Januari 2004 ECN-C--04-083

BEPERKING NO_x-UITSTOOT BIJ EEN BESTAANDE SCHEEPSDIESELMOTOR

Effectiviteit SwirlFlash en SCR-techniek

H.P.J. de Wilde
G.P.A. Kos

Verantwoording

De NO_x-metingen beschreven in deze rapportage zijn uitgevoerd onder ECN-projectnummer 8.27405 in het kader van het DEMO-project 'Voor- en nageschakelde binnenvaartmotor'. Dit project werd uitgevoerd met een consortium van projectpartners in opdracht van het *Bureau Innovatie Binnenvaart* (BIB) onder auspiciën van de *Stichting Projecten Binnenvaart* (SPB) met ondersteuning van de *Nederlandse Onderneming voor Energie en Milieu* (Novem) en het *Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Goederenvervoer*. De opdracht van ECN in het project betrof alleen het uitvoeren van metingen. De rapportage is daarom beknopt van aard.

INHOUD

LIJST VAN TABELLEN 4

LIJST VAN FIGUREN 4

SAMENVATTING 5

1. INLEIDING 7
1.1 Achtergrond 7
1.2 Vorming van NO_x in dieselmotoren 7
1.3 Projectpartners 7
1.4 Doelstelling 8
1.5 De sleepboot en motor 8

2. NO_X-METINGEN 10
2.1 Meetcondities 10
2.2 Bemonstering van het uitlaatgas 10
2.3 NO_x-analyse 10
2.4 CO_2-analyse uitlaatgas 11

3. VOOR- EN NAGESCHAKELDE $DENO_X$-TECHNOLOGIE 12
3.1 De voorgeschakelde SwirlFlash-techniek 12
3.2 De nageschakelde Katalysator 13

4. RESULTATEN NO_X -REDUCTIE SWIRLFLASH 15
4.1 Effectiviteit van de SwirlFlash-technologie 15

5. RESULTATEN NO_X-REDUCTIE KATALYSATOR 18

6. CONCLUSIES 21

7. AANBEVELINGEN 22

REFERENTIES 23

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 4.1 *Tijdschema SwirlFlash-metingen op 30 september 2003. De tabel geeft de tijden waarop de NO_x-concentratie in het uitlaatgas is bepaald onder afwisselend in en uitschakelen van de SwirlFlash-technologie bij verschillende motorvermogens* 16

Tabel 5.1 *Tijdschema van de SCR-metingen op 30 september 2003. De tabel geeft de tijden waarop de NO_x-concentratie in het uitlaatgas is bepaald met in- en uitgeschakelde SCR-installatie bij verschillende motorvermogens* 19

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1.1 *De sleepboot 'En Avant 4' van rederij Muller in Dordrecht waarop de twee NO_x-reductietechnologieën zijn ingebouwd en beproefd* 9

Figuur 1.2 *Vermogenskromme van de uit 1962 stammende 4-takt 6 cylinder 552 kW dieselmotor, met turbocharger, zoals ingebouwd in de sleepboot 'En Avant 4'* 9

Figuur 2.1 *NO_x-monitor (Eco Physics, type CLD 700 AL) en de meetopstelling zoals geïnstalleerd in de machinekamer van de 'En Avant 4'* 11

Figuur 3.1 *Verstuivingsinjectie door SwirlFlash-nozzle in het inlaatluchtfilter van de motor* 12

Figuur 3.2 *SwirlFlash-injectiepunten* 13

Figuur 3.3 *De katalysator, ingebouwd in de schoorsteen van de sleepboot 'En Avant 4', gezien door de toegangsdeur naar de machinekamer* 14

Figuur 4.1 *Chronologisch overzicht van de gemeten NO-concentratie (blauw), NO_2-concentratie (magenta) en de somparameter NO_x (geel) in het rookgas* 15

Figuur 4.2 *De gemiddelde concentraties in ppm van NO (blauw), NO_2 (paars) en de somparameter NO_x (geel) in het rookgas bij ingeschakeld SwirlFlash-systeem, als functie van het motorvermogen waarbij getest werd* 16

Figuur 4.3 *De percentages NO, NO_2 en NO_x in het rookgas dat na inschakeling van de SwirlFlash resteert, als functie van het motorvermogen waarbij getest werd* 17

SAMENVATTING

Het in deze rapportage beschreven project betreft de meting van de effectiviteit van twee technieken ter beperking van de uitstoot van stikstofoxiden (NO_x), geïnstalleerd op een bestaand schip. Het gaat om een zogenaamde 'voor- en nageschakelde techniek'. De voorgeschakelde techniek betreft 'SwirlFlash' heetwaterverstuiving in de motorinlaatlucht. De nageschakelde techniek betreft selectieve katalytische reductie (SCR) met ureum als toegevoegde reductant. Dit demonstratieproject, ondersteund door Novem en het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, beoogt om na te gaan of middels combinatie van beide technologieën een optimaal kosteneffectieve reductie van NO_x in het uitlaatgas kan worden gerealiseerd, waarbij tevens aan strenge emissienormen kan worden voldaan.

De opdracht van ECN in het project betrof alleen het uitvoeren van NO_x-metingen. De metingen tonen aan dat de voorgeschakelde SwirlFlash-technologie resulteert in een NO_x-reductie tot ruim 20% bij een motorvermogen van 80%. Voor de SCR-installatie werd een NO_x-reductie gemeten van ongeveer 85% voor motorvermogens tussen 40% en 100%. Deze gemeten reductiepercentages voldoen ruimschoots aan de verwachtingen.

1. INLEIDING

1.1 Achtergrond

De binnenvaartbranche hecht aan het behouden en versterken van haar groene imago. Daarom initieert en stimuleert de binnenvaartsector toepassing van schone technologie, waaronder het onderhavige DEMO-project. Tevens sluit dit project aan bij (inter)nationale wetgeving, waaronder het besluit van verschillende West-Europese landen om bij scheepsdieselmotoren de uitstoot te beperken van stikstofoxiden (NO_x) alsook van de componenten kooldioxide (CO_2), fijn stof (PM10) en vluchtige organische stoffen (VOS). Het internationale orgaan dat de regelgeving voor de West-Europese binnenvaart opstelt is de Centrale Rijnvaart-commissie (CCR) in Straatsburg. Sinds 1 januari 2002 moeten motoren voldoen aan de door de CCR uitgevaardigde regels (fase 1, waarbij de maximaal toegestane NO_x-emissie is vastgesteld op 9,2 g/kWh (CBRB, 2004). In de hierop volgende normstellingsfase 2, voorzien in zomer 2007, zullen de emissie-eisen worden aangescherpt naar 6 g/kWh, terwijl in de rond 2010 voorziene fase 3 een emissieplafond is voorzien van 1,5 g/kWh. Het is dus van belang om nu reeds te zoeken naar technologieën die ervoor kunnen zorgen dat motoren kunnen voldoen aan deze toekomstige normen. Het in deze rapportage beschreven project beoogt een stimulans te zijn voor de binnenvaartbranche om met bestaande schepen milieuvriendelijker te kunnen varen.

