

# **Framtida tekniska lösningar för att uppfylla NECA-kraven - underlagsrapport**

**2016-12-27**

**Project Promotion Services AB**



# Förord

PPS Project Promotion Services AB har fått Trafikanalys uppdrag att i deras slutredovisning av införandet av NECA få en bild, av vilken utveckling avseende teknisk utrustning för kväveoxidreduktion, man kan komma att se på längre sikt.

Uppdraget omfattar att analysera hur framtida teknisk utveckling kan väntas påverka förutsättningar för sjöfarten att hantera NECA-reglerna. Vilka tekniska lösningar framstår som mest sannolika och hur kan kostnadsbilden för dessa komma att utvecklas? Finns det andra faktorer som kan förutses påverka skilda lösningars marknadspotential? Arbetet ska ha ett tidsperspektiv på 25 år (2040). Det ska också relatera till andra parallella krav av relevans, såsom SECA-regler och sannolikt kommande koldioxidkrav.

Arbetet ska beakta relevant litteratur och kompletterande intervjuer ska genomföras med motorleverantörer och med forskare som ligger i fronten av utvecklingen.

I det nedan följande har PPS beskrivit rådande teknikläge, potentiella framtida forskningsinsatser samt kommersiella och marknadsmässiga konsekvenser som detta skulle kunna medföra för svensk industri och svensk sjöfart.

Göteborg 2016-12-27

Thomas Stenhede

Project Promotion Services AB



# Innehåll

<b>Förord</b> .....	<b>5</b>
<b>Sammanfattning</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Inledning</b> .....	<b>11</b>
<b>2 Kväveoxidernas kemi</b> .....	<b>13</b>
2.1    Kväveoxider i förbränningen .....	13
<b>3 IMO:s NECA regler</b> .....	<b>17</b>
3.1    Indelning av marinmotorer .....	17
3.2    NOx-reduktion .....	18
3.3    Motoregenskaper .....	21
3.4    Sammanfattning "Rådande teknisk nivå" .....	21
<b>4 Bränsle</b> .....	<b>23</b>
4.1    LNG.....	23
4.2    Metanol .....	24
4.3    Etanol.....	24
4.4    HVO .....	24
4.5    CNG, DME, LPG och etan .....	24
4.6    Vätgas.....	24
4.7    Eldrift.....	25
4.8    Bränslecell.....	25
<b>5 Forskning och utveckling</b> .....	<b>27</b>
5.1    Farleds- och hamnavgifter .....	27
5.2    Norska NOx-avgifter.....	28
5.3    Finlandstrafiken.....	28
5.4    Zero-vision tool.....	28
5.5    Produkt- och bulkfartyg .....	28
5.6    Hercules EU-projekt .....	28
5.7    Scania och Volvo .....	29
5.8    Nordamerika.....	29
<b>6 Forskningsbehov</b> .....	<b>31</b>
6.1    Kostnadsbild.....	31
<b>7 Förslag till åtgärder</b> .....	<b>33</b>
7.1    Emissionsnivåer och harmonisering .....	33

7.2	Besiktning och verifiering .....	33
7.3	Mätning .....	34
7.4	Efterbehandling.....	34
7.5	Primärmetoder .....	34
<b>8</b>	<b>Marknadsmässiga och kommersiella konsekvenser.....</b>	<b>37</b>
8.1	Marknaden .....	37
8.2	Kommersiella konsekvenser .....	37
8.3	Harmonisering.....	38
<b>9</b>	<b>Slutsatser och rekommendationer .....</b>	<b>39</b>
9.1	Slutsatser .....	39
9.2	Rekommendationer.....	39
<b>10</b>	<b>Litteratur och referenser .....</b>	<b>41</b>

# Sammanfattning

Trafikanalys har gett PPS AB i uppdrag att titta närmare på de tekniska lösningar som hittills använts inom sjöfarten för att minska utsläppen av kväveoxider till luften. För sjöfarten har man använt en trestegsmetod och nu har IMO beslutat om att nya regler skall gälla från 2021 enligt IMO Tier III inom avsatta områden s.k. Nitrogen oxides Emission Control Areas, NECA.

Tack vare trestegsmodellen har man skaffat sig mycket erfarenhet vilka metoder som är framkomliga. I det första steget kunde man uppfylla kraven med motortekniska åtgärder, i den andra räckte det med kylning av förbränningstemperaturen med vatteninsprutning eller avgasåterföring, men för den tredje måste man använda extern efterbehandling med katalysatorer och reagent.

I studien finns en genomgång av varför kväveoxider uppstår och hur man undviker dem i ett förbränningsrum. Denna kunskap är en svensk specialkompetens.

På kort sikt fram till 2021 kan man effektivt uppfylla morgondagens regelverk med SCR-tekniken. Nästa steg 10-15 år är att inom motorn men med vissa bränslen uppfylla inte bara NOx-kraven utan också en rad andra utsläppskomponenter såsom det definieras inom AQI (Air Quality Index) i synnerhet för inlandssjöfarten. Det tredje steget inom sjöfarten fram till 2040 är att använda fossilfria bränsle i första hand alkoholer.

Sjöfarten kräver stora mängder bränslen som lagras ombord. Därför skall bränslet kunna bunkras snabbt och säkert och dessutom tillverkas fossilfritt. En sådan bra kandidat är metanol, som kan tillverkas av väte från vind-el och lämplig koldioxidkälla t ex. från biomassa

För att svensk industri skall kunna leverera utrustning till sjöfarten måste det ske på lika villkor dvs. att regelverken harmoniserar och att inga systemtekniska hinder begränsar utbytet av varor och tjänster.

Svensk industri är mycket framgångsrik i det lägre effektområdet och för att förbli där krävs omfattande forskning kring förbränningsmotorteknik. I de fyra kompetenscentra som finns i landet skall en fortsatt fokusering ske mot alternativa bränslen, förbränningskoncept, katalysator teknik och förbränningskemi.

Gapet mellan grundforskning och industrialisering måste överbryggas genom att ge forskningsinstituten en större roll i att få produkter ut mot tillverkningsindustrin. Detta gäller i synnerhet motorer som har långa ledtider innan de blir mogna produkter som uppfyller allt strängare emissionsprestanda. Bränsleceller utgör också en energiomvandlare som i det lägre effektsegmentet förtjänar en ordentlig genomlysning för att kunna användas i fartyg.





# 1 Inledning

Som framgår av Trafikanalys delrapport blir kraven på sjöfarten allt strängare med de krav IMO ställer på den maritima näringen avseende utsläpp av kväveoxider.

Denna delrapport avser att täcka de områden som står öppna för framtida insatser att tekniskt och kostnadsmässigt uppfylla redares, myndigheters, hälsovård och andra intressenters krav på att minimera den negativa inverkan som utsläpp av kväveoxider åsamkar samhället.



## 2 Kväveoxidernas kemi

För att göra en bedömning av vilka framtida forskningsinsatser som kan bli nödvändig beskrivs nedan rådande kunskapsläge hur kväveoxider bildas.

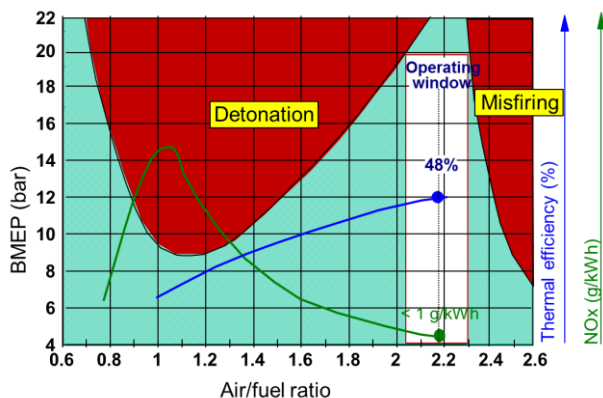
Till skillnad från många andra miljö- och klimatpåverkan ämnen uppkommer kväveoxider i själva förbränningsprocessen. Kväveoxider betecknas oftast som NO<sub>x</sub> vilket är ett samlingsnamn för en rad olika kväveoxidmolekyler NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. De molekyler som bildas i förbränningsmotorer är NO och NO<sub>2</sub> medan de övriga inte omfattas av IMO:s regelverk även om N<sub>2</sub>O kan vara en betydande klimatgas. Nedan kommer således bruket av NO<sub>x</sub> att endast omfatta NO och NO<sub>2</sub>

Mycket möda har lagts ned på att identifiera hur NO<sub>x</sub> bildas och idag är den bästa förklaringsmodellen den s.k. Zeldovich mekanismen. Atmosfären innehåller 78 vol.-% molekylärt kväve N<sub>2</sub>, 21 vol.-% O<sub>2</sub>, 1 vol.-% argon (Ar), 400 ppm CO<sub>2</sub> samt varierande mängd vattenånga. Vid normalt lufttryck 101,3 kPa och normal temperatur 0 °C är luftkväve att betrakta som en inert gas, vilket betyder den har mycket svårt att ingå föreningar med andra ämnen. I en förbränningsmotor råder helt andra villkor dvs. under själva energifrigörelseförloppet är trycket högt ca 20 MPa och temperaturen mycket hög ofta över 2000 °C. Vid dessa betingelser bildas en rad fria radikaler som leder till att NO<sub>x</sub> bildas och kvarstår när processen kyls.

