



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Den maritime næringens tilnærminger til design av CO₂-skip



Bacheloroppgave utført ved

Høgskolen Stord/Haugesund nautisk utdanning

Av: Gaute Losnegård

Kandidatnummer: 23

Dette arbeidet er gjennomført som ledd i bachelorprogrammet i nautikk ved Høgskolen Stord/Haugesund og er godkjent som sådan. Godkjennelsen innebærer ikke at HSH innestår for metodene som er anvendt, resultatene som er fremkommet og konklusjoner og vurderinger i arbeidet.

Bacheloroppgavens tittel: Den maritime næringens tilnærming til design av CO₂-skip

Gaute Losnegård

Navn på veileder: Sverre Fagerland

Gradering: *Offentlig.*

Forord

Takk til Hans Richard Hansen og Geir Fridtjof Foldøy i Teekay, Jostein Bjorkan Vaagland i Rederiforbundet og Fredrik Platou i Sintef for hjelp til å finne stoff som er brukt til oppgaven, og ikke minst til min veileder Sverre Fagerland som har kommet med mange nyttige innspill.

Arbeidet med oppgaven hadde sin spede begynnelse i høstsemesteret 2010, men hovedvekten av arbeidet har foregått i månedene fra januar til mai 2011. Arbeidet har ikke vært tilknyttet en spesiell bedrift eller organisasjon, men har fått innspill fra flere parter i næringen.

Det har vært lærerikt å jobbe med denne oppgaven. Det har gitt meg innsikt i hvordan CO₂-skip fungerer og om hvordan de forskjellige bedriftene og organisasjonene som jobber med utvikling av denne typen skip ser for seg at de skal designes.

*Forsidebildet (Figur 1) er av skipet "Yara Gas 1" eid av rederiet Larvik Shipping A/S.
(Larvik Shipping AS)*

Haugesund, 14.05.2011

Gaute Losnegård

Sammendrag

Problemstillingen for denne oppgaven var "Hvilke tilnærminger har den maritime næringen til design av CO₂-skip?". For å finne svar på dette ble rapporter analysert og sammenlignet. Skip kan brukes til frakt av CO₂ fra fangst- til lagringsstedet. Kildene kan være for eksempel kullkraftverk, stålverk eller petrokjemiske anlegg. Man kan bruke gamle hydrokarbonreservoarer til lagring. Per dags dato finnes det kun små skip som frakter CO₂-gass, men skip til bruk i storskalatransport er under utvikling. Disse har få fellestrekk med eksisterende skip som frakter denne typen gass. Prosjektene er en "mellomting" mellom dem og skipene som i dag blir brukt til frakt av LPG/LNG. En direkte oppskalering av dagens CO₂-skip ville fungert dårlig da dette gir for tunge lastetanker. Dermed er man nødt til å la seg inspirere av LPG-/LNG-skipenes design.

Forkortelser og forklaringer

CO₂: Karbondioksid. Går fra væske- til gassform ved -79°C. Ikke brennbar. Virker som et drivhustak som hindrer for stor utstråling av varme fra jordoverflaten. (Caplex, karbondioksid)

LNG: Liquified Natural Gass (flytende naturgass). Går fra væske til gassform ved -163°C. (Caplex, LNG)

LPG: Liquified Petroleum Gas (flytende petroleumsgass) Går fra væske til gassform ved -43°C. (Caplex, propan)

Superkritisk fase: det trykket og den temperaturen hvor fasegrensen mellom gass og væske opphører å eksistere. (Mathisen, 2010)

Submerged Turret Loading (STL): En bøye er plassert under vann og holdt i posisjon av ankere (typisk 8 stk). Tankbåten kan heise denne bøyen inn i et hulrom under baugen. Den delen av bøyen som er koblet til tankbåten kan rotere fritt i forhold til den nedre delen av bøyen, slik at tankbåten kan legge seg opp mot været. (Chezhia, 2008)

Single Anchor Loading (SAL): Et stigerør og en ankertrasse blir heist opp i tankskipet fra havbunnen. På havbunnen er dette festet til en fritt roterende konstruksjon som blir holdt i posisjon av ett anker. Dette gjør at båten kan rotere fritt og legge seg opp mot været. Den kan holdes på plass av ankeret på havbunnen, slik at det ikke er behov for fremdrift på skipet. (National Oilwell Varco)

Trippelpunkt: Den temperaturen og det trykket der et stoff kan eksistere i både fast, flytende og gassform. (Store Norske Leksikon)

Semi-ref: Et skip som benytter seg av tanktrykk over atmosfæretrykk og temperaturer lavere enn omgivelsene for å holde lasten flytende.

Innholdsfortegnelse

FORORD	III
SAMMENDRAG.....	IV
FORKORTELSER OG FORKLARINGER.....	V
INNHALDSFORTEGNELSE	VI
1. INNLEDNING	1
1.1 BAKGRUNN FOR VALG AV PROBLEMSTILLING	1
1.2 PROBLEMSTILLING OG FORMÅL MED UNDERSØKELSEN.....	2
1.3 GENERELL INNFORING I TEMAET	2
2. METODE.....	4
2.1 METODEPRESENTASJON.....	4
2.2 METODEVALG.....	4
2.3 BEGRUNNELSE FOR METODEVALG	4
2.4 BEGRENSNINGER I METODEN	5
2.5 VALIDITETS- OG RELABILITETSPROBLEMER	5
2.6 RAMMER FOR ARBEIDET	6
2.7 DELKONKLUSJON	6
3. TEORI	7
3.1 UTVALG AV TEORI.....	7
3.1.1. <i>Hvilke kilder er valgt, og hvorfor akkurat disse?.....</i>	<i>7</i>
3.1.2. <i>Hvordan har jeg funnet fram til materialet?</i>	<i>9</i>
3.2. PRESENTASJON AV UNDERSØKELSER.....	9
3.2.1. <i>Historisk tilbakeblikk.....</i>	<i>9</i>
3.2.2. <i>Ship Transport of CO₂: Technical Solutions and Analysis of Costs, Energy Utilization, Exergy Efficiency and CO₂ Emissions</i>	<i>10</i>
3.2.3. <i>Ship Based transport of CO₂.....</i>	<i>13</i>
3.2.4. <i>Design of a large scale CO₂ carrier for Carbon Capture and Storage.....</i>	<i>14</i>
3.2.5. <i>Ship Transport of CO₂.....</i>	<i>17</i>
3.2.6. <i>Eksisterende skip</i>	<i>20</i>
3.3 DELKONKLUSJON	21
4. ANALYSE	22

4.1 LIKHETER OG FORSKJELLER MELLOM TIDLIGERE FORSKNING.....	22
4.2 FORKLARING AV FORSKJELLER	24
5. DRØFTING	26
6. KONKLUSJON.....	28
7. LITTERATUR	30

1. Innledning

De siste årene har regjeringens månelanding, fangst og lagring av karbondioksid (CO₂) på Mongstad, fått enorm oppmerksomhet i mediene. Hva skal vi gjøre med denne gassen når den en gang blir fanget? Og hva med andre steder i verden der slike prosjekter blir realisert? En løsning på dette kan være å frakte den med skip til hydrokarbonreservoarer til sjøs, deriblant i Nordsjøen. Med riktige forutsetninger gir dette trygg lagring på steder som ellers har begrensede bruksområder.

I denne rapporten viser jeg hvordan et skip som frakter CO₂ fungerer og opereres. Du vil også få innblikk i hvordan de på mange måter kan sammenlignes med skip som blir brukt til frakt av flytende naturgass og propangass (LNG- /LPG-skip). Hvis den politiske viljen til å få i gang fangst av CO₂ er stor nok, kan dette bli en relativt vanlig skipstype, og kan sysselsette sjøfolk i fremtiden.

Jeg har arbeidet ut fra problemstillingen "Hvilke tilnærminger har den maritime næringen til design av CO₂-skip?". For å finne svar på dette spørsmålet har jeg studert rapporter som i hovedsak er fra forskningskonsernet Sintef, energiselskapet Statoil, rederiet Teekay, og skipsbygger/-designer Mitsubishi Heavy Industries.

1.1 Bakgrunn for valg av problemstilling

Grunnen til at jeg ville ta for meg denne problemstillingen var at jeg leste en artikkel i Stavanger Aftenblad i begynnelsen av 2009. Den omtalte CO₂-lagring i gamle oljereservoar som Norges nye oljeeventyr (Stavanger Aftenblad, 2009). Dette, sammen med regjeringens ambisiøse planer om å få til CO₂-rensing på Mongstad, gjorde at jeg hadde lyst til å utforske hvilke bindeledd mellom fangst og lagring som er aktuelle med dagens teknologi.

Det finnes per dags dato to reelle alternativ for frakt av gass til sjøs, enten via rørledning eller med skip. Mest relevant for min utdanning er å se på skipsalternativet. Arbeidet med denne oppgaven har gitt meg innsikt i hvordan disse skipene, som muligens kan bli en vanlig arbeidsplass for nautikere i fremtiden, fungerer. Uansett om skipene blir en realitet, har arbeidet med denne oppgaven lært meg mye om skip som frakter gass.

1.2 Problemstilling og formål med undersøkelsen

Formålet med denne undersøkelsen er å finne ut om forskning på området er enstemmig, og om rederiene og forskerne som holder på med utvikling av konsepter for storskala CO₂-transport med skip har kommet frem til noe som avviker fra tidligere forskningsresultater. Problemstillingen som er valgt er "Hvilke tilnærminger har den maritime næringen til design av CO₂-skip?"

1.3 Generell innføring i temaet

I en stadig mer miljøbevisst verden ser man etter nye løsninger som kan bidra til å få bukt med klimaproblemene vi står overfor. CO₂ (karbondioksid) har blitt utpekt som den største synderen når det kommer til global oppvarming, og det forskes på forskjellige tilnærminger for å redusere utslipp av denne gassen. I to rapporter (M. Barrio, 2004) (A. Aspelund, 2006) står fangst og lagring av karbondioksid frem som et effektivt og hensiktsmessig alternativ. Denne oppgaven skal ta for seg skipene som blir brukt i mellomledet mellom disse prosessene, altså selve transporten av oppsamlet gass til stedet den skal injiseres.