De reden voor steeds strengere wetgeving voor NO_x-emissies is gelegen in de gezondheid en milieuschade die NO_x-emissie veroorzaakt. Stikstofdioxide kan effecten in de luchtwegen veroorzaken. Blootstelling kan leiden tot een toename in de ademweerstand, chronische bronchitis, verlies van longelasticiteit en afname van de weerstand tegen infecties van het longweefsel. (US National Safety Council, 2001). Astmatici zijn gevoeliger voor deze effecten, vooral tijdens lichamelijke inspanning. Stikstofdioxide is een belangrijke veroorzaker van smog. Stikstofdioxide moleculen reageren met vluchtige organische koolwaterstoffen tot smog. Hoge doses smog zijn schadelijk omdat ze hoest veroorzaken en de ademhaling bemoeilijken (met name bij astma patiënten), hetgeen uiteindelijk kan leiden tot een algehele ziekte van het ademhalingssysteem (Slob, 1996). Kinderen zijn extra gevoelig. Daarnaast speelt stikstofdioxide ook een rol bij de verzuring van het milieu (Erisman, 2000).

1.2 Vorming van NO_x in dieselmotoren

NO_x wordt in verbrandingsmotoren gevormd, met name bij hoge temperaturen. Bij dieselmotoren wordt de brandstof, in tegenstelling tot gasmotoren en benzinemotoren met carburateur, in de motor geïnjecteerd in de vorm van kleine vloeistof druppeltjes. Om de kleine druppeltjes goed te kunnen verbranden moet er veel lucht aan de motor worden toegevoegd. Omdat slechts een gedeelte van de zuurstof in de lucht gebruikt wordt voor de verbranding van de diesel, reageert een deel van de overmaat zuurstof met de stikstof uit de lucht tot stikstofoxide (NO_x). De vorming van NO_x neemt sterkt toe bij stijgende verbrandingstemperaturen (Acton en Taplin, 2002).

1.3 Projectpartners

De metingen beschreven in deze rapportage zijn uitgevoerd onder ECN-projectnummer 8.27405 in het kader van het DEMO-project 'Voor- en nageschakelde binnenvaartmotor'. Dit project werd uitgevoerd met een consortium van projectpartners in opdracht van het *Bureau Innovatie Binnenvaart* (BIB) onder auspiciën van de *Stichting Projecten Binnenvaart* (SPB) met ondersteuning van de *Nederlandse Onderneming voor Energie en Milieu* (Novem) en het *Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Goederenvervoer*.

Het project werd uitgevoerd door de onderstaande partners, met de volgende rolverdeling:

- DLD — Projectleiding
- Alpha Power Systems — Voorgeschakelde deNO_x-techniek
- Ceti — Demi waterinstallatie
- Siemens — Nageschakelde techniek
- Norsk Hydro — Ureum installatie
- ECN — NO_x-metingen
- Rederij Muller — Eigenaar sleepboot 'En Avant 4'
- Hoogendijk groep — Werf die aanpassingen aan schip verzorgde
- CBRB — Projectondersteuning en Public Relations

1.4 Doelstelling

Het project 'Voor- en Nageschakelde' binnenvaartmotor, betreft de installatie en beproeving van twee technieken aan boord van een bestaand schip, ter beperking van de uitstoot van stikstofoxiden (NO_x). De voorgeschakelde deNO_x-techniek betreft 'SwirlFlash' heetwaterverstuiving in de motorinlaatlucht, terwijl de nageschakelde techniek bestaat uit een SCR deNO_x-installatie met ureum als toegevoegde reductant.

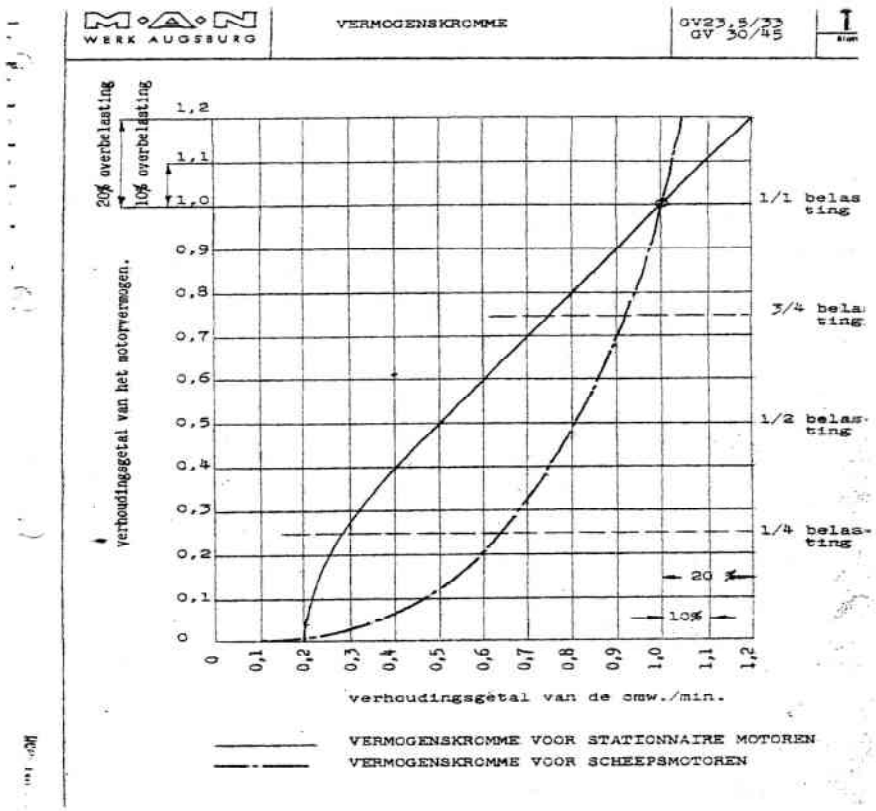
Met de relatief nieuwe SwirlFlash-technologie kan een NO_x-reductie worden gerealiseerd in de orde van enkele tientallen procenten. Hoewel deze reductie in de meeste gevallen niet voldoende zal zijn om aan de (toekomstige) emissienormen te voldoen, staat hier tegenover dat zowel de investeringskosten als de operationele kosten van de technologie verhoudingsgewijs laag zijn. De katalytische deNO_x-technologie, die zich in vele industriële toepassingen en de zeescheepvaart reeds heeft bewezen, maakt een veel verdergaande NO_x-verwijdering mogelijk. Echter, zowel de investeringskosten als de operationele losten van deze technologie (ureumverbruik) zijn hoger. Het project 'Voor- en Nageschakelde' binnenvaartmotor beoogt om na te gaan of middels combinatie van beide technologieën een optimaal kosteneffectieve reductie van NO_x in het uitlaatgas kan worden gerealiseerd, waarbij tevens aan strenge emissienormen kan worden voldaan. Het lijkt immers kosteneffectief om met de voorgeschakelde SwirlFlash-technologie de eerste tientallen procenten NO_x tegen relatief lage kosten te reduceren en aansluitend met de nageschakelde SCR-techniek de NO_x-concentratie tot zeer lage waarden terug te brengen, zodat toch aan de strenge (toekomstige) emissienormen kan worden voldaan. Door de voorschakeling kan de nageschakelde SCR-technologie kleiner worden uitgevoerd, met navenant lagere investerings- en operationele kosten (lager ureum verbruik). Het voorliggende rapport beschrijft de deNO_x-prestatie van beide technologieën op basis van NO_x-metingen in het uitlaatgas tijdens testen aan boord van de sleepboot 'En Avant 4' (Figuur 1.1). Het gecombineerde effect van beide technologieën kon niet worden bepaald. Vanwege organisatorische en logistieke problemen konden beide technologieën namelijk niet gelijktijdig worden bedreven in het voor de metingen gereserveerde tijdsbestek.