Zeldovich delade in kväveoxidbildningen i tre kategorier 1. Termisk NO<sub>x</sub> 2. Bränsle-NO<sub>x</sub> 3. Prompt-NO<sub>x</sub>. Termisk NO<sub>x</sub> är, som beskrivits, betingat av villkoren inne i förbränningsmotorn (temperatur, tryck och uppehållstid), medan bränsle-NO<sub>x</sub> uppkommer när kvävet i bränslet redan är bundet i andra molekyler. Detta uppträder när man använder biobränslen när man i samband med gödsling av grödor tillför kväve. Vid RME i dieselmotorn bildas mer kväveoxider än vid fossil diesel. Prompt-NO<sub>x</sub> är inte tillämpbar för förbränningsmotorer.

### 2.1 Kväveoxider i förbränningen

Det mest önskvärde vore att NO<sub>x</sub> överhuvudtaget inte uppstod i förbränningsprocessen men som ofta finns motverkande faktorer. För att uppnå hög verkningsgrad och stort effektuttag eftersträvar man just högt tryck och mycket hög temperatur. Detta leder till kompromisser och man kan då acceptera en viss mängd NO<sub>x</sub>. Nedanstående diagram visar hur motverkande faktorer bidrar till NO<sub>x</sub> bildningen.



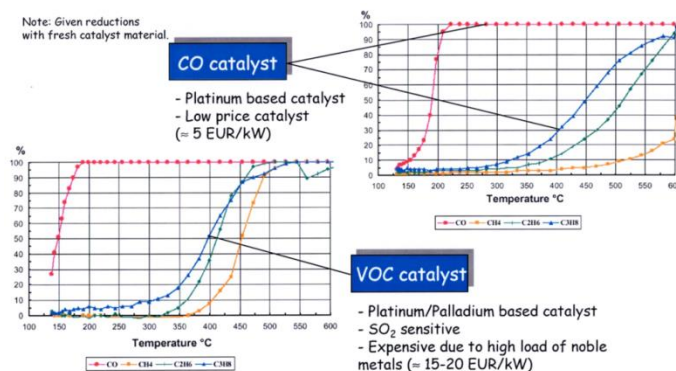
Figur 1 Förbränningsegenskaper i en typisk gasdriven magermotor

För att beskriva hur med- och motverkande faktorer samverkar kan detta illustreras med ett diagram med mängden luft som tillförs förbränningsrummet. Det valda fallet är en fyrtakts ottomotor där endast gas används som bränsle. Vid ett luft/bränsle-förhållande (air/fuel ratio) vid ett finns precis så mycket luft att all syre förbrukas i förbränningen (stökiometrisk förbränning). Mäter man syrehalten i avgaserna skall dessa vara noll. I diagrammet kan man utläsa att BMEP (break mean effective pressure), som är ett mått på effektuttaget är 9 bar och att NO<sub>x</sub> (grön kurva) når ett maximum samt att verkningsgraden är låg (blå kurva).

CNG-drivna bilar har detta som sin arbetspunkt. Varför väljer man då en så dålig arbetspunkt? Jo då kan man med trevägskatalysatorer reducera NO<sub>x</sub> till N<sub>2</sub>, oxidera CO till CO<sub>2</sub>, och oxidera oförbrända kolväten till CO<sub>2</sub>. Priset man betalar är låg verkningsgrad och lågt effektuttag. Varför kan man inte öka kompressionen och få mer effekt? Bränslet i en ottomotor blandas redan i insuget med luft varvid motorn lätt kan gå i knack, vilket är förödande. Alltså en bra kompromiss!

Av diagrammet framgår att det finns en god utvecklingspotential genom att flytta sig till höger med ökat luftöverskott. Ett problem som då tillstöter är att en trevägskatalysator inte fungerar vid luftöverskott och därmed blir NO<sub>x</sub>-utsläppet högt.

Vid utvecklingen av gasmotorer för LNG-drift låter man luftöverskott bli ca 2,2 och då kan man träffa en arbetspunkt som ger en rad fördelar. Höjer man både kompression och lufttillskott kan effektuttaget ökas och verkningsgraden höjas rejält samtidigt som NO<sub>x</sub>-bildningen minskar. Priset man nu betalar är förhöjt CO-utsläpp och förhöjd oförbrändhalt av kolväten. CO oxiderar lätt i en passiv oxidationskatalysator medan det blir svårare att få bort kolväten.



Figur 2 Reduktionsgrad hos oxidationskatalysatorer

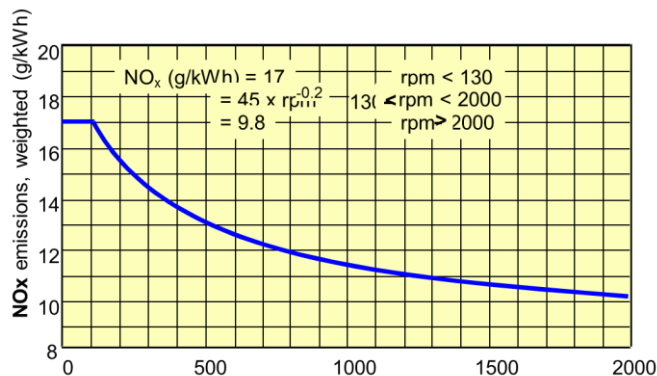
I fig. 2 framgår hur svårt det kan vara att få bort oförbränt metan som är en mycket potent klimatgas, medan CO lätt oxideras till CO<sub>2</sub>. Metan kräver både hög temperatur och exklusivt katalysatormaterial för att omvandlas effektivt.

Med dieselmotorer är det annorlunda eftersom bränslet sprutas när kolven står i sitt övre dödläge och bränslet kompressionsantänds. Tack vare den höga förbränningstemperaturen i flamfronten blir utbränningen av CO och kolväten bra men mycket NO<sub>x</sub> bildas. Risk för knockning finns inte eftersom endast luft komprimeras. Även en dieselmotor arbetar med höga luftöverskott ca 2,3 för en fyrtaktsmotor och närmare 3 för en tvåtaktsmotor.



## 3 IMO:s NECA regler

I huvudrapporten finns IMO:s framtida regler beskrivna och illustrerade men för forskningsändamål behöver de beskrivas mer ingående.



Figur 3 IMO:s NECA förslag från år 2000

I fig. 3 illustreras maximal NO<sub>x</sub> utsläpp som en funktion av motorens varvtal på utgående axel och inte motoreffekten. Detta har ställt till en del huvudbry då lågvarviga motorer kan få släppa ut avsevärt mer än högvarviga eftersom lågt varvtal leder till långa uppehållstider och därmed gynnas bildningen av termisk NO<sub>x</sub>.

### 3.1 Indelning av marinmotorer

Förbränningsmotorer som används inom sjöfartsnäringen är mycket varierande både avseende användning och storlek. Någon form av indelning måste göras eftersom ursprunget av dem skiftar t ex stycketillverkning eller mycket stora serier. Indelningen görs i effektklasser och motorer för fritidsbåtar omfattas inte.

