

# KLYNGESAMARBEJDET I HOVEDSTADEN OM CO<sub>2</sub>-INFRASTRUKTUR OG TRANSPORT

Tekniske og økonomiske analyser -

CO<sub>2</sub> standarder og specifikationer

Rev. 5 – 21. december 2022



Bright ideas.  
Sustainable change.



Bright ideas. Sustainable change.



## CONTENTS

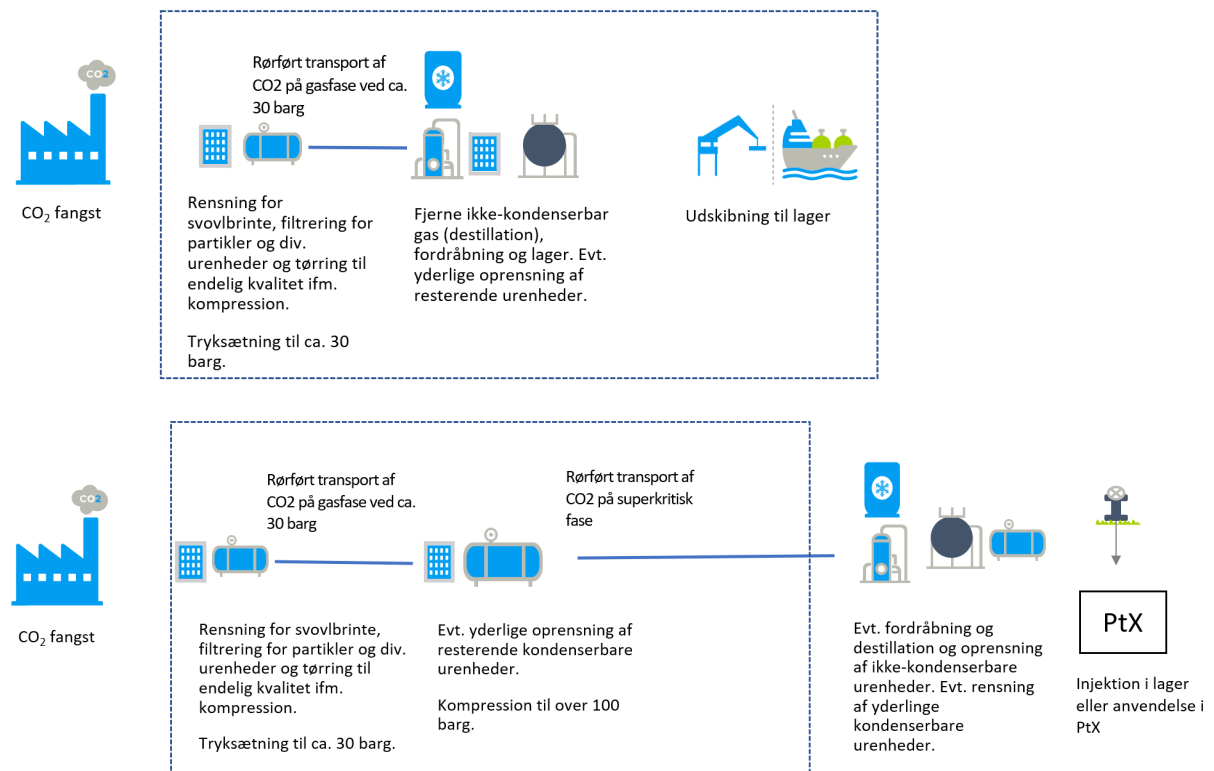
<b>1.</b>	<b>Executive summary</b>	<b>3</b>
1.1	Anbefaling til punktkilden og transport i gasrør	3
1.2	Anbefaling til fordråbningsanlæg	4
<b>2.</b>	<b>Generelt omkring håndtering, processering og transport af CO<sub>2</sub></b>	<b>5</b>
2.1	Delkonklusion	9
<b>3.</b>	<b>Kendte kravspecifikationer til lagring</b>	<b>10</b>
3.1	Delkonklusion	11
<b>4.</b>	<b>CO<sub>2</sub> ved fangstanlæg og klargørelse til transport eller fordråbning</b>	<b>12</b>
4.1	Delkonklusion	13
<b>5.</b>	<b>Rørført transport af CO<sub>2</sub> i gasform</b>	<b>14</b>
5.1	Delkonklusion	14
<b>6.</b>	<b>Fordråbning af CO<sub>2</sub></b>	<b>15</b>
6.1	Delkonklusion	15
<b>7.</b>	<b>Standarder og specifikationer som omkostningsdrivere</b>	<b>16</b>
7.1	Krav til komposition af CO <sub>2</sub> under transport via rør i gasform	16
7.2	Krav til komposition af CO <sub>2</sub> under transport via lastbil	16
7.3	Krav til komposition af CO <sub>2</sub> i endelig kvalitet under skibstransport	16
<b>8.</b>	<b>Krav til standarder og specifikationer</b>	<b>17</b>
8.1	Krav for rørført CO <sub>2</sub>	17
8.2	Krav for flydende CO <sub>2</sub>	17
8.3	Konklusion	17

## 1. EXECUTIVE SUMMARY

CO<sub>2</sub>-værdikæden, fra fangst til slutlagring, vil kræve CO<sub>2</sub>-standarder og kravspecifikationer, som afspejler, hvor i kæden CO<sub>2</sub> renses (til dels eller til endelig kvalitet), tørres (til dels eller til endelig tørhed) og fordråbes. Teknisk udstyr, fx rør, fører implicit til visse krav til CO<sub>2</sub>-kompositionen, mens krav fra fx slutlager specifikt dikterer, hvilken komposition kræves til endelig kvalitet.

CO<sub>2</sub>-specifikationer anbefales at gælde for hvert led i transportkæden for at opnå den mest optimale synergieffekter fra nødvendige rens-/tørreprocesser. Oprensning for svovl og fugt skal håndteres inden rørinfrastruktur i gasform og kan med fordel opnå endelig kvalitet allerede i denne proces, mens oprensning for alle andre indholdsstoffer (ikke-komprimerbare komponenter) skal foretages efter fordråbning.

Værdikæden vises på efterfølgende diagrammer, hvor opgaver forbundet med klyngesamarbejdet afgrænses med stiplede linjer.



### 1.1 Anbefaling til punktkilden og transport i gasrør

Ved transport af CO<sub>2</sub> i gasform er det væsentligt, at fugt og svovlbrinte udrenses fra CO<sub>2</sub>'en, da disse stoffer kan medvirke til korrosion af gasrørene.