1.5 De sleepboot en motor

De voorgeschakelde SwirlFlash-technologie en de naschakelde SCR-installatie werden geïnstalleerd op de sleepboot 'En Avant 4' van Rederij Muller in Dordrecht. Op de voorkant van deze rapportage staat een foto van dit schip (lengte over alles 25,25 m, breedte over alles 6,85 m). De 'En Avant 4' is uitgerust met een 4-takt 6 cylinder MAN 750 pK (552 kW) dieselmotor, met turbocharger, in 1962 in Nederland gebouwd in licentie van MAN. De motor heeft als indicatie G6 V30/45 en dit duidt op boring x slag 300 x 450 mm en een cilinderinhoud is van ca. 32 liter (Van Liere, 2003). Volgens de schipper correspondeert stationair draaien van de motor met een toerental van 130 rpm. De fabrikant MAN heeft een vermogenskromme voor

scheepsmotoren, waarin het vermogen versus het verhoudingsgetal van de toeren per minuut (rpm) staat uitgezet (Figuur 1.2.)

Figuur 1.1 *De sleepboot 'En Avant 4' van rederij Muller in Dordrecht waarop de twee NO_x-reductietechnologieën zijn ingebouwd en beproefd*



Figuur 1.2 *Vermogenskromme van de uit 1962 stammende 4-takt 6 cylinder 552 kW dieselmotor, met turbocharger, zoals ingebouwd in de sleepboot 'En Avant 4'*

2. NO_X-METINGEN

2.1 Meetcondities

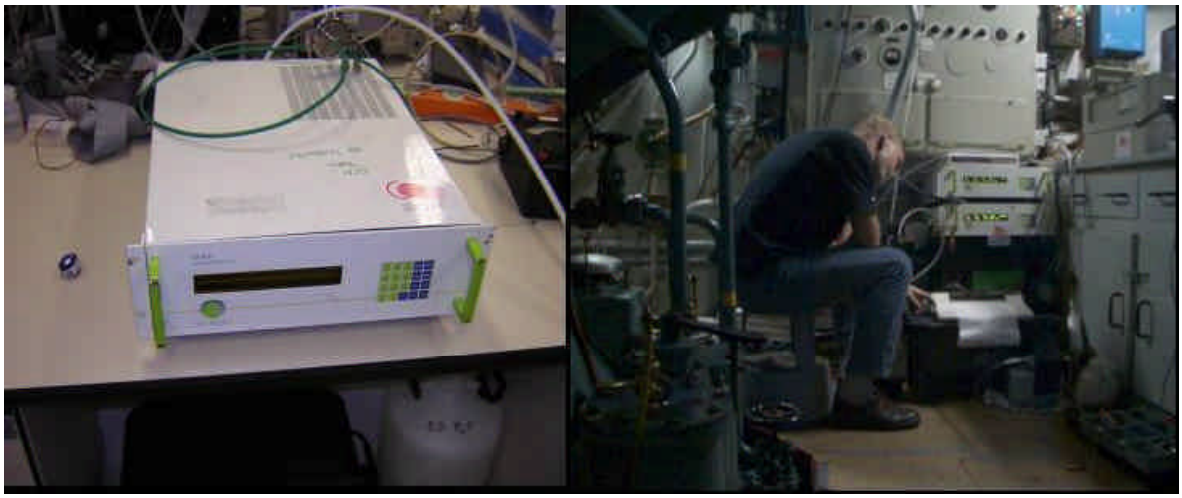
De metingen ter verificatie van de NO_x-reductie werden door ECN uitgevoerd, voor beide technieken afzonderlijk. De uiteindelijke metingen aan de $SiNO_x$ SCR-installatie vonden plaats op 26 september 2003 en de metingen aan de Alpha Power Systems SwirlFlash-technologie werden uitgevoerd op 30 september 2003. Het gecombineerde effect van beide technologieën kon niet worden bepaald omdat de technologieën om organisatorische en logistieke redenen niet gelijktijdig operationeel waren. De deNO_x-effectiviteit van zowel de SwirlFlash-technologie als de SCR-technologie werden bepaald terwijl de sleepboot met de kop tegen de wal lag afgemeerd, waarbij steeds bij verschillende motorvermogens werd gemeten. Hierbij werd de NO_x-concentratie in het uitlaatgas gemeten onder afwisselend aan- en uitschakelen van de te testen technologie (Zie Bijlage A en B voor meetschema SwirlFlash, respectievelijk SCR-technologie).

2.2 Bemonstering van het uitlaatgas

De aanzuigleiding voor het te analyseren uitlaatgasgas, een roestvaststalen leiding met een diameter van 1/4 inch, was ongeveer een halve meter boven de katalysator in de schoorsteen gemonteerd. Om vervuiling door roetinvang van de leiding en analyseapparatuur te beperken was de aanzuigopening in de richting van de uitgang van de schoorsteen gemonteerd. De homogeniteit van de NO_x-uitlaatgasconcentraties werd bevorderd doordat de aanvoerleiding stroomopwaarts van het innamepunt was gebogen in een steeds wijder wordende spiraal, die extra turbulentie veroorzaakte. Om condensatie van waterdamp te voorkomen was de aanvoerleiding verwarmd. Alvorens het rookgas de analyseapparatuur bereikte werd het door een Peltier koelelement geleid dat continu op 10 ºC werd gehouden. Door waterdampcondensatie in het koelelement werd het dauwpunt van het rookgas zodanig verlaagd dat condensatie van waterdamp in de analyseapparatuur werd voorkomen.