- I. 0-100 kW med ett varvtal 1500-3000 rpm i fyrtaktsutförande, där gasolja är bränsle. Bensinmotorer används inte inom sjöfarten på grund av bränslets låga flampunkt.
- II. 100-5000 kW med ett varvtal 900-2100 rpm fyrtaktsutförande, där gasolja är bränslet men tjockolja kan förekomma.
- III. 500-30000 kW med ett varvtal 400-1000 rpm i fyrtaktsutförande där tjockolja är huvudbränslet men gasolja kan förekomma.
- IV. 1500-100000 kW med ett varvtal 50-250 rpm i tvåtaktsutförande för tjockolja.

Kategorierna 1 och 2 kallas ofta högvarviga motorer (high speed), kategori 3 för medelvarvmotorer (medium speed) och 4 för långsamgående (slow speed). Bränslet till marinmotorer är kopplat till dess viskositet och för vanligt dieselbränsle som används i fordon brukas gasolja (marine gas oil), marine diesel oil (MDO) är ett destillat ett något tjockare bränsle. Ibland ser man light fuel oil (LFO) istället för MDO. Heavy fuel oil (HFO) är det

vanligaste marina bränsle oftast med en viskositet på 380 cSt och är en restprodukt från raffinaderiet.

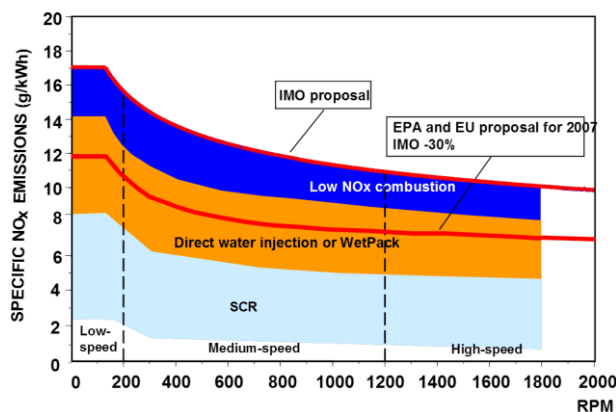
## 3.2 NOx-reduktion

Det bästa vore således att minimera NOx-bildningen redan i förbränningsprocessen alternativt efterbehandla rökgaserna.

### Primära metoder

De enskilda företagen har utvecklat en rad metoder för att minimera NOx-bildningen genom omkonstruktioner av motorn eller genom vatteninsprutning.

De mest effektiva konstruktionsåtgärderna har varit att öka insprutningstrycket och utveckla nya munstycken så bränsledropparna blivit mer finfördelade med ökad atomisering. Härigenom blir antändningen mer utspridd och flamfronten mindre påtaglig. Temperaturen i flamfronten minskar och enligt Zeldovich mekanismen minskar förbränningstemperaturen och därmed NOx-bildningen. Tyvärr försämras verkningsgraden något. Andra metoder är fördröjd insprutning, kylning av spolluften i kombination med s k Miller-timing eller ökad kompression.



Figur 4 IMO:s NECA förslag från år 2007 Tier II

I fig. 4 visas hur man de senaste tjugo åren stegvis kunna reducera NOx-bildningen genom dels motortekniska åtgärder dels genom efterbehandling. Den övre röda linjen visar Tier I och nedre Tier II. Motortekniska åtgärder räckte bra för att komma under Tier I men för att komma ner mot Tier II krävs ytterligare åtgärder.

Då har det ofta blivit aktuellt med att tillföra vatten i olika former och på olika ställen i motorn.

I huvudsak finns det tre olika processer där vatten skall åstadkomma en kylande påverkan på förbränningen:

- I. Vatten inblandas i bränslet,
- II. Vatten sprutas direkt in i cylindern via injektorn,
- III. Vatten tillförs förbränningsluften.

#### Vatten inblandat i bränslet

Vatten är inte lösligt i olja men med emulsionsmedel kan man få en dispersion där vattendroppar kan fördelas jämt i blandningen. Metoden är känd sedan länge och provas i



olika omgångar i synnerhet från bränsleleverantörer som bereder blandningen. Resultaten visar att man kan nå en halvering av NO<sub>x</sub>-utsläppen och att man får en förhöjd bränsleförbrukning. Tekniken bygger på att vattnet i bränslet förångas och därmed minskar förbränningstemperaturen. Inblandningen uppgår till några procent av bränslemängden.

#### *Vatteninsprutning i cylindern*

Direktinsprutning (Direct water injection) av vatten kan användas via kombinerade insprutningsmunstycke ett för bränsle ett för vatten. Därmed kan mängden och tidpunkten för vatteninsprutning äga rum oberoende av varandra. Vatten sprutas in före bränslet och vattnet förångas med påföljande NO<sub>x</sub>-reduktion. Vattenkvaliteten är kritisk och stora mängder måste evaporeras ombord. Även här kan man uppnå en halvering av NO<sub>x</sub>-bildningen. Praktisk tillämpning ombord kräver förhöjd evaporeringskapacitet, medför korrosion i cylindrarna och ökad bränsleförbrukning.

#### *Vatten i förbränningsluften*

Vatten kan också tillföras förbränningsluften innan den går in i cylindrarna. Det finns flera system på marknaden t ex HMI (Humid air injection) och WetPack. Lufttemperaturen direkt efter turboladdaren är 150-200 °C och vid vatteninjicering evaporerar vattnet. Luften passerar en laddluftkylare och en del av vattnet återkondenserar som vattendroppar. Via spillluftsbältet leds luften till cylindrarna och förbränningstemperaturen sjunker. I praktiken har det visat sig att laddluftkylarna måste utföras i rostfritt samt att spillluftbältet måste ytbehandlas för att minska korrosionsskador. Vattnet måste ha mycket god kvalitet om den del som återkondenserar ska återanvändas. När vattnet återanvänds ökar dess salthalt vilket medför krav på noggrann kontroll för att undvika korrosion i motorn. Även här ökar bränsleförbrukningen något.

Dessa tre processer med vattensinsprutning har testats under mer än tjugo år och använts med begränsad framgång. Generellt kan sägas att NO<sub>x</sub>-utsläppen minskar med 20-50%. De kan uppfylla Tier II kraven men ingen av dem kan förväntas möta framtida Tier III krav.

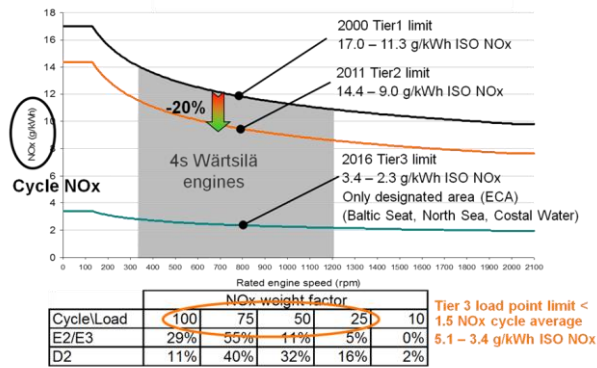
### **Avgasrecirkulation**

Lastbilsindustrin har med framgång tillämpat avgasrecirkulation och kunnat uppfylla Euro 5 kraven vilka i huvudsak motsvara 2 g/kWh NO<sub>x</sub> inklusive partiklar. Teoretiskt skulle det vara möjligt att även för större motorer kunna tillämpa denna teknik. Principen bygger på att en del av utgående avgaser med ett syrenehåll på ca 12% återförs och blandas med ingående förbränningsluft. Avgaserna är mycket varma och måste kylas innan de blandas, vilket medför stora värmexlaren där sjövattnet används som kylmedel och sänker avgastemperaturen till omgivningstemperatur. Uppemot en tredjedel av avgaserna kan återföras, vilket totalt leder till ett omfattande rörarrangemang med ett komplext reglersystem. Det högre CO<sub>2</sub>-innehållet i förbränningsluften med hög värmekapacitet ger långsammare och kallare förbränning med lägre NO<sub>x</sub>. Verkningsgraden påverkas inte. Motorer som drivs med HFO kan inte använda avgasrecirkulation eftersom svavlet och andra ämnen ökar korrosionen i motor och värmexlaren. Fartygets elförbrukning väntas öka med tillkommande cirkulationspumpar.

Som framgår är det med primärmetoder på nuvarande nivå inte möjligt nå Tier III utan då blir efterbehandling ett alternativ.

