



Universitetet  
i Stavanger

**DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET**

**MASTEROPPGAVE**

Studieprogram/spesialisering:  
M.Sc. Offshoreteknologi, Maskinteknikk,  
Marin og Undervannsteknologi

Vårsemesteret, 2007

~~Konfidensiell~~

Åpen fra juni 2009

Forfatter: Endre Lajord

.....  
(signatur forfatter)

Faglig ansvarlig: Mohsen Assadi

Veileder(e): Jan Berntzen, Kristian Gerhard Jebsen Skipsrederi AS  
Mohsen Assadi, UiS

Tittel på masteroppgaven: NO<sub>x</sub>-utslipp fra skip  
Engelsk tittel: NO<sub>x</sub> emissions from ships

Studiepoeng: 30

Emneord:

- Luftforurensning fra skip
- Dieselmotoren
- NO<sub>x</sub>-utslipp og avgift
- Reduksjonstiltak

Sidetall: 128  
+ vedlegg/annet: 0

Stavanger, 15.06.2007

## Forord

Jeg, Endre Lajord, startet masterstudiene i Offshoreteknologi, Maskinteknikk, linje for Marin- og Undervannsteknologi ved Universitet i Stavanger høsten 2005. Denne Masteroppgaven er det siste arbeidet jeg legger ned ved UiS før jeg får graden Master i Marin- og Undervannsteknologi. Oppgaven teller 30 studiepoeng og har gått over hele dette siste semesteret i Stavanger. De siste fem årene, som startet med Bachelorgrad i Marinteknikk ved Høgskolen i Bergen høsten 2002, har gått veldig fort og gitt meg kompetanse og åpninger til arbeidslivet jeg ikke ville vært foruten.

Masteroppgaven har vært gjort i samarbeid med Kristian Gerhard Jebsen Skipsrederi AS (KGJS) i Bergen. Jeg fikk oppgaven av visedirektør for prosjektavdelingen hos KGJS, Jan Berntzen, i januar 2007. Jeg har i denne perioden vært mye på kontoret i Fyllingsdalen, der jeg har jobbet en del sammen med og tatt del i arbeidet til "NO<sub>x</sub>-gruppen" i firmaet. Samtidig har jeg fått god støtte og verdifulle tilbakemeldinger fra spesielt ansatte hos KGJS Cement og prosjektavdelingen. Jeg fikk også en tur til Molde, der jeg var med på målinger av NO<sub>x</sub>-utslipp på fergen Tresfjord.

Vi ble enige om en rund oppgavetekst rundt NO<sub>x</sub>-problematikken, dermed sto jeg ganske fritt til å utdype store deler av temaet videre. Jeg fant ut at det var veldig mye stoff å hente om temaet, men at informasjonen stemte bare delvis om hverandre, noe som ga meg lyst til å finne ut hva som egentlig stemmer. Oppgaven har vært veldig interessant for meg, og både informasjonssamling og kontakt med forskjellige aktører i næringen har vært nyttig og lærerikt. Kontortiden hos KGJS har også gitt meg en pekepinn på hva jeg kan forvente i arbeidslivet etter fullført grad.

Hensikten med oppgaven er å forklare temaet om luftforurensning og utslipp fra skip, den nye NO<sub>x</sub>-avgiften på skip langs norskekysten og måter å redusere begge disse på. Samtidig skal jeg utdype tilgjengelige erfaringsdata i forbindelse med reduksjonstiltak så oversiktlig som mulig. Jeg har og sett litt nærmere på avgifter og utslipp fra M/V Bornholm Cement i KGJS Cement-flåten.

Takk til følgende personer for assistanse, støtte og informasjon:

- |  |                        |
|--|------------------------|
| ➤ Professor ved UiS                        | Mohsen Assadi          |
| ➤ Visedirektør for Teknisk/Prosj.avd. KGJS | Jan Berntzen           |
| ➤ Flåtesjef KGJS Cement                    | Tore Telle             |
| ➤ Prosjektingeniør KGJS                    | Stein Håvard Sunnevaag |
| ➤ Driftssjef KGJS Cement                   | Leif Birger Sture      |
| ➤ Visedirektør for Gearbulk KGJS           | Willy Reinertsen       |

Endre Lajord

Stavanger 15.06.2007

-----

## Sammendrag

Skipsfarten er til tross for at det er en miljøvennlig transportmetode i forhold til andre, ansvarlig for ca. 40% av utslippene av nitrogenoksider til luft i Norge. Det har vært ønskelig å få definert hvor på havet de største utslippene skjer, men siden slik statistikk er meget vanskelig å oppdrive har denne oppgaven heller differensiert mellom utslippskilder og sammenlignet mellom landsdelene. I Nordland slippes det blant annet ut omtrent 25% mindre NO<sub>x</sub> fra skip enn i Hordaland (2005). Dette skyldes nok først og fremst at skipstrafikken er større i Hordaland.

Hensikten med oppgaven har vært å se på utslipp til luft fra skip, og da spesielt nitrogenoksider (NO<sub>x</sub>). I den sammenhengen er oppgaven delt opp i flere hovedtema: miljø, dieselmotorens virkemåte og tilhørende utslipp, NO<sub>x</sub>-avgiften, reduksjonstiltak og erfaringer rundt disse og til slutt et eksempel med et skip i norsk kystfart. Det er sett på regelverk og miljøkonsekvenser for miljødelen. I avsnittet om dieselmotoren er det fokusert på forbrenningsforløp og typer av NO<sub>x</sub>. I delen om avgiften er det forsøkt å gi en grundig gjennomgang av avgiftsforhold og forklaring av usikkerhetene rundt beregning av denne. Avsnittet om reduksjonstiltak gir en fullstendig oversikt over tilgjengelige reduksjonstiltak i 2007, og etterfølgende eksempler over utprøvde metoder og erfaringer med nevnte metoder.

Det er gjennom direkte kontakt med Sjøfartsdirektoratet, DNV og leverandører av rensutstyr forsøkt å gi en oversikt over hva som egentlig eksisterer i dag. Problemet har vært at de ulike bedriftene gjerne holder litt på tallene, eller oppgir litt forskjellige vurderinger. Dette gir igjen forskjellige utgangspunkt i og med at bakgrunnstallene for beregninger av faktisk reduksjon og pris ikke er like.

Rense- og reduksjonsteknologien eksisterer men kombinasjonen av dyr teknologi og lite gjennomtenkte krav fra myndighetenes side, i kombinasjon med romslige krav fra IMO gjør at det ikke blir prioritert hos rederiene. Innføring av miljøteknologi kommer, men dagens flåte har enda lang levetid, så det er viktig å fokusere på å legge til rette for installasjon og innføring av tiltak i eksisterende skip. Satsing på mer miljøvennlige nybygg kommer, men det går sakte så lenge føringene fra myndighetene er slappe. Samtidig er det slett ikke sikkert at en avgift på NO<sub>x</sub>-utslipp vil gi effekten regjeringen ønsker, nemlig en reduksjon i henhold til Gøteborgprotokollen. Å nå det målet i forhold til utslipp fra skip er pr. dags dato lite realistisk. Spesielt ikke så lenge det eksisterer mye usikkerhet rundt gjennomføring av avgiften. Et samarbeid mellom rederier og staten gjennom et NO<sub>x</sub>-fond kan gi ønskelig effekt, problemet er at staten fort kan se på avgiften som nok en avgift til statskassen. NO<sub>x</sub>-fondet koster rederiene bare 1/3 av avgiften og kan gi opptil 100% tilbakebetaling til rederiene for gjennomførte installasjoner.

Skip som blir drevet av brenselceller er fremtidens løsning for å få nullutslipp, men dette er enda et stykke frem i tid. Det finnes enda få anlegg med effektive reduksjonstiltak ombord i dagens flåte, men de som er installert som f.eks. HAM-anlegget på

M/S Mariella (Viking Line) kan vise til gode reduksjonstall og økonomi. En avgjørelse om å foreta seg noe i forbindelse med installasjon på egne skip må tas i samarbeid mellom rederi, motorfabrikant og leverandør av reduksjonsutstyr. Bare en slik grundig analyse kan gi svar på om det lønner seg for beslutningstagerne å gjennomføre. Dessuten sitter mange på gjerdet i og med at erfaringene er begrenset. En vurdering er gjort av M/V Bornholm Cement, en sementfrakter som stort sett går på norskekysten. Etter å ha fått bestemt kilde spesifikk utslippsfaktor gjennom målinger gjort av firmaet Ecoxy AS er det beregnet at rederiet kan spare minst 200.000 i året i forhold til sjablongfaktor, gitt at driftsprofilen til skipet opprettholdes ut levetiden. Skipet er gammelt, så reduksjonstiltak blir dyrt å installere og er ikke ansett for å være fornuftig, ihvertfall så lenge et NO<sub>x</sub>-fond ikke er på plass.

## Innholdsfortegnelse

1	Innledning .....	1
1.1	Bakgrunn for prosjektet .....	1
1.2	Disposisjon.....	2
1.3	Avgrensning av oppgaven.....	2
2	Om Firmaet .....	3
2.1	Flåte og Last.....	3
2.1.1	Gearbulk.....	3
2.1.2	Tank .....	5
2.1.3	Sement.....	6
2.2	Handel .....	7
3	Miljø.....	8
3.1	Luftforurensning og klimagasser .....	8
3.1.1	NO <sub>x</sub> -Nitrogenoksid .....	8
3.1.2	SO <sub>2</sub> -Svoveldioksid.....	8
3.1.3	Partikler (Sot).....	8
3.1.4	CO <sub>2</sub> -karbondioksid .....	9
3.2	Miljøpåvirkning og konsekvenser.....	9
3.2.1	NO <sub>x</sub> .....	9
3.2.2	SO <sub>2</sub> .....	10
3.2.3	Partikler (Sot).....	10
3.2.4	CO <sub>2</sub> .....	10
3.3	Statistikk .....	11
3.3.1	Luftforurensning .....	12
3.3.2	Klimagasser.....	17
3.4	Regelverk .....	20
3.4.1	NO <sub>x</sub> .....	20
3.4.1.1	MARPOL 73/78, Anneks VI, Regulativ 13, NO <sub>x</sub> .....	20
3.4.1.2	Gøteborgprotokollen .....	21
3.4.2	SO <sub>x</sub> .....	27
3.4.3	CO <sub>2</sub> .....	27
4	Dieselmotoren og tilhørende utslipp.....	29
4.1	Dieselmotorens forbrenningsforløp klassisk modell .....	29
4.1.1	Tenningsforsinkelse .....	30
4.1.2	Forblandet forbrenning .....	30
4.1.3	Diffusjonsforbrenning.....	31
4.2	”DEC-modellen” .....	32
4.3	Opprinnelse av NO <sub>x</sub> .....	33
4.3.1	3 typer NO <sub>x</sub> .....	33
4.3.1.1	Termisk NO <sub>x</sub> .....	33
4.3.1.2	Prompt NO <sub>x</sub> .....	35
4.3.1.3	Brensel NO <sub>x</sub> .....	36
4.4	Mer om NO <sub>x</sub> -utslipp.....	37
4.4.1	Klassisk modell.....	37
4.4.2	”DEC-modellen” .....	38

4.4.3	Utslipp av NO <sub>x</sub> og driftsparametere .....	40
4.4.4	Ekspériment .....	41
5	Ny NO <sub>x</sub> -avgift .....	43
5.1	Oppfølging av Gøteborgprotokollen.....	43
5.2	NO <sub>x</sub> -forskriften.....	47
5.2.1	Bakgrunn og hensyn .....	47
5.2.2	Omfang .....	47
5.2.3	Avgiftsberegning.....	48
5.2.4	Rapportering og avgiftsberegning.....	50
5.2.5	Overgangsordninger-avgiftsrefusjon .....	50
5.2.6	Gyldighet målinger/sertifikater.....	51
5.3	Næringslivets NO <sub>x</sub> -fond.....	51
6	Reduksjon av utslipp og avgiften.....	53
6.1	Reduksjonstiltak aktuelle i dag og i fremtiden .....	53
6.1.1	Tiltak og modenhet .....	55
6.2	Forbehandling .....	59
6.2.1	Alternativt drivstoff .....	59
6.2.1.1	Gass.....	59
6.2.2	Vann.....	61
6.2.3	Vannemulsjon i drivstoff .....	61
6.3	Motor teknisk ombygging/justering.....	62
6.3.1	Brenselceller .....	62
6.3.2	Justering og timing.....	63
6.3.3	Direkte vanninjeksjon .....	63
6.3.4	HAM-Humid Air Motor .....	63
6.4	Etterbehandling .....	71
6.4.1	Selektiv katalytisk reduksjon (Selective catalytic reduction-SCR) .....	71
6.4.2	ECO-silencers .....	73
6.5	Motor tekniske vurderinger.....	74
6.5.1	NO <sub>x</sub> -utslipp og tilgjengelig teknologi .....	74
6.5.2	Andre motor tekniske vurderinger av interesse .....	77
6.6	Økonomiske betraktninger.....	80
6.6.1	Motor teknisk ombygging.....	80
6.6.2	Tiltak basert på vanntilførsel .....	81
6.6.3	Selektiv katalytisk reduksjon (SCR).....	81
7	Erfaringer fra tiltak .....	82
7.1	Design, nybygg, eksisterende anlegg.....	82
7.1.1	Erfaring fra NO <sub>x</sub> -målinger .....	82
7.1.2	Motor ombygging .....	83
7.1.3	Motor bytte/Nybygg.....	85
7.1.4	Gassdrift.....	86
7.1.5	SCR.....	86
7.1.6	HAM .....	88
7.1.7	NO <sub>x</sub> -reduksjon med membraner.....	88
7.2	Mer om HAM og SCR.....	88
7.2.1	HAM (Humid Air Motor).....	88

7.2.1.1	Patentet-Metode for å tilføre vanndamp til inntaksluften til en forbrenningsmotor, og innretning for dette.....	88
7.2.1.2	M/S Mariella .....	91
7.2.2	SCR (Selective Catalytic Reduction).....	100
7.2.2.1	SCR-system.....	100
7.2.2.2	Modellering av forbrenning i dieselmotor .....	102
7.2.2.3	M/V Viking Cinderella .....	106
7.2.3	Sammenligning HAM og SCR .....	108
8	Case: Sementfrakteskipet M/V Bornholm Cement.....	110
8.1	NO <sub>x</sub> innrapportering og betaling .....	110
8.2	Miljøavtale med staten .....	110
8.3	Kostnader for MV Bornholm Cement .....	111
8.4	Teori rundt målinger av M/V Bornholm Cement .....	112
8.4.1	Skipet og motorer.....	112
8.4.2	Avgassmåling.....	113
8.4.3	Testoppsett .....	113
8.4.4	Resultater .....	117
8.4.5	Beregningsmetoden.....	118
8.5	Effekt av målinger for Bornholm Cement .....	118
8.6	Sammenligning opp mot investeringer .....	120
8.7	Vurdering av tiltak .....	121
9	Konklusjon/diskusjon .....	123
10	Referanser .....	125

## Nomenklaturliste

NO <sub>x</sub>	Nitrogenoksider
SO <sub>x</sub>	Svoveldioksid
CO <sub>2</sub>	Karbondioksid
NH <sub>3</sub>	Ammoniakk
PM	Partikler
HC	Hydrokarboner
CO	Karbonmonoksid
SCR	Selective Catalytic Reduction (Selektiv Katalytisk Rensing)
KFK	Klor Fluor Karboner
VOC	Volatile Organic Compounds (Flyktige Organiske Komponenter)
HAM	Humid Air Motor
KGJS	Kristian Gerhard Jebsen Skipsrederi As
SECA	SO <sub>x</sub> Emission Control Areas
EGR	Exhaust Gas Recirculation (Eksosgass resirkulering)
Offhire	Tid uten normal drift
MTO	Motorteknisk ombygging
HRSG	Heat Recovery Steam Generator
ETC	European Transient Test Cycle
DWT	Dead weight tonnage
IMO	International Maritime Organisation
LNG	Liquefied Natural Gas
Marpol	Internasjonalt regelverk for utslipp fra skip laget av IMO
PPM	Parts per million
SFT	Statens Forurensningstilsyn
SSB	Statistisk Sentralbyrå



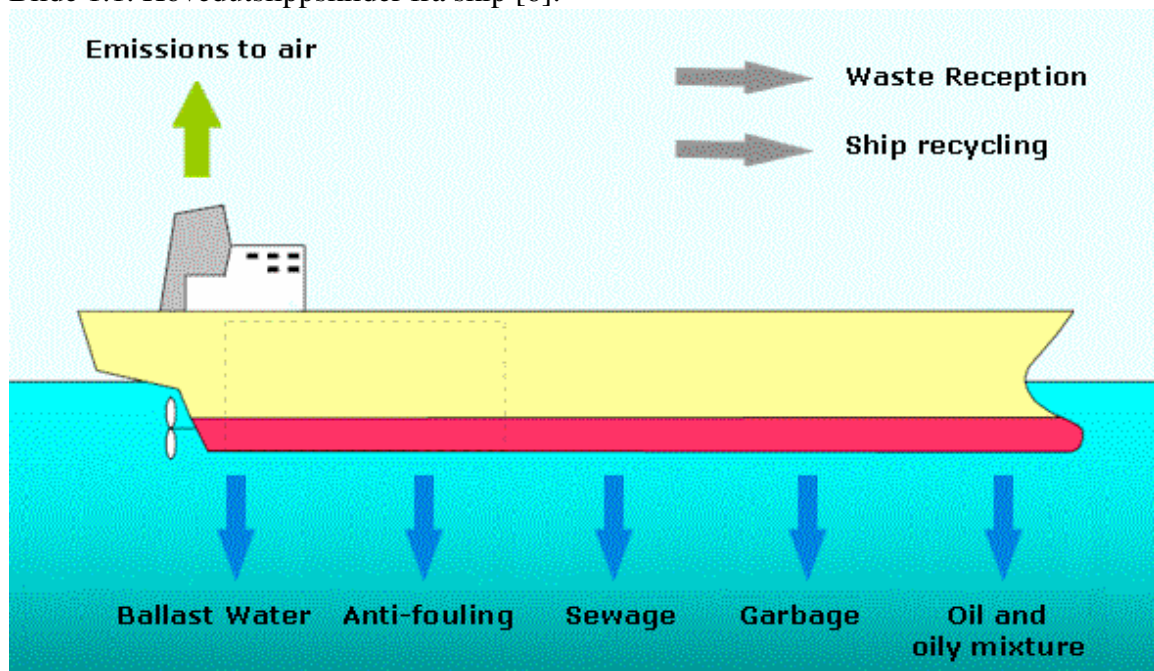
# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn for prosjektet

Utslipp fra skipsfarten er et forurensningsområde med stort potensiale for forbedringer, selv om det er en gjennomgående miljøvennlig transportmetode sammenlignet med alternativene. Dette har nå fått et løft, og en viktig motivasjonsfaktor her er den nye NO<sub>x</sub>-avgiften som ble iverksatt 1.1.2007 (se kapittel 5.2). Vi har et stadig økende transportbehov og flere krefter vil ha mer og mer last over på sjø og jernbane, blant annet for å senke eller bedre ulykkesstatistikken langs norske veier. Med økt transport og flere skip får vi flere og flere kilder til forurensning langs kysten, og ellers i verden forøvrig. Da sier det seg selv, at for å møte internasjonale utslippsavtaler må man innføre effektiv miljøteknologi ombord på skipene for å minke utslipp av blant annet NO<sub>x</sub>. Det er per i dag stor vilje og flere aktører som kan bidra til å implementere tiltak på skip, men problemet er at tiltakene koster rederiene dyrt. Løsningen må være å innføre tiltak der det svarer seg i forhold til avgiftene man er pålagt fra myndighetene å betale, slik at man får en balansegang der det er billigere å innføre tiltak enn å forurense.

Denne masteroppgaven skal ta for seg noen viktige NO<sub>x</sub>-reduksjonstiltak, og se litt på hva som er praktisk gjennomførbart på et skip hos rederiet Kristian Gerhard Jebsen Skipsrederi AS. En skal være klar over at det beste ikke alltid er gjennomførbart eller mulig. Hensikten med oppgaven er å kartlegge hva som finnes av aktuelle tiltak i 2007, samt kartlegge regelverket for NO<sub>x</sub> slik det framstår i dag. Figuren under viser utslippskildene man har fra skip. Denne rapporten tar for seg de viktigste utslippene til luft, geografiske sammenligninger og konsekvenser av disse.

Bilde 1.1. Hovedutslippskilder fra skip [6].



## **1.2 Disposisjon**

Rapporten fokuserer på NO<sub>x</sub>-tiltak ombord på skip, spesielt med tanke på marine dieselmotorer, det vil si en innføring i tiltak og konsekvenser av disse både før, under og etter forbrenningsprosessen, mellom annet SCR og HAM. Noe av det sentrale er hva som er mulig i dag og i fremtiden. Den går og inn på hvordan mennesker påvirker miljøet, regelverket for utslippene omtalt i denne oppgaven og den inneholder en case fra et skip i KGJS sin sementflåte. Her har man foretatt målinger for å bestemme kildespesifikk utslippsfaktor for å få en mer nøyaktig utregning av avgiften. Resultatene kan så brukes for å bestemme eventuelle reduksjonstiltak ombord det aktuelle skipet, og se på mulige endringer i lys av driftsprofilen.

## **1.3 Avgrensning av oppgaven**

Alle faser ved livsløpet til skip påvirker miljøet på den ene eller andre måten. Denne rapporten er avgrenset til å ta for seg hovedutslippskilder til luft fra skip, og da spesielt NO<sub>x</sub> med fokus på tiltak for å begrense dette på en teknisk-økonomisk forsvarlig måte. CO<sub>2</sub> er den andre viktige utslippsgassen som blir behandlet her. Med tiltak menes motortekniske tiltak implementert for normal drift på eldre skip, og nyvinninger på området for nybygg.

Det som ikke dekkes i denne rapporten er utslipp av KFK eller VOC, og bare delvis SO<sub>x</sub>. Heller ikke avfall, kloakk eller gråvann (ballastvann) blir behandlet her. Partikler og HC (hydrokarboner) er bare forklart enkelt, og aske fra forbrenning er heller ikke fokusert på, samt luftforurensning fra cargosystemer mellom annet kjølemedier. Annen forurensning fra lasten, mindre oljeutslipp, materialvalg ved bygging av skip og kjemikaliebruk til mellom annet bunnstoff er heller ikke behandlet i denne rapporten.

Oppgaven er delt inn slik at hovedemnene (NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> og partikler) er omtalt flere ganger, men i forskjellige sammenhenger og kapittel. På samme måte er reduksjonsmetodene omtalt i oppgaven også gjengitt flere steder, men i forskjellige sammenhenger slik at de blir presentert i relevant delkapittel. Forfatteren mener dette er det mest ryddige for å gi en grundig gjennomgang av temaet for oppgaven.

## 2 Om Firmaet

Kristian Gerhard Jebsen Skipsrederi As er et rederi som eier og driver en rekke skip innen forskjellige bransjer på verdensbasis. Det ble stiftet i 1967 av Kristian Gerhard Jebsen og har hovedkontor i Bergen med datterkontor og representanter i [69]:

- Manila - Filippinene (Bemanningskontor)
  - Sagreb - Kroatia (Bemanningskontor)
  - Mumbai - India (Eksklusiv bemanningsagent/Bemanning Borgestad)
  - Rio de Janeiro - Brasil (Driftskontor)
  - Rotterdam - Nederland (Driftskontor)
  - Bangalore - India (Driftskontor)
  - Skien - Norge (Borgestad/Driftskontor)
- 
- KGJS planlegger å ansette mer teknisk personell i Rio og Shanghai, samt at de oppretter driftskontor i Singapore våren 2007.

Firmaet begynte i 1967 med drift av to mindre kystfartøy, og har siden ekspandert både i størrelse og inn i andre shippingområder. Målt på brutto inntekt og antall skip under administrasjon er KGJS et av de største rederiene i Norge. Firmaet er 100% eid av Jebsen familien, som også har eierskap i flere andre firma som beskrevet senere i dette avsnittet [3] (2007).

### 2.1 Flåte og Last

Flåten som KGJS opererer er stor og variert med tanke på størrelse og type fartøy. I hovedsak er den delt opp i Gearbulk-, Sement- og Tankflåte.

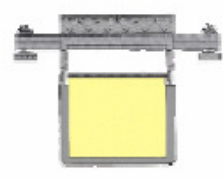


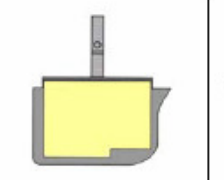
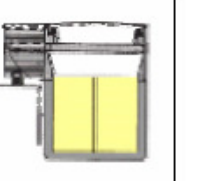
#### 2.1.1 Gearbulk

Jebsenfamilien eier 60% av Gearbulk-gruppen, mens Mitsui O.S.K. Lines eier de resterende 40%. KGJS har ansvar for teknisk drift, og bemanningsansvar på 61 av disse fartøyene. Befraktning, altså transport og logistikk, blir administrert av Gearbulk i London. Flåten består av følgende skip, også vist i tabellene under [69];

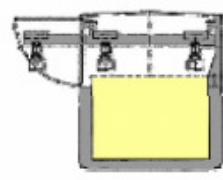



- 72 spesialfartøy i størrelsesorden 38,500 – 52,000 dwt, gruppert som
  - 5. generasjon, Open Hatch Gantry Craned Vessels (OHGC)
  - 4. generasjon
  - 3. generasjon
  - Fleximax
  - Totally Enclosed Forestry Carrier Vessel (TEFC)

- Totally Enclosed Forestry / Pitch Carrier Vessel (Jaeger Arrow)
- Andre
  - General Cargo
  - Liquid Pitch / Metal Carrier
  - Geared Handymax Bulk Carrier
  - Liquid Pitch Carrier
  - High heat tankers
  - 1 cement carrier under management av Belden

Tabell 2.1. Gearbulkskip (2007) [3].

				
OHGC 5 <sup>th</sup> generation	OHGC 4 <sup>th</sup> generation	OHGC 3 <sup>rd</sup> generation	Fleximax	Totally Enclosed Forestry Carrier (TEFC)

Tabell 2.2. Gearbulkskip (2007) [3].

			
Totally Enclosed Forestry/ Pitch Carrier Vessel	OHGC	Fleximax	TEFC

Gearbulkflåten består hovedsaklig av open hatch gantry craned (OHGC) - skip med dobbelt skrog, og boksformede lasterom som tillater lett adgang til alle deler av lasterommet, uten dekkoverheng. Glatte overflater på lasterommene sikrer at faren for lastskade er redusert. OHGC-skip er designet for å frakte sammenbundet last som skogprodukt og ikke-jernholdige metall. De mest vanlige skogproduktene som fraktes er pappmasse, trykkepapir og forskjellige typer papp og papir. Gearbulk er den største befrakteren av aluminiumsprodukt og andre ikke-jernholdige metall som kobber og bly. Andre enheter som fraktes er granitt, rør og ståldeler, forskjellige prosjektlaster og bulklaster. Gearbulkflåten har også to skip som frakter raffinert sukker.

OHCG-skipene er fleksible og utskiftbare, og kan derfor enkelt og effektivt tilpasses kundenes krav. Gantrykranene som er installert ombord de aller fleste Gearbulkskipene er spesialisert for bulklaster. Kranføreren er plassert på toppen av kranen og har fullstendig oversikt over lasterommet nedenfor. Dette gjør lasting og lossing av sensitive varer sikkert og effektivt.

I og med at en del last er sensitiv med tanke på temperatur og fuktighet, (mye frakt foregår mellom klimasoner) har Gearbulkflåten fått installert tørkesystemer ombord.

Disse kontrollerer fuktighet og temperatur i lasterommene og dermed synker faren for lastskader [3].

## 2.1.2 Tank

SKS OBO Limited – Bermuda er delvis eiet av KGJS og flåten består av;

- 12 Aframax – størrelse Ore–Bulk–Oil (OBO) fartøy
  - 8 på 110.000 dwt, der V-ships har ansvar for teknisk drift og bemanning
  - 2 på 121.000 dwt, der KGJS har ansvar for teknisk drift og bemanning
  - 2 på 110.000 dwt, der KGJS har ansvar for teknisk drift og bemanning

Konseptet med OBO-skip som har mulighet til å frakte både våt og tørr last er ikke ny, men er i de senere år forbedret for å motvirke de operasjonelle begrensningene til de foregående generasjonene av disse skipene [3].

SKS Tankers Limited, Bermuda, er også delvis eiet av KGJS og kontrollerer

- 4 Suezmax – størrelse tankskip på 160.000 dwt på timecharter, med 4 skip i bestilling. 2 skip der Columbia Ship Management Ltd. i Limassol, Kypros har ansvar for teknisk drift og bemanning, og 2 der V-ships har ansvar for teknisk drift og bemanning.

Disse innovative fartøyene har lagringstanker dekket med ren epoxy og forskjellige tilpasninger som gjør at de kan frakte sensitive laster som flydrivstoff. Disse fartøyene er de største i sitt slag. Befraktning er administrert av Pine Limited på Bermuda, som gjennom et agentur har utnevnt Pelican Shipping Limited som befraktningsagent i London [3].

Bilde 2.1. SKS skip 2006 [3].



Kgjs eier i tillegg 50% av Flumar Transportes de Quimicos e gases Ltda ("Flumar"), Rio de Janeiro, Brasil. Denne flåten opererer stort sett på østkysten av Sør Amerika i kjemikalie- og gassmarkedet. Disse fartøyene har V-ships ansvar for teknisk drift og bemanning [3];

- 4 Kjemikalietankere fra 9544 til 12450 dwt
- 2 Gasstankere fra 4452 til 10310 dwt

Bilde 2.2. Flumar skip 2006 [3].



KGJS har også eierskap i;

- 2 Kysttankere (1120 til 1870 dwt) (Disse går langs norskekysten)
- Dette gir totalt 17 tankskip der KGJS har ansvar for teknisk drift og bemanning

### 2.1.3 Sement

- 23 Selvtømmende bulk sement fartøy (1725 til 27145 dwt)

Moderne sementfrakteskip er spesialiserte fartøy som ikke frakter andre typer gods. De er klassifisert som tørrbulk fartøy, og minner med sin lukkede konstruksjon mer om tankskip. Det er særegne fartøy med komplekst utstyr ombord i fabrikkanklegget, et ekstensivt system av transportbelter og ofte et tårn på fordekket. Sementfraktere pleier å bli delt opp i "deep sea fartøy", som frakter sement på lange internasjonale turer, og "short sea traders", som danner et distribusjonsnettverk der last fra deep sea terminalene blir fraktet til havner i nærheten av kunden.

Bilde 2.3. Sementfrakteren Cembalo (Kgjs 2007).



Totalt har KGJS (2007) [69];

- Teknisk management av 116 fartøy, inkludert 26 fartøy under submanagement
- Fører byggetilsyn med Gearbulk og egne Suezmax nybygg
- Prosjekterer fornyelse i sementflåten
- Er involvert i utvikling, konstruksjon og management av terminaler, lektere, havner og forskjellige godshandlings- og lagringssystemer over hele verden
- 13 sementfraktere som er under management av Belden kommer i tillegg

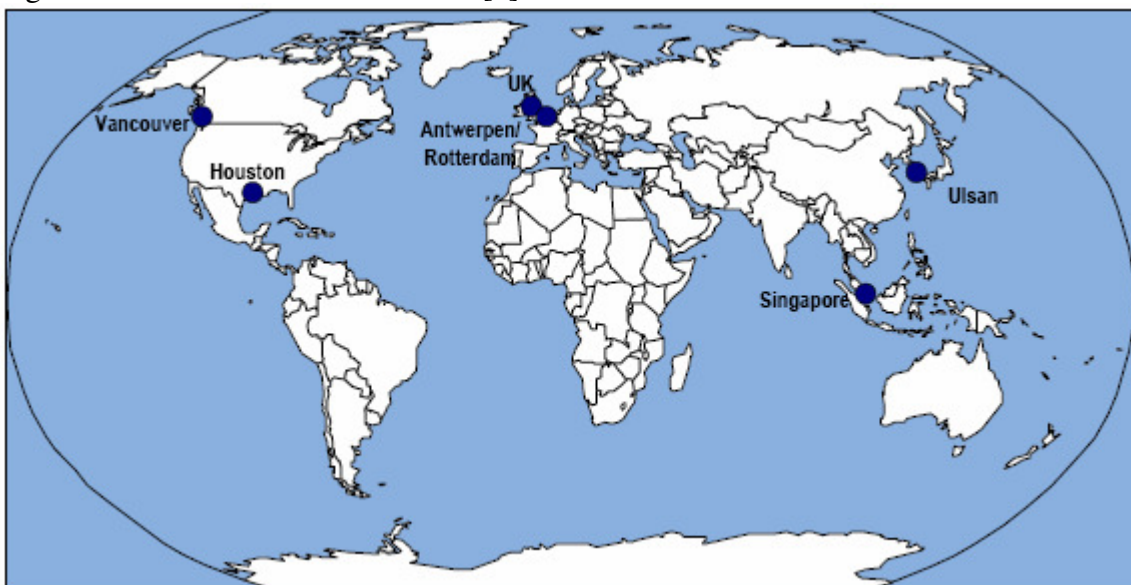
## 2.2 Handel

Følgende havner eller områder er identifisert som KGJS viktigste forsyningssteder [69]:

- Antwerpen/Rotterdam
- Tyskland
- Storbritannia
- Vancouver B.C.
- Houston
- Japan
- Ulsan, Sør-Korea
- Singapore

I disse nøkkelområdene satser KGJS på å sikre lagringsforhold for fartøyene. Andre viktige mål er å kunne planlegge langt frem i tid for å sikre kontinuitet og konsolidere last for å redusere kostnadene. Figuren under viser de viktigste havnene på verdenskartet [3].

Figur 2.1. Verdenshandelen til KGJS [3].



## 3 Miljø

### 3.1 Luftforurensning og klimagasser

#### 3.1.1 NO<sub>x</sub>–Nitrogenoksid

Nitrogenoksid (NO<sub>x</sub>) inkluderer NO, NO<sub>2</sub> og andre oksidanter av nitrogen. Den mest vanlige, nitrogendioksid (NO<sub>2</sub>), er en rødlig brun, høy reaktiv gass som dannes i omgivelsesluften ved oksidering av nitratoksid (NO). Hovedkildene til menneskeskapte NO<sub>x</sub> - utslipp er høytemperatur forbrenningsprosesser. NO<sub>x</sub> spiller en viktig rolle i dannelsen av bakkenært ozon gjennom reaksjonen med VOC under påvirkning av sollys. Nitrogenoksid bidrar også til dannelsen av sur nedbør og et bredt spekter av miljøeffekter som endring av sammensetning og overlevelsessevne til en del vegetasjon i våtmarksområder, dårligere sikt, forsuring av ferskvann, algevekst og økte verdier av giftstoff som er farlig for fisk og annet marint liv. NO<sub>x</sub> er også forbundet med alvorlig helsefare for mennesker [6].

#### 3.1.2 SO<sub>2</sub>-Svoveldioksid

Avgasser som inneholder svoveloksid dannes når drivstoff som inneholder svovel (fortrinnsvis kull og olje) forbrennes. Den mest vanlige, svoveldioksid (SO<sub>2</sub>), er en fargeløs, ikke-brennbar gass med sterk lukt som irriterer øyne og luftveier. Den reagerer på overflaten til en rekke luftbårne partikler, er oppløselig i vann og kan oksideres (tæring av metall gjennom å binde oksygen ved å gi fra seg elektron [20]) i sammenheng med luftbårne vanndråper. Marint drivstoff har vanligvis et høyt svovelinnhold sammenlignet med drivstoff som brukes på land. I Europa står shipping for 20% av de totale SO<sub>x</sub>-utslippene. Fordi landbasert industri reduserer sine utslipp mer enn skipsindustrien, forventes det at shipping vil stå for mesteparten av utslippene i Europa innen 2020. IMO har overvåket innholdet av svovel i marint drivstoff siden 1999. Overvåkingen, som er basert på bunkringsrapporter fra hele verden, viser at det gjennomsnittlige svovelinnholdet er på 2,67% m/m [6].

#### 3.1.3 Partikler (Sot)

Partikler som dannes under forbrenning av fossile brensler er en kompleks blanding av organiske og uorganiske stoff. Disse stoffene finnes både i fast og flytende form. Luftbårne partikler benevnes gjerne PM<sub>10</sub>, og en finere brøkdell av disse (PM<sub>2,5</sub>), er de som gir størst negative utslag for mennesker. Grovere partikler finner vi i jord og veistøv, mens finere partikler består av forbrenningspartikler og rekondenserte organiske og metalliske dis. Syrekomponentene er også fine partikler. I et urbant miljø, eller i områder



med mye skipstrafikk, oppstår partikler ofte som sulfater og nitrater i reaksjoner som involverer svoveldioksid (SO<sub>2</sub>) og nitrogenoksider (NO<sub>x</sub>) [6].

De viktigste klimagassene er karbondioksid (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), lystgass (N<sub>2</sub>O) og fluorgasser. Det fokuseres mest på disse siden de både er viktige klimagasser, og konsentrasjonen av disse gassene i atmosfæren styres av menneskelig aktivitet [9]. I denne rapporten blir det fokusert på utslipp fra skip, så CO<sub>2</sub> er den som blir sett nærmere på av klimagassene.

### 3.1.4 CO<sub>2</sub>-karbondioksid

Karbondioksid (CO<sub>2</sub>) er en fargeløs, luktfri gass som blir produsert når karbon forbrennes med store mengder oksygen [6]. Karbonet fra drivstoffet binder seg med oksygen fra luften under forbrenningsprosessen, og den vil oppstå i store mengder uansett hvordan forbrenningen skjer. Rent kjemisk vil alle karbonatomene i drivstoffet som benyttes bli til CO<sub>2</sub>, så innholdet av karbon og forbruk av drivstoff avgjør avgassmengden [4]. Karbondioksid produseres også naturlig i naturen på grunn av skogbranner, vulkanutbrudd, nedbryting av planter og dyr og fordamping fra havene. CO<sub>2</sub> fjernes også av naturen gjennom naturlige prosesser der sjøvann tar opp gassen, og plankton bruker den i fotosyntesen. Skog og gress på land bruker og CO<sub>2</sub> i fotosyntesen [6].

I forbindelse med skip er hovedkildene til CO<sub>2</sub> – utslipp forbrenning av fossilt drivstoff i hovedmaskineri, hjelpemotorer, kjeler og forbrenningskammer. CO<sub>2</sub> blir også ofte brukt i brannslukningsutstyr ombord. Størsteparten av utslippene skjer ute på havet, men ved landligge kan avgassene fra skip gi lokale påvirkninger.

## 3.2 Miljøpåvirkning og konsekvenser

### 3.2.1 NO<sub>x</sub>

#### Sur nedbør

Sur nedbør oppstår når utslipp av svoveldioksid (SO<sub>2</sub>) og nitrogenoksid (NO<sub>x</sub>) i atmosfæren reagerer med vann, oksygen og oksidanter. Denne nedbøren faller til bakken i tørr form (gass og partikler), eller i våt form (regn, snø og tåke). Partiklene kan i visse tilfeller fraktes flere hundre kilometer. SO<sub>2</sub> - og NO<sub>x</sub> - gasser og relaterte partikler som sulfat og nitrat, bidrar til dårlig sikt og påvirker helsen til mennesker i nærheten. Mennesker utsatt for disse stoffene, i større eller mindre mengder, kan få pustevansker eller andre problemer knyttet til respirasjon. Andre effekter er skader på lungevev og fosterdød. Sur nedbør påvirker også pH-verdien i vann og i bakken siden den løser seg lett i vann og danner salpetersyre (HNO<sub>3</sub>), noe som gjør det vanskelig for fisk eller andre dyr, samt trær å overleve over en viss høyde. Sur nedbør akselererer også degenereringen av bygninger, broer og statuer eller andre kunstverk.

### **Bakkenært ozon (O<sub>3</sub>)**

Ozon i de øvre luftlagene beskytter jorda mot farlig stråling fra sola. Bakkenært ozon er derimot farlig for både folk og miljø hvis konsentrasjonen blir for høy. Dette er et miljøproblem i de fleste land, og høye nivå kan gi helseproblemer, redusere avlinger og skader forskjellige materialer. Ozon dannes i reaksjoner som inkluderer NO<sub>x</sub> og VOC kombinert med sollys. Det skal vanligvis til flere store utslippskilder for å danne ozon, men det er og avhengig av lokale værforhold og konsentrasjonen av NO<sub>x</sub>.

### **Lokal luftforurensning**

Områder med høy konsentrasjon av bakkenært ozon opplever flere innleggelsler på sykehus på grunn av folk med luftveisproblemer. Personer som blir utsatt for dette i flere eller lengre perioder kan få infeksjon i lungene, oppleve endringer i lungene eller utvikle astma, men dette er også avhengig av sykdomshistorien til individet. Personer som blir utsatt for konsentrasjoner av NO<sub>x</sub> i kortere perioder kan oppleve endring i lungekapasitet og oksygenopptak [6].

## **3.2.2 SO<sub>2</sub>**

### **Lokal luftforurensning**

I tillegg til sur nedbør i sammenheng med NO<sub>x</sub>, fører svovel til lokal luftforurensning i spesielt urbane strøk. SO<sub>x</sub>-utslipp fra skip i havner nære urbane strøk bidrar og til store mengder SO<sub>x</sub> i omgivelsesluften. Mennesker som utsettes for utslipp opplever tvunget utåndingsvolum, opplevelsen av å ha motstand i halsen ved normal pust og symptomer som vesing og tung pust. WHO anbefaler å ikke overskride 125 µg/m<sup>3</sup> i løpet av en 24-timers periode [6].

## **3.2.3 Partikler (Sot)**

Personer utsatt for høye konsentrasjoner av partikler kan føre til problemer med luftveiene som hoste, bronkitt og tung pust. Hvor mye man påvirkes er avhengig av størrelse, form, kjemisk sammensetning og syreinnhold [6].

## **3.2.4 CO<sub>2</sub>**

### **Global oppvarming**

Sola er drivkraften til klimaet på jorda. Mye av solenergien blir absorbert av planeten, mens noe blir reflektert vekk. Et naturlig lag av atmosfæriske gasser fanger opp denne reflekterte energien. Noe blir sluppet ut i verdensrommet, men mye blir tvunget ned mot jordoverflaten igjen. Det er denne effekten som kalles "drivhuseffekten". Uten disse gassene ville gjennomsnittstemperaturen på jorda vært ca. 35 grader lavere enn i dag, og de er derfor nødvendige for livet på jorda [11]. Nye forskningsbevis tyder på at drivhuseffekten øker som en følge av utslipp av visse gasser, og dermed øker den globale oppvarmingen. CO<sub>2</sub> står for omtrent 85% av drivhusgassene som slippes ut i USA [6].

CO<sub>2</sub> er en viktig del av det naturlige karbonkretsløpet, men menneskeskapte utslipp forskyver den balansen. Menneskeskapte utslipp utgjør i dag omtrent 5% av det naturlige karbonkretsløpet. Brenning av fossilt brensel gjør at rundt 7,2 milliarder tonn karbon slippes ut, mens avskoging av tropeskoger bidrar med ca 1,6 milliarder tonn. Til sammen har man menneskeskapte utslipp på om lag 32 milliarder tonn CO<sub>2</sub>. Disse utslippene kan virke lite i forhold til den totale mengden, men de utgjør et tillegg til et system som før var i balanse. Forbrenning av fossile brensler som kull, olje og gass har omdannet store mengder fossilt karbon til CO<sub>2</sub>, og på den måten innlemmet dette i det naturlige kretsløpet. Mengden CO<sub>2</sub> som nå inngår i kretsløpet, er større enn den mengden atmosfæren klarer å fange opp naturlig. CO<sub>2</sub> – konsentrasjonen i atmosfæren er økt med 36% på grunn av menneskeskapte utslipp, sammenlignet med førindustriell tid [10]. Fortsetter denne utslippstrenden, forventes konsentrasjonen å fordoble seg i løpet av 50 år. Dagens CO<sub>2</sub> – konsentrasjon er den høyeste på minst 650000 år, og økningen i konsentrasjonen av CO<sub>2</sub> i atmosfæren det siste tiåret har vært raskere enn siden målingene begynte i 1960 [9]. En økning i klimagassutslipp fører til økt drivhuseffekt og mulig raskere klimaendringer. Det er foreløpig vanskelig å si noe direkte om konsekvensene, men is vil fortsette å smelte, øyer etterhvert forsvinne og biologisk mangfold vil langsomt gå tapt. Varmere vær gir bedre forhold for sykdommer og man forventer mer ekstremvær med alle skadene som følger, eksempelvis ”Katrina” i USA i 2005 [28].

### **3.3 Statistikk**

Luftforurensning fra skip har alvorlige konsekvenser for miljøet både i havet og på land. Det er en betydelig mengde innenriks skipstrafikk i norske farvann, med ca 500 fartøy over 100 bruttoregister tonn (lasteskip, forsyningskip, ferger, hurtigrute m.m.), og ca 550 norskregistrerte fiskefartøy over 100 brt. I tillegg kommer mange flere små fartøyer. Skipstrafikken står for omtrent 40% av NO<sub>x</sub>-utslippene og 15% av SO<sub>2</sub>-utslippene i Norge. (Tallene varierer noe fra kilde til kilde). Skipsfarten står for ca 5% av verdens svovelutslipp, 14% av nitrogenutslipp og 10% av karbondioksiden som slippes ut i atmosfæren [24].

## Forbruk av drivstoff

Tabell 3.1. Forbruk av drivstoff i innenriks sjøfart i 1998 [27]. (1000 tonn).

Forbruk	I alt	Marin gassolje	Spesialdestillat	Tungolje
Lasteskip	256	169	38	49
Passasjertrafikk	247	182	65	-
<b>Sum</b>				
<b>kysttrafikk</b>	<b>503</b>	<b>352</b>	<b>103</b>	<b>49</b>
Supply	192	192	-	-
Bøyelastere	59	1	7	50
Mobile rigger	97	97	-	-
Seismikkfartøy	1	-	-	1
<b>Sum</b>				
<b>oljerelatert</b>	<b>348</b>	<b>290</b>	<b>7</b>	<b>51</b>
<b>Fiske</b>	<b>392</b>	<b>371</b>	<b>20</b>	<b>-</b>
<b>Andre fartøy</b>	<b>77</b>	<b>57</b>	<b>-</b>	<b>21</b>
<b>Totalt</b>	<b>1320</b>	<b>1070</b>	<b>130</b>	<b>121</b>

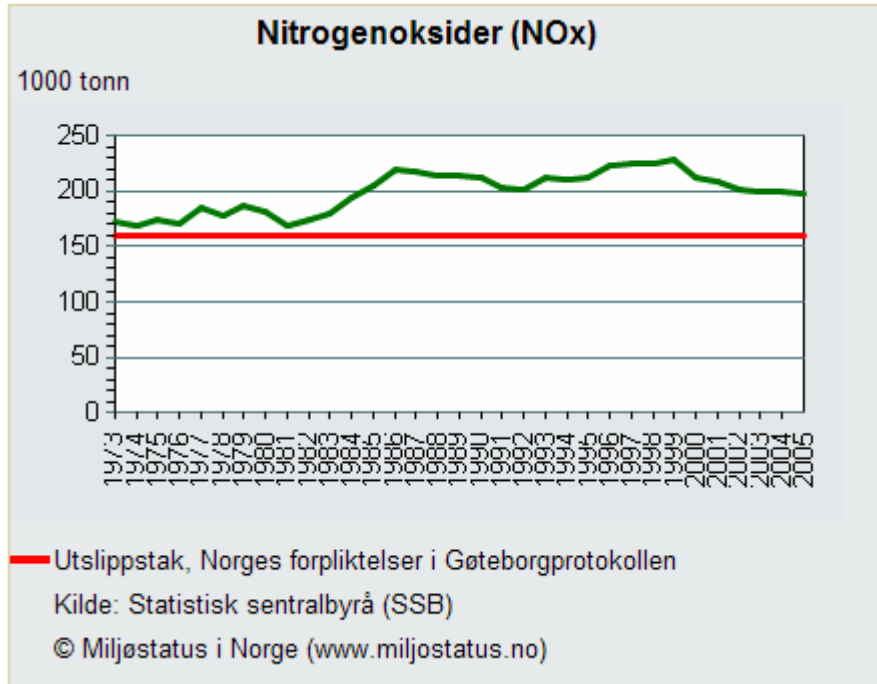
Det norske drivstofforbruket på totalt 1 320 000 tonn resulterte i et utslipp i 1998 på 3.400.000 tonn CO<sub>2</sub>, 93.600 tonn NO<sub>x</sub> og 4.800 tonn SO<sub>2</sub> fra innenriks sjøfart [27]. Videre kommer tillegg fra utenlandske skip og skip som har bunkret i utlandet.