2.3 NO_x-analyse

De NO_x-concentratie in het rookgas werd bepaald door chemoluminescentie. Hierbij werd gebruik gemaakt van twee monitoren van het merk Eco Physics, type CLD 700 AL, geschikt voor de gecombineerde meting van NO en NO_2. NO_x is de som van de beide gemeten componenten NO en NO_2. De monitoren hebben een meetbereik van respectievelijk van 0 - 100 ppm en 0 - 1000 ppm. Calibratie geschiede door analyse van NO_x-ijkgassen. Figuur 2.1 geeft een beeld van de meetopstelling zoals opgesteld aan boord van de sleepboot ‘En Avant 4’ van Rederij Muller.



Figuur 2.1 NO_x-monitor (Eco Physics, type CLD 700 AL) en de meetopstelling zoals geïnstalleerd in de machinekamer van de 'En Avant 4 (foto T. Groot / G.P.A. Kos)

2.4 CO_2-analyse uitlaatgas

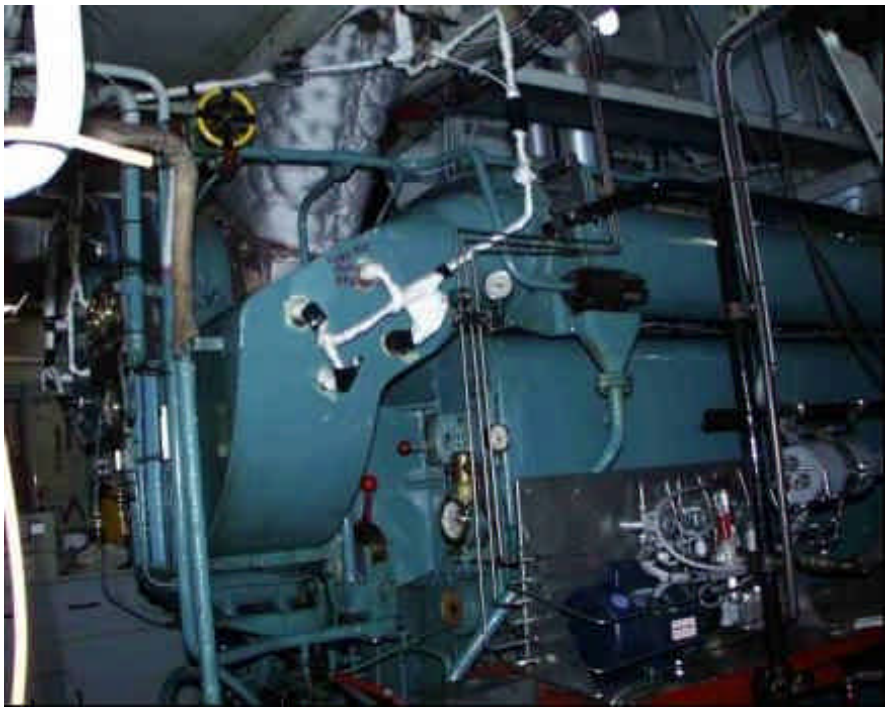
De voorgeschakelde SwirlFlash-techniek beïnvloedt de verbrandingscondities in de motor (zie Hoofdstuk 3). Daarom was het interessant om na te gaan of toepassing van de SwirlFlash invloed zou hebben op het brandstofverbruik van de motor, in positieve of negatieve zin. Helaas was de motor van de 'En Avant 4' niet voorzien van een brandstofverbruikmeter en was er onvoldoende budget beschikbaar om deze alsnog te plaatsen. Een nauwkeurige bepaling van het brandstofverbruik vereist tevens het gelijktijdig meten van het geleverde vermogen van de motor. Het plaatsen van rekstrookjes op de schroefas - waarmee in combinatie met het toerental het motorvermogen bepaald kan worden - was echter niet mogelijk, aangezien de schroef middels een zeer korte as aan de motor was gekoppeld. Om toch een indicatie van een eventueel effect van de SwirlFlash-technologie te kunnen bepalen, is het CO_2-gehalte in het uitlaatgas gemeten onder condities van uit- en ingeschakelde technologie, bij verschillende motorvermogens. Hierbij werd geen waarneembaar effect van de SwirlFlash-technologie op de CO_2-concentratie in het rookgas geconstateerd met de beschikbare CO_2-analyseapparatuur (H&B Uras 3G infrarood adsorptie CO_2-analyser). Bij motorvermogens van 60, 80 en 100% bedroeg de CO_2-concentratie, zowel bij uit- als bij ingeschakelde techniek, respectievelijk 11,3%, 11,9% en 12,8 %, bij een standaarddeviatie in de meting van ca. 3%.

3. VOOR- EN NAGESCHAKELDE DENO$_X$-TECHNOLOGIE

3.1 De voorgeschakelde SwirlFlash-techniek

De SwirlFlash-technologie van *Alpha Power Systems* is gebaseerd op de injectie onder hoge druk van heet water (150-250°C) in de inlaatlucht van de motor (zie http://www.alphapowersystems.nl). Het Swirl-proces resulteert in de vorming van zeer kleine waterdruppels (enkele microns), die zeer snel verdampen en daarmee de inlaatlucht van de motor verlagen (Figuur 3.1). Hierdoor neemt ook de temperatuur in de motor af, hetgeen resulteert in minder NO_x-vorming. De mate van thermische NO_x-vorming wordt namelijk bepaald door de verbrandingskarakteristieken in de motor en neemt exponentieel toe met de absolute temperatuur (Braswell et al., 2001; Acton en Taplin, 2002). Het benodigde gedemineraliseerde water voor het SwirlFlash-systeem kan worden gemaakt uit rivierwater middels een omgekeerd osmose installatie. Daarom was door de firma Ceti een dergelijk systeem aan boord opgesteld. Het water voor de SwirlFlash werd verwarmd met de hete uitlaatgassen van de motor, middels een in de schoorsteen gemonteerde warmtewisselaar (Van Liere et al., 2003; 2004). Figuur 3.2 geeft een beeld van de heetwaterleidingen en de injectiepunten op de motor zoals die door de Hoogendijk Groep en Getronics zijn gemonteerd.

Figuur 3.1 *Verstuivingsinjectie door SwirlFlash-nozzle in het inlaatluchtfilter van de motor*



Figuur 3.2 *SwirlFlash-injectiepunten (foto: G.P.A. Kos)*

3.2 De nageschakelde Katalysator

Op dit moment zijn er diverse katalytische deNO_x technieken beschikbaar en commercieel bewezen. De meest toegepaste technologie is de door Siemens (www.sinox.com) en andere fabrikanten toegepaste selectieve katalytische reductie (SCR), waarbij uit ureum gevormd ammoniak wordt toepast als reductant. Door het katalytische proces wordt het schadelijke NO_x gereduceerd naar de onschadelijke componenten stikstofdioxide en water, volgens de onderstaande reactievergelijkingen:

$$4\ NO + 4\ NH_3 + O_2 \bullet\ \ 4\ N_2 + 6\ H_2O$$

$$6\ NO_2 + 8\ NH_3 \bullet\ \ 7\ N_2 + 12\ H_2O$$

Dit proces verloopt snel en selectief als het onder de juiste condities wordt uitgevoerd. Precieze dosering van de uit ureum gegenereerde ammoniak is hierbij essentieel. In het project voor- en nageschakelde binnenvaartmotor werd de ureumtank en de ureumleverantie verzorgd door Hydro Gas and Chemicals. Zoals eerder genoemd zijn de ureumkosten een belangrijke factor, waardoor het aantrekkelijk lijkt om middels de SwirlFlash-technologie de eerste tientallen procenten NO_x tegen relatief lage kosten te verwijderen. De katalysator, waarvan de vorm speciaal was aangepast aan de beschikbare ruimte in de schoorsteen van de ‘En Avant 4’, werd ingebouwd door de Hoogendijk Groep (Figuur 3.3).