New emissions requirements impact on fuel consumption and smoke

Revised Marpol Annex VI



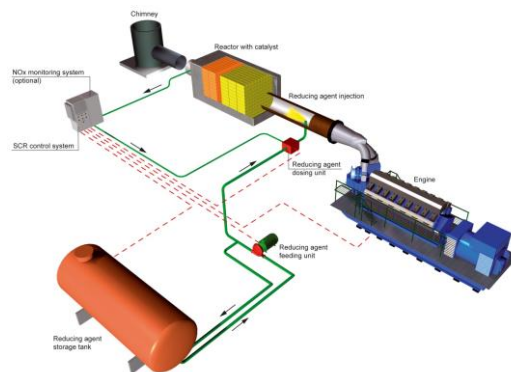
Figur 5 IMO NECA-regler efter 2021

Fig. 5 ger en bra illustration till IMO Tier III kraven för nybyggen efter 2021. Som framgår har man sänkt Tier II-kraven med ca 20 % från Tier I. Kvar finns varvtalberoendet så att en långsamgåendemotor (100 rpm) får släppa ut betydligt mer än en snabbgående 14 g/kWh mot ca 9 g/kWh för en snabbgående (1000 rpm). För Tier III har reglerna skärps betydligt, där varvtalsberoendet nästan upphört. Nu talar man om NOx-nivåer på ca 2 g/kWh, en nästan 80 %-ig reduktion. NOx-bildningen beror inte bara på varvtal utan även på motorns belastning, varför man inför viktsfaktorer hur mycket en motor går på olika belastningar. E2/E3 är för direktdriva motorer medan D2 är för motorer med konstant varvtal.

För att möta dessa nya strängare krav kan i dagens kunskapsläge bara katalysatorteknik eller bränslebyte bli aktuellt.

Efterbehandlingsmetoder

Avgaserna leds till en katalysator där kväveoxiderna reduceras till molekylärt kväve.



Figur 6 Selective catalytic reactor (SCR) för deNOx

SCR har blivit ett begrepp inom katalysatortekniken för de-NOx. Metoden bygger på att man tillför en reagent oftast urea i vattenlösning, som lagras i en tank. Eftersom avgaserna är varma förångas vattnet och urean (CO(NH2)2) ombildas till ammoniak (NH3), som reagerar med NOx molekylerna till kväve (N2). I fig. 6 framgår schematiskt ett SCR arrangemang där urea pumpas och doseras i en mixer för att få en homogen blandad avgas innan avgaserna går in till katalysatorn där reaktionen äger rum. Alla komponenter är skrymmande. Redan mixern, som placeras direkt efter injektorn, kan vara tre meter lång och en halv meter i diameter utan isolering för att få god omblandning. Katalysatorn är lika lång och något

tjockare. Förutom SCR placeras ofta en oxidationskatalysator för att få bort ammoniaköverskott (slip) och CO-oxidation. Denna utrustning skall samplaceras med ljuddämpare och panna för värmeåtervinning.

Urea används som reagent för ammoniakgenerering. Urea är ursprungligen ett gödselmedel framställt från naturgas i en reformeringsprocess. Därmed blir urea en del av fossilsamhället och skall räknas med i bränslets klimatpåverkan. Beroende på graden av NO<sub>x</sub>-reduktion blir ureaförbrukningen inte försumbar.

För fartyg med flera motorer används normalt en katalysator per motor. Samtidigt skulle man kunna tänka sig en gemensam katalysator för dessa. I praktiken har det visat sig svårt att optimera storlek och säkerställa att avgaser inte går bakvägen till motorer som inte är igång varför detta inte är en attraktiv konfiguration. Avgaspanna och ljuddämpare kan dock samplaceras för att vinna utrymme.

### 3.3 Motoregenskaper

#### Fyrtaktsmotorer

Avgastemperaturen från en fyrtakts dieselmotor varierar mellan 350-450 °C vilket är en gynnsam temperatur för SCR-systemet och en konverteringsgrad upp till 95 % är möjlig vid nyinstallation och optimal dosering av urea. I praktiken varierar avgastemperaturen och vid låglast kan konverteringen sjunka, svavlet i bränslet försämrar katalysator, katalysatorn åldras om doseringen är felställd. Reglersystem ombesörjer att doseringen blir optimal för att uppfylla utsläppskraven.

#### Tvåtaktsmotorer

Tvåtaktsmotorn är den klart vanligaste motortypen inom sjöfarten tack vare sin höga verkningsgrad, drivs med billig tjockolja och låga varvtal för fast propeller. Avgastemperaturen blir följaktligen låg 250-350 °C vilket är i lägsta laget för att använda SCR-teknik. Idag används oftast HFO med ett svavelinnehåll upp till 3,5 % svavel vilket är fördödande för katalysatorns livslängd (svavelförgiftning). För att få en katalysator att fungera måste den placeras mellan avgasernas cylinderavlopp och turboladdaren där temperaturen är 50-100 °C högre. Därmed kan SCR-tekniken tillämpas. Installationen blir dock komplex och utrymmeskrävande men är tekniskt möjlig. Kommer SECA-reglerna med max 0,5 % svavel i bränslet att införas kan man nog få katalysatorernas livslängd att öka.

### 3.4 Sammanfattning "Rådande teknisk nivå"

Det är redan idag tekniskt möjligt att uppfylla Tier III-kraven. Eftersom regelkraven kommer först efter 2021 för nybyggen krävs en omfattande planering av fartygens generalarrangemang då all utrustning skall få plats i maskinrum och kapp (utrymmet upp genom skorsten). Kommer dessutom skrubbers för avsvavling att installeras ställs än högre krav på utrustningen. Eftersom deNO<sub>x</sub>-katalysatorn måste placeras före skrubbern pga temperaturen kan man få målkonflikter med svavlet i bränslet.

Alla dessa delsystem som tillkommer kommer att dra en avsevärd mängd ström för pumpar varför fartygen kräver större elgenerering för eget bruk och därmed försämras totalverkningsgrad.

Framdrivningsmaskineriet i ett fartyg är en betydande investering omfattande motor, propeller, växlar samt hjälpsystem för kylvatten, bränsle, pannor etc. Fartygets kostnader kan enkelt indelas i avskrivningar, bränsle och drift och underhåll (O&M, operation and maintenance). Detta varier mycket beroende på fartygstyp passagerarfartyg, ropax eller tank-och bulk. Därmed blir varje fartyg unikt. I en första approximation kan kostnadsfördelningen vara två tredjedelar bränsle, en sjättedel avskrivningar och en sjättedel O&M. Bränslekostnaderna är mycket varierande och redaren väljer det bränsle som är billigast dvs. oftast HFO med högsvavelhalt. Det blir därmed mer fördelaktigt att installera svavelreningsutrustning som kan skrivas av snabbt. Samma gäller för deNOx-utrustning. Trots en mer omfattande installation för deNOx-utrustning bedöms installationskostnaderna endast utgöra ett marginellt tillskott för ett nybyggt fartygs totalinvestering.

Installeras både deSOx och deNOx i samband med ett nybygge blir marginalkostnaden måttlig medan en "retrofit" blir avsevärt mer betungande. Däremot ökar O&M-kostnaden för kemikalier och urea samt katalysatorbyte och underhåller.

## 4 Bränsle

Valet av motorbränsle kan bli av avgörande betydelse om deNO<sub>x</sub> inte kan samverka med andra utsläpp av andra miljö- och klimatgaser från fartygen. Dessutom måste motorbränslet visas kunna uppfylla IMO:s Marpol Annex VI krav avseende flampunkter och genom en omfattande riskanalys.

Sedan ångan försvann från fartygens framdrivning har dieselmotorn varit helt dominerande tack vare hög verkningsgrad, använder billigt bränsle HFO, direkt driven propeller och bra tillförlitlighet. Detta har samverkat till att tvåtaktsmotorn har varit så framgångsrik. För passagerarfartyg, ropax, och mindre fartyg har fyrtaktsmotorn varit dominerande i det lägre effektområdet och dess lägre krav på mindre utrymme.

Dieselpincipen med kompressionsantändning (CI compression ignition) är helt dominerande medan ottomotorer med tändstift (SI spark ignited) endast funnits på fritidsbåtar.

