scenarie 2: Fælles planlægning og offentlige krav om tredjepartsadgang
- Scenarie 3: Hovedstaden er hub for Nordeuropas CO₂-transport

Scenarie 1 er baseret på individuelle anlæg med hver sin havn til udskibning og lastbiltransport fra kilder, der ikke er placeret ved en havn. Som led i konkretiseringen blev muligheden for at lagre CO₂ i Havnsø en vigtig faktor, der kan påvirke det samlede klyngesamarbejde. Scenarie 2 blev derfor opdelt i tre underscenerier: 2a) uden adgang til onshore-lager ved Havnsø, 2c) hvor al CO₂ føres til onshore-lageret og et mellemscenarie 2b) hvor der både er adgang til Havnsø-lageret og udskibning. I det internationale scenarie er medtaget en rørledning fra Sverige, og der regnes også her med en kombination af lagring i Havnsø og udskibning samt mulig indskibning. Der er ikke medtaget rørledning til Tyskland, da det forventes, at dette vil være et særskilt projekt mellem tyske punktkilder og Havnsø-lageret.

Fordelene ved klyngesamarbejdet i Hovedstaden er bl.a., at der kan anvendes større skibe ved et samlet system, at der kun er brug for en havn, at der kan etableres en fælles rørledning til et lager på Sjælland, at behovet for mellemlager bliver mindre, at fordråbningsanlæg og kompressorer kan deles, og at rørledninger kan erstatte lastbiltransport og dermed forhindre yderligere belastning af vejene. Endelig kan et klyngesamarbejde bidrage til fælles aftaler med slutlagerselskab, hvilket dog ikke er direkte medtaget i den kvantitative vurdering af scenarierne.

Der er en række store CO₂ punktkilder i Hovedstaden. Herudover er der på Sjælland store kilder omkring Kalundborg, Køge og Roskilde. I konkretiseringen af scenarierne forventes de årlige CO₂-mængder at variere fra 1,5 mio. ton i scenarie 1 op til 3 mio. ton i scenarie 2 og 5 mio. ton i scenarie 3, hvoraf 2 mio. ton stammer fra Sverige.

Infrastrukturen, der skal anvendes til et klyngesamarbejde, består af kompressorer og fordråbningsanlæg, som i visse tilfælde er en samlet enhed, mellemlagre ved havne og i scenarie 1 også ved fangstanlæggene, rørledninger til havne og til lager på Sjælland og selve havnene. Separate anlæg til rensning af CO₂ til endelig kvalitet er ikke medtaget i konkretisering af klyngesamarbejdet, men i forbindelse med fordråbning vil der ske en kvalitetsforbedring. For rørledninger er der forskellige muligheder for transport af CO₂ i forskellige faser. I konkretisering af scenarierne er antaget, at der vil være transport i gasfase i selve Hovedstaden, mens transport fra et punkt vest for København til Havnsø vil foregå i superkritisk fase, som kræver et tryk på omkring 100 bar. Kompression til denne trykforøgelse er ikke medtaget i kvantificeringen. Valg af fase for transport af CO₂ vil bl.a. afhænge af økonomisk optimering og resultaterne af risikovurderinger. Det er i denne konkretisering vurderet, at transport af CO₂ med rørledninger kan foregå med et acceptabelt sikkerhedsniveau, hvis tilstrækkelige tiltag indarbejdes i projektering og udførelse.

Havne for ind- og udskibning af CO₂ er vigtige for et klyngesamarbejde, da antallet af nødvendige havne og størrelsen af disse påvirker såvel omkostningerne til selve transportsystemet som skibsomkostningerne, da større skibe har betydeligt mindre enhedsomkostninger end små skibe, her vurderet til mellem 350 DKK/ton for små skibe og 250 DKK/ton for mellemstore skibe. Der er identificeret 9 mulige havne omkring Sjælland, og ud fra en vurdering af behov for dybgang er det vurderet, at det i Hovedstaden kun er Københavns Havns oliepier ved Prøvestenen, der egner

sig til ind- og udskibning af CO₂ med større skibe. Havnene ved Stignæs og i Kalundborg er også mulige som ind- og udskibningshavne.

Danmark er et af de få lande i Europa, hvor der er identificeret mulighed for onshore lagring af CO₂. Her er specielt de mulige lagre ved Havnsø og Stenlille aktuelle for direkte forbindelse fra Hovedstaden. Offshore-lagre som projekt Greensand og Bifrost er aktuelle for udskibning fra Hovedstaden i konkurrence med andre lagre omkring Nordsøen. Der pågår p.t. modningsarbejde for de mulige onshore-lagre ved Havnsø og Stenlille, og i konkretisering af scenarierne er det vurderet, at Havnsø kan være relevant for op til 300 millioner ton CO₂ med en årlig lagring på op mod 10 millioner ton.

Investeringerne i et klyngesamarbejde er vurderet til at være i størrelsesordenen 2,5 mia. DKK i scenarie 1, hvoraf hovedparten går til fordråbning, 4 mia. DKK i scenarie 2 med omkring halvdelen til fordråbning og/eller kompression og 5,5 mia. DKK for scenarie 3, hvor rørledninger udgør den største post. Vurdering af investeringerne er baseret på overslagsmæssige enhedsomkostninger og bør kvalificeres ved projektmodning i et feasibility- eller konceptstudie. I disse beregninger er medtaget 2x100% backup for mekaniske anlæg med roterende udstyr i scenarie 1 med mindre enheder og 3x50% i de øvrige scenarier, som også er forbundne med rørledninger. Hvis der også i scenarie 1 anvendes 3x50%, bliver investeringen ca. 2,2 mia. DKK i scenarie 1.

De gennemsnitlige totalomkostninger er vurderet baseret på investeringer og driftsomkostninger og en brug af anlæg på 25 år fra 2026 til 2050. Der er anvendt en kommerciel realrente på 8 % p.a. Baseret på dette vurderes de samlede transportomkostninger inkl. kompression af fordråbning til at være i størrelsesordenen 300 DKK/ton i scenarie 1, 200-250 DKK/ton i scenarie 2 og 160 DKK i scenarie 3. Det er bl.a. stordriftsfordele ved de større mængder i scenarierne 2 og 3, der medvirker til forskellene. Hvis der anvendes samme backup i Scenarie 1 som i de øvrige scenarier bliver gennemsnitlige omkostninger også i størrelsesordenen 250 DKK/ton som i Scenarie 2a.

De samlede omkostninger til transport vil hertil omfatte lastbiltransport i scenarie 1 og skibstransport i scenarie 1, 2a, 2b og 3, hvis CO₂ skal lagres i Nordsøen eller Island. Hermed vil den samlede omkostning blive mellem 700 DKK/ton i scenarie 1, da der antages, at der anvendes små skibe, til 400 DKK/ton i scenarie 3. For transport til onshore lager ved Havnsø i scenarie 2 og 3 vil omkostningerne være mellem 160 og 230 DKK/ton.

Ovennævnte omkostninger er konservative, da der er regnet med en høj forrentning og indregnet redundans i de tekniske løsninger. Nærværende konkretisering af scenarierne er baseret på enhedsomkostninger uden teknisk feasibility-studie. Det anbefales derfor, at der sker en modning af scenarierne for at indsnævre usikkerheden.

Gennemsnitlige omkostninger er ikke altid det mest relevante for et klyngesamarbejde, da for høje omkostninger kan betyde, at lagring fra visse kilder ikke vil være rentabel, mens dette kunne være tilfældet, hvis kun marginalomkostningerne skal betales. Tilsvarende kan gennemsnitsomkostninger være så høje, at det for visse kilder vil være optimalt at anvende eget anlæg og ikke medvirke i et klyngesamarbejde. Disse forhold bør indgå i en analyse af tarifystemer.

2. INTRODUKTION TIL SCENARIER OG TILGANG

Hovedstadens klyngesamarbejde har beskrevet tre scenarier, som er grundlaget for denne konkretisering:

- Scenarie 1: Peer-to-peer med optimeret kapacitet
- Scenarie 2: Fælles planlægning og offentlige krav om tredjepartsadgang
- Scenarie 3: Hovedstaden er hub for Nordeuropas CO₂-transport

Denne konkretisering søger at fastsætte, hvor store CO₂-mængder, hvor lange rør, antallet af udskibningssteder, mængden af mellemlagring, fordråbning m.v., der er behov for. Dette sker uden at udarbejde konkret layout for infrastruktur, linjeføring af rørledninger m.v. På et senere tidspunkt er der behov for egentlige feasibility-studier. Konkretisering er baseret på in-house viden og offentligt tilgængelige studier. Det er væsentligt for scenarierne, om der indgår et CO₂-lager ved Havnsø vest for Holbæk. Hvis det er muligt at lagre CO₂ i et CO₂-lager på land, kan omkostninger til fordråbning og mellemlager reduceres. Omvendt er fordråbning og mellemlager omdrejningspunktet i et klyngesamarbejde, hvis der ikke kan lagres CO₂ i undergrunden under Sjælland. Det er i dag usikkert, om og hvornår det bliver muligt at lagre CO₂ under Sjælland, og det skal således afklares hurtigst muligt for at vælge scenarie for CO₂-transport i hovedstaden.

Formålet med klyngesamarbejde er at udnytte stordriftsfordele ved et samlet system, hvor omkostningerne er lavere end ved individuelle løsninger. Elementerne, hvor der er stordriftsfordele, er identificeret og analyseret.

CO₂-mængderne årligt samt den sæsonmæssige produktion af CO₂ er vigtige for konkretisering af scenarierne. Ved klyngesamarbejde kan det muligvis være muligt at udjævne den samlede transport og lagring af CO₂ og dermed opnå klyngefordele.

Lokalisering af CO₂-fangsten i forhold til evt. udskibning eller transport med rørledninger er elementer, som indgår i afgrænsning af klyngesamarbejdet og de enkelte aktørers interesse i at deltage i samarbejdet. Ud over deltagerne i klyngesamarbejdet vil der i scenarie 3 være import eller eksport af CO₂, hvor de tekniske installationer for klyngesamarbejdet kan anvendes.

Anlæg for udskibning eller slutlagring er baseret på tilgængelig information om havnefaciliteter i Hovedstaden samt naboregioner. Fordele og ulemper ved et samarbejde, der kun dækker hovedstaden og et større net, der også medtager resten af Sjælland, herunder adgang til onshore lagring, er medtaget i analysen.

Transport af store mængder CO₂ på lastbil er vurderet, da dette er nødvendigt i de punktkilder i scenarie 1, som ikke er placeret ved en havn.

Såfremt CO₂ skal transporteres til slutlagring med skib til Norge, UK, den danske del af Nordsøen eller Island, er der behov for nedkøling af CO₂. Der er forskellige forventninger om, hvilke tryk- og temperaturforhold der bliver praksis i fremtiden.

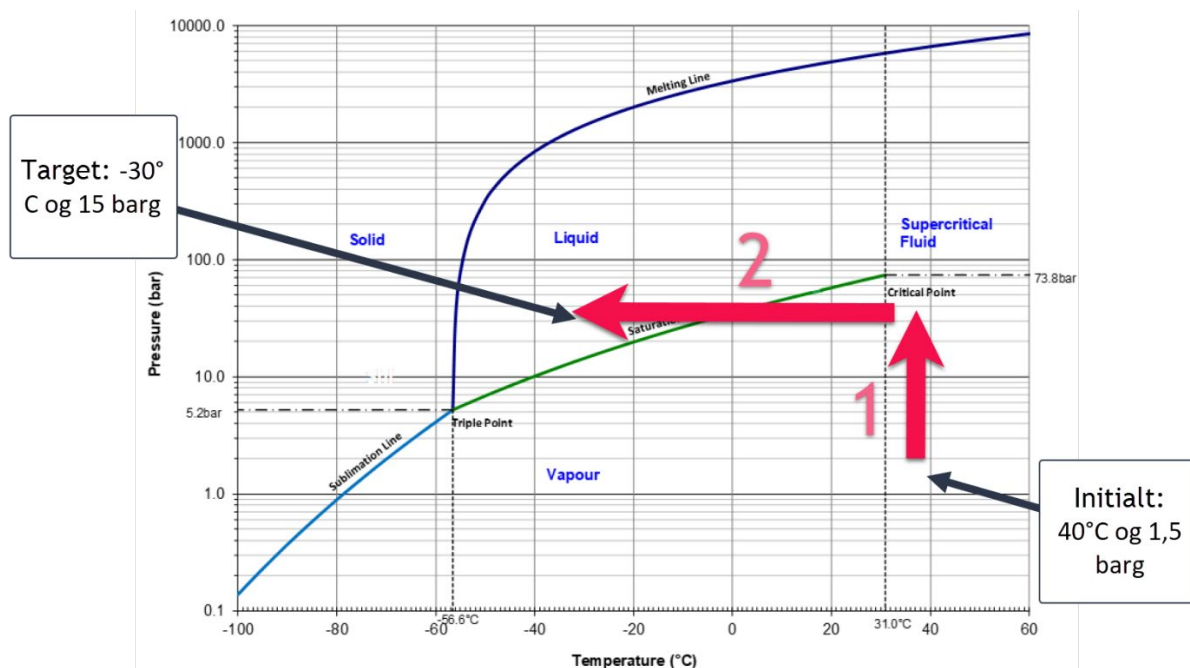
Et af de store spørgsmål ved infrastrukturløsning er placeringen af anlæg for nedkøling, da dette også vil påvirke, hvilken fase CO₂ skal transporteres i. Forskellige aktører har egne præferencer for at placere fordråbningen på egne anlæg i sammenhæng med CO₂-fangst eller et fælles anlæg i forbindelse med udskibningen. Dette valg vil igen påvirke, hvilken fase CO₂ mest optimalt kan transporteres i og evt. behov for flere rørledninger med forskellige faser.