GESTCO (European Potential for the Geological Storage of CO₂) –prosjektet estimerer at mer enn 750 millioner tonn CO₂ slippes ut i atmosfæren hvert år av industri i relativ nærhet av Nordsjøen, så det er dermed liten tvil om at potensialet for CO₂-fangst er enormt (Carbon Capture Journal, 2010). Teknologien for dette er fortsatt i startgropen, men er under stadig utvikling. Den 17. november 2010 publiserte Siemens en pressemelding om at de hadde fullført et pilotprosjekt for CO₂-fangst i et kraftverk i Staudinger, Tyskland. (Siemens, 2010)

Tilsvarende CO₂-fangst er også planlagt ved gasskraftverket på Mongstad (Technology Centre Mongstad, 2010) og er allerede på plass ved kullkraftverket i Meri-Pori, Finland. (Carbon Capture Journal, 2010)

Felles for disse anleggene og teknologien som brukes er at man fanger opp gassen før den slippes ut i atmosfæren. Når gassen så er fanget, kan den brukes i industrien

(Technology Centre Mongstad, 2011) eller lagres. Lagringen kan foretas på land eller ved at gassen injiseres i havbunnen.

Man kan bruke gamle hydrokarbonreservoarer til dette, eventuelt kan man bruke gassen til såkalt EOR (Enhanced Oil Recovery) på felt som fortsatt er i produksjon. Sistnevnte går ut på å injisere gassen i reservoaret for å øke viskositeten til hydrokarbonene man prøver å få opp, slik at strømmen i reservoaret flyter lettere. Dette gir økt utvinningsgrad og produksjon, noe som forbedrer oljefeltets med så mye som 7-15% i følge rapporten "CO₂ as Injection Gas for Enhanced Oil Recovery and Estimation of the Potential on the Norwegian Continental Shelf" (Mathiassen, 2003). Dette gjør at operatørene på feltene er villig til å betale for gassen som skal brukes til EOR, slik at dette kan brukes som et springbrett for å få i gang storskalatransport av CO₂ med skip.

Transport av CO₂ kan, som nevnt tidligere, foregå via rørledninger eller via tankskip. En rørledning vil være den mest økonomiske og minst kompliserte løsningen for kortere distanser, men gir ingen fleksibilitet i forhold til å betjene ulike produksjonssteder eller reservoar. Det er her skip kommer inn som et kulant alternativ. En slik løsning vil kunne gi nødvendig fleksibilitet i en tidlig fase der man frakter relativt små volumer gass fra forskjellige opphavssteder til reservoar.

I neste kapittel vil jeg presentere metoden som er brukt for å finne svar på problemstillingen, hvorfor akkurat denne ble valgt, samt hvilke begrensninger dette har lagt på oppgavens innhold.

2. Metode

2.1 Metodepresentasjon

I dette kapitlet vil det begrunnes hvorfor valgte metode er brukt for å samle inn informasjon om emnet. Det vil også drøftes hvilke fordeler og ulemper som knytter seg til bruk av denne metoden.

Kildene til oppgaven har bevisst blitt samlet inn fra forskjellige deler av næringen for å få et mest mulig nyansert syn på design av denne typen skip.

2.2 Metodevalg

Denne undersøkelsen er ikke basert på primærdata, men har støttet seg på sekundærdata. Dette er data som allerede er samlet inn, og er publiserte resultater fra forskning som allerede er utført. (Riksrevisjonen, 2006)

Innsamling av sekundærdata kan foregå på to måter, enten ved dokumentstudier eller ved å se på registerdata og statistikk. Datainnsamling til denne oppgaven har foregått ved dokumentstudier. Ved uklarheter, og der det følte naturlig å supplere med mer informasjon, har spørsmål blitt stilt til forfatteren av den aktuelle rapporten.

I jakten på informasjon har det fremgått at det er få som besitter ekspertise på dette området. Derfor var det ikke naturlig å bruke for eksempel en spørreundersøkelse for å finne svar på problemstillingen. I stedet har enkelte eksperter blitt kontaktet.

Henvendelsene har stort sett blitt møtt med velvillighet, og i stedet for å kun svare stykkevis på enkeltspørsmål, har forskerne oversendt rapporter og undersøkelser som de selv har utført. Disse har vært svært utfyllende, og det har i liten grad vært nødvendig å stille tilleggsspørsmål.

2.3 Begrunnelse for metodevalg

Fordelene med å bruke sekundærdata er at de er relativt lett tilgjengelige, og at man slipper å bruke tid på utforming, gjennomføring og bearbeiding av intervju/spørreundersøkelse.

Dokumentstudier virker relevant for denne utdanningen fordi nautikere vil bli nødt til å sette seg inn i systemer, oppgaver og annen informasjon relevant for det daglige arbeid, blant annet ved å lese rapporter. En stor del av arbeidsdagen til en nautiker går også med til papirarbeid, og ved å sette seg inn i hvordan profesjonelle rapporter skrives kan man lære å uttrykke seg på en oversiktlig og presentabel måte.

Ved valg av metode skal man grovt sett velge mellom kvalitativ og kvantitativ metode. Der kvantitativ metode baserer seg på spørreundersøkelser og data fra et stort antall kilder, er den kvalitative metoden vanligvis basert på færre kilder, som for eksempel ekspertuttalelser. Da informasjonen brukt i oppgaven er hentet fra forskjellige personer og organisasjoner, og formålet var å holde undersøkelsen mest mulig kvalitativ, var det nødvendig å være kritisk til kildene.

Da jeg fant et ganske utfyllende svar på problemstillingen med dokumentstudier alene, var det lite å hente på å utføre dybdeintervjuer i tillegg. Etter å ha snakket med forfatterne av rapportene, har det kommet frem at kunnskapen de besitter om temaet er å finne i den publiserte forskningen. Det har kun vært nødvendig med enkelte mindre spørsmål for å belyse sider ved forskningen som var vanskelig å sette seg inn i, eller som virket uklare ved analyse av rapporten.

2.4 Begrensninger i metoden

Det har vært bevisst fra min side å kun kontakte rederier som allerede driver innen gassfrakt. Dette for å få informasjon fra rederier med erfaring på området, og som kan tenkes å utvikle et solid konsept også for frakt av CO₂.

2.5 Validitets- og relabilitetsproblemer

Bruk av sekundærdata har sine ulemper. Dataene er innsamlet av forskere som har arbeidet ut i fra forskjellige problemstillinger enn den som er gjeldende for denne oppgaven. Det er også viktig å se kritisk på rapportene. Motivene for å skrive dem, og måten dataene presenteres på, kan være ensidig. Disse motivene kan for eksempel være økonomiske. Man kan ha fått oppdraget om å skrive rapporten fra en bedrift som ønsker å selge/promotere sitt produkt, eller som ønsker å sette sin forskning i et godt lys.

Min tolkning av hva som er skrevet i en rapport er også et svakt ledd når det gjelder bruk av sekundærdata. Målet har vært å, så langt som mulig, prøve å holde tolkningen objektiv. Ved uklarheter har forfatteren av rapporten blitt kontaktet.

Det har også vært en del arbeid med å sile ut hvilken informasjon i rapportene som er relevante for oppgavens problemstilling. Rapportene er i og for seg svært omfattende, og har omhandlet mer enn bare det som trengtes av opplysninger.

2.6 Rammer for arbeidet

Siden dokumentstudier ble valgt som metode, kan det tenkes at informasjonen som har vært mulig å hente er begrenset i forhold til hvilke syn forskerne har på de forskjellige områdene. Etter å ha vært i kontakt med rapportforfatterne, var inntrykket at den kunnskapen de hadde som var relevant for min problemstilling, var formidlet gjennom det de hadde skrevet.

2.7 Delkonklusjon

Dette avsnittet vil bli brukt til å gi en kort oppsummering av metodekapittelet. Stoff til oppgaven har blitt funnet gjennom bearbeiding av rapporter som er skrevet av eksperter på området. Der det har vært uklarheter har jeg henvendt meg til rapportforfatterne. Hverken spørreundersøkelse eller dybdeintervju ble funnet nødvendig å bruke, da et tilfredsstillende svar på problemstillingen ble funnet ved bearbeiding av dokumentstudier.

Neste kapittel tar for seg eksisterende teori på området. Den delen av oppgaven er disponert for å gi en oversiktlig presentasjon av hva som allerede er kjent på området. Kapittelet gir først en kort gjennomgang av hvilke kilder som er brukt, og hvorfor disse er valgt. Deretter vil du få presentert et historisk tilbakeblikk før innholdet i hver rapport beskrives.

3. Teori

3.1 Utvalg av teori

3.1.1. Hvilke kilder er valgt, og hvorfor akkurat disse?

Det er meg bekjent ingen som har skrevet bøker om emnet, men det har blitt utført en del forskning på området som er publisert gjennom rapporter og artikler. Jeg har valgt å bruke fire av disse rapportene sammen med stoff hentet fra nøyte utvalgte internettkilder.

Rapporten "Ship Transport of CO₂: Technical Solutions and Analysis of Costs, Energy Utilization, Exergy Efficiency and CO₂ Emissions" fra 2006 er skrevet av A. Aspelund og M. J. Mølnvik fra Sintef og G. De Koeijer fra Statoil. "Ship-based transport of CO₂" er en rapport fra 2004. Den er skrevet av M. Barrio m. fl. fra Sintef, T.E. Sandvik m. fl. fra Vigor og S.I. Eide fra Statoil.

Rapportene gir utfyllende informasjon om forskningsmetodene som er brukt, noe som er med på å understreke validiteten i resultatene. De er også samlet i sine konklusjoner om emnet. Som et eksempel har Sintef-rapporten fra 2006 brukt prosess- og logistikkmodellering for å evaluere gassens transportkjede med simuleringsverktøyet ProVision. De har også foretatt en gjennomførbarhetsstudie, og resultatene av denne har blitt evaluert som et konsept. Kostnads kalkylene er basert på priser oppgitt av utstyrsleverandører og skipsverft. For å måle alternativene opp mot hverandre har man analysert transportert mengde, distanser og sammensetning av gassen fra de ulike opphavsstedene. Risikovurdering og analyser av potensielle farer er også foretatt.