Det anbefales, at punktkilden står for tørring til endeligt vandindhold, som påkrævet af slutlagret. Dette sikrer integriteten af rør og forenkler fordråbning af CO<sub>2</sub>. Tørring kan ske i forbindelse med kompression op til transporttryk (30 bar).

Afhængigt af fangstkilde og fangstteknologi så skal punktkilden også stå for en vis grad for oprensning, som minimum af svovlbrinte, hvis det findes i den fangede volumen. Her kan

oprensningen for svovlbrinte med fordel opnå endelig kvalitet, som påkrævet af slutlagret, i stedet for en delvis oprensning.

Anbefaling: Ved transport i gasform anbefales det, at der oprenses for fugt og svovlbrinte allerede ved punktkilden og til endelig kvalitet, hvis volumen skal til lagring.

### **1.2 Anbefaling til fordråbningsanlæg**

Fordråbningsanlæg skal anvendes, hvis CO<sub>2</sub> skal transporteres med skib eller lastbil.

Givet at CO<sub>2</sub> til fordråbning har opnået tilstrækkelig/endelig tørhed, kan en yderligere oprensning alligevel forventes. Fordråbning af CO<sub>2</sub> vil implicit sætte krav til indhold af partikler og ikke-komprimerbare komponenter. Oprensning til endelig kvalitet, som dikteres af skibstransport eller offshore slutlager, anbefales at foregå i forbindelse med fordråbning.

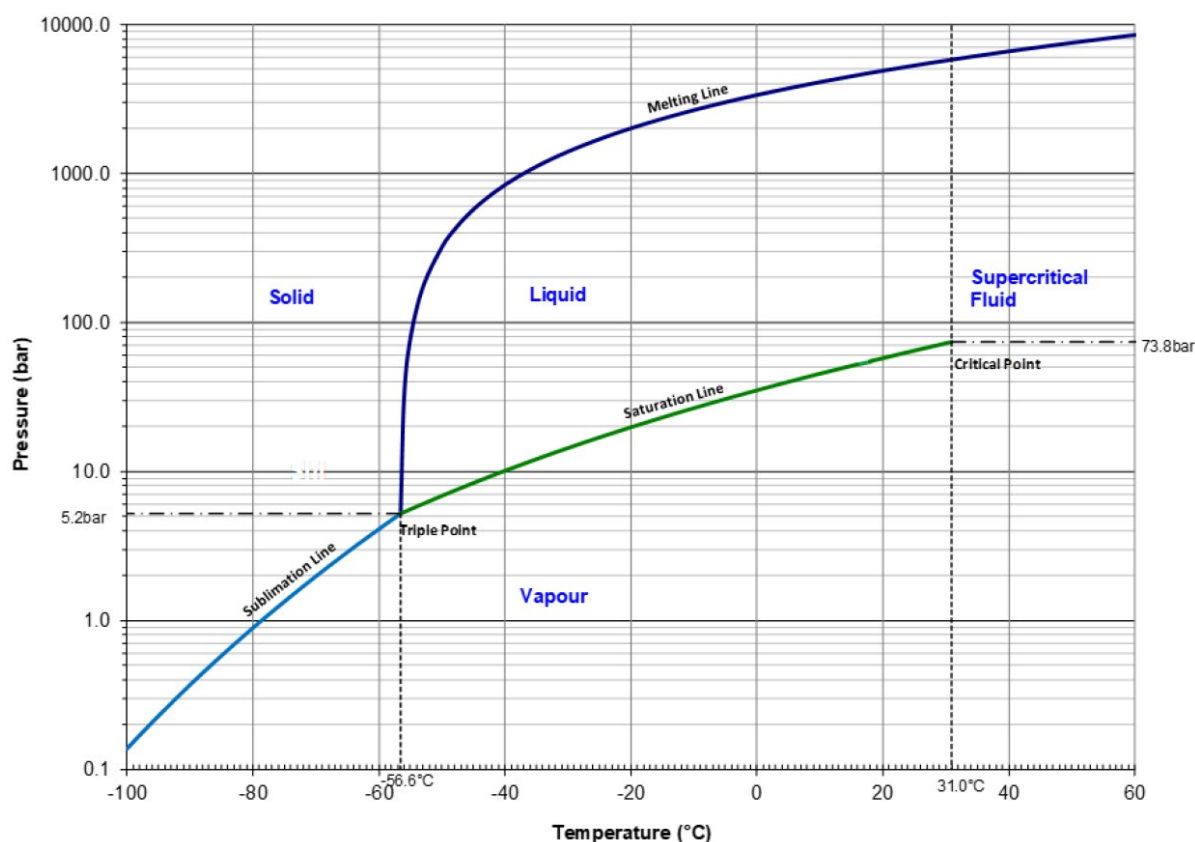
Da CO<sub>2</sub> til PtX samt onshore-lager ikke forventes at blive fordråbet i forbindelse med klyngesamarbejdet, vil kun den CO<sub>2</sub>, der skal videretransporteres med skib eller lastbil, fordråbes. Slutlager sørger for yderligere oprensning, inkl. fjernelse af ilt ifølge egne kravspecifikationer.

## 2. GENERELT OMKRING HÅNDTERING, PROCESSERING OG TRANSPORT AF CO<sub>2</sub>

Dette afsnit giver en general beskrivelse af egenskaberne af CO<sub>2</sub> samt de væsentligste elementer i forbindelse med håndtering, transport, lagring og processering af CO<sub>2</sub>.

Egenskaber af CO<sub>2</sub> afhænger af renhed, tørhed, tryk og temperatur, se fasediagrammet for ren CO<sub>2</sub> i Figur 1. For dette studie er CO<sub>2</sub> i gasform ("vapour") i fokus, da rørført transport af CO<sub>2</sub> i tætbyggede områder af sikkerhedsmæssige årsager er mest optimalt i den form – årsager som senere forklares nærmere. Den økonomiske gevinst ved at spare på kompression og anvende gasform er diskutabel, men drøftes ikke yderligere her<sup>1</sup>.