### 3.3.1 Luftforurensning

#### NO<sub>x</sub>

##### Norge

De årlige utslippene av nitrogenoksider (NO<sub>x</sub>) skal maksimalt være 156000 tonn f.o.m. 2010. Fram til 2010 skal de årlige utslippene ikke overstige nivået vi hadde i 1987, dvs. 230000 tonn [7].

Graf 3.1. Utslipp av NO<sub>x</sub> fra 1973 til 2005 [7].

Man ser av figuren at de norske NO<sub>x</sub>- utslippene økte veldig fram til 1986. Videre ser man at utslippene ble redusert fram til 1992. Dette skyldes antageligvis nedgang i den økonomiske aktiviteten, og innføring av strengere krav til avgasser fra veitrafikken. Utover dette har utslippstrendene variert litt opp og ned. I 2004 var det norske NO<sub>x</sub>-utslippet 215000 tonn. Det vil si 59000 tonn over kravet vi har forpliktet oss til gjennom Gøteborgprotokollen som gjelder fra 2010. På grunnlag av nye og strengere regler for avgasser fra kjøretøy, er det ventet at utslippene reduseres [7]. Utslippene i 2003 var forøvrig nesten 2% lavere enn i 1990.

### Utslippskilder

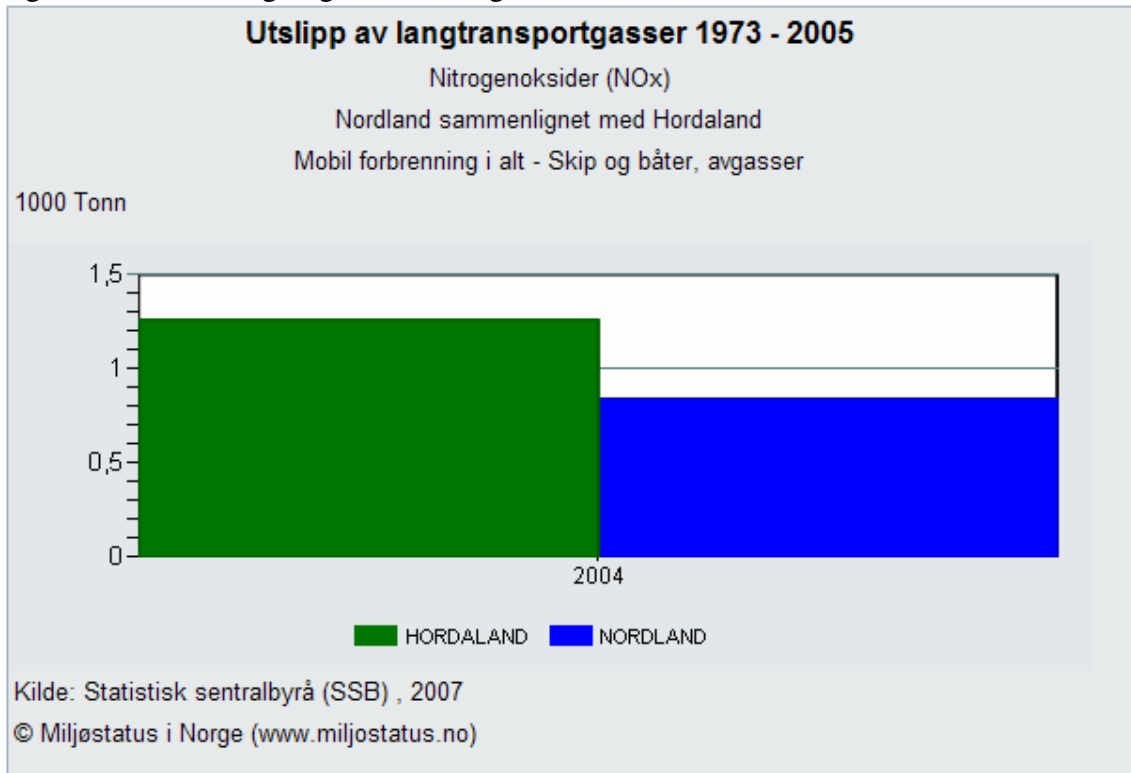
I Norge er kildene til utslipp av NO<sub>x</sub> først og fremst forbrenning av fossilt brensel i industri, offshore oljeaktivitet og mobile kilder på land og til havs [8]. Som en ser av figuren (kakediagrammet) under er den største kilden kysttrafikk og fiske, som sto for 40% av utslippene i 2003. Dette gikk ned til 37% i 2005 [17]. Det kan nevnes at 86000 tonn (utslipp fra kysttrafikk og fiske i 2003) tilsvarer ca. 2560 jernbanevogner med konsentrert salpetersyre.

Figur 3.1. Utslipp av NO<sub>x</sub> i Norge fordelt på kilder [8].

Petroleumsvirksomheten hadde med sine 22% i 2003 gått forbi veitrafikken med 19%. De resterende 19% fordeles på andre kilder som annen industri, luftfart og andre mobile kilder [8]. Utenriks sjøfart sto for ca 1,2% av de totale utslippene. At kysttrafikk og fiske har stått for en så stor andel av utslippene skyldes at det ikke har vært stilt krav til NO<sub>x</sub>-utslipp fra skip og båter før år 2000. Utslippsfaktor for NO<sub>x</sub> varierer fra 65-80 kg pr tonn forbrent drivstoff, men dette er avhengig av skipstype og maskineri [27].

Statistikken viser at veitrafikken reduserte sine utslipp med 46% fra 1990 til 2003. Det bekymringsfulle er at skipsfart og fiske økte med 21% i den samme perioden, mens petroleumsvirksomheten økte med 72%. I 2003 var det norske NO<sub>x</sub>- utslippet 220000 tonn. Dette var 9000 tonn eller 4% mer enn i 2002 og 64000 tonn, eller 29% mer enn vi har forpliktet oss til fra 2010 [8]. Med andre ord, skal vi holde forpliktelsene i Gøteborgprotokollen må vi ha en utslippsreduksjon på 30% i forhold til utslippsnivået i 1990, og 29% i forhold til 2003. Nye krav til utslipp fra skip kom i 2000 (se kapittel 5.2), og det vil uansett ta tid før disse får noen effekt.

Figur 3.2. Sammenligning innad i Norge [13]:



Som en ser av grafen slapp man ut 1260 tonn NO<sub>x</sub> i Hordaland i 2004, mot 860 tonn i Nordland samme år.

Av tabellen under ser man at tallene for Rogaland var noe høyere, med 940 tonn [13].

Tabell 3.2. Fordeling Rogaland mot Hordaland [13].

Ar	Sted	1000 Tonn
2004	HORDALAND	1,26
2004	ROGALAND	0,94

Kilde: Statistisk sentralbyrå (SSB) , 2007

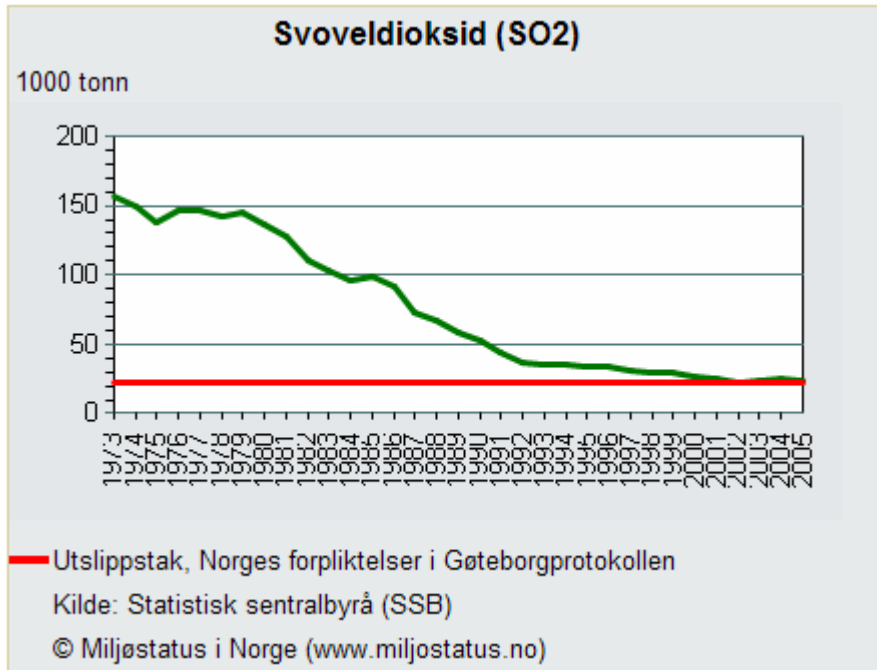
© Miljøstatus i Norge (www.miljostatus.no)

## SO<sub>2</sub>

### Norge

De årlige utslippene av svoveldioksid skal maksimalt være 22000 tonn f.o.m. 2010. Det betyr en reduksjon på 13% i forhold til 2004. Figuren under viser utslipp fra 1973 til 2005 [25].

Graf 3.2. Utslipp av SO<sub>2</sub> [25].

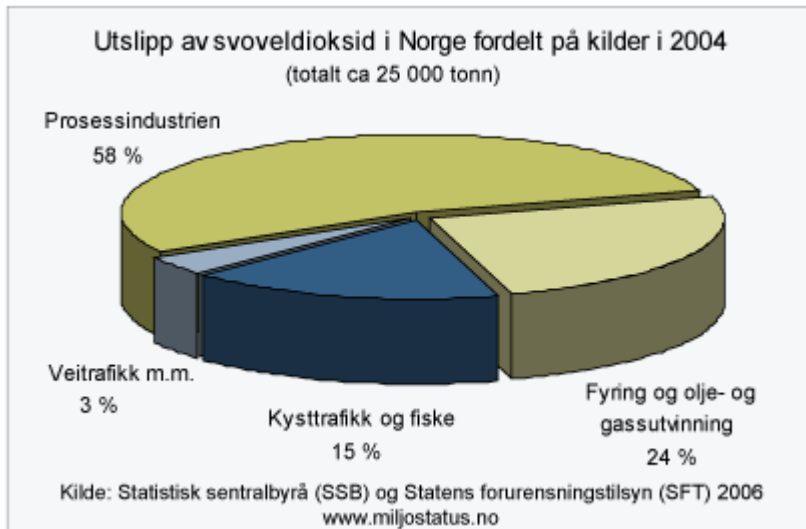


Tallene viser at utslippene av svovel i Norge har gått veldig ned de siste 20 årene. Utslippene var i 2002 på 23000 tonn, bare 1000 tonn over forpliktelsene i Göteborgprotokollen, mot 136000 tonn i 1980 [25].

### Utslippskilder

Prosessindustrien er den største kilden til utslipp av SO<sub>2</sub> i Norge, og bidro med ca 58% av de samlede utslipp i 2004. Som en ser av kakediagrammet under sto fyring og olje- og gassutvinning for 24%, mens kysttrafikk og bidro med ca 15% [26]. Utenriks sjøfart sto for ca 2,4% av de totale utslippene. Utslippene økte fra 13,5% i 2001 til 15% i 2004. En av årsakene til dette er at en del av aktørene i næringen fortsatt benytter drivstoff med høyt svovelinnhold. Utslippsfaktoren for SO<sub>2</sub> er (20 x svovelprosent) kg pr tonn forbrukt drivstoff [27].



Figur 3.3. Utslipp av SO<sub>2</sub> fordelt på kilder [26].

### Sammenligning med Europa

Siden svoveldioksid ikke er hovedtemaet i denne masteroppgaven, har man valgt å fokusere på utslipp i Europa istedenfor innad i Norge. Dette fordi svoveldioksid ikke lenger først og fremst er et norsk problem, på kort sikt, siden Norge ikke er langt unna kravet i Gøteborgprotokollen. Tabellen under viser utslipp av SO<sub>2</sub> og NO<sub>x</sub> i Europa for 1990 samt utslippskrav fra 2010 gitt i Gøteborgprotokollen [4].

Tabell 3.3. Europeisk utslipp av SO<sub>2</sub> og NO<sub>x</sub> [4]. (1 000 000 tonn).

Kilde	1990		2010	
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
EU 15	16,3	13,2	3,8	6,5
Ikke EU	21,6	10,2	9,9	7,3
Internasjonal shipping	2,8	4	2,8	4
Totalt Europa	40,7	27,4	16,5	17,8

Som tallene viser, skal det mye til for å komme fra 1990-nivå til kravene i protokollen for Europa. Svovelproblemet er vel langt på vei løst i og med at SECA ble innført for Nordsjøen og Norge der man har vedtatt maks 1,5% svovel i fuel fra 19.05.

### 3.3.2 Klimagasser

#### CO<sub>2</sub>

##### Verden

Sjøtransportindustrien står for 10% av verdens utslipp av CO<sub>2</sub>, og hvis vi ikke snart gjør noe ender vi bokstavelig talt opp på dypt vann. Satelittbilder avslører at ismeltingen går dobbelt så fort som før, og det er nå dobbelt så mye havis som i 1979 [11]. Det er bekymringsfullt at USA nekter å delta i ett nytt "klimaredningsregime" før Kina og India

forplikter seg til det samme. Kina på sin side har i følge en upublisert rapport som "Reuters" har fått tak i ingen planer om å forplikte seg til noe før moderniseringen av landet er i mål, rundt midten av dette århundret. Og foreløpig slipper de ut lite per hode i forhold til USA. FN – tall fra 2003 viser at USA sto for 23% av verdens CO<sub>2</sub> – utslipp (20 tonn per amerikaner), mens Kina sto for 16,5 & (3,2 tonn per kineser) [12]. Det er ventet at verdenshavene kommer til å stige 0,5 meter dette århundret. Hvis all isen smelter kan havene komme til å stige 7 meter. 5 meter ville ha gjort Miami til en by 80 km ute i havet, mens Bangladesh ville blitt borte. 150 millioner mennesker kan komme til å måtte flytte på seg innen 50 år [11]. Disse tallene sier noe om alvoret vi står ovenfor. Etter G8-møtet i Tyskland i juni 2007, anerkjente alle medlemslandene de vitenskapelige faktaene i rapportene til FN's klimapanel. Konklusjonen ble at de "seriøst vurderer" å halvere klimautslippene innen 2050.

### Norge

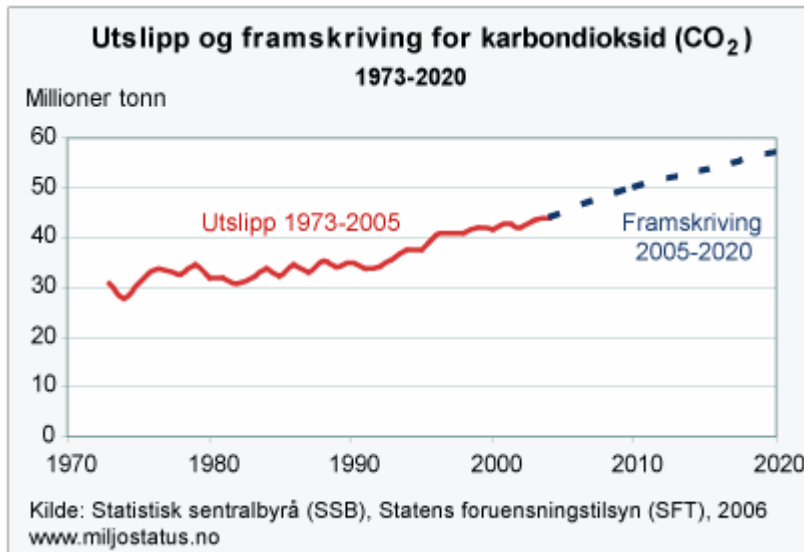
De norske utslippene av klimagasser var i 2005 ca 54 millioner tonn CO<sub>2</sub> – ekvivalenter [16]. De norske CO<sub>2</sub> – utslippene kommer med en høy andel fra petroleumsvirksomhet og energikrevende industri. Som en ser av grafen under sto kysttrafikk og fiske for en relativt liten del av det totale utslippet med 9% i 2005 [10].

Figur 3.4. Utslipp av CO<sub>2</sub> fordelt på kilde [10].

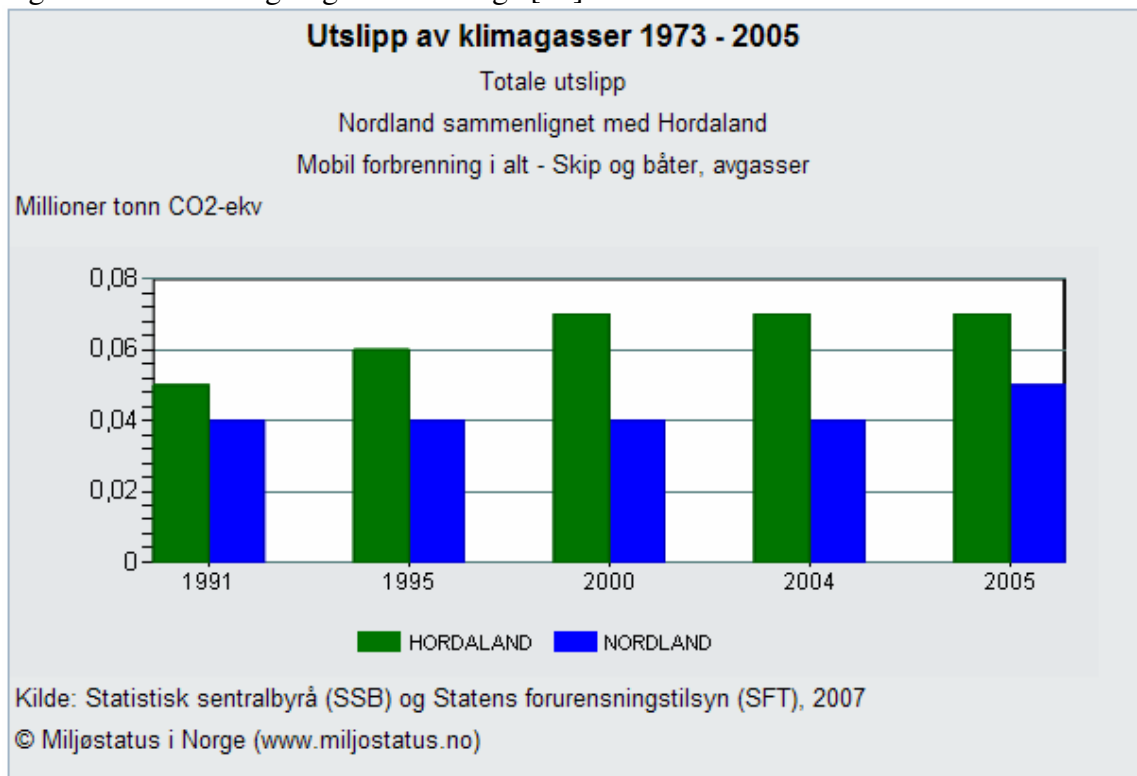


Utslipp av CO<sub>2</sub> utgjør ca 80% av utslipp av klimagasser i Norge. Utslippene har flatet ut etter å ha økt betydelig mot første halvdel av 1990 – tallet. Utenriks sjøfart sto for ca 0,4% av de totale utslippene. Utslippsfaktor for CO<sub>2</sub> er 3,17 tonn CO<sub>2</sub> pr tonn drivstoff for marin gassolje og spesialdestillat, og 3,20 tonn CO<sub>2</sub> pr tonn tungolje [27].

Man forventer en økning i utslipp fram mot 2010 på grunn av gasskraftverket på Kårstø og energianlegget på Snøhvit. Som en ser av grafen under ventes det at utslippet av CO<sub>2</sub> vil ligge ca 45% over nivået i 1990 [10].

Graf 3.3. Utslipp av CO<sub>2</sub> [10].

Figur 3.5. Sammenligning innad i Norge [14]:



Som en ser av grafen slapp man ut 0,07 millioner tonn CO<sub>2</sub> – ekvivalenter i Hordaland i 2005, mot 0,05 millioner tonn i Nordland samme år.

Av tabellen under ser man at tallene for Rogaland var de samme som Nordland i 2004 og 2005 [14].

Tabell 3.4. Sammenligning Rogaland mot Hordaland [14].

Ar	Sted	Millioner tonn CO <sub>2</sub> -ekv
2005	HORDALAND	0,07
2005	ROGALAND	0,05
2004	HORDALAND	0,07
2004	ROGALAND	0,05
2000	HORDALAND	0,07
2000	ROGALAND	0,05
1995	HORDALAND	0,06
1995	ROGALAND	0,04
1991	HORDALAND	0,05
1991	ROGALAND	0,04

Kilde: Statistisk sentralbyrå (SSB) og Statens forurensningstilsyn (SFT), 2007

© Miljøstatus i Norge ([www.miljostatus.no](http://www.miljostatus.no))

### 3.4 Regelverk

#### 3.4.1 NO<sub>x</sub>

##### 3.4.1.1 MARPOL 73/78, Anneks VI, Regulativ 13, NO<sub>x</sub>.

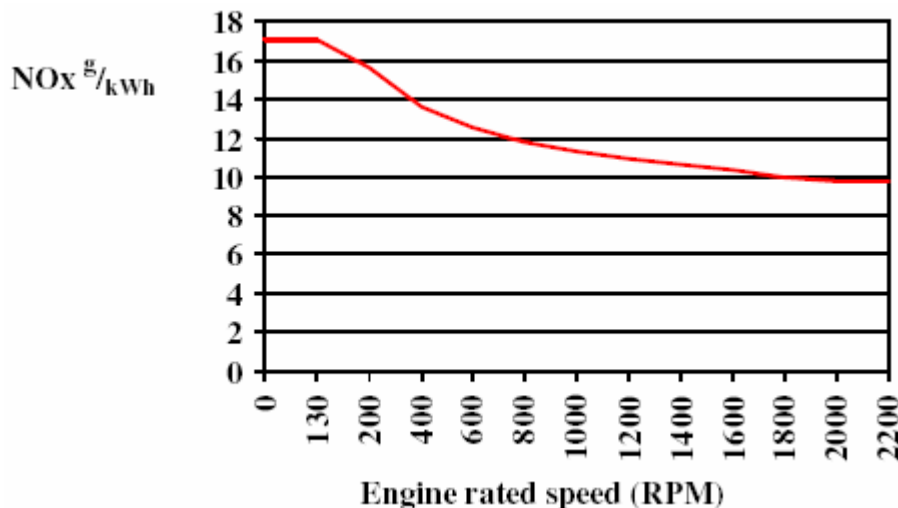
MARPOL vedlegg 6 styrer utslipp til luft fra skip. Regulativet trådte i kraft 19.mai 2005 og setter grense for utslippsverdier av NO<sub>x</sub>. Regulativet spesifiserer at motorer som er installert på skip konstruert på eller etter 1.januar 2000, eller motorer som har gjennomgått en større ombygging/modifisering på eller etter 1.januar 2000 skal møte kravene satt i den tekniske koden satt for kontroll av utslipp av NO<sub>x</sub> fra marine dieselmotorer. (Se EIAPP-sertifisering). Den tekniske koden for NO<sub>x</sub> bestemmer prosedyrer for testing, inspeksjon og sertifisering av marine dieselmotorer, noe som vil muliggjøre motorfabrikanter og skipsredere å sikre seg at alle motorer i bruk tilfredsstillende oppdaterte utslippsgrenser for NO<sub>x</sub>, som spesifisert i Regulativ 13 av Anneks VI [6].

Regulativet setter følgende grenser for NO<sub>x</sub>-utslipp fra dieselmotorer:

- i) 17.0 g/kW h når n er mindre enn 130 omdreininger
- ii)  $45.0 \times n^{(-0.2)}$  g/kW h når n er 130 eller mer, men mindre enn 200 omdreininger
- iii) 9.8 g/kW h når n er 200 omdreininger eller mer

Hvor n er omdreining av veivaksel per minutt. Tabellen under viser lovlige NO<sub>x</sub>-utslipp fra dieselmotorer [18]:

Tabell 3.5. IMO-kurven [18].



### 3.4.1.2 Gøteborgprotokollen

Gøteborgprotokollen av 1999 baserer utslippskravene sine på naturen sine tålegrenser for sur nedbør og bakkenært ozon i det aktuelle området. Protokollen setter utslippstak innen 2010 for svovel, NO<sub>x</sub>, VOC og ammoniakk. Norges plikt i denne protokollen er mellom annet å begrense totale utslipp til 22000 tonn/år SO<sub>2</sub> og 156000 tonn/år NO<sub>x</sub> fra 2010. Avtalen ble ratifisert av Norge 30.januar 2002 [19]. Tallene er forhandlet fram basert på vitenskapelige vurderinger av forurensningseffekter og reduksjonstiltak. Parter som har utslipp som i stor grad påvirker miljø eller helse, og som har utslipp som er relativt billige å redusere, må ta største delen av kuttene. Utslipp fra innenriks skipstransport er inkludert i Norges plikter i Gøteborgprotokollen, mens internasjonal skipsfart ikke er det siden den skal reguleres av IMO. [4,6] Når protokollen er fullt implementert, skal Europas svovelutslipp være redusert med minst 63%, NO<sub>x</sub>-utslipp med 41%, VOC-utslipp med 40% og ammoniakktutslipp med 17% sammenlignet med 1990. Protokollen setter også strenge utslippsgrenser for spesifikke utslippskilder (f.eks biler, elektrisitetsproduksjon og fabrikker) og krever at best mulig teknikk skal nyttes for å holde utslippene nede [6].

Norge er et av landene i Europa med lavest totale utslipp av SO<sub>2</sub> og NO<sub>x</sub>. Disse forbindelsene, som virker forsurende på jord og vann, kommer også langveis fra. Det er med andre ord et globalt problem. Norge har mye kalkfattig jord og sårbar vegetasjon. Dette gjør at skadevirkningene blir større her enn andre steder med høyere eksponering.

Sørlandet og sørlige deler av vestlandet er særlig rammet, mens Nord Norge blir rammet av kilder fra Russland. Under vises Norge sine utslipp og kvoter i forhold til Gøteborgprotokollen [29].

Tabell 3.6. Norges utslipp og kvoter for 2010 [29]. (tonn).

Komponent	Utslipp i 1990	Utslipp i 2002	Utslipp i 2010
NO <sub>x</sub>	223725	212978	156000
NM VOC	294395	344903	195000
SO <sub>2</sub>	52295	22074	22000
NH <sub>3</sub>	20375	22244	23000

### 3.4.1.2.1 Definisjoner fra Regulativ 13

#### Definisjoner

Regulativ 13 av Anneks VI gjelder NO<sub>x</sub>-utslipp fra dieselmotorer og skal gjelde for [18]:

- Hver dieselmotor med effekt på mer enn 130 kW som er installert på skip konstruert på eller etter 1.januar 2000
- Hver dieselmotor med effekt på mer enn 130 kW som har gjennomgått en større ombygging/modifisering på eller etter 1.januar 2000

Reglene gjelder ikke for nød-dieselmotorer, motorer på mindre enn 130 kW, motorer i livbåter eller annet utstyr tenkt til brukt i nødsituasjon.

Med ombygging/modifisering menes modifisering av motoren der [18]:

- Motoren byttes ut med en ny bygget på eller etter 1.januar 2000
- En større modifikasjon<sup>1</sup> er gjort på motoren i henhold til den tekniske koden for NO<sub>x</sub> (bytte av kamaksel, drivstoffdyser eller andre NO<sub>x</sub>-relaterte komponenter)
- Effekten på motoren er økt med 10%

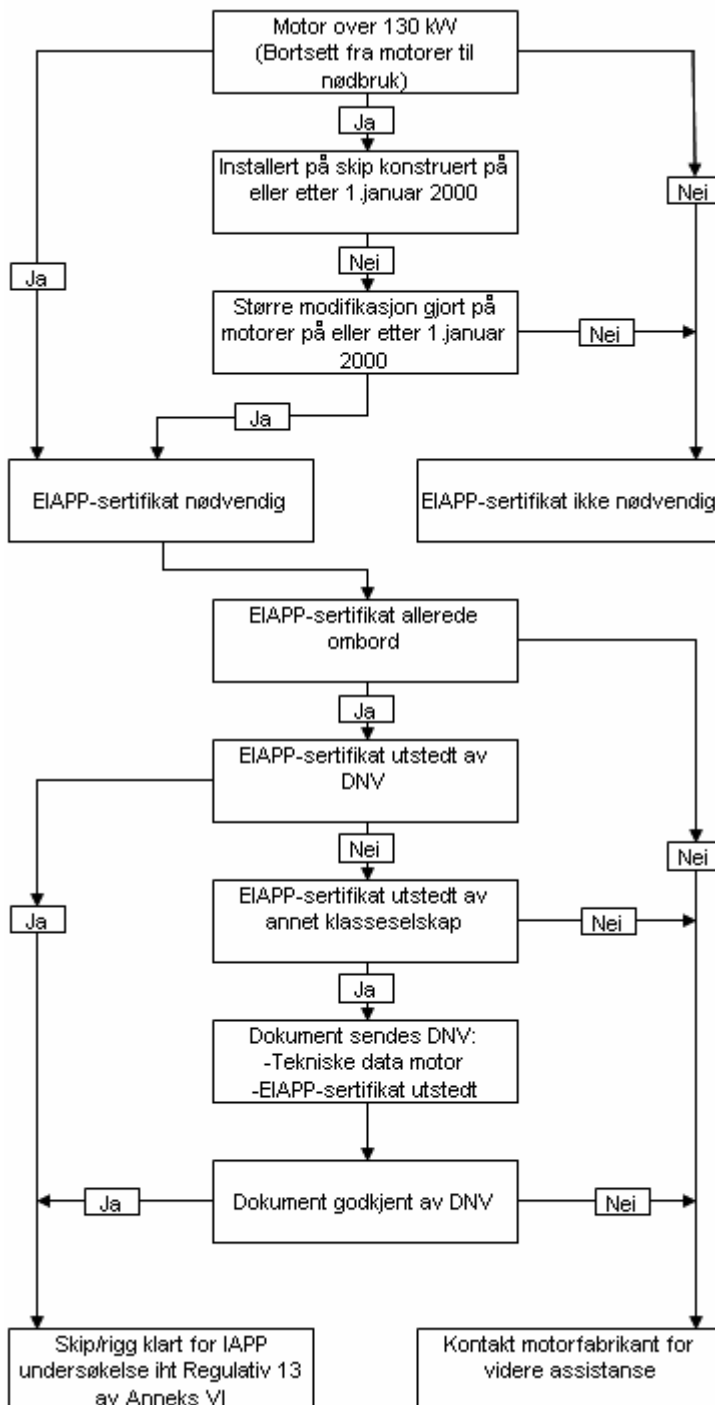
<sup>1</sup>For motorer installert på eller etter 1.januar 2000, gjelder en større modifikasjon av motor enhver modifikasjon av motor som potensielt kan øke utslipp utover utslippsstandarden definert i Regulativ 13 av Anneks VI. Deler av en motor som byttes, som ikke påvirker utslippet av NO<sub>x</sub>, er heller ikke definert som en større modifikasjon.

<sup>1</sup>For motorer installert før 1.januar 2000 gjelder en større modifikasjon av motor enhver modifikasjon av motor som øker utslippskarakteristikken bestemt ved målinger i henhold til NO<sub>x</sub>-regelverket. Eventuelle endringer av motor inkluderer, men er ikke begrenset til, endring av driftsspesifikasjon eller tekniske spesifikasjoner som kamaksel, drivstoffdyser, luftesystem, brennstoffkammer eller kalibrering av tenningspunkt (timing) [18].

### **3.4.1.2.2 EIAPP – sertifikat**

EIAPP- sertifikatet (Engine International Air Pollution Prevention) kreves for alle dieselmotorer som beskrevet ovenfor i dette kapitlet, og vil bli utstedt for marine dieselmotorer etter hvert som bevis på at utslipp er under kravene blir forelagt. Dette sertifikatet kom som et resultat av nye regler i IMO for skip konstruert etter 1.1.2000. Rederi bør bestemme kilde spesifikk utslippsfaktor totalt for skipene sine, siden dette er billigere enn å basere avgiften på turtallsbasert sjablongfaktor. Kontinuerlige målinger er heller lite sannsynlig å gjennomføre. Dette sertifikatet skal inngå i underlaget til skipets IAPP-sertifikat. Sertifikatene skal være om bord senest 19.mai 2008 [18]. Sertifiseringsprosessen skal gjøres i henhold til den tekniske koden for NO<sub>x</sub> gitt av IMO.

Figur 3.6. Framgangsmåten i sertifiseringsprosessen [18]:



Flytdiagrammet er basert på NO<sub>x</sub>-kravene for dieselmotorer, slik som EIAPP-sertifikatet er det. Sertifiseringsprosessen inkluderer en avgasstest hos motorfabrikant for å se om utslippene er under NO<sub>x</sub>-kravene, og godkjenning av teknisk fil for motor. Alle sertifiserte motorer blir levert med en individuell teknisk fil som inneholder motorens spesifikasjoner med tanke på samsvar med NO<sub>x</sub>-regulativet, og verifikasjonsprosedyrer anvendelige ombord.



### 3.4.1.2.3 Teknisk kode for NO<sub>x</sub>

Den tekniske koden for NO<sub>x</sub> bygger på ISO 8178 og åpner for 3 forskjellige verifikasjonsprosedyrer ombord gjort av classeselskap [18]:

- Sjekk av motorparametere
- Forenklet måling
- Direkte måling og monitorering

Den anvendelige verifikasjonsprosedyren ombord er i utgangspunktet bestemt av motorfabrikant, og er vanligvis et spesifikt kapittel i motorens tekniske fil. Metoden som blir mest brukt er uten tvil sjekk av motorparametere, men reder står fritt til å bruke den metoden en ønsker. Hvis en ønsker å benytte en annen metode enn den som er beskrevet i motorens tekniske fil, må den nye verifikasjonsprosedyren ombord forandres gjennom søknad til flaggstat og godkjenning av classeselskap.

#### Sjekk av motorparametere

For å fastslå samsvar med Regulativ 13 av Annex VI, er det ikke alltid nødvendig å måle utslipp for å fastslå at en motor er i samsvar med utslippsgrensene for NO<sub>x</sub>. Det vil være tilstrekkelig å vite at den nåværende tilstanden til motoren korresponderer med de spesifikke komponenter, kalibrering eller parameterjustering gjort ved 1.gangs sertifisering. Motorens tekniske fil identifiserer komponenter, innstillinger og operasjonsverdier som påvirker avgassene. Disse må sjekkes for å underbygge samsvar ved inspeksjoner. Følgende informasjon skal være ombord og oppdateres ved endringer [18]:

- Teknisk fil, inkludert verifikasjonsprosedyre
- Logg for å registrere alle endringer gjort relativt til motorens komponenter og innstillinger. Inkludere teknisk dokumentasjon i tilfelle modifikasjoner der noen av de omtalte komponentene inngår.
- EIAPP-sertifikat for hver motor

NO<sub>x</sub>-influerende komponenter og innstillinger er avhengig av hvilken motortype det gjelder, og skal inngå i motorens tekniske fil. Under er noen NO<sub>x</sub>-influerende parametere [18]:

- Injeksjonstiming
- Komponenter i injeksjonssystem (dyse, injektør, drivstoffpumpe)
- Injeksjonstrykk
- Kamakselens komponenter
- Ventiltiming
- Forbrenningskammer (sylinder, sylinderhode, sylinder liner)
- Kompresjonsrate (stag, simring, pakninger)
- Turboladers type og fabrikant (interne deler)
- Ladeluft (Kjøler og Varmer)
- Spylelufttemperatur og spyleluftkjølertilstand (hjelpblåser brukes kun ved lavlastkjøring og oppstart)
- NO<sub>x</sub>-reducerende utstyr (vanninjeksjon/emulsjonert drivstoff/avgass resirkulasjon/scrubber)

**Forenklet måling**

For verifikasjonstesting ombord under periodisk eller mellomliggende undersøkelse (survey), gir teknisk kode for NO<sub>x</sub> rom for forenklet målemetode. Det er uansett et krav at den initielle sertifiseringen er gjort av motorfabrikant. Målingen utføres mer eller mindre på samme måte som den initielle ved installasjon, men forenklinger i henhold til paragraf 6.3 i teknisk kode for NO<sub>x</sub> er akseptert. Det er likevel krav om at testingen blir gjort i henhold til testsyklus spesifisert i teknisk fil. Dette betyr gjerne full lastkjøring i 20 minutt, og vil i de fleste tilfeller kreve en full testkjøring av motoren. På grunn av mulige avvik ved bruk av denne metoden, er det satt en grense på 10% over øvre grense for utslipp for godkjenning.

**Direkte måling og monitorering**

Rederi har også mulighet til å foreta direkte målinger av NO<sub>x</sub>-utslipp under drift av motor. Slike data kan enten hentes via stikkprøver tatt fra operasjonsdata under normaldrift, og over hele spekteret til driftsprofilen, eller de kan komme fra kontinuerlig måling og datalagring. Kravet er at dataene er hentet innen de siste 30 dager, og må ha blitt samlet gjennom bruk av testprosedyrer gitt i teknisk kode for NO<sub>x</sub>. Måledataene må beholdes i arkivet i minst 3 måneder for verifikasjon og testsurvey. Det anbefales likevel å beholde dataene for en lengre periode. For å kunne bevise at utslippene er under kravet ved direkte måling, skal tilstrekkelig data samles for å kunne regne ut vektet gjennomsnittlig NO<sub>x</sub>-utslipp i henhold til teknisk kode for NO<sub>x</sub>.

**Reservedeler**

En av konsekvensene av MARPOL Annex VI, er at verifikasjonsprosedyren ombord for sjekk av motorparametere krever markering av NO<sub>x</sub>-influerende komponenter. Disse komponentene er de som står oppført i nevnte kapittel over. Alle komponentene i listen skal markeres med id i henhold til teknisk fil. Klaseselskap, på vegne av flaggstat, aksepterer ikke andre id-merker enn de som står oppført i teknisk fil.

I tilfeller der motorfabrikant kommer opp med et nytt design for en av de NO<sub>x</sub>-influerende komponentene, kan det hende at id-merket for den nye delen ikke stemmer med listen i teknisk fil. Dette skal godkjennes av flaggstat, eller klaseselskap gjennom autorisasjon fra flaggstat, og endringen skal dokumenteres i loggbok for motorparametere. Det samme gjelder for alle andre endringer som godkjennes på motoren under levetiden.

**Inspeksjoner**

På grunn av regelverket som ligger til grunn for IAPP-sertifikatet, skal dieselmotorer gjennomgå følgende inspeksjoner [18]:

- 1.gangs besiktigelse før skipet settes i drift, eller før IAPP-sertifikatet er utgitt for første gang
- Periodisk besiktigelse bestemt av flaggstat, men ikke mer sjelden enn hvert 5. år
- Minimum en mellomliggende besiktigelse under gyldighetstiden til sertifikatet
- Årlige besiktelser (eller det kan implementeres uannonserte inspeksjoner som et alternativ til dette)

### 3.4.2 SO<sub>x</sub>

#### IMO

MARPOL 73/78, Anneks VI, Regulativ 14, SO<sub>x</sub>.

I følge dette regulativet skal det være et globalt tak på 4,5% svovel i drivstoffet. Der det er behov for lavere utslipp gir IMO gjennom konvensjonen anledning til å etablere "SO<sub>x</sub> Emission Control Areas" med strengere grenseverdier for utslipp fra skip. Østersjøen og Nordsjøen er to områder med en øvre grense på 1,5% svovel i drivstoffet. I det mest brukte drivstoffet, IFO380, var gjennomsnittlig svovelinnhold i 1996 2,9%.

#### EU direktiv

EU-direktivet av 1999/ 32/ EC legger retningslinjene for svovelinnhold i en del drivstoff. Direktivet krever at medlemslandene sørger for at marin gassolje som brukes i deres territorialfarvann (12 nautiske mil fra land, og vannveier), fra 1. juli 2000 ikke overskrider 0,2% svovel. Dette skal endres til 0,1% fra 1. januar 2008. Det er i dag forbud mot bruk av marine diesellojler med mer enn 0,2% svovel i EU/EØS-land. Det ligger ikke inne noen bestemmelser for marin tungolje i dette direktivet. Et forslag om å innlemme tungolje i direktivet av 1999 er nylig publisert, og EU evaluerer nå muligheten for kvotehandling på utslipp fra skip [6]. Europaparlamentet vedtok i 2003 en øvre grense for svovelinnhold på 0,5% for hele Europa, og en må ligge på dette nivået for å oppnå en reduksjon på mellom 60 og 80% innen 2010. Avgjørelsen ligger uansett til slutt hos EUs miljøvernministere [21]. Parlaments- og rådsdirektiv 2005/ 33/ EF av 6.7.2005 ble innlemmet i EØS-avtalen 28.04.2006. Denne behandler innholdet av svovel i marine drivstoff. Denne nye avtalen setter forbud mot bruk av marine tungoljer med mer enn 1,5% svovel. I spesielt sårbare områder som Østersjøen fra 11.08.2006 og Nordsjøen fra 11.08.2007 [22]. Planen til Europaparlamentet om å redusere svovelandelen i bunkersolje til 0,5% i Nord-Europa og på ferger fra 2008, og i resten av Europa fra 2012 virker således lite sannsynlig [23].

#### Gøteborgprotokollen

Denne avtalen innbefatter også SO<sub>2</sub>-utslipp. Se foregående kapittel om NO<sub>x</sub>.

### 3.4.3 CO<sub>2</sub>

#### Kyotoavtalen

Kyotoavtalen (Kyotoprotokollen) er en internasjonal avtale som ble forfattet i desember 1997 i Kyoto, Japan. I avtalevilkårene innebærer det at globale utslipp av klimagasser skal reduseres med 5,2% i forhold til nivået i 1990 frem til 2008 – 2012. Dette innebærer at EU skal senke sine utslipp med 8%, USA med 7% og Japan med 6%. Det ble bestemt at minst 55 land med 55% av utslippene av CO<sub>2</sub> i 1990 offisielt ratifiserte den for at avtalen skulle kunne tre i kraft. (189 land har skrevet under, men ikke alle har ratifisert den, bare gitt løfte om å jobbe mot det [16] ). Russland underskrev avtalen i november 2004, dermed trådte avtalen i kraft 16 februar 2005. Norge skulle i følge avtalen få

mulighet til å øke sine utslipp med 1% i forhold til 1990, men har hittil økt med 8% [15]. Med i Norges plikter i Kyotoavtalen er CO<sub>2</sub> – utslipp fra innenlands skipstrafikk, men ingenting er fastlagt enda. IMO arbeider med å utvikle en strategi for kontroll av klimagassutslipp i tillegg til kartlegging av utslippsmengder og mulige reduksjonstiltak. Norge har i IMOs miljøkomite fått støtte for at en ikke skal skille mellom land med og uten kvantitative utslippsforpliktelser. Dette er viktig for å unngå at rederi flagger ut skipene sine til land som ikke har gjort seg forpliktet til å holde nede eller redusere utslipp [4]. Det sier seg jo selv at det gir store konkurransefortrinn til land uten utslippstak å forholde seg til. Det er fortsatt ingen enighet eller avtale som gjelder internasjonal skipsfart. En del land, som India og Kina, men at det bare er skip som er flagget i industriland som kan omfattes av et internasjonalt klimagassregime i IMO, uavhengig av eventuelle tvungne eller frivillige tiltak.

## 4 Dieselmotoren og tilhørende utslipp

### 4.1 Dieselmotorens forbrenningsforløp klassisk modell

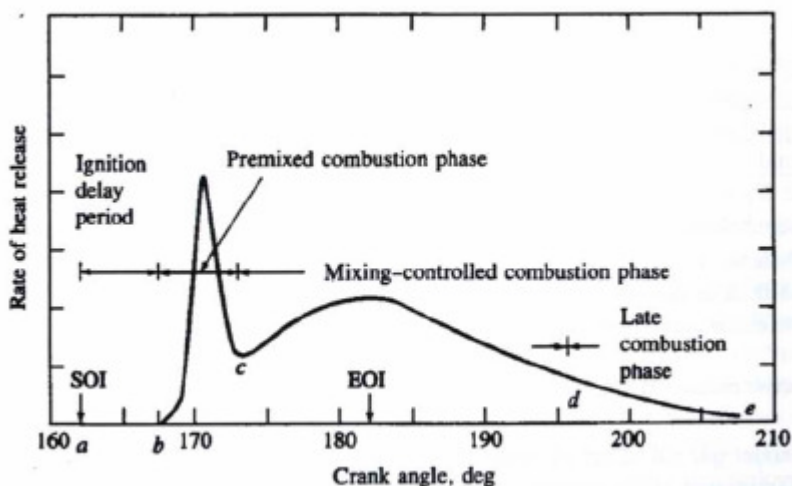
Dieselmotorens forbrenningsforløp er helt ulik den som skjer i bensinmotoren (ottomotoren). I bensinmotoren blandes drivstoff og luft før blandingen antennes av en gnist, mens blanding og forbrenning skjer samtidig i dieselmotoren. Dieselmotoren benytter seg av det som kalles diffusjonsforbrenning, som ikke må forveksles med bensinmotorens forblandede forbrenning [30]. Arbeidsprosessen til dieselmotoren starter med å komprimere ren luft i sylindren. Den høye temperaturen som er et resultat av kompresjonen, gjør at drivstoffet selvantenner når det sprøytes inn i sylindren. Hvordan drivstoffet sprøytes inn i og blandes med luften i sylindren påvirker forbrenningsprosessen. Det er derfor forskjellige former for innsprøytningsystem (ref. "common rail") og forbrenningskammer er utviklet.

Den klassiske modellen for forbrenningsforløpet i en dieselmotor kan deles opp i 3 deler, tilsvarende de 3 hovedprosessene under forbrenning når varmefrigjørelse bestemmes av trykkforholdet [30]:

1. Tenningsforsinkelse
2. Forblandet forbrenning
3. Diffusjonsforbrenning

Figuren under viser varmefrigjørelsen for en normal dieselmotor [30].

Figur 4.1. Varmefrigjørelse for normal dieselmotor [30].



Steg en er den tidlige delen mellom innsprøytningsstart og den første varmefrigjørelsen. Steg to tilsvarer den første "peak-perioden" i varmefrigjøringskurven, mens den tredje fasen utgjør resten av kurven med det andre lokale maksimumsutslaget.