Med de ökande kraven på lägre miljöpåverkan kan nya motortyper bli aktuella eftersom dieselmotorn är en betydande NO<sub>x</sub>- och partikelskapare. Otto-motorn, där luft och bränsle blandas i kompressionsslaget, visar lägre NO<sub>x</sub>- och partikelgenerering och har idag nästan samma höga verkningsgrad som dieselmotorn

### 4.1 LNG

Kraftindustrin har sedan länge använt gas till elproduktion med både gasmotorer och gasturbiner och visat upp mycket låga NO<sub>x</sub>-utsläpp. När LNG-transporten ökade kunde man installera fartygsmotorer som kunde använda både gas och olja som bränsle. Gasen kommer från avkoket i LNG-tankarna vid lågt tryck och bränns i dual-fuel motorer. Dessa DF-motorer arbetar enligt otto-principen vid gasdrift och dieselpincipen vid oljedrift.

Vid kraftverksapplikationer följer man de tyska TA-luftnormerna och då skall NO<sub>x</sub>-emissionerna understiga 1,2 g/kWh dvs. halva Tier III-kraven för sjöfarten. LNG i fartygsmotorer har blivit framgångsrikt tack vare man uppfyller SECA-kraven och att de även uppfyller framtida partikel- och NO<sub>x</sub>-krav. Det är då inte bara LNG-tankers som utnyttja tekniken utan även färjor, produktankers, supplyfartyg etc. De fartyg som använder LNG i dieselprocess kan sänka NO<sub>x</sub>-utsläppen men har ännu inte demonstrerat att man kan uppfylla Tier III-kraven utan kräver efterbehandling av EGR eller SCR. Tvåtaktsmotorer med lågtrycks gassystem i otto-mode kan uppfylla Tier III redan idag.

LNG är idag godkänt av IMO som fartygsbränsle.

I framtiden kan vi förvänta oss att fartygsbränslet även skall bidra till mindre utsläpp av klimatgaser t ex CO<sub>2</sub> och metan. Att framställa LNG fossilfritt är en utmaning i sig och lämnas utanför denna skrivning.

## 4.2 Metanol

Metanol är i sig ett utmärkt motorbränsle och många försök har gjorts för att introducera bränslet på marknaden utan egentlig framgång. Nu när kraven ökat både avseende svavelfrihet och fossilfri framställning av bränslet har intresset ökat eftersom metanolen liksom etanol kan tillverkas i stora kvantiteter och är logistiskt enkelt. De försök som hittills gjort indikerar att metanol i dieselprocess kanske kan uppfylla Tier III-kraven medan metanol i otto-process med stor sannolikhet på samma sätt som etanol möter kraven.

Metanol behandlas f n inom IMO för att bli klassat som ett säkert fartygbränsle.

## 4.3 Etanol

Etanol är en alkohol liksom metanol. Den är ett utmärkt motorbränsle som testas på land både för otto-process som E85 och i dieselprocess som ED95. Etanolen är klassad som fartygs på samma sätt som metanolen och det pågår utvecklingsarbete att kunna använda ren metanol eller etanol i otto-process för mindre motorer till kust- och färjetrafik.

## 4.4 HVO

HVO (hydrogenerade vegetabiliska oljor) är ett fossilfritt dieselbränsle som uppvisar samma förbränningsegenskaper som MGO avseende NO<sub>x</sub>-utsläpp. IMO har inga särskilda synpunkter på HVO utan det blir tillgång och efterfrågan som styr om HVO skall bli ett maritimt bränsle.

## 4.5 CNG, DME, LPG och etan

CNG (Compressed natural gas), DME (Dimethyl ether), LPG (Liquified petroleum gas/gasol) och etan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) är alla gasformiga bränslen vid normalt tryck (101,3 kPa) och temperatur (0 °C) och måste lagras i trycktankar ombord. Idag finns etandrivna fartyg med samma förbränningsegenskaper som LNG. DME och LPG är svåra gasbränslen ombord på fartyg pga dess densitet.

CNG ger låga NO<sub>x</sub>-utsläpp eftersom det liknar naturgas och framställs fossilfritt men måste lagras under mycket högt tryck ca 25 MPa och ger korta drifttider.

Av dessa bränslen är det bara etan som är preliminärt godkänt som fartygsbränsle.

## 4.6 Vätgas

Vätgasen studeras mycket av fordonsindustrin som ett möjligt framtida fossilfritt bränsle. Vätgasen skulle då användas tillsammans med bränsleceller och ge helt NO<sub>x</sub>-fria utsläpp. Begränsade försök har gjorts i förbränningsmotorer bl a wankel. Problemet med väte i en

motor ligger i dess låga metanindex (jfr oktantal) vilket gör luft/väteblandningen mycket reaktiv vilket leder till låga verkningsgrader. Även denna förbränning leder till någon form av NO<sub>x</sub>-bildning men f n okänt. Vätgasen lagras under mycket högt tryck 70 MPa eller vätgastankar nedkylda till -253 °C, vilket leder till kort räckvidd.

Tanken med vätgas är dess användning i bränsleceller.

## 4.7 Eldrift

El är en väl etablerad framdrivningsteknik hybridteknik (u-båtar) och dieselelektriska maskiner (isbrytare, färjor). De har då speciella applikationer för att uppnå höga vridmoment tack vare elmotorns egenskaper. För kommersiella tank- och bulkfartyg har det inte gett något mervärde utan bara varit en tillkommande investering med försämrade verkningsgrad. Direkt drift av linfärjor för korta avstånd används med fördel.

Från NO<sub>x</sub>-synpunkt vore eldrift en fördel eftersom motorer går med konstant varvtal och det blir som ett kraftverk på land med en arbetspunkt och vridmomentet regleras med propellern. Den mest gynnsamma konfigurationen blir i hybriddrift där batteriet laddas antingen från land eller med kraftaggregat ombord. Kraftaggregatet körs bara vid en driftpunkt full last och konstant varvtal för att ladda batterierna. Batterierna utgör primärkällan och kraftaggregatet är redundans med korta laddningstider. I en sådan konfiguration kan med Tier III-regler de totala NO<sub>x</sub>-utsläppen minskas radikalt. Ett antal sådana projekt finns genomförda men fortfarande återstår utvärderingar.

Kustrafiken och inlandssjöfarten skulle därmed kunna bidra till låga NO<sub>x</sub>-utsläpp på samma sätt som lastbilar minskat sina.

## 4.8 Bränslecell

Stora förhoppningar har ställts på bränsleceller men det visar sig att kostnaderna blir höga trots bra verkningsgrad och ringa NO<sub>x</sub>-utsläpp.

På fartygssidan har några pilotanläggningar byggts med SOFC (solid oxide fuel cell) där bränslecell matats med vätgas från reformer (bränsleomvandlare) som i sin tur använt metanol som primärbränsle. I ett annat projekt har LNG förts till reformer för vätgasproduktion. I en MCFC (Molten carbonate fuel cell) omvandlas vätet till el. Dessa bränsleceller uppvisar verkningsgrader runt 50 % men tar man hänsyn till efterföljande omvandlingsförluster i elsystemet blir verkningsgraden som en förbränningsmotor. Från reformen blir NO<sub>x</sub>-utsläppen mycket låga.

En på sikt intressant bränslecell är den med metanol direktdrivna bränslecellen (DMFC Direct driven Methanol Fuel Cell), som finns redan idag att köpa dock endast i låga effektområden (<5 kW). Fördelen ligger i att metanol och vatten tillförs direkt utan omvägen via vätgasreforming.

I dagsläget vet man inte kostnaderna och om exklusiva katalysatormetaller behövs. Blir behovet av platina och andra ädelmetaller stort kommer det att påverka kostnaderna i betydande utsträckning. Verkningsgraden tycks f.n. vara lägre än vätgasdrivna bränsleceller

men med utvecklingsinsatser kan prestanda höjas och man skulle åtminstone i det lägre effektområdet få en kväveoxidfri energiomvandlare för båtar.



## 5 Forskning och utveckling

Av ovanstående framgår att det finns många möjligheter att uppfylla NOx-utsläppen enligt IMO:s Tier III-krav till 2021. Erfarenheterna från SECA-kravens genomförande den 1 januari 2015 leder till eftertanke eftersom det slutliga beslutet togs så sent som 2013.

Utrustningstillverkarna var mycket villrådiga avseende industrialiseringen då produkterna är mycket kostsamma. Pilot- och demonstrationsprojekt ombord på fartygen måste genomföras för att framgent kunna ställa prestandagarantier på levererad utrustning till användarna.