Figuur 3.3 *De katalysator, ingebouwd in de schoorsteen van de sleepboot 'En Avant 4, gezien door de toegangsdeur naar de machinekamer (foto: G.P.A. Kos).*

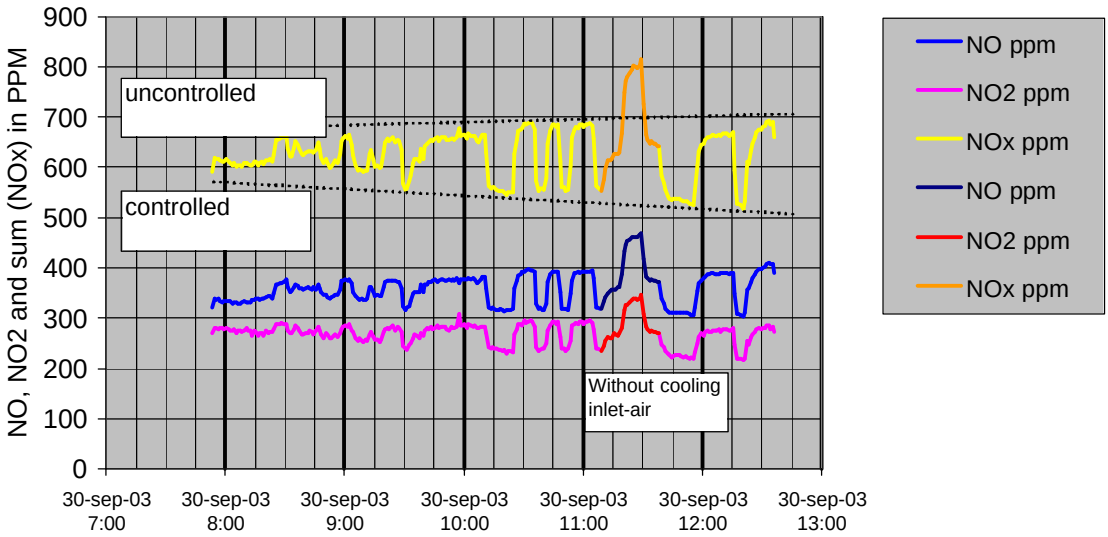
4. RESULTATEN NO_X-REDUCTIE SWIRLFLASH

4.1 Effectiviteit van de SwirlFlash-technologie

De effectiviteit van de SwirlFlash-technologie werd bepaald bij motorvermogens tussen 60% en 100%, onder afwisselend in- en uitschakelen van het systeem, volgens het meetschema zoals weergegeven in Tabel 4.1.

De resultaten van de metingen aan de SwirlFlash-technologie zijn in de onderstaande figuren op drie manieren weergegeven.

- Ten eerste als chronologisch overzicht van de NO_x-concentratie in het rookgas gedurende de gehele meetsessie (Figuur 4.1), volgens het meetschema in Tabel 4.1.
- Ten tweede als absolute NO_x-concentratie bij ingeschakeld SwirlFlash-systeem, als functie van het motorvermogen waarbij getest werd (Figuur 4.2).
- Ten derde als het percentage NO_x in het rookgas dat na inschakeling van de SwirlFlash resteert (Figuur 4.3).

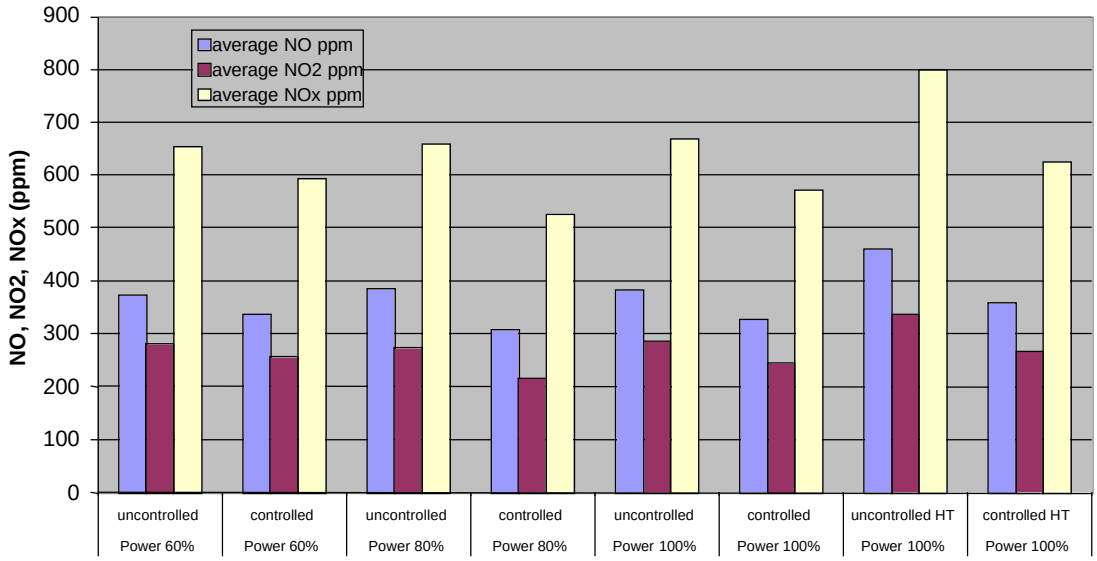


Figuur 4.1 *Chronologisch overzicht van de gemeten NO-concentratie (blauw), NO_2-concentratie (magenta) en de somparameter NO_x (geel) in het rookgas*