CO₂ kan transporteres i rørledninger i forskellige faser:

- Gas
- Væske, hvilket kræver nedkøling
- Superkritisk (dense) fase, hvilket kræver et højt tryk over 80 bar

Den enkleste transportmæssige rørledningsløsning er transport i gasfase. Væskefase vil kræve isolerede rørledninger og er specielt velegnet som korte rørledninger fra fordråbningsanlæg i forbindelse med CO₂-fangst eller fra opsamlingspunkt for CO₂ leveret på lastbil, da man dermed undgår energispildet ved at skulle opvarme og derefter nedkøle igen. Transport i superkritisk fase er specielt velegnet for transport af store mængder CO₂ over længere afstande og kan derfor på sigt blive relevant i scenarie 3, hvis klyngen indgår i et Nordeuropæisk samarbejde.

Ved endt CO₂-fangst vil CO₂ være på gasform ved ca. 40°C og 1,5-2 barg. Hvis volumen skal transporteres på lastbiler fra decentrale CO₂-punktkilder, skal den konverteres på væskeform, fx ved -30°C og 15 barg. Dette indebærer kompression og fordråbning (nedkøling). Processen vises på fasediagrammet på Figur 1 for ren CO₂. Gassen er i første omgang komprimeret til et tryk som svarer til det endelige tryk (typisk lidt over for at kompensere for tryktab under fordråbning) – ikon 1 på Figur 1. Derefter køles volumen ned, indtil den når den tiltænkte temperatur – ikon 2 på Figur 1.



Figur 1: Fordråbning af CO₂, fra CO₂ fangstbetingelser til typiske tryk- og temperaturforhold til lastbiltransport

Kompression er dermed en indbygget del af fordråbningsprocessen, hvis gassen, som skal fordråbes, er ved lavere tryk end tilsigtet (og ligger under den grønne linje på Figur 1, hvor grænsen mellem gas og væske ligger i temperaturintervallet -56,6°C og 31,0°C). Ved "fordråbning" menes herefter også kompressionsdelen af fordråbningsprocessen.

Der er forskellige risici ved transport af CO₂ i forskellige faser. Dette er beskrevet som del af vurdering af mulighed for anlæg af rørledninger i hovedstadsområdet.

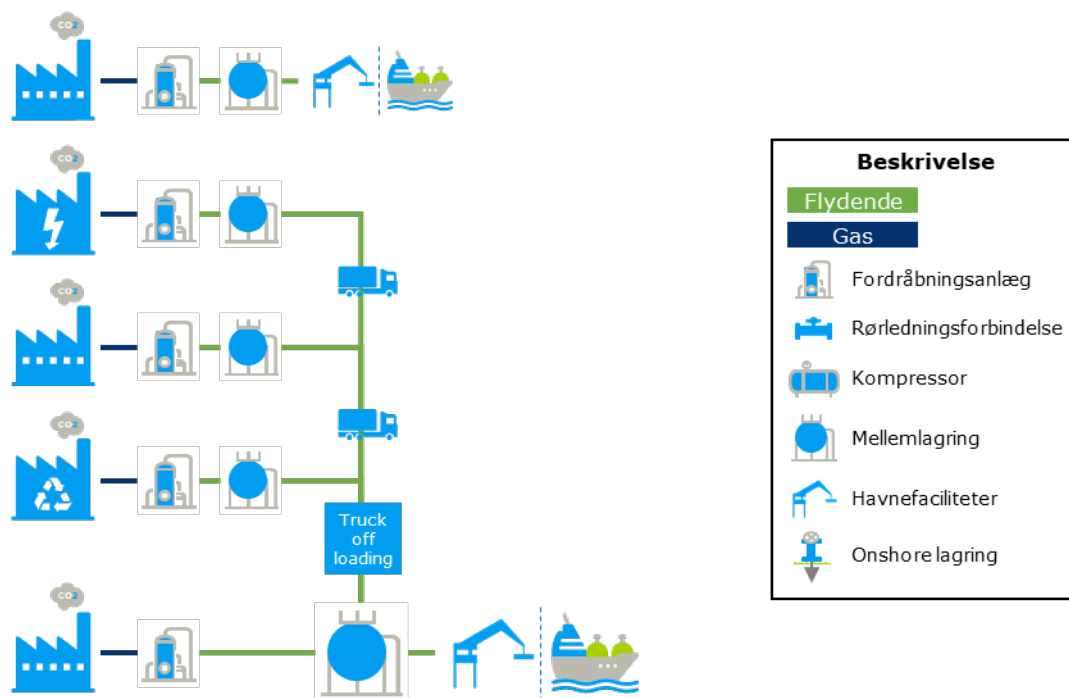
3. BESKRIVELSE AF SCENARIER

3.1 Scenarie 1: Peer-to-peer med optimeret kapacitet

Scenariet bygger videre på den nuværende politik. CCS-projekter vil blive udbudt af regeringen som enkeltstående projekter, ét ad gangen, på tværs af landet. Ligeledes vil negative emissioner håndteres via udbud eller omvendte auktioner.

Udbygningen af CCS-infrastruktur etableres på baggrund af aftaler mellem enkelte aktører på baggrund af deres selvstændige økonomiske interesser.

Dette scenarie er specielt oplagt, hvor CO₂-fangst foregår på anlæg tæt på udskibningsmuligheder, og hvor man ønsker kontrol over kvalitet og oprindelse af CO₂, f.eks. sikring at der er tale om biogent CO₂. Ved dette scenarie er der en risiko for, at mindre CO₂-kilder ikke kan få adgang til infrastruktur, og CO₂-fangst derfor må opgives fra disse kilder.



Figur 2: Oversigt over infrastruktur og flow i Scenarie 1

3.2 Scenarie 2: Fælles planlægning og offentlige krav om tredjepartsadgang

I scenarie 2 antages det, at de relevante aktører planlægger linjeføring, dimensionering og taksstruktur, så det understøtter parternes forventninger om CO₂-fangst fremadrettet. Der etableres således en fælles infrastruktur.

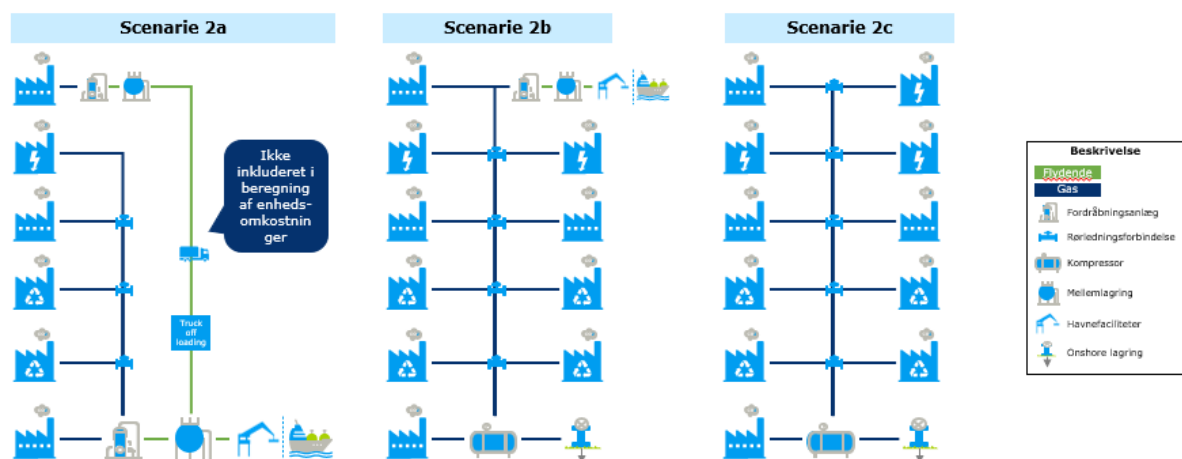
Rørejere etablerer rørinfrastrukturen i takt med, at der er behov, men planlægger til fuld kapacitet. Risiko fordeles efter aftalt fordelingsnøgle, og der gives mulighed for offentlige tredjepartsadgang til nettet, hvis der er plads.

Ejeren af infrastruktur kan potentielt være lageroperatør, samarbejde mellem interessenter eller staten, som også sikrer nødvendig regulering.

Dette scenarie er mest oplagt, hvis der er stordriftsfordele ved transport, fordråbning og udskibning af CO₂. Scenariet vil give mulighed for, at mindre kilder af CO₂ kan indsamles, selv om de er placeret i en vis afstand fra udskibnings-/lagerfaciliteter. Ud over kravet til tredjepartsadgang skal principper for tariffer for anvendelse af systemet overvejes, da ensartede tariffer kan betyde, at anlæg med høje omkostninger ikke bliver tilsluttet, selv om de kunne betale mere end marginalomkostningerne.

Scenarie 2 opdeles i tre underscenarier, Scenarie 2a, hvor punktkilder i Hovedstaden forbindes med rørledninger og udskibes fra en fælles havnefacilitet, og Scenarie 2b hvor punktkilderne ligeledes forbindes med rørledninger, men hvor en væsentlig del af CO₂-mængderne transporteres til et onshore lager i Havnsø/Stenlille og resten udskibes, og Scenarie 2c hvor der ikke er udskibning, men kun transport til Havnsø/Stenlille.

For transport til Havnsø er der antaget en kompressor vest for Hovedstaden med henblik på at øge trykket til ca. 100-110 bar, som muliggør transport i superkritisk fase, hvilket også vil være en fordel for selve lagringen. Omkostningerne til denne kompressor henføres til lageret, ligesom andre lager- og PtX-specifikke omkostninger ikke indgår. I de følgende beregninger er kompressoren dog medtaget, men udskilt fra de andre omkostninger i klyngesamarbejdet. Det skyldes, at den skal placeres i forbindelse med infrastrukturen for at opnå synergi til fjernvarmenettet, men at den ikke skal ejes og drives af rørejeren.



Figur 3: Oversigt over infrastruktur og flow i scenarie 2a, 2b og 2c

Små CO₂-kilder, der ikke er tilsluttet med rørinfrastruktur, kan aflevere CO₂ med lastbil ved havneterminalerne. I scenarie 2c er det omkostningstungt at tilslutte små kilder uden rørinfrastruktur, da deres CO₂ skal gøres flydende, transporteres på lastbil, ændres tilbage til gasform og så injiceres i gasrørnettet.