Dette er to vitenskapelig begrunnede artikler skrevet av eksperter på feltet. Man kan anta at de er skrevet med et relativt upartisk syn da hovedvekten av forfatterne er ansatt av Sintef. Sintef er Skandinavias største uavhengige forskningskonsern og er en ikke-kommersiell virksomhet. Med det menes at inntektene fra forskjellige forskningsoppdrag går til investering i ny forskning, utstyr og kompetanse. 90% av Sintefs inntekter kommer fra oppdrag for næringsliv, offentlig forvaltning og fra prosjektbevilgninger gitt av Norges forskningsråd. 8% av inntektene kommer fra basisbevilgninger fra Forskningsrådet. (Sintef, 2010)

På den annen side kan det påpekes at Sintef får sine forskningsoppdrag fra klienter, og at disse muligens kan påvirke undersøkelsene på forskjellig vis. Dette gir grunn til å vurdere disse rapportene kritisk.

Likevel er disse to rapportene blitt brukt som grunnlag for oppgaven, ettersom de er de mest uavhengige undersøkelsene som er gjort på området. De har fått en større vektning enn for eksempel stoffet publisert av rederier eller skipsbyggere, fordi disse er aktører som til syvende og sist skal selge et produkt.

Stoffet som er skrevet om emnet er av relativt ny dato. Den eldste artikkelen (som) jeg har støttet mitt arbeid på er fra 2004, og den nyeste er publisert i 2009. Disse har blitt supplert med stoff hentet fra artikler på internett. Totalt sett presenterer denne oppgaven et relativt oppdatert bilde av hvor forskningen på området ligger.

Rapporten "Ship Transport of CO₂" er publisert av The International Agency Greenhouse Gas Research and Development Programme og er produsert av Mitsubishi Heavy Industries (MHI) Ltd. i Japan på oppdrag fra disse. Hele kjeden som er nødvendig for å produsere, transportere og lagre CO₂ er med i denne omfattende rapporten. Kun informasjon som er relevant for problemstillingen i denne oppgaven er beskrevet her. Da rapporten ble publisert hadde MHI drevet forskning på fangst og lagring av CO₂ i 10 år, og bygget skip for frakt av LPG siden 1962, og LNG siden 1983. Dette gjør at de har et godt grunnlag for å forske på emnet, ettersom de har ekspertise innen de involverte fagfeltene.

De har, vel å merke, en kommersiell interesse på området, da de kan få i oppdrag å bygge skip for frakt av CO₂ i fremtiden. Rapporten har derfor blitt vurdert kritisk.

"Design of a large scale CO₂ carrier for Carbon Capture and Storage" er en presentasjon holdt av Hans Richard Hansen i rederiet Teekay. Denne formidler rederiets syn på transport av CO₂, noe som er viktig å få med da de representerer den næringen som til syvende og sist skal drifte skipene og utføre transportoppdragene. Rederiet har lang erfaring med gasstransport, noe som gir dem et godt grunnlag for å utvikle et konsept for transport av CO₂. I 2007 fikk de i oppdrag av Gassco å studere kostnadene knyttet til transport av CO₂. (Teekay Corporation, 2007)

3.1.2. Hvordan har jeg funnet fram til materialet?

For å finne frem til Sintefs to rapporter, har forskerne som arbeider der blitt kontaktet. Kontaktinformasjonen deres ble funnet på Sintefs sider for CO₂-transport (Sintef, 2009). Rapporten fra Mitsubishi ble tilsendt av Rederiforbundet, mens Teekays bidrag ble sendt av en av deres tidligere ansatte.

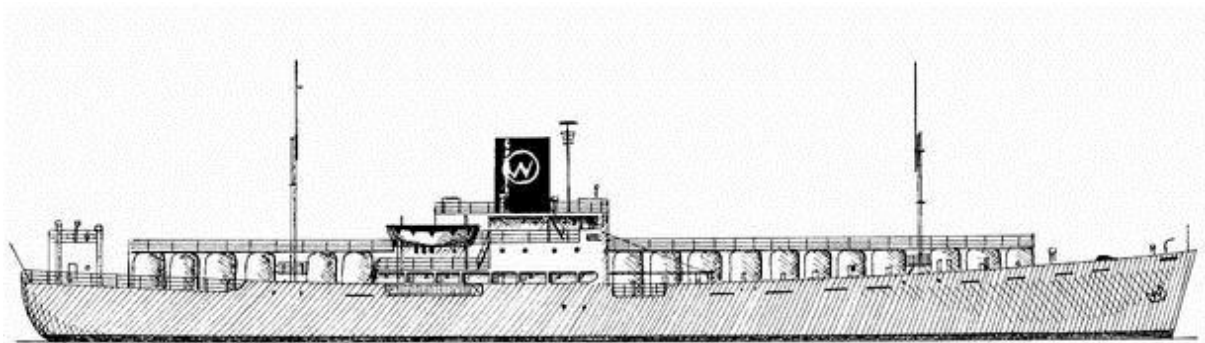
Utover disse artiklene har informasjon blitt funnet på internett. HSH-bibliotekets database inneholdt ingen relevant informasjon om temaet, og det finnes, meg bekjent, heller ingen bøker skrevet om emnet.

3.2. Presentasjon av undersøkelser

3.2.1. Historisk tilbakeblikk

Transport av gass til sjøs hadde sin spede begynnelse da man begynte med transport av gass i trykktanker. Tidlig på 1940-tallet ble den første LPGen fraktet fra Mexicogolfen til Brasil. Dette var om bord på et linjeskip som hadde tanker montert på dekk.

Skipet "Nathalie O. Warren" ble bygd om fra et konvensjonelt lasteskip til å få sylindervermede trykktanker i 1947, og var dermed det første skipet som ble spesialutrustet for frakt av LPG.



Figur 2: "Nathalie O. Warren". (United States Maritime Commission, 2009)

På 50-tallet tok handelen mellom Mexicogolfen og Sør-Amerika/Europa seg opp, og i 1953 ble det første skipet som var spesialbygd for frakt av LPG satt i drift. Dette var skipet "Rasmus Tholstrup" som oppbevarte gass i tolv sylindervermede tanker, kun ved

hjelp av trykk. Det var først i 1959 at Gazocean utviklet et skipsdesign som benyttet seg av både nedkjøling og trykksetting av gassen. I 1962 bygde man den første tankbåten som benyttet seg av dette. Den kunne frakte 28 875 m³ LPG, og var den første som ble bygd med frittstående og fullt isolerte tanker. (Teekay Corporation, 2010)

I 1964 ble skipet "Methane Princess" satt i drift. Det var eid av selskapet Conch International Maritime og betjente transport av LNG mellom Algerie og Canvey Island. Hun kunne frakte 27 400m³ i sine 9 tanker. (Michael D. Tusiani, 2007)

På 70-tallet begynte utviklingen av de lengre transportrutene, i første omgang til Japan. Dette skapte et behov for større skip for å gjøre turene mer lønnsomme, og i 1977 ble verdens første Very Large Gas Carrier (VLGC) bygd. Den ble døpt "Monge". I det kommende tiåret ble gassmarkedet stadig mer globalisert, noe som førte til at man på 90-tallet ekspanderte verdens VLGC-flåte. I det siste har man gått bort fra å øke størrelsen på skipene, og streber i stedet etter å bygge dem mer miljøvennlige, effektive og lønnsomme i drift. (Teekay Corporation, 2010)

3.2.2. Ship Transport of CO₂: Technical Solutions and Analysis of Costs, Energy Utilization, Exergy Efficiency and CO₂ Emissions

Rapporten fra 2006 er skrevet av A. Aspelund og, M. J. Mølnvik fra Sintef og G. De Koeijer fra Statoil.

I følge rapporten er det nåtidens fokus på sikkerhet, fleksibilitet, pålitelighet og kostnadsbesparelser som har skapt behovet for nye løsninger som kan konkurrere med transport i rørledninger.

De kildene som leverer den reneste CO₂en er ammoniakkfabrikker og raffinerier. Den gjennomsnittlige gassmengden produsert av disse er i størrelsesorden 1-1,5 million tonn årlig. Dette tilsier at man trenger å hente gass fra flere slike steder for å fylle kapasiteten til et enkelt reservoar.

Da rapporten ble skrevet ble flytende CO₂ produsert flere steder i verden, men da i hovedsak for bruk i matvareindustrien. Det europeiske markedet hadde da et årlig forbruk på 3 000 tonn. Denne CO₂en ble komprimert til transporttrykk, renses for uønskede partikler, tørket og gjort flytende.

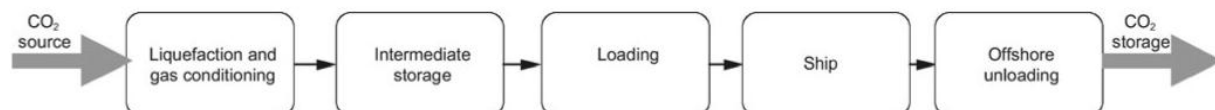
Gassen blir også brukt til EOR flere steder i USA, men dette er enda ikke brukt i offshoreproduksjon på tross av mulighetene dette gir for større utvinningsgrad. Dette betyr i følge rapporten at teknologi for lossing til havs må utvikles.

Yara blir i rapporten trukket frem som et eksempel på selskap som leverer gass med skip i Nord-Europa. Disse drives av Larvik Shipping AS. Gassen lagres om bord i tanker med en total lastekapasitet på 1000-1500 m³ og ved trykk på 14-20 bar. Metoden vil ikke fungere på større skip ettersom tankene i disse rommer mer. Tankene kan dermed ikke holde på samme trykk uten at dimensjoneringen blir uhensiktsmessig. Med det menes at tankenes vegger måtte vært så tykke for å sikkert oppbevare lasten, at tankene i seg selv ville utgjort en stor del av skipets egenvekt. Dette ville gitt mindre lastekapasitet, som igjen fører til mindre effektivitet og lønnsomhet.