Figur 1: Fasediagram for ren og tør kuldioxid<sup>2</sup>

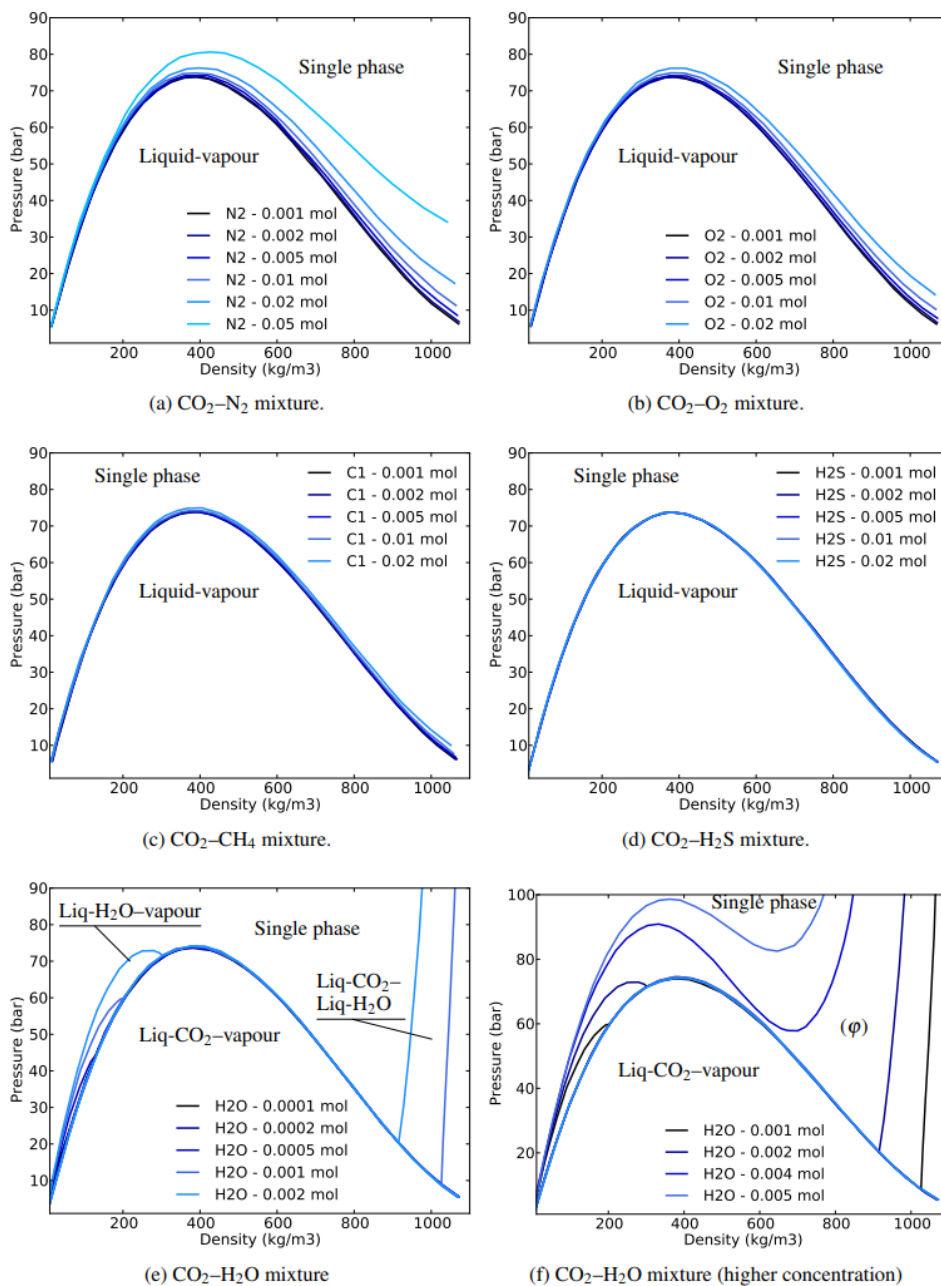


Urenheder og vandindhold påvirker fasediagrammet ved at flytte på de tryk og temperaturer, hvor CO<sub>2</sub>-strømmen overgår til en anden fase, f.eks. fra gas til væske. Faseskifte kan ske inde i et rør og føre til CO<sub>2</sub> i to faser samtidig, f.eks. væske- og gasfase, hvis CO<sub>2</sub> føres ind i et rør på væskeform, som opheides undervejs og "koger" i røret. Fasediagrammer for forskellige kombinationer af CO<sub>2</sub> og andre komponenter kan ses i Figur 2. Dette illustrerer, hvor vigtigt det er at kende til CO<sub>2</sub>-kompositionen for at undgå ukontrollerede faseskift.

<sup>1</sup> Se fx. side 13 i Peletiri, Suoton P., Nejat Rahmani, and Iqbal M. Mujtaba. "CO<sub>2</sub> Pipeline design: A review." *Energies* 11.9 (2018): 2184. Også sider 11-12 i "Transport af CO<sub>2</sub> i Danmark – barrierer og muligheder" via Axel Future (sep. 2022)

<sup>2</sup> DNV-RP-F104 (Sep. 2021) "Design and operation of carbon dioxide"

Figur 2: Fasediagrammer for forskellige blandinger af CO<sub>2</sub> og andre komponenter<sup>3</sup>



Med begrebet "urenheder" menes typisk komponenter som brint (H<sub>2</sub>), svovlbrinte (H<sub>2</sub>S), ilt (O<sub>2</sub>) og organiske materialer. Hvad der betragtes som relevante urenheder afhænger af applikationen, f.eks. om CO<sub>2</sub> skal lagres under højt tryk eller som kold væske, transporteres i rør (og i hvilken fase), fordråbes, indgå i processer, osv. To eksempler på oplyste urenheder kan ses i Figur 3.