NOx-utsläppen måste hanteras i sammanhanget av att många andra miljöstörande och klimatpåverkande gaser måste reduceras. Innehållet i sådana avgaser är t ex svavel, koloxid, metan, VOC (volatile organic compounds), partiklar. Andra parameterar kan vara verkningsgrad, energiåtervinning, kemikalieanvändning, utbildning, drift- och underhåll, bunkring, hamnfaciliteter för att nämna några.

Med tanke på att det finns cirka hundratusen fartyg i världen och fartygens livslängd oftast är över tjugo år står sjöfartsnäringen inför en gigantisk omställning. Det ligger utanför denna skrivning att fundera över detta men kommande NECA-regler måste beakta en rad kringparametrar när man skall börja bygga fartyg för framtida krav.

Vi kan redan idag bygga fartyg som uppfyller Tier III-kraven t ex efterbehandling med SCR och EGR eller bränsle för motorer med otto-teknik.

Till slut blir det användaren dvs. redaren som står inför det slutliga valet när han skall beställa ett fartyg som skall vara säkert, konkurrenskraftigt och att fartyget kan ha ett attraktivt andrahandsvärde.

Sverige har faktiskt skaffat sig en bra position genomförtseende ombyggnader och nybeställningar av ny teknik och erfarenheter av borde användas i det fortsatta arbetet.

Nedan några exempel.

### 5.1 Farleds- och hamnavgifter

Incitamentet till investering i deNOx låg i införandet av farleds- och hamnavgifterna. Ett flertal fartyg installerade SCR-ombord i första hand färjor som kontinuerligt opererar i Sverige t ex på Danmark, Tyskland och Finland. Dessa använde i huvudsak HFO numera MGO som bränsle samtidigt som ett flertal tillverkare etablerades i landet t ex DEC Marine och GESAB. För att erhålla NOx-rabatter räcker det med max 0,5 g/kWh dvs. väsentligt lägre än NECA-kraven

På Stora Enso's S-borg båtar installerades tre SCR-system för tvåtaktsmotorer samt på Transatlantics tre fyrtaktsbåtar.

## 5.2 Norska NOx-avgifter

Norge införde enligt Göteborgs-protokollet en särskild NOx-avgift för sin inrikestrafik. Avgiften fonderades och bekostade olika de-NOx-projekt. Bl a finansierades Skärhamns registrerade Bit Viking:s ombyggnad till LNG-drift eftersom hon opererar helt i norska vatten. För att minimera avgiften kan man uppnå 0,2 g/kWh.

## 5.3 Finlandstrafiken

Ålandsbaserade Vikinglinjens färja Viking Grace är ett nybygge som drivs med LNG som försörjer gasdrivna DF-motorer. Tekniken valdes i första hand för SECA men man sneglade generellt på miljövänligheten. Här kan man uppnå som bäst 1,2 g/kWh.

## 5.4 Zero-vision tool

ZVT är ett svenskt utvecklingsforum för fartyg finansierat med medel från bl a EU med målsättningen att i första hand uppfylla SECA-reglerna. Tre delprojekt har genomförts 1. LNG-drift 2. Metanoldrift 3. Skrubberteknik.

LNG-delen ledde till utveckling och bygge av lågtrycks tvåtakt gasmotorer, en fyrtakt DF-motor, ombyggd färja till metanol, samt ett fartyg med skrubber. LNG-byggena för tvåtakt kan sannolikt klara Tier III redan idag, medan metanolen kanske kan, dock finns redan SCR på denna färja.

## 5.5 Produkt- och bulkfartyg

Under de senaste åren har några svenska redare byggt om och beställt fartyg som kan uppfylla Tier III, antingen genom att installera SCR eller helt enkelt utrusta dem med LNG-drift. Samtliga förväntas ligga under 1,2 g/kWh

## 5.6 Hercules EU-projekt

Inom EU genomförs Hercules-projektet, som är ett marinmotorprojekt, med ca 40 deltagande parter från industrin och akademier. Projektet är mycket ambitiös och brett och drivs i huvudsak av de stora motortillverkarna MAN och Wärtsilä. En del i projektet syftar till att uppnå ultralåga utsläpp från fartygmaskiner. Mycket av som nämnt ovan ingår i projektet. Den ende svenske deltagaren är Lunds universitet som medverkar i mätningar av förbränningsrummet. En viktig del är att förstå förbränningskemin och hur man kan minimera NO-bildningen.

## 5.7 Scania och Volvo

Industrigrupperna Scania och Volvo är fyra av de enda tillverkarna av marinmotorer i Sverige dock begränsade till motoreffekter under 1000 kW. Detta är ett betydande marknadssegment i antal motorer för kustsjöfart och inre vattenvägar. Liksom lastbilar kan deNOx-tekniken användas för marina applikationer. NO-utsläppen regleras inte av IMO utan av särskilda regler för inre vattenvägar som motsvarar Tier III/Euro 5. Marinmotorer utgör en mycket liten del av den totala motorproduktion men är som nischprodukt väsentlig. Så länge bränslet är svavelfritt kan EGR-tekniken tillämpas men används svavelrika bränslen måste SCR nyttjas begränsad livslängd till trots. Scania har till svensk kustredare levererat en Tier III-installation med SCR-teknik

## 5.8 Nordamerika

Den Nordamerikanska kusten med Sjöarna (USA och Kanada) är redan idag NECA. Detta påverkar den svenska sjöfartsnäringen eftersom fartygen måste utrustas så de kan operera på denna marknad. Om svenska fartyg kölsträckta efter 2016 vill operera inom detta område måste de uppfylla IMO Tier III eventuellt EPA Tier 4.



## 6 Forskningsbehov

Genom projekt ovan finns en bra utgångspunkt för fortsatt utveckling hur man skall förbättra användandet av deNOx-tekniken ombord avseende investeringskostnader och driftkostnader.

### 6.1 Kostnadsbild

Det är därför angeläget att utröna vilka deNOx-metoder som är mest kostnadseffektiv. Sådana studier har genomförts men med mycket stor spridning. Eftersom flertalet SCR-installationer gjorts kan i samarbete med redare och leverantörer uppnå ett noggrannare resultat. Därmed kan både investering och driftkostnader säkerställas. Gjorda installationer är ombyggnad men här talar vi om merkostnad för nybyggen.

Tre referensprojekt har under de senaste fem åren genomförts för att i första hand uppfylla SECA-kraven men även NECA-kraven kan uppfyllas.

#### *Bit Viking:*

Bit Viking är en produkttanker som ägs av Tarbit i Skärhamn. Hon byggdes med ett konventionellt dieselmaskineri men konverterades till att använda LNG för att operera på norska vatten och att uppfylla norska krav.

Det är en omfattande retrofit där både motor och bränslesystem anpassades till LNG och NOx-nivån förväntades bli 1,2 g/kWh vilket är under Tier III och ge låga NOx-avgifter. Investeringen uppgick till ca 10 MEUR vilket motsvarar ca 1000 EUR/kW. Ombyggnaden finansieras av norska NOx-fonden, rederiet och leverantörerna.

#### *Viking Grace:*

Viking Grace är ett nybygge i den meningen att hon utrustades redan från början med låga utsläpp av svavel och NOx dvs ingen ombyggnad. Det fördes långa diskussioner mellan Vikinglinjen och finska staten om bidrag för att installera LNG-drift. Det slutade med att Vikinglinjen fick ett bidrag som motsvarar merkostanden för LNG-drivs i jämförelse med HFO-drift. Så vitt bekant är kostnaden för merinstallationen 15-20% för framdrivningsmaskineriet. NOx-nivån ligger på ca 1,2 g/kWh med DF-tekniken.

#### *Tärnsund:*

M/s Tärnsund med systrar ägs av Tärntank på Donsö och är en kemikalietanker utrustad med en tvåtakts dual-fuel motor för LNG-drift. Fartyget ingick som modellfartyg inom ZVT (Zero Vision Tool projektet) för att uppfylla i första hand SECA-kraven men den valda tekniken innebar att även Tier III kan uppnås. Det finns således ingen efterbehandlingsteknik utan bränsle- och motorval ledde till att miljökraven uppfylls. Hon kan därmed operera i Norge och Sverige utan farledsavgifter och tycks bli konkurrenskraftig. Sannolikt fick hon investeringsbidrag men systrarna byggdes på normala villkor. NOx-nivåerna torde ligga kring 1-2 g/kWh.