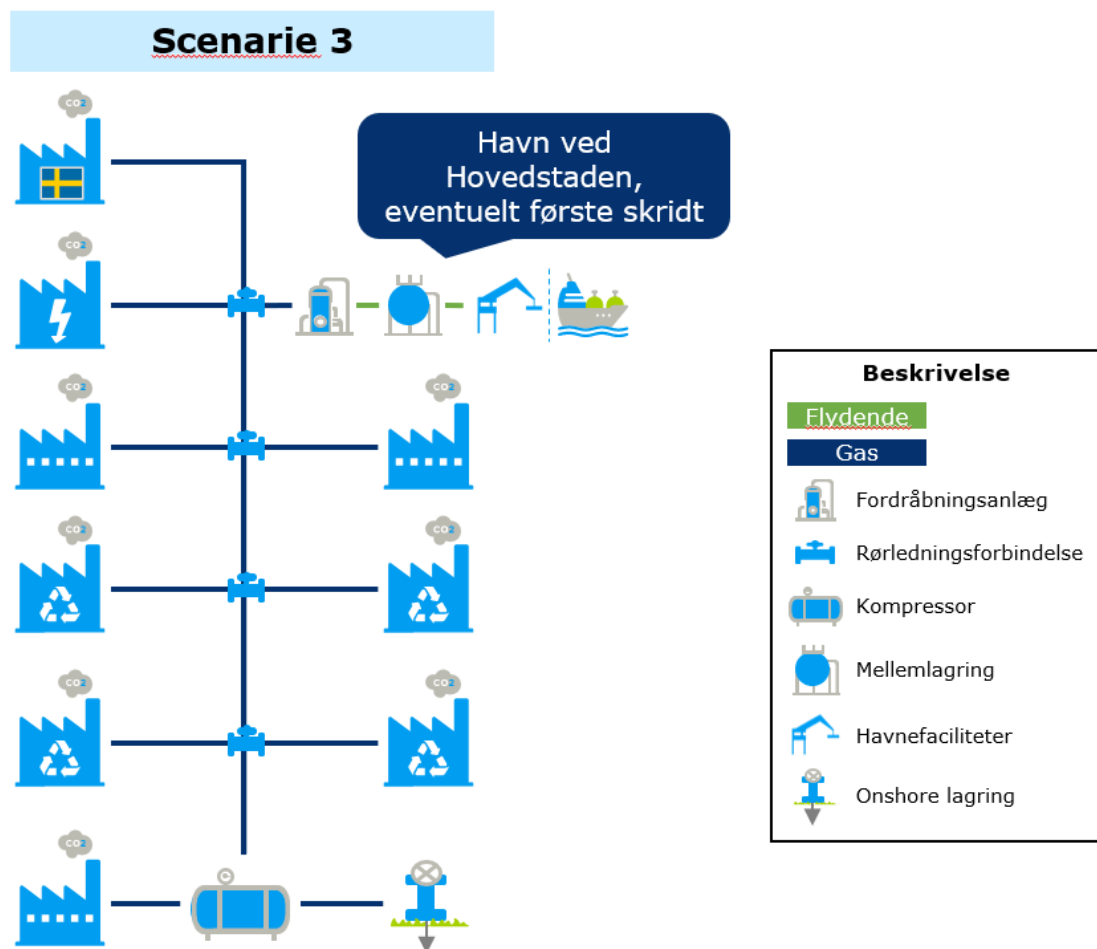
3.3 Scenarie 3: Hovedstaden er hub for Nordeuropas CO₂-transport

For scenarie 3 antages det, at der træffes en strategisk beslutning om, at der skal etableres international CO₂-hub på Sjælland, og at Hovedstaden skal søge om at være Nordeuropas CO₂-hub. CO₂-infrastruktur etableres som offentlig infrastruktur med lige adgang for alle, uanset størrelse. Infrastrukturen etableres med god kapacitet og med potentiel tilslutning (rørledning) til/fra Sverige, Jylland og/eller Tyskland. Det antages, at der indledningsvis vil etableres rørledning til/fra Sverige. Komprimering i Sverige er ikke medtaget i beregningerne af investeringer og enhedsomkostninger.

En CO₂-hub fjerner risici og omkostninger, giver mulighed for konsolidering og fleksibel adgang til CO₂.

Et Nordeuropæisk samarbejde kan være relevant, hvis der f.eks. kan etableres direkte rørledningsforbindelse til CO₂-lagre, eller hvis udviklingen går i retning af store skibe til transport af CO₂ i store mængder eller opsamling til transport i store rørledninger direkte til slutlagring. Det er ikke nødvendigvis hovedstaden, der skal være hub for en sådan infrastruktur på Sjælland, men hvis CO₂-infrastrukturen udvikles tidligt i hovedstaden, kan denne anvendes som en del af et internationalt netværk. Et sådant netværk kan etableres trinvist med forbindelse fra Sydsverige som et første skridt.

I scenarie 3 antages ligesom i scenarie 2b og 2c, at der etableres en rørledning fra hovedstaden til onshore-lagret i Havnsø/Stenlille.



Figur 4: Oversigt over infrastruktur og flow i scenarie 3

3.4 Oversigt over scenarierne

Tabel 1: Konkretisering af scenarier – mængder

	Scenarie 1	Scenarie 2			Scenarie 3
		2a	2b	2c	
Lagring ved Havnsø?	✗	✗	✓	✓	✓
Ton CO ₂ /år fra punktkilder i hovedstaden (kton)	1500	2500	3000	3000	3000
Import fra Sverige					2000
- Heraf til Havnsø			2000	3000	4000
- Heraf udskibning fra hovedstaden	1500	2500	1000	0	1000
Antal punktkilder	5	5-10	5-15	5-15	5-15
Import					Sverige via rørledning
Rørledning (km)		40	120	120	170
Mellemlagre	5	1	1	0	1
Havnefaciliteter	2	1	1	0	1

4. FORDELE VED KLYNGESAMARBEJDE

Der er en række tekniske fordele ved at etablere et fælles klyngesamarbejde for CO₂-transport frem for at etablere individuelle og uafhængige peer-to-peer-aftaler. I beskrivelsen af fordele antages det, at der ikke vil være behov for separate transportanlæg for fossil og biogen CO₂.

4.1 Anvendelse af større skibe som reducerer transportomkostninger

Anvendelsen af større skibe til CO₂-transport vil medvirke til at reducere omkostningerne til den samlede transportkæde.

CO₂-branchen er stadig i sin start, og der er derfor endnu ikke etableret en standard for skibsstørrelser, og der er få skibe under bygning. Det forventes, at den største relative besparelse vil være at øge fra ca. 7.500 m³ til 22.550 m³ skibsstørrelse. Det er muligt, at der senere kan komme endnu større skibe.

4.2 Fælles rørledning til lager på Sjælland – Havnsø/Stenlille

Hovedstaden kan have fordel af beliggenhed relativt tæt på potentielle slutlagre for CO₂ i Havnsø og/eller Stenlille, ligesom der er andre potentielle lagre i området. Der foregår p.t. seismiske undersøgelser af reservoiret ved Havnsø, og der planlægges prøveinjektion af CO₂ i Stenlille. Desuden er der igangsat en strategisk miljøvurdering af de mulige lagre. Afhængig af forløbet af de forskellige initiativer vil der være mulighed for lagring inden for den forventede tidsramme.

4.3 Aftaler med slutlagerselskab

Et klyngesamarbejde kan gøre det billigere at indgå aftaler med slutlagerselskaber, da variationer i mængder m.v. kan udjævnes. Der er desuden mulighed for, at man ved fællesaftaler i klyngen vil have øget forhandlingskraft og potentielt vil kunne opnå bedre priser på baggrund af dette.

4.4 Havneanlæg til udskibning kan deles – kun brug for én havn

Deling af havneanlæg til udskibning betyder, at der kun er behov for etablering af én havn, hvilket reducerer omkostninger til både anlæg og drift. Samling af CO₂-udskibning ved en havn giver også skala, der muliggør brugen af større skibe med kapacitet op mod 22.500 m³.

4.5 Mellemlager vil følge skibsstørrelse og lastbiltransport

Mellemlagret for CO₂ før udskibning vil følge skibsstørrelsen, da der mindst skal være lager til en skibslast med tillæg af usikkerhed for logistikken ved ankomst af skibe. Dermed vil forøgelse af mængder ikke nødvendigvis betyde øgede behov for mellemlager.

I scenarie 1 forudsættes transport med lastbil fra tre punktkilder til to havne. Der vil derfor være behov for mellemlager ved disse punktkilder. Størrelsen af dette mellemlager vil afhænge af logistikken. Som et skøn regnes med tre dages produktion svarende til 5000 m³ mellemlager.

4.6 Fordråbningsanlæg kan reduceres, da der er stordriftsfordele og mindre behov for redundans end ved uafhængige anlæg

Fodråbningsanlæg til nedkøling af CO₂ til væskefase er en af de mest omkostningstunge elementer af CO₂-kæden. Da der er tale om mekaniske anlæg, er der typisk stordriftsfordele. For komplekse mekaniske anlæg er der behov for at kunne tage anlæg ud af drift for vedligehold eller reparation. Ved klyngesamarbejde kan denne redundans deles.

4.7 Rørledninger erstatter lastbiltransport

Rørledningstransport er velegnet til transport af store mængder CO₂ i stedet for brug af lastbiler såvel af økonomiske årsager som af hensyn til påvirkning af den generelle trafiksituation specielt i Hovedstadsregionen, hvor der i forvejen er stor trafikbelastning og lav fremkommelighed.

Meromkostningerne ved at forøge rørdimensioner er forholdsvis lave, og der er derfor markante stordriftsfordele ved rørledningstransport.

Klyngesamarbejde kan være afgørende for, at der kan samles tilstrækkelige mængder CO₂ til, at det bliver økonomisk rentabelt at etablere rørledningstransport til onshore-lager på Sjælland, f.eks. Stenlille og Havnsø.

4.8 Oprensning af CO₂ – kan evt. ske på fælles anlæg

Oprensning af CO₂ til forskellige kvaliteter kan evt. ske på fælles anlæg. Det forventes dog, at brugere af CO₂ til PtX-anlæg selv vil være ansvarlige for den ekstra rensning af CO₂, der er nødvendig for sådanne anlæg.

5. FORVENTEDE MÆNGDER CO₂ FRA PUNKTKILDER PÅ SJÆLLAND

5.1 Store punktkilder på Sjælland

CO₂-punktkilder i Hovedstadsområdet samt resten af Østdanmark er vist i følgende skema, der både viser store punktkilder over 100 kton/år, samt punktkilder på 20-100 kton/år.

Det kan ses, at hovedparten af de store punktkilder er placeret i Hovedstadsregionen samt omkring Kalundborg, Køge og Roskilde i region Sjælland.

Tabel 2: Punktkilder på Sjælland

Oversigt over punktkilder på Sjælland			
Over 100 kton/år		20-100 kton/år	
Anlæg	Placering	Anlæg	Placering
Amagerværket Blok 4	København S	I/S REFA Affaldsforbrændings- anlæg, Ovn 3	Nykøbing F
Avedøreværket Blok 2	Hvidovre	SK Varme A/S - Slagelse Kraftvarmeværk	Slagelse
I/S Amager Ressourcecenter	København S	I/S AffaldPlus, Næstved Forbrænding	Næstved
Equinor Refining Denmark	Kalundborg	NLMK DanSteel	Frederiksværk
Avedøreværket Blok 1	Hvidovre	CP Kelco ApS	Lille Skensved
I/S Vestforbrænding, Anlæg 6	Glostrup	Hillerød Biokraftvarme	Hillerød
I/S Vestforbrænding, Anlæg 5	Glostrup	Masnedø Kraftvarmeværk	Vordingborg
Køge Kraftvarme Blok 8	Køge	Nordic Sugar, Nykøbing Sukkerfabrik	Nykøbing F
ARGO I/S, Anlæg 6	Roskilde	Østkraft ØKR6	Rønne
Asnæsværket Blok 6	Kalundborg	Ardagh Glass Holmegaard A/S	Holmegaard
ARGO I/S, Anlæg 5	Roskilde	Nordic Sugar, Nakskov Sukkerfabrik	Nakskov
Amagerværket Blok 1	København S	Lolland Varme A/S	Nakskov
I/S Norfors, Ovn 5	Hørsholm	Haldor Topsøe A/S	Frederikssund
Helsingør Kraftvarmeværk	Helsingør	NGF Nature Energy Køng	Lundby
Maribo-Sakskøbing Kraftvarme	Sakskøbing	Korsør Fjernvarmekedel	Korsør
I/S Norfors, Ovn 4	Hørsholm	Faxe Kalk Ovnanlægget Stubberup	Faxe
		Kalundborg Bioenergi	Kalundborg

5.2 Input fra spørgeskema til punktkilder og sæsonvariabilitet

Hovedstadens klyngesamarbejdet har gennemført en spørgeskemaundersøgelse for at kortlægge de aktuelle og fremtidige CO₂-emissioner. Der er modtaget besvarelser, der dækker de største

punktkilder i selve hovedstadsområdet og dele af Sjælland, mens der mangler nogle kilder på resten af Sjælland.