<sup>3</sup> Dynamic flow of CO<sub>2</sub> in pipelines: Sensitivity to impurities, NORDICCS Technical Report D5.2.1301 (Juni 2013), Ref. [https://www.sintef.no/globalassets/sintef-energi/nordiccs/d5.2.1301-dynamic-flow-of-co2-in-pipelines-sensitivity-to-impurities\\_web.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/sintef-energi/nordiccs/d5.2.1301-dynamic-flow-of-co2-in-pipelines-sensitivity-to-impurities_web.pdf)

**Figur 3: Oversigter over urenheder fra hhv. en international design norm for CO<sub>2</sub> i rørført transport<sup>4</sup> og en planlagt permanent lagring af CO<sub>2</sub> i undergrunden<sup>5</sup>**

Impurities in a CO <sub>2</sub> stream can include the following: <ul style="list-style-type: none"> <li>— oxygen (O<sub>2</sub>);</li> <li>— water (H<sub>2</sub>O);</li> <li>— nitrogen (N<sub>2</sub>);</li> <li>— hydrogen (H<sub>2</sub>);</li> <li>— sulfur oxides (SO<sub>x</sub>);</li> <li>— nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>);</li> <li>— hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S);</li> <li>— hydrogen cyanide (HCN);</li> <li>— carbonyl sulfide (COS);</li> <li>— ammonia (NH<sub>3</sub>);</li> <li>— amines;</li> <li>— aldehydes;</li> <li>— particulate matter (PM).</li> </ul>	Water (H <sub>2</sub> O)
	Oxygen (O <sub>2</sub> )
	Sulphur oxides (SO <sub>x</sub> )
	Nitric oxide/Nitrogen dioxide (NO <sub>x</sub> )
	Hydrogen sulphide (H <sub>2</sub> S)
	Carbon monoxide (CO)
	Amine
	Ammonia (NH <sub>3</sub> )
	Hydrogen (H <sub>2</sub> )
	Formaldehyde
	Acetaldehyde
	Mercury (Hg)
	Cadmium (Cd), Thallium, (Tl)

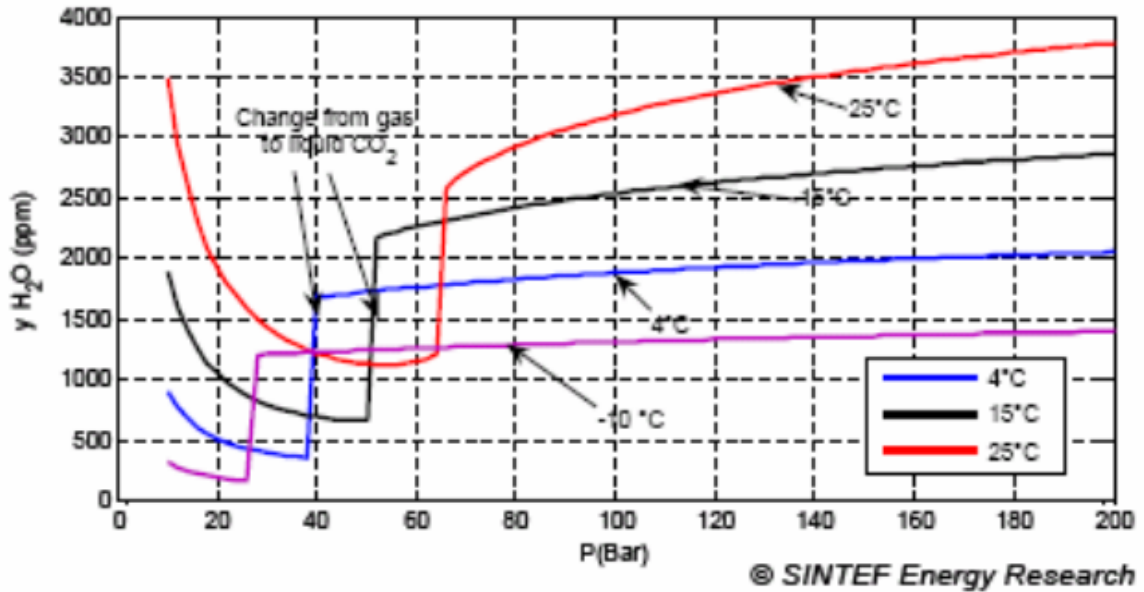
Vandindhold samt kombinationen af de rette tryk- og temperaturforhold og ændringer kan føre til kondensering af vand i røret ("free water"), som fører til korrosion af kulstofrør (rustfrit stål vil være mere modstandsdygtigt, men ikke økonomisk attraktivt). Opløseligheden af vand i CO<sub>2</sub> som funktion af tryk og temperatur vises i Figur 4 og som funktion af tryk og metanindhold i Figur 5 (som et eksempel på påvirkningen af urenheder på opløseligheden).

På grafen i Figur 4 kan det aflæses, at ved 30 bar vil opløseligheden falde med faktor ~3, når temperaturen falder fra 25°C til 4°C, hvilket betyder, at risikoen for frit vand tredobles. Ved 20 bar falder opløseligheden med faktor ~4 ved samme temperaturfald. Standarder (designnormer) for CO<sub>2</sub> har stort fokus på, at vandindholdet er kontrolleret for de relevante tryk- og temperaturbetingelser, og hvis temperaturforholdene er usikre, vil der typisk stilles krav til et meget lavt vandindhold.

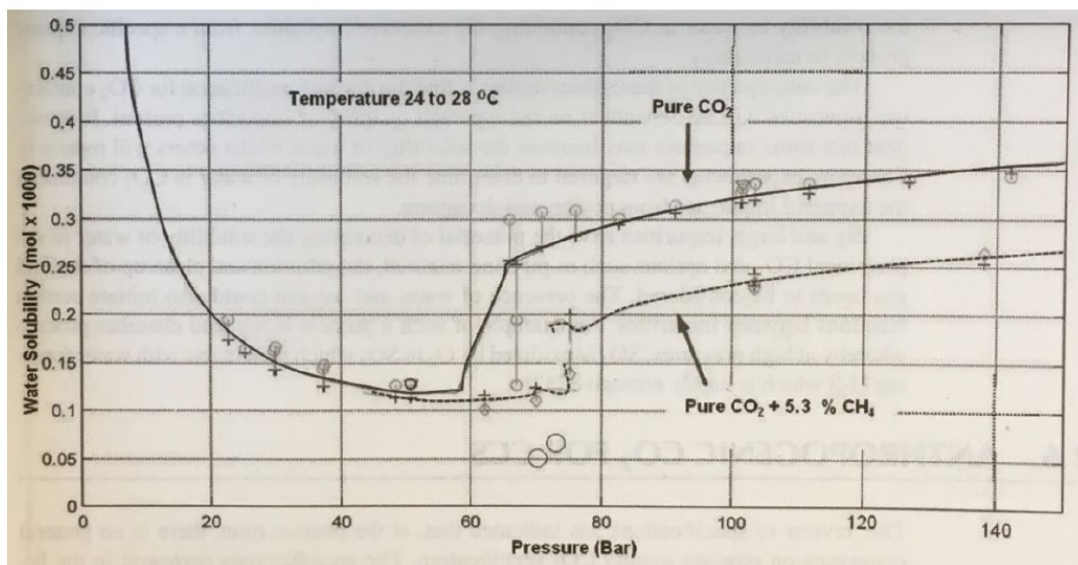
<sup>4</sup> ISO 27913 (2016) "Carbon dioxide capture, transportation and geological storage – Pipeline transportations systems"