Aspelund og hans medforskere har brukt skipsdesign, tankløsninger og lastesystem for LPG som utgangspunkt for utviklingen av CO₂-teknologien.

Som et resultat av risikovurderingen i rapporten har man anerkjent at CO₂ er tyngre enn luft. Som en konsekvens av dette fortrenger den luft i fordypninger hvis en lekkasje forekommer. Dette er viktig å ta hensyn til ved design av tanker i skip, og forfatterne av rapporten tilrår bruk av gassdetektorer ved slike installasjoner. Man har også utviklet prosedyrer for lasting og lossing av flytende CO₂ nær trippelpunktet. Dette gjør man for å unngå at den går over til fast form (tørris), som fort kan forekomme dersom trykket faller.

Forfatterne skriver videre at transportkjeden består av fem hovedledd, som vist i illustrasjonen under. I henhold til problemstillingen vil jeg ikke ta for meg alt, men kommer derimot til å ta for meg delen som omhandler skipet i seg selv.

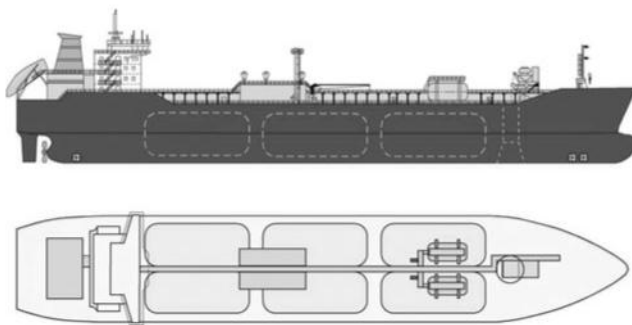


Figur 3: Illustrasjon av transportkjeden for CO₂. (A. Aspelund, 2006)

Når gassen skal transporteres må den over i en form hvor den har høyere tetthet. Man har i hovedsak valget mellom væskeform, fast form eller i superkritisk fase. Om bord i

LPG og LNG skip holdes gassen i væskeform ved atmosfæretrykk (1 bar) ved at man holder temperaturen under fordampningspunktet. Dette er derimot umulig å oppnå med CO₂ fordi dens trippelpunkt er på 5,2 bar og -56,6°C. Ved lavere trykk eller temperatur vil CO₂ eksistere som gass, eller i fast form som tørris. CO₂ kan transporteres i tørrisform, men dette vil ikke være økonomisk forsvarlig grunnet de kompliserte laste- og losseoperasjonene som da ville vært påkrevd.

I følge denne rapporten er de foretrukne forhold for transport av CO₂ et trykk på 6,5 bar og en temperatur på -52°C.



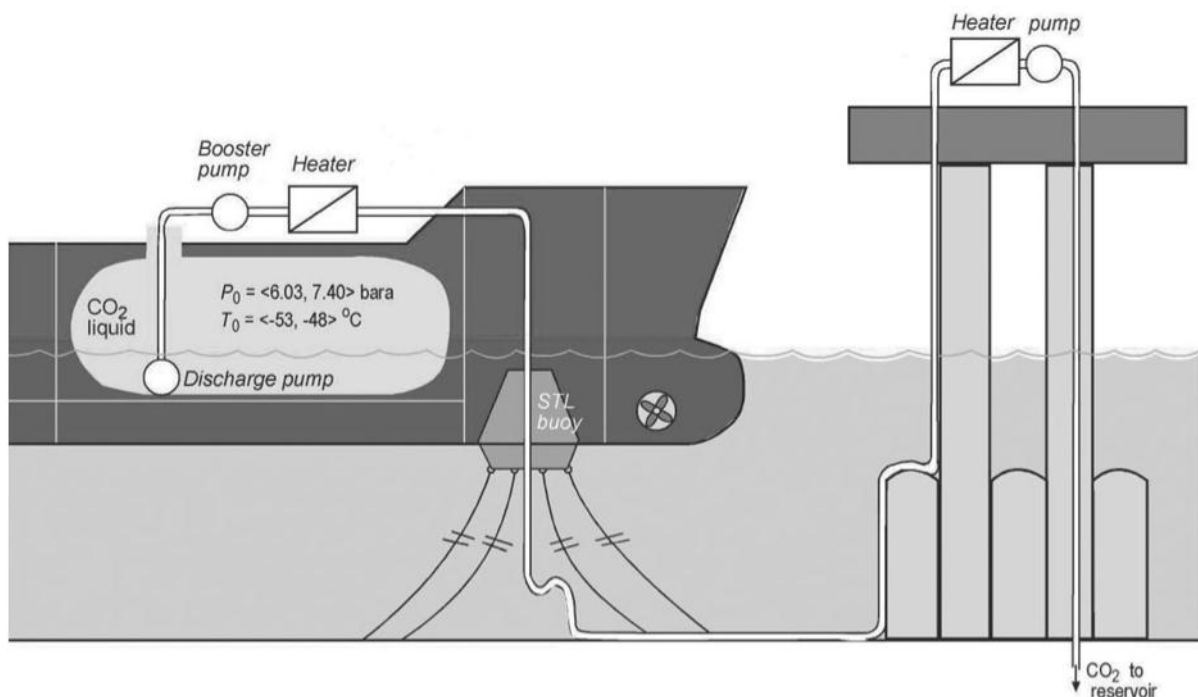
Figur 4: Hvordan forfatterne av rapporten ser for seg et CO₂-skips oppbygning. (A. Aspelund, 2006)

Forfatterne av denne rapporten foreslår et skipskonsept som kan transportere både LPG og CO₂ med en total lastekapasitet på 20 000 m³, der hver tank kan ha kapasitet på 4 500m³. Et skip som kombinerer frakt av begge typer last er anbefalt da dette gir økt bruksverdi, og høyere utnyttelse av skipet. CO₂ har høyere tetthet enn LPG og må transporteres under høyere trykk. Dette gjør at ombygging av eksisterende LPG-tankere til dette formålet blir ugunstig.

Det kombinerte skipet bør ha utrustning både for "Submerged Turret Loading" (STL) og "terminal til terminal"-transport. Ved frakt av gass i væskeform vil en viss fordampning alltid forekomme. For å hindre gasstap anbefaler forskerne å ha et anlegg om bord som kan omdanne den fordampde gassen til væske for så å sende den i retur til tankene hvis transporten skal foregå over avstander utover nordsjøbassenget.

Systemet for lossing til sjøs bør i følge forskerne bestå av følgende komponenter:

- Submerged Turret Loading-systemet.
- En neddykket lastepumpe i hver tank som jobber sammen med en hjelpepumpe på dekk.
- Et system for å varme opp gassen ved hjelp av varmevekslere og pumper, eventuelt sammen med et varmegjenvinningsystem.
- Et fleksibelt stigerør som går fra skipet til havbunnsinstallasjonen.



Figur 5: Lossing via STL (A. Aspelund, 2006)

3.2.3. Ship Based transport of CO₂

Denne rapporten er skrevet av M. Barrio m. fl. fra Sintef, T.E. Sandvik m.fl. fra Vigor og S.I. Eide fra Statoil.

Som i rapporten omtalt i forrige delkapittel, legger også denne vekt på at behovet for et fleksibelt system for transport av gassen er nødvendig. Dette på grunn av spredte kilder og usikkerhet med henhold til vekst i næringen. Videre skriver de at produksjonsstedene i verden i dag som kan levere gass med stor nok renhetsgrad kun har en årlig produksjon på gjennomsnittlig 0,5 til 1 million tonn. Dette er ikke nok til å utnytte kapasiteten til et vanlig reservoar.

I følge forfatterne av denne rapporten må transport av CO₂ i stor skala foregå ved bruk av semi-ref-prinsippet for å oppnå høyest mulig effektivitet og lønnsomhet.

Videre blir det anbefalt å holde gassen nær dens trippelpunkt ved 6,5 bar og -52°C. Da kan man benytte seg av erfaringer fra tidligere kommersiell konstruksjon av LPG-skip. En annen fordel man kan dra nytte av ved frakt av gass i denne kondisjonen er at den ved dette punktet har sin høyeste tetthet i væskeform. Dermed kan man bruke tanker med så lite volum som mulig.

Forfatterne legger også vekt på at man må utvise aktsomhet for å unngå dannelse av tørris i tankene og ved laste- og losseoperasjoner.

3.2.4. Design of a large scale CO₂ carrier for Carbon Capture and Storage

Hans Richard Hansen,
tidligere sjef for
teknologiutvikling i rederiet
Teekay, holdt i mars 2009 en
presentasjon på universitetet
i Newcastle. Denne var
titulert "Design of a large
scale CO₂ carrier for Carbon
Capture and Storage".



Figur 6: Skip med sylindervermede tanker. (Hansen, 2009)

Hansen begynte denne presentasjonen med å legge vektlegge viktigheten av at verdens industriland tar ansvar for å minske utslippene av skadelige klimagasser til atmosfæren. For at kloden i det hele tatt skal være beboelig i år 2050, må utslippene kuttes med mellom 50 og 80 prosent i forhold til dagens nivåer.

For å oppnå dette foreslår Hansen å samle inn CO₂ fra de største kildene, som for eksempel kraftverk, stålverk, og petrokjemiske anlegg. Kullkraftverk er de største utslippskildene per dags dato, og er også den kilden som ser mest utbygging på verdensbasis.