Resultatet af spørgeskemaundersøgelsen viser et udslip på op mod 6 mio. ton om året indtil 2030. Vi vurderer, at en vis del af dette vil blive brugt til PtX, ligesom det ikke er økonomisk at dimensionere fangstanlæg for kortvarige udslip. Derfor forudsættes at klyngesamarbejdet skal modtage op til 2 mio. ton fra hovedstaden og op til 1 mio. ton fra resten af Sjælland.

Spørgeskemaundersøgelsen viser en vis sæsonvariation for affaldsforbrænding, mens der er mindre variation for industrianlæg. For kraftvarmeanlæg antydes meget store variationer, men det er endnu uklart, hvordan de vil blive brugt i fremtiden. Ved klyngesamarbejde vil det være muligt at udjævne variationer. Baseret på besvarelserne vurderes de væsentligste kilder at have en timemaks. på 1,2 gang det gennemsnitlige udslip.

5.3 Import fra Sverige og Tyskland

Baseret på analysen af potentialet for import af CO₂ til Sjælland fra internationale kilder er det valgt at medtage import af 2 mio. ton CO₂ fra Sverige i scenarie 3.

Der er ikke medtaget import fra Tyskland, da det vurderes, at der ved import via rørledning til Havnsø vil blive etableret direkte rørledning mellem Tyskland og Havnsø. Dette skyldes, at CO₂ over så lange afstande transporteres i superkritisk tilstand. Hermed vil der være meget stort energitab hvis denne CO₂ skal blandes med CO₂, der løber i gasfase i de københavnske rør.

5.4 Forventede mængder på tværs af scenarier

Baseret på punktkildeanalyserne og spørgeskemaundersøgelsen arbejdes der videre med følgende CO₂-mængder i forhold til fordele ved klyngesamarbejdet gældende for perioden fra 2030-2035. Ind til 2030 vil der typisk være en vis indkøring, da der skal etableres fangstanlæg.

Tabel 3: Årlige CO₂-mængder i scenarierne

kton CO ₂ /år	Scenarie 1	Scenarie 2			Scenarie 3
		2a	2b	2c	
Hovedstaden	1500	2000	2000	2000	2000
Sjælland i øvrigt		500	1000	1000	1000
Import fra Sverige					2000
I alt	1500	2500	3000	3000	5000
Antal punktkilder i hovedstaden	5	5-10	5-15	5-15	5-15

Forskellene i de forskellige scenarier skyldes, at det forventes, at omkostningerne for transport af CO₂ vil være lavere i scenarie 2 end i scenarie 1, samt at rørledninger vil gøre det muligt at forbinde flere kilder. De høje omkostninger til transport af CO₂ i scenarie 1 og 2a vil således begrænse antallet og størrelsen af fangstanlæg.

Det forventes, at CO₂-mængderne vil være svagt faldende over de kommende år efter 2030 for de enkelte anlæg, som kan opvejes af tilslutning af nye anlæg samt eventuelt import.

For visse typer anlæg vil der være sæsonvariationer af CO₂-udslip. Det gælder specielt for kraftvarmeproduktion, mens der er mindre sæsonvariationer for affaldsforbrænding.

Industrianlæg har typisk ingen eller kun meget begrænsede sæsonvariationer. Samlet vurderes det, at den maksimale daglige produktion af CO₂ er omkring 20 % større end den gennemsnitlige produktion.

6. UNDERSTØTTENDE INFRASTRUKTUR RELATERET TIL CO₂-TRANSPORT

6.1 Oversigt over infrastruktur

I følgende tabel er givet en oversigt over infrastruktur, som er nødvendig i de forskellige scenarier. De enkelte elementer er beskrevet nedenfor.

Tabel 4: Kvantificering af scenarier med hensyn til kapacitet

	Scenarie 1	Scenarie 2			Scenarie 3a
		2a	2b	2c	
CO ₂ -mængde i alt (kton/år)	1500	2500	3000	3000	5000
Maks. (ton/time)	200	340	400	400	680
Backupfaktor	2,0	1,5	1,5		1,5
Kapacitet (ton/time)	400	510	600	600	1000
Kompression til 30 bar på Sjælland (ton/time)		510	600	600	600
Heraf fordråbning (ton/time)	400	510	200		200
Antal fordråbningsanlæg	5	1 ved havn	1 ved havn	0 direkte til Havnsø	1 ved havn
Størrelse af enheder (ton/time)	60	100	100		100
Heraf kompression til tæt fase til Havnsø (ton/time)			400	600	800
Antal kompressorstationer til Havnsø			1	1	1

6.1.1 Fordråbningsanlæg

Kapaciteten af fordråbningsanlæg er en af de afgørende omkostninger ved CO₂-transport. For de valgte scenarier er kapaciteten beregnet ud fra de årlige mængder, variation af produktion over året og backup af udstyr.

Maksimal timeproduktionen er skønnet til at være ca. 20 % højere end den gennemsnitlige produktion.

I scenarie 1, hvor fordråbningsanlæggene er fordelt på flere anlæg, regnes med, at der er fuld backup af anlæggene (2x100 %), da der er tale om mindre anlæg, og at der anlægges fordråbningsanlæg ved såvel de store og mellemstore kilder, i alt 5 placeringer. For de øvrige scenarier regnes med 50 % backup (3x50 %), da fordråbning placeres centralt med større enheder og er forbundne med rørledninger, hvilket også giver en vis redundans. Hermed vil der være en klyngefordel ved de integrerede scenarier. Herudover vil der være en stordriftsfordel. Redundans er medtaget af hensyn til den samlede værdikæde, der har store investeringer i fangstanlæg, skibe til transport samt injektion i lagrene. Behov for redundans skal afklares i feasibility- eller konceptstudier.

6.1.2 Mellemlagre

Mellemlagrene forventes udført som cryogene termisk isolerede tryktanke, som er tilpasset skibstransport og placeret ved udskibningshavnen. Derudover vil der i scenarie 1 være behov for transport med lastbil, og der vil således være behov for lagre ved punktkilderne, der ikke er placeret ved en udskibningshavn.

Størrelsen af mellemlagrene er valgt til 1,5 gange skibsstørrelsen.

6.1.3 Kompressorer

Ved brug af rørledninger vil der være behov for kompressorer ved punktkilderne, der er forbundet til nettet. Kapaciteten af kompressorer kan optimeres i forhold til fordråbningsanlæg. Kompressorerne skal mest hensigtsmæssigt placeres, så overskudsvarme kan bruges i fjernvarmeanlæg eller til varmeproduktion, der kan integreres i fangstprocessen.

For scenarie 2 og 3 skal der ved hver punktkilde etableres en kompressor, der sikrer ca. 30 bar tryk i rørledningerne. I scenarie 1 er også medtaget kompressorer som del af fordråbningsanlæg ved hver punktkilde, men prisen er inkluderet under "fordråbning". Forskellen mellem scenarie 1 og 2 er derfor kun, at der er en rørledning mellem kompressorer og fordråbning med et lille trykfald. De optimale løsninger med hensyn til trykniveau i de forskellige scenarier skal optimeres i modningsstudier. Der er regnet med 50 % backup for kompressorerne (3 x 50 %).

6.1.4 Rensning af CO₂

Det forventes at CO₂ modtages i samme kvalitet, som lagerselskaberne vil kræve. Evt. yderligere krav til rensning til PtX-anlæg forventes udført på disse anlæg. Der er således ikke medtaget investeringer til kvalitetsforbedring af CO₂. I forbindelse med fordråbning vil der dog ske en kvalitetsforbedring.

6.1.5 Kompressorer ved transport i rørledning til Havnsø

Det antages at transport i rørledning til Havnsø vil ske i tæt fase, og at der etableres en kompressor vest for København. Dermed kan evt. spildvarme fra kompressoren anvendes i fjernvarmesystemet. Da lageroperatøren har fordelen ved det høje tryk, er denne kompressor ikke medtaget i beregninger af omkostninger.

6.1.6 Redundans og backup

En af fordelene ved et klyngesamarbejde er, at det kan medvirke til redundans i den samlede værdikæde fra fangst til transport, mellemlagring, skibstransport m.v. For transportsystemet er de kritiske elementer fordråbning og kompressorer, som har roterende mekaniske dele. For sådanne dele er der tradition for at have en vis backup som f.eks. 2x100 % eller 3x50 % afhængig af størrelsen af de enkelte enheder og hensynet til enhedsomkostninger. For rørledninger til havneanlæg eller til slutlager er ikke medtaget redundans ud over den, som er indarbejdet i systemet i form af flere kilder. Her kunne etablering af ringforbindelser m.v. være elementer, som kunne overvejes i projektmodning.

7. HAVNE FOR IND- OG UDSKIBNING AF CO₂

Havne til ind- og udskibning af CO₂ er vigtige knudepunkter i CO₂ værdikæden, og antallet af havne i samarbejdet vil være en potentiel omkostningsfaktor.

Havnene vist på Figur 5 er identificeret som mulige knudepunkter i et CO₂ klyngesamarbejde omkring hovedstaden.



Figur 5: Oversigtskort over placering af mulige havne for CO₂ ind-/udskibning

Valget af havn(e) hænger sammen med størrelsen af skibe til CO₂-transport samt afstand til de væsentligste og/eller første punktkilder. CO₂ har en høj densitet, og der er behov for tryksatte tanke, hvilket gør, at CO₂-skibe har en stor dybgang i forhold til lasten.

På baggrund af tidligere projekter og input fra interessenter i værdikæden forventes følgende skibsstørrelser at være standard for CO₂-transport.

Tabel 5: Typiske CO₂-skibe

	Typiske CO ₂ -skibe				
Skib	Kapacitet (m ³ CO ₂)	Kapacitet (ton)	Længde (m)	Bredde (m)	Dybgang (m)
Northern Light	7.500	8.250	130	15	6
CO ₂ carrier, lille	12.500	13.750	150	20	9,5
CO ₂ carrier, mellem	22.500	24.750	180	30	10

På længere sigt kan der blive tale om endnu større skibe i størrelsen op til 50.000 m³.

Størrelsen på skibene vil sætte naturlige begrænsninger for, hvilke af de ovenstående havne der vil være relevante at anvende. Da der initialt udelukkende bygges skibe til definerede projekter med lange kontrakter, optimeres skibene til projekterne. De tidlige projekter kan skabe standarder for hvordan CO₂-skibe generelt designes. På længere sigt, kan man forestille sig et så

vel etableret marked at et udvalg af skibe vil være tilgængeligt i forskellige størrelser og som kan chartres på kortere og længere kontrakter. Her giver en havn med dybgang mulighed for at anvende flere skibsstørrelser og dermed indpasse sig efter den mest på optimale skibsstørrelse på et givet tidspunkt.

Ud over havnenes individuelle kapacitet vil man være begrænset af dybgang, tilsejlingsforhold, kajlængde mv.

Herunder følger en liste over de mulige havne på Sjælland og omegn for at understrege forskellen muligheder for anvendelse af forskellige skibe¹:

Tabel 6: Oversigt over mulige havne på Sjælland og omegn

Oversigt over mulige havne på Sjælland og omegn						
Havn	Vand-dybde (m)	Bredde, indsejling (m)	Kajlængde (m)	Største skib (L X B, m)	Tilladelig dybgang (m)	Muligt skib (m ³)
Stignæsværkets Havn	18,0		310	290 x 45	16,2	22.500
Kalundborg Havn	15,0	100	285	240 x 35	13,5	22.500
København, Prøvestenen ² Oliepier	10,5 ³	140	250	275 x 45	9,5 11,4	12.500 22.500
Vordingborg Havn	10,4	67	550	200 x 35	9,4	12.500
Malmø Havn	13,5 ³	160	325	250 x 45	12,5	22.500
Køge Havn	9,5	80	600	230 x 32	8,5	7.500
Rødby Tunnelhavn	9,5	150			8,5	7.500
Avedøreværkets Havn	7,0	55	270	125 x 21	6,3	7.500
Frederiksværk Stålv. Havn	6,0	42	300	130 x 20	5,4	< 7.500

Konklusionen er, at det i hovedstaden kun er Prøvestenens oliepier, der egner sig til ind- og udskibning af CO₂ med større skibe. Dog kan der opstå begrænsninger, hvis skibenes størrelse eller dybgang stiger. Desuden er det forbundet med omkostninger for skibe fra Østersøen, hvis de skal sejle rundt om Sjælland. Havnene ved Stignæs og i Kalundborg er derfor også mulige som ind- og udskibningshavne. Det forventes, at de første fangstanlæg vil blive placeret i hovedstaden, hvorfor det også er mest oplagt at anvende Prøvestenen som fælles ind- og udskibningshavn til CO₂. Det skyldes, at der ikke kan forventes samtidighed i anlægget af CO₂-fangstanlæg og hermed, at man med fordel kan sikre sig, at de første rørledninger, der etableres, bliver så korte som muligt.