### 4.1.1 Tenningsforsinkelse

Forbrenningen skjer når brennstoff sprøytes inn med høyt trykk i en varm luftmasse. Kravet til at forbrenningen skal starte er at det eksisterer en brennbar blanding av luft og brennstoff som har vært utsatt for tilstrekkelig høy temperatur i en tilstrekkelig periode. Å komme til dette stadiet krever alltid en viss tidsperiode. Derfor er det en forsinkelse fra når brennstoffet sprøytes inn i kammeret, til forbrenningen starter. Forsinkelsen er avhengig av hvilken temperatur man har i sylindere, hvor fint brennstoffet finfordelles, hvor raskt det sprøytes inn og fremfor alt type brennstoff [30]. Stegene man må gjennom fra innsprøyting til antennelse av brennstoffet er [30]:

- Innsprøyting av spraytåke i sylindere
- Finfordeling av brennstoffet til små dråper, referert til som atomisering
- Oppvarming av dråpene til fordampningstemperatur
- Fordampning av brennstoffdråpene
- Blanding av luft og brennstoff i gassfase for å oppnå en brennbar blanding
- Kjemiske reaksjoner gjennom sterkt exoterme, varmegenererende reaksjonsveier

Hvor raskt dette skjer er avhengig av forutsetningene i sylindere og hvordan brennstoffet injiseres. Generelt gir høyt innsprøytingstrykk, små hull i dysene, høyt trykk og temperatur i sylindere forutsetninger for en kort forsinkelse. Brennstoffets egenskaper påvirker også prosessen [30].

#### Cetantall

Et bra brensel for en dieselmotor skal selvantenne så raskt som mulig etter at det er sprøytet inn i sylindere. Cetantallet sier noe om hvor lettantennelig dieseloljen er, og høyere cetantall er bedre enn lave. Cetantallet for en referanseblanding av cetan (N-hexadekan, C<sub>16</sub>H<sub>34</sub>) og HMN (heptametylnonan) kan bestemmes ut fra [30];

$$CN = \% \text{-andel cetan} + 0,15 \times \% \text{-andel HMN.}$$

Som en grov tommelfingelregel kan oktantallet (ON) og cetantallet (CN) relateres på denne måten [30]:

$$ON = 120 - 2 CN$$

eller

$$CN = 60 - ON/2$$

Av dette uttrykket kan en se at brennstoff som passer til en bensinmotor, dvs har høyt oktantall, passer dårlig til dieselmotoren og omvendt.

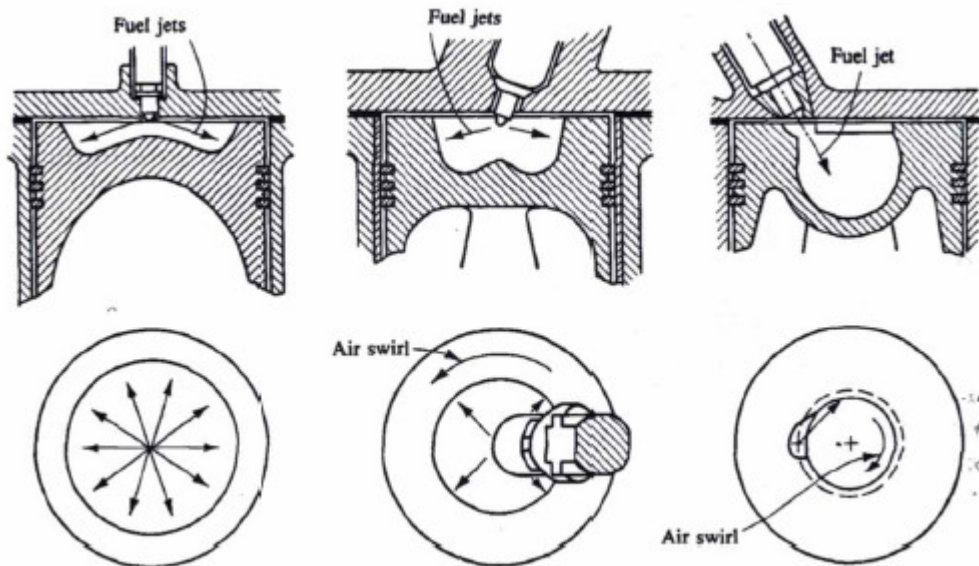
### 4.1.2 Forblandet forbrenning

Når det er generert en tilstrekkelig mengde brennstoff/luft-blanding med rett støkiometri som har vært utsatt for tilstrekkelig temperatur over et gitt tidsrom, skjer en spontan

antennelse på noen eller flere steder i sylinderen. Energien som her frigjøres øker raskt temperatur og trykk, noe som fører til at mer brennstoff/luft-blanding selvantenner. Er en stor mengde brennstoff sprøytet inn i sylinderen, kommer også energimengden til å øke tilsvarende på kort tid og dermed også trykket proporsjonalt med dette. I følge teorien forsvinner i prinsippet all brennbar blanding i sylinderen i den forblandede fasen. Det er i denne fasen det genereres mest støy fra motoren, og denne forsøker en derfor å få så kort som mulig. En av metodene for å begrense denne fasen går ut på å sprøyte brennstoffet i en sylindergrop istedenfor et forkammer. Da behøver brennstoffet relativt lang tid på seg for å varmes opp og fordampes langs sylindereens overflate, dermed har man minsket den mengden av brennstoff som kan inngå i den forblandede fasen. Dette forbrenningskonseptet kalles M-metoden enda, og er mye benyttet av M.A.N., selskapet som "Diesel" jobbet i når han oppfant motoren sin på slutten av 1800-tallet [30].

Figuren viser forbrenningskammer med tilhørende dyser for saktegående motorer til venstre (1200 rpm), hurtige i midten (5000 rpm) og M-metoden til høyre [30].

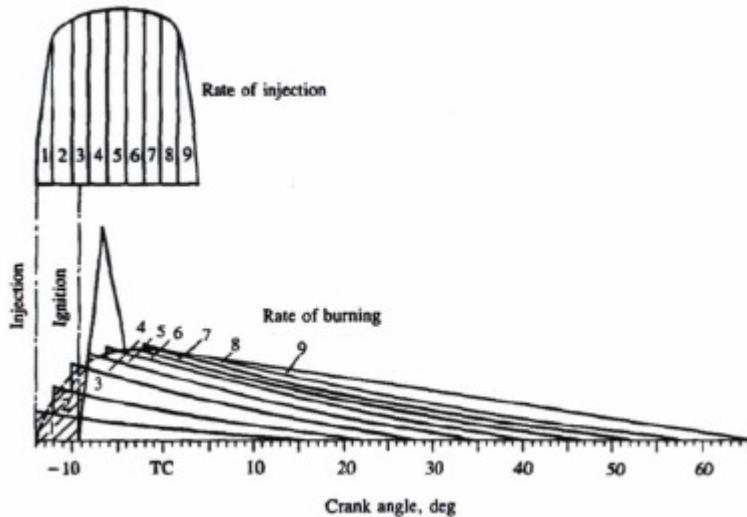
Figur 4.2. Forskjellige forbrenningskammer [30].



### 4.1.3 Diffusjonsforbrenning

I følge den klassiske modellen kan man anta at det er et kvasistatisk forløp etter at brennstoffet som har kommet inn i sylinderen i den forblandede fasen er brent opp. Dette innebærer at brennstoff sprøytes inn, atomiseres, blandes med luft og forbrennes kontinuerlig. Dette forløpet endres lite med tiden. Forbrenningen skal skje i de områdene rundt dysene som gir brennbar blanding. Figuren under viser et tenkt forløp for dette [30].

Figur 4.3. Skjematisk innsprøytning og forbrenning i en dieselmotor [30].



Innsprøytningen av brennstoff skjer i følge denne figuren i 9 forskjellige ”pakker”. Hver slik ”pakke” gir et forbrenningsforløp som ligner ett triangel jamfør nederst på figuren. ”Pakke” en, to og tre sprøytes inn i sylindern før forbrenningen starter, og man har derfor en akkumulert mengde brennstoff i sylindern ved starten av forbrenningsprosessen. Det brennstoffet som er blandet til brennbar blanding innen selvantennelse starter, brenner opp fort. Man har altså en forblandet forbrenning først. Etter dette første maksimumsutslaget fås senere den rolige og langsomme forbrenningen av de gjenstående ”pakkene”. Formen på hvert triangel samstemmer med hvor mye av det tilførte brennstoffet som kommer i kontakt med luft for å danne en brennbar blanding [30]. I MARULS prosjektet arbeides det med å komme frem til parametere for å teste en oljes tenningsforsinkelse. Dette har til de senere årene kun vært teoretisk utledet med varierende nøyaktighet. Leverandører blander forskjellige typer olje som gir den laveste kostnaden pr. tonn. Dette kan i ekstreme tilfeller resultere i store problemer med betydelige tenningsforsinkelser. Dette antas særlig å kunne bli et problem med lavsvovel olje. Det er et firma i Trondheim som har utviklet en ”bombe” for å teste dette. DNV bruker dette i en utvidet og kostbar testing av olje for fremtiden [78].

## 4.2 ”DEC-modellen”

Modellen med tenningsforsinkelse, forblandet forbrenning der alt brennbart brenner opp og diffusjonsforbrenning fikk en konkurrent når John Dec fra Sandia National Lab. presenterte sin modell i 1997. Forskjellen på tidligere forsøk på å forklare forbrenningsforløpet og DEC sin metode, var at han benyttet avanserte lasermålingsmetoder for å kartlegge forløpet i spraytåken i sylindern. Tidligere forsøk hadde anvendt seg av metoder som studerte sprayens utside, men hva som skjedde inne i spraytåken var ukjent [30]. For å få til dette brukte han en motor bygget delvis i glass og bruk av laserlys. Denne masteroppgaven går ikke inn på detaljene i ”DEC-modellen”, men det kan nevnes at modellen ga et bedre bilde av brennstoff i væske- og gassfase,



samt mer nøyaktig beskrivelse av selvantennning og sotdannelse. En studie av diffusjonsfasen ga også et annet bilde på utslipp av NO<sub>x</sub>.

### 4.3 Opprinnelse av NO<sub>x</sub>

NO<sub>x</sub> dannes ved at oksygen og nitrogen (78% av volum) fra luften blir sugd inn i motoren og reagerer. For at en slik reaksjon skal skje kreves det høye temperaturer, mellom 1800 og 1900 grader Celsius. NO<sub>x</sub>-konsentrasjonen øker eksponentielt med temperaturøkningen i motoren. Ved å senke forbrenningstemperaturen, og styre innsuging av oksygen slik at det ikke suges inn mer enn det som trengs til forbrenningsprosessen kan en redusere utslipp av NO<sub>x</sub>. Katalysator på avgassene fungerer på samme måten. Andre tiltak er å optimalisere; turtal, innsprøytingstidspunkt, forbrenningslufttemperatur og nitrogeninnhold i drivstoffet [5].

En av forbrenningsmotorens alvorligste bakdeler er avgassutslippene som kommer fra den. Poenget med forbrenningsmotoren er å omvandle den energien som er kjemisk bundet i drivstoffet til mekanisk arbeid. Motoren bruker derfor forbrenning for å generere varme, som siden brukes for å generere arbeid i den termodynamiske syklusen [30].

Nitrogenoksidene starter nesten alltid som NO (nitratoksid) i en forbrenningsmotor. En større eller mindre del av disse kan omvandles til NO<sub>2</sub> (nitrogendioksid) i motoren. For en dieselmotor kan så mye som 30% av NO<sub>x</sub> bestå av NO<sub>2</sub>, mens en ottomotor (bensinmotor) ofte har mindre enn 5%. Nitrogenoksider kan dannes på flere ulike måter, men i de fleste tilfeller er det den termiske produksjonen av NO<sub>x</sub> som dominerer. Kan man kjøre en motor slik at den termiske NO<sub>x</sub>-produksjonen er liten, kan man få større bidrag fra prompt NO<sub>x</sub> og brensel NO<sub>x</sub> [30].

#### 4.3.1 3 typer NO<sub>x</sub>

##### 4.3.1.1 Termisk NO<sub>x</sub>

Termisk NO<sub>x</sub> kommer som navnet antyder av at det er varmt. Det som faktisk skjer er at nitrogen og syre i luften reagerer og danner NO sammen med oksygen. Hvor fort NO dannes er temperaturbestemt, men ofte skjer dannelsen i samme tidsskala som forbrenningsforløpet i den aktuelle motoren. Dette betyr at NO rekker å dannes i forbrenningssyklusen når temperaturen er høy, men reaksjonen rekker ikke å gå baklengs for å gjenvinne N<sub>2</sub> og NO når det blir kaldere i sylindere under ekspansjonen. Termisk NO<sub>x</sub> er referert til som Zeldovich NO<sub>x</sub>. Denne er gitt av den forenklete reaksjonen [63];



Zeldovich har vist at man kan beskrive dannelse av NO med to reaksjoner ut fra denne ligningen [30];



Lavoie viste senere at man kan legge til enda en reaksjon [30];

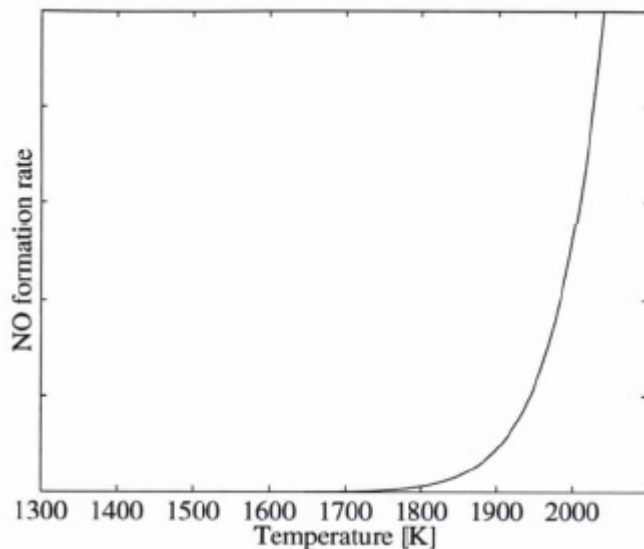


Denne siste reaksjonen kalles den utvidede Zeldovich-mekanismen for NO. Alle reaksjonene er reversible. Reaksjonskonstantene for 1.1-1.3 er nå bestemt og man kan regne ut hvor mye NO som produseres pr. tidsenhet. Heywood har brukt Zeldovich-mekanismen for å bestemme hvor mye NO som dannes pr. tidsenhet under forutsetning av at konsentrasjonen av NO er mye mindre enn ved likevektstilstanden. Dette uttrykket er slik [30]:

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = \frac{6 \times 10^{16}}{T^{1/2}} \exp\left(\frac{-69090}{T}\right) [\text{O}_2]_e^{1/2} [\text{N}_2]_e \quad (4.5)$$

Der indeksen e står for likevektskonsentrasjonen, og [] betyr konsentrasjonen av et stoff i mol/cm<sup>3</sup>. Når denne ligningen tegnes med henyn på temperatur får man figuren under.

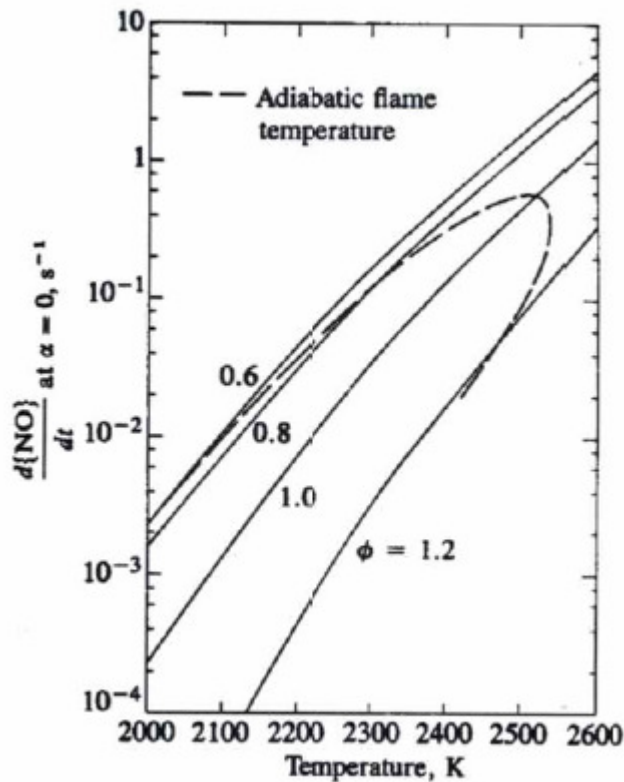
Graf 4.1. NO<sub>x</sub>-dannelse [30].



Man ser at figuren virkelig blir eksponensiell ved 1800-1900 K (1527-1627°C). I de fleste forbrenningsmotorer er maksimal temperatur under forbrenningssyklusen ofte høyere enn dette nivået, og derfor får man høy konsentrasjon av NO<sub>x</sub> i eksosen. Temperaturavhengigheten betyr at NO-utslippet er avhengig av tilstanden før forbrenning. Maksimal temperatur etter forbrenning opprettholdes om man benytter en

støkiometrisk blanding. En slik blanding tar ikke med seg ekstra drivstoff eller luft, og har med andre ord minimalt med masse å varme opp, dermed blir temperaturen høyest. Det er ikke bare temperaturen som har noe å si for NO-innholdet, men også innholdet av syre. I noen magre blandinger er det overskudd på luft, men forbrenningen genererer fortsatt høy temperatur. Man får altså maksimal NO-produksjon ved bruk av noen magre blandinger. Figuren under viser genereringshastighet for NO for noen forskjellige drivstoff/luft-forhold,  $\phi$ .

Figur 4.4. Genereringshastighet for NO.



Man oppnår mest NO ved høy temperatur og mager blanding. Den adiabatisk flammemetemperaturen for kerosene (syntetisk drivstoff) er inntegnet. Man ser av figuren at maksimal temperatur opprettholdes med noen fete blandinger, derimot fåes maksimal NO ved noe magrere blanding, men dette er avhengig av syreinnholdet [30].

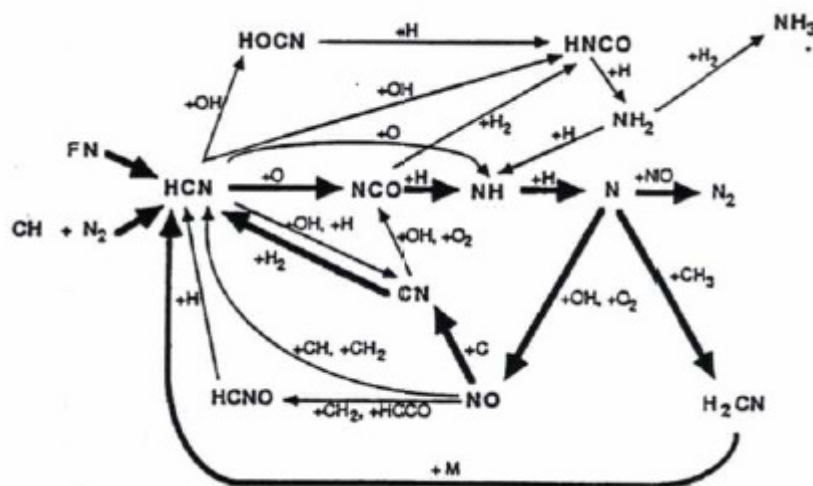
#### 4.3.1.2 Prompt NO<sub>x</sub>

Prompt NO<sub>x</sub> er et samlebegrep på mer kompliserte og raske reaksjonsveier (derav uttrykket prompt) som kan føre til NO<sub>x</sub>, spesielt ved bruk av fete blandinger. Prompt NO<sub>x</sub> kan beskrives med den generelle ligningen [63];



I prompt NO<sub>x</sub> kan reaksjoner inne i selve flammefronten (spisstemperatur) tas med i beregningene. I realiteten består denne kompliserte reaksjonen av flere hundre reaksjoner [63]. Fenimore foreslo at CH-radikalen var spesielt viktig [30]. Prompt NO<sub>x</sub> kan forklares med at atmosfærisk nitrogen (N<sub>2</sub>) reagerer med radikaler som C, CH og CH<sub>2</sub>. Disse radikalene er fragmenter i drivstoffet. Prosessen skjer tidlig i forbrenningsprosessen, og danner nitrogen typer som; NH (nitrogenmonohydrid), HCN (hydrogencyanid), H<sub>2</sub>CN (dihydrogencyanid) og CN (en type klogass) som oksiderer til NO. Prompt NO<sub>x</sub> er generelt en viktig mekanisme i lav-temperatur forbrenningsprosesser [63], men andelen prompt NO<sub>x</sub> i avgassene er vanligvis minimal [33]. Metoden for å vise termisk NO<sub>x</sub> krever i prinsippet ikke informasjon om forbrenningen, den påvirker bare NO indirekte gjennom å endre temperaturen til de forbrente gassene. Reaksjoner inne i flammefronten ser man bort fra. Prompt NO<sub>x</sub> krever denne informasjonen, og blir dermed mer komplisert å simulere. Figuren under viser hvordan dette kan vises [30]:

Figur 4.5. Dannelse av prompt NO<sub>x</sub>.



#### 4.3.1.3 Brensel NO<sub>x</sub>

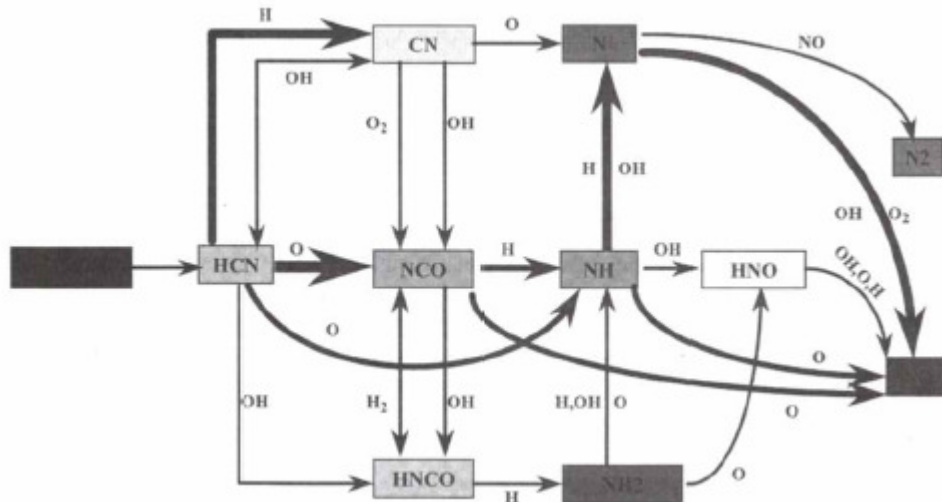
En tredje metode å få NO<sub>x</sub> på er å kjøre på et drivstoff som inneholder nitrogen. Brensel NO<sub>x</sub> er gitt ved den generelle reaksjonen [63];



Råolje inneholder ca 0.65% nitrogen. Når råoljen senere destilleres til lette og tunge komponenter, henholdsvis bensin og dieselolje, havner nesten alt nitrogenet i de tyngre komponentene. Bensin kan etter prosessen inneholde 0.07% nitrogen, mens dieselolje inneholder 1.4% nitrogen. Hvor mye av det drivstoffbundne nitrogenet som forvandles til NO under forbrenningen kommer mye an på brensel/luft-forholdet, men det er vanligvis ikke noe problem for høykvalitets gassblandinger som naturgass eller propan siden disse

normalt ikke inneholder organisk bundet karbon [63]. I fete blandinger forvandles lite til NO<sub>x</sub>, mens støkiometriske eller magre blandinger kan gi opp til 100% av nitrogenet som NO<sub>x</sub>. Derfor er det viktig å kontrollere oksygenmengden eller overflødig oksygen i blandingen for å begrense formasjonen av brensel NO<sub>x</sub>. Hvordan nitrogenet frigjøres fra brenselet og danner NO<sub>x</sub> er usikkert [30]. Det man vet, er at under forbrenning blir nitrogenet som er bundet i drivstoffet frigjort i form av frie radikaler og danner N<sub>2</sub> eller NO. I realiteten er det mange mellomliggende reaksjoner for denne formasjonsmekanismen som vist i figuren under [63].

Figur 4.6. Skjematisk figur av brensel NO<sub>x</sub> formasjonsveier [63].



Brensel NO<sub>x</sub> kan bidra med så mye som 50% av totalutslippene ved forbrenning av olje, og 80% ved forbrenning av kull. Selv om prosessforløpet er usikkert, er det primært to veier til formasjon av NO<sub>x</sub>. Den første involverer oksidering av flyktige nitrogen typer under den første delen av forbrenningen. Under frigjøringen og før oksideringen av de flyktige stoffene, reagerer nitrogen og danner mellomliggende stoff (HCN, NH<sub>3</sub>) som igjen oksideres til NO. Hvis de flyktige stoffene dannes i en begrenset atmosfære (dråper), blir nitrogenet gjerne omdannet til nitrogengass (N<sub>2</sub>) istedenfor NO<sub>x</sub>. Den andre måten involverer forbrenning av nitrogen som er i den forkullede delen av drivstoffet. Denne reaksjonen skjer mye saktere enn den flyktige fasen. Bare rundt 20% av "kullnitrogenet" blir sluppet ut som NO<sub>x</sub>, siden mye av NO<sub>x</sub> som dannes i denne prosessen er redusert til nitrogen av kullet, som er nesten rent karbon [33].

## 4.4 Mer om NO<sub>x</sub>-utslipp

### 4.4.1 Klassisk modell

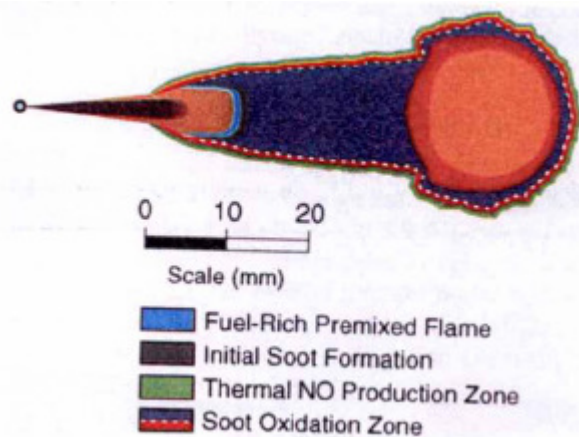
Dieselmotorer har ikke større utslipp av hydrokarboner (HC) og kullmonoksid (CO) enn bensinmotorer, men har desto større utslippsmengde av NO<sub>x</sub> og partikler. Dannelsen av NO<sub>x</sub> skjer fremst i flammefronten der det er varmt og tilgang på syre. Da forbrenningen i

den forblandede fasen ble ansett til å skje i  $\lambda$ -intervall som er tilsvarende for forblandet forbrenning ( $\lambda = 0.8-1.2$ ), fant man også grunn til å tro at store mengder av NO<sub>x</sub> ble dannet her. Prøver med ulike lastmengder for en dieselmotor ga også resultatet at mengden NO<sub>x</sub> pr. brennstoffenhet (Emission Index, EI) økte når lastmengden avtok [30]. Ettersom man når lastmengden avtar på en dieselmotor bare avslutter innsprøyting tidligere, antok man at den tidlige delen av forbrenningen var uforandret. Men med lavere last skjer en større og større del av forbrenningen i den forblandede fasen, samtidig som mengden NO<sub>x</sub> øker pr. brennstoffenhet. Konklusjonen er derfor at den forblandede fasen står for en stor del av NO<sub>x</sub>-utslippet [30].

#### 4.4.2 "DEC-modellen"

DEC viste også en modell for hvordan forbrenningen foregår i den kvasistatiske delen av forbrenningen under diffusjonsdelen av varmegjoringen. Denne modellen er bare gyldig til innsprøytningsprosessen er ferdig, og effekten av dette er ikke nok studert for å sikre resultatet. Figuren under viser en skjematisk spray med flere regioner. Dysemunnstykket er til venstre, mens sprayåken brer seg mot høyre i bildet.

Figur 4.7. Modell for dieselforbrenning under diffusjonsdelen av forbrenningen [30].



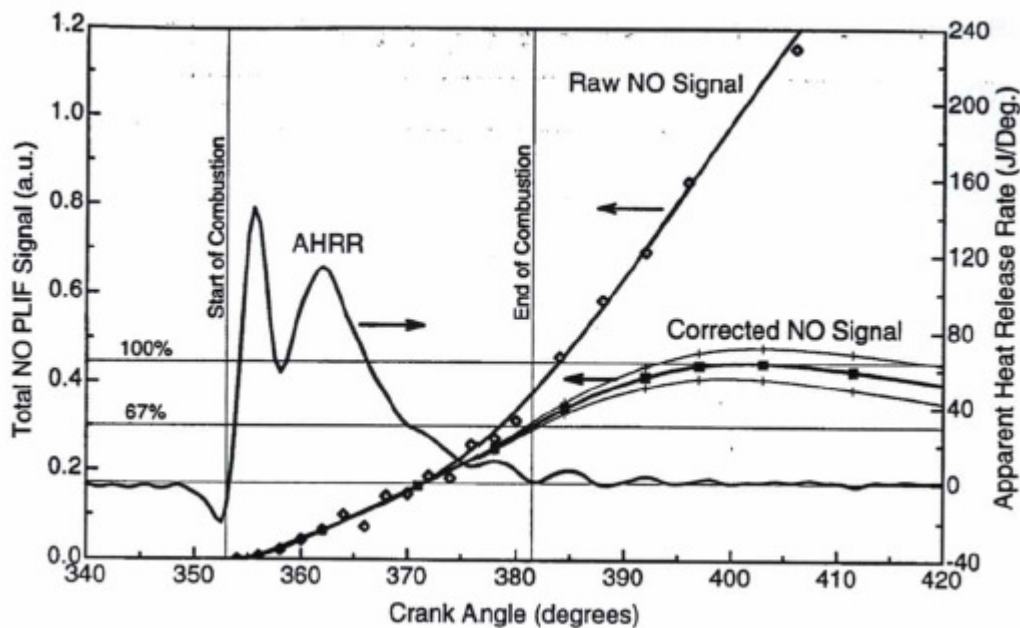
I bildet vises flytende brennstoff ca. 23 mm fra dysemunnstykket, noe som er illustrert med mørkebrunt. Kort etter dette blandes det atomiserte brennstoffet med luft og danner en fet blanding som vises som lysebrun. Denne blandingen brenner i en ganske tynn forblandet flamme, vist som blått. Ettersom forbrenningen her er fet, får man sotdannelse som vises som grått i bildet. De små partiklene øker i størrelse og mengde, ettersom de transporteres nedstrøms i sprayåken. Mørkeblå, rød og orange viser denne gradvise økningen. Rundt flammen er det en tynn sone med en diffusjonsflamme. I denne forbrenner de fete produktene fra den forblandede flammen, og det skjer også en betydelig oksidering av sotpartikler [30].

Figuren viser også en sone der termisk NO<sub>x</sub> produseres. Denne sonen er veldig tynn siden det krever syre og høy temperatur samtidig for at NO skal kunne dannes. Senere målinger av NO<sub>x</sub> ved hjelp av laserindusert fluorescens har vist at denne modellen av

forløpet er sann. NO kunne ikke måles under den forblandede fasen, men det fantes NO i et lite tynt skall der diffusjonsflammen er [30]. I senere deler av forbrenningen, etter at innsprøyting er slutt, skjer NO-dannelse i restene av spraytåken.

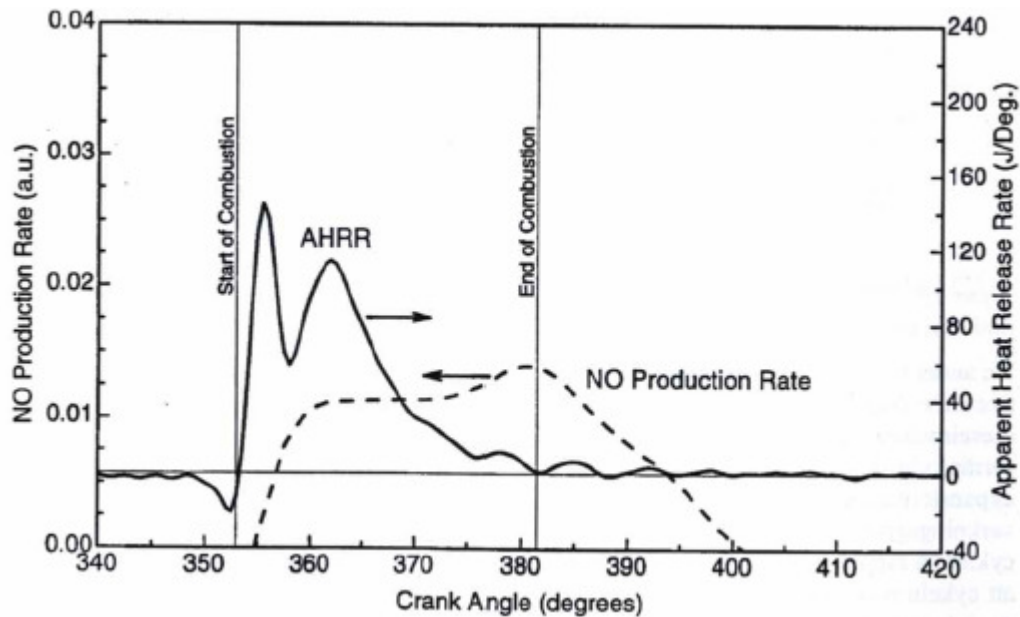
Dannelsen av NO<sub>x</sub> ble målt på et tykt laserark, dermed ble det mulig å danne seg et bilde av total mengde NO. Figuren under viser det totale signalet fra NO-PLIF og det samme signalet kompensert for LIF-signalets ømfintlighet for trykk og temperatur.

Figur 4.8. PLIF-signal av NO og det samme signalet korrigert [30].



Det kan påpekes at kompensering av signalet er veldig vanskelig, siden temperaturen i sylindere er alt annet enn homogen. Med denne usikkerheten i bakhodet er det mulig å gjøre seg noen observasjoner. Det kompenserte signalet for NO<sub>x</sub> er derivert og formasjonshastigheten er vist i figuren under. Det kan noteres, overraskende nok, at ingen NO<sub>x</sub>-produksjon skjer i den forblandede fasen i dette forsøket. Når diffusjonsflammen har startet, oppstår en formasjon som påvirkes relativt lite av spraytåkens utbredelse. Man får en topp i dannelseshastighet i slutten av varmefrigjøringen, noe som kommer av en større forbrenningssone og at temperaturen her er størst. Like etter forbrenningens slutt, faller temperaturen fort og dermed også dannelsen av NO [30].

Figur 4.9. Dannelse av NO<sub>x</sub> i dieselmotor [30].



#### 4.4.3 Utslipp av NO<sub>x</sub> og driftsparametere

Dieselmotorens utslipp er betydelig mer koblet til forbrenningen enn den er det i bensinmotoren. Nitrogenoksider dannes som kjent der det er varmt og det er tilgang på syre og nitrogen. I en bensinmotor kan temperaturforløp og syretilgang kontrolleres ganske bra med endringer i  $\lambda$ , tenningstidspunkt eller ved hjelp av resirkulerte avgasser. Forskjellen er at dieselmotorens forbrenning skjer ved en helt annen  $\lambda$  enn det som gjelder globalt for resten av sylinderen. Den senere delen av forbrenningen skjer alltid i nærheten av  $\lambda = 1$ , selv om motoren skulle gå på lav last, og dermed kanskje har  $\lambda$  på 10 globalt. Denne forskjellen på forbrennings-  $\lambda$  og global-  $\lambda$  betyr at dieselmotorens utslipp av NO<sub>x</sub> ikke kommer til å påvirkes spesielt mye av global-  $\lambda$ . Figuren under viser forskjellen[30].

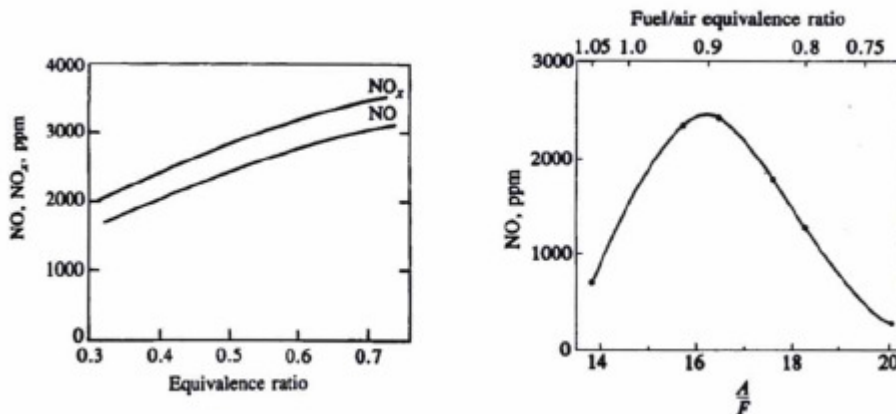
Lambda ( $\lambda$ )

For ordens skyld kan det nevnes at  $\lambda$  representerer "Air/Fuel-ratio" (luft/brennstoff-forholdet).

- $\lambda > 1$ : "Lean burn", eller tynn blanding. Altså overskudd på luft
- $\lambda < 1$ : Fet blanding. Altså overskudd på brennstoff
- $\lambda = 1$ : Optimal blandingsmengde for motor. Gir høy temperatur og mye NO<sub>x</sub>



Figur 4.10. Til venstre vises NO<sub>x</sub> fra en dieselmotor som funksjon av  $\phi (=1/\lambda)$  og til høyre NO<sub>x</sub> fra en bensinmotor som funksjon av A/F [30].



NO<sub>x</sub> fra en bensinmotor kan reduseres med en tierpotens gjennom å kjøre motoren ekstremt magert eller ekstremt fett. Samtidig skjer det relativt lite med dieselmotorens utslipp. Senkningen som likevel kommer med minskende  $\phi$  kommer av at middeltemperaturen i sylindern blir lavere under lavlast, der mindre brennstoff forbrenner.

De andre to metodene for å senke NO<sub>x</sub>-utslipp fra en bensinmotor, forsinket tenning og EGR, kan også anvendes med dieselmotoren. Det er ikke uvanlig med motorer der innsprøyting av brennstoff ikke starter før stempelet er helt i toppen av sylindern. Dermed skjer all forbrenning under ekspansjonen, og med dette får man to bivirkninger. Den første er dårligere virkningsgrad med forbrenning i feil fase. I følge teorien om termodynamiske sykluser taper man relativt mye i virkningsgrad om forbrenningen er for sen. Av dette kan man si at syklusen ligner den ideelle med forbrenning under konstant trykk, istedenfor den med forbrenning under konstant volum. Mye av denne ulempen kan forbedres med et høyere kompresjonsforhold, fordi med et høyere kompresjonsforhold øker den termodynamiske virkningsgraden. Med sen forbrenning er det maksimale trykket relativt lavt, dermed tåler den mekaniske konstruksjonen et ganske høyt kompresjonsforhold,  $r_c$  [30].

Den andre bivirkningen av sen forbrenning er økte utslipp av partikler (sot), PM. Sen forbrenning gjør at det er relativt kaldt når forbrenningen starter, slik at forholdene for oksidering av sot er dårligere. Det er dessverre en klar sammenheng mellom NO<sub>x</sub> og sot for andre parametervariasjoner enn de som er nevnt her. Endres noen av parameterene slik at forbrenningen blir varmere, øker NO<sub>x</sub>-dannelsen og det blir mindre partikler. På samme måte hvis det blir kaldere minsker dannelsen av NO<sub>x</sub>, og det blir mer partikler i avgassene [30]. Det kan nevnes at sotpartikler spesielt dannes ved bruk av fet blanding under forbrenningen.

#### 4.4.4 Eksperiment

Det er gjort eksperiment på utslipp fra HSDI (High Speed Direct Injection) diesel motorer. Disse er mindre motorer enn man vanligvis finner i skip, men det er en del

interessante paralleller. Flere uttrykk er utviklet for å beregne NO<sub>x</sub>-dannelse under forbrenning, basert på både formasjon og nedbrytning i Zeldovitchmekanismen. Uttrykk som beskriver NO-konsentrasjon inkluderer likevektskonsentrasjonen for nitrogen- og/eller oksygenatom. Hvis man ser bort fra nedbrytning av NO, og antar stasjonære forhold for N, vil NO som dannes under et tidsintervall som er definert fra begynnelsen av forbrenningen til åpningen av eksosventilen være gitt ved [31];

$$NO = \int_{SOI}^{EVO} \int_0 A \omega K_{O_2} \exp\left(\frac{-E}{R \times T}\right) [F]^a [O_2]^b dV dt \quad (4.8)$$

Hvor

A, a og b: Konstanter

$\omega$ : Motorens vinkelhastighet

$K_{O_2}$ : Likevektskonstant for O<sub>2</sub>, som er en funksjon av temperatur

E: Aktiveringsenergi

T: Lokal gasstemperatur

F: Brennstoff/damp-konsentrasjon

O<sub>2</sub>: Oksygenkonsentrasjon

V: Volum av reagerende gasser

t: Tid

Ligningen viser NO<sub>x</sub>-konsentrasjon i eksosen som funksjon av; oksygenkonsentrasjon, brennstoff/damp-konsentrasjon og tid, i tillegg til forbrenningsproduktenes temperatur. Alle disse parameterne forandres med lastkondisjon (%belastning), injeksjonstrykk P, EGR (Exhaust Gas Recirculation), timing (av injeksjon) og virvelstrømmen [31].

### Sot-utslipp

Sot i avgassene har mye med innsprøytning i forbrenningskammeret å gjøre. Hvor mye det er bestemmes av oksygenkonsentrasjon, ladetemperatur, blandingsforhold, gasstemperatur og tid.

### Hydrokarbon-utslipp

Hydrokarboner i dieleleksos kommer av følgende [31]:

1. Spraytåke som er rik eller fattig på oksygen
2. Drivstoffvæske avsatt på veggen inne i kammeret
3. Sprayhale, der drivstoffet ikke er bra atomisert

### CO-utslipp

Disse utslippene kommer av uferdig oksidering av hydrokarbonene. Dette oppstår når man har en rik blanding i kammeret. CO kan og oppstå fra uferdig oksidering av hydrokarboner sent i forbrenningsprosessen [31].

## 5 Ny NO<sub>x</sub>-avgift

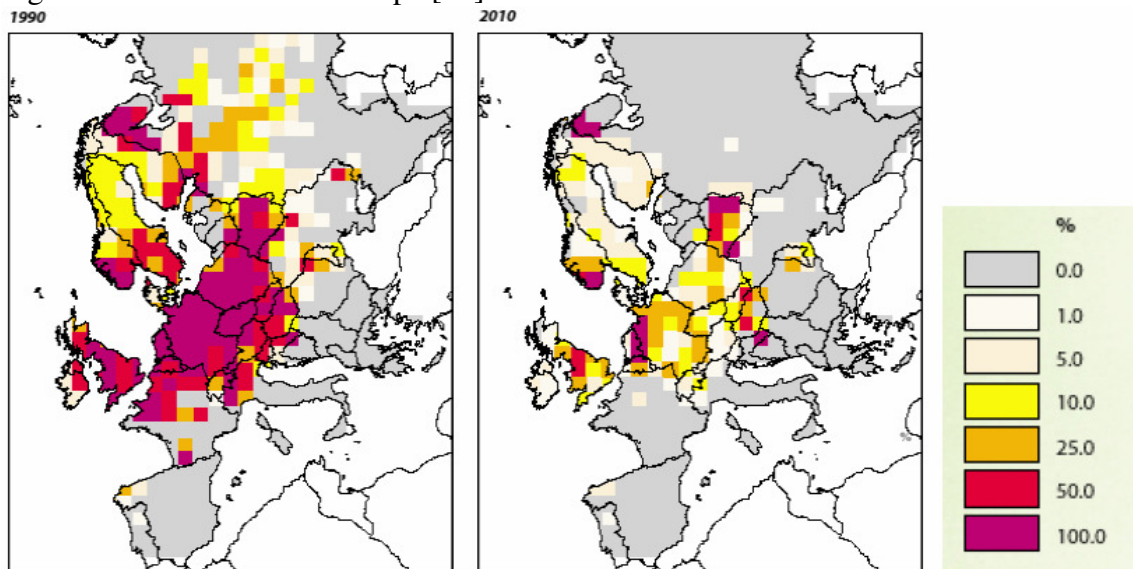
### 5.1 Oppfølging av Gøteborgprotokollen

Som nevnt i kapittel 1 retter denne protokollen seg mot forsurening, overgjødning og bakkenært ozon. Den regulerer også utslipp av NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, ammoniakk og VOC fra 2010. Avtalen trådte i kraft 17.mai 2005 da 21 parter hadde ratifisert og forpliktet seg til en snittreduksjon på 30%. Avtalen er i tillegg effektbasert, det vil si basert på naturens tålegrenser. Naturens tålegrenser er definert på denne måten [48]:

- Hvor er naturen mest sårbar
- Hvor er det mest transport
- Det er brukt meteorologiske modeller
- Det er laget scenario for hvordan man reduserer, og effekten av dette

Figuren under viser overskridelser av tålegrenser for forsurening i Europa.

Figur 5.1. Overskridelser Europa [48].



Gøteborgprotokollen er den siste av en lang rekke avtaler, og miljøverndepartementet har gjort flere tiltaksvurderinger. Det er også lagt opp til muligheter for avgiftsreduksjon gjennom avtale med staten. Nå arbeides det med å vurdere effekten av Gøteborgprotokollen ut 2007. Det er foreløpig ikke tatt noen beslutninger på om man skal forhandle om ny avtale og nye forpliktelser, men 2020 blir antakeligvis en ny milepæl [48].

Tabell 5.1. Norges utslippsforpliktelser ser per i dag (2007) slik ut:

- Utslipp 2005: 197.000 tonn
- Fremskrivning 2010: 193.000 tonn
- Fremskrivning 2020: 156.000 tonn
- Forpliktelse 2010: 156.000 tonn

I en ny avtale skal også partikkelutslipp med på programmet. EU-kommisjonen vil komme med et nytt forslag til sommeren, og det er i skrivende stund usikkert om dette skal med i EØS-avtalen. Tiltaksvurderingen som ble gjort av blant annet SFT for miljøverndepartementet ser slik ut [48]:

Tabell 5.2. Tiltaksvurdering SFT [48].

Sektor	Kostnad	Utslippsreduksjon	Sum utslippsreduksjon
Skip/fiskefartøy	< 15 kr/kg	26.000 tonn	26.000 tonn
Energianlegg I	< 17 kr/kg	1.000 tonn	27.000 tonn
Fastlandsindustri	< 15 kr/kg	2.500 tonn	29.500 tonn
Fastlandsindustri	< 25 kr/kg	3.000 tonn	32.500 tonn
Energianlegg II	18-56 kr/kg	3.100 tonn	35.600 tonn
Energianlegg III	57-150 kr/kg	7.200 tonn	42.800 tonn
<i>Nybygg skip</i>	<i>20 kr/kg</i>	<i>10.000 tonn</i>	<i>52.800 tonn</i>

Her ser en at skip og fiskefartøy er billigste tiltak for å begrense NO<sub>x</sub>-utslipp med lavest kostnad pr. kg redusert NO<sub>x</sub>. I stortingsmelding nr. 21 (2004-2005) har regjeringen opplyst at (utdrag) [48]:

- Krav til utslipp til luft både for nye og eksisterende skip i norsk innenriksfart og for fiskefartøy
- Legge til rette for fleksible løsninger, avgifter differensiert etter utslipp av NO<sub>x</sub> og/eller tredjepartsløsninger utredes nærmere
- Vurdere om det bør gis tilskudd til finansiering av NO<sub>x</sub>-reduserende tiltak på skip og fiskefartøy

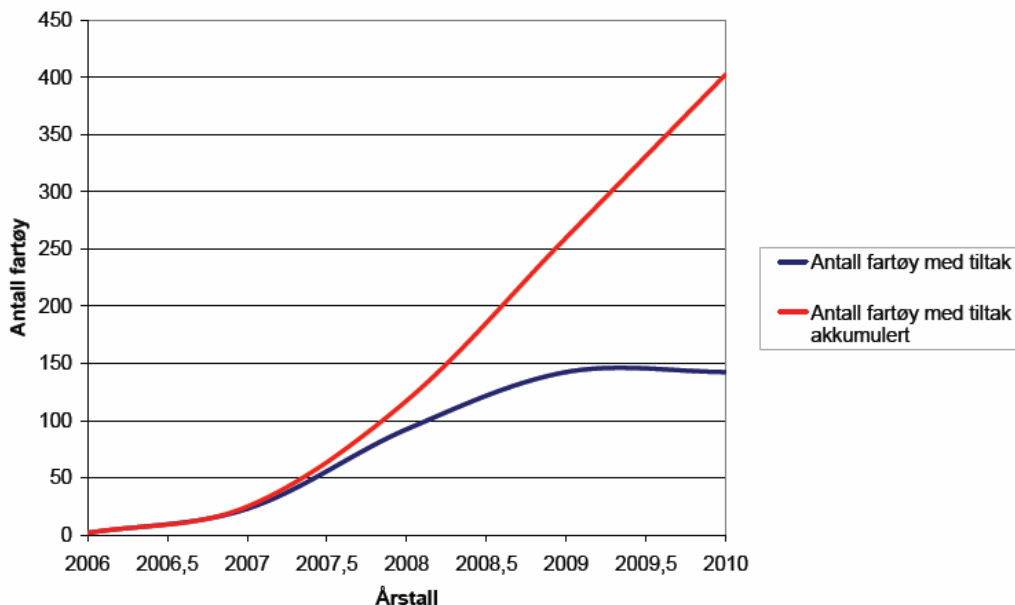
Stortinget bestemte også i budsjettet for 2007, at det skal være en avgift på NO<sub>x</sub> med mulighet for tidsbegrenset fritak ved inngåelse av miljøavtale med staten.