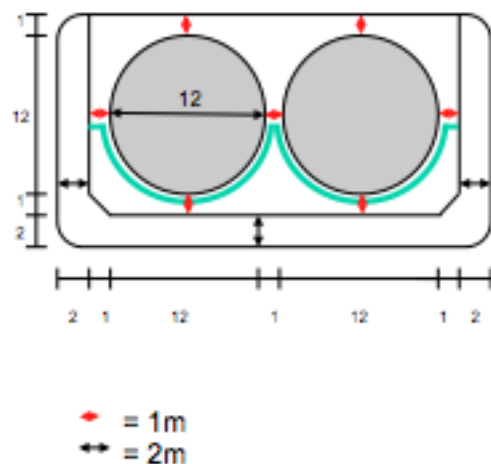
Det blir foreslått at man kan lagre gassen under bakkenivå, for eksempel i hydrokarbonreservoarer det ikke lenger er økonomisk forsvarlig å produsere fra, eller i andre former for undersjøiske strukturer. Et eksempel på en slik struktur er saline akviferer, som er saltvann som ligger under grunn i porøs stein.

Lagring vil kunne gi et utslippsmessig pusterom til ny teknologi er kommet på banen og er såpass moden at den kan erstatte fossile (og forurensende) brennstoff. Behovet for transport melder seg fordi egnede lagringssteder sjelden sammenfaller med plasseringen til gassens produsent. Her kommer skip inn i bildet fordi de er mer økonomiske å bruke over lange avstander enn en rørledning.

I presentasjonen blir fordelene ved bruk av såkalte "semi-ref"-skip trukket frem. Mer enn 300 slike skip eksisterer i dag med i overkant av 5000 år samlet seilingstid. På tross av disse høye tallene har det ikke forekommet en alvorlig ulykke som har resultert i utslipp av last med disse skipene. Videre foreslår Teekay å benytte seg av trykk mellom 6,5 og 7,5 bar og temperaturer mellom -55 og -53°C, noe som effektivt sett er på linje med lagringsforholdene som brukes i dagens LPG-skip.

Hansen foreslår en rute som kan gå mellom Hamburg og Kårstø. Hvis den betjenes av et skip som går i 14 knop vil det kunne gå 88 turer i året med nesten 20 000 m³ gass om bord hver gang.

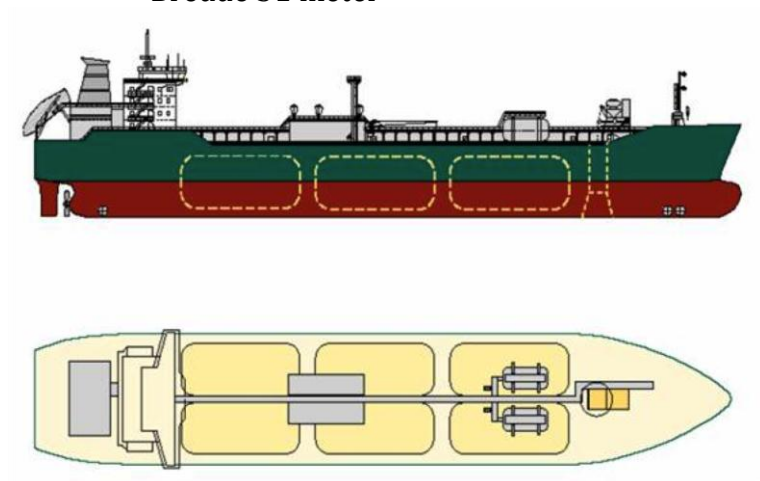
Når det kommer til designet av tankfarmen, foreslår han å bruke to rekker med tre tanker i langskipsretningen, hver med en diameter på 12 meter og lengde på 30 meter. Dette avviker fra konvensjonelle løsninger på gassfraktende skip og er nødvendig på grunn av den høye tettheten til CO₂ kontra for eksempel LPG. Forskjellen ligger i at tankene må være kraftigere dimensjonert for å kunne holde på kreftene de blir påført av gassens vekt, og dette løses ved at man bruker flere små tanker.



Figur 7: Illustrasjon av tankene i skroget. (Hansen, 2009)

Skipet som foreslås i rapporten har følgende spesifikasjoner:

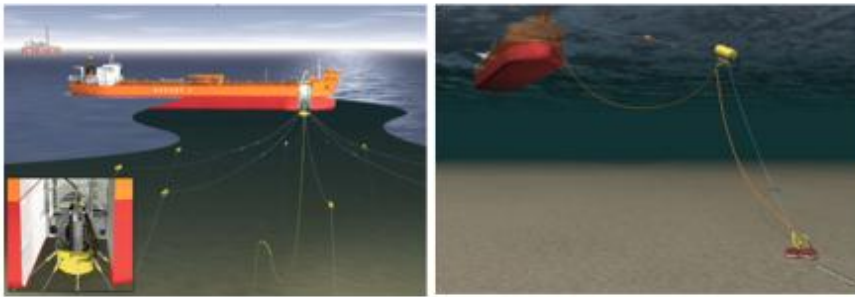
- Lastekapasitet 20 000 m³
- Lengde 165 meter
- Bredde 31 meter



Figur 8: Skipets design. (Hansen, 2009)

Hvis skipet skal gå over relativt korte distanser (mellom europeiske havner) kan det med fordel benytte seg av maskineri som primært går på LNG, med marinediesel som reserveløsning. Dette er et miljøvennlig alternativ til ren diesel-fremdrift, med 22% reduksjon av CO₂-utslipp og 95% mindre NO_x (nitrogenoksid). Utslippene av CO₂ med denne typen fremdriftsmaskineri vil være så lite som 1% av mengden gass som transporteres.

Metodene som kan brukes for lossing til havs er STL og SAL.



STL
Submerged
Turret
Loading

SAL
Single
Anchor
Loading

Figur 9: Lasting via STL og SAL. (Hansen, 2009)

Det som ikke er tatt høyde for i denne rapporten er vannmotstand, optimal hastighet og hvilken blokkoeffisient som er mest hensiktsmessig. Man må også finne ut hvordan skipets linjer best kan formes rundt de to tankrekkene, og bedre vektkalkulasjoner må foretas. Det er knyttet en viss usikkerhet til hvor strenge kravene til skadestabilitet er, og om disse vil fordre mer kompliserte tankdesign.

3.2.5. Ship Transport of CO₂

Denne rapporten er fra 2004 og beskriver et studium utført av Mitsubishi Heavy Industries Ltd. i Japan. Hele kjeden som er nødvendig for å transportere, frakte og lagre CO₂ er med i denne omfattende rapporten, men kun det som er relevant for problemstillingen i denne oppgaven er beskrevet her.

Faktorer som transportert distanse, størrelse på skipet og dets hastighet er tatt høyde for. Rapporten fastslår at skip er et rimeligere alternativ enn rørledning over lengre distanser. Bruk av skip til transport gir også høyere fleksibilitet, da man kan betjene flere produksjonssteder og reservoar med samme fartøy.

Studiet baserer seg på et transportbehov i størrelsesorden 20 000 tonn CO₂ per dag, noe som, i følge rapporten tilsvarer utslippene fra en dags produksjon av 1000 MW (megawatt) kullkraft eller 2200 MW gasskraft.

Rapporten fortsetter med å fastslå at CO₂ må transporteres under trykk og ved lav temperatur. Dette fordi gassen ikke går over i væskeform når den kjøles ned, men rett over i sin faste form (tørris). Anbefalte transportforhold er 7 bar og -50°C.

Skip med lastekapasitet på 10 000, 30 000 og 50 000 tonn (1 tonn CO₂ opptar litt i underkant av 1 m³) er vurdert i rapporten. De to minste størrelsene har 4 sfæriske tanker, som på figur 10, mens det største har 5. Det er også eksperimentert med to ulike hastigheter, nemlig 15 og 18 knop. Det er beregnet for avstander mellom 200 og 12 000 km. I følge forskerne er ikke



Figur 10: Skip med 4 sfæriske tanker. (Meisei Kogyo)

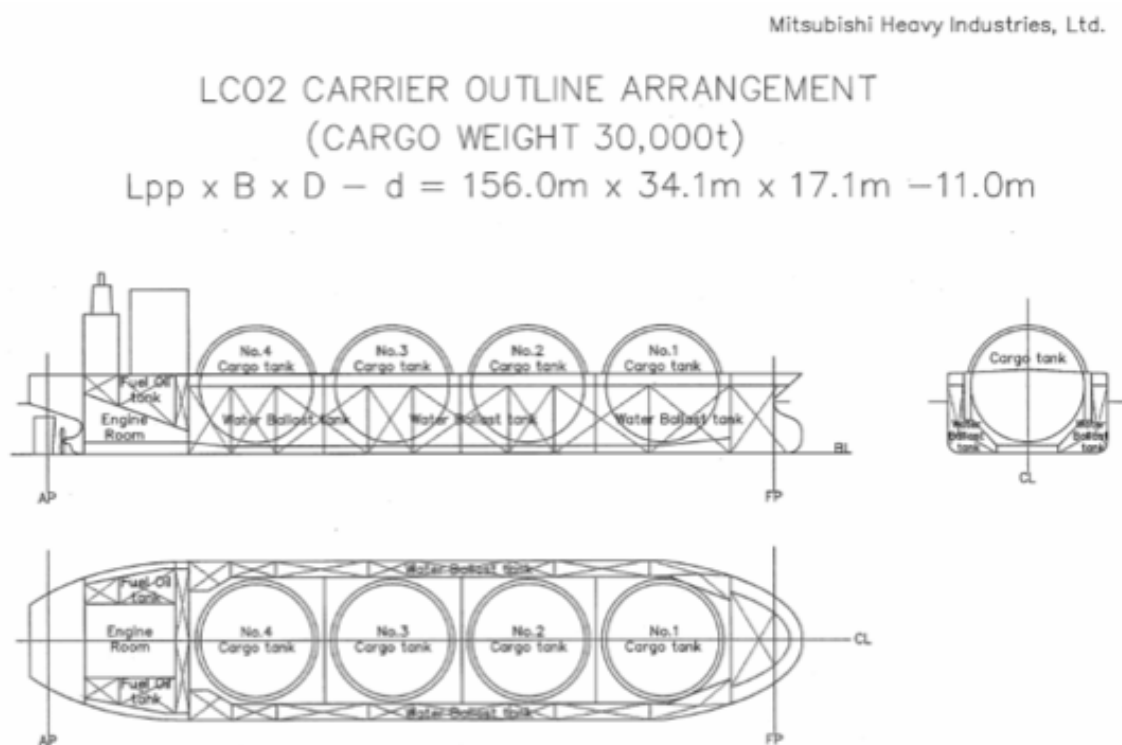
sistnevnte distanse en aktuell seilas per dags dato, men er beregnet med tanke på fremtiden hvor man kanskje får bruk for CO₂ i EOR på fjerntliggende steder.