¹ Oplysninger om største skibe stammer fra "Den danske Havnelods"

² Der er angivet dybgang for selve havnen og for oliepier

³ Ved besejling fra syd er Drogden en begrænsning

7.1 Omkostninger til skibstransport relativt til størrelsen på skibet

Udvælgelse af havn er afgørende, da størrelsen af skibene er en vigtig faktor i at drive lavere transportomkostninger – der er mindre transportomkostninger per ton ved større skibe.

Ud over størrelsen vil omkostningerne til skibstransport af CO₂ vil også afhænge af valg af brændsel, krav til injektion fra skibene til offshore-installationer, krav til dynamisk positionering m.v.

I det følgende er angivet typiske transportomkostninger fra hovedstaden til lagring i Island, Norge og UK. Selv om dette indgår direkte i omkostningerne for hovedstadens CO₂-scenarier, kan det være afgørende for valg af scenarie.

Tabel 7: Transportomkostninger, skib på tværs af størrelser

Transportomkostninger, skib på tværs af størrelser			
Kapacitet	7.500 m ³	12.500 m ³	22.500 m ³
Skibstransport (DKK/ton)	350	300	250

Omkostningerne til skibstransport er behæftet med stor usikkerhed, og information fra visse selskaber indikerer, at omkostningerne for små skibe er op til 500 DKK/ton.

8. MULIGHEDER FOR LAGRING OG ANVENDELSE AF CO₂

8.1 Lagring af CO₂ – muligheder tæt på hovedstaden

Danmark er et af de få lande i Europa, hvor der er identificeret mulighed for onshore lagring af CO₂. Dette vurderes til at være betydeligt billigere end transport til offshore-lagre i den danske del af Nordsøen (Greensand, Bifrost), i Norge eller UK eller til onshore-lagre i f.eks. Island. Ud over selve skibstransporten er det billigere at udvikle onshore-lagre.

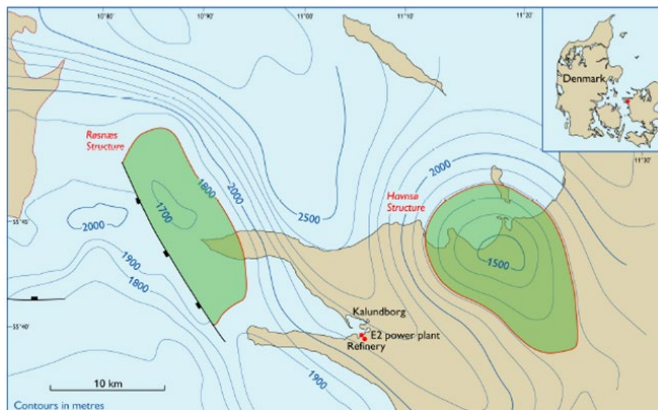
For CO₂-klyngen omkring hovedstaden er det specielt onshore-lagre øst for Storebælt, som er interessante. Ifølge GEUS-rapport om CO₂-lagerpotentialet i Danmark⁴ er følgende lagre en mulighed tæt på hovedstaden: Havnsø, Rødby og Røsnæs. Hertil kommer Stenlille gaslager, hvor der er planlagt forsøg med lagring af CO₂ i størrelsen 2,5 mio. ton. Her vil der muligvis være yderligere lagermuligheder i dybereliggende lag. I forhold til hovedstaden vurderes Stenlille og Havnsø at være de mest relevante.

Tabel 8: Relevante lagre på Sjælland/øst for Storebælt

Relevante lagre på Sjælland/øst for Storebælt				
Lager	Placering	Relevant for hovedstaden	Størrelse P50 - mton	Skøn over årlig lagring (mton/år)
Havnsø	Vest for Holbæk	2025	294	10
Rødby	Rødby		335	10
Røsnæs	Storebælt nearshore	På langt sigt – ikke med i miljøscreening	412	15
Stenlille	Stenlille	2025	Testanlæg 2,5 mio. + mulighed for større mængder i andre lag	0,5

Der gennemføres for tiden geofysiske undersøgelser af Havnsø-strukturen, og Gas Storage Denmark har igangsat arbejde med modning af Stenlille til et testanlæg på i alt 2,5 mio. ton CO₂. Vestforbrænding, Gas Storage Denmark og Evida har igangsat studier af en rørledning mellem Vestforbrænding og Stenlille. Herudover er der igangsat strategiske miljøvurderinger af onshore CO₂-lagre.

⁴ Capture, Storage and Use of CO₂ (CCUS) Evaluation of the CO₂ storage potential in Denmark Rapport 2020/46



Figur 6: Kort over potentielle lagre ved Havnsø og Røsnæs⁵

Der vil samlet være tilstrækkelig lagerkapacitet til import af betydelige mængder CO₂ ud over lagring af mængderne fra hovedstaden og Sjælland m.v. Derfor er det interessant at kombinere en CO₂-klynge omkring hovedstaden med import af CO₂ til lagring onshore i f.eks. Havnsø.

Transport af CO₂ til Havnsø fra hovedstaden vil have betydning for dimensionering af rørledningerne i klyngesamarbejde scenario 2 og 3. Vi antager, at der i scenario 2b og 3 vil være rørledning fra hovedstaden til Havnsø.

Hvis f.eks. Havnsø bliver udviklet som lager inden for en kort årrække, kan det gøre udskibning af CO₂ overflødig, og evt. investeringer i fordråbningsanlæg kan blive overflødige. Det vil derfor være vigtigt at få en hurtig afklaring om udvikling af Havnsø er mulig.

Tabel 9: Onshore-lager på Sjælland i scenarierne

Forventninger til lagring	Scenarie 1	Scenarie 2			Scenarie 3
		2a	2b	2c	
Anvendes onshore-lager på Sjælland?	✗	✗	✓	✓	✓

8.2 CCUS-anlæg tæt på hovedstaden

Brug af CO₂ til PtX-anlæg kan erstatte transport til CO₂-lagre. Der er identificeret en række projekter for PtX, som kan være relevante i forhold til anvendelse af CO₂ til PtX-produktion.

De fleste danske PtX-anlæg er placeret i Jylland, da elprisen typisk har været lavere vest for Storebælt end øst for Storebælt. Situationen i 2022 har dog vist, at der kan være ændringer i dette billede i takt med, at priserne i Vestdanmark bliver trukket op af priserne på kontinentet og vandkraft i Syd norge.

De væsentligste anlæg, som kan have indflydelse på udvikling af klyngesamarbejdet i hovedstaden, er:

- Avedøre – Ørsted – "Green Fuel for Denmark"
- Vordingborg – Arcadia

Derudover skønner vi også, at der kan være muligheder omkring Kalundborg i forbindelse med raffinaderiet, samt omkring kraftværker, større industri og havne.

PtX-anlæg i hovedstaden kan potentielt reducere CO₂-mængden til lagring, men det skønnes, at der på lang sigt vil være tale om en mindre andel af de samlede CO₂-mængder i området.

9. TRANSPORT AF CO₂

9.1 Lastbiltransport af CO₂

Transport af CO₂ på lastbil er muligt og vil være den foretrukne transport for mindre mængder. Specifikt vil omkostningerne ved transport af CO₂ på lastbil være i størrelsesordenen 50-100 DKK/ton for en strækning på 15 hhv. 50 km. Herudover vil lastbiltransport kræve omkostninger til lokal fordråbning og lager ved CO₂-fangstlageret til ca. tre dages produktion.

I hovedstadsområdet vil lastbiltransport bliver påvirket af den allerede eksisterende trængsel specielt i hovedstaden, hvor nogle af de store CO₂-kilder er placeret.

Tabel 10: Lastbiltransport til CO₂

Lastbiltransport til CO ₂	Scenarie 1	Scenarie 2			Scenarie 3
		2a	2b	2c	
Anvendes lastbiltransport?	✓	(✓)	✗	✗	✗
Estimeret mængde ton CO ₂ /år	500.000	100.000			
Afstand – km gennemsnit	50	50			

Lastbiltransport vil skulle foregå på veje i hovedstaden, som i forvejen er præget af stor trængsel. Derfor vil der være skjulte omkostninger for samfundet ved vejtransport i form af forsinkelser i trafikken eller behov for udvidelse af vejsystemerne.

9.2 Rørledningstransport

9.2.1 CO₂-rørledninger principper

Transport af CO₂ i rørledninger kan ske i forskellige faser som funktion af tryk og temperatur.

- Gasfase ved f.eks. 30 bar. Transporten er robust over for tryk og temperatur. Rørledningerne kan udføres som almindelige gasrørledninger, og evt. kunne eksisterende rørledninger anvendes. Ved afkøling under -5 C vil der ske væskeudslag/faseskift. Der vil ved 30 barg være nogle forhold omkring nedgravning og/eller isolering også (i hvert fald over jord)
- Væske nedkølet og forholdsvis lavt tryk under samme forhold som ved transport på lastbil eller i skib. Kræver isolerede rørledninger og sikring af konstant nedkøling, evt. med returrørledning eller genfordråbningsanlæg som på skibe.
- Superkritisk/tæt fase med højt tryk over ca. 80 bar, men almindelige temperaturer, hvor CO₂ skifter fase til tæt fase. Denne fase er robust over for temperaturændringer f.eks. -10 til 40 grader.

Brugen af rørledninger til transport af CO₂ i de forskellige faser kan kombineres.

Tabel 11: Transport af CO₂ i rørledning – faser

Transport af CO ₂ i rørledning – faser			
	Gasfase (forventet fase)	Væske	Tæt (dense)
Længde	0 – 100 km	0-15 km	20-500 km
Kapacitet	Middel	Middel	Høj

Transport af CO ₂ i rørledning – faser			
	Gasfase (forventet fase)	Væske	Tæt (dense)
Tryk	0 – 40 bar	10- 20 bar	> 85 bar
Temperatur	Omgivelse	-30 C til -50 C afhængig af trykket	Omgivelse

Som udgangspunkt forventes hovedparten af transport af CO₂ i rørledninger som del af klyngesamarbejdet at foregå i gasfase, og at der etableres centrale fordråbningsanlæg i scenarie 2 og 3 som en del af klyngesamarbejdet. Anlæg til kompression og fordråbning med henblik på faseskift er væsentlige omkostningselementer, og placering af disse er derfor vigtigt.

Ved transport af meget store mængder CO₂ over store afstande kan det være optimalt at transportere CO₂ i superkritisk fase, det kan f.eks. være rørledning fra Tyskland til Havnsø, men også fra f.eks. et punkt i den vestlige del af hovedstaden til Havnsø. Her kan der etableres en kompressor, og det vil være muligt at anvende overskudsvarme og have adgang til el-systemet.

Transport i væskefase kan være attraktivt fra fordråbningsanlæg i forbindelse med CO₂-fangst direkte til mellemlager ved havnefacilitet, hvis afstanden er meget kort, idet man undgår at skulle skifte fase flere gange med deraf følgende energitab.

Fordelen ved rørledningstransport er, at der er en markant stordriftsfordel. Kapaciteten af rørledningen er typisk proportional med kvadratet på diameteren, mens omkostningerne nærmere er proportionale med diameteren. Dette skyldes at, omkostninger til adgang til trace- og gravearbejdet er næsten det samme for forskellige diametre af rørledningen. Vi vurderer, at der ikke er eksisterende rørledninger, der er tilgængelige og kan anvendes til CO₂-transport, men det vurderes muligt at anvende samme ruteføringer som eksisterende gas og olierørledninger.

9.2.2 Risikovurderinger af CO₂-rørledninger

Der er i Danmark ikke erfaringer med etablering af CO₂-rørledninger. Globalt set er de fleste CO₂-rørledninger i USA. Klyngesamarbejdet omkring hovedstaden vil kræve, at der etableres CO₂-rørledninger i og gennem bebyggede områder og f.eks. parallelt med motorveje. Dette forventes muligt, men da der endnu ikke er udpeget relevante myndigheder og indhentet erfaring, er det vigtigt at igangsætte vurdering af risici tidligt i processen.