<sup>5</sup> Quality specification for liquified CO<sub>2</sub>, Ref. <https://norlights.com/wp-content/uploads/2021/12/Quality-specification-for-liquified-c02.pdf>

Figur 4: Opløselighed af vand i CO<sub>2</sub> som funktion af tryk og temperatur<sup>6</sup>



Figur 5: Opløselighed af vand i ren CO<sub>2</sub> og CO<sub>2</sub> + 5,3 % CH<sub>4</sub> (metan)<sup>7</sup>



Kravspecifikationer påvirker omkostningerne til rensning, lagring og transport af CO<sub>2</sub>. Nogle tekniske processer vil implicit kræve en overholdelse af visse kvalitetskrav. F.eks. kan CO<sub>2</sub> ikke fordråbes og komme på flydende form, hvis vandindholdet er meget højt, eller hvis der er store mængder urenheder i en gas, som skal dannes til væske.

Vandindhold og urenheder påvirker materialevalg. Våd CO<sub>2</sub> vil føre til korrosion som før nævnt, og rør vil dermed skulle bygges i ikke-metalliske materialer eller i rustfrit stål, som medfører en signifikant stigning i pris sammenlignet med almindelige kulstofrør (rør bygget i sort stål).

<sup>6</sup> Buit, L., Ahmad, M., Mallon, W., & Hage, F. (2011). CO<sub>2</sub> EuroPipe study of the occurrence of free water in dense phase CO<sub>2</sub> transport. Energy Procedia, 4, 3056-3062.

<sup>7</sup> DNV-RP-F104 (Sep. 2021) "Design and operation of carbon dioxide"



Designnormer til fangst, håndtering, processering, transport og lagring af CO<sub>2</sub> beskriver altid krav til kvalitetskontrol. Ukontrolleret komposition af CO<sub>2</sub> indebærer for store procestekniske usikkerheder og sikkerhedsmæssige udfordringer.

### **2.1 Delkonklusion**

Krav til tørhed og indhold af svovlbrinte skal stilles til en rørført infrastruktur, da vand og svovlbrinte kan påvirke rørstålet negativt. Det skal besluttes i hvilket led i CO<sub>2</sub>-transportkæden fra punktkilde til endelig lagring/anvendelse, hvor delvis og endelig oprensning og tørring af CO<sub>2</sub> skal foregå. I og med at rørført transport og fordråbning kræver en vis grad tørhed, kan endelig tørhed med fordel opnås, inden volumen enten transporteres med rør eller fordråbes (hvis fordråbning foregår ved punktkilden). Det samme gælder rensning for svovlbrinte samt en række andre komprimerbare komponenter (inklusive partikler i røggassen). I forbindelse med fordråbning vil stort set kun ikke-komprimerbare komponenter være tilbage, som fjernes via destillation af den flydende volumen.

### 3. KENDTE KRAVSPECIFIKATIONER TIL LAGRING

Designnormer som fx ISO 27914 specificerer ikke kompositionen af CO<sub>2</sub> til underjordisk lagring, men specificerer i stedet, at CO<sub>2</sub>-kompositionen samt tryk er compatible med de geotekniske forhold<sup>8</sup>. Det vil derfor være op til det enkelte lager at specificere den compatible CO<sub>2</sub>-komposition. Eksempler på lokation-specifikke og generiske krav til CO<sub>2</sub>-lagring gives i Tabel 1.

**Tabel 1: Eksempler på CO<sub>2</sub>-komposition til underjordisk lagring**

Urenhed	Northern Lights <sup>9</sup>	CarbonNet <sup>10</sup> (delvis specifikation)	Porthos <sup>11</sup> (delvis specifikation)	ISO 27921 <sup>12</sup> (delvis specifikation)
CO <sub>2</sub>	-	> 93,5 vol%	≥ 95 %	> 95 mol%
Vand (H <sub>2</sub> O)	≤ 30 ppm	≤ 100 ppmv	≤ 70 ppm	< 200 ppmv
Ilt (O <sub>2</sub> )	≤ 10 ppm	-	≤ 40 ppm	Begrænsninger ved reservoiret
Svovloxid (SO <sub>x</sub> )	≤ 10 ppm	≤ 2000 ppm	-	< 50 ppmv
Nitrogendioxid (NO <sub>x</sub> )	≤ 10 ppm	≤ 2500 ppm	≤ 5 ppm	< 50 ppmv (NO <sub>2</sub> )
Svovlbrinte (H <sub>2</sub> S)	≤ 9 ppm	≤ 100 ppm	≤ 1%	< 200 ppmv
Carbonmonoxid (CO)	≤ 100 ppm	≤ 5000 ppm	≤ 750 ppm	< 2 mol%
Amin	≤ 10 ppm		≤ 1 ppm	
Ammoniak (NH <sub>3</sub> )	≤ 10 ppm		≤ 3 ppm	
Brint (H <sub>2</sub> )	≤ 50 ppm		≤ 0,75 %	< 0,75 mol%
Formaldehyd	≤ 20 ppm			
Acetaldehyd	≤ 20 ppm			
Kviksølv	≤ 0.03 ppm			
Cadmium (Cd) / Thallium (Tl)	sum ≤ 0.03			
Nitrat (N <sub>2</sub> )			≤ 2,4 %	< 2 mol%
Argon (Ar)			≤ 0,4%	
Hydrogencyanid (HCN)		Konkret vurdering	≤ 2 ppm	
Sum H <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> + Ar + CH <sub>4</sub> + CO + O <sub>2</sub>			≤ 4 %	
Samlet svovlbaserede komponenter (fx H <sub>2</sub> S, SO <sub>x</sub> )			≤ 20 ppm Deraf H <sub>2</sub> S ≤ 5 ppm	
Dugpunkt			< -10°C ved 20 bara	
Andre kulbrinter		≤ 0,5%	≤ 1 ppm	

<sup>8</sup> ISO 27914 (2017) "Carbon dioxide capture, transportation and geological storage – Geological storage"

<sup>9</sup> Quality specification for liquified CO<sub>2</sub>, Ref. <https://norlights.com/wp-content/uploads/2021/12/Quality-specification-for-liquified-co2.pdf>