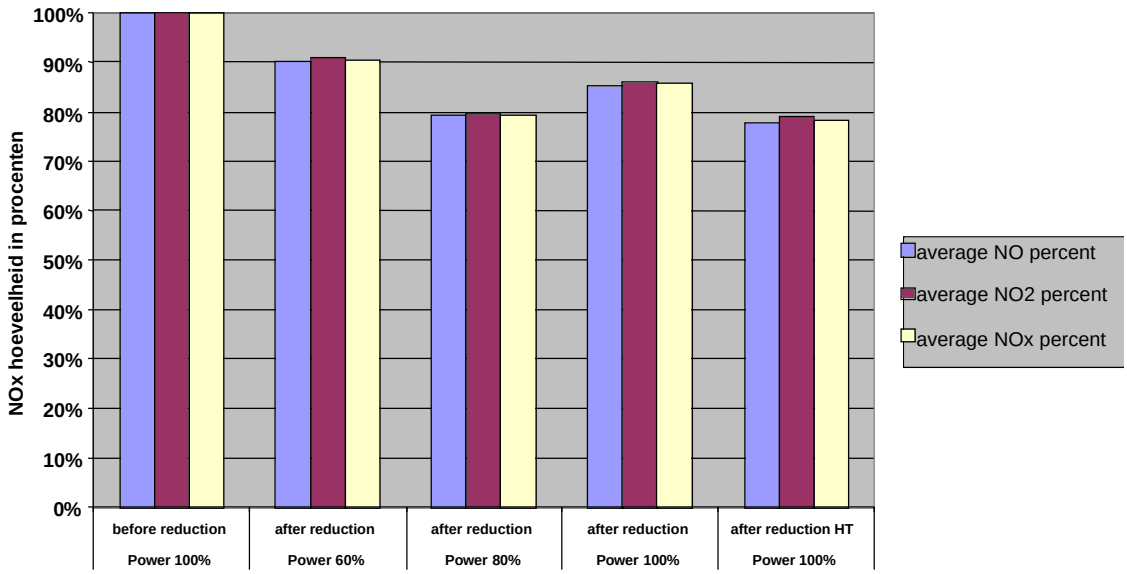
De deNO_x-effectiviteit van de technologie werd bepaald door bij een gekozen motorvermogen afwisselend de SwirlFlash-technologie in en uit te schakelen, in de figuur aangegeven met respectievelijk ‘controlled’ en ‘uncontrolled’. De afwijkende kleuren midden in het tijdsinterval tussen 11 en 12 uur, corresponderen met een kort experiment waarbij de koeling van de inlaatlucht werd gestopt.

Tabel 4.1 *Tijdschema SwirlFlash-metingen op 30 september 2003. De tabel geeft de tijden waarop de NO_x-concentratie in het uitlaatgas is bepaald onder afwisselend in- en uitschakelen van de SwirlFlash-technologie bij verschillende motorvermogens*

Meting	Motorvermogen	DeNOx aan/uit	tijdstip
1	100%	uncontrolled	30-09-03 8:38:00
2	100%	controlled	30-09-03 8:43:59
3	60%	controlled	30-09-03 8:52:29
4	60%	uncontrolled	30-09-03 9:00:29
5	60%	controlled	30-09-03 9:12:30
6	60%	uncontrolled	30-09-03 9:25:00
7	60%	controlled	30-09-03 9:32:00
8	60%	uncontrolled	30-09-03 9:52:31
9	100%	uncontrolled	30-09-03 10:09:29
10	100%	controlled	30-09-03 10:18:59
11	100%	uncontrolled	30-09-03 10:30:59
12	100%	controlled	30-09-03 10:39:29
13	100%	uncontrolled	30-09-03 10:45:30
14	100%	controlled	30-09-03 10:51:00
15	100%	uncontrolled	30-09-03 11:00:00
16	100%	controlled	30-09-03 11:08:00
17	100%	controlled	30-09-03 11:16:30
18	100%	uncontrolled	30-09-03 11:26:00
19	80%	controlled	30-09-03 11:48:58
20	80%	uncontrolled	30-09-03 12:06:59
21	80%	controlled	30-09-03 12:18:59
22	100%	uncontrolled	30-09-03 12:31:59



Figuur 4.2 *De gemiddelde concentraties in ppm van NO (blauw), NO_2 (paars) en de somparameter NO_x (geel) in het rookgas bij ingeschakeld SwirlFlash-systeem, als functie van het motorvermogen waarbij getest werd*



Figuur 4.3 *De percentages NO, NO_2 en NO_x in het rookgas dat na inschakeling van de SwirlFlash resteert, als functie van het motorvermogen waarbij getest werd*

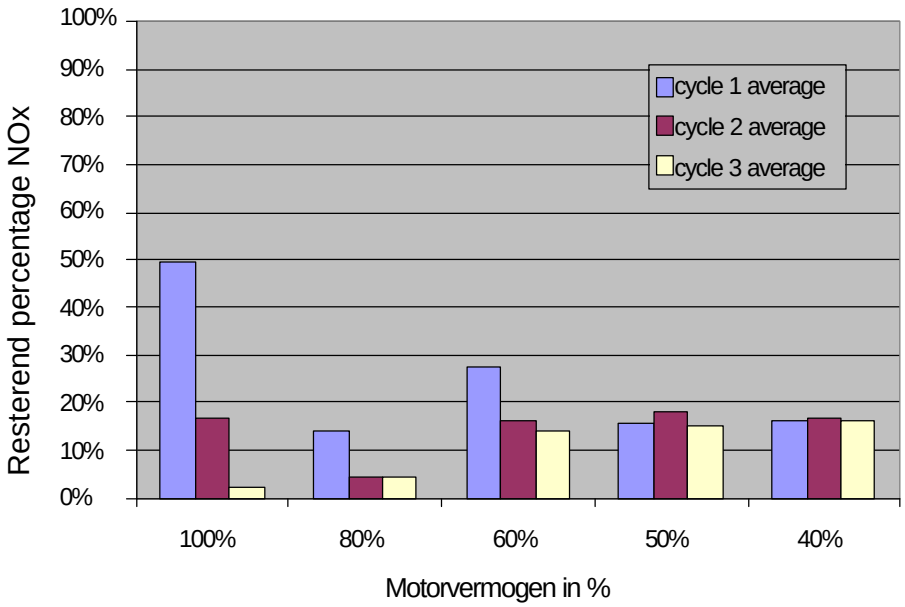
Figuur 4.3 laat zien dat de NO_x-reductie ten gevolge van het inschakelen van het SwirlFlash-systeem kan oplopen tot meer dan 20%, ofwel minder dan 80% NO_x in het rookgas ten opzichte van de ongecontroleerde situatie. Opvallend is dat de prestatie van het SwirlFlash-systeem bij 60% motorvermogen beperkt blijft tot ca. 10%. Dit komt waarschijnlijk omdat het systeem tijdens de 60% motorvermogen test in het begin van de ochtend (zie Tabel 4.1) nog niet optimaal functioneerde. In de loop van de ochtend werd het systeem geoptimaliseerd en werden enkele aanpassingen doorgevoerd, waardoor de deNO_x-effectiviteit verbeterde. De geleidelijke toename van de effectiviteit van het systeem wordt gevisualiseerd door de divergerende lijnen in Figuur 4.1 die de trend weergeven van de NO_x-concentratie bij in- en uitgeschakeld systeem gedurende de testperiode.