Når det kommer til forurensing i forbindelse med transporten, varierer den ut fra seilingsdistansen. 200 km seilingsdistanse tilsvarer at skipet i seg selv har utslipp tilsvarende 2,5% av mengden last om bord, mens den er på hele 18% hvis man må frakte gassen 12 000 km. En 3000 km lang seilas vil føre til utslipp tilsvarende 1% av transportert mengde. Utslippene er avhengig av flere faktorer, blant annet mengde last og skipenes størrelse. Små skip forurenses mer enn store per tonn CO₂ som blir fraktet.

Studiet har også sett på såkalte "dual purpose"-skip. Disse kan frakte både CO₂ og LNG. Bruksområdet for disse kan være at de frakter CO₂ for bruk i EOR til et oljefelt, og laster om bord LNG som blir produsert på feltet før det setter kursen mot land igjen. I følge forfatterne blir dette vel å merke kun aktuelt for lengre distanser da det vil ta flere dager å rengjøre tankene før man kan bytte last. En slik skipstype vil også være dyrere fordi

LNG må fraktes ved -130°C om det er komprimert til 7 bar, noe som vil kreve bedre isolasjon og kjøling om bord. Alt i alt, anbefaler forfatterne at man benytter forskjellige skip, med mindre det er snakk om store seilingsdistanser.

Rapporten har også konkludert med at å frakte CO_2 i tørris-form (uten behov for trykk, og kun med noen få minusgraders temperatur) vil være omtrent 15\$ dyrere per tonn sammenlignet med å frakte den i flytende form.



Figur 11: Illustrasjon av oppbygningen av et skip med 4 sfæriske tanker. (Mitsubishi Heavy Industries, 2004)

For at tanken skal tåle det høye trykket kan man gi den mindre omkrets, større tykkelse eller bruke materialer med høyere kvalitet. De sistnevnte begrenses av fabrikkasjonsprosessen (hvordan man kutter, bøyer og sveiser stålet sammen). Derfor sitter man igjen med tankens omkrets som eneste reelle variabel.

Rapporten fastslår at risikoen knyttet til frakt av CO_2 er mindre enn for eksempel risikoen ved frakt av LPG og LNG da den ikke er brennbar. Det er likevel noen faktorer som må tas hensyn til, blant annet at det vil kunne dannes tørris ved lasting og lossing.

For å flytte en gitt mengde gass, kan man enten bruke mange saktegående skip som forurenses lite, men har høy boil-off (innholdet i lastetankene fordampes pga. oppvarming) eller færre hurtiggående skip som forurenses mer, men har lavere boil-off fordi de bruker kortere tid på reisen mellom havnene. Man kan også kjøle ned gassen som fordampes fra tankene, men dette har studiet valgt å se bort fra, fordi forurensingen fra skipenes fremdriftsmaskineri er så stor i forhold til det som kommer fra boil-off. Uansett vil utslipp av CO₂ fra skipet være en sum av boil-off og eksosen fra fremdriftsmaskineriet, og denne øker proporsjonalt med transportert distanse, og minker hvis store og saktegående skip velges.

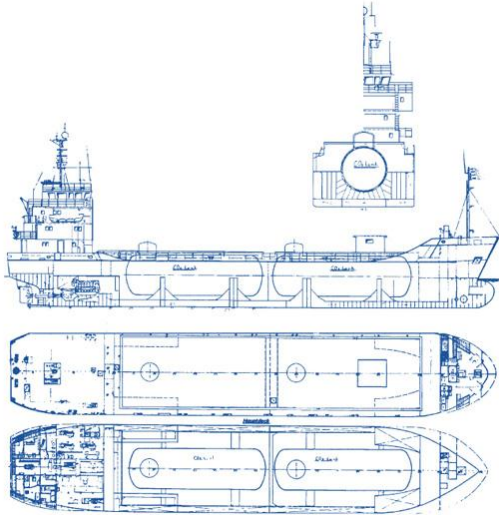
Rapporten konkluderer med at skip mellom 30 000 og 50 000 tonn kan bygges uten vanskeligheter med dagens teknologi. Disse må bygges i såkalt "semi-ref"-design. Hvis man vil bygge større skip enn dette, må man forske mer på dimensjonering av tankene. En annen mulighet er å plassere flere tanker om bord, men dette vil kreve designarbeid for å få skipets linjer til å passe rundt tankene, uten at man får uhensiktsmessig stor bredde på skipet. Ettersom CO₂ er en tung gass, må man ta høyde for at skip som frakter denne vil få stor dyppgang hvis man øker skipets størrelse. Dette må tas hensyn til når man planlegger hvilke havner som skal anløpes.

Cargo Weight	10,000 t	10,000 t	30,000 t	30,000 t	50,000 t	50,000 t
Speed(Full Load)	15 kn	18 kn	15 kn	18 kn	15 kn	18 kn
Speed(Ballast)	16 kn	19 kn	16 kn	19 kn	16 kn	19 kn
Lpp	116.0 m	116.0 m	156.0 m	156.0 m	220.2 m	220.2 m
Bmld	24.3 m	24.3 m	34.1 m	34.1 m	38.8 m	38.8 m
Dmld	12.8 m	12.8 m	17.1 m	17.1 m	18.5 m	18.5 m
dml(draught, moulded)	9.5 m	9.5 m	11.0 m	11.0 m	11.0 m	11.0 m
Number of CO ₂ tanks	4	4	4	4	5	5
Inside Diameter of CO ₂ tank	16.5 m	16.5 m	23.8 m	23.8 m	26.1 m	26.1 m
Material of CO ₂ tank	Steels for low temperature service(For example ,9% Ni Steel)					

Figur 12: De forskjellige størrelsene MHIs rapport har tatt for seg. (Mitsubishi Heavy Industries, 2004)

3.2.6. Eksisterende skip

Larvik Shipping driver tre skip som frakter CO₂ i Nord-Europa. Yara Gas 1 og 2 har lastekapasitet på omtrent 900 tonn fordelt på to tanker, mens Yara Gas 3 har en kapasitet på omtrent 1200 tonn fordelt på to tanker. Disse er relativt små skip, med lengder på 72 og 81 meter. Skipene har sylindriske tanker som står på rekke i langskipsretningen, som vist i illustrasjonen under.



Figur 13: Yara Gas 1 sin planløsning. (Larvik Shipping AS)

Skipet Coral Carbonic eies av rederiet Anthony Veder i Nederland. Det er 79,4 meter langt, 14 meter bredt og har en lastekapasitet på 1240 m³. Skipet har en sylindrisk tank for lagring av CO₂, og oppbevarer gassen med et trykk på 18 bar og -40°C.



Figure 14: Coral Carbonic. (Ehlén, 2010)

3.3 Delkonklusjon

I dette kapitlet har jeg forsøkt å presentere rapportenes innhold på en lettfattelig måte. I neste kapittel vil funnene i dem bli sammenlignet, og jeg vil gå nærmere inn på eventuelle deviasjoner dem i mellom.

4. Analyse

4.1 Likheter og forskjeller mellom tidligere forskning

De forskjellige skipene omtalt i rapportene har følgende spesifikasjoner:

Rederi/ forskningsinstitusjon	Lastekapasitet [m ³]	Tanktype	Antall tanker	Temperat ur [°C]	Trykk [bar]	Mulighet for multigas s	Skipslengde [meter]
Larvik Shipping	900- 1200	Sylindrisk	2	-40	14-20	Ikke nevnt	72-81 meter
Anthony Veder	1 240	Sylindrisk	1	-40	18 bar	Ikke nevnt	
Sintef	20 000	Sylindrisk	4	-52	6,5	Ja	
Teekay	20 000	Sylindrisk	6	-55- -53	6,5- 7,5	Ikke nevnt	165
Mitsubishi	30 000	Sfærisk	4	-50	7	Ja	156

Figur 15: Sammenligning av hovedpunktene i de forskjellige konseptene.

Synonymt i alle rapportene er at de begynner med å understreke viktigheten av snarlige klimatiltak. De ser på fangst, transport og lagring (CCS) av CO₂ som en potensielt viktig del av fremtidens klimakamp. Rapportene vektlegger også at CCS er i en oppstartsfase, og at det derfor er nødvendig med en fleksibel transportløsning som kan betjene flere produksjonssteder og reservoarer. Dette fordi det er knyttet en viss usikkerhet til hvor gassen produseres og det at et reservoar, som i første omgang kan virke lovende for mottak og lagring av gass, kan vise seg å ikke fungere så godt som først antatt. Derfor blir skip trukket frem som et godt alternativ kontra rørtransport.

I Sintefs rapporter blir Yara brukt som eksempel på at transport av CO₂ er gjennomførbart i praksis. Dette er derimot ikke direkte overførbart til storskala transport fordi tankene vil bli for tunge i forhold til skipets totalvekt, noe som vil føre til mindre effektivitet og lønnsomhet.

Man tar derfor i stor grad utgangspunkt i dagens design av LPG/LNG-skip og baserer seg på at CO₂-skipenes teknologi kan være en videreføring av prinsippene man bruker på

disse. Dette er begrunnet med at de alle har som oppgave å frakte flytende gass, dog med forskjellige trykk- og temperaturforhold. Dette gjør at man ikke kan bygge om eksisterende LPG-skip til å kunne frakte CO₂. Teekay foreslår at man kan bruke både STL og SAL for lossing til havs. STL blir også foreslått av Sintef, som også vil inkludere laste-/lossesystem for terminaler.

Mens Sintefs og Mitsubishis rapporter nevner muligheten for å frakte LPG med samme skip som frakter CO₂, er det kun Sintef som stiller seg positive til dette.