Tabell 5.3. Antall fartøy berørt av avgift [43].

	<b>NOR-flåte</b>
	> 750kW Mellom norske havner
<b>Total</b>	<b>834</b>
<b>Fiske</b>	<b>319</b>
<b>Riksv.ferger</b>	<b>125</b>
<b>Hurtigbåt</b>	<b>50</b>
<b>Passasjerskip</b>	<b>58</b>
<b>Supply</b>	<b>144</b>
<b>Beredskap</b>	<b>50</b>
<b>Bøyelastere</b>	<b>20</b>
<b>Lasteskip</b>	<b>61</b>
<b>Mobile rigger</b>	<b>7</b>

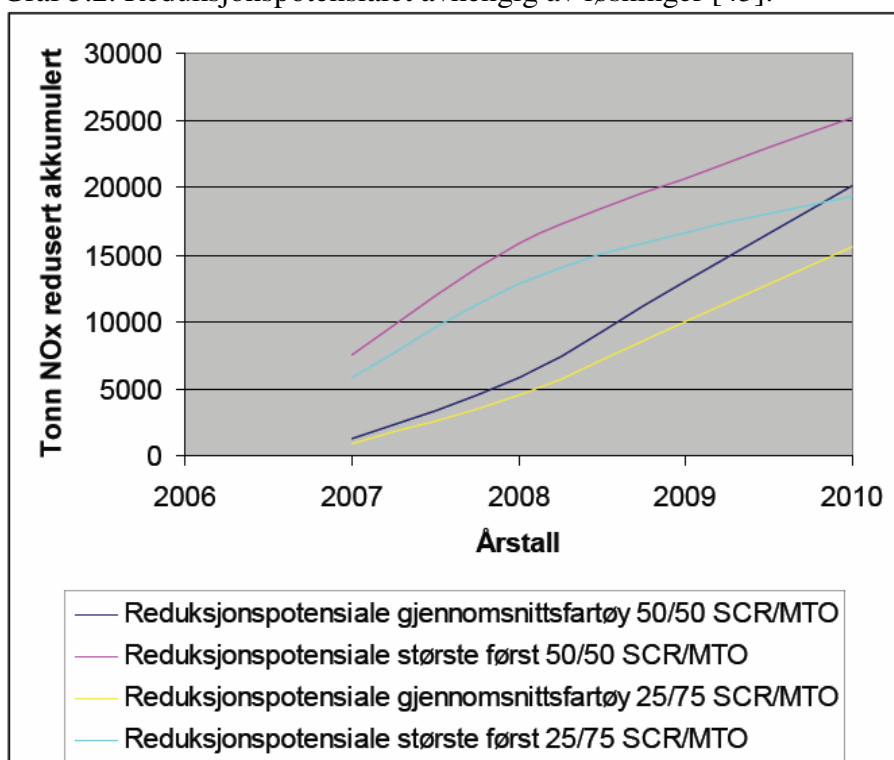
Som en ser av tabellen over er det mange skip som er berørt av avgiften, og det er vanskelig å gjennomføre tiltak på alle disse for å komme ned mot målet på 156.000 tonn innen 2010. Det er det rett og slett ikke kapasitet til blant leverandører og vertft slik situasjonen er nå. Det er dessuten ønskelig å få gjennomført tiltak med så liten andel offhire (periode uten normal drift for fartøyet) som mulig. Reduksjonspotensialet frem mot 2010 er også avhengig av løsninger som blir valgt for de forskjellige skipene, at tiltak blir satt i verk hvis mulig så fort som mulig og samarbeid mellom redere, tiltaksleverandører og myndigheter. Den nederste grafen under viser reduksjonsscenarioer frem mot 2010 ved forskjellig bruk av reduksjonsmetodene SCR og MTO.

Graf 5.1. Samlet kapasitet for tiltaksleverandører [43].



Med andre ord samlet kapasitet til å levere tiltak til omtrent halvparten av den avgiftsberørte flåten innen utgangen av 2010.

Graf 5.2. Reduksjonspotensialet avhengig av løsninger [43].



## 5.2 NO<sub>x</sub>-forskriften

### 5.2.1 Bakgrunn og hensyn

Avgiften på utslipp av nitrogenoksider (NO<sub>x</sub>) er en del av et nytt regelverk gjeldende fra 1.januar 2007. Avgiften er ment som ett av flere virkemidler for å nå forpliktelsen i Gøteborgprotokollen. Sentrale hensyn å ta for tollvesenet er i denne sammenhengen sektorlikhet, treffsikkerhet og miljøpolitikk. Med sektorlikhet menes at NO<sub>x</sub>-avgiften skal være en særavgift på samme måte som for alkohol. Dette er en stor jobb for tollvesenet siden det er mange og store aktører. Stortingets avgiftsvedtak inneholder regler om bl.a. avgiftspliktens omfang, avgiftssats, avgiftsfritak og dispensasjon. Når det gjelder sanksjoner ved eventuelle overtredelser er dette behandlet i lov 19.mai 1933 om særavgifter. Forskrift 11.desember 2001 om særavgifter inneholøder generelle regler om avgiftsforvaltning og særskilte regler om den enkelte avgift, deriblandt NO<sub>x</sub>-avgiften (kap. 3-19) [49].



### 5.2.2 Omfang

#### Saklig virkeområde

Avgiftsplikten gjelder ”framdrifts-energiproduksjon”, og prosessutslipp i industrien faller derfor utenfor. Det er kun effekten av fremdriftsmaskineri som omfattes av avgiften, hjelpemotorer, turbiner og kjeler inkludert, såfremt de er konstruert til fremdrift [51]. Eventuelle andre hjelpemotorer og motorer som benyttes til kjøleaggregater regnes ikke med [52]. Det er presisert at det er summen av motorer som benyttes eller er konstruert til fremdrift som er avgiftspålagt, og her legges motorens sertifiserte effekt til grunn [49]. Dersom det fremlegges dokumentasjon fra motorprodusent eller klasseselskap om at effekten er nedjustert til under 750 kW, bortfaller avgiftsplikten [51].

#### Stedlig virkeområde

Avgiftspliktens omfang gjelder:

- Norskregistrerte fartøy med utslipp i nære farvann, dvs. mindre enn 250 nm fra grunnlinjen (250 nm er innom dansk og britisk sektor)
- Utenlandske fartøy med utslipp i territorialfarvannet rundt norsk fastland, dvs. 12 nm fra grunnlinjen
- Norskregistrerte og utenlandske fartøy med utslipp fra innenriks fart (fart mellom to norske havner), selv om deler av farten skjer utenfor territorialfarvannet rundt norsk fastland

For skip som bare sneier innom grensen selv om det er i utenriksfart, er det fortsatt usikkert om de kommer inn under avgiftsregimet [49]. Det levnes likevel liten tvil om at de forurenses like mye som norske skip, eller skip som er innenfor avgiftsregimet på

grunn av reglementet, og hvordan denne differensieringen skal gjennomføres er enda ikke bestemt.

#### Avgiftspliktige virksomheter

Eier av utslippet er avgiftspliktig. Dvs. at det mest hensiktsmessige er at driver/operatør betaler avgiften, ikke et postkasseselskap i den 3.verden. For fartøy vil det si at rederi/fartøyseier betaler regningen, men dette er enda til behandling [49]. NO<sub>x</sub>-avgiftspliktige virksomheter skal registreres i den tollregionen virksomheten har sitt forretningssted. (Eventuelt hovedkontor dersom rederiet har forretningssted i flere tollregioner).

#### Registrering

Registreringen hos tollvesenet medfører en plikt til å føre et særskilt avgiftsregnskap. I dette ligger det at en må sende inn avgiftsoppgave (blankett RD-0007 B) hvert kvartal. Eventuell dokumentasjon på avgiftsberegning eller på avgiftsfritak må oppbevares i rederiets regnsap, da tollregionen når som helst kan kontrollere om avgiften er beregnet og betalt korrekt [49].

### 5.2.3 Avgiftsberegning

Avgift beregnes av alt utslipp fra avgiftspliktige enheter, dvs. fremdriftsmaskineri med samlet installert motoreffekt på mer enn 750 kW. Når installert motoreffekt av fremdriftsmaskineri er på mer enn 750 kW, er utslippet fra annet maskineri også avgiftsbelagt (også hjelpemotorer) og kommer i tillegg til avgift på fremdriftsmaskineri [50].

Det grunnleggende prinsippet er at det skal betales avgift for faktisk utslipp jmf. § 3-19-6 (1). Der faktisk utslipp fastsettes ved måling kreves kontinuerlig måling. Hvis faktisk utslipp ikke er kjent, skal avgift betales for utslipp som er beregnet etter kildespesifikk utslippsfaktor. Hver utslippskildes spesifikke utslippsfaktor skal legges til grunn, jmf. § 3-19-6 (2). For hoved- og hjelpemotorer, som er levert etter 1.1.2000, skal kildespesifikk utslippsfaktor beregnes på grunnlag av data for 75% motorbelastning. (At dette skal benyttes var ikke endelig fastsatt per april 2007). Dette er jmf. motorens EIAPP-sertifikat, IMO's NO<sub>x</sub> Technical File og motorens test- eller prøvekjøringsrapport. Målt spesifikt NO<sub>x</sub>-utslipp i g/kWh finnes i EIAPP-sertifikatet i kolonnen for NN% motorbelastning. Samtidig finnes det spesifikke drivstofforbruket i g/kWh enten i EIAPP-sertifikatet eller i motorens test- eller prøvekjøringsrapport, for den samme motorbelastningen. Avgiften skal betales for utslipp fra motorer etter turtallsbasert sjablongfaktor (1) hvis kildespesifikk utslippsfaktor ikke finnes jmf. § 3-19-6 (3) hhv. § 3-19-9 (1), (2) og (3) i "forskrift om særavgifter-avgift på utslipp av NO<sub>x</sub>". For kjele(r) beregnes det etter type bunkers iht. (2) og turbiner iht. (3a eller 3b) [51].

§ 3-19-9 Tabell for beregning av utslipp [53]:

- Motorer (1)



- Turtall lavere enn 200 rpm: 100 kg NO<sub>x</sub> pr. tonn energivare
- Turtall fra og med 200 rpm til 1000 rpm: 70 kr NO<sub>x</sub> pr. tonn energivare
- Turtall fra og med 1000 rpm til 1500 rpm: 60 kr NO<sub>x</sub> pr. tonn energivare
- Turtall fra og med 1500 rpm: 55 kr NO<sub>x</sub> pr. tonn energivare
- Kjeler (2) (utdrag)
  - 9,6 kg NO<sub>x</sub> pr. tonn tungolje
  - 3,6 kg NO<sub>x</sub> pr. tonn lettolje
  - 3,6 kg NO<sub>x</sub> pr. tonn marin gassolje/diesel
  - 3,6 kg NO<sub>x</sub> pr. tonn tungdestillat
  - 1,7 g NO<sub>x</sub> pr. Sm<sup>3</sup> naturgass, gasskjeler
- Turbiner (3a)
  - 16 g NO<sub>x</sub> pr. Sm<sup>3</sup> gass
  - 25 kg NO<sub>x</sub> pr. tonn flytende energivare
- Lav-NO<sub>x</sub>-turbiner (3b)
  - 1,8 g NO<sub>x</sub> pr. Sm<sup>3</sup> gass

Avgiften beregnes da oppsummert ut fra 3 prinsipper [50]:

- Forskriftens § 3-19-6 (1)                   Iht. faktisk utslipp; eller
- Forskriftens § 3-19-6 (2)                   Iht. fastsatt kildespesifikk utslippsfaktor
- Forskriftens § 3-19-6 (3)                   I mangel av de to andre; sjablongfaktor

Krav til dokumentasjon [50]:

- Faktisk utslipp, forskriftens § 3-19-10 (1): Dokumentert måling utført av kompetent aktør godkjent av Sjøfartsdirektoratet (kompetent myndighet), f.eks Ecoxy AS
- Kildespesifikk utslippsfaktor, forskriftens § 3-19-10 (2): Dokumentasjon, iht. veiledning fra sjøfartsdirektoratet, innsendt og godkjent av Sjøfartsdirektoratet, alternativt EIAPP-sertifikat
- Avhengig av turtall, forskriftens § 3-19-10 (3): Dokumentert med sertifikat e.l.

Utslippsberegning med kildespesifikk faktor [50]:

- NO<sub>x</sub>-faktor (F) (kg NO<sub>x</sub>/tonn drivstoff): 

Målt spesifikt NO <sub>x</sub> -utslipp (g/kWh) x 1000
Målt spesifikt drivstofforbruk (g/kWh)
- NO<sub>x</sub> (utslipp av NO<sub>x</sub> i kg):                   F x drivstoff i tonn
- NO<sub>x</sub>-avgift:                                       F x drivstoff i tonn x 15 kr/kg NO<sub>x</sub>

EIAPP-sertifikatet for skip med installert motor etter 1.1.2000, bekrefter IMO's NO<sub>x</sub> Technical Code for skip [62]. Når det gjelder motorer som er levert før 1.1.2000 er de ikke formelt underlagt dette, men disse kan få fastsatt kildespesifikk utslippsfaktor ved at

målinger gjennomføres ombord av ”kompetent aktør”, som er godkjent av Sjøfartsdirektoratet, med utstyr og under driftstilstander lik det som benyttes for EIAPP-sertifisering [51]. Dette har KGJS fått gjennomført på ”Bornholm Cement” av Ecoxy AS. Man kommer nærmere inn på resultatene av dette i senere kapittel.

Det finnes noen unntak i forskriften [49] [50]:

- Fartøy i direkte fart mellom norsk og utenlandsk havn (ved direkte utenriks fart er utslippet fra hele turen dritatt)
- Fiske- og fangstfartøy for utslipp som skjer utenfor 250 nm (fjerne farvann)
  - Det må ikke drives fiske, fangst eller annen virksomhet underveis. Det er bedt om presisering av hva som er definisjonen på dette.
- Fartøy med miljøavtale med staten ved Miljøverndepartementet om gjennomføring av NO<sub>x</sub>-reduserende tiltak
- Verneverdige fartøy (det finnes særlige regler for dette)
- Fartøy som transitterer norsk territorium (såkalt uskyldig gjennomfart)

De tre beregningsmetodene er subsidiære, ikke valgfrie og sjablong skal ”svi” mest. Når det gjelder sjablongmetoden så er det motorens maksimale turtall som skal legges til grunn for beregningen. Faktisk turtall under en enkeltreise har ingen betydning, og det er hovedmotorens turtall som er avgjørende. Turtallet kan verifiseres ved kontroll av fartøy og faktorene er satt høyt for å gi motivasjon til utslippsreduksjon.

#### 5.2.4 Rapportering og avgiftsberegning

Man må anta at de forskjellige utslippskildene (hvm, hjm og kjele) har ulikt utslipp (driftsmønster), men kan benytte samme drivstofftype. Det forutsettes derfor at drivstofforbruk for hver enkelt utslippskilde er registrert, og kan dokumenteres, for avgiftsperioden for å garantere korrekt avgiftsberegning. Om drivstofforbruk ikke kan dokumenteres for hver utslippskilde, må altså fartøyets kildespesifikke utslippsfaktor bestemmes som forklart over [51].

#### 5.2.5 Overgangsordninger-avgiftsrefusjon

Det er opprettet overgangsordninger som rederiene kan benytte seg av. Disse medfører en avgiftsreduksjon hvis overholdt innen fristen. Ordningene omfatter [49]:

- Rederier som innen 1.juli 2007 inngår avtale med verksted om installasjon av rensutstyr
- Rederier som innen 31.desember 2007 installerer måleutstyr
- Rederier som innen 1.juli 2007 har søkt Sjøfartsdirektoratet om fastsettelse av kildespesifikk utslippsfaktor (endring i utslippsfaktor)

Utføres en eller flere av disse ordningene innen fristene får man refusjon tilsvarende utslipp før og etter installasjon, eventuelt fastsettelse av faktor, for perioden 1.januar 2007 og frem til installasjon/fastsettelse. Når det gjelder kildespesifikke målinger kan disse gjennomføres til og med 2008. For å få tilbakebetalt for mye avgift i forbindelse med kontinuerlige målinger, må måleutstyret være ombord innen 2007 [66]. Alt kan selvfølgelig etterkontrolleres av tollvesenet uten varsel, og dette gjøres gjennom Sjøfartsdirektoratet. Refusjonssøknad sendes til tilhørende tollregion med tilhørende dokumentasjon. Fartøy som allerede har gjennomført tiltak, skal beregne brutto utslipp av NO<sub>x</sub> før fradrag gjøres for dokumentert effekt av NO<sub>x</sub>-reduserende tiltak.

### 5.2.6 Gyldighet målinger/sertifikater

Når det gjelder målinger (fastsettelse av kildespesifikk faktor) og EIAPP-sertifikater er disse gyldige på ubestemt tid, såfremt det ikke gjøres endringer i motorkonfigurasjonen som endrer utslippskarakteristikken etter at målinger/sertifisering er gjennomført [65]. Det er også tatt opp med Sjøfartsdirektoratet om målinger som er utført på like motorer, eventuelt på søsterskip, kan legges til grunn ved fastsettelse av kildespesifikk faktor. Direktoratet har i denne sammenhengen bestemt at det bare er i de tilfellene et fartøy har flere like motorer det er tilstrekkelig å måle bare en av motorene [66].

## 5.3 Næringslivets NO<sub>x</sub>-fond

Innføringen av NO<sub>x</sub>-avgift medfører store økonomiske belastninger for skip som faller innenfor avgiftsregimet, samtidig som den miljømessige effekten er meget usikker. Det må nevnes at Norge i følge Gøteborgprotokollen er sent ute, og virkemidler er etterlyst i denne sammenhengen. Som et alternativ til å betale høy statlig avgift som bare delvis vil bli brukt til å støtte NO<sub>x</sub>-reduserende tiltak, har de berørte organisasjonene NHO, NI, OLF, RLF, FRF, Fiskarlaget og NR fremmet forslag om et alternativt næringsfond for NO<sub>x</sub>-reduksjon [45]. Får man i stand en miljøavtale med staten medfører det 0 kroner i avgift, men man forplikter seg til å betale 3-4 kr/kg NO<sub>x</sub> til fondet [55]. Fordi fondet gjelder statsstøtteregler, må man ha godkjenning av ESA før fondet kan stiftes.

NO<sub>x</sub>-avgiften rammer industri, fiskerier, deler av turistnæringen, jernbanen og innenriks skips- og luftfart. En avgift på 15 kr/kg NO<sub>x</sub> belaster næringen med ca. 1800 mill. kr. Kysttrafikken får dermed en meravgift på rundt 570 mill. kr. Regjeringen har vedtatt NO<sub>x</sub>-red støtte med 50 mill. kr over 3 år, noe som tilsvarer 30-40% i støtte til investeringer. Fiskeriene får derimot opp i mot 100% finansieringsstøtte i 2007 [54]. En avgift til staten gir begrenset NO<sub>x</sub>-rensing og taper rederiene, samtidig som tilskudd er begrenset av EØS-regler (konkurranseregler), restutslipp belastes med avgift og avgiften vil kunne øke til 50-60 kr/kg NO<sub>x</sub>. En avgiftssats på 15 kr/kg NO<sub>x</sub> kan føre til utslippsreduksjoner opp mot 25 000 tonn. Analyser indikerer at for å oppfylle forpliktelsene i Gøteborgprotokollen må man gjennomføre tiltak der marginalkostnaden kan komme opp mot 50-60 kr [56]. En avgift på 50 kr /kg og utvidet virkeområde belaster næringen med 8 mrd. kroner i året, gitt at man uendrede utslipp. Fondsløsningen

begrenser innbetaling fordi alle midler brukes til tiltak og 4-500 mill. kr årlig i 3-5 år gir en sum på 1500-2000 mill. kr. totalt [54]. For å oppnå dette trenger man altså 3-4 kr/kg NO<sub>x</sub> til fondet.

Fondet er tenkt organisert slik at organisasjonenes medlemmer, og eventuelt utenlandske skip i norsk innenriksfart, inngår en avtale med fondet som innebærer en forpliktelse til å betale inn beløp knyttet til bedriftens/skipets utslipp. Meningen er at det skal være langt billigere enn å stå utenfor næringsfondet. Man forplikter seg også til å utrede tiltak og gjennomføre disse etter avtale. Inntektene til fondet skal brukes på tiltak som monner der det koster minst, dvs. det som kan gjøres først blir prioritert. Rederier og andre som inngår avtale, vil kunne søke fondet om dekning av inntil 100% av kostnader til NO<sub>x</sub>-reducerende tiltak, herunder både investeringer og netto driftskostnader for en periode, anslagsvis til 2015. Alt fondet får inn skal brukes på dette, bortsett fra et mindre beløp til administrasjon. Alle som slipper ut NO<sub>x</sub> kan bli medlem av fondet, og alle som har bestilt verksted, eller på annen måte satt i gang tiltak, har rett til å søke fondet om støtte [55]. En avtale med staten baseres på at organisasjonene påtar seg under visse forutsetninger å redusere utslippene innen en gitt tidsfrist [45]. Det legges vekt på fra regjeringens side at en miljøavtale skal gi konkrete, tidfestede utslippsreduksjoner som må gi minst samme miljøeffekt som avgiften over tid [56].

DNV har gjort en tiltaksanalyse for 2007 der man har vurdert utslippsreducerende tiltak fra en avgiftsbelagt flåte på i alt 834 skip, deriblandt 319 fiske- og 144 supplyskip. Beregnede utslipp før tiltak settes i verk er 86 000 tonn NO<sub>x</sub>. Den begrensende faktoren ligger i kapasiteten hos leverandører, og en kraftig opptrapping av denne er nødvendig for å nå målene om tilstrekkelig reduksjon. Det er usikkert hvor raskt tiltak på skip kan gjennomføres, men NO<sub>x</sub>-fondet sikrer jevn etterspørsel [54].

Man er pr. mai 2007 i en forhandlingsfase med Miljøvern- og Finansdepartementet. Det man vet sikkert er at en eventuell avtale kun skal gi et midlertidig avgiftsfritak frem til avtaleforpliktelsen er oppfylt til fastsatt tid. Hjemmelen gitt av stortinget åpner for muligheten til å inngå avtaler på et senere tidspunkt som gir unntak for avgift, men innebærer ingen forpliktelse for staten til å inngå en slik avtale. Problemet kan jo bli at staten ser på dette som nok en inntekt til statskassen, og derfor drar ut prosessen. Meningen var å få en godkjenning fra EFTA's kontrollorgan ESA før sommeren, men det er foreløpig usikkert når norske myndigheter godkjenner en avtale. Det som er sikkert er at en avtale vil ha tilbakevirkende kraft 3 mnd. etter at en avtale er inngått med ESA. Hvis fondet stiftes vil det være i full drift så snart en godkjenning fra ESA foreligger [55]. Et møte som skulle vært holdt mellom NHO og Miljøvernministeren 16.mai 2007 ble utsatt med ingen ny dato, slik at miljøverndepartementet skal få tid til å sette seg ordentlig inn i forslaget. Selv om begge parter ser fordelene av en avtale, er det ikke sikkert de kommer til enighet fordi NO<sub>x</sub>-reduksjonene industrien vil forplikte seg til er mindre enn forventningene til Miljøverndepartementet [68].

## 6 Reduksjon av utslipp og avgiften

### 6.1 Reduksjonstiltak aktuelle i dag og i fremtiden

Ulike tekniske tiltak for å redusere luftforurensning fra skip [4] [43]:

- Planlegging og utnytting
- Fartsregulering i henhold til driftsprofil
- Maskineristresystem; PMS: power management system
- Forbehandling
  - Alternative drivstoff og andre energitekniske tiltak
  - Senking av forbrenningstemperatur (vannemulsjon)
- Godt vedlikehold av motor og propellanlegg
- Forbedret skrogform, optimalisering av alle parametere ved nybygg
- Motorinterne tiltak:
  - Endringer i motorkonfigurasjon som påvirker forbrenningsprosessen
    - endring av innsprøytningsstidspunkt
    - innsprøytningsmengde
    - fordeling og trykk
    - lavere ladelufttemp
    - endring av dysespesifikasjoner
    - ladeluftparametere
    - kompresjonsforhold og modifikasjon av turbolader
  - HAM
  - EGR
  - Direkte vanninjeksjon
- Etterbehandling
  - Avgassbehandling (rensing)

#### Operasjonelle reduksjonstiltak


For enkelte skip kan det være aktuelt (lønnsomt) å endre seilingsmønster for på den måten å redusere omfanget av innenriksfart, hvis dette er kommersielt mulig og billigere enn å betale avgift. Dette til tross for om tekniske reduksjonstiltak er gjennomført. Det er uansett viktig å presisere at gjenværende utslipp etter eventuelle reduksjonstiltak skal betales avgift for. Før man gjør noe er det viktig å analysere grundig [45];

- Økonomiske nettvirkninger for rederiet
- Konsekvenser for den norske selger/kjøper av endret transporttilbud
- Miljøkonsekvenser, for eksempel om last overføres til landtransport

Det levnes liten tvil om at å overføre godstransport innenriks langs kysten til land vil gi store negative konsekvenser for både helse, miljø og sikkerhet.

Denne masteroppgaven går nærmere inn på hovedpunktene 4, 7 og 8. Tiltakene deles opp i primærtiltak og sekundærtiltak, der forbehandling og motorinterne tiltak defineres som primærtiltak. Etterbehandling defineres da som et sekundærtiltak. Det er klart billigere å gjennomføre primærtiltak enn sekundærtiltak [36].

Tabell 6.1. MAN B&W sitt kostnadsoverslag for NO<sub>x</sub>-reduksjon [36].



**Emission Control**

What is the cost for emission (NO<sub>x</sub>) control ?

	Reduction capability in %	First cost In % of engine price	Running cost index
<b>Primary methods</b>			
Engine adjustments	0-30%	0%/Small	100
Engine process modifications	0-70%	3-20%	30-50
<b>Secondary methods</b>			
SCR (Sel. Cat. Reduction)	0-98%	50-70%	200-300

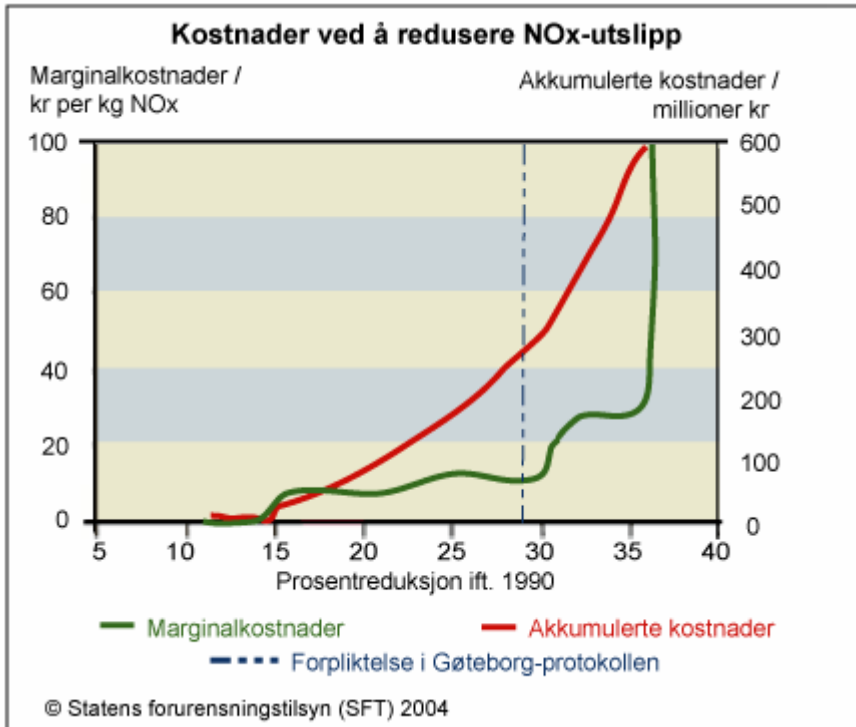
L74220-4-06502 (343094)

Som en ser av figuren over, er det lavere investeringer som skal til i % av motorprisen for å gjennomføre tiltak i gruppen for primærtiltak. En ser at SCR gir signifikant mer reduksjon i utslipp, men SCR er i tillegg langt dyrere å installere og tar stor plass slik at et system av denne typen begrenser seg selv. Dette gjelder spesielt på mindre og eldre skip. Ferger er gjerne den skipstypen som har størst plasspotensiale for slike anlegg.

Statens forurensingstilsyn har gjort en analyse av tiltak og kostnader for å redusere NO<sub>x</sub> – utslippene til kravet fra Gøteborgprotokollen (SFT-rapport 99:13). Tiltak med lavest kostnad per kg redusert utslipp er [8]:

- Motortekniske endringer og katalytisk rensing på skip
- Installering av lav-NO<sub>x</sub> gassturbiner i nordsjøen
- Rensing av NO<sub>x</sub> i ferrolegeringsindustrien
- Effektivisering av godsbiltransporten

Her er de årlige kostnadene for å nå målet beregnet til 200 - 300 millioner kroner per år. Marginalkostnaden, kostnaden ved å redusere utslippene med en ekstra enhet utover forpliktelsen, er beregnet til 10 – 20 kroner per kg NO<sub>x</sub>.

Figur 6.1. Kostnader ved reduksjon av NO<sub>x</sub>-utslipp [8].

I tillegg til NO<sub>x</sub>-avgiften, for ytterligere å stimulere rederier til å implementere NO<sub>x</sub>-reducerende tiltak, har myndighetene besluttet å etablere kompensasjonsordninger. Når det gjelder skip i innenriksfart er rederiforbundet informert om at regjeringen vil videreføre NO<sub>x</sub>RED-programmet med en totalramme på 50 mill kr for kommende 3-års periode [45].

### 6.1.1 Tiltak og modenhet

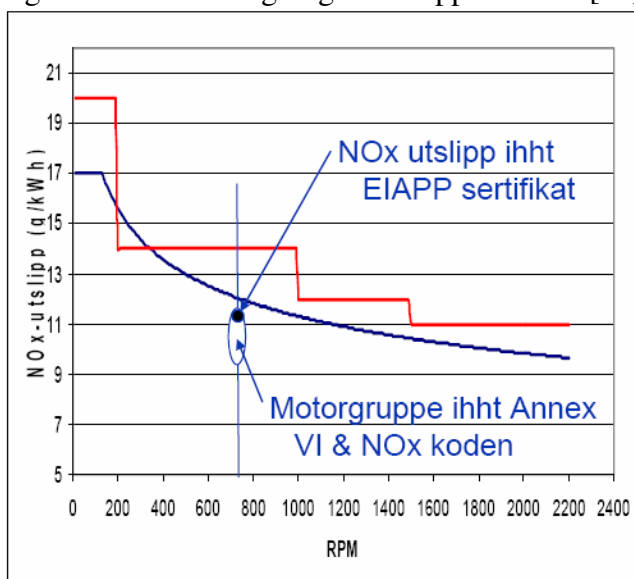
Det enkelte rederi bør i tillegg til å vurdere metoder som HAM og SCR, i første omgang få definert/målt en kilde spesifikk utslippsfaktor for de av sine skip som faller innenfor det nye avgiftsregimet. Det er mye å spare på å beregne avgiften ut fra denne faktoren i forhold til den turtallsbaserte sjablonfaktoren. DNV har gjort noen sammenligninger som vist under [43].

Tabell 6.2. Eksempler på utslippsreduksjon ved dokumentasjon av skipsspesifikke målinger [43].

	EIAPP sertifikat			
	RPM<200	200<RPM <1000	1000< RPM<1500	1500<RPM
Utslippsfaktor (kg NO <sub>x</sub> /tonn drivstoff)	86	58	47	42
Sjablonverdi (kg NO <sub>x</sub> /tonn drivstoff)	100	70	60	55

Tabellen over viser at man kan få mellom 12 og 24% reduksjon av NO<sub>x</sub>-faktoren (F) ved bruk av EIAPP-sertifikater.

Figur 6.2. Sammenligning av utslippsfaktorer [44].



- Sjablongverdi ihht forskrift
- Kildespesifikk faktor basert på EIAPP sertifikat vil normalt ligge like under IMO-kurven.
- Kildespesifikk faktor fra måling vil sannsynligvis gi lavere utslippsfaktor enn å bruke utslippsverdi fra EIAPP sertifikatet.

IMO-kurven er bestemt ut fra et turtallsbasert grunnlag. Grunnen til at kildespesifikk måling sannsynligvis gir lavere utslippsfaktor enn å bruke EIAPP-sertifikatet, er at EIAPP-verdien representerer verdien fra den dårligste (motoren med mest utslipp) i en motorgruppe [62].

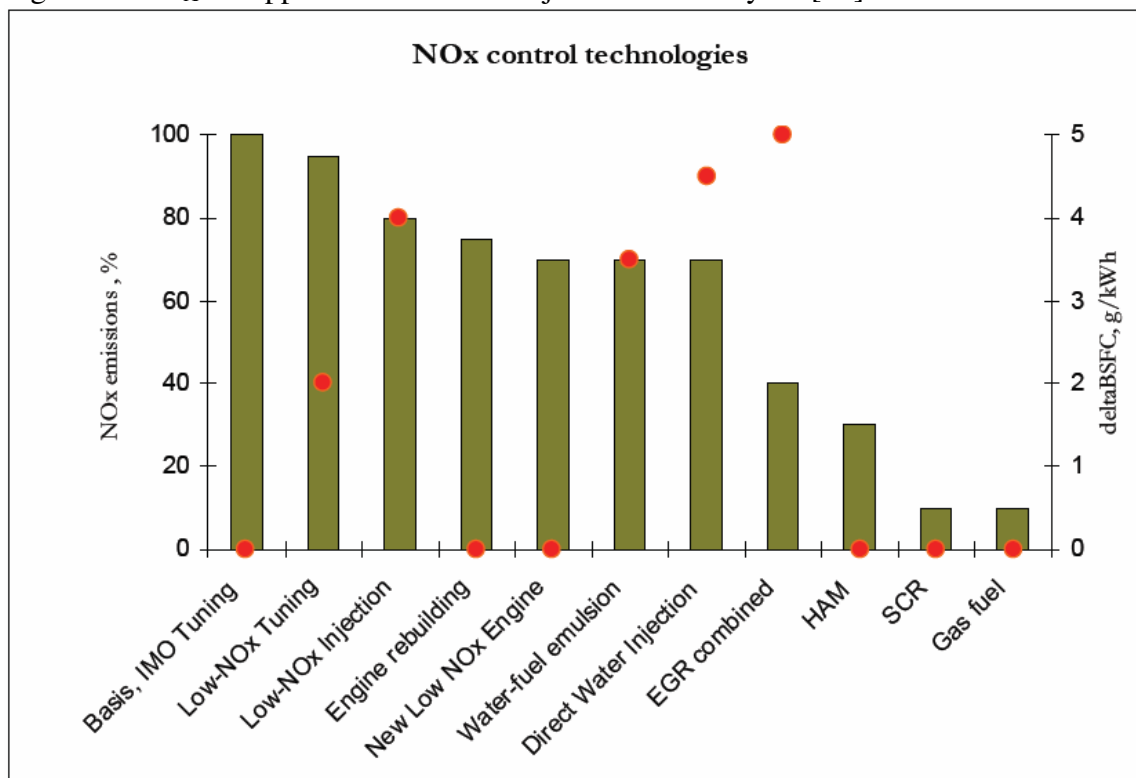
De forskjellige reduksjonsmetodene utredet senere i dette kapittelet har ikke kommet like langt når det gjelder modenhet og anvendelighet.



Tabell 6.3. Modenhetscore tiltak pr. februar 2007 [43].

Tiltak	Modenhets- score	
Gass/LNG-drift -nybygg	**	* Implementert på enkeltfartøy eller prototype
Vannemulsjon	*	
MTO	***	** Implementert på 10-talls fartøy
HAM	*	
Vanninjeksjon	*	*** Implementert på 100-talls fartøy eller mer
EGR	*	
SCR	**	

En ser at det ikke er mange fartøy som har implementert tiltak, spesielt ikke tiltak som krever større investeringer. Dette vil nok i lys av den nye avgiften på NO<sub>x</sub> gi et utslag i antall installasjoner på sikt. Reduksjonspotensialet i tabellen er oppsummert i figuren under. Her ser en at tiltakene med størst reduksjonspotensiale er lite implementert på dagens fartøy.

Figur 6.3. NO<sub>x</sub>-utslipp i forhold til reduksjonsmetode benyttet [43].

En skal også være klar over at med forbrenningsmotorer må en gi og ta. En får med andre ord ikke i både pose og sekk med tanke på utslipp selv om reduksjonstiltak blir implementert. Endringer i utslippskarakteristikk for andre stoff enn NO<sub>x</sub> hører med selv om det stort sett er reduksjoner det er snakk om.

Tabell 6.4. Endringer i andre utslipp ved NO<sub>x</sub>-reduksjonstiltak [43].

Tiltak	Endringer i andre utslipp
Gass/LNG	CO <sub>2</sub> , PM, SO <sub>2</sub> og HC reduseres også
Vannemulsjon	Små endringer
MTO	PM og HC kan også reduseres
HAM	Liten økning i PM og HC
Vanninjeksjon	Ukjent
EGR	PM reduseres ved PM-filter
SCR	CO <sub>2</sub> øker med ca. 2%. NH <sub>3</sub> -utslipp

Det er uansett ikke snakk om store tall, men nok til at en kan oppleve små negative endringer i utslipp. Som for eksempel ved bruk av SCR, der en får en liten straff i form av økt CO<sub>2</sub>- og NH<sub>3</sub>-utslipp.

## 6.2 Forbehandling

### 6.2.1 Alternativt drivstoff

Framdriftssystem som er basert på alternativt drivstoff som LNG og hydrogen vil redusere utslipp til luft betydelig. Ved å bruke gass, kan en redusere utslipp av CO<sub>2</sub> med ca 20% og NO<sub>x</sub> med ca 85%. Med gass er det heller ingen utslipp av svovel, samt reduksjon i partikkelutslipp og heller ingen svart eksos.

#### 6.2.1.1 Gass

Operasjon av skip som går på gass har sine begrensninger i dag. I Norge er det noen få skip som bruker gass som drivstoff foreløpig. De to hovedbarrierene for gassdrift i dag er tilgjengeligheten av drivstoff (LNG) og sikkerhetsaspekter ved gassbruk (eksplosjonsbarrierer, risikoanalyser). Skip som går på gass i dag har fast hjemmehavn, noe som letter tilgangen på flytende naturgass. Slik som infrastrukturen og distribusjon av LNG er i dag, er det gitt at antallet slike skip er begrenset. Med tanke på sikkerhetsaspektet har fergene vært i fokus av opplagte grunner. Dette har igjen ført til strengere regler spesielt med tanke på skipssystemer. Det er i dag både nasjonale og internasjonale regler for skip som går på LNG [6].

Fergeselskapet Fjord1 Fylkesbaatane satte den første gassdrevne ferga i verden (M/F Glutra) i drift i 2000. I løpet av første kvartal 2007, kom også de 5 nye gassfergene som trafikkerer E39 mellom Bergen og Stavanger inn i operasjon. Disse har kuttet overfartstid mellom Halhjem-Sandvikvåg og Arsvågen-Mortavika med henholdsvis 15 og 5 minutter. Det har kommet en del kritikk (avisartikler i m.a. BT) rundt disse nye gassfergene med tanke på utslipp av CO<sub>2</sub>. Den kritikken er regelrett feil, siden man må sammenligne med ferger av tilsvarende størrelse (hastighet, kapasitet og kW) med dieseldrift, ikke utslipp av CO<sub>2</sub> før og nå. Man har og flere gode eksempler på skip med gassdrift.

Bilde 6.1. Gassfergen Bergensfjord [41].



Bilde 6.2. "Viking Energy" [38].

Offshorerederiet Eidesvik AS satte i drift verdens første gassdrevne plattform supplyskip



”Viking Energy” i 2003, og Simon Møkster skipet ”Stril Pioner” samme år. Begge disse skipene går på LNG og er et resultat av forskningsarbeid gjort i samarbeid med Statoil, med initiativ fra Eidesvik. ”Viking Energy” har dual fuel-motorer, noe som gjør at det både kan gå på LNG og marin dieseloilje. Statistikken etter noen år i drift viser at LNG-drift reduserer NO<sub>x</sub>-utslipp med 90% (ca 200 tonn i året) og CO<sub>2</sub>-utslipp med 30%. Tester har vist at drivstofføkonomien er 30% bedre enn med diesel som brennstoff [38]. Med et bedre distribusjonsnett av LNG i Norge på sikt, er dette et viktig steg i utviklingen mot utslippsfrie skip.

## 6.2.2 Vann

Vanndamp har en betydelig høy effekt med tanke på å begrense NO<sub>x</sub>-utslipp fra dieselmotorer. Når vanndamp mikses i inntaksluften til motoren, får man en tynnere blanding og høyere spesifikk varmekapasitet i ladeluften som reduserer NO<sub>x</sub>-formasjonen. Lavere og mer konstant forbrenningstemperatur hindrer ”hot spots” og reduserer NO<sub>x</sub> på samme tid. Det er flere måter å gjøre dette på

- Direkte vanninjeksjon (motorinterne tiltak)
- Vannemulsjon i drivstoff (forbehandling)
- HAM-Humid Air Motor (motorinterne tiltak)

Fordelene med vann er flere [32]:

- Redusert systemtemperatur
- Bedret atomisering
- Reduksjon av sot, CO og NO<sub>x</sub>
- Bedret forbrenning

## 6.2.3 Vannemulsjon i drivstoff

Metoden er basert på at vann tilsettes brennoljen, eventuelt sammen med emulgator (Reduserer energien som kreves for å lage en emulsjon. Dette skjer fordi emulgatoren er overflateaktiv og reduserer grenseflatespenningen mellom de to væskene [47]. Emulgatoren fungerer og som stabilisator og hindrer dermed to dråper i å smelte sammen (koalesere), før blandingen/emulsjonen sprøytes inn i forbrenningskammeret. (En emulsjon er en blanding av to væsker som ikke er fullstendig løselige med hverandre. Den ene væsken er fordelt som dråper i den andre). Injisering av vann/drivstoff emulsjoner fører til effektiv atomisering (mikrofordamping) og god fordeling av drivstoff i forbrenningskammeret. Atomisering vil i denne sammenhengen si at man har veldig små dråper av brensel i forbrenningskammeret, og jo mindre dråper jo bedre forbrenning og lavere utslipp på grunn av lavere temperatur. Vann absorberer varme bedre, og senker derfor forbrenningstemperaturen. Det kreves ca 1000Kj/Kg energi for å forandre blandingen til gass. Cp for gass er 4 ganger større enn for luft, dermed senkes temperaturen uten at det går utover virkningsgrad [35]. Resultatet er bedre forbrenning

med lavere drivstofforbruk, renere motor og reduksjon i utslipp til luft som NO<sub>x</sub>, CO, HC og PM. Emulsjonsdrift er mulig for både nye og eksisterende marine motorer. Reduksjonspotensialet er på ca 20-25% uten økning i drivstofforbruk, men erfaring tilsier at emulsjonsdrift sammen med tungolje som brennstoff gir et litt høyere forbruk. Samtidig kan diesellole gi en liten reduksjon i drivstofforbruk. NO<sub>x</sub>-utslippene reduseres lineært som en funksjon av vanninnhold i drivstoffet, dvs. 1% reduksjon krever 1% tilsatt vann [6].

Tiltaksbegrensning vannemulsjon

Begrensningen ligger i kapasiteten til pumper og dyser i drivstoffsystemet. Tilsetning av større andeler vann kan overskride kapasitetene til systemet. Man skal ha plass til vanntank om bord, og man får med vann mulighet for korrosjon, selv om driftserfaringer ved pilotanlegg tilsier at dette ikke er noe problem [43].

### **6.3 Motorteknisk ombygging/justering**

Dette er en kombinasjon av tiltak som kan omfatte forsinket injeksjonstiming, endring av trykkforhold, nye fuelinjektorer, ny teknologi m.m.

#### **6.3.1 Brenselceller**

Eidesvik AS deltar også i et stort industriprosjekt med utvikling av et nytt revolusjonerende konsept for kraftproduksjon i skip. Det er basert på at brenselceller skal overta for dieselmotorene, og dermed redusere utslippene dramatisk. Teknologien skal prøves ut i et gassdrevet forsyningskip som bygges for Eidesvik av Westcon i Ølen [39]. Målet med arbeidet som er gjort i prosjektet "Fellowship", er å utvikle et komplett integrert hybrid brenselcelle system for bruk ombord på skip. Prosjektet er et samarbeid mellom DNV, Eidesvik, MTU CFC Solutions GmbH, Vik-Sandvik og Wärtsilä Automation Norway [34]. Det er flere fordeler med den nye teknologien; Virkningsgraden er god, det er lave operasjonskostnader og null utslipp av stoff som NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, VOC og PM. De eneste avgassene etter brenselceller er varme og vann (hvis den går på hydrogen). Hvis cellene drives på naturgass vil avgassene inneholde CO<sub>2</sub>, men bare 50% sammenlignet med dieselmotorer. I tillegg er det ikke vibrasjoner eller støy på grunn av ingen bevegelige deler [40]. Hvis man bruker hydrogen som drivstoff oppnår en altså null-utslipp. Hydrogenet må da fremstilles ved utnyttning av naturlig fornybare energikilder, eller henting av lavtrykks naturgass ved hjelp av CO<sub>2</sub>-deponering [41]. En PEM-brenselcelle (Proton Exchange Membrane fuel cell) fungerer slik at hydrogen i gassform blåses inn i cellen. Denne oksideres på anoden og frigjør to elektroner og to protoner ved hjelp av en katalysator. Protonene ledes gjennom en protonledende membran, mens elektronene går i en elektrisk strøm i en ytre krets og driver den elektriske lasten. Elektronene strømmer etterpå til katoden, hvor de sammen med protoner og oksygen danner vann, som da blir det eneste sluttproduktet fra denne reaksjonen. Noe av den største utfordringen med denne type drift på skip er lagringen av hydrogen tilsvarende forbruket ombord [34].