Tijdens de meetsessie werd als experiment gedurende circa 15 minuten de koeling van de inlaatlucht stopgezet. Deze periode correspondeert met de afwijkende kleuren in Figuur 4.1 midden in het tijdsinterval tussen 11 en 12 uur. Duidelijk is te zien dat de NO_x-concentratie in het rookgas stijgt door de toename van de temperatuur en daaraan gekoppelde thermische NO_x-vorming. De mate van thermische NO_x-vorming hangt af van verbrandingskarakteristieken, en neemt exponentieel toe met de absolute temperatuur (Braswell et al., 2001; Acton en Taplin, 2002).

5. RESULTATEN NO_X-REDUCTIE KATALYSATOR

De effectiviteit van de Selectieve Katalytische Reductie (SCR)-technologie werd bepaald volgens het meetschema zoals weergegeven in Tabel 5.1. Tijdens de test werd, zowel met als zonder SCR, enkele malen een cyclus doorlopen bij motorvermogens van 100%, 80%, 60% en 40%. Het doseringssysteem voor ureum kon tijdens de test nog niet worden aangestuurd door als functie van het brandstofverbruik van de motor (zie ook Paragraaf 2.4). Daarom gebeurde dit tijdens de test met de hand, waardoor de gerealiseerde NO_x-reductie, vooral tijdens het begin van de meetsessie erg variabel was. Dit verklaart ook de relatief grote verschillen die voor de NO_x-reductie tijdens de meetcycli werden geregistreerd. Figuur 5.1 toont echter duidelijk dat bij alle motorvermogens tussen 40 en 100% een NO_x-reductie tot ongeveer 15% of lager kon worden gerealiseerd. Een uitstekend resultaat, conform de verwachtingen vooraf!

Afhankelijk van de hoeveelheid ureum die werd gedoseerd, konden nog verdere NO_x-reducties worden gerealiseerd. Figuur 5.2 laat zien dat het SCR-systeem in staat is tot een NO_x-reductie van meer dan 95% indien extra veel ureum wordt geïnjecteerd, zoals tijdens het inregelen van het systeem het geval was. Echter, dit vereist hogere doseringen ureum en daarmee gepaard gaande hogere kosten. Tevens bestaat in deze situatie het risico dat niet alle uit ureum gevormde NH_3 reageert met NO_x, met als potentieel gevolg ongewenste NH_3-emissie (zie reactievergelijkingen in Paragraaf 3.2). Het is daarom belangrijk om in een voortzetting van het experiment de ureumadditie aan te sturen door het motorvermogen of een hiermee samenhangend stuursignaal. Nog beter is het om de ureumadditie te regelen op basis van continue meting van het NO_x-gehalte in het uitlaatgas.



Figuur 5.1 *Het percentage NO_x in het rookgas dat na inschakeling van de SCR-technologie resteert, als functie van het motorvermogen waarbij getest werd. Meetcycli 1, 2 en 3 corresponderen met het meetprogramma zoals beschreven in Tabel 5.1. De gedoseerde hoeveelheid ureum is niet bekend. Eventuele NH_3-slip is niet gemeten*

Tabel 5.1 *Tijdschema van de SCR-metingen op 30 september 2003. De tabel geeft de tijden waarop de NO_x-concentratie in het uitlaatgas is bepaald met in- en uitgeschakelde SCR-installatie bij verschillende motorvermogens*

Cycle uncontrolled		**NOx**							
First			order:	2	3	1	4		5
	Engine burden (reference: rpm)			100%	80%	60%	50%	40%	idle
Cycle uncontrolled		test	start	10:05	10:17	9:48	10:02	10:24	11:25
date 030925		test	end	10:17	10:27	10:05	10:24	10:43	11:32
emission	average	NOx	PPM	370	365	365	360	n.a.	165
emission	lowest	NOx	PPM	350	350	345	340	n.a.	170
emission	highest	NOx	PPM	380	380	370	370	n.a.	160

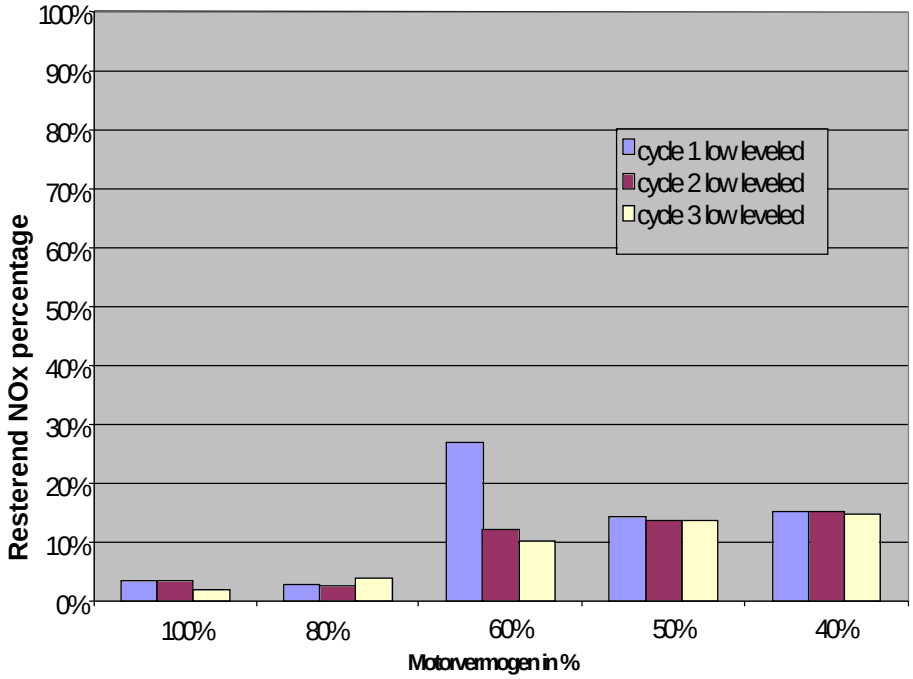
Cycle uncontrolled		**interval**	**RPM ->**					
Second	Engine burden (reference: rpm)			100%	80%	60%	50%	40%
Cycle uncontrolled		test	start	8:28			10:04	
date 030926		test	end	8:31			10:08	
emission	average	NOx	PPM	654	643	632	621	598
emission	lowest	NOx	PPM	623			437	
emission	highest	NOx	PPM	679			662	