Det finns ytterligare rederier som byggt LNG-fartyg med låga NOx-utsläpp.

## **Mätningar**

Som framgår av exemplen kring LNG-fartygen vet vi inte med säkerhet vilka NOx-nivåer som faktiskt uppnås vid olika driftkonditioner. Motortillverkarna har i sina specifikationer endast NOx-nivåer vid fullast men hur väl uppfyller man idag NECA-kraven vid dellast? Dessutom finns det behov att mäta andra utsläpp som partiklar och VOC. Sådana mätningar finns genomförda på Viking Grace med bra resultat men tekniken behöver utvecklas för andra motortyper och andra bränslen t ex metanol och etanol.

Därför skulle ett större sammanhållet mätprojekt genomföras på ett antal fartyg med olika deNOx-metoder. Det är viktigt att hålla samman projektet då mätmetoder, mätinstrument, driftpunkter etc. måste vara så lika som möjligt för att uppnå en god totalbild.

## **Teknikutveckling**

Sverige har idag några mindre företag som levererar deNOx-utrustning och de har gjort det framgångsrikt på en marknad som knappast finns. Man säljer i huvudsak en teknisk lösning som sedan andra tillverkar och säljer till varven. Viss direktleveras till rederier kan vara aktuell men ombyggnader är en mycket liten marknad eftersom inga deNOx-krav finns på äldre fartyg.

Några tillverkare av katalysatorer finns inte heller i Sverige. Teknikutvecklingen bör därför ligga på systemlösningar i samverkan med användarna och internationella varv och motortillverkare. Därför skall företagen ges möjligheter till pilot- och demonstrationsanläggningar ihop med rederiet för få fram kostnadseffektiv och välfungerade teknik. Sådan teknikutveckling tar lång tid, flera år, eftersom installationer på fartyg bara kan ske när fartyget är tillgängligt. Utprovning och ändringar är tidskrävande och kräver speciella insatser.

## 7 Förslag till åtgärder

Uppdraget syftar till att dels fastställa rådande utvecklingsläge och vilka tekniker som tidigare använts och vilka teknik som är förhärskande idag.

För att uppnå konkurrenskraftiga deNOx tekniker så svensk industri får låga transportkostnader har följande behov av åtgärder och insatser identifierats:

### 7.1 Emissionsnivåer och harmonisering

Från tillverkningsindustrins sida har det i samband med genomförda intervjuer man påpekat att svenska myndigheters bör eftersträva en harmonisering av utsläppsreglerna. Eftersom många svenska produkter används både inom den marina sektorn för transocean sjöfart och på de inre vattenvägarna och för arbetsmaskiner på land och i hamnar är det angeläget att utvecklade motorer kan användas för alla dessa områden utan större merutveckling. I Nordamerika tillämpas IMO Tier III/EPA Tier 4 medan för inre vattenvägar i Europa en modifierad IMO Tier III vilken skall ställas mot lastbilarnas regelverk. Många parametrar är inblandade: effektstorlek, cylindervolym, varvtal etc. och ett enklare och enhetligare system skulle spara mycket pengar för alla tillverkare.

### 7.2 Besiktning och verifiering

Att installerad utrustning verkligen används och uppfyller ställda krav bör utredas vidare. Olika procedurer har under åren använts, t ex typbesiktning i tillverkningen, där emissionerna skall demonstreras i provbänk under föreskrivna körcykler. Därmed ligger det på tillverkaren att han kunna visa att produkten/motorn uppfyller ställda krav och att produkten blir certifierad.

Varje fartyg genomgår vid leverans en provtur där det säkerställs att leveranskontraktet uppfylls vid olika lastkonditioner, manöverbarhet och specifik bränsleförbrukning vid olika farter. Vid dessa provturer medverkar klassningssällskapet. En möjlighet är att man vid provturen genomför emissionsmätningar som skall godkännas av klassningssällskapet.

Under sin levnad genomgår fartyget regelbundna klassningar med tre till femårs intervall, t ex att skrov och utrustning är intakt. Vid varje sådant tillfälle skulle även emissionsmätningar genomföras för att se att åldring på maskin och utrustning inte avviker allt för mycket från ursprungsdata.

På landsidan har kraftverken ofta kontinuerliga mätning av bl a NOx som registreras och tillsänds Naturvårdsverket för bestämning av NOx-avgifter. Ett liknande system skulle tekniskt vara möjligt var möjligt på den marina sidan med tillgång till dagens it-teknik. Ett sådant system blir komplext och kostsamt men leder sannolikt till ett väl kontrollerat utsläpp.

## 7.3 Mätning

Mätning av utsläpp är idag en ganska omfattande procedur eftersom kvaliteten på mätningarna kräver dyrbar utrustning med kalibergaser och specialbyggda fordon. Inför någon form av utsläppskontroll krävs enkla, billiga och tillförlitliga mätinstrument samt att fartyg är så utrustade att man enkelt kan ansluta till de mätpunkter som behövs. Eftersom fartyg enligt de nya kraven förväntas bli byggda först med start tidigast 2021 kan man i god tid planera för just dessa mätningar.

På land finns ackrediterade mät företag som bör kunna anpassa sin verksamhet till ombordmätningar men att man tar hänsyn till fartygets driftvillkor som sjögång, anlöpstider etc.

Ett systematiskt arbete skulle kunna utvecklas av rederinäringen och företrädare för mätinstituten.

## 7.4 Efterbehandling

Efterbehandling med SCR är etablerad teknik som uppfyller Tier III-kraven. Svagheter är att bränslet inte får vara svavelrikt och att en regent, urea, behövs vilket medför bunkring och lagring av ytterligare en produkt ombord.

På Kompetenscentrum Katalys (KCK) på Chalmers forskar man på att använda metanol som reagent för deNO<sub>x</sub>. Man har visat i doktorsavhandlingar att man med billiga silverbaserade katalysatorer kan reducera NO<sub>x</sub> med metanol. Skulle alkoholer i framtiden bli ett fossilfritt bränsle inte bara för sjöfarten skulle det medhavda bränslet också kunna användas som reagent. Detta kan bli en intressant svensk nisch för efterbehandling.

De två svenska företag som levererar SCR-utrustning deltar redan idag i internationell konkurrens med andra tillverkare men har svårigheter att medverka eftersom motortillverkarna gärna knyter sina motorer till utvalda leverantörer (gärna sina egna system).

## 7.5 Primärmetoder

Som framgått är primärmetoder åtgärder direkt inne i motorn som leder till att motorn uppfyller utsläppskraven utan efterbehandling. Både Tier I och Tier II kunde man möta med motortekniska åtgärder.

En målsättning med det europeiska Hercules projektet har varit att se om man kan uppfylla Tier III (ultra low emissions). En väg är att införa tvåstegs turboladdning med EGR. Resultaten ser lovande ut men med ett svavelrikt bränsle är man ännu inte framme. Ett amerikanskt företag säljer dieselmotorer med Tier III prestanda med tvåstegsturbo och EGR. Den inslagna vägen är intressant för svenskt vidkommande vilket skulle passa svenska motortillverkare.

I Lund bedriver man Kompetenscentret med ett antal doktorander för förbränningsprocess (KCFP) där man utvecklar den s.k. PPC-tekniken (Partly Premixed Combustion) med just tvåstegs turboladdning och EGR. Det vore intressant om man accelererade utveckling till motorer i fullskala som demonstrationsanläggningar. Därmed skulle man i långtidstest med alkoholer kunna visa mycket låga NO<sub>x</sub> (0,4 g/kWh), inga partiklar, svavelfritt och fossilfria



bränslen och verkningsgrader på 50%. En sådan utveckling skulle kunna ha stor bärighet på svensk fordonsindustri med sjöfarten som en modell för tekniken.

För att PPC tekniken skall bli tillgänglig genomförs omfattande forskning av själva förbränningsförloppet med speciellt utvecklade lasermätmetoder. Detta har blivit en svensk specialitet inom förbränningstekniken för förståelse av händelseförloppet. Denna kunskap kan direkt överföras till förbränningsmotorer och skapa förutsättningar för låg NO<sub>x</sub>-generering.