### 6.3.2 Justering og timing

Ved motortuning og forsinket injeksjonstiming er hensikten å kontrollere NO<sub>x</sub>-utslippene ved å redusere ladelufttemperaturen og sinke injeksjon av brennolje under forbrenningen. Denne metoden har i noen tilfeller gitt negative utslag i form av dannelse av mer HC og CO. Forsinket injeksjonstiming alene kan i verste fall øke drivstofforbruket med ca 3%, og påfølgende øke utslipp av CO<sub>2</sub> og SO<sub>x</sub>. Økningen i drivstofforbruket er avhengig av motortype og hvor forsinket injeksjonstiming er satt. NO<sub>x</sub>-dannelse er avhengig av temperatur og forbrenningstid. Den forbrente gassen fra forbrenningen som skjer før maks trykk er oppnådd, blir komprimert på grunn av økende trykk i forbrenningskammeret. Dette betyr at den holder seg ved høy temperatur i lang tid sammenlignet med forbrent gass senere i prosessen, noe som betyr at NO<sub>x</sub> får mer tid til å dannes. Forsinket injeksjon fører til lavere trykk og temperatur under mesteparten av forbrenningsprosessen. Metoden øker også drivstofforbruket på grunn av senere forbrenning, samtidig som mindre av forbrenningsenergien utløst blir utsatt for hele ekspansjonsprosessen og gasstemperaturen holdes høy lengre inn i ekspansjonen. Dette vil igjen gi et større varmetap til veggene i forbrenningskammeret. Man får også mer røykutvikling på grunn av lavere forbrenningstemperatur, og derav mindre oksidering av sot som dannes tiddligere i forbrenningen [6].

Når det gjelder dieselmotorer som brukes i skip og båter, kan man enten redusere NO<sub>x</sub>-produksjonen ved å brenne dieseloiljen ved lav temperatur, eller man kan redusere sotdannelse ved å brenne ved høye temperaturer. Man kan ikke unngå både sot/røyk og NO<sub>x</sub> på samme tid og forhold. For å oppnå dette må man forbedre etterforbrenningen av flyktige hydrokarboner, og i denne sammenhengen kunne operere ved lavere temperaturer og produsere mindre NO<sub>x</sub>.

### 6.3.3 Direkte vanninjeksjon

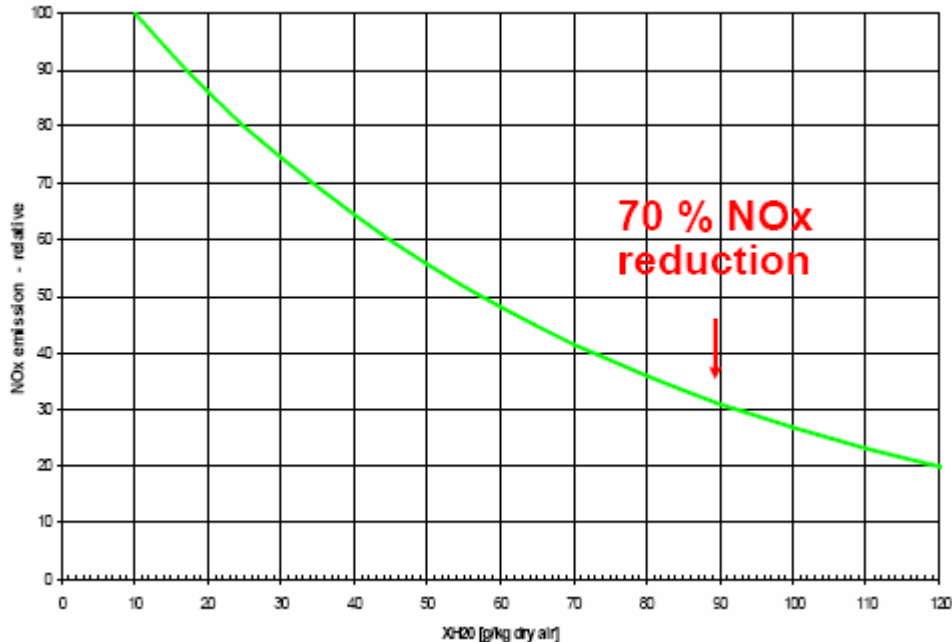
En av metodene for å tilføre vann i forbrenningsprosessen er å injisere vann direkte inn i forbrenningskammeret ved siden av drivstoffet. Sammenlignet med andre teknikker for tilsetning av vann i forbrenningen, gir direkte injeksjon mulighet for å gjøre dette til rett tid og rett sted for å oppnå høyest reduksjon av NO<sub>x</sub>. Direkte vanninjeksjon ble først vurdert som en god måte å redusere NO<sub>x</sub> i eksosgassen. Flere produsenter tilbyr systemer for å sprøyte vann direkte inn i forbrenningskammeret, men metoden har også noen bakdeler. Sylinderforinger har tørket inn som et resultat av vann i smøreoljen [6], og vannet kan gi sprekkdannelse i sylinder som følge av termiske spenninger [35]. Resultatet er at metoden ikke lenger er så mye brukt, spesielt av rederi som er skeptiske i forhold til bakkdelene metoden fører med seg. Vannemulsjon i drivstoffet foretrekkes fremfor direkte injeksjon.

### 6.3.4 HAM-Humid Air Motor

HAM kan redusere dannelsen av NO<sub>x</sub> med 60-80% ved befuktning av dieselmotorens inntaksluft (ladeluft). Denne teknikken er fremfor alt miljøvennlig og ren, samtidig som

den direkte angriper årsaken til dannelse av NO<sub>x</sub>. Vanndamp (basert på fordampet sjøvann) tilsettes forbrenningsluften, og forskjellige tester og HAM-installasjoner viser at reduksjon av NO<sub>x</sub> med opp til 70% er mulig, men dette er avhengig av klimaforhold.

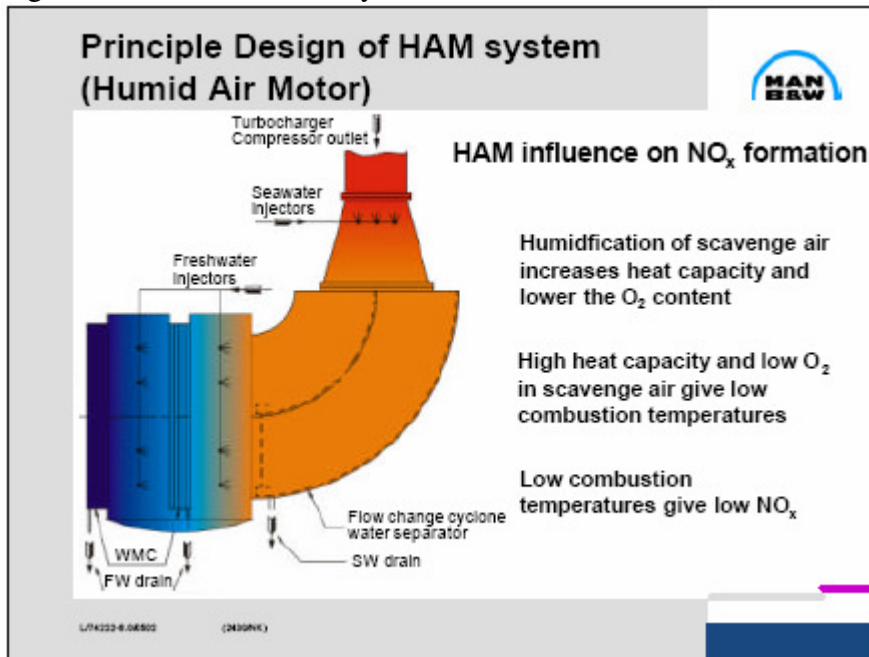
Figur 6.4. NO<sub>x</sub>-reduksjon i forhold til innhold av vanndamp [74].



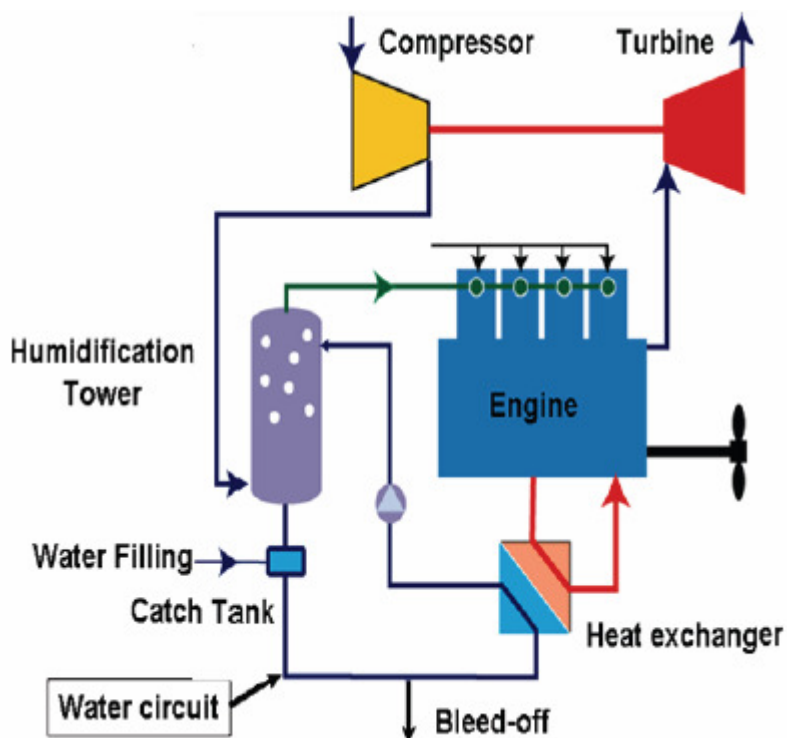
Denne reduksjonen er oppnådd uten å påvirke drivstofforbruket. Dampen øker den spesifikke varmekapasiteten og reduserer oksygenkonsentrasjonen i forbrenningskammeret. På grunn av den mer jevne forbrenningen som oppnås med HAM-systemet, får man betydelige reduksjoner i sylindertemperatur (>20°C) og ventiltetemperatur (>30°C), noe som øker livslengden og senker vedlikeholdskostnadene. Erfaringer med denne metoden er både gode og dårlige, men fremfor alt begrenset siden det ikke finnes så mange systemer i full drift. Innholdet av natrium i sjøvann er et problem siden motorer er ømfintlige for økt natriuminnhold i inntaksluften. HAM-systemet passer både til mobile og stasjonære dieselmotorer, men installasjonene er plasskrevende og passer derfor ikke for skip med små maskinrom. HAM har høye installasjonskostnader slik som SCR-systemet, men er rimeligere å etterinstallere. Driftskostnadene er også noe mindre enn ved SCR [6].



Figur 6.5. Skisse av HAM-systemet [36].



HAM-systemet er vist mer forenklet på tegningen under.

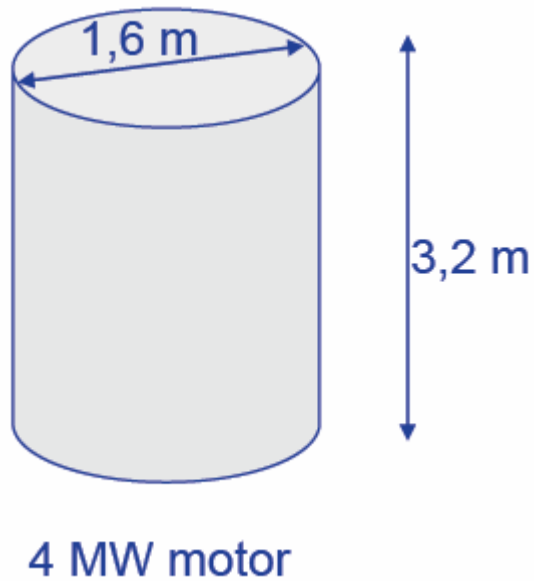
Figur 6.6. Prinsippet med NO<sub>x</sub>-reduksjon ved bruk av HAM [74].

Skissen under viser utslippskarakteristikker for NO<sub>x</sub>, CO, HC og PM ved 100% lastkjøring og 0, 50% og 100% HAM. Man ser at for å få ned NO<sub>x</sub>-utslippet, får man en signifikant straff på CO og liten straff på PM. HAM-systemet testet av MAN B&W gir 40% reduksjon av NO<sub>x</sub>, ved 100% HAM [36].

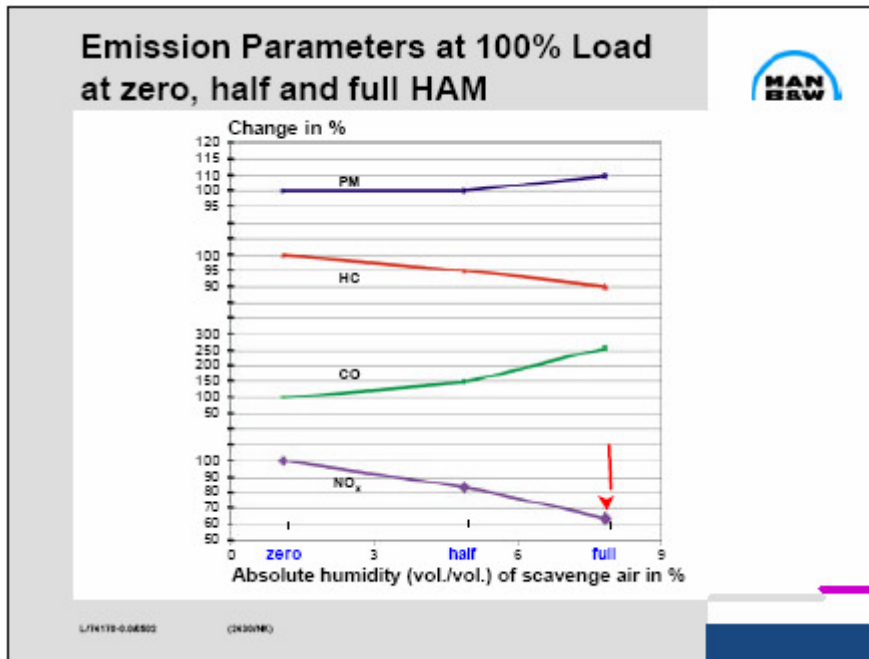
#### Tiltaksbegrensninger HAM

Tiltaksbegrensningene for HAM ligger i at man må ha plass til systemet, deriblandt en fuktekolonne med avsaltingsanlegg. Her er samarbeid med motorleverandører nødvendig.

Figur 6.7. Fuktekolonne for et anlegg med 4 MW motor installert [43].



Figur 6.8. Utslippskarakteristikker for HAM-anlegg [36].



Som vist i tabellen under, har vandampens spesifikke varmekapasitet en positiv effekt på driftstemperaturen i viktige deler av forbrenningsprosessen.

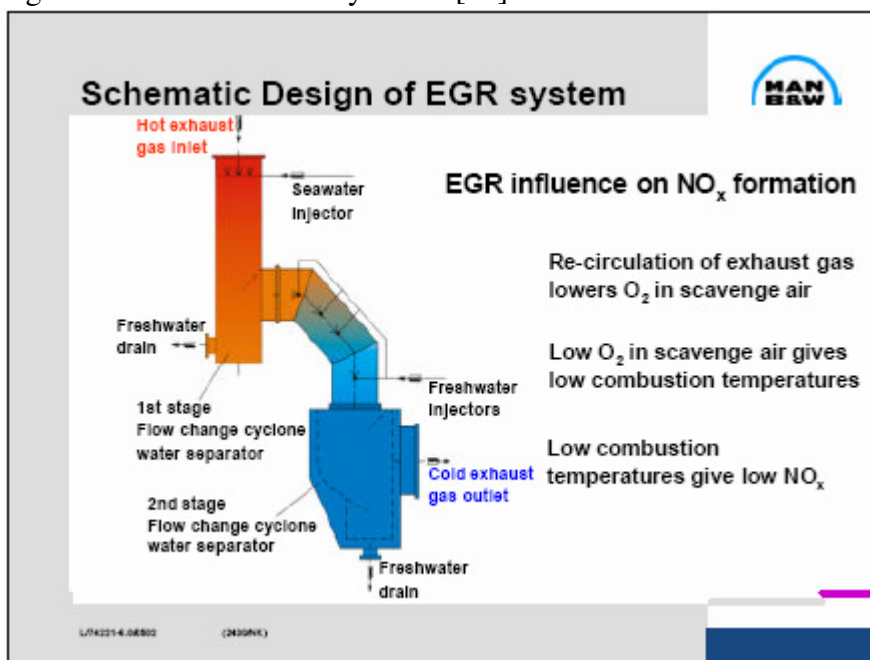
Tabell 6.5. Temperaturer i forbrenningskammer ved bruk av HAM [36].

Running conditions/ components	Without HAM	With full HAM
Liner top °C	201	231
Piston top °C	435	453
Cylinder cover °C	295	312
Exhaust spindle seat °C	461	481
Exhaust spindle bottom °C	580	592

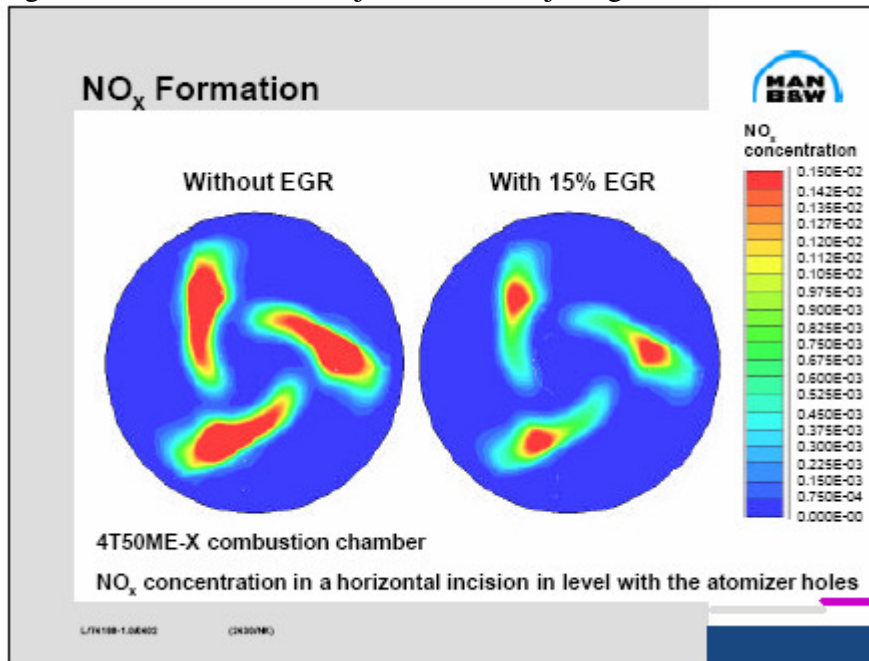
## Eksosgassresirkulering (EGR)

Gjennom EGR-metoden resirkuleres eksosgass i små mengder for å utnytte høy varmekapasitet i eksosgasskomponenter (CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>O) i forhold til luft. NO<sub>x</sub> reduseres ved å føre mindre enn 10% tilbake til inntaksmanifolien (en fraksjon av eksosgassen blir resirkulert for å fortynne den friske blandingen) der den blir blandet med ny luft-/drivstoffblanding. Dette reduserer oksygenkonsentrasjonen, senker den adiabatisk flammemetemperaturen [37] og øker ladeluft varmekapasiteten slik at temperaturen synker under temperaturgrensen der nitrogen og oksygen danner NO<sub>x</sub>. Dette fører til at de totale utslippene går ned [6]. EGR passer best for motorer som går på naturgass eller høykvalitetsdrivstoff som har lavt svovelinnhold. En ulempe er at drivstofforbruket øker på grunn av tykkere blanding og dermed dårligere forbrenningsvilkår slik at man får økte drivstoffkostnader og utslipp av CO<sub>2</sub>.

Figur 6.9. Skisse av EGR-systemet [36].



I moderne dieselmotorer blir EGR-gassen kjølt ned gjennom en varmeveksler, noe som gir større mengde resirkulert gass. Dieselmotorer er heller ikke begrenset av at de trenger en kontinuerlig flammefront. De opererer alltid med overskuddsluft og kan oppnå så gode EGR-rater (passivt) som 50% ved kontroll av NO<sub>x</sub>-utslipp. Figuren under viser NO<sub>x</sub>-konsentrasjon ved 0 og 15% EGR under testkjøring [36].

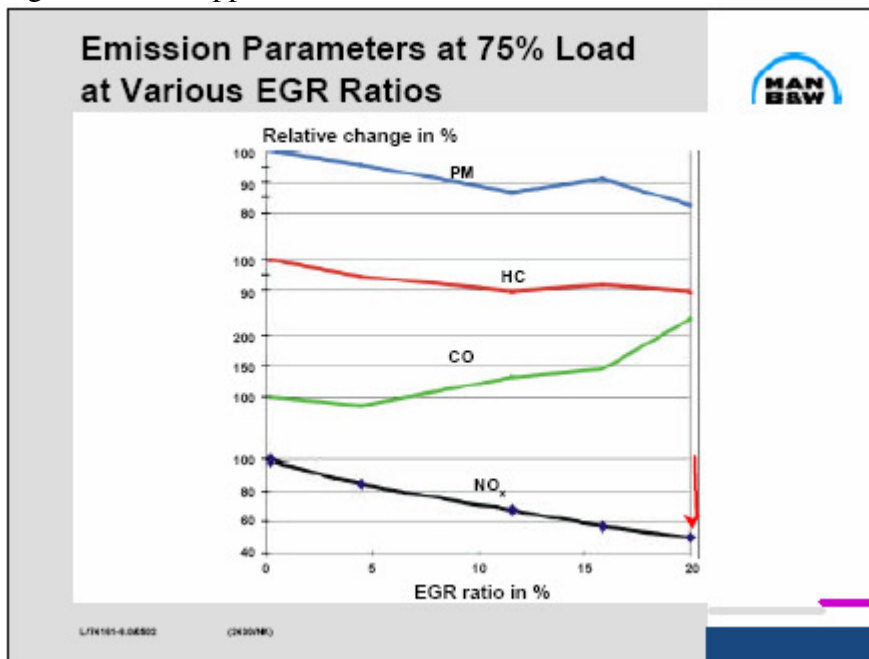
Figur 6.10. NO<sub>x</sub>-konsentrasjon under testkjøring [36].

Hvis prosentdelen av eksosgass som er resirkulert (%EGR) er definert som en prosentdel av den totale blandingen er;

$\%EGR = (M_{EGR}/M_i) \times 100$ , hvor  $M_{EGR}$  er resirkulert eksosgass. EGR senker generelt flammtemperaturer, og dette senker NO<sub>x</sub>-bidraget. Mellom 5 og 10% EGR halverer sannsynligvis NO<sub>x</sub>-utslippene, derimot kan EGR senke effektiviteten og redusere luftandelen ved tynn forbrenning (lean combustion limit) [32].

Skissen under viser utslippskarakteristikk for NO<sub>x</sub>, CO, HC og PM ved 75% lastkjøring og varierende EGR-rate. På samme måte som ved bruk av HAM får man en straff på CO, men i motsetning reduksjon av PM, bortsett fra ved rater på mellom 11-15%. NO<sub>x</sub> reduseres med ca 50% ved bruk av EGR.

Figur 6.11. Utslippskarakteristikk ved bruk av EGR [36].



Som vist i tabellen under, har EGR-systemet en positiv effekt på driftstemperaturen i viktige deler av forbrenningsprosessen. Ved bruk av systemet, som ved bruk av HAM, går forbrenningstemperaturen opp uten at NO<sub>x</sub> følger med.

Tabell 6.6. Temperatur i forbrenningskammer ved (15%) bruk og ikke bruk av EGR [36].

**Combustion Chamber Temperatures without and with EGR**

Running conditions/ components	Without EGR	With 15% EGR
Liner top °C	201	209
Piston top °C	401	412
Cylinder cover °C	253	257
Exhaust spindle seat °C	440	451
Exhaust spindle bottom °C	587	598

MAN B&W

L7K328-4.0E502 (2430NM)

## 6.4 Etterbehandling

### 6.4.1 Selektiv katalytisk reduksjon (Selective catalytic reduction-SCR)

SCR-metoden er en teknikk for å kontrollere NO<sub>x</sub>-utslipp ved hjelp av en selektiv katalytisk reduksjonsenhet, og SCR er den mest brukte metoden for fjerning av NO<sub>x</sub> i eksosgassen som genereres fra skip. Ved bruk av denne teknologien reduserer en NO<sub>x</sub> til N<sub>2</sub> (nitrogengass) i en keramisk katalysator ved å benytte NH<sub>3</sub> (ammoniakk) eller urea (direkte reaksjon mellom ammoniakk og karbondioksid) som en reaktant. Selve NO<sub>x</sub>-reduksjonen foregår i en SCR-reaktor som inneholder et katalytisk materiale i flere utskiftbare enheter. Reaktoren fungerer i temperaturer mellom 270-500 °C. I tillegg til reduksjon av NO<sub>x</sub>, kan man oppnå en reduksjon i utslipp av HC, CO og PM (svevestøv) ved å legge til et ekstra oksidasjonstrinn i SCR-enheten [6].

#### Virkemåte

Metoden fungerer på den måten at en liten mengde urea og vann injiseres inn i den varme eksosgassen. Blandingen fordampes og settes i forbindelse med NO<sub>x</sub> i en heterogen katalyse over SCR-katalysatorene. Det er ingen avfallsprodukt ved denne kombinerte SCR og oksidasjonsprosessen, og reduksjonsraten kan enkelt endres for å tilfredsstille forskjellige utslippsregelverk ved å justere injeksjonsraten mellom 0-100%. Urea suppleres til systemet med et pumpeystem via kontrollventiler til innsprøytningdysene. Dysene er montert i injeksjonsdelen før SCR-omformer. Injeksjonen av urea inn i eksosledningskanalen økes av trykkluft for å atomisere urealøsningen, og for å rense dysene for urea etter injeksjonsstopp. Det er montert statiske mikserer nedstrøms i eksosrørene, og disse mikserene sørger for at eksos og fordampet urea blandes til en homogen gasstrøm før den går inn i SCR-omformeren [6]. Reaksjonen med ammoniakk kan beskrives kjemisk på denne måten [30];



Ammoniakk må tilsettes avgassen slik at ligningen over er helt korrekt for å oppnå reduksjon av NO. Dette innebærer også at man må ligge på grensen til å få en lekkasje av ammoniakk gjennom systemet, en såkalt ammoniakk-slip. Hvis en motor går stasjonært, dvs. med små forskjeller i lastvirkning og turtall, kan ammoniakkmengden økes sakte for å få så mye ut av prosessen som mulig. For motorer som ikke går stasjonært, er det utviklet et system ved LTH i Sverige som benytter seg av algoritmer for å beregne hvor mye NO<sub>x</sub> som slippes ut i sanntid. Ut fra denne beregnede mengden tilsettes så en passelig mengde ammoniakk. Deretter benyttes en modell for hvordan reaksjonene foregår i katalysatoren samtidig som i virkeligheten. Hvis modellen er tilstrekkelig, kan ammoniakk tilsettes uten å få ”slip”. Man har oppnådd 80% rensing under testkjøring der motoren ble belastet på samme måte som i virkeligheten [30]. Kvaliteten på urealøsningen er viktig for å sikre at det ikke oppstår beleggdannelse og tetting av dyser. Det er spesielt viktig å hindre at vannet inneholder de mineralene som vanligvis forekommer i vanlig drikkevann. Reduktan™ (40% urealøsning) er basert på

demineralisert vann for å hindre driftsproblemer og sikre en stabil tilførsel av reduksjonsmiddel.

SCR- og oksidasjonskatalysatorene består av lag som igjen er bygd opp av kjeramiske blokker montert side ved side i flere lag inne i omformerhuset. Blokkene har smale kanaler og er dekket med katalytisk aktive materialer som metaller eller oksidasjonsformer av disse. De er bygd opp for å gi så stor kontaktflate med avgassene som mulig, da det åpne arealet i kanalene vanligvis er > 65%. For kontinuerlig bruk, bør eksostemperaturen ligge mellom 320-500 °C for å unngå belegg eller overheting som gir mer slitasje. For lave temperaturer kan i tillegg gi korrosjon. Med forskjellige driftsparametere og type katalysator, blir virkningsgraden til katalysatorene dårligere over tid. Normalt kan SCR-systemet brukes fra 12.000-100.000 timer før vedlikehold [6]. SFT har beregnet at denne metoden kan redusere norske utslipp med 18.250 tonn, noe som er 24% av de framskrevne utslippene fra kystfart og fiskeflåte i 2010 [4].

SCR-systemet bidrar til signifikant utslippsreduksjon;

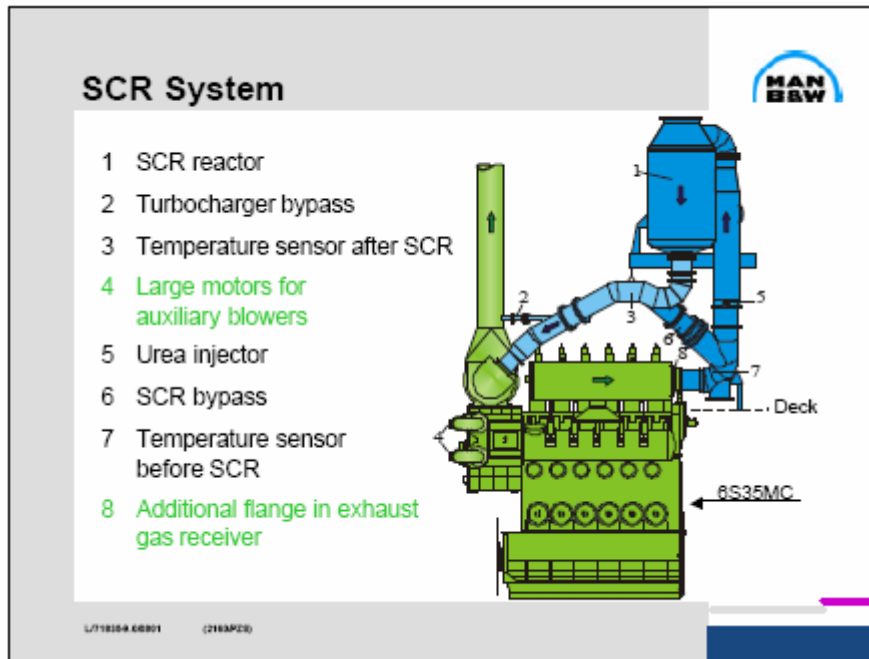
- NO<sub>x</sub>: 85-99% reduksjon
- HC: 70-90% reduksjon
- Lydstøy: 25-35 dB reduksjon (når mulig) (Katalysator kan plasseres der lyddemper vanligvis er, og tar derfor ingen ekstra plass. Lyddempingen opprettholdes siden katalysatoren har meget gode støydempingsegenskaper.

### **Kostnader SCR**

I tillegg til installasjonskostnadene kommer de største driftskostnadene til SCR-katalysatoren av ureaforbruk og utskifting av katalyselagene. Levetiden til katalysatorelementene er vanligvis 3-5 år for flytende drivstoff, og litt lenger for motorer som forbrenner gass. Ureaforbruket er omtrent 15 g/kWh med 40% urealøsning. Størrelsen på ureatank som kreves om bord er avhengig av motortype og størrelse, last-/driftsprofil og hvor ofte skipet er innom havner med urea tilgjengelig [6].



Figur 6.12. Skisse av SCR-systemet [36].



### Tiltaksbegrensninger SCR

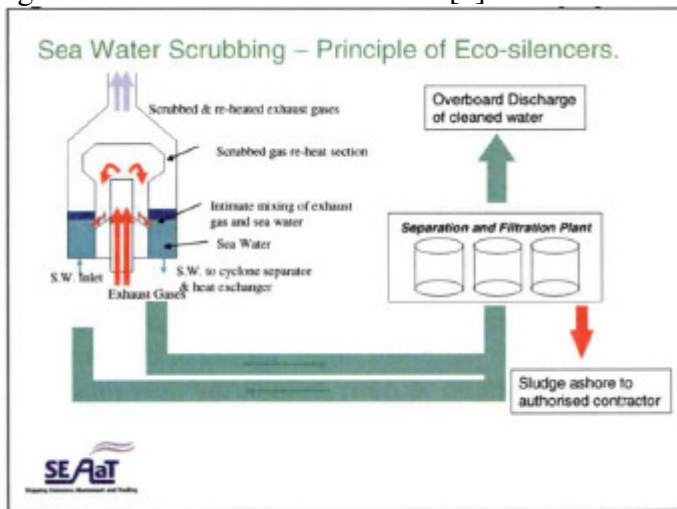
Lite aktuell metode for skip som opererer mye på lav motorlast over lengre tidsrom. Det blir stans i SCR-systemet ved lavere motorlast enn 25%. Det er også en lite aktuell metode for skip med kort seilasvarighet og med lengre opphold i havn. Det kreves også plass for urealagring og anlegg. Dette krever igjen ca 10% av drivstofftankvolum eller 25m<sup>3</sup>, noe som tilsvarer en tankbil. Man kan eventuelt bytte ut en ballasttank, men dette kan være vanskelig av flere grunner, blant annet fordi urealøsningen helst krever temperaturer over 0 °C for å sikre at urea ikke krystalliserer seg ut av løsningen (krystallisasjonspunkt: -12 °C ved 35% løsning, -0,7 °C ved 40% løsning [70]). For to-taktsmotorer blir det oppgitt mulige utfordringer med turbolader fra leverandører. Metoden i kombinasjon med tungolje generelt gjør den mindre effektiv, spesielt hvis høyt svovelinnhold. Det finnes noen eksempler med skip som går på HFO (heavy Fuel oil) med 3% svovelinnhold, men katalysator ved bruk av tungolje er egentlig ikke mulig over tid [59]. Dette gir som nevnt høyere vedlikeholdsfrekvens og eventuelt bytte av katalysator. Systemet leveres i dag ned til motorer på 500 kW.

### 6.4.2 ECO-silencers

Denne metoden er en type "Sea water scrubbing" som egentlig er utviklet for å begrense SO<sub>x</sub>-utslipp ved vasking og rensing av eksos [6]. Avgassene fra skipsmotoren blir blandet med sjøvann, og sjøvannet som nå inneholder eksos og partikler blir pumpet til et separasjons- og filtreringsanlegg ombord. Renset sjøvann blir pumpet tilbake til sjøen, mens avfallsstoff blir sendt til land for behandling. Systemet reduserer SO<sub>x</sub>-innholdet i avgassen med ca 95%, slik at drivstoff med 3% svovelinnhold som vanligvis avgir 60 kg

SO<sub>x</sub> pr tonn forbrent drivstoff, bare vil slippe ut 3 kg etter rensing. PM vil i tillegg gå ned med 80% og NO<sub>x</sub> vil reduseres med 10-20% [4]. Det fantes pr 2005 ingen operative anlegg av denne typen [6].

Figur 6.13. Skisse av Eco-silencers [4].



## 6.5 Motortekniske vurderinger

### 6.5.1 NO<sub>x</sub>-utslipp og tilgjengelig teknologi

Ved temperaturer fra ca 1600°C og oppover starter den kjemiske prosessen mellom N<sub>2</sub> og O<sub>2</sub> i forbrenningsluften som danner NO<sub>x</sub>. Mengden av produsert NO<sub>x</sub> er avhengig av prosessstemperatur og lengde. I en dieselprosess er mengden NO<sub>x</sub>-produksjon som forholdet mellom temperaturendring (temperaturstigning) og tid (forbrenningslengde). NO<sub>x</sub>-produksjonen går ned ved å senke lokal forbrenningstemperatur (spisstemperatur) og forbrenningslengde.



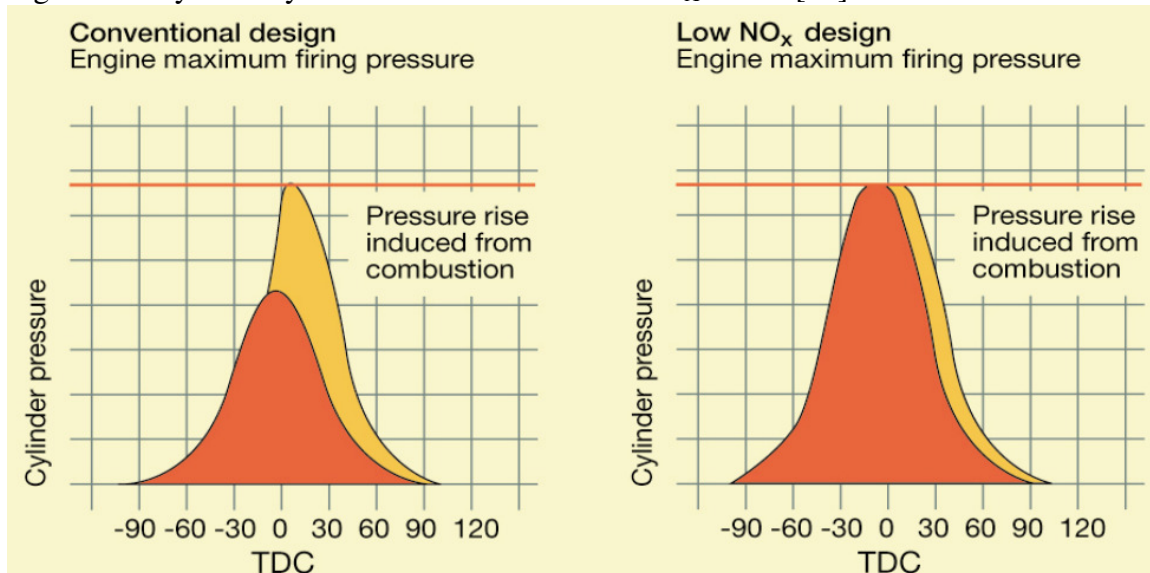
#### LavNO<sub>x</sub>-teknologi

Wärtsilä har utviklet følgende tiltak ifm. motortekniske ombygginger (MTO) som sammen gir permanent NO<sub>x</sub>-reduksjon på mellom 25-40%, og reduksjon i spesifikt brennstofforbruk på 2-7% avhengig av motortype og alder [57]:

- Høyere temperatur av forbrenningsluft når innsprøytning starter, noe som gir betydelig reduksjon av tenningsforsinkelse, dvs. kortere forbrenningstid
- Man får tilnærmet konstant trykk under forbrenningsprosessen

- Senere innsprøytningsstidspunkt (injeksjonstiming) og opp til 30% kortere innsprøytningsstid gir optimale forhold for forbrenningen med tanke på termisk virkningsgrad, og lavest mulig NO<sub>x</sub>-produksjon
- Forbedret brennstoffforstøvning med tilpasning av forbrenningsrom og dysegeometri gir bedre brennstoff- og luftblanding

Figur 6.14. Sylindertykk standard motor mot lavNO<sub>x</sub>-motor [57].



En ser av figuren at trykket i sylinderen induisert av forbrenningen, er større med lavNO<sub>x</sub>-motoren enn med den konvensjonelle. TDC betyr "top dead centre", og beskriver hvor langt stempelen er unna veivakslingen. Injeksjonstiming er vanligvis spesifisert som grader før "top dead centre", selv om noen små høyforbrenningsmotorer krever gnist like etter TDC [58].

Produksjon av Wichmannmotorene ble avsluttet i 1998. Wärtsilä utviklet oppgraderingspakker for motorene for å opprettholde og videreutvikle motorkompetansen allerede i 1992. Første prototype med lavNO<sub>x</sub>-teknologi ble installert i 1997. LavNO<sub>x</sub>-pakkene til andre Wärtsilämotorer er en naturlig videreføring av "dagens" motorteknologi til eldre motortyper.

#### Status oppgradering

Det er totalt bygget om 43 Wichmannmotorer pr. 01.02.2007, med 7 Wichmann og 2 Wärtsilä Wasa 32 i bestilling. Det er selvfølgelig et spørsmål om kapasitet og tid, men mulige oppnåelige reduksjoner i eksisterende kystflåte er på 45 000 tonn. Dette representerer 75% av forpliktelsene Norge har i henhold til Gøteborgprotokollen. Disse tallene er medregnet motorer som er eldre enn byggeår 1990. Teoretisk, ut fra 5000 h/år, kan man oppnå følgende årlige reduksjoner ved MTO[57];

- NO<sub>x</sub> 1950 tonn
- CO<sub>2</sub> 12020 tonn
- Brennstoff 3800 tonn

En lavNO<sub>x</sub>-ombygging er kostbart, men det er flere fordeler enn "bare" lavere NO<sub>x</sub>-utslipp. Noen viktige er [57];

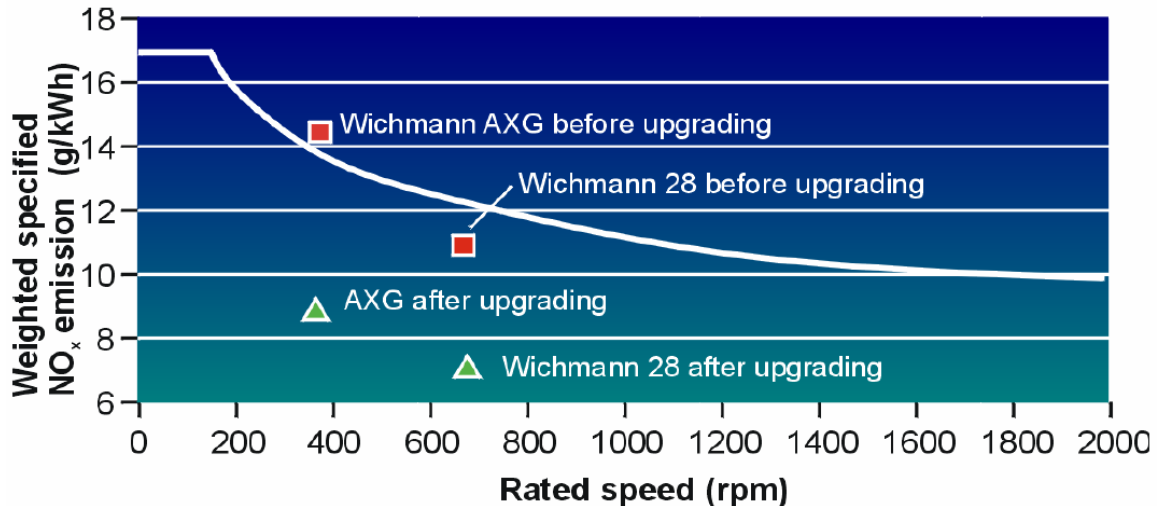
- Eldre motorer får oppdatert forbrenningsteknologi implementert
- Alle vitale hovedkomponenter blir kontrollert og overhald
- Levetiden forlenges med 10-15 år
- Man får reduksjon i årlige vedlikeholdskostnader
- De fleste motorer får redusert brennstofforbruk
- Ingen nye tilleggssystem må implementeres
- Ingen merutgifter ved drift av maskineriet etterpå
- Oppgraderingen kan gjøres i forbindelse med planlagt verkstedopphold (klassing/overhaling/docking)

Andre fordeler ved en ombygging er betydelig lavere NO<sub>x</sub>-avgifter, økt driftssikkerhet, motoren tilfredstiller IMO's krav til tillatt utslippsnivå og man kan få EIAPP-sertifikat for motor. Dette gir i tillegg økt annenhåndsverdi av fartøyene. Nedenfor følger noen mer nøyaktige eksempler enn i kapittelet om eksisterende anlegg [57].

- LavNO<sub>x</sub>-pakke for Wichmann 28
  - Nye sylindertopper (ny geometri i forbrenningskammer)
  - Nye innsprøytningdyser og dyseholdere. Åpningstrykk økes fra 250 til 720 bar
  - Nye brennstoffpumpekammer (raskere kamprofil), som gir 30% kortere innsprøytningsslengde
  - Nye innsprøytningrør
    - Reduksjoner
      - NO<sub>x</sub>: 30-40%
      - SFOC: 2-5%, der SFOC står for spesifikt brennoljeforbruk
- LavNO<sub>x</sub>-pakke for Wichmann AXA/AXAG
  - Nye stempelkroner (ny geometri i i forbrenningskammer)
  - Nye innsprøytningdyser og dyseholdere. Åpningstrykk økes fra 250 til 720 bar
  - Nye brennstoffpumpekammer (raskere kamprofil), som gir 30% kortere innsprøytningsslengde
  - Nye innsprøytningrør
  - Ny turbolader
    - Reduksjoner
      - NO<sub>x</sub>: 30-40%
      - SFOC: 4-7%
- LavNO<sub>x</sub>-pakke for Wichmann AX/AXG
  - Nye sylindreforinger og sylindredeksel
  - Nye stempelkroner

- Nytt brennstoffpumpearrangement (inkludert dyser, dyseholder, brennstoffpumper, innsprøytningsrør, kamakselhus og kamaksel)
- Nytt turboladerarrangement
  - Reduksjoner
    - NO<sub>x</sub>: 30-40%
    - SFOC: 7-10%

Figur 6.15. Etter forbedringer ser det slik ut i forhold til IMO-kurven [57]:



### Eksempel

En standard Wichmann 8v28A med ytelse på 2640 kW har utslipp av 197 g/kWh SFOC, og 12 g/kWh NO<sub>x</sub>. Gitte forutsetninger er at den går 5000 t/år ved ca. 90% last og bruker 1970 tonn drivstoff/år. Standard NO<sub>x</sub>-faktor er satt til 70. Etter ombygging går SFOC ned til 191 g/kWh og NO<sub>x</sub> ned til 9,5 g/kWh. Drivstofforbruket går da ned til 1910 tonn/år. Kalkulert NO<sub>x</sub>-faktor.  $(9,5 \times 1000) / 191 = 50$ . Enkel utregning gir da en spart differanse på 636 000 NOK/år.

Wärtsilä kommer snart med et nytt system som kalles "wetpack". Dette er fukting av ladeluft, og er et system tilsvarende HAM [57].

## 6.5.2 Andre motortekniske vurderinger av interesse

### Gass

Gassmotorer kan benyttes til både mekanisk og elektrisk fremdrift og har en elektrisk virkningsgrad på ca. 46%. Å benytte gassmotorer er i dag den beste og forsåvidt eneste måten å virkelig redusere CO<sub>2</sub>-utslipp på, bortsett fra ved bruk av brenselcelleteknologi [59]. Dette er fortsatt et lite stykke frem i tid. Det er klart andre tiltak som optimalisering av skrogdesign, propelldesign, diverse motorjusteringer og optimalisering av driftsprofil kan begrense mengden CO<sub>2</sub> noe, men bare en brøkdel av hva gassteknologi har muligheten til.

**Diesel/Gass**

En diesel til gass-ombygging er mulig men det involverer mye arbeid, og er derfor ikke kostnadmessig forsvarlig. Man må mellom annet bytte stempel, sylinderdeksel og avgasssystemet for å nevne noe. Det er da billigere å bytte motor helt i de fleste tilfeller. En gassmotor egner seg forøvrig godt til marint bruk da den har relativt mager forbrenning (lean burn).

Man har også Dual-fuel motorer som går på både diesel og gass. Dette konseptet fungerer bra, men er ikke egnet til store forskjeller i lastvirkning, dvs. det fungerer best ved tilnærmet 100% lastkjøring [59]. Dual-fuel motorer er bygget over samme lest som dieselmotorer. Ved dual fuel-drift substitueres en del av dieseloljen med et annet drivstoff, som oftest biogass eller naturgass. Prinsippet krever på grunn av sin enkelthet og oppbygning over solide dieselmotorer minimalt med service, har god driftssikkerhet og lang levetid [60].

Det skjer mye med gassteknologi i Norge om dagen, og tilgjengelig mengde LNG øker. Små tankskip på gass er hensiktsmessig langs kysten, og maritim bruk gir synergieffekter, f.eks. til kollektivtransport, busser o.l. Foreløpig er det planlagt LNG-terminaler helt opp til vestfjorden (se figur 6.16), og alt tyder på at det vil bli flere etter hvert. LNG er stabilt og inneholder i snitt 95% metan. Gassen er ikke sensitiv med tanke på maskineri og gassprisen er konkurransedyktig med diesel [61]. (Kan være billigere nærme produksjonsanlegg).