Ett punkt der Mitsubishis rapport skiller seg fra de andre, er når det kommer design av tankparken. Der både Sintef og Teekay, i tillegg til de eksisterende skipene, har gått for en løsning med sylindriske tanker, har Mitsubishi valgt å bruke sfæriske tanker. For å få klarhet i fordeler og ulemper med disse designene, ble Hans Richard Hansen i Teekay konsulert. Han kom med følgende uttalelse angående dette: "Sfæriske tanker blir noe tynnere og lettere fordi materialet belastes i to retninger, og ikke hovedsakelig i en. Men de tar opp mer plass i skroget, det er lettere å plassere inn en viss kubikk med sylindriske tanker."

Man har i hovedsak tre variabler i sammenheng med dimensjonering av tanker. Disse er tykkelsen på veggene, fabrikasjonsprosessen (hvordan man kutter, bøyer og sveiser stålet sammen), og omkretsen på tanken. Siden man vil holde skipet så lett som mulig er det begrenset hvor tykke vegger man kan ha. Fabrikasjonsprosessen er allerede optimalisert. Det som gjenstår da er å variere tankens omkrets etter hvor stort trykk den må tåle.

Sintef og Teekay har valgt forskjellig antall lastetanker. Førstnevnte har nøydt seg med 4 stk, mens Teekay har 6. Alle de tre største konseptene, med lastekapasiteter mellom 20 000 og 30 000 m³, holder seg på trykk mellom 6,5 og 7,5 bar. Temperaturene ligger mellom -50 og -52°C. Totalt sett kan vi si at forskerne er relativt samstemte på akkurat dette området, noe som er forståelig da dette er rundt gassens trippelpunkt, som er det optimale området den kan transporteres på. Kildene er samstemte om at det er mest hensiktsmessig å frakte gassen i flytende form fordi det totalt sett er dyrere å frakte den i fast form (tørris) og at den opptar for stort volum i gassform.

Kildene nevner forskjellige faremomenter ved transport av CO₂. Blant annet blir det at gassen er relativt tung fremhevet. Dette medfører at den fortrenger oksygen i

fordypninger og kan resultere i oksygentomme rom. Sintef anbefaler derfor at man installerer gassdetektorer om bord. Et annet punkt som er kritisk er at man må vedlikeholde lagringsforholdene også ved lasting og lossing for å forhindre dannelse av tørris. Tørris kan blokkere laste-/losseutstyret og kan i noen tilfeller skade tankene. Dannelse av tørris er et problem fordi lasten ikke kan brukes til formålet den først var tiltenkt. Man har også sett på at gassens tyngde vil medføre at skipene får en stor dypgang om man frakter store mengder last. Dette gjør at man må man være observant i forhold til hvilke havner man planlegger å anløpe.

Laste-/losseutstyret om bord bør i følge Sintef bestå av en neddykket lastepumpe i hver tank og en hjelpepumpe på dekk. Et system for å regulere temperaturen på gassen ved hjelp av varmevekslere og pumper er anbefalt.

Hvis man skal transportere over distanser utover nordsjøbassenget, trenger man i følge Sintef et system som kan behandle avdampnet gass (boil-off) slik at den omgjøres til væske igjen og sendes til tankene.

4.2 Forklaring av forskjeller

Ut fra tabellen, og det som er skrevet i rapportene, kan vi se at hvordan man oppbevarer gassen om bord varierer med størrelsen på skipene. De mindre skipene som seiler for Larvik Shipping og Anthony Veder bruker trykk mellom 14 og 20 bar sammen med en temperatur rundt -40°C . Når man kommer opp i størrelse, til de prosjekterte skipene fra Sintef, Teekay og Mitsubishi, endrer lagringsforholdene seg betraktelig. Dette er på grunn av at en mindre tank kan holde på større trykk og vekt.

Dette fordi gassens vekt må absorberes av tankstrukturen. Vekten øker sammen med gassens volum. For at en stor tank skal kunne holde på stort trykk og samtidig vekten av innholdet i den, må man øke tykkelsen på veggene. På grunn av dette øker vekten på tanken i seg selv, fordi man må bruke mer stål i konstruksjonen. Det er derfor nødvendig å finne en balansert løsning som både er sterk nok til å trygt oppbevare lasten, men samtidig ikke veier mer enn nødvendig. Skipet må være effektivt skip slik at det kan frakte mest mulig nyttelast.

Når det gjelder transport av flere typer gass med samme skip, anbefales dette av Sintef, og for så vidt også av MHI. Sistnevnte reserverer seg derimot kun til bruk av dette om transporten skal foregå over lengre avstander, og anbefaler forskjellige skip hvis det ikke er tilfelle. Dette fordi det tar flere dager å rengjøre en tank så grundig at man kan bytte last. En mulig årsak til at Sintef ikke har kommet frem til dette kan være at de mangler en skipsbyggers/-designers praktiske innsikt.

Valg av design på tankene vil avhenge av preferansene til den enkelte designer. Det er fordeler og ulemper med både sylindriske og sfæriske tanker.

Fordamping av gassen under transport er nok et punkt rapportene strides om. Sintef anbefaler anlegg for behandling av boil-off hvis man skal seile over distanser utover nordsjøbassenget. MHI ser på denne faktoren som såpass ubetydelig sammenlignet med utslippet fra skipets fremdriftsmaskineri i seg selv at de har valgt å ikke ta høyde for det.

5. Drøfting

Det jeg ønsket å finne svar på gjennom arbeidet med denne oppgaven var hvordan den maritime næringen så for seg CO₂-skipenes design. Gjennom dette arbeidet har det vist seg at det har blitt utført forskning på feltet i forskjellige deler av næringen.

Jeg har bygd oppgaven på sekundærdata som består av forskning utført ved en forskningsinstitusjon (Sintef), et rederi (Teekay) og en skipsbygger/-designer (Mitsubishi). Dette har gitt meg mulighet til å sette meg inn i hvordan de forskjellige delene av den maritime næringen tenker om akkurat dette, og har gitt meg en flersidig tilnærming til å svare på problemstillingen.

Det viste seg at det er liten sammenheng mellom hvordan de små CO₂-skipene som er i drift i dag og de store skipene som er under utvikling blir operert i praksis. Dette fordi en direkte oppskalering av de eksisterende skipenes format ville ført til at tankveggene hadde blitt veldig tykke for å sikkert oppbevare gassen. Tankenes vekt ville i seg selv utgjort en stor del av skipets totalvekt. Dette ville medført mindre lastekapasitet, noe som igjen gir mindre effektivitet og lønnsomhet. Rapportene er samstemte om at når CO₂ blir komprimert og flytende, deler den karakteristikk med LPG og LNG. Derfor kan man bruke disse skipene som basis for design av skip som skal frakte CO₂.

Devisjoner mellom skip som skal frakte CO₂ og eksisterende gassfraktende skip finnes. Dette er fordi man blant annet må ta hensyn til at gassen er tyngre enn for eksempel LNG/LPG, og tankene må dimensjoneres etter dette. Det kreves også andre trykk- og temperaturforhold.

Noen av rapportene foreslår å bruke samme skip til både LPG- og CO₂-transport. Et argument for er at man øker utnyttelsesgraden til skipene ved at det kan ta med seg CO₂ til bruk i EOR til oljeinstallasjonen, mens man kan laste om bord for eksempel LPG før man setter kursen mot land igjen. Argumenteringen mot er at det tar enormt lang tid å rense tankene hver gang man skal bytte last. Flere dager med dødtid på grunn av at man skal bytte last er lite økonomisk med mindre reisen i seg selv er veldig lang. Det er også komplikasjoner involvert med tanke på at de forskjellige gassene trenger varierende lagringsforhold om bord.

Uansett størrelse må et skip som frakter gass ta hensyn til farene relatert til lasten. Et skip som for eksempel frakter LPG eller LNG må ta høyde for at lasten er ekstremt brannfarlig, og ekstra hensyn må tas på grunn av dette i den daglige driften.

CO₂ er på sin side ikke brannfarlig, og blir tvert i mot brukt i slokkeanlegg i maskinrom om bord på enkelte skip. Den fortrenger oksygen (O₂), og på grunn av sin tyngde vil den legge seg i fordypninger, som for eksempel luker på dekk. I ytterste konsekvens kan dette resultere i oksygenfrie rom, noe som vil kvele mannskapet hvis de entrer rommet uten utstyr for pustestyr. For å oppdage lekkasjer og uønskede forekomster av CO₂ om bord, bør gassmålere installeres.

Et annet kritisk punkt ved frakt av CO₂ er at det kan dannes tørris hvis man mister trykk eller temperatur. Tørris kan tette igjen laste-/losseutstyret og i verste fall skade det eller tankene. Det medfører også at lasten blir ubrukelig til formålet den først var tiltenkt med mindre man kan behandle den og gjøre den om til flytende væske igjen.

For å frakte en gitt mengde gass må man enten bruke et stort antall saktegående skip eller et mindre antall skip som kan holde høyere fart. Mens saktegående fartøy forurensere mindre per mengde transportert last, vil kortere tid til havs føre til lavere boil-off. Man kan kompensere for sistnevnte ved å installere anlegg om bord som kan ta hånd om den avdampede gassen og komprimere og kjøle den ned igjen. På den annen side har MHI kommet frem til at mengden utslipp fra et hurtiggående skips fremdriftsmaskineri vil forurense så mye at boil off blir en usignifikant faktor. Uansett vil det bli en slags likning for å finne balansen mellom disse variablene.

Når det kommer til hvilke laste-/lossesystemer man skal bruke vil dette være avhengig av hvilken skipsmodell man velger å bruke, og hvilke havner det skal betjene. Tankenes størrelse vil bestemmes av trykkene de skal holde, og man har i realiteten kun en variabel, nemlig tankens omkrets. Derfor vil det være vanskelig å bygge skip som er over 50 000 tonn i størrelse uten videre forskning på akkurat dette området.

