



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Zwavel- dioxide- uitstoot

Zwavedioxide-uitstoot van zeeschepen op afstand gemeten met lidar





Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Zwaveldioxide-uitstoot van zeeschepen op afstand gemeten met lidar

RIVM Rapport 609021115/2011

Colofon

© RIVM 2011

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave'.

A.J.C. Berkhout
D.P.J. Swart
G.R. van der Hoff
J.B. Bergwerff

Contact:

M. Mooij
Centrum Inspectie Milieu- en Gezondheidsadviesing
martje.mooij@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van VROM-Inspectie, in het kader van project M/690021/09-LI-Lidar.

Rapport in het kort

Zwavel dioxide-uitstoot van zeeschepen op afstand gemeten met Lidar

Het RIVM heeft een instrument ontwikkeld om vanaf de wal de zwavel dioxide-uitstoot van voorbijvarende zeeschepen te meten. Dit instrument maakt gebruik van de zogeheten Lidar-techniek (*Light Detection And Ranging*). Het instrument scant met een laserbundel de rookpluim van een passerend schip en stelt zo onopgemerkt de uitstoot vast. Hiermee is tussen 2006 en 2008 bij een groot aantal schepen op de Westerschelde en op het Noordzeekanaal de uitstoot van zwavel dioxide gemeten. De hoogst gemeten uitstoot bedroeg 37 gram per seconde.

De totale uitstoot van zwavel dioxide neemt in Nederland al jaren af. Sinds 2006 daalt ook de uitstoot door de zeescheepvaart, maar minder hard dan de uitstoot door andere bronnen. Daardoor is de zeescheepvaart een steeds belangrijker bron van deze emissie geworden. In 2010 was 55 procent van de Nederlandse uitstoot van zwavel dioxide afkomstig van de zeescheepvaart. In 1990 was dit nog 21 procent.

Zeeschepen mogen binnen de territoriale wateren en op de Noordzee niet op zwavelrijke brandstof varen. Deze relatief goedkope brandstof mag echter wel aan boord zijn voor gebruik elders op zee. Het is onbekend in hoeverre reders zich aan het verbod houden. Bij de traditionele meetmethoden worden brandstofmonsters aan boord genomen. Dit vereist dat iemand aan boord gaat, waardoor een controleteam slechts enkele schepen per dag kan controleren.

De Lidar is nog geen wettelijk erkend instrument, waardoor op dit moment op grond van alleen Lidar-metingen geen boetes gegeven kunnen worden. De Lidar kan wel gebruikt worden om vermoedelijke overtreders te identificeren, waarna een wetshandhaver per patrouilleboot aan boord kan gaan om de overtreding vast te stellen. Inzet op deze wijze blijkt op dit moment al wel kosteneffectief. Dit komt doordat hiermee vrijwel alle passerende schepen kunnen worden gemeten en dure scheepspatrouilles uitsluitend hoeven worden ingezet voor vermoedelijke overtreders. Bovendien wordt de pakkans zo sterk vergroot. Daardoor mag verwacht worden dat het aantal overtredingen zal afnemen als de Lidar wordt ingezet.

Trefwoorden:

zwavel dioxide, SO₂, emissie, zeescheepvaart, Lidar, remote sensing

Abstract

Remote sensing of sulphur dioxide emissions of sea-going vessels using the lidar technique

RIVM developed a shore-based instrument to measure the sulphur dioxide emissions of passing seagoing vessels. This instrument applies the lidar (*Light Detection And Ranging*) technique by scanning the exhaust plume of a passing ship with a laser beam and, after analysis of the return signals, determining the emissions. This whole procedure occurs unnoticed by the passing ship. The instrument was used between 2006 and 2008 to measure sulphur dioxide emissions from a large number of ships sailing on the Westerscheldt estuary and North Sea Canal. The highest measured emission of sulphur dioxide was 37 gram per second.

The total amount of sulphur dioxide emissions in the Netherlands has been declining for many years. Since 2006, emissions from oceangoing shipping vessels have been declining as well, but not as fast as those from other sources. Consequently, the contribution from oceangoing shipping vessels has become a proportionally more important source of sulphur dioxide emissions. In 2010, 55 percent of the Dutch sulphur dioxide emissions originated with sea-going vessels; in 1990, this was 21 percent.

Seagoing ships are not allowed to use sulphur-rich fuel in Dutch territorial waters and on the North Sea. However, this relatively cheap fuel may be on board for use elsewhere at sea. To what extent ship owners comply with this ban is not known. Traditional measurement methods, such as taking fuel samples on board, require a ship to be boarded. Therefore, a team of inspectors can check only a few ships per day using such control measures.