### Sikkerhetsaspekter

Sikkerhet er svært viktig for gassdistribusjon da metan er brennbart blandet med 5-15% luft [61]. Gass lagres derfor aldri innendørs, og lastebiler som frakter LNG kjører aldri i tunnel ved kø. Man skal og være forsiktig ved lekkasjer, da LNG stiger opp når den er varmere enn -80°C.

### Miljø

Gassdrift er først og fremst miljøvennlig sammenlignet med dieseldrift. For de gamle og nye fergene som trafikkerer E-39 mellom Bergen og Stavanger er utslippskarakteristikken som vist i tabellen under.

Tabell 6.7. Utslipp ved gass-kontra dieseldrift (gram pr. kW/h) [61].

Stoff	Gass	Diesel
NO <sub>x</sub>	1,8	11,5
CO <sub>2</sub>	450	600
SO <sub>2</sub>	0	0,2

Når det gjelder CO<sub>2</sub>, er det som nevnt vanskelig å redusere noe uten å bruke en energikilde som ikke inneholder karbonatomer. Reaksjonsligningen for forbrenningen av metangass er slik;

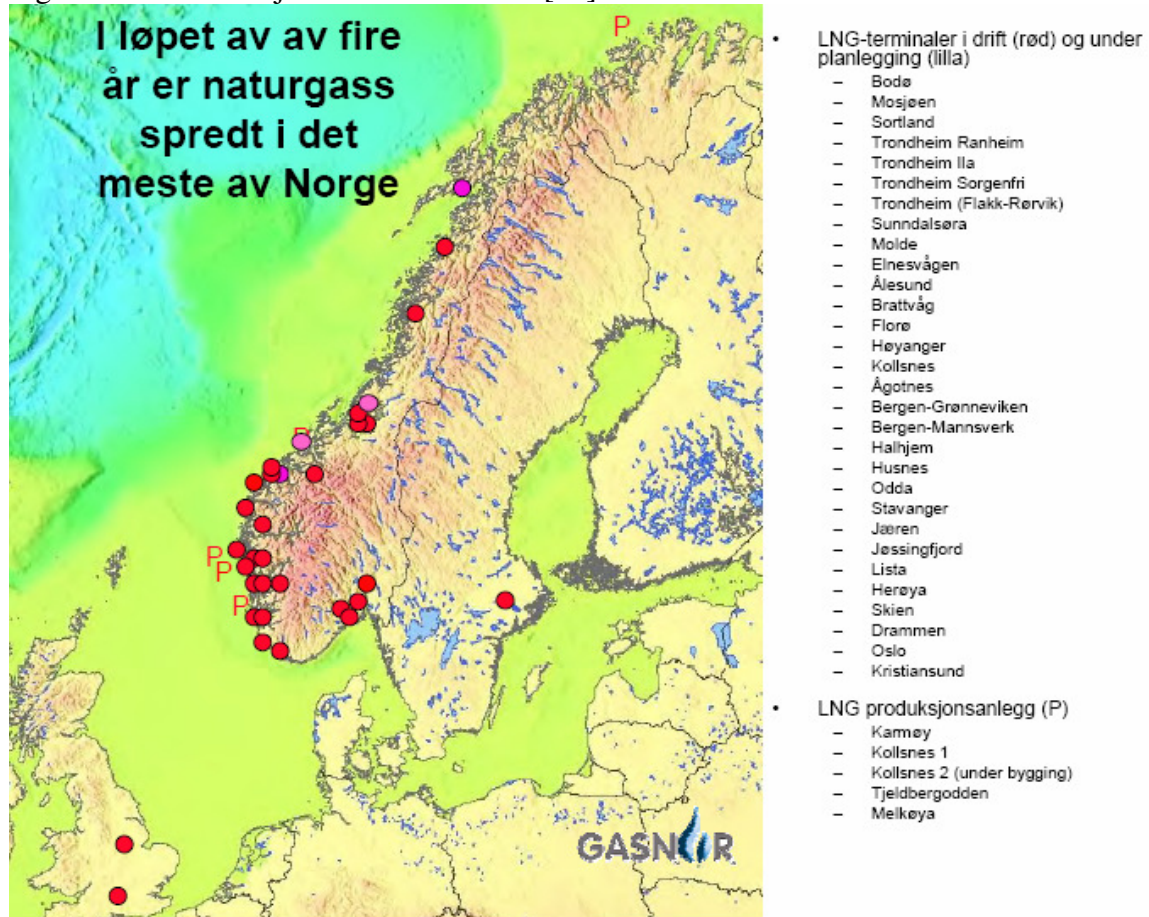


Metan og oksygen reagerer, og danner avfallsstoffene karbondioksid og vann.

Tabell 6.8. Tilgjengelig mengde LNG [61].

• 1998	Tjeldbergodden Luftgassfabrikk	12.000 årstonn
• 2003	Gasnor Snurrevarden	20.000 årstonn
• 2003	Gasnor Kollsnes	40.000 årstonn
• 2007	Gasnor Kollsnes	80.000 årstonn
SUM		152.000 årstonn
Tilsvarende		210 millioner liter olje

Figur 6.16. Distribusjonsnett til Gasnor [61].



## 6.6 Økonomiske betraktninger

Det er gitt standard forutsetninger for tekniske beregninger dersom mer nøyaktige data fra eventuell produsent av slikt utstyr ikke foreligger [45].

### 6.6.1 Motorteknisk ombygging

Man regner med en investeringskostnad på 450 kr/kW. Dette inkluderer komponent- og installasjonskostnader, men ikke offhire siden arbeidet forutsettes utført i tilknytning til annet vedlikehold. Driftsutgifter er satt til 0 kr/kg NO<sub>x</sub>. Noen tiltak kan resultere i økt virkningsgrad og dermed lavere drivstoffkostnader, mens andre tiltak kan resultere i redusert virkningsgrad. NO<sub>x</sub>-reduksjon i snitt er på 20%, men kan variere i området 10-30% avhengig av individuelle komponenter [45]. Slik denne oppgaven er definert teller HAM og EGR som en motorteknisk ombygging, og her kan en oppnå henholdsvis 40 og 50% reduksjon. Investerings- og installasjonskostnadene for HAM er på nivå med eller noe høyere enn for SCR. Man har derimot ingen kontinuerlige driftskostnader [43]. Hva



som egentlig er den dyreste løsningen av SCR og HAM er det egentlig ingen fasit på, siden dette i praksis varierer i hvert tilfelle.

### 6.6.2 Tiltak basert på vanntilførsel

Det er begrensede erfaringsdata tilgjengelig for tiltak som baseres på vann, men HAM er bevist som metoden med størst reduksjonspotensiale. HSD har testet et emulsjonssystem levert av Motorconsult AS på to av sine fartøyer. Det er målt reduserte NO<sub>x</sub>-utslipp som varierer i betydelig grad med motorbelastning og andre forhold i maskinen. I disse målingene fikk man for det ene skipet vektet utslippsreduksjon på 29% omregnet til en standard driftsprofil (ISO-profil). For noen skip er det også målt reduksjoner i det spesifikke brennstofforbruket. Spesifikke kostnader (kapital og drift) varierer med motorstørrelse og er satt til 3-4 kr/kg NO<sub>x</sub> for et anlegg på 5000 kW [45]. Det kan nevnes at for vannemulsjon ligger reduksjon av NO<sub>x</sub> på rundt 20-25%. Det har vist seg at investerings- og installasjonskostnadene for et anlegg i størrelsesorden 3 MW ligger på 0,5-1 mill. NOK. Fordelen er at det kan installeres under normal drift. Driftskostnaden for eventuell emulgator ved vannemulsjon ligger på ca. 0,3 kr/kg NO<sub>x</sub> (For SCR minst 4,5 kr/kg NO<sub>x</sub>) [43].

### 6.6.3 Selektiv katalytisk reduksjon (SCR)

Man regner med en investeringskostnad på 780 kr/kW. Leverandører oppgir kostnader inklusiv installasjon og katalysator i området 300-600 kr/kW, men som ved MTO inkluderer det ikke ekstra offhire. Installasjon ca. 2 uker minus tid til andre parallelle verkstedaktiviteter [43]. Som en tilnærming kan man anta snittkostnader på 390 kr/kW som ganges med 2 for å kompensere for offhire. Definert på en annen måte ligger tiltakskost for SCR på ca. 45 kr/kg NO<sub>x</sub> [67]. Driftsutgiftene er satt til 0 kr/kg NO<sub>x</sub> for katalysator, og 5 kr/kg NO<sub>x</sub> for ureaforbruk. Katalysatorens levetid kan variere fra 4 år (vanlig garantiperiode) til 10 år avhengig av type drivstoff som benyttes. Høyt svovelinnhold i bunkers reduserer levetiden. For denne beregningsmodellen er kostnaden i investeringen gjort ut fra antagelsen at den har en levetid fra til 2015, og da kan avskrives over samme periode som annet SCR-utstyr. Ureaforbruket anslås til ca. 1,5 kg(l)/kg NO<sub>x</sub> (= 75-150 l/tonn drivstoff) til en pris av 3,30 kr/kg urea (1500 kr/tonn hos leverandører i Sverige [43]). Transportkostnad blir utslagsgivende med priser på 3000-7000 kr/tonn oppgitt til nordvestlandet og nord-Norge. NO<sub>x</sub>-reduksjon i snitt er på 80%, men kan være så mye som 95%. Bakdelen med SCR er at systemet må kuttes ved lavlastkjøring når eksosgasstemperaturen faller under ca. 280°C slik at gjennomsnittlig reduksjon for en standard driftsprofil (ISO-profil) vil være ca. 80% [45].

## 7 Erfaringer fra tiltak

### 7.1 Design, nybygg, eksisterende anlegg

#### 7.1.1 Erfaring fra NO<sub>x</sub>-målinger

M/F Stavanger (ferge)

Dette relativt nye skipet har 4 stk. MTU 12V med et årlig forbruk på ca. 4000 tonn MDO. Sjablongfaktor for dette skipet er satt til 55 kg NO<sub>x</sub>/tonn drivstoff. Målinger gjort av DNV på to motorer ga utslippsfaktor på henholdsvis 36 og 37. Målingene ga i dette tilfellet et "spart" utslipp på ca. 72 tonn drivstoff (dette regnes som 55-37 kg NO<sub>x</sub>/tonn drivstoff x årlig forbruk / 1000), omregnet til 1.080.000 NOK pr.år. For dette skipet er EIAPP-verdien (ref. sammenligning av EIAPP-verdi og kildespesifikk faktor i starten av kapittelet) 9,4 g/kWh, som tilsvarer 47 kg/tonn drivstoff eller 600.000 NOK pr. år [44].

Bilde 7.1. Fergen M/F Stavanger [44].



M/F Rennesøy

Dette skipet har 2 stk. Bergen KRMB 6 med et årlig forbruk på ca. 1600 tonn MDO. Sjablongfaktor for dette skipet er satt til 70 kg NO<sub>x</sub>/tonn drivstoff. Målinger gjort på begge motorer ga utslippsfaktor på 43. Målingene ga her et "spart" utslipp på ca. 43 tonn, eller ca. 650.000 NOK pr. år [44].

Bilde 7.2. Fergen M/F Rennesøy [44].



#### M/F Bodø

Denne fergen har installert 4 stk. MTU med et årlig forbruk på ca. 2500 tonn MDO. Sjablongfaktor for dette skipet er satt til 55 kg NO<sub>x</sub>/tonn drivstoff. Målinger på to motorer ga utslippsfaktor på henholdsvis 36 og 45. Målingene ga her spart utslipp på ca. 25 tonn, omregnet til ca. 375.000 NOK pr. år, basert på høyeste faktor [44].

Bilde 7.3. M/F Bodø [44].



For å sammenligne urettferdigheten mellom avgiftsregimene på land og til sjøs kan man dra inn sjablongfaktoren gitt for jernbanekjøretøy. NSB's diesellokomotiv Di.4 fra 1980 med motor på 2450 kW v/900 RPM er gitt en sjablongfaktor på 47 kg NO<sub>x</sub>/tonn diesel [44]. I en skipsinstallasjon ville faktoren vært 70, det vil si 49% høyere.

### 7.1.2 Motorombygging

44 riksvegferjer har Wichmann totaktsmotorer, hvorav 23 er lav-NO<sub>x</sub> ombygd så langt (Mars 2007). 1 Caterpillar ble ombygd høsten 2006. Ved motorombygging gjør man

endringer for å redusere maksimumstemperatur i forbrenningskammer uten at virkningsgraden reduseres. Reduksjonspotensialet for en gitt motor er avhengig av [44];

- Motortype
- Grad av ombyggingstiltak
- Teknisk stand før ombygging

Motorombygging har hittil vært et tema for Wichmann (Wärtsila Norway). For denne leverandøren er 28-serien den nyeste modellen. Det finnes ca. 100 stk. i det norske markedet og ombygging innbefatter nye sylindrerlokk, kammer, innsprøytningsrør og dyser. Ombyggingskostnaden er satt til 800.000-1.200.000 NOK [44]. Man har og en eldre generasjon motorer fra Wichmann, AX og AXA, som ble produsert så langt tilbake som tidlig på 70-tallet. Det finnes ca. 200 stk. i Norge og ombygging innbefatter nye foringer, sylindrerlokk, turbo og innsprøytningsystem. Ombyggingen koster her i området 800.000-3.000.000 NOK avhengig av alder og type [44]. Generelt gjelder at jo eldre motor, jo dyrere er det å bygge om.

#### Bjørnsund

Denne fergen har en Wichmann 6AXA totakter som yter 1324 kW v/375 RPM. Skipet ble levert i 1979 og NO<sub>x</sub>-ombygd i 1999. Faktoren før ombygging var 71, sjablong 70 og etter ombygging 53. Et årlig forbruk på 850 tonn drivstoff ga en besparelse på 15 tonn NO<sub>x</sub>, noe som tilsvarer ca. 230.000 NOK i året. Vektet NO<sub>x</sub>-utslipp er i dette tilfellet 11,4 g/kWh, noe som er 83% av IMO-kravet, og vektet spesifikt forbruk er her 217 g/kWh [44].

Bilde 7.4. Fergen Bjørnsund [44].



#### Bastø 2

Denne fergen har en Wichmann 12V28B som yter 3600 kW v/365 RPM. Skipet ble levert i 1997 med en utslippsfaktor på 58. Motoren ble NO<sub>x</sub>-ombygd i 1999, og avgassmåling utført av Marintek i 2002 ga en ny utslippsfaktor på 48. Dette er ca. 81% av IMO-kravet [44]. Besparelsen ved et årlig forbruk på 2500 tonn drivstoff ble da ca. 25 tonn NO<sub>x</sub>, noe som tilsvarer ca. 375.000 NOK pr. år.

Bilde 7.5. Fergen Bastø 2 [44].



### Sigrid

Fergen har en Caterpillar 3606 som yter 1475 kW v/900 RPM. Skipet ble levert i 1992, og ombygd med ny turbo og ladeluftkjøler i 2006. Faktoren var før ombygging 91, mens sjablomg lå på 70. Etter ombygging var faktoren 54, og innenfor IMO-kravet. Et årlig forbruk av drivstoff på 1000 tonn ga en besparelse på ca. 30 tonn NO<sub>x</sub>, noe som tilsvarer ca. 255.000 NOK i året. Tiltakskost for dette prosjektet er ca. 7 kr/kg basert på annuitet (10 år og 7% rente). "Pon Power" har estimert at spesifikt forbruk vil stige med 4,1%. Vektet NO<sub>x</sub>-utslipp er i dette tilfellet 11,5 g/kWh, og vektet spesifikt forbruk er her 214 g/kWh [44].

Bilde 7.6 Fergen Sigrid [44].



### 7.1.3 Motorbytte/Nybygg

En ombygging eller bytte av motor kan ligge på så mye som 10 mill. NOK [44]. Dette er en stor investering, men NO<sub>x</sub>-faktoren på en gammel og ny motor kan variere med så mye som 30% i noen tilfeller. Dette gjelder motorer i området 1800 kW avhengig av turtall. Nyere motorer ligger også godt innenfor IMO-kravet, og ofte under 80% av dette [44].

## Wärtsila

Wärtsila har utviklet ny motorteknologi i form av en to-taktsmotor på hele 80.080 kW, noe som tilsvarer 108.920 hK ved 102 rpm. Denne store motoren på 2300 tonn og 14 sylindere vil i forhold til ytelse være svært miljøvennlig i form av lavt drivstofforbruk og gi mindre utslipp av skadelige komponenter på grunn av det elektroniske innsprøytningsystemet [79]. MAN B&W utvikler også lignende løsninger.

### 7.1.4 Gassdrift

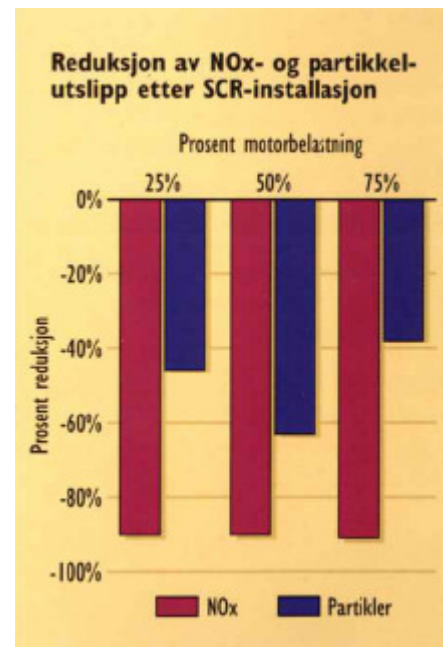
For å skjønne det store reduksjonspotensialet som ligger i gassdrift er det interessant å sammenligne de ordinære fergene med ferger på gassdrift. Norges første gassferge, Glutra, har en utslippsfaktor (NO<sub>x</sub>-faktor) på 11 og et vektet NO<sub>x</sub>-utslipp på 2,3 g/kWh til tross for et vektet spesifikt forbruk på 218 g/kWh [44]. Den helt nye gassfergen ”Bergensfjord”, som forøvrig har motorytelse 4 ganger større enn ”Glutra”, har en utslippsfaktor på 3,6. Vektet NO<sub>x</sub>-utslipp er her nede i 0,69 g/kWh (lastsyklus E2), og vektet spesifikt forbruk er 191 g/kWh [44]. Med de nye fergene får E-39 sambandet en besparelse på 650 tonn NO<sub>x</sub> ved overgang til LNG-drift. Hadde man bygget ut alle de største fergesambandene i Norge med gassdrift, hadde det gitt en total besparelse på 33% av totalt utslipp i Norge i 2006.

### 7.1.5 SCR

Hertug Skule (ferge)

Det finnes flere eksempler på bruk av SCR-systemet. Fergen ”Hertug Skule” var et forsøksprosjekt mellom SFT, Veidirektoratet og Sjøfartsdirektoratet våren 1996. Skipet hadde en Normo LDMC 8 som yter 920 kW v/ 750 RPM, og det fikk installert et SINO<sub>x</sub>-SCR anlegg fra Siemens som besto av katalysator, tilførselssystem for reduksjonsmiddel og et kontroll- og overvåkningsystem. Reduksjonsmiddelet var en vannløsning av urea, dvs. 35% urea og 65% avionisert vann. (32,5% løsning har frysepunkt på -11°C [46]). Etter 2300 timers drift viste anlegget stabile driftskarakteristikker og reduksjon av NO<sub>x</sub> på 90% så langt [44].

I Hertug Skule kostet det ca. 10 kr å uskadeliggjøre ett kilo NO<sub>x</sub> ved garantert levetid for katalysatormassen på 20.000 timer. Selv en halvering av Reduktan™ pris evt. en dobling av katalysatorens levetid reduserte ikke totalkostnaden med mer enn ca. 20%. Kostnaden



Figur 7.1. Reduksjon etter driftsprofil [70]

forblir i området 8-11 kr/kg. Forbruket av Reduktan<sup>TM</sup> var i dette prosjektet 5-10% av drivstofforbruket [70].

SCR-systemet på dette skipet fungerte overraskende bra, også ved lav last som vist i grafen til høyre. Drivstoffet som ble brukt på fergen var marin gassolje med 0,05% svovel. Uten systemet ville Hertug Skule sluppet ut 60.000 kg NO<sub>x</sub>-gass hvert år. Dette tilsvarer 2 fulle jernbanevogner med konsentrert salpetersyre [70].

#### Nordfjord (ferge)

Skipet har en Volvo Penta D49A MT som yter 1040 kW v/1650 RPM. Det ble levert i desember 2001 og fikk målt en utslippsfaktor på 42 uten SCR. Her var vektet NO<sub>x</sub>-utslipp 8,9 g/kWh og spesifikt forbruk 215 g/kWh. Et SCR-anlegg skulle teoretisk etter driftsprofilen i ISO 8178 gi en utslippsfaktor på 14. Den reelle driftsprofilen tilsier derimot en faktor på 30 [44]. Driftsmønsteret halverer effekten av tiltaket. Dette er en utfordring ved dokumentasjon av avgiftsgrunnlaget for fartøy med slike installasjoner. For dette skipet gir et totalt oljeforbruk på 560 tonn en besparelse på 6,7 tonn NO<sub>x</sub>, som omregnet gir 100.800 NOK i året. En av de største utfordringene ved et slikt anlegg er kostnadene ved ureakjøp. Gjennomsnittsforkonsumet av urea er 5,2% av drivstofforbruket. Med et årsforbruk på 505 tonn, gir dette et årsforbruk av urea på 26,3 tonn. Pris urea (35% urea og 65% avionisert vann) er i dette tilfellet 5000 kr/tonn. Dermed får man en årskostnad av urea på 131.300 NOK. Dette anlegget får dermed et tap på 30.500 NOK i året [44]. Yara opplyser imidlertid at prisen på urea mellom annet er avhengig av volum, avstand, tilgjengelighet, infrastruktur og skipets liggetid [46], og denne kan med andre ord vippe et SCR-anlegg i lønnsom eller ulønnsom retning på sikt.

Bilde 7.7. Fergen Nordfjord [44].



#### Vannemulsjon

Bruk av eksisterende drivstoffpumper begrenser maksimal vanntilsetning til ca. 10-15%, noe som svarer til 10-15% reduksjon i NO<sub>x</sub>-utslipp. Vannemulgert diesel kan leveres i stabil form eller produseres og injiseres via injeksjonsrigg ombord [44].

## 7.1.6 HAM

Det ble testet et HAM-anlegg på en hjelpemotor på M/F Rennesøy i april 1999. Dette var en Scania på 316 kw, og det spesifikke NO<sub>x</sub>-utslippet ble målt redusert fra 8,5 til 2,8 g/kWh (67%). Prosjektet her ble ikke videreført siden det kan virke upraktisk å tilpasse eksisterende fartøy [44]. Vann som ble tilsatt ladeluften ga tetting av ladeluftkjøleren da avsaltingsenheten i systemet ikke fungerte tilfredsstillende. Salt/rustflak tettet luftkjølerne på motoren, noe som førte til svart røyk. Det ble også gjort forsøk med ferskvann direkte, men regulering av vannmengde fungerte ikke, noe som førte til nødvendig totaloverhaling [44].

## 7.1.7 NO<sub>x</sub>-reduksjon med membraner

Det er gjort noen små forsøk med membraner. Disse membranene nitrogenanriker ladelufta ved å redusere O<sub>2</sub>-innholdet, noe som er en parallell til EGR-systemet. Firmaet Ecoxy AS i Trondheim leverer disse membranene. Ecoxy AS er forøvrig firmaet som fastsatte kilde spesifikk utslippsfaktor for KGJS-skipet Bornholm Cement. Utslippsfaktoren i det aktuelle forsøket gikk ned fra 67 til 63 [44]. Man fant ut at membranpakken var underdimensjonert for motoren og det ble et problem at eksostemperaturen steg, slik at det ble vanskelig å kjøre på høy last.

Erfaring viser at miljøfokus og styring gir;

- Bedre miljøprofil og reduserte utslipp
- Bedre dokumentasjonsgrunnlag
- Identifikasjon av reduksjonspotensialet
- Økt design- og teknologiforståelse

Man skal huske på at energiforbruk er kvantitet i forhold til pris, mens energiverdi er kvalitet i forhold til pris.

## 7.2 Mer om HAM og SCR

### 7.2.1 HAM (Humid Air Motor)

#### 7.2.1.1 Patentet-Metode for å tilføre vanndamp til inntaksluften til en forbrenningsmotor, og innretning for dette

Patentet på dette systemet ble levert 16. januar 1995 i Sverige. Oppfinnerne er Per Rosén og Lars-Ola Olsson [71]. Prinsippet med å tilføre vanndamp til inntaksluften i en motor er kjent. Dette er spesielt aktualisert i forbrenningsmotorer med turbolader, der

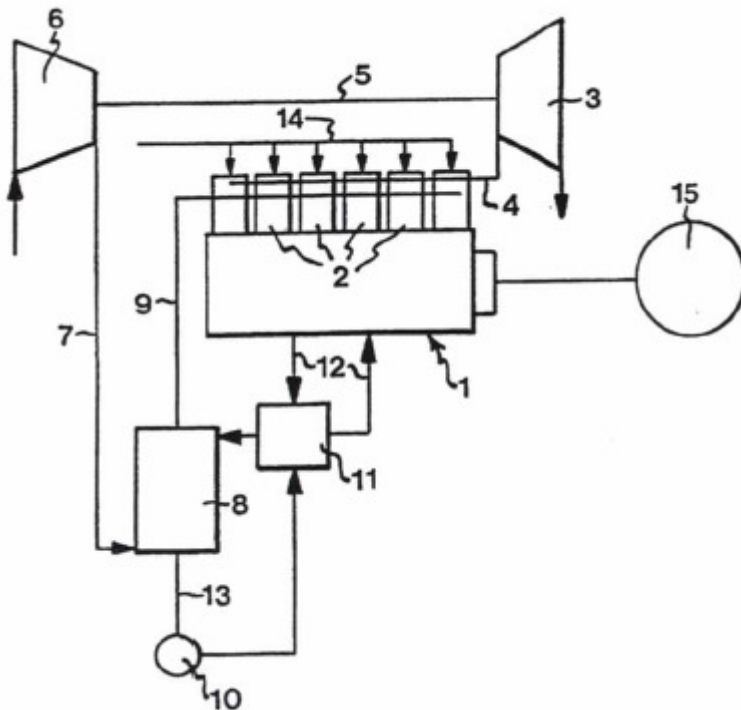


befuktning av inntaksluften mer enn noe annet påvirker utslippet av nitrogenoksider. Dette er av spesiell interesse for motorer som kjører med overskuddsluft, og derfor ikke kan benytte seg av tre-veis katalysatorer. Systemet fungerer på samme måte når det benyttes til å kjøre motorer som går på alkohol med fordampet drivstoff. Innretningen som brukes for å supplere vanndamp til inntaksluften (patentnummer US-4, 632, 067), lager vanndamp ved å varme opp vann direkte med et varmeelement. Dampen blir deretter mikset sammen med den "vanlige" inntaksluften til motoren. Teknikken med å fordampe vann krever relativt store mengder høyeffektiv energi. Et viktig punkt i denne prosessen er at reguleringen av tilført vanndamp er vanskelig, siden dampen må tilføres i velbalansert mengde pr. liter luft for optimal effekt. På grunn av denne balanseringen kan strømningsmengden av inntaksluft variere mye over kortere perioder. Dette har vært et problem ved tidligere typer av patentet. En viktig sak med dette patentet har vært å finne en metode for å supplere systemet med vanndamp i riktige mengder, og en enhet for akkurat denne oppgaven. Dette skal kunne eliminere variasjon i strømmingen til inntaksluften og føre til drivstoffeffektivitet. Ved direkte fordampning av vannet i inntaksluften, er det mulig å oppnå selvregulering av mengden damp i inntaksluften. Det er derfor ikke nødvendig med separat regulering av mengden luft til inntaket. Et annet mål med patentet har vært å fange opp den energien som går tapt i forbrenningsprosessen [71].

### **Virkemåte**

Figuren under illustrerer en forbrenningsmotor 1 med seks sylindere 2. Motoren er en turboladet dieselmotor, og alle viktige deler er nummerert for å lette forklaringen. Turboladeren omfatter en turbin 3 som er koblet til avgassiden av motoren 1 via en eksosrørføring 4. Turbinen er også koblet til en aksling 5 som driver en kompressor 6. Kompressoren komprimerer luften til motoren på inntakssiden som går via en luftføring 7. Mellom kompressor 6 og motoren 1 er det en befuktningseenhet 8, som i dette tilfellet er et befuktningstårn 8. Denne er koblet til for å tilføre vanndamp til inntaksluften før den går inn i motoren via en annen luftføring 9. Vanndampen er produsert fra vann som er samlet i en tank 10, via en varmeveksler 11 til befuktningstårnet 8. I varmeveksleren blir vannet varmet opp av kjølevannet til motoren som sirkulerer forbi varmeveksleren i en kanal 12. Vannet ledes inn i øvre del av befuktningstårnet mens luften ledes inn i nedre del. Vannet blir spredd i tårnet via dyser som får det til å falle ned som regntåke. Vannet blir samlet opp på bunnen av tårnet og føres til tanken 10 via en kanal 13. Samtidig blir luft under trykk ført til befuktningstårnet og strømmer opp og ut gjennom den andre luftføringen 9. I befuktningstårnet oppstår det kontakt mellom luften og vannet mens de strømmer i forskjellige retninger. Drivstoff blir tilført motoren via et dysesystem og ledninger 14 og motoren er koblet til en generator 15 [71].

Figur 7.1. Turboladet dieselmotor med befuktningstårn [71].



### Tilførsel av vanndamp

Inntaksluften blir komprimert av kompressoren som via akslingen er drevet av turbinen, som igjen er drevet av eksosgassene til motoren. Den komprimerte, og derfor oppvarmede inntaksluften, blir ført til de lavere delene av befuktningstårnet. Der det er mulig skal luften inn over vannet som samles opp i bunnen av tårnet. Vann blir samlet opp fra lagringstanken 10 og blir ført inn i den øvre delen av befuktningstårnet etter først å ha blitt varmet opp i varmeveksleren 11. I tårnet 8 blir vannet omgjort til vanntåke ved hjelp av dyser, og faller ned i mellom og motsatt retning av inntaksluften som er på vei opp. Deler av vannet fordamper i denne prosessen og blir med inntaksluften ut av befuktningstårnet 8 og inn i forbrenningskammeret på motoren 1. En signifikant større strøm av vann blir tilført systemet i forhold til hva som fordampes. Dette betyr at fordampningsenergien faktisk blir tatt fra vannet [71]. Dette er bedre kjent som endring i entalpi fra termodynamikken. Når fordampning av vann skjer på denne måten i en gassblanding, skjer fordampningen ved mye lavere temperaturer enn når bare vann er til stede. I forhold til trykk og vannmengde tilsier metoden at fordampning, i nærheten av der luftinntaket er på tårnet, vil skje ved veldig lave temperaturer. Denne fordampningstemperaturen vil stige ettersom man beveger seg oppover i tårnet, og fuktmengden samt det tilhørende deltrykket vil øke. Når en kraftig fordampning som den beskrevet ovenfor oppstår ved en relativt lav temperatur, muliggjør det bruken av lav-effektivitetsenergi i prosessen. Spillvarme fra motoren finnes i overflod, og man kan nytte varme fra både kjølevannet og eksosgassene. Både kjølevann som beskrevet før, og eksosgass, kan benyttes til oppvarming av vannet før det kommer inn i befuktningstårnet [71].

Metoden som er beskrevet her, er bare et eksempel på hvordan man kan benytte seg av systemet. Flere modifikasjoner er mulige innenfor oppfinnelsens virkemåte. For eksempel kan man benytte seg av enhver væske som kan fordampes i prosessen i stedet for vann. Eller man kan bytte ut dysene som sprer vannet inne i befuktningseenheten med et arrangement som fører vannet på en annen måte nedover i et horisontalt/vertikalt tårn [71].

### 7.2.1.2 M/S Mariella

HAM-systemet ombord den finske fergen M/S Mariella er et av de beste eksemplene på en vellykket ombygging til HAM i drift i dag. Skipet er 177 meter langt, 37.860 BT og går mellom Stockholm (Sverige) og Helsinki (Finland). Skipet har fire 6.6 MW 4-takts dieselmotorer, og ble originalt bygget uten HAM i 1985. Det ble som et svar på svenske myndigheters miljøpolitikk ombygget med befuktete marine dieselmotorer i 1999 [72]. En av hovedgrunnene til luftforurensning i Skandinavia er utslipp fra skip, spesielt NO<sub>x</sub>.

#### Skipet og motorer

##### M/S Mariella

- Bygget: 1985, Wärtsilä, Finland
- Isklasse: IA Super
- BT/NT: 37.860/23.644
- Lengde: 177 m
- Bredde: 29 m
- Dybde: 6.7 m
- Hastighet: 22 knop
- HVM: 4 x Wärtsilä SEMT Pielstick 12PC2.6-26.64 MW
- Passasjerer: 2500
- Biler/trailer: 400/60
- Stabilisator installert

Bilde 7.8. M/S Mariella, Viking Line [73].



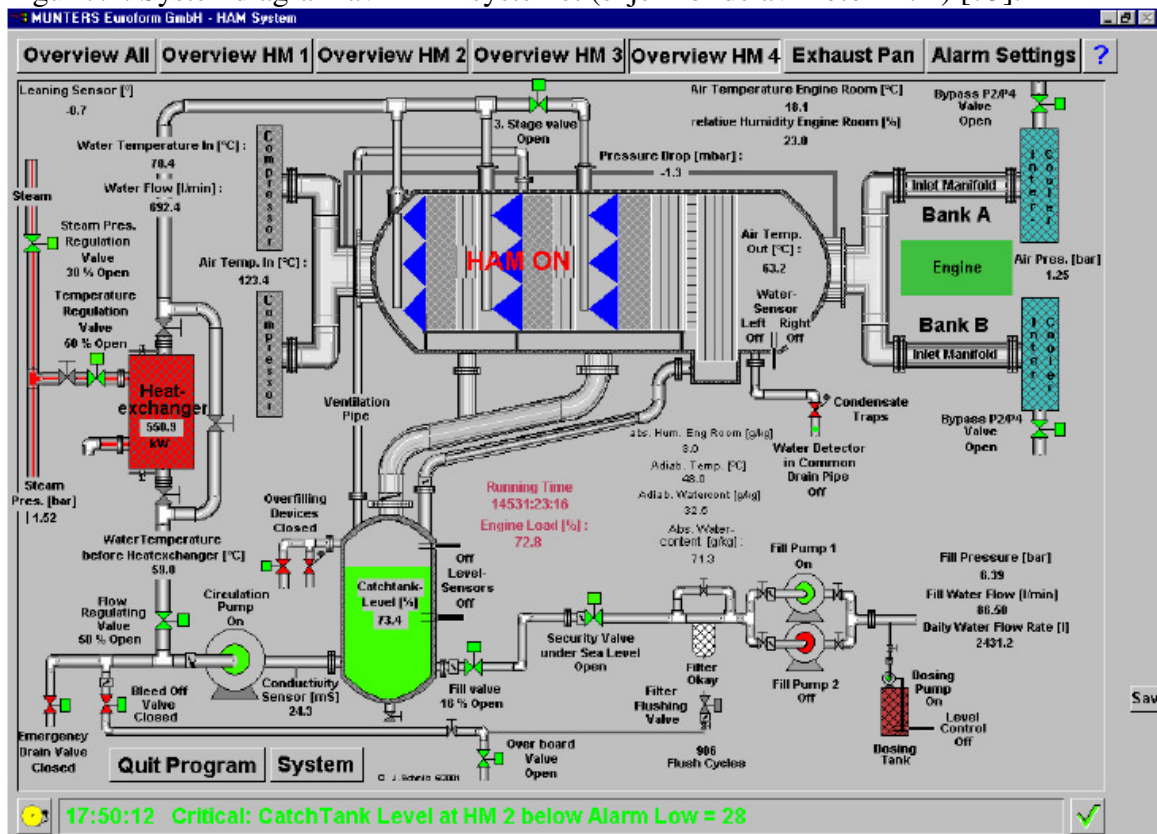
## S.M.E.T Pielstick 12PC2.6

- Turboladet og etterkjølt 4-takters diesel
- Antall sylindere: 12
- Effekt: 6.6 MW
- Hastighet: 500-520 rpm
- Sylinder: 400 mm
- Slaglengde: 460 mm

## Systemoversikt

Figuren under viser et diagram av HAM-systemet installert på motor nr. 4. Det består hovedsakelig av et horisontalt befuktningstårn og "fill-and-catch" tankmodul. Befuktningstårnet sitter mellom turboladerens kompressor og motorens inntaksmanifol, men tårnets plassering er egentlig rett over motoren [72].

Figur 7.2. Systemdiagram av HAM-systemet (skjerm bilde av motor nr. 4) [73].



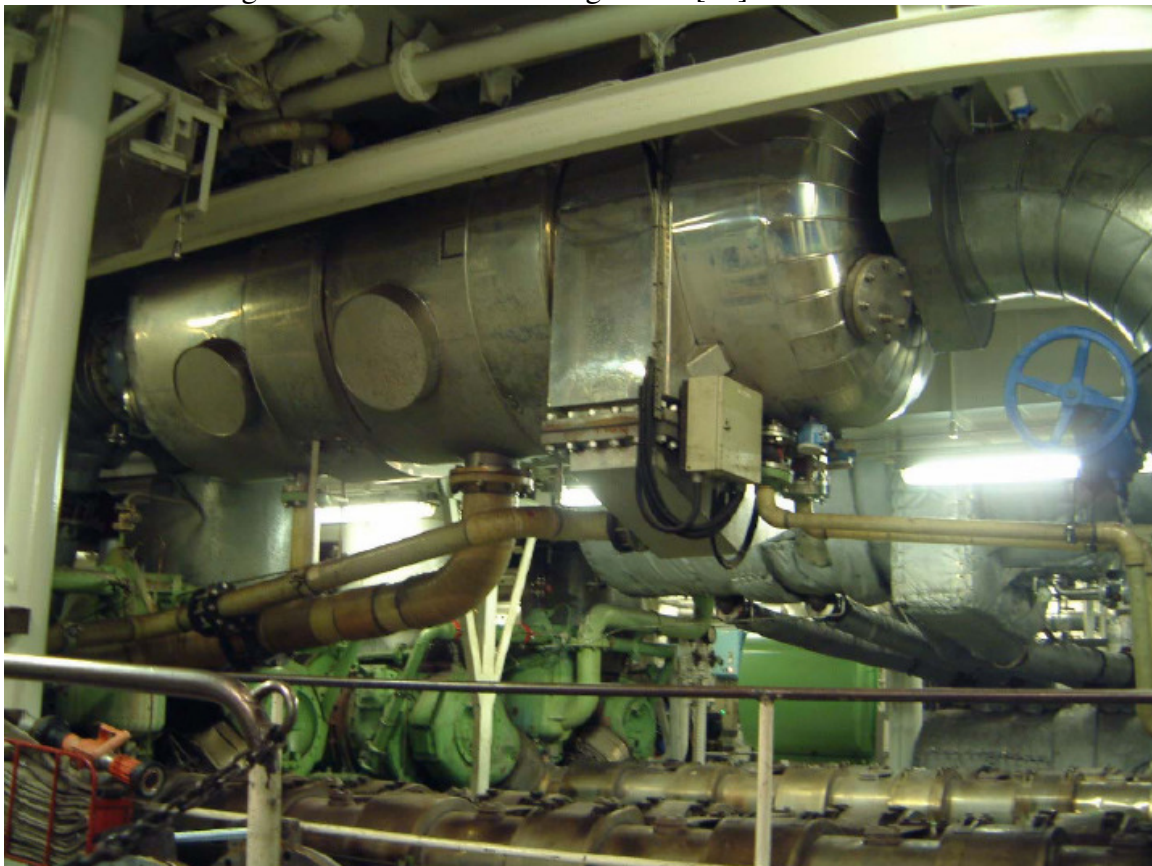
Sjøvann føres til lagringstanken (fill-and-catch) etter råfiltrering (#400 mesh), og går videre til befuktningstårnet via en damp til sjøvann-varmeveksler. Sjøvannet sprayer i tre stadier og store dråper faller ned inne i tårnet mens det kolliderer med utluften på vei opp fra kompressoren. Fyllingene bak sprayen skaper en stor kontaktflate uten å danne fine dråper. Fordampningen av vannet kjøler den innkommende luften fra ca. 160 °C til ca. 70 °C (ved ca. 98% relativ fuktighet). I tillegg til lavere inntaksluft, får man lavere O<sub>2</sub>-

deltrykk og høyere spesifikk varmekapasitet på ladeluften, noe som reduserer dannelsen av NO<sub>x</sub>. Noe av det beste med systemet er at man oppnår NO<sub>x</sub>-reduksjon uten å tilsette ammoniakk, ingen modifisering på det originale forbrenningssystemet er nødvendig, bruk av lav-kvalitets vann og flere positive bieffekter [72].

Varmeveksleren forvarmer sjøvannet før det når befuktningstårnet. I tillegg til økt trykk i kompressoren, fører forvarmingen til en økning i massetransporten i tårnet (ref. h-T diagram i termodynamikken). Ca. 5% av rent fordampet vann inngår i massestrømmen i dette tilfellet. Doseringstanken (se figuren over) forer systemet med kjemikalier for å unngå oppsamling av kalsiumkarbonat, som er en del av sjøvannet i damp til sjøvann-forvarmeren. Damp til sjøvann-varmeveksleren er en typisk platevarmeveksler og den er liten (400 x 250 x 50). Dampen fra eksosgass-dampgeneratoren som følger med originalt på skipet (brukes mellom annet til oppvarming av kabiner) er bygget om for damp til sjøvann-forvarmer, og forvarmeren gjenvinner noe av eksosgassenergien [72].

På grunn av ombyggingens natur, fikk man en plassbegrensning i maskinrommet, til tross for at horisontalt befuktningstårn med høy-ytelses spraytåke eliminator ble valgt.

Bilde 7.9. Motor og det horisontale befuktningstårnet [73].



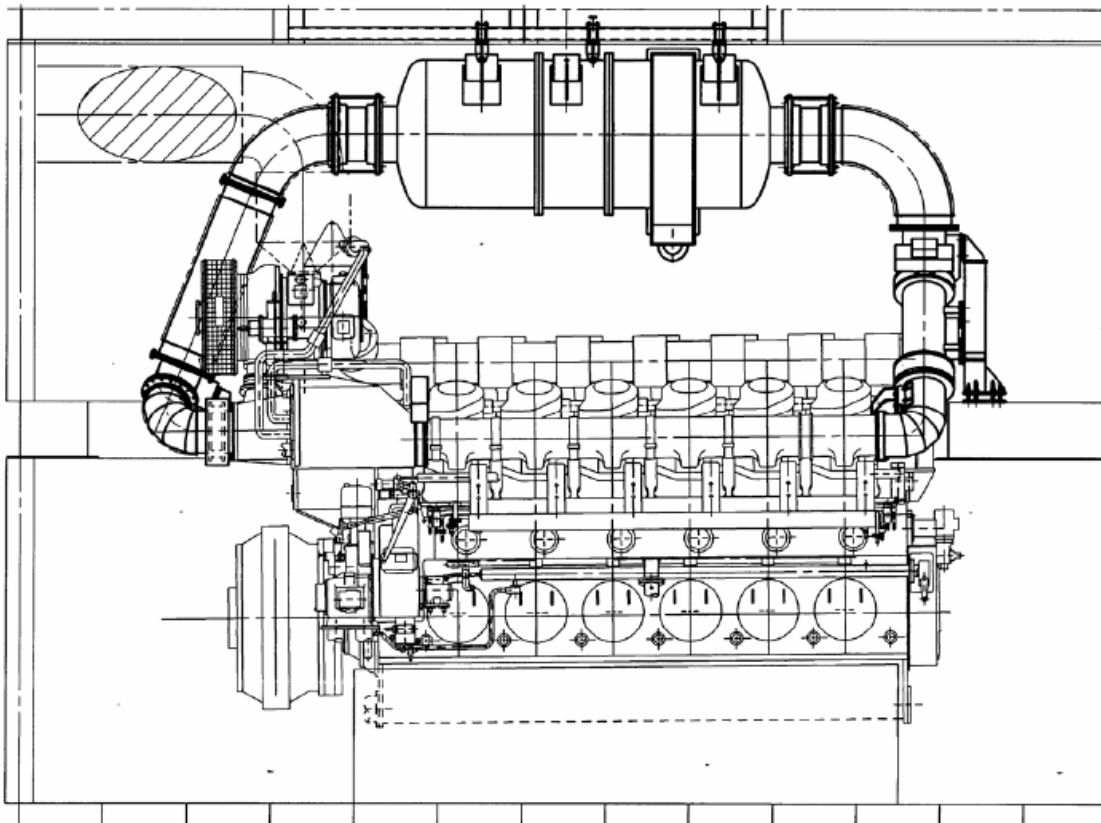
Firmaet Munters ble valgt på grunn av systemdesignet og mulighet for integrasjon med eksisterende motorkonfigurasjon. Det første HAM-systemet ble installert på motor nr. 1 i 1999 under meget forebyggende overvåking og mange instrument var satt opp for å

oppdage eventuelt vann/sjøvann i smøreljen og ingen overførsel av salt inn i forbrenningskammeret. Det ble samtidig sammenlignet hoveddata med de tre originale motorene for å oppdage abnormaliteter. Fordi dette var den første installasjonen av et HAM-system på en større dieselmotor, sørget man for å ha muligheten til å forandre enkelt tilbake til det originale luftinntaket. Det betyr bruk av etterkjøleren på vanlig måte, da denne funksjonen er overtatt av HAM-systemet når det er i bruk. For å få til dette benytter man seg av flere luftventiler som er integrert i rørsystemet [72]. Viking Line var veldig fornøyd med systemet og klarte å redusere avgiftene etter å ha installert det på motor nr. 1. Munters fikk derfor i 2000 i oppgave å installere systemet på de tre resterende hovedmotorene for å oppnå ytterligere reduksjon. Etter dette har systemet gått over 95.811 timer totalt pr. februar 2007 [73].

### Befuktningstårnet

Befuktningstårnet er hjertet til HAM-systemet og det er en tank med lengde på 4 m, 1.4 m i diameter og tre befuktningstadijer. Det er en enkel trykktank med vanddyser, fylling og tåkeeliminator, men gjennomtenkt design basert på utregnet masse- og varmetransportteori tillater bruk av vanlig sjøvann. Rent vann uten urenheter fordampes under prosessen. Tegningen under viser størrelsen og plassering av befuktningstårn i forhold til motor.

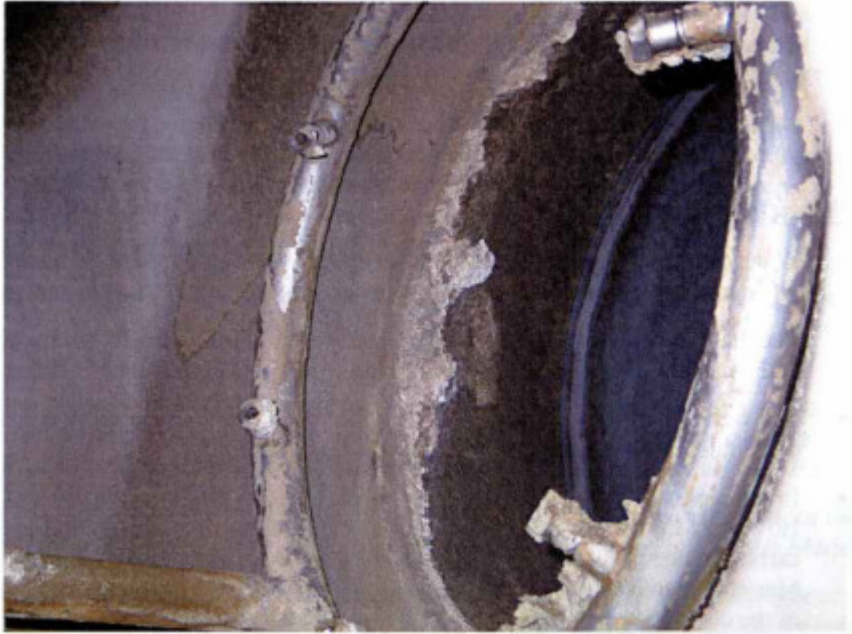
Figur 7.3. Relasjon mellom befuktningstårn og motor [73].