# 8 Marknadsmässiga och kommersiella konsekvenser

## 8.1 Marknaden

För användarna dvs. redarna innebär deNOx-installationer en tillkommande investering i maskinrummet. För bulk- och tankbåtar finns det jämförelsevis gott om plats med mindre påverkan på lastkapaciteten men för färjor och bilbåtar påverkas både lastkapacitet och stabilitet. Med den erfarenhet som hittills vunnits med SCR-installationen bedöms merkostnaden för maskinrumsinvesteringen bli mindre än 5 %. Till detta kommer ureaförbrukning och andra drift- och underhållskostnader på ca 2 €/MWh, vilket skall ställas mot dagens HFO-kostnad på 30 €/MWh och MGO 45 €/MWh enligt Bunker World.

I praktiken blir det så att redaren ställer av sin deNOx-anläggning då han lämnar NECA-området.

Skulle utvecklingen gå mot att motorerna internt kan möta Tier III utan extra efterbehandling och kemikalier blir maskinrumsinstallationen ingen merkostnad utan en konkurrensfördel för motorleverantören.

NECA-reglerna blir tvingande för nya fartyg, kombinerat med sanktioner från myndigheterna vid överträdelser. Det innebär att kraven blir lika för alla berörda fartyg. I den mån farledsavgifter eller andra ekonomiska styrmedel blir styrande exempelvis för äldre fartyg blir det ett optimeringsstycke för redaren att välja mellan bränslen, motortyp och efterbehandling.

På lång sikt kommer redaren att välja det enklaste systemet och motortillverkarna kommer, givet att konkurrensen fungerar, att ta fram det kostnadseffektivaste, vilket sannolikt betyder att Tier III kommer att mötas med motorteknik och inte efterbehandling.

## 8.2 Kommersiella konsekvenser

SCR-system certifieras av landets administrerande myndighet, Transportstyrelsen i Sverige, som kan delegera till ett klassningssällskap. Regelverket säger f n att SCR-systemet skall betraktas som en integrerad del av motorn vilket betyder att motorleverantören skall genomföra certifieringen och SCR-leverantören ställs utanför certifieringsproceduren. I själva verket är efterbehandlingsystem en egen process som tillvaratar rökgaserna och behandlar dem enligt givet regelverk.

SCR-leverantören kommer härvid i en beroendeställning till motorleverantören som kan ha sitt eget system och en utomstående leverantör blir exkluderad inte av tekniska skäl utan av motorleverantörens kommersiella. Detta kan betraktas som kurrensbegränsning i EU-mening och leder till förfång för svenska SCR-leverantörer.

## 8.3 Harmonisering

IMO Tier III tillämpas redan idag i Nordamerika, från 2016 och från 2021 i motsvarande NECA-område. I vissa delar av Nordamerika ställer man nu krav på sjöfarten att uppfylla EPA Tier 4 vilket är mycket bredare emissionskrav då det omfattar en rad andra utsläpps komponenter. Till detta kommer tolkningen av utsläppsnivåer för "inlandssjöfarten" som är en del av området "none road mobile machinery" EPA Tier 4 Standard for Marine Engines som täcker flera utsläppskomponenter samt indelat i effektområden. Detta gynnar fler installerade motorer istället för en större.

För att inte snedvrída konkurrens mellan olika NECA-områden, certifiering och transport bör eftersträvas en övergripande harmonisering eftersom sjöfarten är en internationell företeelse.

NB! Inom EU använder vi Tier-beteckning med romerska siffror t ex. EU Tier III medan Nordamerika använder Tier-beteckning med arabiska siffror t ex. EPA Tier 4S.

# 9 Slutsatser och rekommendationer

## 9.1 Slutsatser

Av ovanstående kan för svenskt vidkommande följande slutsatser göras:

- I Sverige finns inga motortillverkare över 1000 kW utan utvecklingen av låg-NOx-motorer görs hos företag som motsvarar lastbilsstorlek 100-1000 kW. Industrialiseringen ligger hos tillverkarna och utvecklingsarbetet ligger i deras linje för att uppfylla kunders och myndigheters krav på NOx-emissioner. Redan idag kan man tekniskt uppfylla möta IMO Tier III.
- Det finns några få tillverkare i Sverige av efterbehandlingsutrustning, SCR-system, som också uppfyller IMO Tier III och som hämmas av rådande regler.
- Merkostnaden för att installera de-NOx-system förväntas inte bli betungande för redarna inte heller driftkostnaderna. Redan idag installeras Tier III-utrustning eftersom det anses öka flexibiliteten på en framtida andrahandsmarknad och kan ge en grönare profil.

## 9.2 Rekommendationer

Följande aktiviteter föreslås:

- Svenska myndigheter och branschorgan bör medverka till att uppnå bättre harmonisering i regelverken IMO Tier III, EPA Tier 4 och EU Stage V och därmed undvika konkurrensbegränsning avseende leveransomfång och handelshinder mellan länderna.
- Svensk NOx-forskning skall inriktas mot mät- och kontrollmetoder för att säkerställa låga utsläppsnivåerna från fartygen och att utsläppen håller sig under angivna nivåer.
- Svensk motorforskning skall inrikta sig på att NOx-nivåer och andra utsläpp kan understigas utan efterbehandling samtidigt som verkningsgraderna blir höga och att fossilfria bränslen kan användas.
- Redarna skall ges möjlighet till att deras fartyg ställs till förfogande för demonstrationsprojekt.



# 10 Litteratur och referenser

## Litteratur:

NOx controls for shipping in EU Seas NUMBER U 5552 JUNE 2016 Hulda Winnes  
Commissioned by Transport & Environment

Diesel Exhaust Emission Control 2008 SAE Int, Diesel Emissions Control in Review Timothy  
Johnsson

IMO Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13

[http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)

Diesel Net: <https://www.dieselnets.com/standards/#eu>

NOx Abatement Technique for Marine Diesel Engines, Doc thesis Mathias Magnusson  
Chalmers 2014

Environmental Assessment of Present and Future Marine Fuels, Doc thesis Selma Brynolf  
Chalmers 2014

Criteria for future marine fuels. The IAME 2012 conference, 6-8 September. Taipei, Taiwan.  
Bengtsson, S., K. Andersson, J. Ellis, L. Haraldsson, B. Ramne and P. Stefenson (2012a).

Fuels in the Baltic Sea after SECA (2016) Karin Andersson; Selma Brynolf

Shipping and the Environment (Karin Andersson et al) Springer Verlag

Diverse avhandlingar om kväveoxider från högskolor och universitet (Lunds universitet,  
Chalmers)

Diesel Engines I&II for ship propulsion and power plants, 2008 Kees Kuiken, Target Global  
Energy Training

Broschyrer och försäljningsmaterial från företag (Wärtsilä Oy, Man Diesel and Turbo AG,  
Volvo Penta AB, Scania AB, Gesab, DEC Marine AB)

## Kontakter möte och samtal:

Stena Teknik Göteborg (Hans Tistedt, Per Stefenson)

Chalmers bibliotek

Lund tekniska högskola Förbränningsmotorteknik Lund (prof. Martin Tunér m fl)

SMTF Svensk Marintekniskt Forum Lund (Karina Linnér)

Lighthouse Göteborg (Åsa Burman)

Svensk Sjöfart Göteborg (Folke Larsson)

Göteborgs Hamn (Edvard Molitor)

RISE/SP Göteborg (Kerstin Hindrum m fl)

Dec Marine AB Göteborg (Per Holmström)

ScandiNAOS AB Göteborg (Per Fagerlund, prof Bengt Ramne)  
Chalmers Lindholmen Göteborg (Kent Salo, prof. Karin Andersson)  
IVL Göteborg (Erik Fridell)  
Scania AB Södertälje (Svante Lejon)  
Volvo Penta Göteborg (Rolf Westlund)  
SSPA Göteborg (Joanne Ellis m fl)  
Wärtsilä Oy Finland, Wärtsilä Sweden AB (Göran Österdahl m fl)  
Chalmers Förbränningsmotorteknik (prof. Sven Andersson)  
Chalmers KCK (prof. Magnus Skoglundh)  
GESAB (Johan Svenberg)

Bildmaterial har tagits ur mina föreläsningar på KTH-Energiteknik, SLU och från Wärtsilä.