Lidar systems have not yet been recognised as a law enforcement instrument; consequently, no fines can be imposed based on lidar measurements only. However, data collected by the lidar instrument may be used to identify possible offenders, leading to the subsequent boarding of the ship in question by a law enforcement official to ascertain whether the law was breached. When this integral approach is implemented, the use of the lidar instrument is cost-effective despite current legal restrictions due to its capability to scan the emissions of almost all passing ships. The deployment of patrol vessels, with their high running costs, then only becomes necessary to monitor those ships which, based on lidar data, are the most likely offenders. Moreover, the use of the lidar instrument greatly increases the chance of identifying and catching offenders. It can therefore be expected that fewer ships will breach the ban on the use of sulphur-rich fuel.

Key words:

sulphur dioxide, SO₂, emission, ocean shipping, lidar, remote sensing

Inhoud

Samenvatting 9

1 Inleiding 11

- 1.1 Zwaveldioxide-uitstoot in Nederland 11
- 1.2 Normen voor de zwavelfractie van brandstof 12
- 1.3 Probleemstelling 12
- 1.4 Doelstelling van het project 13
- 1.5 Vraagstelling en realisatie 14

2 Materiaal en methoden 15

- 2.1 De Lidar-techniek 15
- 2.2 Bepaling van de emissie 16
- 2.3 Meetlocaties 17
- 2.4 Windmeting 18
- 2.5 Meetprocedure 19
- 2.6 Bepaling van een emissiegetal uit een meting 20
- 2.7 Van een emissiegetal naar het zwavelgehalte in de brandstof 22
- 2.8 Vergelijking met andere meetmethodes 23
- 2.9 Opzet meetcampagne 23

3 Resultaten 25

- 3.1 Meetresultaten per meetdag 25
- 3.2 Bepaling onderste bepalingsgrens 38
- 3.3 Overzicht van alle meetresultaten 39
- 3.4 Bepaling zwavelfractie in de brandstof 42
- 3.5 Ontwikkeling van de emissie door de jaren heen 44

4 Discussie en aanbevelingen 45

- 4.1 Factoren die de slaagkans van de Lidar-meting bepalen 45
- 4.2 Prestatiekenmerken Lidar-emissiemeting 47
- 4.3 Bepaling van de zwavelfractie van de brandstof 49
- 4.4 Kosteneffectiviteit van de inzet van de Lidar 50
- 4.5 Aanbeveling voor toekomstig onderzoek 52

5 Conclusie 53

Literatuur 55

Dankwoord 57

Bijlage 1 59

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de inzet van een nieuwe meetmethode voor het vaststellen van de zwaveldioxide-uitstoot van zeeschepen. De meting vindt plaats vanuit een meetwagen op de wal, met behulp van een scannende laserbundel. De gebruikte techniek heet Lidar, *Light Detection And Ranging*. Als onderdeel van de in dit rapport beschreven studie werd het eerder door het RIVM ontwikkelde mobiele Lidar-instrument geschikt gemaakt voor de detectie van zwaveldioxide en voor het meten van de bewegende rookpluimen van schepen. Deze ontwikkelingen werden succesvol afgerond en hebben een operationeel instrument opgeleverd.

De methode is inzetbaar voor inspectiedoeleinden bij controles op het zwavelgehalte van brandstoffen gebruikt door varende zeeschepen, zowel als zelfstandig instrument als in combinatie met andere methoden. Het belangrijkste voordeel is dat men op het schip niet weet dat de meting plaatsvindt. Een ander voordeel ten opzichte van traditionele methoden is de efficiëntie: nagenoeg elk langsvarend schip kan worden gemeten. Wanneer de Lidar-techniek wordt ingezet in combinatie met andere methoden, kan op basis van de Lidar-metingen worden besloten welke schepen in aanmerking komen voor een bezoek en voor een nadere controle met andere methoden. De Lidar wordt dan dus als opsporingsinstrument gebruikt.

In 2006 werd een proefstudie uitgevoerd aan de Westerschelde. Op vijf meetdagen werd voor 24 schepen de emissie bepaald. De hoogst gemeten uitstoot bedroeg 37 gram per seconde.

Op basis van deze proefstudie is een onderste bepalingsgrens van 0,1 gram per seconde vastgesteld. De meeste gemeten schepen zitten hier ruim boven. Een typische emissiemeting heeft een onnauwkeurigheid van ongeveer 20 procent.