Tårnene på alle 4 motorene er i virkemåte den samme, men den første installasjonen skiller seg litt fra de andre med hensyn på utseendet. I stedet for bare metall er tanken

kledd i en myk foring. Ellers er den også på 316 liter i rustfritt stål med titankledd innerflate. Røropplegget er også litt annerledes på de tre nyeste installasjonene. Den første har individuelle rør fra hvert stadium opp til fill and catch-tanken, mens de tre siste har forenklet røropplegg laget av plastikk med spesielle motstandsegenskaper i forhold til sjøvann. Fill and catch-tankene for installasjon to til fire er også laget av plastikk for å redusere vekt og kostnader [72].

Bilde 7.10. Sjøvannsdysen til 1. stadium i tårn nr. 1 [72].



Figuren over viser sjøvannsdysen til 1. stadium i befuktningstårn nr. 1. Man ser sporadiske avsetninger av kalsium karbonat, men dette er ikke noe problem siden det ikke er grunn til å danne fine vanddråper (ytelseevnen til dysen er upåvirkelig i denne sammenhengen). Selv om avsetningene faller av metalloverflaten, blir det vasket vekk av sjøvannet som strømmer forbi og ender opp på utsiden av tårnet. Selv når motoren går i "tørrmodus" (dvs. luft går gjennom tårnet uten vanntåke i motsatt retning), har ikke disse avsetningene vært noe problem for motoren. Lufthastigheten i befuktningstårnets hovedkropp (d=1.4 m) er bare rundt 3-4 m/s ved vanlig drift [72]. Det er heller ikke problemer med avsetninger i andre deler av systemet.

### Operasjonsforhold og driftsstrategi

- Systemtrykk
  - Luftrykket i befuktningstårnet er det samme som utgangstrykket i kompressoren
  - Vannsirkulasjonspumpen går med konstant hastighet og holder vanntrykket ca. 3 bar høyere enn luftrykket hele tiden, uavhengig av motorstyrke (fin atomisering av sjøvann må unngås, så det er med vilje satt en liten trykkforskjell)

- Strømningskontroll
  - Strømningsraten av vann inn i befuktningstårnet er alltid konstant på grunn av konstant trykkdifferanse gjennom dysene
  - Mengden rent fordampet vann, som innlemmes sammen med luftstrømmen, er bestemt av og kontrollert av metningsforholdene i tårnet
  - Vannstrømmen inn i tårnet (gjennom dysene) må være stor nok til at urenheter blir ført vekk av dreneringsvannet i bunnen av tårnet
  - I prinsippet kan dreneringsvann fra befuktningstårnet dumpes rett i sjøen. Dette fører derimot til et høyt forbruk av kjemikalier mot oppsamling av kalsium karbonat i systemet, spesielt i damp til sjøvann-varmeveksleren. I dette systemet blir derfor dreneringsvannet sirkulert og brukt på nytt til befuktning (det blir med nåværende driftsprofil brukt ca. 22 liter kjemikalier pr. 2 uker)
  - Strømningsraten til "fill-and-catch"-tanken blir kontrollert slik at saltkonsentrasjonen inne i tårnet faller innenfor en bestemt rekkevidde (strømningsraten er større enn fordampningsraten, noe som betyr at noe må dumpes til sjø). Saltkonsentrasjonen i befuktningsvannet blir overvåket ved å måle elektrisk ledningsevne
  - Kommentar fra Viking Line: I startfasen ble det brukt feil materiale på blødeventilen (for dumping av vann til sjø), eller rundt den. Dette førte til at korrosjon blokkerte vandumpungssystemet. Strømningsraten ble kontrollert for å kompensere for fordampningsraten, men saltkonsentrasjonen i det sirkulerende befuktningsvannet fortsatte å øke på grunn av ytterligere sirkulasjon. Føleren for elektrisk ledningsevne slo alarm, men dette ble sett bort fra av operatøren på det tidspunktet. Dette førte til at befuktningstårnet ble helt fullt og blokkert med saltkrystaller på bare 6 minutter. Dette førte igjen til at motoren stoppet da den ikke kunne suge luft. Det bli ingen skader på hverken motor eller befuktningssystem, og saltet ble fjernet ved å spyle 3 ganger med ferskvann.
- Nedstengning
  - For å beskytte skorsteinen og HRSG (heat recovery steam generator) ombord på skipet fra kondensert vann (siden disse ikke var bygget for å motstå kondensert vann originalt), stopper Viking Line strømmen av befuktningsvann og tørker opp kanalene i avgassystemet før de stopper motorene
  - Det er ingen fare for lastoverskridelse, som kan føre til høy hastighet (ifm. generatorbruk), siden propellene alltid er i vannet på så store skip
- Kompressor surge (tilbakestrømning på grunn av økt nedstrømstrykk)
  - I teorien er det mulig å øke maksimumstrykket videre med HAM-systemet. Siden den originale turboladeren har vært brukt som originalt installert, har man opplevd tilfeller av surge når trykket er økt under driften. Dette er på grunn av ubalansen mellom kompressor og turbin på grunn av den økede massestrømmen på turbinsiden i forbindelse med befuktningen. Ved nåværende drift blir en del av blødeluften tatt fra

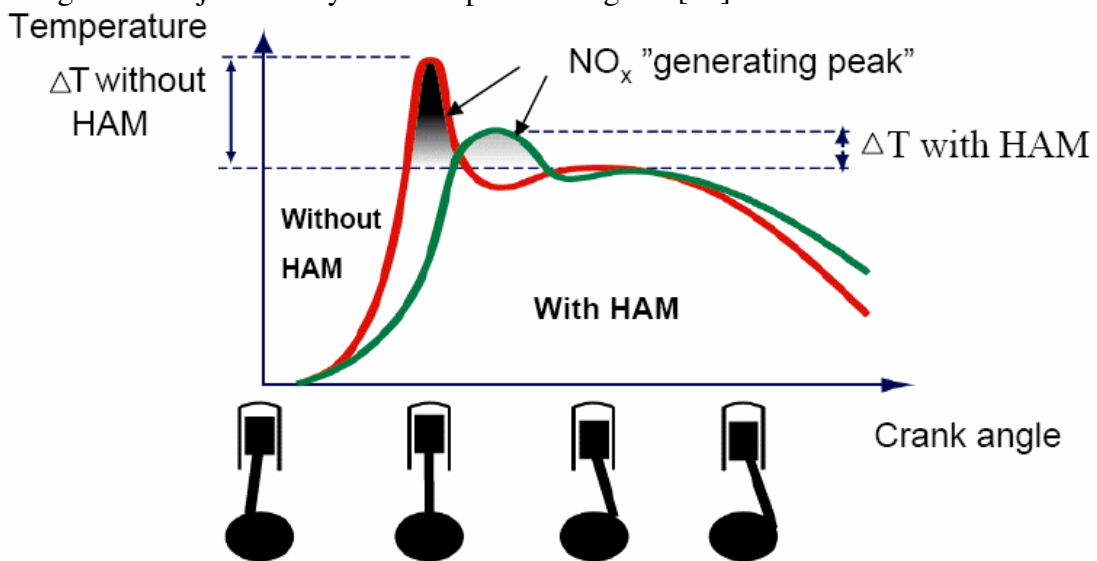


kompressoren (resirkulert) for å unngå surge ved driftsforhold som krever høy effekt

### Oppsummering av fordeler/driftserfaringer så langt pr. februar 2007:

- Man har fått vesentlig NO<sub>x</sub>-reduksjon. Forskjellige tester har vist at man har oppnådd en reduksjon på minst 70% (g/kW-h) uten å bruke hverken ammoniakk, ekstra rent vann eller gjort noen modifikasjon på motorens forbrenningssystem. CO-utslipp er også tilfredsstillende og forverres lite i forhold til driftsprofil, bortsett fra ved ekstra lave turtall
- Det er oppnådd redusert sylindertemperaturer. Dette er nok på grunn av mer jevn forbrenning, og lavere maksimumstemperatur (peak) i starten av forbrenningen som vist på figuren under [73]:

Figur 7.4. Skjematisk sylindertemperatur diagram [73].

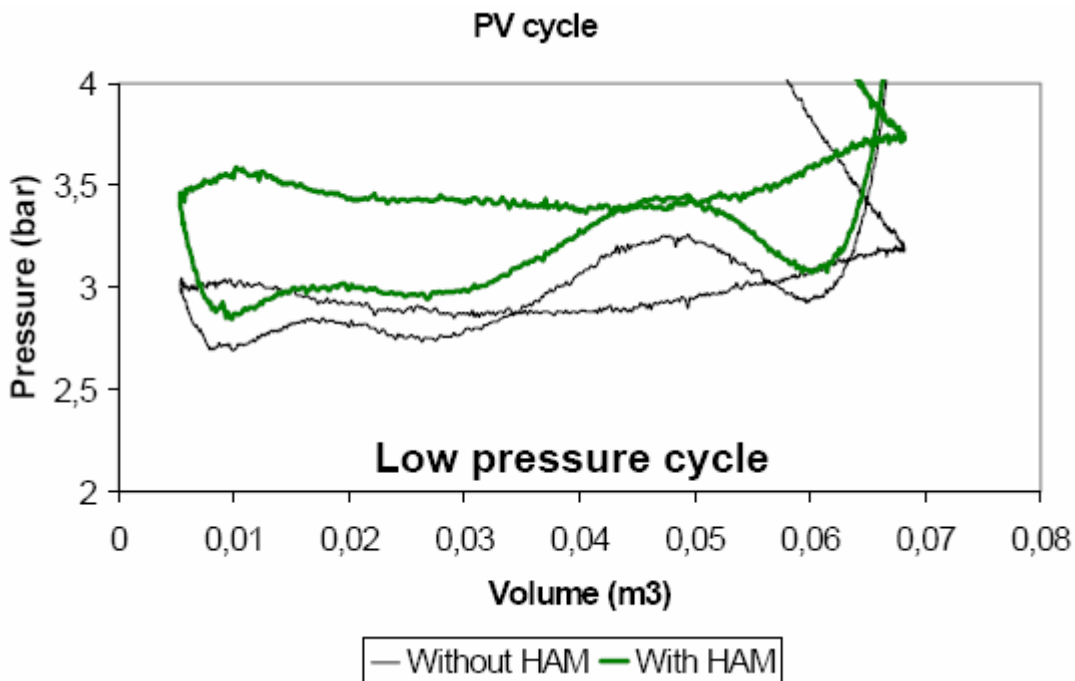


Cylinder temperature vs.. Crank angle.

Sylindertemperatur har gått ned med >20 °C, og ventiltemperatur med >30 °C under normal drift, noe som igjen fører til lengre levetid og mindre vedlikehold (driftstid mellom overhaling av sylindere og pakning er økt med 25%)

- Man har fått renere interndeler i motoren, dvs. mye mindre og mykere karbonavsetninger og ingen korrosjon i forbrenningskammeret. Noe av årsaken til dette kan også være renseluften som følger med vannstrømmen (ved overhaling av motor er soten mye enklere å fjerne, og dette sparer igjen arbeidstid og bruk av reservedeler)
- Det er registrert lavere drivstofforbruk med omtrent 4% etter at HAM-systemet ble installert (basert på en 24-timers periode). Dette er som nevnt en av de positive bivirkningene med systemet

- Graf 7.1. Ingen innvirkning på motoreffektivitet [74]:



- Man bruker også ca. 30% mindre smøreolje ved bruk av systemet, samtidig som den forvitres saktere og kan brukes lengre enn normalt
- Man har fått en mer stillegående motor. Selv om dette ikke er målt, er det bekreftet av både mannskap og motorfabrikant. Årsaken til dette er antakeligvis den jevne forbrenningen med lavere maksimumstemperatur
- Overskuddsvarme brukes til å forvarme prosessvann
- Det er lavere eksogasstemperatur med systemet i bruk
- Kan stå på helt til 10 minutter før man slår av motorene [74]
- Sjøvannsforbruket er omtrent 3 ganger så mye som drivstofforbruket [74]
- Analysen for M/S Mariella tilsier en utstyrsvekt på 15-30 ganger mindre enn ved bruk av SCR-system [74]

### Andre observasjoner

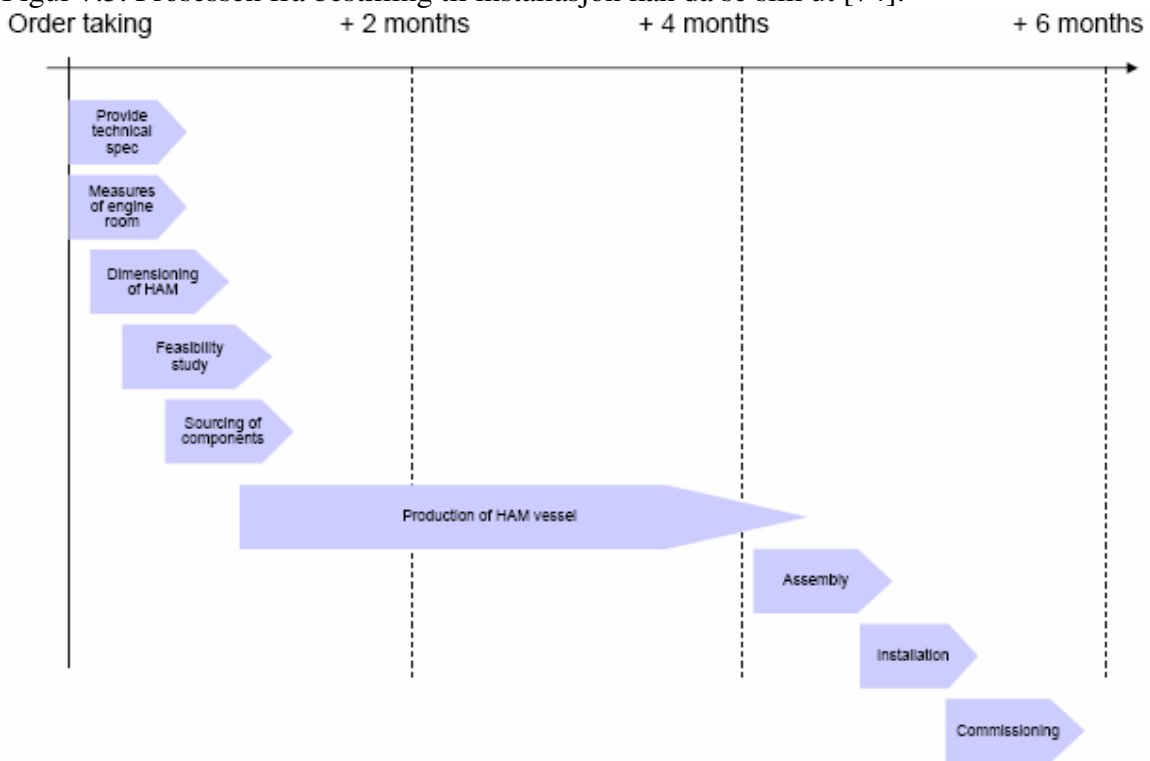
- Selv om rustfritt stål kan benyttes til befuktning ved hjelp av sjøvann istedenfor titan ved dette temperaturnivået, er sveisekvaliteten det viktigste å passe på i denne sammenhengen
- Viking Line er fornøyd med systemet, spesielt at det er billigere i drift enn SCR og de tilhørende positive bivirkningene som nevnt over
- For dette systemet var kostnaden omtrent den samme som ved installering av SCR, men siden dette var det første systemet krevde det mye kalibrering av anlegget, noe som økte kostnaden

- Fordi oppbygningen av systemet og komponentene er relativt enkle, er det sagt at i tillegg til lave operasjonskostnader må det være mulig å redusere capex i fremtiden. Dette kan gjøres ved å bruke andre underleverandører av deler, og enklere konstruksjon og instrumentasjon basert på erfaringsdata fra M/S Mariella
- Det er gjort målinger ombord, og det spesifikke utslippet totalt for skipet er på 3,91 g/kWh (NO<sub>x</sub>-sertifikat fra 2001)

### Generelt

Ved en eventuell ombygging til HAM er det noen viktige punkt som må vurderes. Man må se på hvor plasskrevende utstyret er, og vektøkningen. Dette gjelder spesielt for mindre skip. Hvor mye overskuddsvarme man har er også vesentlig for systemet [73]. Sist men ikke minst må man gjennom dialog med motorfabrikant finne den løsningen som passer den aktuelle motoren. MAN Diesel SA har standardiserte produktpakker fra motorer på 2,5-3,5 MW i intervaller opp til 8-12 MW. Dette er gjort for å begrense installasjonstid og ingeniørarbeid. I tillegg må rederi stå for å tilpasse turbo, passe på at det er nok energi tilgjengelig for befuktning og gjøre målinger i maskinrom. HAM-systemet kan installeres under vanlig dokking. Målet til MAN Diesel SA er å levere 20 komplette utstyrspakker i året [74].

Figur 7.5. Prosessen fra bestilling til installasjon kan da se slik ut [74]:



## 7.2.2 SCR (Selective Catalytic Reduction)

### 7.2.2.1 SCR-system

Selektiv katalytisk reduksjon (SCR) av NO<sub>x</sub> ved bruk av enten ammoniakk, NH<sub>3</sub> eller urea CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> som reduksjonsmiddel, har eksistert siden 70-tallet i fabrikker og andre stasjonære anvendelsesområder. SCR-system for mobile applikasjoner ble utviklet på 90-tallet, først og fremst for marine applikasjoner. I 2004 kom også den første lastebilmotoren med integrert SCR-system ut på markedet. Urea er det mest brukte reduksjonsmiddelet for mobile applikasjoner på grunn av at den er luktfri og ikke giftig. Urea blir solgt kommersielt under navnet AdBlue som en væskeblanding med 32,5% urea. Et urea/SCR-system består av 3 hovedblokker [75]:

1. Urea doseringssystem
2. Kontrollsystem
3. SCR-katalysator

Urea injiseres inn i eksosstrømmen fra doseringssystemet. Injeksjonspunktet bør være et stykke fra katalysatoren for å sikre at blandingen mikser seg skikkelig. Urea blir dekomponert (termolysert) til ammoniakk og syre. Syren blir så hydrolysert (tar opp vann) til ammoniakk og karbonmonoksid. Ammoniakken reagerer på katalysatoroverflaten sammen med NO i følge reaksjonen [75]:

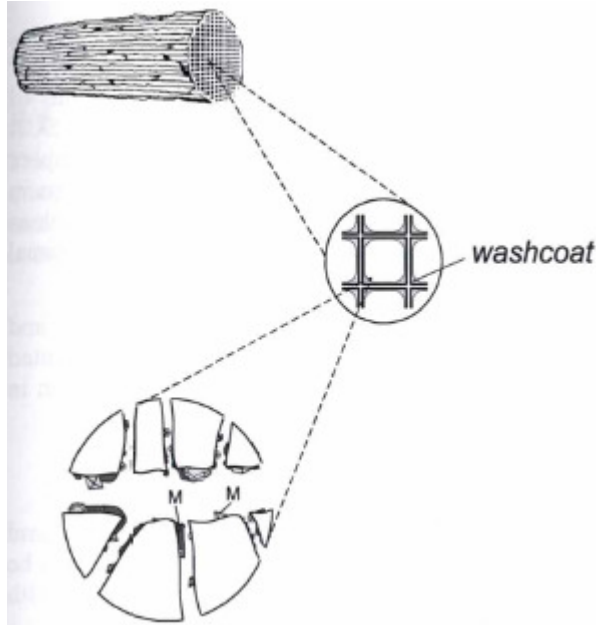


Resultatet av reaksjonen er bare nitrogen og vann. Dessverre er det ikke mulig å oppnå 100% reduksjon, spesielt under forbigående forhold. En av nøkkelfaktorene for å oppnå høy reduksjon er temperatur. Utenfor temperaturvinduet på 200-500 °C er reduksjonskapasiteten meget dårlig. Katalysatoren har også mye tregere dynamikk enn motoren. Den trenger typisk flere minutter før den når kjemisk likevekt, noe som for en dieselmotor kan ta noen få millisekunder. Det er også viktig å passe på å ha kontroll med ureadoseringen for å unngå lekkasje (slip), dvs. ammoniakk i eksosgassen etter katalysator. Ammoniakk har en særegen ubehagelig lukt, og er regulert ved lovgivning [75].

Den dominerende katalysatorstrukturen som blir brukt i dag er monolittstrukturen. Monolittkatalysatoren har stor kontaktflate og likevel lavt trykktap i prosessen. Det finnes 2 typer av monolittkatalysatorer på markedet. Den første er bygget på en nøytral (ikke reaktiv) struktur som vanligvis inneholder materialet "cordierite", 2MgO 2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5SiO<sub>2</sub>. Strukturen er dekket med et porøst materiale ("washcoat") som øker kontaktflaten ytterligere. Det mest brukte washcoat-materialet i SCR-katalysatorer er titandioksid (TiO<sub>2</sub>). Det porøse materialet er dekket med de aktive katalytiske elementene. Den andre typen innlemmer det katalytiske materialet i hele katalysatorstrukturen, dvs. at ikke noe nøytralt materiale brukes [75]. Andre tilsetninger som silisium blir da brukt for å lage

monolittstrukturen. Andre aktive ingredienser i SCR-katalysatorer er vanadium pentoksid (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) blandet med tungstentrioksid (WO<sub>3</sub>).

Figur 7.6. Illustrasjon av en typisk monolittkatalysator og den porøse strukturen [75].



### Optimaliseringsproblem

For å oppnå lavt utslippsnivå og samtidig opprettholde god drivstofføkonomi, er det viktig at motoren og etterbehandlingssystemet er optimalisert gjennom en grundig systemgjennomgang. Dette er ingen enkel oppgave på grunn av alle faktorene som spiller inn på utslipp og drivstofforbruk i dagens kompliserte dieselmotorer. Med utgangspunkt i at motoren har vanlig innsprøytningsystem og urea/SCR-system, må følgende parametere optimaliseres i hvert tilfelle [75]:

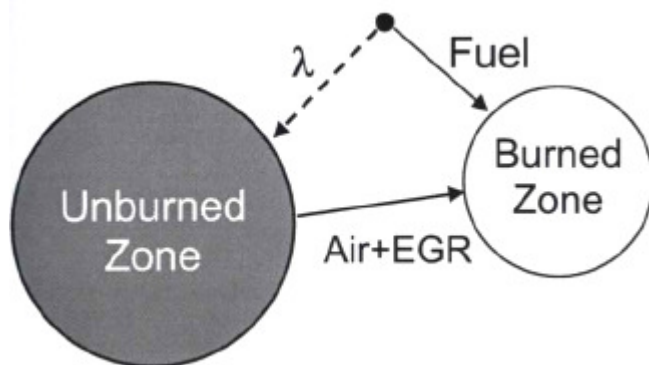
- Injeksjonstiming
- Antall injeksjoner
- Avstanden mellom injeksjoner
- Drivstoffinnhold i hver injeksjon
- Injeksjonstrykk
- Ureadosering

Det er da opplagt at dette krever mye tid med testing for å sjekke alle kombinasjoner og tolkning av resultater. Optimalisering blir ikke lettere på grunn av den tregere dynamikken til katalysatoren, noe som gjør at det hele blir tidsavhengig. I noen driftsprofiler kan det og være mer kostnadseffektivt å kjøre motoren litt utenfor optimale grenser [75]. Faktorer som urea- mot dieselkostnader og andre faktorer som påvirker motstanden kan påvirke oppsett og kalibrering av et komplett etterbehandlingssystem.

### 7.2.2.2 Modellering av forbrenning i dieselmotor

Denne masteroppgaven tar ikke for seg kompliserte beregningsmetoder og modeller for NO<sub>x</sub>-utslipp, men viser litt om hvordan dette kan gjøres. En modell som Claes Ericsson [75] har satt opp for dieselmotorer i lastebiler bygger på et to-sone konsept. Innholdet i forbrenningskammeret er oppdelt i en ubrent sone, som består av luft og eventuelt EGR, og en forbrent sone, som inneholder resultatet av forbrent brennstoff og innhold fra uforbrent sone tidligere i syklusen.

Figur 7.7. To-sone konseptet [75].



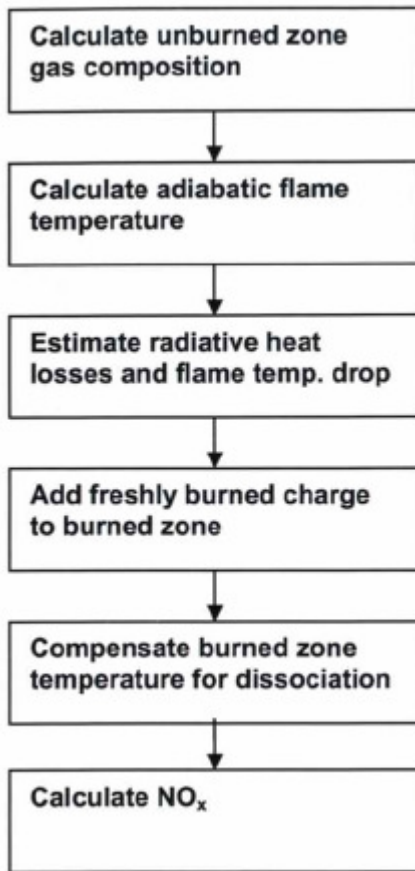
Flere antagelser er gjort i modelleringsprosessen [75]:

- Innholdet i sylindren beskrives som en ideell gass
- All forbrenning skjer ved den samme luft/drivstoff raten ( $\lambda$ )
- Det er ingen trykkgradienter inne i sylindren
- Sonene inne i sylindren er isentropisk sammentrykket
- Alt brennstoff forbrenner i prosessen
- NO<sub>x</sub> dannes inne i flammefronten
- All oppnådd energi kommer fra injisert brennstoff

Beregninger av forbrent sone (burned zone) og dannelselse av NO gjøres i en egen utregning. Denne er noe lettere enn den som benyttes ved beregning av varmemefrigjøringen til motoren, og dette gjøres for å spare beregningstid på pc (Matlab). Tradisjonelt blir det brukt en itereringsprosess basert på "Gibbs frie energi" som blir utført for hver rotasjon til veivakselen. Iterasjonen bestemmer gassammensetningen og flammefronttemperaturen. Da denne blir veldig tung er en variasjon av en multisone-modell benyttet i denne to-sone forbrenningsmodellen. Lokal støkiometrisk forbrenning er antatt ( $\lambda=1$ ) her. Algoritmen for å oppdatere forbrent sone og beregne NO<sub>x</sub> blir da som i flytdiagrammet under. Først blir gassammensetningen i den uforbrente sonen beregnet, der det blir tatt hensyn til mangden EGR. Dette brukes til å bestemme adiabatisk flammetemperatur i det neste steget ved bruk av entalpi-balanse (mellom et uforbrent masselement og et perfekt forbrent masselement). Entalpi og spesifikk varme i iterasjonen gjøres ved bruk av koeffisienter fra termodynamikken. Den forbrente sonen

vil bestå av N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>O hele tiden på grunn av antagelsen om støkiometriske forhold [75].

Figur 7.8. Flytdiagram for forbrent sone/NO<sub>x</sub>-formasjon [75].



For å kompensere for ufullstendig forbrenning blir et sett med tabulerte data brukt. Funksjonen for å beregne forbrent sone-temperatur er en funksjon av trykk, temperatur og lokal lambda ( $\lambda$ ). Adiabatisk flammtemperatur oppnås aldri i virkeligheten, her er det bare et tall i en forenklet forbrenningsmodell. Ved bruk av energibalans og antagelsen av at spesifikke varmekomponenter er like, kan temperaturen i forbrent sone skrives på denne måten [75]:

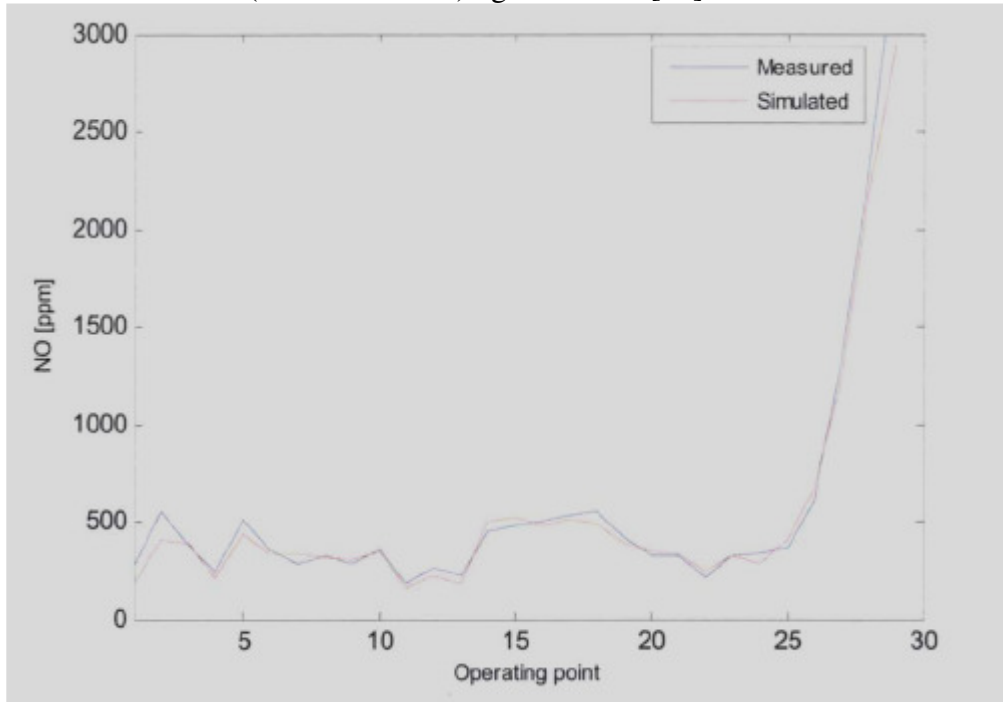
$$T_{burn,perf}(\theta) = \frac{T_{exp} m_{burn}(\theta - \Delta\theta) + T_{flame,ht} m_{flame}(\theta)}{m_{burn}(\theta)} \quad (7.2)$$

Hvor  $T_{exp}$  er isentropisk ekspandert temperatur fra forrige rotasjon av veivaksel.  $m_{burn}$  betegner massen i den forbrente sonen, mens  $m_{flame}$  beskriver massen til det nyforbrente elementet.

## Resultater

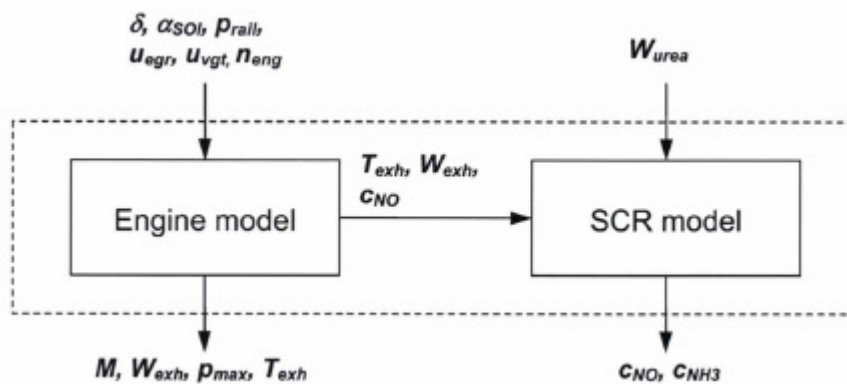
Resultatene fra modelleringen ble bekreftet via sammenligning av dataene med målinger gjort av en dieselmotor under stasjonære forhold. Målingene ble gjort på "test bed" i lastvariasjoner fra 0 til 100% i hastigheter fra 500 rpm til 2300 rpm. Figuren under viser simulert og målt NO<sub>x</sub>-utslipp for stasjonære forhold som er undersøkt. Sammenfatningen stemmer ganske bra, bortsett fra noen små forskjeller ved visse punkt i testen der det største avvikene er på 13%. For ordens skyld kan det nevnes at datamaskinen i testen klarte å simulere ytelse på 2400 rpm sammenlignet med virkelige forhold.

Graf 7.2. Simulert (dataakkumulert) og målt NO<sub>x</sub> [75].



Det er også vist at man kan sette opp modeller for kombinert dieselmotor og EGR-system, men dette går utenfor grensene til denne masteroppgaven. En kan også sette opp modeller for SCR-systemet isolert, og kombinert dieselmotor og SCR-modell. Denne siste modellen kan se slik ut [75]:

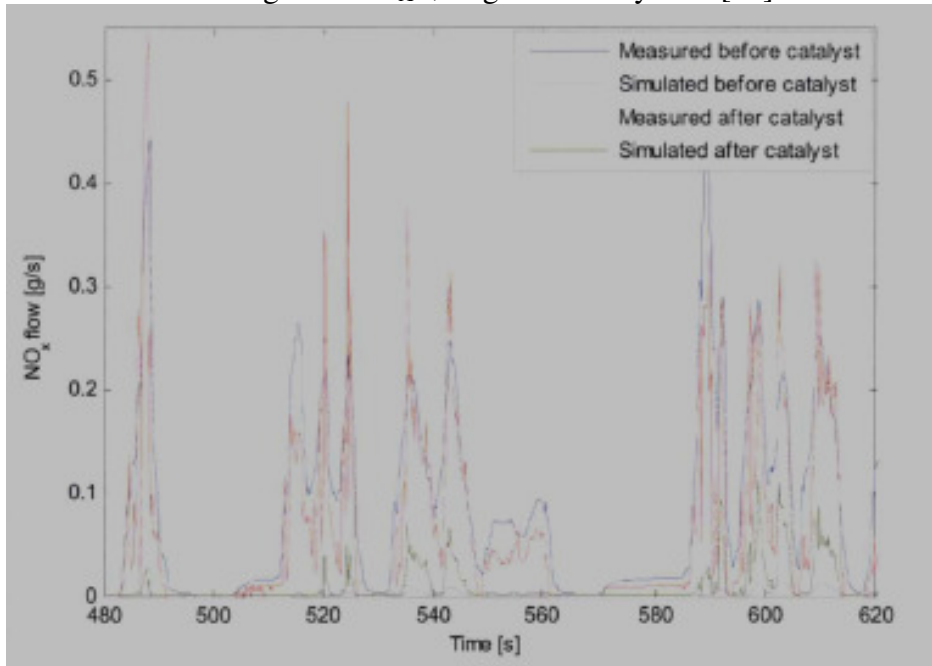
Figur 7.11. Modellstruktur kombinert dieselmotor og SCR-system [75].





I modellstrukturen for den kombinerte motor og SCR-modellen er de eneste inputdataene typiske motor kontrollparametere. Vridningsmoment, eksosstrømning og NO-konsentrasjon er gitt som output [75]. Maksimalt sylindetrykk er også gitt, noe som er nyttig for å ikke overskride motorens grenser. Bekreftelse av denne modelleringen ble gjort ved å kjøre en ETC (European Transient Test Cycle) på en motor med 6 sylindere, EGR-system, common rail injeksjonssystem og urea SCR-system. Testmotoren i dette systemet bruker pilotgass, noe som modelleringen ikke dekker foreløpig. Grafen under viser simulert og målt NO<sub>x</sub> før og etter katalysator.

Graf 7.3. Simulert og målt NO<sub>x</sub> før og etter katalysator [75].



Grafen viser at NO<sub>x</sub>-dannelse er modellert nesten helt perfekt, selv om spesifikt NO<sub>x</sub>-utslipp er undertestimert med 15,4%. Variasjonen her kan komme av pilotinjeksjonen som testmotoren bruker. NO<sub>x</sub>-utslipp etter katalysator er derimot litt overestimert, med andre ord underestimerer SCR-modellen reduksjonen.

### 7.2.2.3 M/V Viking Cinderella

#### Motorer

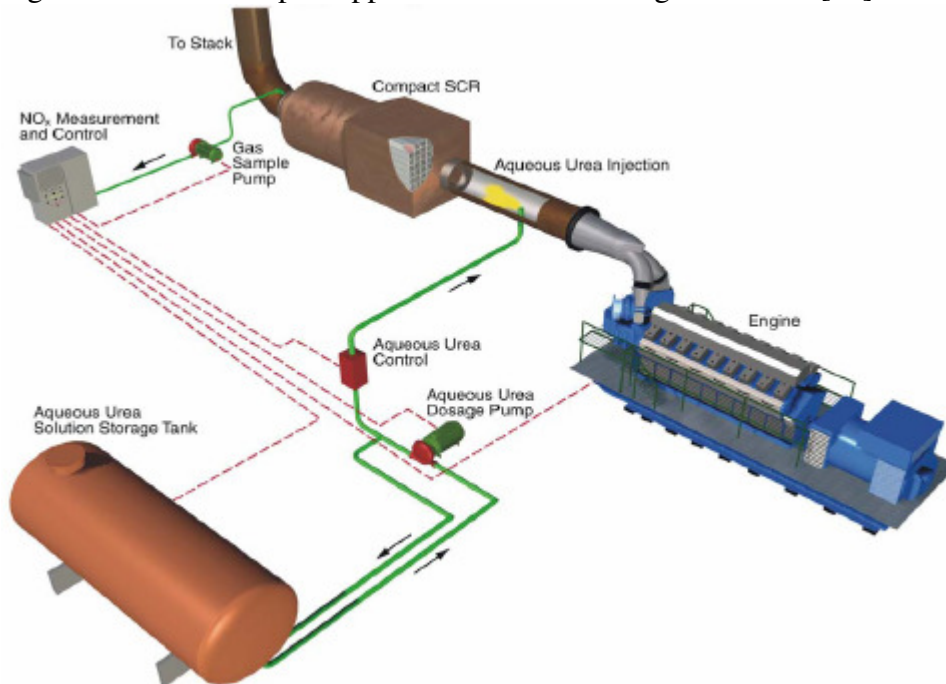
- 4 x SULZER 12ZAV 40S ER1 (4 x 7200 kW=28800 kW)
- 4 x VASA 6R32E
- 4 x 2460=9860 kW
- 8 stk. Munters SCR-anlegg

Bilde 7.11. M/V Viking Cinderella, Viking Line [73].

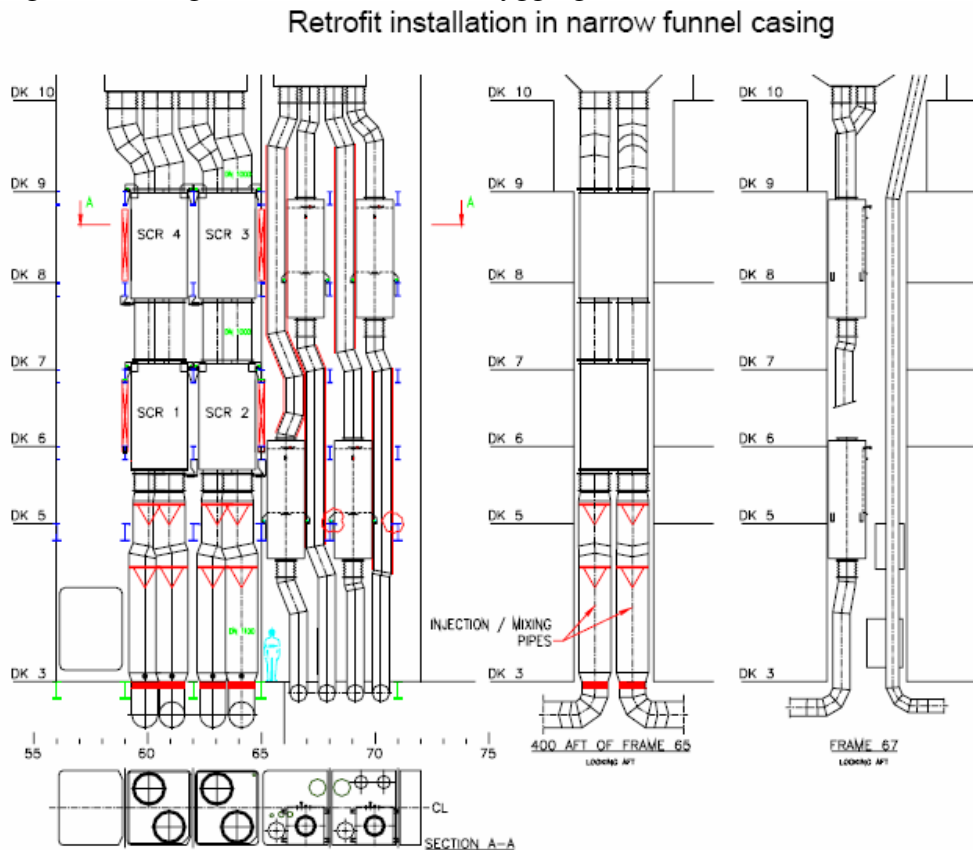


Det ble installert SCR-system fra Munters på de 4 hovedmotorene og 4 hjelpemotorer i 2003. Installasjonstid på verftet var ca. 16000 arbeidstimer. Det ble mottatt NO<sub>x</sub>-reduksjon sertifikat i september samme år, og det spesifikke utslippet er så lavt som 0,2 g/kWh etter ombyggingen [73].

Figur 7.12. Skisse av prinsippet ombord MV Viking Cinderella [73].



Figur 7.13. Avgassrørene ser etter ombygging slik ut [73].

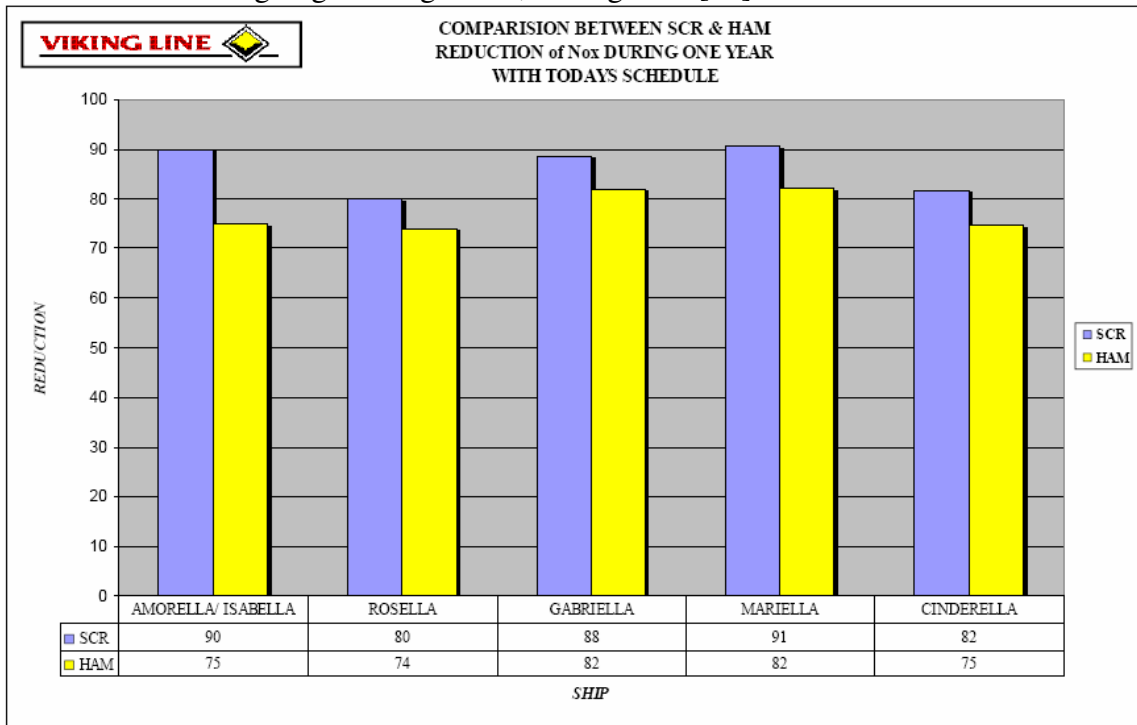
**Driftserfaringer fra Cinderella og Gabriella (ombygd 1997) pr. februar 2007.**

Anlegget på begge skipene har fungert bra, men det har vært problemer med sotblåseventilene på Cinderella. Det har også vært noe problemer med NO<sub>x</sub>-analyser på begge skip men årsaken til dette er ikke oppgitt. Cinderella har fått noe høyere tyngdepunkt, se bildet over. Andre rederi opplyser forskjellige erfaringsdata [73]:

- Kranglete elektronikk
- Sprukken katalysator
- Korrosjon i avgassrør
- Høyt mottrykk i avgassrør
- Problem med tetting av katalysator
- Vanlig med liten urealekkasje
- Ujevn ureakvalitet
- Urea i motor ved stans
- Logistikkproblem med urealeveranser

## 7.2.3 Sammenligning HAM og SCR

Graf 7.4. Sammenligning SCR og HAM, Viking Line [73].

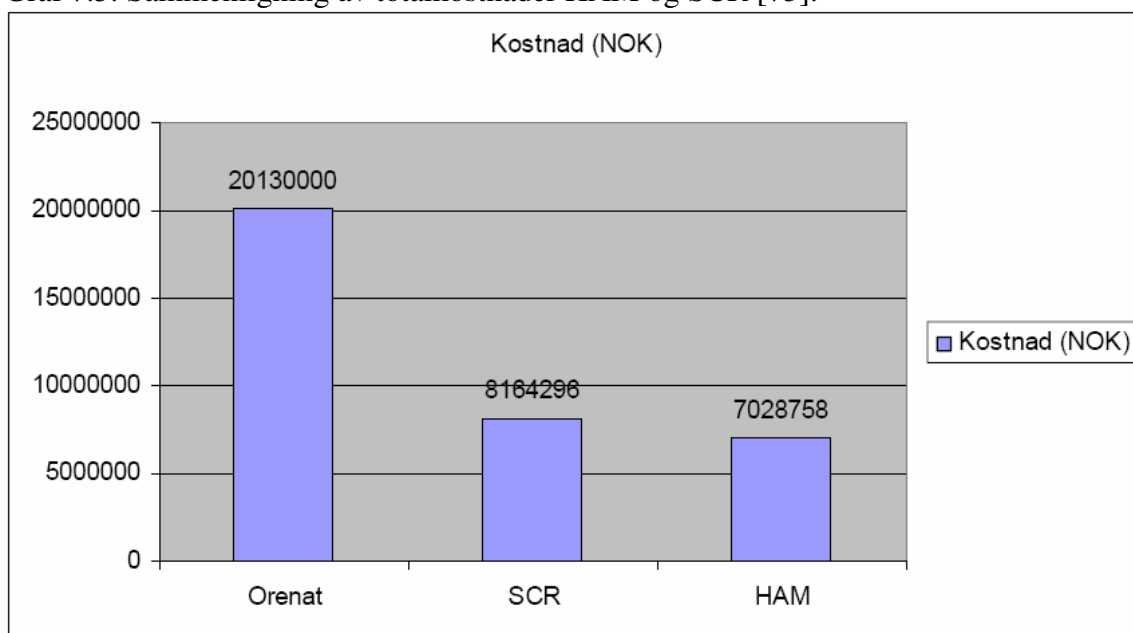


Viking Line har gjort målinger og sammenlignet utslipp mellom de to renseteknikkene for gjeldende driftsprofiler for de skipene som har implementert tiltak. Det viser seg at SCR-systemet er tiltaket som reduserer mest, men her tar man ikke hensyn til installasjons- og driftskostnader. Dessuten tar SCR-systemet mer plass og gir mer vekt enn HAM.