<sup>10</sup> Development of a CO<sub>2</sub> specification for a CCS hub network, 13<sup>th</sup> International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (2016), Ref. Energy Procedia 114 ( 2017 ) 6708 – 6720

<sup>11</sup> CO<sub>2</sub> specifications, Ref. <https://www.porthosco2.nl/wp-content/uploads/2021/09/CO2-specifications.pdf>

<sup>12</sup> ISO 27921 (2020) "Carbon dioxide capture, transportation , and geological storage – Cross Cutting Issues – CO<sub>2</sub> stream composition

Urenhed	Northern Lights <sup>9</sup>	CarbonNet <sup>10</sup> (delvis specifikation)	Porthos <sup>11</sup> (delvis specifikation)	ISO 27921 <sup>12</sup> (delvis specifikation)
Alle ikke-komprimerbare komponenter				< 4 % Individuelle komponenter kan vægte højt

I dansk sammenhæng arbejdes på flere specifikationer til CO<sub>2</sub>-kvalitet, fx:

- Bifrost (CCS i den danske sektor af Nordsøen)
- Greensand (CCS i den danske sektor af Nordsøen)
- Stenlille (CCS på dansk grund)

Sammenligning på tværs af specifikationer er svær. Ikke alle specifikationer lister de samme komponenter som krav. På nogle komponenter er spændet stort mellem de lempeligste og strammeste krav, og nogle komponenter er klumpet sammen i nogle af specifikationerne, men listes enkeltvis i andre. Dette skyldes formentlig, at CCS via lagring i undergrunden er yderst eksperimentalt i dag, og at konvergens af kravspecifikationer ligger ude i fremtiden, når erfaringer er dannet. Desuden vil forskelle i geologiske forhold muligvis påvirke specifikationerne til hver enkel lokation og gøre, at den specifikke slutlagring af CO<sub>2</sub> påvirker specifikationerne til ren- og tørheden af CO<sub>2</sub>-volumen samt det tryk, som CO<sub>2</sub>'en skal have for at komme ned i undergrunden.

### 3.1 Delkonklusion

Kravspecifikationer til lagring er under udvikling. Det kan forventes, at hver slutlagerlokation vil have en unik specifikation, som afspejler de specifikke forhold (geotekniske forhold, underjordisk tryk, osv.). Kendte specifikationer i dag kan ikke sammenlignes en til en.

## 4. CO<sub>2</sub> VED FANGSTANLÆG OG KLARGØRELSE TIL TRANSPORT ELLER FORDRÅBNING

CO<sub>2</sub> kan fanges fra mange typer af kilder med forskellige teknologier (fx "adsorption", "membrane" og "cryogenic separation") samt forskellige lokationer i samme udledningsprocekskæde. CO<sub>2</sub> ved endt fangst kan dermed have flere slags urenheder og lavt/højt vandindhold, og CO<sub>2</sub>-kompositionen kan dermed variere afhængig af den specifikke fangstlokation i proceskæden. Indikativ komposition af røggassen fra et affaldsforbrændingsanlæg vises i Tabel 2.

**Tabel 2: Indikativ komposition af røggas fra et affaldsforbrændingsanlæg<sup>13</sup>**

Urenhed	Værdi
O <sub>2</sub> (vol %)	7-14
N <sub>2</sub> (vol %)	Ligevægt
CO <sub>2</sub> (vol %)	6-12
H <sub>2</sub> O (vol %)	10-18
NO <sub>x</sub> (ppmw)	200-500

Røggassen ligner den fra et kulfyret kraftværk, men CO<sub>2</sub>-fangsten vil være simplere grundet lavere svovlindhold og færre partikler. Et eksempel på CO<sub>2</sub>-kompositionen efter endt fangst fra et kulkraftværk vises på Figur 6, og ligeledes vises komposition fra et gasfyret kraftværk, som afspejler i hovedtræk CO<sub>2</sub>-fangst fra forbrænding af biogas.

**Figur 6: Indikativ komposition af CO<sub>2</sub> ved endt CO<sub>2</sub>-fangst<sup>14</sup>**

Component	Coal fired power plant			Gas fired power plants		
	Post-combustion	Pre-combustion	Oxy-fuel	Post-combustion	Pre-combustion	Oxy-fuel
Ar/ N <sub>2</sub> / O <sub>2</sub>	0.01	0.03-0.6	3.7	0.01	1.3	4.1
H <sub>2</sub> S	0	0.01-0.6	0	0	<0.01	0
H <sub>2</sub>	0	0.8-2.0	0	0	1	0
SO <sub>2</sub>	<0.01	0	0.5	<0.01	0	<0.01
CO	0	0.03-0.4	0	0	0.04	0
NO	<0.01	0	0.01	<0.01	0	<0.01
CH <sub>4</sub> +	0	0.01	0	0	2.0	0
Amines	-	-	-	-	-	-
Glycol	-	-	-	-	-	-

Grundet variationer i kompositionen af fanget CO<sub>2</sub> fra et affaldsforbrændingsanlæg, der skyldes varierende komposition af affaldet, samt de typer urenheder som typisk forekommer, vil en amine-baseret fangstteknologi være mest oplagt.

Ved endt fangst skal CO<sub>2</sub> enten fordråbes til et lager (hvor det enten transporteres videre på lastbiler eller med skib) eller gøres klar til rørført transport (som her antages at være på

<sup>13</sup> Waste-to-Energy with CCS: A pathway to carbon-negative power generation (2019). Ref. [https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/10/Waste-to-Energy-Perspective\\_October-2019-5.pdf](https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/10/Waste-to-Energy-Perspective_October-2019-5.pdf)

<sup>14</sup> DNV-RP-F104 (Sep. 2021) "Design and operation of carbon dioxide"

gasform). Uanset, så skal en vis grad af urenheder og vand fjernes. Krav til renhed afhænger af den næste fase i værdikæden.

#### **4.1 Delkonklusion**

Fangstteknologi for en given punktkilde skal tage hensyn til forventede urenheder og vandindhold og krav til næste led i CO<sub>2</sub>-transportkæden. Fx, hvis en stor koncentration af svovlbrinte findes i røggassen, så vil en fangstteknologi, som griber den allerede ved fangst, være optimal, da en rørført transport stiller implicit krav til et lavt svovlbrintindhold. Det samme gælder vand.