Generelt defineres risiko som kombinationen af frekvensen (hvor ofte), der kommer en fejl og konsekvensen, hvis der sker en fejl. I forbindelse med rørbåren transport af CO₂ skal der ske et udslip af CO₂ for, at det vil have en konsekvens for personer, der opholder sig i nærheden af et udslip. Definition af frekvensen er uheld per 1000 km/år.

M.h.t. frekvensen for, at der sker et uheld (defineret som udslip af CO₂), findes der forskellige kilder, der kan benyttes. Disse kilder er:

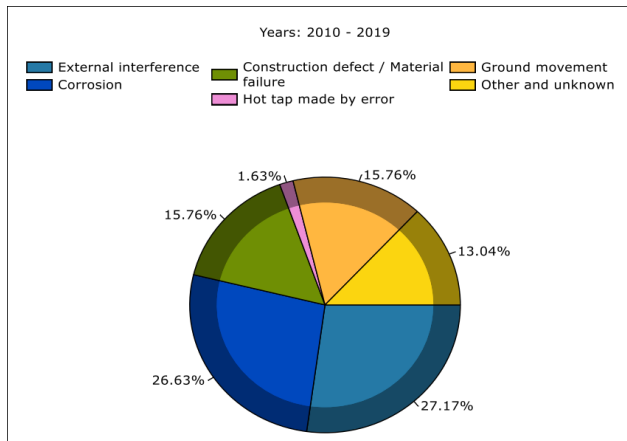
- EGIG database (2020 version, 11th version)
- UKOPA (July 2021)
- CONCAWE
- US DoT

EGIG og UKOPA er relateret til transport af naturgas, men det vurderes, at disse vil være relevante også for transport af CO₂. I nedenstående tabel er givet en overordnet vurdering af frekvensen for, at der kan forekomme et udslip.

Tabel 12: Ulykkesfrekvenser for rørledninger

	EGIG	UKOPA	CONCAWE	US DoT
Frekvens	0,241 (40 års data)	0,204 (1962 til 2019)	0,43 (50 års data)	0,33

Baseret på tallene i ovenstående vurderes EGIG-databasen af være repræsentativ for udslip fra rørledninger, der transporterer gas/væske. I Figur 7 er vist fordelingen på årsager, der fører til udslip af gas fra rørledninger. Data er fra EGIG-databasen.

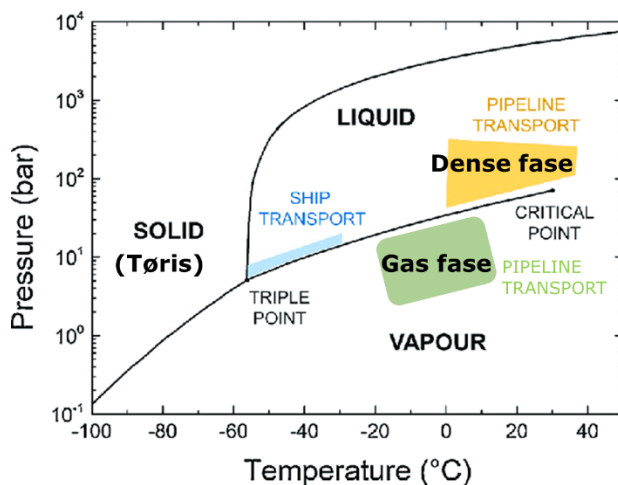


Figur 7: Udslip fordelt på årsager. Data fra EGIG-databasen, rapport fra 2020

I Danmark er frekvensen for skader på rørledninger typisk drevet af uheld fra 3. part (f.eks. gravemaskiner).

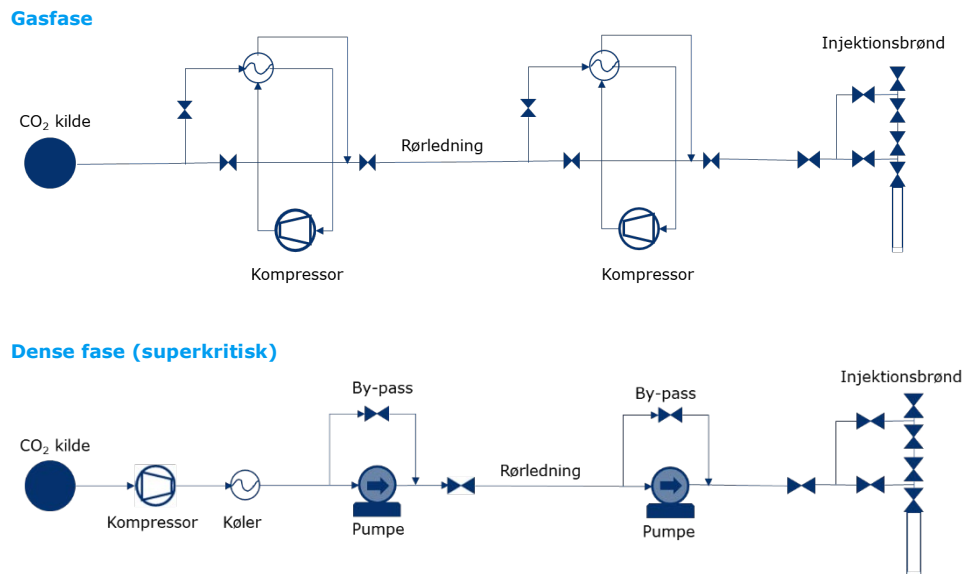
For at reducere frekvensen for intern korrosion er det vigtigt, at CO₂'en ikke indeholder frit vand. Hvis der er frit vand i CO₂, er der mulighed for sweet korrosion.

Konsekvenserne ved et udslip vil afhænge af, hvilken driftssituation som er fastlagt for rørledningssystemet. Driftssituationen kan enten være i gasfase eller superkritisk fase. I Figur 8 er vist et fasediagram for CO₂.



Figur 8: Fasediagram for CO₂

Den overordnede rørledningskonfiguration for de to driftssituationer fremgår af Figur 9.



Figur 9: Konfiguration ved drift i gasfase og dense-fase

Rørledninger, der drives ved dense-fase, vil have et højere tryk, end hvis rørledningen drives i gasfase, hvilket betyder, at konsekvenserne forventeligt vil være større ved et udslip fra en rørledning i dense-fase sammenlignet med et udslip fra en rørledning, der drives i gasfase. Ved udslip af CO₂ vil CO₂ sprede sig langs jorden, da CO₂ er tungere end luft. Der vil dog løbende ske en opblanding med luft, så koncentrationen af CO₂ vil falde. Specielt i situationer med vindstille vejr eller lave vindhastigheder vil spredning af CO₂ i kritiske koncentrationer have en stor rækkevidde. Der vil også være mulighed for, at CO₂ vil samle sig i lavpunkter eller løbe ned i kældre, hvis der findes sådanne i områder, hvor der sker et udslip.

Ved udslip fra dense-fase vil der kunne dannes fast CO₂ (tøris). I Figur 10 er vist situationen fra et brud på en CO₂-rørledning i USA, hvor der er dannet tøris. Ved opvarmning af tøris vil der ske en fordampning fra denne.



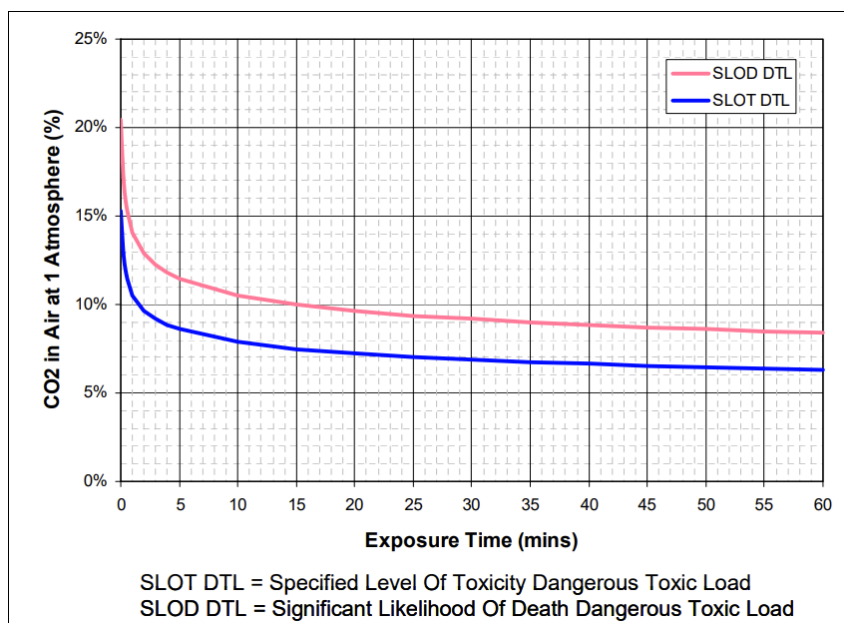
Figur 10: Dannelse af tør is efter udslip af CO₂

CO₂ har en lav akut giftighed for mennesker, men som for alle andre stoffer er CO₂ giftigt, 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].

For at vurdere i hvilke områder der kan forekomme høje koncentrationer af CO₂ ved et udslip, er der nødvendigt at gennemføre detaljerede spredningsberegninger f.eks. ved brug af CFD-simuleringer. Sådanne simuleringer kan benyttes ved udarbejdelse af beredskabsplaner, så eventuel evakuering af personer, der befinder sig i kritiske områder i forhold til udslippet, kan foretages hurtigt og effektivt.

Ud over 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.

I Figur 11 er vist SLOD- og SLOT-kurver for påvirkning med CO₂. SLOD- og SLOT-kurver angiver sammenhængen mellem koncentrationen af CO₂ og den tid, en person er påvirket af denne koncentration, for at påvirkningen kan være farlig (SLOT) eller medføre en stor sandsynlighed for dødsfald (SLOD).



Figur 11: Konsekvenser for personer ved påvirkning med CO₂

Ved udslip af CO₂ vil der også være mulighed for kuldeskader, som er mest udtalt ved transport i dense-fase, men også ved transport i gasfase, da der sker en stor afkøling (Joule-Thomson effekten) af gassen i forbindelse med trykafkastningen på grund af udslippet.

Det vil forventeligt være muligt at udføre design af CO₂-rørledningen, så man opnår et acceptabelt sikkerhedsniveau. For at vurdere risikoen skal der gennemføres risikovurderinger til fastlæggelse af, om det beregnede risikoniveau er acceptabelt. Der kan vise sig et behov for at indføre risikoreducerende tiltag som øget vægtykkelse på røret, fysisk beskyttelse, betonplade eller anden form for plade, der placeres over rørledningen, mindre afstand mellem afspærringsventiler på rørledningen eller andet for at sikre, at risikoniveauet er på et acceptabelt niveau.

9.2.3 Anlæg af rørledninger gennem hovedstaden

Der er erfaringer med etablering af naturgasrørledninger i hovedstaden, dels som højtryks transmissionsrørledninger, dels som distributionsrørledninger. Det forventes, at de samme principper kan anvendes ved anlæg af CO₂-rørledninger som for naturgasrørledninger.

Naturgasrørledninger i hovedstaden er dels etableret parallelt med nogle af motorvejene, som f.eks. Amagermotorvejen. Der er også etableret en forbindelse mellem Amager Fælled og det tidligere Sundby Gasværk.

Der er etableret olierørledninger mellem Prøvestenen og Lufthavnen. Ligeledes er der etableret olierørledninger mellem Kalundborg og Hedehusene.

9.2.4 Forberedelse af CO₂-rørledninger i gasfase til tæt fase

Såfremt der anlægges rørledninger til transport af CO₂ i gasfase, kan det overvejes at forberede disse for senere transport i dense-fase ved højt tryk. Dette vil kræve ekstra ståltykkelse, hvilket er en begrænset ekstra omkostning. Dette vil muliggøre transport af store mængder CO₂ i de samme rørledninger, men vil kræve etablering af nye kompressorstationer.

9.2.5 Samspil med fjernvarme og el-systemer

Etablering af klynge-samarbejde i hovedstaden muliggør anvendelse af varme fra fordråbningsanlæg og kompressorer. Herudover er det muligt at etablere disse anlæg, hvor der er god adgang til el-transmission/distribution, hvilket vil reducere de samlede omkostninger.