Diagrammet under er basert på norske avgifter for skipet Isabella, som slipper ut ca. 1.342.000 kg NO<sub>x</sub>/år. Beregningene viser at det er langt billigere å implementere tiltak enn å betale avgift, samt totalutgiftene i året til HAM er minst. I denne kalkylen er det satt en installasjonskostnad for både SCR og HAM på 2.000.000 €, med 6% rente og avskrivningstid på 5 år gir en kapitalkostnad på 475.000 €/år. Ureakostnad for dette skipet er satt til 280.000 €/år. Som diagrammet viser blir det 1.135.538 kr billigere å benytte seg av HAM istedenfor SCR.

I Sverige blir sertifiseringen gjort i henhold til ISO 8178 (utslippsstandarden) vært tredje år. Dette er en dyr og komplisert prosess med kostnader på 20-30.000 €. I denne sammenhengen er det vanskelig å bestemme motorenes last, drivstofforbruk, ureautslipp og omregning fra ppm (parts per million) til g/kWh [73].

Graf 7.5. Sammenligning av total kostnader HAM og SCR [73].



## 8 Case: Sementfrakteskipet M/V Bornholm Cement

### 8.1 NO<sub>x</sub> innrapportering og betaling

NO<sub>x</sub>-beregninger for 1. kvartal 2007 ble beregnet etter sjablongmetoden for alle skip i flåten. Denne metoden blir brukt frem til KGJS har målinger/godkjente beregninger fra skipene. Som nevnt i avsnittet om forskriften blir for mye betalt avgift refundert såfremt rederiet har søkt om å få fastsatt kildespesifikk faktor innen 1.juli 2007. Kundene fikk faktura på NO<sub>x</sub>-avgift første uken i april, og samlet innbetaling for alle skip (Cement/kysttank) ble betalt 18.april. Grunnlaget for denne betalingen var basert på rapport om bunkersforbruk pr. reise i Dataloy for KGJS Cement, og rapporter fra skipene om bunkersforbruk pr. mnd. fra Kysttank [64].

### 8.2 Miljøavtale med staten

KGJS er meget positive til en miljøavtale med staten, men veien videre er foreløpig usikker. Man har bestemt at man skal søke Sjøfartsdirektoratet om å få måle kildespesifikk faktor på 4 skip i tillegg til Bornholm Cement, henholdsvis to fra KGJS Cement og to fra Kysttank innen 1.juli 2007. Fire andre aktuelle båter har EIAPP-sertifikat som det også skal søkes kildespesifikk faktor for. En interessant ting i denne sammenhengen er at hvis man søker, må man isåfall søke Sjøfartsdirektoratet om å få kildespesifikk faktor på alle motorer ombord? Hvis resultatene viser at sjablongfaktoren er bedre på en eller flere motorer, er det jo hensiktsmessig, ihvertfall økonomisk, å fortsette å betale avgift basert på denne faktoren. Poenget er da om man må opplyse om at man har dokumentasjon på dette. Det har i skrivende stund ikke lyktes forfatteren å få svar på denne problemstillingen, men KGJS kommer antageligvis til å ta saken videre ved passende anledning.

Bornholm Cement har hyppige anløp i norske havner fra Kristiansand i sør til Kjøpsvik i nord, med noen få unntak hver måned der skipet går til havner i Nederland, Danmark, Island eller Shetland. NO<sub>x</sub>-avgiften for dette skipet blir da så høy at det svarer seg å gjennomføre målinger for å finne kildespesifikk utslippsfaktor (payback-tiden blir ikke lang). En annen grunn til å få fastsatt den kildespesifikke faktoren er at inngangsbilletten til et eventuelt NO<sub>x</sub>-fond blir høyere hvis man bruker sjablongfaktoren for skipet.

Muligheten for direkte kontinuerlig måling av NO<sub>x</sub> og CO<sub>2</sub> er også diskutert, men det blir for dyrt i denne sammenhengen. Skjønt systemet fra det britiske selskapet Martek Marine, MariNOX, kan vise til nøyaktige målinger og blant annet 0,6 til 2,1% i innspart drivstofforbruk på både testmotor fra Wärtsilä (10RTA96-C) og containerskipet MV Copiapo [77]. De har beregnet at for hvert tonn med drivstoff man sparer, reduserer man CO<sub>2</sub>-utslippet med 3 tonn. Uansett så er prisen på 89.000 £ (1068000 NOK) for komplett system eller 1.890 £ (22.680 NOK) pr. mnd. i 5 år for mye. Denne oppgaven tar ikke for seg bakgrunnen for disse tallene, men konstaterer heller at det er uaktuelt i sammenheng

med NO<sub>x</sub>-utslipp for skip i mindre skala. Ecoxy AS har også et system for kontinuerlig monitorering av avgasser, men prisen er avhengig av avtale mellom kunde og Ecoxy AS i hvert tilfelle. Det er nevnt verdier på mellom 1,2 og 2 millioner NOK for ferdig installert system [67].

### 8.3 Kostnader for MV Bornholm Cement

Bornholm Cement har NO<sub>x</sub>-faktor på 70 (0,07) for hovedmotor og 55 (0,055) for hjelpemotorer. I tabellen er MGO utslipp og forbruk hovedmotor, mens GO er utslipp og forbruk hjelpemotorer. Innbetalinger og beregning for de fire første mnd. i 2007 er basert på bunkersforbruk, både under overfart og bidraget som eventuelt kommer i havn under lossing og lasting. Ved beregning er 15 kr/kg NO<sub>x</sub> lagt til grunn.

Tabell 8.1. NO<sub>x</sub>-avgift januar 2007 (KGJS):

Forbruk i tonn		Utslipp i tonn				NO <sub>x</sub> avgift NOK
Total MGO	Total GO	NO <sub>x</sub> utslipp fra MGO	NO <sub>x</sub> utslipp fra GO	NO <sub>x</sub> totalt		
84,8000	41,9000	5,9360	2,3045	8,2405	123 607,50	

Tabell 8.2. NO<sub>x</sub>-avgift februar 2007 (KGJS):

Forbruk i tonn		Utslipp i tonn				NO <sub>x</sub> avgift NOK
Total MGO	Total GO	NO <sub>x</sub> utslipp fra MGO	NO <sub>x</sub> utslipp fra GO	NO <sub>x</sub> totalt		
85,4000	29,9000	5,9780	1,6445	7,6225	114 337,50	

Tabell 8.3. NO<sub>x</sub>-avgift mars 2007 (KGJS):

Forbruk i tonn		Utslipp i tonn				NO <sub>x</sub> avgift NOK
Total MGO	Total GO	NO <sub>x</sub> utslipp fra MGO	NO <sub>x</sub> utslipp fra GO	NO <sub>x</sub> totalt		
42,3000	23,4000	2,9610	1,2870	4,2480	63 720,00	

Tabell 8.4. NO<sub>x</sub>-avgift april 2007 (KGJS):

Forbruk i tonn		Utslipp i tonn				NO <sub>x</sub> avgift NOK
Total MGO	Total GO	NO <sub>x</sub> utslipp fra MGO	NO <sub>x</sub> utslipp fra GO	NO <sub>x</sub> totalt		
46,6000	23,6000	3,2620	1,2980	4,5600	68 400,00	

Dette gir en totalsum fra januar til april på 370.065 NOK for Bornholm Cement. Det utgjør ca. 45% av KGJS Cement sine totale innbetalinger for samme periode. Med andre ord har Bornholm Cement sin driftsprofil mye å si for avgiftene til KGJS Cement og kunder.

## 8.4 Teori rundt målinger av M/V Bornholm Cement

### 8.4.1 Skipet og motorer

Bilde 8.1. M/V Bornholm Cement (KGJS).



- Byggeår/Verft: 1976/Århus Flytedokk
- Sommerdødvect/dypgang: 4323 mt/6,32 meter
- LOA/Bredde/Dybde: 98,3 m/15,8 m/7,50 m
- Flag: Bahamas, Nassau
- Tonnasje BRT/NRT: 3227/968
- Hovedmotor: HSM B&W 6S50HU 4100 HK/3015 KW
- Hovedmotordata: 3015 KW / 450 RPM
- Hjelpemotor: 2 x 169 KW Scania-Vabis ds 14
- Hjelpemotor: 1 x 202 KW Scania D1 12 45 M
- Hjelpemotor: 1 x 515 KW Mitsubishi
- Hjelpemotor: 1 x 160 KW Detroit S50
- Hastighet/forbruk lastet: 13 knop/MDO-13mt/dag + MGO-1,2mt/dag
- Hastighet/forbruk ballast: 13,5 knop/MDO-12mt/dag + MGO- --||--
- Fueltype hovedmotor: MDO=type DMB
- Fueltype hjelpemotor: MGO=type DMX (ISO 8217)



## 8.4.2 Avgassmåling

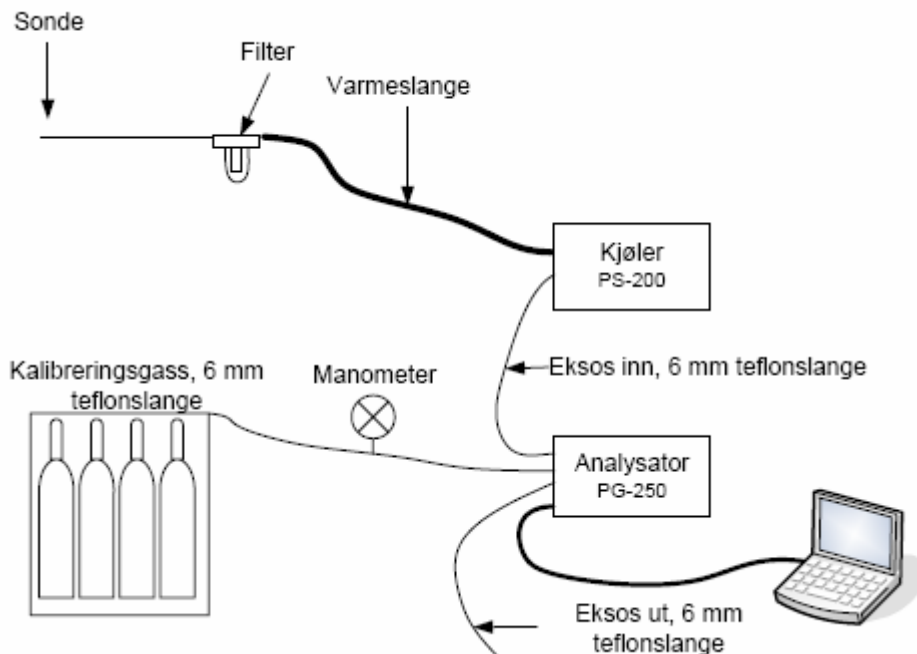
Det ble arrangert en fysisk utslippsmåling av NO<sub>x</sub> ombord Bornholm Cement 3.mai 2007. Dette skipet ble som nevnt valgt på grunn av sitt seilingsmønster med hyppige anløp i norske havner. Selskapet Ecoxy AS med base i Trondheim ble valgt som ”kompetent aktør” til å utføre dette arbeidet. Det ble målt på hovedmotor samt en av hver type hjelpemotor.



## 8.4.3 Testoppsett

Systemet for å måle avgassene ble koblet opp som vist i figuren under.

Figur 8.1. Skisse av oppsett av måleutstyr [76].



Det ble målt ved 25, 50, 75 og 100% belastning på hovedmotoren. Faktorene som fremkom på de fire ulike belastningene ble så veid i henhold til ISO 8178 (henholdsvis 0.2, 0.5, 0.15, 0.15). På hjelpemotorene ble det bare målt en belastning (hhv. 75%, 55% og 75%). Mer info om kjøler og analysator er ikke interessant for denne oppgaven. For hver belastning ble målingene logget hvert sekund i 10 minutter (det er regnet som nok nøyaktig i denne sammenhengen, selv om analysatoren kan logge mye mer nøyaktig enn det). Verdiene som ble benyttet i utregningen av utslippsfaktorene er gjennomsnittet av denne 10 minutters loggeperioden. Hovedmotoren ble kjørt i 30 minutter på innstilt belastning før loggingen startet for å sikre at den var termisk stabil. For hjelpemotorene ble det brukt 15 minutter til stabil drift før målingene startet. Kalibrering av målingene skjedde før første målepunkt og etter hvert målepunkt på alle motorer.

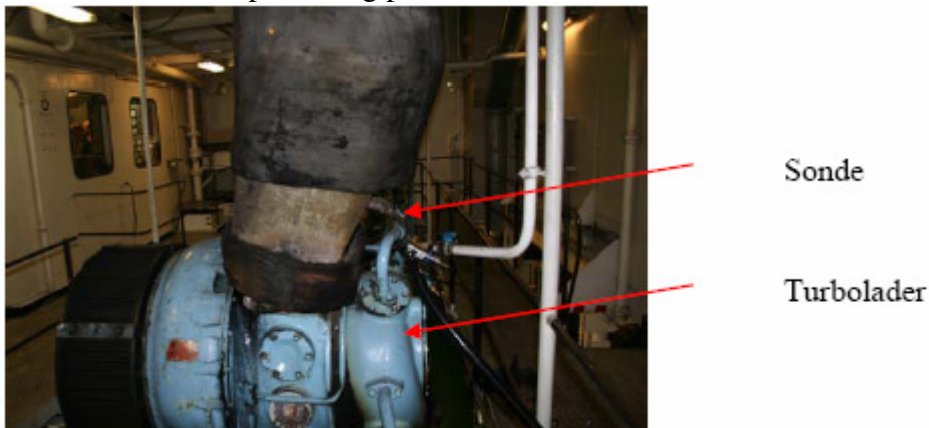
Kalibreringsgassene er gjengitt i tabellen under. Gassene var av "klasse 1", som betyr  $\pm 2\%$  unøyaktighet i analysen [76]. Det kan nevnes at utstyret Ecoxy AS bruker er det samme som DNV og Marintek. Kalibreringsgassene gjelder dessuten innenfor 80% av måleområdet [67].

Tabell 8.5. Kalibreringsgasser [76].

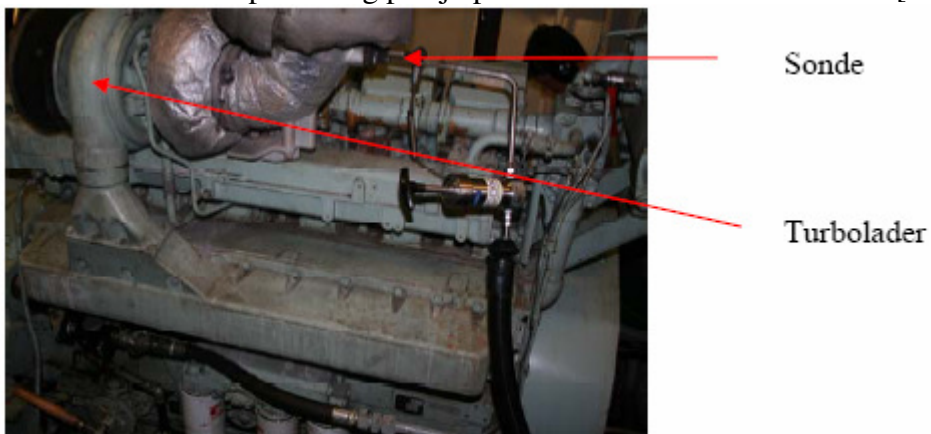
Gass	K-nummer	Konsentrasjon
NO	K-183830	846 ppm
CO	K-232633	160 ppm
CO <sub>2</sub>	K-232633	3 %
O <sub>2</sub>	K-211780	20 %
N <sub>2</sub>	373275	N <sub>2</sub> 5.0

Målesonden som ble brukt hadde en ytre diameter på 10mm i SS316 med et hull i rørveggen nær enden av sonden. Sonden bør monteres vinkelrett på eksoskanalen med hullet mot strømningsretningen, men dette var ikke mulig på hjelpemotorene Scania D1 12 45 M og Scania DS 14. For den første av disse to ble sonden plassert aksielt etter en ekspansjon i eksosrøret, og for den andre ble sonden ført ca. 1.5 m ned i skorsteinen. På hovedmotoren og Mitsubishi 6SR-MPTA ble sonden plassert rett etter turbolader da dette var eneste mulighet for innføring av sonden. Bildene under viser noen av målepunktene for tre av fire målte motorer [76]:

Bilde 8.2. Sondens plassering på hovedmotor [76].



Bilde 8.3. Sondens plassering på hjelpemotor Mitsubishi 6SR-MPTA [76].



Bilde 8.4. Sondens plassering på hjelpemotor Scania D1 12 45 M [76].



Bilde 8.5. Nærbilde av sonden plassert under avgassrøret ved avgassmåling på fergen "Tresfjord" mellom Molde og Vestnes 08.05.2007.



I dette tilfellet var sonden plassert etter en kjele på undersiden av avgassrøret gjennom en overgang. Denne overgangen er egentlig en dreneringsventil som ble modifisert i forbindelse med målingene på fergen. Alle målingene ble forøvrig gjennomført i henhold til ISO 8178/IMO NO<sub>x</sub> Technical Code.

Skjermbildet under viser "live" utslipp av NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> og O<sub>2</sub>-metningen.

Bilde 8.6. Skjerm bilde fra måleprogrammet under målinger på fergeren Tresfjord.



#### 8.4.4 Resultater

Beregnet utslippsfaktor for de ulike motorene basert på målingene er oppført i tabellen under. Ecoxy AS har i dette tilfellet ikke kommet med noen veid verdi (dvs. felles utslippsfaktor for alle motorene), men dette er etterlyst av KGJS. Veid verdi er spesielt interessant når man har lave utslipp på lav last, og høyt på f.eks. 75% last.

Tabell 8.6. Utslippsfaktorer for motorene [76].

Motor	Sjablonverdi [kg NO <sub>x</sub> /tonn brensel]	Utslippsfaktor [kg NO <sub>x</sub> /tonn brensel]
HSW B&W 6 S 50 HU	70,00	41,57
Mitsubishi S 6 R – MPTA	55,00	50,44
Scania D1 12 45 M	55,00	81,05
Scania DS 14	55,00	85,85

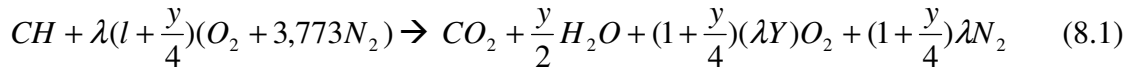
En ser at utslippsfaktorene varierer fra 32% under sjablongfaktoren for hovedmotor til 56% over sjablongfaktor for den ene hjelpemotoren. (Merk: Tabellen fra Ecoxy AS er feil, utslippsfaktoren skal være 47,57 ikke 41,57, noe som stemmer med både beregninger og det offisielle sertifikatet).

Usikkerheten i NO<sub>x</sub>-konsentrasjonene som er målt er beregnet til  $\pm 4,18\%$  i henhold til ISO 14956. Denne usikkerheten er i tillegg avhengig av usikkerheten i målingene av [76]:

- CO<sub>2</sub>
- Omgivelsestrykk, temperatur og luftfuktighet
- Brenselsammensetning

### 8.4.5 Beregningsmetoden

NO<sub>x</sub>-faktoren (F) beregnes etter karbonbalanse-metoden i henhold til IMO NO<sub>x</sub> Technical Code, Appendix 6 (se kapittel 3.4). Metoden er for såvidt hemmelig, i den forstand at de aktørene som er ute på markedet ønsker å ha kunder i dette begrensede segmentet så lenge som mulig. Utgangspunktet for beregningene er denne [67]:



der y står for molvekten og  $\lambda = (\frac{m_l}{m_b}) / (\frac{m_l}{m_b})_s$ ,

som betyr (spesifikt luftforbruk)/fuelforbruk / (støkiometrisk spesifikt luftforbruk/støkiometrisk spesifikt fuelforbruk).

Ut fra dette finner man NO<sub>x</sub>-faktoren (F) ved:

$$F_{NO_x} = \frac{\text{Målt spesifikt NO}_x\text{-utslipp (g/kWh) x 1000}}{\text{Målt spesifikt drivstofforbruk (g/kWh)}}$$

Her får man resultatet i g NO<sub>x</sub>/kg fuel eller kg NO<sub>x</sub> pr. tonn fuel (NO<sub>x</sub>-konsentrasjonen) og regner ut utslipp basert på lastkondisjon i forhold til fuelforbruk. Noe av utfordringen med formelen (F<sub>NO<sub>x</sub></sub>) er å finne målt spesifikk NO<sub>x</sub>-utslipp (M<sub>NO<sub>x</sub></sub>). Målt spesifikt drivstofforbruk (be) kan man forøvrig lese rett av måleinstrumentene hvis dette er installert, mens M<sub>NO<sub>x</sub></sub> følger denne formelen:

$$M_{nox} = NO_x \times (\frac{2,05}{1,29}) \times (be + le) \quad (g/kWh), \quad (8.2)$$

der 2,05/1,29 altså 1,587 beskriver tettheten til eksos. Løsningen ligger i å finne sammenhengen mellom be og le, der le er luftmengde. Til slutt blir ligningen for F<sub>NO<sub>x</sub></sub> egentlig slik [67]:

$$NO_x \times 1,587 \times (...), \text{ der } (...) \text{ er den beregnede sammenhengen.} \quad (8.3)$$

## 8.5 Effekt av målinger for Bornholm Cement

Med ny kildespesifikk NO<sub>x</sub>-faktor for hovedmotor på 47,57 (0,04757) og 50,44 (0,05044) for hjelpemotor blir innbetalinger noe annerledes for Bornholm Cement og da selvfølgelig totalt. Det er i beregningene under bare lagt til grunn den ene (beste) faktoren for hjelpemotorene sett under ett, siden det er én faktor som ligger til grunn for innbetalingene basert på sjablong. Målingene viste at Scania-hjelpemotorene fikk en langt dårligere spesifikk faktor enn sjablong som ligger til grunn fra før (81,05 og 85,85).

Hvis dette må legges inn, spiser dette naturlig nok opp noe av det som den nye bedre faktoren for hovedmotor og Mitsubishi hjelpemotor har fått, og dermed spart inn i avgift.

Tabell 8.7. "Ny" NO<sub>x</sub>-avgift januar 2007 (KGJS):

Forbruk i tonn

100

## 8.6 Sammenligning opp mot investeringer

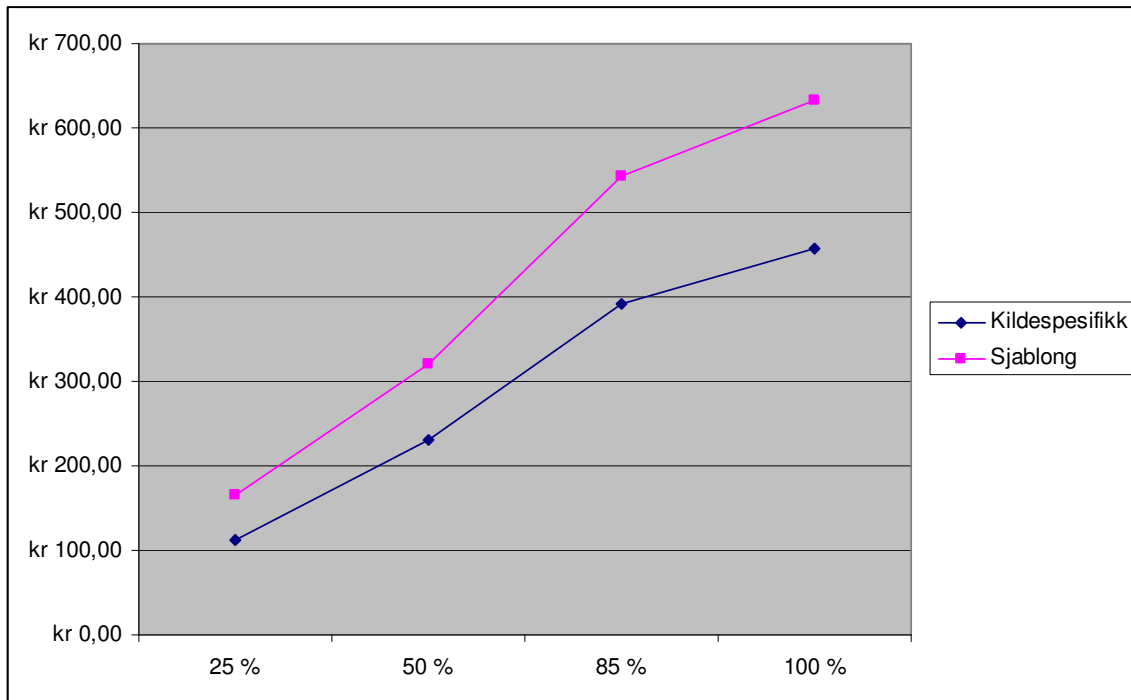
Det å investere i tiltak ombord på dette, eller andre skip, bør gjøres i samarbeid mellom rederi, motorfabrikant og leverandør av aktuelt system. Bare sammen kan de på best mulig måte finne en løsning for en eventuell modifisering av det aktuelle fremdriftssystemet som er installert ombord. Dessuten er det viktig å finne en løsningsvei som både rederi og leverandør kan leve med økonomisk og kvalitetsmessig. Det å gjøre en antagelse basert bare på rådata og kvalifiserte antagelser alene blir mer sjonglering med tall enn et godt gjennomførbart forslag. Det økonomiske anslaget for Bornholm Cement tar altså ikke hensyn til plasshensyn i maskinrom og eventuelle ønsker fra KGJS. Det er heller ikke hentet inn noe tilbud på en ombygging til f.eks. HAM fra leverandør, eller vært noen diskusjon med motorfabrikant siden dette ikke er aktuelt for skipet på nåværende tidspunkt. Skipets alder (31 år pr. 2007) må ta en del av skylden for dette.

M/V Bornholm Cement har installert hovedmotor på 3015 kW, eller ca. 4100 HK. Basert på opplysninger om priser pr. kW vil en motorteknisk ombygging ligge på 1.355.000 NOK for dette skipet alene. Å nedbetale et slikt system er ikke mulig for et skip av denne typen og størrelse innen rimelig tid.

Når det gjelder installasjon av SCR-anlegg vil også dette bli dyrt. For Bornholm Cement kan man forvente å måtte ut med 1.175.800 NOK, men dette inkluderer ikke offhire. Som ved HAM og MTO er dette et meget dyrt tiltak, og egentlig ikke mulig (ihvertfall økonomisk) basert på driftsprofil og skipstype. Her får man i tillegg utgifter til urea og utskiftning av katalysatorelementer på sikt.

Grafen under viser utslipp av NO<sub>x</sub> fra hovedmotoren til Bornholm Cement basert på lastmengde på motoren plottet mot spesifikt utslipp (basert på fuelforbruk) pr. time. Det spesifikke utslippet (i form av avgift) er beregnet med hensyn på sjablongfaktor og kildepesifikk faktor.



Graf 8.1. NO<sub>x</sub>-utslipp fra Bornholm Cement, basert på kildespesifikk og sjablong.

Som en ser av grafen, øker forskjellene ved maksimal last på motoren. Hvis en relaterer dette til både utslipp av NO<sub>x</sub> og avgift så kan det kanskje lønne seg å gå med 85% motorlast, hvis dette passer for kunde og havneanløpene. I tillegg til å minske utslipp og spare avgift, sparer man drivstoff samtidig som maskineriet ikke går så hardt. Dette til tross for at utslippet øker proporsjonalt mer fra 50 til 85%, enn fra 85 til 100%.

## 8.7 Vurdering av tiltak

Det er vanskelig å forutse driftsprofilen til eksisterende skip, samtidig som markedet er i stadig bevegelse og lovgivningen for utslipp fra skip kan endre seg (Avgiften kan gå opp til 50-60 kr/kg NO<sub>x</sub>). Stadig strengere krav til miljø og vanskelige skattemessige forhold for rederi og andre store internasjonaliserte bedrifter gjør at flere og flere vurderer utflagging til lavkostland. Det burde egentlig være en felles avgifts- og utslippspolitikk for alle land. Når det gjelder M/V Bornholm Cement, er egentlig tiltaket med fastsettelse av kildespesifikk utslippsfaktor (se grafen over) et tiltak rederiet kan leve en stund med. Andre tiltak kan selvsagt vurderes etter hvert, men dette er nok avhengig av utviklingen rundt det omtalte NO<sub>x</sub>-fondet. Det er forøvrigt viktig for alle rederi å være miljøbevisste, men så lenge kunden er fornøyd med tingenes tilstand er det til slutt det som bestemmer så lenge man holder seg innenfor lovlige rammer.

Når det gjelder fremtiden er det viktig å se på transportkjeden som en helhet. I nye skip er det ønskelig med så stor motorinstallasjon som mulig, noe som betyr at motoren kan gå på lavere turtall og dermed slippe ut mindre avgasser. Bedre virkningsgrad er også noe det jobbes kontinuerlig med. Med tanke på utviklingen av mer miljøvennlige motorer går

dette hånd i hånd med lovgivningen. Dagens motorleverandører leverer nye enheter i forhold til kravene satt av myndighetene i det landet de produserer eller skal levere til. Halve flåten til KGJS Cement blir vurdert som gammel, og nye skip skal inn i fornying av denne. Dette er skip på ca. 6.000 tonn [78] med bedre drivstofføkonomi enn de gamle. Men hva med økning av dette opp til 12.000 tonn? Da ville man fått inn ca. dobbelt så mye last, og oppnådd lavere fuelforbruk pr. fraktet enhet. Dette er igjen en vurdering som må gjøres basert på hvor skipet skal gå, og hvor lenge det eventuelt skal gå i samme profil. Samarbeid mellom flere kunder er også en måte å spare utslipp på. Hvis båten går med last begge veier istedenfor en, får man mye bedre utnyttet og effektiv tonnasje. Størrelse og logistikk må henge sammen med havner, og dette samarbeidet tar det tid å utvikle.

## 9 Konklusjon/diskusjon

Hvor mye vi som mennesker påvirker klimaet og klimaendringer på jorda gjennom utslippene vi forårsaker er fortsatt usikkert, og bare fremtiden kan vise resultatet. Det som er sikkert, er at vi forårsaker endringer i naturen, både lokalt og globalt. Både næringen, myndighetene, kunder og samfunnet ellers bør føle den forpliktelsen og ansvaret det er å ferdes på sjøen, og ta ansvar ved å bidra til reduksjon i utslippene.

Hvor lite Norge enn er i den store sammenhengen, er vi en stor sjøfartsnasjon. Og som en stor sjøfartsnasjon bør det være en overordnet målsetning at Norge skal være ledende på miljøvennlig sjøtransport. Samtidig som vi bør gå foran med et godt eksempel, er det også viktig at vi fortsetter med å jobbe for å få ratifisert internasjonalt bindende regler. Det er viktig å ta hensyn til råd fra ekspertene, uten nødvendigvis å ha nøyaktige vitenskapelige bevis før en foretar seg noe.

NO<sub>x</sub>-avgiften som norske myndigheter har pålagt rederi med skip som går langs kysten er et virkemiddel som er tatt i bruk. Avgiften gjelder fra 1.1.2007, men fortsatt pr. juni 2007 råder det mye usikkerhet blant norske rederi rundt detaljene i avgiften, og gjennomføringen av denne. Det er forfatterens oppfatning at avgiften og omfanget av denne er vedtatt litt for raskt uten noen saklig diskusjon med den faglige motparten (rederiene og forbund) først. Dette er litt synd siden noe som i utgangspunktet er tenkt som et virkemiddel med tanke på utslippsreduksjon, virker mer som noe myndighetene har vedtatt raskt for å vise handlekraft og ansikt utad.

Selv om dieselmotoren er en gammel arbeidshest i skipsfarten, gir forskning og arbeid av blant annet motorfabrikanter stadig større forståelse av hvordan forbrenningscyklusen fungerer og hvordan utslippene genereres. Dette kan igjen brukes til å gi mer optimale utslippsprofiler for nye motorer, blant annet mellom nye innsprøytingsteknologier. Brenselceller er det nye store, men det står fortsatt en del utviklingsarbeid igjen før en kan benytte dette til kommersiell bruk i skip. Isteden bør en rette fokuset mot det en kan gjøre med dagens teknologi. Den totale flåten får uansett ikke slik teknologi på mange år, blant annet fordi det å fornye flåten er den dyreste investeringen som gjøres. Det eksisterer i dag utstyr og teknologi for å redusere utslipp fra skip. Problemet er bare at det er meget dyrt, og det har manglet økonomiske incentiv fra myndighetene. Miljøstandarden man setter seg styres dessverre av at det er relativt billig å forurense og dyrt å implementere tiltak. Tiltakene som eksisterer i dag er enten bare på forsøksstadiet (vannemulsjon), de passer bare for skip med plass og relativt store motorer (SCR og HAM), eller de koster så mye for rederiet (MTO) at det er billigere å betale avgift enn å gjennomføre tiltak. De er dessuten vanskelig å sammenligne reduksjonstiltak siden tallmaterialet og erfaringene med disse tiltakene er meget begrenset. På en måte bør kanskje leverandører av slike system bli flinkere til å markedsføre produktet sitt, og på den måten skape større etterspørsel.

KGJS har flere skip som går mye langs norskekysten, et av disse er M/V Bornholm Cement. Med tanke på hva det koster å gjennomføre tiltak ombord på dette skipet, er det mest realistisk at rederiet fortsetter å betale avgift. I hvertfall så lenge et NO<sub>x</sub>-fond ikke er realisert. Etter å ha fastsatt kilde spesifikk utslippsfaktor er det estimert at rederiet kan spare minst et par hundre tusen i avgift i året. Det er også mer sannsynlig at det blir investert i nye skip, med bedre plassutnyttelse og mer miljøvennlige motorer på sikt som et alternativ. Flåten er gammel, og fornying gjør en eventuell ombygging lite nyttig. M/V Bornholm Cement er forøvrig 31 år, det er med andre ord en eldre dame med begrenset levetid. Innføring av ny teknologi vil på sikt kunne medføre at det på noen områder vil bli billigere å redusere utslipp. Land og bedrifter som foretar seg noe og de omstillingene det medfører, vil kunne få et teknologisk forsprang på andre. Dette kan være viktig med tanke på langt strengere utslippsgrenser i fremtiden.

Når det gjelder den nye NO<sub>x</sub>-avgiften er effektene på miljøet vanskelig å forutsi. Hvis man tar utgangspunkt i at et fond ikke blir realisert, og staten fortsetter NO<sub>x</sub>red-programmet sitt, noe som gir maksimalt gir 30% tilbakebetaling av investeringene i miljøtiltak, vil nok mange fortsette som de gjør i dag. Man legger bare på prisen til kundene og kjører som før. En avtale med staten gjennom et fond, eller høyere avgift vil nok presse mange, spesielt de mindre mer utsatte rederiene, til å foreta seg noe. En miljøavgift i Norge som NO<sub>x</sub>-avgiften faktisk er, hindrer ikke utslippene i å spre seg til resten av Europa og verden for den del.

Å legge forholdene til rette for mer samarbeid mellom rederiene med båter som går på kysten for å sikre effektiv tonnasje kan være en god løsning i første omgang. Har man fleksible mellomstore skip kan disse gå på kystfart, like mye som blandet internasjonal fart. Men igjen er dette noe som rederi, og eventuelt kundene må sette seg sammen for å vurdere.

## 10 Referanser

1. [www.kgjs.no](http://www.kgjs.no) (14.06.07)
2. [www.gearbulk.com](http://www.gearbulk.com) (14.06.07)
3. Master Thesis Jan Helge Bjørnstad 2006.
4. Masteroppgave Miljøteknologi for skip, Anja karoline Fjellvang 2004.
5. Simon Møkster Rederi, årsrapport 2001.
6. <http://projects.dnv.com/portenv/portal/> (14.03.07)
7. [http://www.miljostatus.no/templates/status\\_4954.aspx](http://www.miljostatus.no/templates/status_4954.aspx)
8. [http://www.miljostatus.no/templates/PageWithRightListing\\_2373.aspx](http://www.miljostatus.no/templates/PageWithRightListing_2373.aspx) (04.04.07)
9. [http://www.miljostatus.no/templates/PageWithRightListing\\_2301.aspx](http://www.miljostatus.no/templates/PageWithRightListing_2301.aspx) (12.04.07)
10. <http://www.miljostatus.no/templates/PageWithRightListing.aspx?id=2306> (13.04.07)
11. BBC-program 16.04.07 på BBC world.
12. <http://e24.no/makro-og-politikk/article1744024.ece> (17.04.07)
13. <http://www.miljostatus.no/templates/report.aspx?id=4930&spraak=NO&dsID=ULLT1&rID=NOx> (16.04.07)
14. <http://www.miljostatus.no/templates/report.aspx?id=4930&spraak=NO&dsID=LKG1&rID=ALLEKG> (16.04.07)
15. <http://no.wikipedia.org/wiki/Kyoto-avtalen> (27.03.07)
16. [http://www.regjeringen.no/nb/om\\_regjeringen/stoltenberg-II/De\\_store\\_oppgavene/Ansvar-for-klima/FAQ-om-klima.html?id=449979](http://www.regjeringen.no/nb/om_regjeringen/stoltenberg-II/De_store_oppgavene/Ansvar-for-klima/FAQ-om-klima.html?id=449979) (25.03.07)
17. Foredrag miljøverndepartementet, Eli Marie Åsen, Solstrand 6.mars 2007.
18. <http://caterpillar.episerverhotell.net/templates/page.aspx?id=416> DNV\_IMO\_annex6\_reg13.pdf (09.03.07)
19. [http://www.toll.no/templates\\_TAD/CircularLetter.aspx?id=105549&epslanguage=NO](http://www.toll.no/templates_TAD/CircularLetter.aspx?id=105549&epslanguage=NO) (12.03.07)
20. <http://no.wikipedia.org/wiki/Oksidering> (19.04.07)
21. [http://www.bellona.no/norwegian\\_import\\_area/transport/gods/skipsfart/skip\\_og\\_svovel/34721](http://www.bellona.no/norwegian_import_area/transport/gods/skipsfart/skip_og_svovel/34721) (13.03.07)
22. <http://www.regjeringen.no/nb/dep/md/aktuelt/nyheter/2006/Innforer-nye-krav-til-utslipp-av-svovel.html?id=100473> (13.03.07)
23. [http://www.bellona.no/norwegian\\_import\\_area/transport/gods/skipsfart/skip\\_og\\_svovel/29837](http://www.bellona.no/norwegian_import_area/transport/gods/skipsfart/skip_og_svovel/29837) (13.03.07)
24. [http://www.wwfno.panda.org/om\\_wwf/dette\\_jobber\\_med/hav\\_og\\_kyst/utfordringer/skipsfart/luftforurensing/index.cfm](http://www.wwfno.panda.org/om_wwf/dette_jobber_med/hav_og_kyst/utfordringer/skipsfart/luftforurensing/index.cfm) (15.03.07)

25. [http://www.miljostatus.no/templates/status\\_4966.aspx](http://www.miljostatus.no/templates/status_4966.aspx) (16.03.07)
26. [http://www.miljostatus.no/templates/PageWithRightListing\\_2372.aspx](http://www.miljostatus.no/templates/PageWithRightListing_2372.aspx) (16.03.07)
27. Bente Tornsjø, Utslipp til luft fra innenriks sjøfart, fiske og annen sjøtrafikk mellom norske havner 2001/6
28. Stortingsmelding nr 29 (1997-1998)
29. [http://www.ssb.no/emner/01/sa\\_nrm/arkiv/nrm2000/kap07.pdf](http://www.ssb.no/emner/01/sa_nrm/arkiv/nrm2000/kap07.pdf) (02.03.07)
30. Bengt Johansson: Forbrenningsmotorer, del 1. Avdeling for forbrenningsmotorer, Institutt for varme og kraftteknikk, Lund tekniske høyskole, Sverige 2003.
31. New Integrated O.P.E.R.A.S. Strategies for Low Emissions in HSDI Diesel Engines. In-Cylinder Diesel Particulate and NO<sub>x</sub> Control 2003, side 4-6.
32. Reduction of NO<sub>x</sub> Emissions by Water Injection in to the Inlet Manifold of a DI Diesel Engine. In-Cylinder Diesel Particulate and NO<sub>x</sub> Control 2003, side 39-41
33. [http://en.wikipedia.org/wiki/Nitrogen\\_oxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Nitrogen_oxide) (25.02.07)
34. <http://www.tu.no/energi/article57521.ece> (15.03.07)
35. Samtaler og info fra veileder Mohsen Assadi
36. <http://arb.ca.gov/msprog/offroad/marinevess/presentations/072602/manbw072602.pdf> (23.04.07)
37. [http://en.wikipedia.org/wiki/Exhaust\\_gas\\_recirculation](http://en.wikipedia.org/wiki/Exhaust_gas_recirculation) (23.04.07)
38. <http://www.ship-technology.com/projects/viking/> (26.05.07)
39. [http://www.rederi.no/default.asp?V\\_ITEM\\_ID=2651&AID=2665&TEMPORARY\\_TEMPLATE=79](http://www.rederi.no/default.asp?V_ITEM_ID=2651&AID=2665&TEMPORARY_TEMPLATE=79) (15.04.07)
40. <http://www.eidesvik.no/innovation.htm> (08.03.07)
41. <http://www.stp-norway.com/Forum/viewtopic.php?t=7879&postdays=0&postorder=asc&start=30> (20.04.07)
42. [http://www.bellona.no/nyheter/Bellona\\_presenterer\\_fremtidens\\_losninger](http://www.bellona.no/nyheter/Bellona_presenterer_fremtidens_losninger) (12.04.07)
43. Tiltaksanalyse, Tommy Johnsen (DNV Maritime Solutions), foredrag Rederiforbundets NO<sub>x</sub>-seminar, 20.02.2007.
44. NO<sub>x</sub>-reduserende tiltak, Arne Bardalen (DNV), foredrag Sjøfartsdirektoratets NO<sub>x</sub>-seminar Solstrand, 07.03.2007.
45. Disponentsirkulære Norges Rederiforbund, nr. 9/2006.
46. Reduktan urea, presentasjon av Yara v/Lise E. Bjerkvoll. Foredrag Sjøfartsdirektoratets NO<sub>x</sub>-seminar Solstrand, 07.03.2007.
47. <http://no.wikipedia.org/wiki/Emulsjon> (02.05.07)
48. Den nye NO<sub>x</sub>-avgiften, Eli Marie Åsen (Miljøverndepartementet), foredrag Sjøfartsdirektoratets NO<sub>x</sub>-seminar Solstrand, 06.03.2007.
49. Avgift på utslipp av NO<sub>x</sub>-nytt regelverk fra 1. januar 2007, Tore Flette (Toll- og Avgiftsdirektoratet), foredrag Sjøfartsdirektoratets NO<sub>x</sub>-seminar Solstrand, 06.03.2007.
50. [http://www.sjofartsdir.no/no/Publikasjoner/Faktaark/Fakta\\_ark\\_NOx/](http://www.sjofartsdir.no/no/Publikasjoner/Faktaark/Fakta_ark_NOx/) (15.04.07)
51. <http://www.sjofartsdir.no/upload/Fart%C3%B8y%20og%20sj%C3%B8folk/Nox-avgiften/Veiledning%20om%20NOx.pdf> (15.04.07)

52. [http://www.toll.no/templates\\_TAD/CircularLetter.aspx?id=105549&epslanguage=NO](http://www.toll.no/templates_TAD/CircularLetter.aspx?id=105549&epslanguage=NO) (28.04.07)
53. Forskrift om særavgifter-avgift på utslipp av NO<sub>x</sub>
54. Næringslivets NO<sub>x</sub>-fond som alternativ til avgift, Geir Høiby (Seniorrådgiver NHO), foredrag Sjøfartsdirektoratets NO<sub>x</sub>-seminar Solstrand, 06.03.2007.
55. Telefonsamtale med Geir Høiby (NHO) 23.05.2007.
56. <http://www.regjeringen.no/nb/dep/fin/aktuelt/nyheter/2006/Nox-avgift.html?id=439959> (03.05.07)
57. Lav-NO<sub>x</sub> oppgradering, Wichmann og Wärtsilä. Erfaringer og omfang. Hans-Petter Nesse (General Manager Technical Service-Wärtsilä Norway), foredrag Norges Rederiforbund Oslo 20.02.2007.
58. [http://en.wikipedia.org/wiki/Top\\_dead\\_centre](http://en.wikipedia.org/wiki/Top_dead_centre) (25.05.07)
59. Motortekniske forhold, Odd Horgen (Rolls Royce Marine AS), foredrag Sjøfartsdirektoratets NO<sub>x</sub>-seminar Solstrand, 06.03.2007.
60. <http://www.dgc.dk/publikationer/rapporter/data/dual.htm> (25.05.07)
61. Tilgjengelighet og infrastruktur for naturgass, Aksel Skjervheim (Rådgiver Gasnor AS), foredrag Sjøfartsdirektoratets NO<sub>x</sub>-seminar Solstrand, 06.03.2007.
62. Telefonsamtale med Arne Bardalen (DNV) 25.05.2007.
63. Charles E. Baukal, JR: Industrial Combustion, Pollution and Control. Marcel Dekker, Inc., 2004.
64. Møte i NO<sub>x</sub>-gruppen hos KGJS 29.05.07.
65. Telefonsamtale med Einar Arnesen (Sjøfartsdirektoratet) 30.05.2007.
66. Bransjesirkulære Rederienes Landsforening, nr B 10/2007.
67. Befaring med Dr. Ing. Øyvind Melhus (Måleingeniør Ecoxy AS) under målinger på fergen mellom Molde og Vestnes 08.05.2007.
68. Medlemssirkulære Norges Rederiforbund, nr. 65/2007.
69. Samtale med Willy Arne Reinertsen (Ass.VP Gearbulk, KGJS) 01.06.2007.
70. SCR fjerner 90% av NO<sub>x</sub> fra skip! Rapport fra samarbeidsprosjektet om selektiv katalytisk reduksjon (SCR) av NO<sub>x</sub> fra skip i Norge, 1996.
71. Per M. Rosén: Doktoravhandling; Evaporative Cycles-in Theory and in Practise. Institutt for varme og kraftteknikk, Lund tekniske høyskole, Sverige 2000.
72. Trip report-visit to M/S Mariella (H.A.M. powered ferry) by Mitch Obana, 29.09.2003. Notat utlånt av Mohsen Assadi, Professor ved Universitetet i Stavanger.
73. Viking Lines erfaringer av Humid Air Motor (HAM) och Selective Catalytic Reduction (SCR), Ulf Hagström (Teknisk Inspektør Viking Line Abp, foredrag Sjøfartsdirektoratets NO<sub>x</sub>-seminar Solstrand, 07.03.2007.
74. Humid air motor, Jean Luc Bertholom (MAN Diesel SA), foredrag Rederiforbundets NO<sub>x</sub>-seminar, 20.02.2007.
75. Claes Ericson: Licentiate Thesis; NO<sub>x</sub> Modelling of a complete Diesel Engine/SCR System. Avdeling for forbrenningsmotorer, Institutt for Energiteknikk, fakultetet for Ingeniørvitenskap, Universitetet i Lund, Sverige 2007.
76. Målerapport fra målinger ombord MV Bornholm Cement, Ecoxy AS 2007.
77. Tilbud fra Martek Marine til Supt. Int. Are Magnussen (KGJS) angående kontinuerlig målesystem ombord nybygg.

78. Samtaler med Jan Berntzen, VP Prosjektavdeling, KGJS.

79.

<http://www.marinelink.com/Story/W%C3%A4rtsil%C3%A4+Debuts+World%E2%80%99s+Most+Powerful+Engine-204424.html> (10.06.07)