Teekay anbefaler bruk av LNG med marinediesel som reserveløsning som drivstoff. Dette vil gi store miljømessige fordeler siden utslipp av CO₂ reduseres med 22% og NO_x med 95%. Forslag til drivstoff er ikke nevnt i de andre rapportene, men her har Teekay et godt poeng.

6. Konklusjon

Etter hvert som oljeressursene i Nordsjøen minker, blir oljeselskapene nødt til å effektivisere produksjonen sin mest mulig for å høyne utnyttelsesgraden på feltene. CO₂ brukes i EOR på land og er planlagt som pilotprosjekter til sjøs. Dette vil øke etterspørselen etter CO₂ på sikt. EOR kan derfor brukes som et springbrett for å få i gang storskala transport av gassen.

Det er dyrt å fange opp CO₂ og det ventes ikke noen paradigmeskifter innen teknologi som vil medføre reduksjon i produksjonskostnader med det første, man må belage seg på å ta denne kostnaden. Teknologien er under utvikling, men kan enda ikke sies å være helt moden. Dette koker ned til at det trengs politisk vilje og store investeringer for å realisere fangstprosjekter.

I følge GESTCO-prosjektet er det enorme mengder CO₂ som har potensiale til å bli fanget opp i relativ nærhet av nordsjøbassenget. Rapportene er samstemte i at transport av CO₂ med skip er den beste løsningen i oppstartsfasen. Dette fordi det gir økt fleksibilitet i forhold til at man kan betjene flere produksjonssteder og eventuelt reservoarer om det man har valgt skulle vise seg uegnet til lagring. De største produsentene av CO₂ er kullkraftverk. De har også mest utbygging på verdensbasis. Andre store kilder er stålverk og petrokjemiske anlegg.

Rapportene presenterer konsepter som i og for seg er klare for produksjon. Alle de største konseptene benytter seg av semi-ref-design, som lagrer gassen om bord i tanker, enten sylindriske eller sfæriske. Gassen blir holdt flytende, og dermed ved høyest mulig tetthet, ved at man bruker trykk på mellom 6,5 og 7,5 bar og temperaturer mellom -50 og -55°C. Tankenes omkrets må tilpasses etter hvor stort trykk den må tåle, siden dette er den eneste variabelen som kan endres på i design av tankene.

Transport av gass med semi-ref skip har en veldig god sikkerhetskultur. Dette viser igjen ved at det er mer enn 300 slike skip i drift i dag med 5 000 års samlet seilingstid. Det har enda ikke forekommet alvorlige ulykker som har resultert i utslipp av last. Selv om transport av CO₂ ikke involverer de samme risikoene som tradisjonell transport av gass (LPG/LNG) er det fortsatt snakk om enorme trykk og mengder i tankene. Blant sikkerhetstiltak nevnes det at man må installere gassdetektorer om bord for å oppdage

eventuelle lekkasjer. Et annet kritisk punkt er at man må opprettholde trykk og temperatur for å unngå dannelse av tørris ved laste- og losseoperasjonene.

Noen av rapportene foreslår å bruke samme skip til både LNG- og CO₂-transport. Mens argumentene for er at man får økt utnyttelsesgrad av skipene, er motargumentene at det tar enormt lang tid å rense tankene hver gang man skal bytte last. Det er også komplikasjoner involvert med tanke på at de forskjellige gassene trenger varierende lagringsforhold om bord. Et skip som skal frakte LNG må ha bedre isolasjon og kjøling om bord, noe som øker bygge- og driftskostnadene. CO₂ er dessuten en tung gass, og vil påføre større påkjenninger på tankene enn den lettere LNGen.

Hvis man vil oppnå størst mulig miljømessig gevinst, bør man benytte seg av Teekays drivstofforslag. LNG har klare fordeler sammenlignet med fyring med konvensjonell marinediesel, deriblant 22% mindre utslipp av CO₂ og 95% reduksjon i NO_x-utslipp. Hvis man velger dette alternativet vil man kunne ha så lite som 1% utslipp fra fremdriftsmaskineriet i forhold til transportert mengde gass.

Om bord blir det anbefalt at man har en neddykket lastepumpe i hver tank sammen med en hjelpepumpe på dekk. For lossing til havs anbefales det bruk av SAL eller STL, mens man kan bruke konvensjonelle lastesystemer for lasting ved terminaler.

Blant forslag til videre forskning kan jeg nevne noen faktorer som ikke har kommet frem gjennom analysen av rapportene. Det er blant annet et konkret forslag til optimal hastighet, hvordan skipets linjer skal designes rundt den tankløsningen man velger, og hvilken blokkoeffisient skipene skal ha.

7. Litteratur

A. Aspelund, M. J. (2006). *Ship transport of CO2 Technical Solutions and Analysis of Costs, Energy Utilization, Exergy Efficiency and CO2 Emissions*. Trondheim/Stavanger: Institution of Chemical Engineers.

United States Maritime Commission. (2009, April 21). *United States Maritime Commission*. Retrieved Mai 11, 2011, from http://drawings.usmaritimecommission.de/drawing/c1_a_now_kl.jpg

Caplex. (n.d.). *karbondioksid*. Retrieved Mars 25, 2011, from <http://www.caplex.no/Web/ArticleView.aspx?id=9317684>

Caplex. (n.d.). *LNG*. Retrieved Mars 25, 2011, from <http://www.caplex.no/Web/ArticleView.aspx?id=9600074>

Caplex. (n.d.). *propan*. Retrieved Mars 25, 2011, from <http://www.caplex.no/Web/ArticleView.aspx?id=9328572>

Carbon Capture Journal. (2010, Mars 31). *Maersk Tankers - a pioneer in CO2 shipping*. Retrieved Februar 23, 2011, from <http://www.carboncapturejournal.com/displaynews.php?NewsID=552>

Chezhia, J. P. (2008). *Disconnectable Submerged Turret Loading Buoy-based Offshore Liquefied Natural Gas Terminal*. <http://www.touchbriefings.com/pdf/3046/chezhian.pdf>.

Ehlén, O. (2010, April 6). *Coral Carbonic: Ship Photos*. Retrieved Mars 3, 2011, from <http://photos3.marinetraffic.com/ais/showphoto.aspx?photoid=195546>

Hansen, H. R. (2009, Mars). Design of a large scale CO2 carrier for Carbon Capture and Storage.

Larvik Shipping AS. (n.d.). *M/T Yara Gas 1*. Retrieved Februar 20, 2011, from http://www.larvik-shipping.no/index.php?option=com_content&view=article&id=16&Itemid=8

National Oilwell Varco. (n.d.). *National Oilwell Varco*. Retrieved April 18, 2011, from http://www.nov.com/Production/FPSO_and_FSO_Products/Terminal_Systems/Single_Anchor>Loading.aspx

Mathiassen, O. M. (2003). *CO₂ as Injection Gas for Enhanced Oil Recovery and Estimation of the Potential on the Norwegian Continental Shelf*. NTNU, Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Trondheim/Stavanger.

Mathisen, R. (2010). *Introduksjon til kjemisk prosessindustri*.

M. Barrio, A. A. (2004). *Ship-based transport of CO₂*. Sintef, Vigor, Statoil.

Meisei Kogyo. (n.d.). Retrieved April 13, 2011, from http://www.meisei-kogyo.co.jp/en/dannetsu/lng_lpg/img/photo01.jpg

Michael D. Tusiani, G. S. (2007). *LNG - A nontechnical guide*. Tulsa, Oklahoma, USA: Pennwell Corporation.

Mitsubishi Heavy Industries. (2004). *Ship transport of CO₂*. IEA Greenhouse Gas R&D Programme.

Oljedirektoratet. (2007, November 29). *Store muligheter for lagring av CO₂*. Retrieved Mars 29, 2011, from [http://www.npd.no/no/Nyheter/Nyheter/2007/Store-muligheter-for-lagring-av-CO2-/](http://www.npd.no/no/Nyheter/Nyheter/2007/Store-muligheter-for-lagring-av-CO2/)

Siemens. (2010, November 17). *Siemens har lykket med å rense CO₂*. Retrieved Februar 23, 2011, from <http://www.nwe.siemens.com/norway/internet/no/press/Pages/SiemensharlykketmedarensingCO2.aspx>

Sintef. (2009, Februar 6). *CO₂-transport - SINTEF*. Retrieved Januar 13, 2011, from <http://www.sintef.no/Miljo/CO2-handtering/CO2-transport/>

Sintef. (2010, Desember 6). *Om SINTEF*. Retrieved April 12, 2011, from <http://www.sintef.no/Om-oss/>

Stavanger Aftenblad. (2009, Januar 16). *CO₂-lagring blir neste "oljeeventyr"*. Retrieved Januar 16, 2009, from http://www.aftenbladet.no/energi/973682/CO2-lagring_bliir_neste_laquooljeeventyrraquo.html

Store Norske Leksikon. (n.d.). *Trippelpunkt*. Retrieved Mars 29, 2011, from www.snl.no/trippelpunkt

Riksrevisjonen. (2006, April 7). *Undersøkelsesdesign*. Retrieved Mars 23, 2011, from http://www.riksrevisjonen.no/SiteCollectionDocuments/Vedlegg/Revisjonsmetodikk/Veileder_i_undersokelsesdesign_19092008.pdf

Rognsaa, A. (2008). *Prosjektoppgaven - Krav til utforming* (2 ed.). Universitetsforlaget.

Technology Centre Mongstad. (2011, Februar 2). *Vil anvende Mongstad-CO2*. Retrieved Februar 23, 2011, from <http://www.tcmda.com/no/Presserom1/Nyheter1/2011/Vil-anvende-Mongstad-CO2/>

Technology Centre Mongstad. (2010, Mai 5). *CO2-fangst*. Retrieved Februar 23, 2011, from <http://www.tcmda.com/no/CO2---fangst/>

Teekay Corporation. (2010). *History*. Retrieved Mai 5, 2011, from http://www.teekay.com/index.aspx?page=lpg_history

Teekay Corporation. (2007, April 26). *Newsletter*. Retrieved April 13, 2011, from http://www.teekay.com/index.aspx?page=newsletter&article_id=101