Hvis der skal etableres en CO₂-rørledning til f.eks. Havnsø, kan transport ved højt tryk muliggøre, at kompressoren etableres tæt på fjernvarmesystemet i hovedstadsområdet frem for tæt på lagret, hvor der ikke er de samme muligheder for udnyttelse af overskudsvarme.

Under fangst af CO₂ konverteres potentiel elproduktion til et varmeoutput ved forskellige temperaturniveauer. Der er tale om betydelige mængder varme fra processen. For at kunne udnytte varmen skal der derfor være et fjernvarmesystem til rådighed med en betydelig kapacitet, hvis den fulde mængde varme skal kunne udnyttes. Det giver således god mening, at varmen leveres til fjernvarmesystemet, der forsyner hovedstadsområdet med varme.

Fjernvarmesystemet i hovedstadsområdet er i forvejen forsynet fra primært CO₂-neutrale kilder som affaldsbaseret varme, biomassebaseret kraftvarme, store varmepumper og en række øvrige kilder. I fremtiden forventes systemet desuden forsynet med bl.a. geotermisk varme samt overskydende varme fra eksempelvis elektrolyse og produktion af grønne brændsler. Overskydende varme fra CO₂-fangst vil således fortrænge varme fra øvrige produktionskilder, men det kan ikke forventes, at der kan leveres varme året rundt, idet sommerperioden er dækket med varme fra bl.a. affaldsbaserede anlæg, der alternativt er nødt til at bortskaffe varmen.

Det er besluttet at konvertere en betydelig andel boliger fra individuel naturgasforsyning til fjernvarme. På landsplan forventes det, at mere end 300.000 boliger skal fjernvarmeforsynes, og en del af dem ligger i hovedstadsområdet. Under en antagelse om, at halvdelen af disse boliger ligger i hovedstadsområdet med adgang til grøn fjernvarme, kan CO₂-emissionerne reduceres med ca. 0,5 mio. ton CO₂ per år.

Ud over varmen fra CO₂-fangstprocessen er det muligt at udnytte en betydelig mængde af varmen fra transporten af CO₂ – dvs. i kompressorer mv. under forudsætning af, at kompressorstationer er placeret i nærheden af fjernvarmenet, der kan aftage varmen. Under en antagelse om et elforbrug på 300 til 400 GWh fra kompressorstationer og fordråbning, og at der kan udnyttes ca. 70 % af varmen herfra, kan der udnyttes i størrelsesordenen 250 GWh varme. Under forudsætning om at anlæggene, hvorfra der fanges CO₂, er i drift i 6000 - 8000 timer årligt, vil den samlede gennemsnitlige varmeeffekt være på 35 MW, hvilket igen bliver fordelt på flere kompressorstationer og dermed flere fjernvarmenet.

Under en antagelse om, at de 250 GWh varme kan fortrænge naturgas året rundt, hvilket i parentes bemærket ikke er realistisk, vil varmen fra kompressorstationerne kunne fortrænge naturgas med et samlet CO₂-indhold på ca. 50.000 tons årligt.

9.2.6 Konklusion vedr. rørledninger

Konklusionen vedr. rørledninger er, at valg af transport af CO₂ i gasform er set som den mest hensigtsmæssige, hvis fordråbning er en del af hovedstadens CO₂ klynge-samarbejde.

Teknologien er kendt, og der er ikke behov for meget lave temperatur eller høje tryk. For længere transportafstande til f.eks. Havnsø eller import fra f.eks. Tyskland kan det dog være økonomisk fordelagtigt at anvende transport ved højt tryk i tæt fase.

Det vurderes muligt at opnå et acceptabelt sikkerhedsniveau for såvel transport af CO₂ i gasfase som i superkritisk fase, bl.a. ved anvendelse af ventiler og detaljerede sikkerhedsanalyser.

10. ØKONOMISK KONKRETISERING AF SCENARIER – CASH FLOW-BEREGNINGER

10.1 Antagelser om kapacitet, rørledning m.v.

Konkretisering af scenarier er foretaget generisk uden at skitsere konkrete lokationer for havne, rørledninger, fordråbningsanlæg, mellemlagre m.v. og uden at identificere konkrete CO₂-kilder. Denne tilgang er valgt for at fokusere på principperne og overordnet kvantificere mulige fordele ved et klyngesamarbejde.

Klyngesamarbejde i hovedstadsområdet vil blive kraftigt påvirket af en mulig etablering af CO₂-lagre i Stenlille og Havnsø i Vestsjælland. Derfor er det nødvendigt at underopdele scenarie 2 med fælles infrastruktur til scenarie 2a, 2b og 2c uden og med adgang til onshore-lager og med/uden adgang til havne. For scenarie 3 – international hub – antages det, at dette scenarie kun er interessant, såfremt der etableres onshore-lager. Scenarie 3 inddrager kun en rørledning til Sverige, idet evt. rørledning direkte fra Tyskland til onshore-lager forventes at være uden for klyngesamarbejdet.

Overblik over de forskellige scenarier og karakteristika:

Tablet 13: Overblik over de forskellige scenarier og karakteristika

Karakteristika	Enhed	Scenarie 1	Scenarie 2			Scenarie 3
			2a	2b	2c	3a
Lagring ved Havnsø		✗	✗	✓	✓	✓
Mulighed for udskibning		✓	✓	✓	✗	✓
Mængder årligt, i alt	kton/år	1500	2500	3000	3000	5000
Mængder time	ton/time	200	340	400	400	680
Backupfaktor	Faktor	2	1,5	1,5	1,5	1,5
Total kapacitet/time	ton/time	400	510	600	600	1000
Heraf kompression på Sjælland til 30 bar	ton/time	400	510	600	600	600
Skibsstørrelse	m ³	7500	22500	22500	N/A	22500
Havnefaciliteter	antal	2	1	1	0	1
Udskibning	Kton/år	1500	2500	1000	N/A	1000
Fordråbning og kompression	ton/time	400	510	200	N/A	200
Mellemlager ved udskibning	m ³	22500	33750	33750	N/A	33750
Mellemlager ved punktkilder	m ³	5000				

Karakteristika	Enhed	Scenarie 1	Scenarie 2			Scenarie 3
			2a	2b	2c	3a
Mængder til Havnsø	Kton/år			2000	3000	4000
Kompression til Havnsø rørledning	ton/time			400	600	800
Rørledninger by	km		40	40	40	40
Rørledninger land	km			80	80	110
Rørledning Øresund krydsning	Antal 20 km					1
Lastbiltransport Estimeret mængde ton CO₂/år		500.000	100.000			
Lastbiltransport Afstand – km gennemsnit		50	50			

For scenarie 1 er medtaget små mellemlagre ved de enkelte udledere.

Backupfaktoren for anlæg med roterende dele er valgt som 2x100 % for mindre anlæg og 3x50% for større anlæg, som er forbundne med rørledninger. Desuden er der i det følgende medtaget følsomhedsberegninger, hvor der regnes med 3x50% for alle anlæg.

10.2 Investeringsoverslag – top down – CAPEX

Samlede CAPEX-omkostninger ved hver af de forskellige scenarier indikerer markant forskel i udgifter. Enhedsomkostningerne til CAPEX per ton er lavest for scenarie 3 og højest for scenarie 1, hvilket skyldes, at de større mængder mere end opvejer de højere investeringsomkostninger

Tablet 14: Investeringsoverslag – top down – CAPEX

CAPEX	Enhed	Scenarie 1	Scenarie 2			Scenarie 3
			2a	2b	2c	
Havne	mDKK	300	150	150	0	150
Kompressor ved punktkilder	mDKK	1800	1530	1800	1800	1800
Fordråbning udskibning	mDKK		663	260	0	260
Mellemlager ved udskibning	mDKK	450	675	675	0	675
Mellemlager ved punktkilder	mDKK	100				

CAPEX	Enhed	Scenarie 1	Scenarie 2			Scenarie 3
			2a	2b	2c	
Rørledninger by	mDKK		800	800	1000	1000
Rørledninger land	mDKK	0	0	800	960	1320
Rørledninger - Øresund	mDKK					300
Samlet CAPEX uden Havnsø kompressor	mDKK	2650	3818	4485	3760	5505
CAPEX pr. ton årligt	DKK/t/år	1767	1527	1495	1253	1101
Havnsø kompressor	mDKK	0	0	600	900	1200

De primære omkostningsdrivers fra et CAPEX-perspektiv er fordråbning og kompressor samt rørledning på land.

Hvis der anvendes en backupfaktor på 1,5 også i scenarie 1, bliver CAPEX 2200 MDKK og CAPEX pr. ton 1467 DKK/ton.

Antagelser om enhedsomkostninger er angivet i følgende tabel.

Tabel 15: Enhedsomkostninger

Enhedsomkostninger	Enhed	Scenarie 1	Scenarie 2			Scenarie 3
			2a	2b	2c	
Havne	MDKK /havn	150	150	150	150	150
Kompressor i forbindelse med fangst (op til ca. 30 bar)	MDKK/Ton/time	3	3	3	3	3
Fordråbning og kompressor udskibning (liquifaction)	MDKK/Ton/time	1,5	1,3	1,3		1,3
Kompressor rørledning +100bar	MDKK/Ton/time			1,5	1,5	1,5
Mellemlager	MDKK/ ton	0,02	0,02	0,02		0,02
Rørledninger by	MDKK/km		20	20	25	25
Rørledninger land	MDKK/km		10	10	12	12
Rørledninger Øresund	MDKK/krydsning					300

10.3 Driftsomkostninger – OPEX

Driftsomkostningerne for klyngesamarbejdet omfatter almindelig drift af anlæg, energiomkostninger til fordråbning og kompression, havneafgifter og almindelig administration. Selskabsdannelse og drift, forsikring m.v. er ikke medtaget.

Til beregning af driftsomkostninger er anvendt følgende antagelser:

Tabel 16: Årlige driftsomkostninger i forhold til anlægsomkostninger

Anlæg	Årlige driftsomkostninger i forhold til anlægsomkostninger
Havne	3 %
Kompressor i forbindelse med fangst (op til ca. 30 bar)	3 %
Fordråbning og kompressor udskibning (liquifaction)	3 %
Kompressor/pumpe +100 bar	3 %
Mellemlager	3 %
Rørledninger by	1 %
Rørledninger land	1 %
Rørledninger – Øresund	1 %

For forbrug af elektricitet, havneafgifter m.v. anvendes følgende værdier:

Tabel 17: Driftsomkostning – energiforbrug

Driftsomkostning	
Kompressor i forbindelse med fangst (op til ca. 30 bar)	75 kwh/ton
Fordråbning og kompressor udskibning (liquifaction)	35 kwh/ton
Kompressor/pumpe +100 bar	35 kwh/ton
Elektricitetspris	500 DKK/MWh
Havneafgifter	20 DKK/ton
Administration mv.	10 MDKK/år

10.4 Totalomkostninger gennemsnitlige

De gennemsnitlige totalomkostninger pr. ton CO₂-transport for de elementer, der er medtaget i scenarierne, er beregnet som simpelt cash flow-beregning af investeringer og driftsomkostninger med følgende antagelser:

- Start 2026 og konstante mængder indtil 2050
- Forrentning 8 % real
- Skat m.v. ikke medregnet
- Konstante priser – inflation ikke medregnet

- Komprimering af CO₂ fra Sverige til 30 bar medregnes ikke
- Investeringer og drift af kompressor til Havnsø rørledning medregnes ikke

Hertil kommer omkostningerne til skibstransport og lastbiltransport. Skibstransporten er meget afhængig af skibsstørrelsen, som er antaget forskelligt i de forskellige scenarier.

Tabel 18: Totalomkostninger

Totalomkostninger (transport til lagring)	Enhed	Scenarie 1	Scenarie 2			Scenarie 3
			2a	2b	2c	
Gennemsnitlige omkostninger for klyngesamarbejdets anlæg – rørledninger, kompressorer, fordråbning	DKK/ton	305	264	230	185	159
Lastbiltransport gennemsnit	DKK/ton	50	10			
Skibstransport	DKK/ton	350	250	250		250
Total omkostninger, med skib	DKK/ton	705	524	480		409
Total omkostninger, Havnsø	DKK/ton			230		159
Min. omkostninger	DKK/ton	705	524	230	185	159

Ved inkludering af omkostninger til lastbil- og skibstransport er enhedsomkostninger til transport af CO₂ fra fangst til lagrings-placering ikke overraskende lavest for scenarie 2c, der ikke har skibstransport, og scenarie 3, der har store mængder importeret CO₂ fra Sverige. Grundet signifikante omkostninger til lastbil- og skibstransport bliver enhedsomkostningerne for scenarie 1 og 2a højere end de andre scenarier, hvor det er muligt at levere direkte til et lager på Sjælland. Den optimale løsning vil derfor afhænge af omkostningerne til lagring.