## 5. RØRFØRT TRANSPORT AF CO<sub>2</sub> I GASFORM

Hvis fanget CO<sub>2</sub> skal transporteres i et rør, vil det kræve en vis grad af rensning og tørring. Almindelige kulstofrør må ikke udsættes for en kombination af frit vand og CO<sub>2</sub>, da dette danner kulsyre under tryk, som korroderer røret. Dugpunktet for CO<sub>2</sub>-kompositionen for de relevante tryk- og temperaturforhold skal være kendt. Tiltag til at øge modstandsdygtigheden af kulstofrør mod korrosion findes f.eks. ved, at rørene coates indvendigt. Dog anbefales det at opnå en CO<sub>2</sub>-kvalitet, som er kompatibel med rørmaterialet, inden CO<sub>2</sub>-strømmen sendes ind i et rør.

Svovlbrinte (H<sub>2</sub>S) kan også påvirke stål negativt og influere kravene samt gøre, at røret skal være kvalificeret til såkaldt "sour service". Dette er uafhængigt af vandindholdet i røret samt sandsynligheden for, at der forekommer frit vand.

Andre fejlmekanismer kan forekomme ved f.eks. tilstedeværelse af ilt (O<sub>2</sub>) i røret – dette til trods for lavt vandindhold. På trods af at sikkerhedsstatistikken for CO<sub>2</sub> generelt betragtes som god, så er CO<sub>2</sub>-drevet korrosion ikke fuldstændig forstået, og en dedikeret materialekvalifikation anbefales, hvis frit vand ikke kan udelukkes<sup>14</sup>.

Dog findes der vejledninger til behandling af CO<sub>2</sub>-volumen for at gøre den kompatibel med rørført transport i kulstofrør, der har fokus på de laveste temperaturer, som kan forekomme, og dermed risikoen for frit vand i CO<sub>2</sub>-strømmen (overskridelse af dugpunktet). Ved hver fangstkilde skal fanget CO<sub>2</sub> derfor tørres, hvilket kan gøres i en kombineret kompression-tørre proces.

Svovl skal fjernes fra CO<sub>2</sub>'en inden transport i gasrør. Afhængigt af kilde og fangstteknologi kan en vis form for oprensning for svovl være nødvendig. Rensning kan være en dyr og energikrævende proces, hvis kravene til rørtransporten er høje, eller hvis røregenskaberne er ukendte (f.eks. hvis nuværende naturgasrør skal genanvendes til CO<sub>2</sub>-transport). Derfor anbefales det, at så meget oprensning som muligt udføres i fællesskab i forbindelse med fordråbning, mens den nødvendige oprensning for svovl håndteres af fangstoperaterne inden transport i gasform.

Det konkluderes, at specifikationer for CO<sub>2</sub> skal opstilles inden rørtransport. Vandindholdet må ikke føre til kondensering af vand i røret ved de relevante tryk- og temperaturforhold. Urenheder i CO<sub>2</sub>-strømmen skal være kendte og må ikke indeholde betydelige mængder af svovlbrinte.

### 5.1 Delkonklusion

Tørhed af rørført CO<sub>2</sub> er vigtig og afgør økonomien i rørkonstruktionen grundet påvirkning på materialevalg, men fugt kan fjernes i samme proces og kompression. Ligeledes er det væsentligt, at indholdet af svovlbrinte reduceres inden transport i rør. Øvrige indholdsstoffer anbefales at blive håndteret på fælles anlæg i forbindelse med, at CO<sub>2</sub> fordråbes.

## 6. FORDRÅBNING AF CO<sub>2</sub>

Fordrånning af CO<sub>2</sub> stiller implicite krav til kvaliteten og vandindholdet af CO<sub>2</sub>, da væskeform ellers ikke kan opnås. Urenheder øger omkostningerne ved fordrånning af CO<sub>2</sub>. Hvor meget omkostningerne øges afhænger dog af det endelige tryk, som væsken skal opnå.

Da oprensning for vand og svovl håndteres tidligt i processen, er det kun resterende oprensning som håndteres i forbindelse med fordrånning, inklusive destillation, hvor ikke-komprimerbare urenheder, fx ilt, fjernes.

Hvis volumen skal udsendes til et slutlager, vil oprensning ifm. fordrånning være til endelig kvalitet, som beskrevet af slutlagerets kravspecifikation, for både komprimerbare og ikke-komprimerbare urenheder.

Hvis volumen skal anvendes i PtX-sammenhæng vil oprensning ifm. fordrånning ikke være til endelig kvalitet. I stedet vil endelig kvalitet opnås ved yderligere oprensning ved PtX-anlægget.

### 6.1 Delkonklusion

Det vurderes som fordelagtigt at fjerne vand og svovlbrinte fra CO<sub>2</sub>-strømmen tidligt, både til at skåne rør i en rørført transport og til at simplificere fordrånning af CO<sub>2</sub> i tilfælde af, at CO<sub>2</sub> skal køres i lastbiler eller skal på et skib på væskeform og til at opfylde endelige krav til vandindhold ved slutlager.

## 7. STANDARDER OG SPECIFIKATIONER SOM OMKOSTNINGSDRIVERE

Tre hovedaspekter af standarder og kravspecifikationer som omkostningsdrivere er:

1. Krav til komposition af CO<sub>2</sub> under transport via rør
2. Krav til komposition af CO<sub>2</sub> under transport via lastbil
3. Krav til komposition af CO<sub>2</sub> under transport via skib
4. Krav til endelige komposition af CO<sub>2</sub> (fx til slutlager på land og PtX-anvendelse)

De to sidstnævnte aspekter kan sammenlægges, da det forventes, at CO<sub>2</sub> under skibstransport er transport til endelig destination og CO<sub>2</sub> i endelig kvalitet.

### 7.1 Krav til komposition af CO<sub>2</sub> under transport via rør i gasform

Dugpunktet for CO<sub>2</sub> skal være lavere end det, som forventes af driften, samt under et moderat tryk. Dette kan gøres forholdsvis omkostningseffektivt via en fælles tørre-komprimeringsproces, hvor CO<sub>2</sub>-volumen derefter renses med aktivt kul og derved bliver ren for svovlbrinte, partikler og vand.

Prispåvirkningen ved at fjerne vand til endelig kvalitet frem for kun at opnå et bestemt dugpunkt (fx -10°C) samt rensning for svovlbrinte er ikke estimeret i dette studie (vil kræve mere detaljeret design), men vurderes ikke at ændre radikalt på prisen ved kun at køre komprimering og tørring til et bestemt dugpunkt (uden rensning).