Cycle 1			**RPM ->**					
	Engine burden (reference: rpm)			100%	80%	60%	50%	40%
date 030926		test	start	8:15	9:10	9:22	10:02	10:24
	average	test	end	9:10	9:22	10:02	10:24	10:37
uncontrolled	emission	NOx	PPM	654	643	632	621	598
reduction active	average	NOx	PPM	324	90	173	96	98
reduction active	lowest	NOx	PPM	16	14	151	76	85
reduction active	highest	NOx	PPM	560	338	194	126	121
reduction active	low level	NOx	PPM	24	19	170	90	91
reduction active	average	reduction	percent	**50%**	**86%**	**73%**	**84%**	**84%**
reduction active	highest	reduction	percent	**98%**	**98%**	**76%**	**88%**	**86%**
reduction active	lowest	reduction	percent	**14%**	**47%**	**69%**	**80%**	**80%**
reduction active	high level	reduction	percent	**96%**	**97%**	**73%**	**85%**	**85%**

Cycle 2			**RPM ->**					
	Engine burden (reference: rpm)			100%	80%	60%	50%	40%
date 030926		test	start	10:37	10:58	11:17	11:30	11:40
	average	test	end	10:58	11:17	11:30	11:40	11:46
uncontrolled	emission	NOx	PPM	671	656	654	637	614
reduction active	average	NOx	PPM	110	27	102	110	99
reduction active	lowest	NOx	PPM	22	14	68	67	86
reduction active	highest	NOx	PPM	371	58	193	158	153
reduction active	low level	NOx	PPM	24	18	79	86	91
reduction active	average	reduction	percent	**83%**	**96%**	**84%**	**82%**	**84%**
reduction active	highest	reduction	percent	**97%**	**98%**	**89%**	**89%**	**86%**
reduction active	lowest	reduction	percent	**43%**	**91%**	**70%**	**74%**	**74%**
reduction active	high level	reduction	percent	**96%**	**97%**	**87%**	**86%**	**85%**

Cycle 3			**RPM ->**					
	Engine burden (reference: rpm)			100%	80%	60%	50%	40%
date 030926		test	begintijd	11:46	11:58	12:04	12:10	12:18
	average	test	eindtijd	11:58	12:04	12:10	12:18	12:27
uncontrolled	emission	NOx	PPM	688	669	677	653	629
reduction active	average	NOx	PPM	14	29	87	95	97
reduction active	lowest	NOx	PPM	11	22	72	79	85
reduction active	highest	NOx	PPM	18	38	108	113	113
reduction active	low level	NOx	PPM	13	27	65	86	90
reduction active	average	reduction	percent	**98%**	**96%**	**86%**	**85%**	**84%**
reduction active	highest	reduction	percent	**98%**	**97%**	**89%**	**87%**	**86%**
reduction active	lowest	reduction	percent	**97%**	**94%**	**83%**	**82%**	**81%**
reduction active	high level	reduction	percent	**98%**	**96%**	**90%**	**86%**	**85%**

Cycle uncontrolled		After tests	**RPM ->**					
Second	Engine burden (reference: rpm)			100%	80%	60%	50%	40%
Cycle uncontrolled		test	start	12:40		12:34		12:28
date 030926		test	end	12:44		12:40		12:34
emission	average	NOx	PPM	688	669	677	653	629
emission	lowest	NOx	PPM	608	637	619		538
emission	highest	NOx	PPM	736	695	711		677



Figuur 5.2 *Maximaal resterend percentage NO_x in het rookgas, zoals gemeten over een periode van 1 minuut, bij relatief hoge dosering van ureum zoals toegepast in het begin van het testprogramma bij het inregelen/optimaliseren van het systeem. De gedoseerde hoeveelheid ureum is niet bekend. Eventuele NH_3-slip is niet gemeten*

6. CONCLUSIES

De belangrijkste conclusie van deze rapportage is dat het gelukt is om op een bestaand schip NO_x-reductie te realiseren met zowel de voorgeschakelde SwirlFlash-technologie als de nageschakelde SCR-technologie. Hierbij werden de vooraf verwachte reducties ruimschoots bereikt:

- De voorgeschakelde SwirlFlash-technologie resulteerde in een NO_x-reductie tot ruim 20% bij een motorvermogen van 80%.
- De SCR-installatie bereikte bij motorvermogens tussen 40% en 100% een NO_x-reductie van ongeveer 85%.

7. AANBEVELINGEN

Voor een eventueel vervolgproject worden de volgende aanbevelingen in overweging gegeven:

- Registratie van het brandstofverbruik en bepaling geleverd motorvermogen tijdens de meting. In combinatie met de brandstof lucht ratio van de motor (eventueel te bepalen middels meting restconcentratie zuurstof in uitlaatgas), kan de gemeten NO_x-concentratie dan nauwkeurig worden omgerekend naar emissies uitgedrukt in g/kWh.
- Bepaling van het effect van gelijktijdige inzet van SwirlFlash en SCR en aansluitend kostenoptimale afregeling van beide technologieën tot gewenste NO_x-concentratie in uitlaatgas.
- Het doseringssysteem voor ureum in de SCR installatie aansturen als functie van het motorvermogen, of een hiermee samenhangend stuursignaal, en registratie van de gedoseerde hoeveelheid ureum. Nog beter is het om de ureum te doseren op basis van continue meting van het NO_x-gehalte in het uitlaatgas.
- Meting van eventuele NH_3-slip.
- Meting van de aantallen en grootteverdeling roetdeeltjes in het uitlaatgas, zodat eventuele invloed van de NO_x-reductie technieken op de roetuitstoot kan worden bepaald.

REFERENTIES

Acton D. en H. Taplin (2002): *NO_x compliance*. Presentatie op de Steam Efficiency Workshop II, 3 april, 2002. (www.ase.org/steamingahead/pdf/NOxworkshop.pdf).

Braswell G., Y. Matros, G. Bunimovich (2001): *NO_x in Non-Utility Industries - Part I. Air emission origins, best control solutions and monitoring methodology for nitrogen oxides*. Environmental Protection Magazine. Article 1017 (www.environmental-center.com/articles/article1017/article1017.htm).

Bureau Innovatie Binnenvaart (2003): *Voor- en nageschakelde motortechniek; 2, de resultaten*, Brochure uit de 'Binnenvaartinnovatiereeks'.

Erisman, J.W.: *De Vliegende Geest: Ammoniak uit de landbouw en de gevolgen voor de natuur*. Beta text, ISBN 9075541066, pp 1-271.

Internet: http://www.alphapowersystems.nl/swirl.

Internet: http://www.cbrb.nl, reader emissie eisen (2004).

Internet: http://www.sinox.com.

Liere, J. van, E.W. Stecher, C.G. Meijer (2004): *Eindrapport NO_x reductie van een 552 kW dieselmotor van de* sleepboot 'En Avant 4', Arnhem, 14 Januari 2004.

Liere, J. van, et al. (2003): *Demonstratieproject Scheepsdieselmotor: voor- en nageschakelde installatie voor kosteneffectieve NO_x reductie*.

Slob, R. (1996): *Handboek Binnenmilieu*, GG&GD, Amsterdam, oktober 1996.

U.S. National Safety Council; Environmental Health Center, Air pollution Fact sheet,http://www.nsc.org/ehc/mobile/airpollu.htm, 2001.