De gennemsnitlige omkostninger for klyngesamarbejdets anlæg – havne, rørledninger, kompressorer, fordråbning m.v. er betydelig højere end transport i rørledninger alene, da investeringer og drift inkl. elforbrug til kompressorer og fordråbningsanlæg udgør op mod 75 % af de samlede omkostninger. I andre analyser er disse omkostninger inkluderet i CO₂-fangstomkostningerne og ikke i transporten. Herudover er regnet med en kommerciel forrentning af investeringerne, hvor andre kilder antager lave samfundsøkonomiske forrentninger eller ikke medtager forrentning.

Der er også tale om gennemsnitlige omkostninger, hvilket betyder, at det for visse punktkilder kan være billigere at have direkte udskibning af CO₂. De gennemsnitlige omkostninger skal derfor fordeles via et tarifsystem, der afspejler dette forhold, medmindre der er regulering, der forhindrer egne anlæg. Analogien er gastransmission og distribution, som har samme tariffer for alle kunder, uanset om de er tæt på importpunkt eller langt væk fra denne.

Følsomhed: Hvis der i scenarie 1 anvendes en backupfaktor på 1,5 som i de øvrige scenarier, bliver gennemsnitsomkostningerne 268 DKK/ton for klyngesamarbejdets anlæg i stedet or 305 DKK/ton, og dermed bliver de samlede omkostninger 668 DKK/ton.

I følgende tabel er de gennemsnitlige omkostninger brudt ned på enkelte elementer (afrundet til hele DKK).

Tabel 19: Totalomkostninger på enkeltelementer

	Scenarie				
	1	2a	2b	2c	3
Enhedsomkostninger 8 % DKK/ton					
Havne	45	28	13	0	8
Kompressor i forbindelse med fangst (op til ca. 30 bar)	139	114	113	113	67
Fordråbning og kompressor udskibning (liquifaction)	68	51	17	0	10
Kompressor/pumpe +100 bar til Havnsø	0	0	37	55	44
Mellemlager	46	34	28	0	17
Rørledninger by	0	34	28	35	21
Rørledninger land	0	0	28	34	28
Rørledninger – Øresund	0	0	0	0	6
Administration	8	5	4	4	3
I alt	305	264	267	240	203
I alt uden kompression til Havnsø	305	264	230	185	159

Tabel 20: Totalomkostninger på enkeltelementer - Følsomhed Scenarie 1 med back up faktor på 1,5

	Scenarie				
	1	2a	2b	2c	3
Enhedsomkostninger 8 % DKK/ton					
Havne	45	28	13	0	8
Kompressor i forbindelse med fangst (op til ca. 30 bar)	114	114	113	113	67
Fordråbning og kompressor udskibning (liquifaction)	56	51	17	0	10
Kompressor/pumpe +100 bar til Havnsø	0	0	37	55	44
Mellemlager	46	34	28	0	17
Rørledninger by	0	34	28	35	21
Rørledninger land	0	0	28	34	28
Rørledninger – Øresund	0	0	0	0	6
Administration	8	5	4	4	3
I alt	268	264	267	240	203
I alt uden kompression til Havnsø	268	264	230	185	159

11. KONKLUSIONER OG REFLEKSIONER

Konklusioner og refleksioner vedr. konkretisering af CO₂ klyngesamarbejdet i hovedstadsområdet:

- De samlede omkostninger for klyngesamarbejde inkluderer investeringer i havne, rørledninger, kompression og fordråbning og er derfor højere end enhedsomkostningerne i andre kilder, der vurderer CO₂ transportomkostninger, men kun inkluderer rørledninger.
- Etablering af onshore CO₂-lager på Sjælland vil påvirke udviklingen af klyngesamarbejdet specielt i scenarie 2 og 3. Samarbejde med selskaber, der vil eller kan udvikle disse lagre, er vigtigt.
- Hvis der etableres onshore-lager på Sjælland, kunne eksportanlæg via skibe muligvis udelukkes for at nedbringe de samlede investeringer. Importfaciliteter for CO₂ kunne i så fald varetages af lagerejeren.
- Fordråbning og kompression af CO₂ er den største omkostning ved CO₂ transportsystemet og udgør ca. halvdelen af de samlede investeringer. Det kan overvejes, om fordråbning skal være del af et fælles transportsystem, eller om de enkelte CO₂-leverandører eller -aftagere skal være ansvarlig for dette, enten på deres egen facilitet eller på havnefacilitet.
- Den geografiske afgrænsning af klyngesamarbejdet kan defineres forskelligt, men vil være påvirket af at inddrage nogle af de store punktkilder. Afgrænsningen kan foretages ved et mere konkret feasibility-studie med detaljerede analyser af omkostningerne ved forskellige løsninger.
- Sæsonvariation og flerårige variationer i leverancer af CO₂ fra store punktkilder påvirker investeringsniveauet. Ved at acceptere et afskæringsniveau, hvor ikke al CO₂ skal opsamles, kan de gennemsnitlige omkostninger nedbringes. Muligheden for dette vil afhænge af politiske og firmamæssige målsætninger.
- Internationalt samarbejde med hovedstaden som CO₂-hub er primært interessant, hvis der etableres CO₂-lager på Sjælland. Dog kan import fra Sydsverige også være relevant for udskibning af CO₂.
- Forudsætninger om de enkelte anlæg, herunder f.eks. backupfaktor og udformning af fordråbningsanlæg vil påvirke økonomien. Der er derfor behov for at gennemføre feasibility-studier for at indsnævre usikkerheder i omkostninger og valg af scenarie.

12. BILAG 1

ENHEDSOMKOSTNINGER

Afgrænsning

Elementer i transportomkostninger

Ved rørført transport af kuldioxid skal kuldioxiden have en vis grad for renhed, tørhed og tryk, som gør den transportbar i rørene. Anlæg til denne processering af kuldioxid fra fangst til føring ind i rør er ikke inkluderet, kan enten betragtes som punktkildens ansvar for at få adgang til rørene eller er en del af det samlede klyngesamarbejde.

En transportkæde for kuldioxid afspejler specifikke mængder, CO₂-kvaliteter og -transportmetoder, hvor delelementer som fx rør dimensioneres afhængigt af afstand, trykniveauer og andre parametre. Et katalog af infrastrukturelementer inkl. CAPEX og OPEX vises i tabellerne nedenfor.

Omkostninger til fordråbning/kompression vises i Tabel B-1. Her indgår tør og ren CO₂ ved atmosfærisk tryk og ender på optrykket væskeform (15 barg ved -30°C). Det vurderes, at kompression og nedkøling udgør hver for sig ca. lige store andele af den samlede CAPEX.

Tabel B-1: Omkostninger – fordråbning og kompression

Fordråbningskapacitet [tons/time]	CAPEX - køling til -30°C [mDKK/tCO ₂ /time]	CAPEX - kompression til 15 barg [mDKK/tCO ₂ /time]	Effekt MW	OPEX (O&M) Procent af CAPEX
25	2,9	2,9	2,8	3 %
50	2,4	2,4	5,5	3 %
100	2,0	2,0	11	3 %
200	1,8	1,8	22	3 %
500**	1,5-1,8	1,5-1,8	55	3 %

* Evt. salg af overskudsvarme er ikke medregnet

** I hvilken grad stordelsfordele opnås her afhænger af, hvornår et anlæg er vokset så meget, at der skal bygges anlæg fra bunden af

Tabel B-2: Omkostninger - kompression

Kompression		Kommentar	CAPEX [mDKK/tCO ₂ /time]	OPEX [kW/tCO ₂ /time]
Fra [barg]	Til [barg]			
1	7	Ifm. fordråbning* eller til gasfase	1,6	46,3
1	15	Ifm. fordråbning* eller til gasfase	2,3	59,7
1	30	Ifm. fordråbning* eller til gasfase	3,3	75,2
1	100	Superkritisk fase	6,2	112,5
30	100	Superkritisk fase	3,1	78,8

* Tørring ifm. kompression fører til en stigning i prisen og men kan betragtes som medtaget

Tabel B-3: Omkostninger – andre delelementer

Delelement	Kommentar	CAPEX	OPEX – procent af CAPEX
Lagertank 3000 m ³		60 mDKK	3 %
Havn	Tilbygning, modifikation til CO ₂ udskibning	150 mDKK	3 %
Tørreanlæg til 50 tons/timen	Tørring til dugpunkt under forventede temperaturbetingelse	0,45 mDKK/tCO ₂ /time	3 %

Omkostninger til rør til rørtransport af CO₂ i gasfase ved 30 barg indikeres i Tabel B-4 og Tabel B-5 for hhv. rør i åbent land og bymæssig bebyggelse. Prispræmien ved at gå fra landbrugsområde til bymæssig bebyggelse er vurderet til ca. faktor 2. En væsentlig omkostning ifm. rørkonstruktion i bymæssig bebyggelse er tilladelser og aftaler med grundejere samt begrænsninger på hhv. støj og belysning på arbejdsområderne og tilladelige tidsrum til støjende aktiviteter. En yderligere forskel er, at i en bymæssig bebyggelse er plads til rørkonstruktion mindre, og løftarbejde af længere sektioner ikke mulig.

OPEX vises som en fast andel på 1-2 % af CAPEX, som er et erfaringstal fra tidligere projekter.

Tabel B-4: Omkostninger – CO₂-rør til transport af CO₂-gas til under 35 barg, i hhv. bymæssig bebyggelse og et åbent land

Rørdimension (ydrediameter [mm]; vægtykkelse [mm])	Kapacitet ved 30 barg over 15 km, tryktab 5 < barg	CAPEX [mDKK/km]		OPEX [mDKK/km/år]	
		By-område	Åbent land	By-område	Åbent land
10"	Ca. 50 tons/timen	16,2	8,1	0,3	0,2
24"	Ca. 400 tons/timen	21	10,5	0,4	0,2
32"	Ca. 900 tons/timen	25,6	12,8	0,5	0,3

Tabel B-5: Omkostninger – CO₂-rør til transport af CO₂-gas til under 35 barg, i hhv. bymæssig bebyggelse og et åbent land

Rørdimension (ydrediameter [mm]; vægtykkelse [mm])	Kapacitet ved 30 barg over 15 km, tryktab 5 < barg	CAPEX [DKK/km/tCO ₂]		OPEX [DKK/km/tCO ₂ /år]	
		By-område	Åbent land	By-område	Åbent land
10"	Ca. 50 tons/timen	324000	162000	6480	3240
24"	Ca. 400 tons/timen	52500	26250	1050	525
32"	Ca. 900 tons/timen	28444	14222	569	284

Arealer

Erhvervelse af arealer deles i to komponenter:

- Midlertidig erhvervelse under konstruktion af rør
- Permanent erhvervelse til servitutbælte for rør samt arealer for permanente bygninger/anlæg

Et servitutbælte er et område omkring en ledning, hvor der er tinglyst en servitut. For større naturgasrør (transmissions- og fordelingsledninger) svarer bredden til 5 m på hver side af

ledningen samt bredden af selve ledningen. Indførelse af et servitútbælte for kuldioxid-rør på samme måde og for gasrør er en antagelse.

Grundejere modtager compensation for servitutter på deres grund. Et vejledende tal er i størrelsesorden 3,3 kr./m². Desuden kompenseres for strukturskade på landbrugsjord samt erstatning for tabt afgrøde i forbindelse med anlægsarbejdet.

Ramboll har i et tidligere studie beregnet den samlede omkostning for midlertidig og permanent erstatning til grundejere af landbrugsjord for et 20 m bredt arbejdsbælte og 10,5 m bredt servitútbælte til en pris på omkring 2,2-2,5 millioner DKK samlet for en 15 km strækning, som svarer til ca. 150.000-170.000 kr./km. I byområder afhænger prisen af, om gæsteprincippet gælder (fx langs større veje), eller om grunde opkøbes på markedsvilkår.