### 7.2 Krav til komposition af CO<sub>2</sub> under transport via lastbil

Lastbiltransport af CO<sub>2</sub> fra punktkilden sker med CO<sub>2</sub> i flydende form, og tørring, rensning og fordråbning sker ved punktkilden med tilhørende investering. Fordråbning er en energikrævende proces, som efterlader en del overskudsvarme. Rensning til en meget høj renhed af CO<sub>2</sub> fra forskellige typer af kilder kræver, at urenheder fra disse kilder tages i betragtning.

Alle komprimerbare urenheder skal være fjernet til endelig kvalitet inden fordråbning. Ikke-komprimerbare urenheder renses ifm. fordråbning.

Hvis volumen transporteres til havn og derefter udskibes til slutlager, skal endelig kvalitet opnås ved punktkilden for at undgå yderligere behandling af volumenet.

Hvis volumen transporteres til et PtX-anlæg, kan volumen enten være på endelig kvalitet eller ej. Hvis ikke den er, så står PtX-anlægget for den sidste tørring og oprensning.

### 7.3 Krav til komposition af CO<sub>2</sub> i endelig kvalitet under skibstransport

Skibstransport af CO<sub>2</sub> sker med CO<sub>2</sub> i flydende form. Alle komprimerbare urenheder skal være fjernet til endelig kvalitet inden fordråbning. Ikke-komprimerbare urenheder renses op til endelig kvalitet ifm. fordråbning. Tørring til endelig kvalitet skal være opnået inden skibstransport.

Skibstransport til endelig destination vil dermed være med CO<sub>2</sub> i endelig kvalitet.

Fordråbning er en energikrævende proces, som efterlader en del overskudsvarme. Rensning til en meget høj renhed af CO<sub>2</sub> fra forskellige typer af kilder kræver, at urenheder fra disse kilder tages i betragtning. Samme anbefalinger givet for lastbilstransport, gives for skibstransport.



## 8. KRAV TIL STANDARDER OG SPECIFIKATIONER

Eksisterende og forventede standarder og specifikationer i forhold til lagring, anvendelse og transport identificeres i dette afsnit, samt i hvilken grad de gælder globalt, lokalt eller mellem afsender/modtager af CO<sub>2</sub>.

Behovet for standarder og specifikationer for en CO<sub>2</sub>-værdikæde fra fangst til endelig lagring kan potentielt stamme fra flere begrundelser:

- Afsender eller modtager ønsker mindst mulig drift af tekniske anlæg til håndtering af CO<sub>2</sub> (tørring, rensning, fordråbning, osv.)
- Afsender eller modtager ønsker enten at drive en forretning i at håndtere, tørre, rense eller lagre CO<sub>2</sub> eller at spare sig omkostningerne ved at lade andre gøre det
- Tekniske begrænsninger på udstyr (rør, tanke, pumper, osv.) ifm. kvaliteten af CO<sub>2</sub>

Som beskrevet tidligere minimeres omkostningerne, hvis oprensning foretages så tæt på slutdestinationen som muligt, da der hermed kan opnås mængdefordele (economy of scale), samt at man ikke oprenser CO<sub>2</sub>, som ikke behøves at blive oprenset. Derfor anbefales det, at der anvendes forskellige standarder og specifikationer for indholdsstoffer i de forskellige led af CO<sub>2</sub>-værdikæden.

### 8.1 Krav for rørført CO<sub>2</sub>

Som nævnt kræver rørført transport af CO<sub>2</sub> i gasform en vis renhed, og standarder vil derfor gælde lokalt eller mellem afsender og modtager af CO<sub>2</sub> samt ejer af rørene. Grundreglen er, at dugpunktet for CO<sub>2</sub> er lavere end forventede temperaturforhold for CO<sub>2</sub> for at undgå frit vand. Afsender og modtager skal desuden blive enige om tilstrækkelig CO<sub>2</sub>-kvalitet. Dette studie antager, at CO<sub>2</sub> leveres "klar til rørtransport", og at omkostninger ifm. rensning og tørring ikke medtages.

Sikkerhedsmæssige begrundelser kan føre til krav til standarder, men disse vurderes at blive fastlagt af myndigheder eller være regulatoriske krav.

### 8.2 Krav for flydende CO<sub>2</sub>

Flydende CO<sub>2</sub> anvendes i lastbiler og på skibe. Indholdsstoffer skal fjernes fra CO<sub>2</sub> for, at den omkostningseffektivt kan gøres flydende og transporteres på skib/lastbil. De forskellige rederier, vognmænd og offshore lageroperatører forventes at stille forskellige krav til indholdsstoffer, som den flydende CO<sub>2</sub> skal overholde. Der findes ikke en fælles standard for transport af CO<sub>2</sub> i flydende form. Hvis flere rederier skal anvende samme havneinfrastruktur, vil de enten skulle blive enige om en fælles standard eller have separate mellemlagre i havneområdet. Alternativt skal oprensning til laveste fællesmængde, hvilket kan være omkostningsdrivende.

### 8.3 Konklusion

Efterfølgende skitse over transportkæden fra kilde til slutlager samt krav til hvert trin opsummeres i Tabel 3.

Tabel 3: Anbefalinger til krav i forskellige led i transportkæden

Led i transportkæden	Krav til vand, partikler og svovlbrinte	Krav til ikke-komprimerbare urenheder (fx ilt)
CO <sub>2</sub> fangst	Fangstteknologi til de forventede urenheder fra røggassen vælges til minimering af urenheder	Fangstteknologi til de forventede urenheder fra røggassen vælges til minimering af urenheder
Rørført transport af CO <sub>2</sub> i gasform	Tørring til endelig kvalitet ifm. komprimering. Aktivt kul til filtrering til endelig kvalitet af svovlbrinte	
Fordråbning	Rensning til endelig kvalitet, herunder bl.a. partikler, kulbrinter m.v.	Destillation ifm. fordråbning, som fjerner ikke-komprimerbare urenheder (fx ilt)
Superkritisk transport	Ingen krav udover krav til rørført transport på lavere tryk	Ingen krav ud over krav til rørført transport på lavere tryk

Hvis en del af CO<sub>2</sub>-volumen skal bruges til PtX, fx til produktion af metanol, vil det være PtX-operatøren som står for endelig oprensning (fx til 99,99 % renhed).

Krav fra slutlagret til komprimerbare og ikke-komprimerbare urenheder ud over vandindhold og svovlbrinte skal opfyldes via rensning ved lagret, og ansvaret ligger hos lageroperatøren.