Inzet van het instrument is deels afhankelijk van het weer. Er moet voldoende wind zijn en de wind moet een voor de meetlocatie geschikte windrichting hebben. Ook moet het niet regenen. Als aan deze voorwaarden is voldaan, kan per meetdag met zeer grote slaagkans een groot aantal schepen worden gemeten.

In 2007 en 2008 werd het instrument opnieuw ingezet, aan het Noordzeekanaal en opnieuw aan de Westerschelde. Dit keer werden door VROM-Inspectie gelijktijdig aan boord van de schepen brandstofmonsters genomen, en door RIVM monsters van de uitgestote rookgassen. Slechts een gering aantal schepen werd zowel door de Lidar gemeten als aan boord bemonsterd, waardoor de beoogde vergelijking niet goed mogelijk bleek. Wel werd opnieuw aangetoond dat de Lidar zelf goed inzetbaar is.

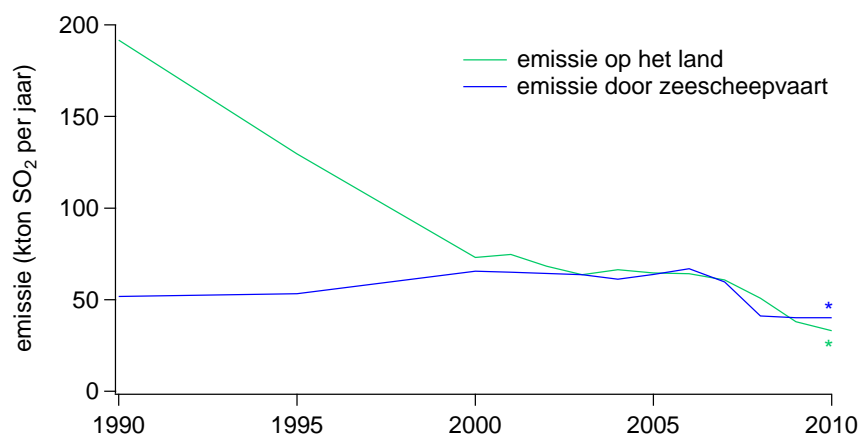
Bij gebruik als screeningsmethode is inzet van het meetinstrument kosteneffectief. De Lidar kan potentiële overtreders identificeren, waardoor patrouilleschepen veel efficiënter ingezet kunnen worden dan nu het geval is. Omdat de pakkans sterk vergroot wordt, mag verwacht worden dat het aantal overtredingen zal afnemen.

De uitstoot van zwaveldioxide is in Nederland al jaren aan het afnemen. Sinds 2006 daalt ook de uitstoot door de zeescheepvaart, maar minder snel dan de uitstoot door andere bronnen. Daardoor is de zeescheepvaart een steeds belangrijker bron van zwaveldioxide geworden. In 2010 was 55 procent van de Nederlandse uitstoot van zwaveldioxide afkomstig van de zeescheepvaart.

1 Inleiding

1.1 Zwaveldioxide-uitstoot in Nederland

De uitstoot van zwaveldioxide is in Nederland al jaren aan het afnemen. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 1-1. De emissies door bronnen op het land zijn afgenomen van 192 kiloton in 1990 tot 33 kiloton in 2010, een afname van bijna 83 procent. Deze afname is terug te voeren op het Besluit Emissie-Eisen Stookinstallaties (BEES) voor de energiesector, raffinaderijen en industrie en het verzuringsconvenant met de energiesector. Concrete maatregelen die de uitstoot hebben vermindert zijn de invoering van rookgasreiniging bij raffinaderijen, de industrie en de energiesector, de overgang van oliestook naar gasstook bij raffinaderijen en in de chemische industrie, en de inzet van kolen met een lager zwavelgehalte in kolengestookte energiecentrales. Daarnaast is ook het zwavelgehalte van de brandstoffen die in de transportsector gebruikt worden verlaagd, waardoor ook de emissie door verkeer en vervoer is afgenomen (CBS et al., 2011a).



Figuur 1-1. De ontwikkeling van de emissie van zwaveldioxide tussen 1990 en 2010. Bron: CBS, 2011a. *: voorlopige gegevens.

De zeescheepvaart geeft een ander beeld te zien (Figuur 1-1). De blauwe lijn in deze figuur geeft de emissie van zwaveldioxide weer door zeeschepen in Nederlandse havens, op Nederlandse waterwegen en op het Nederlandse deel van het continentale plat. Tot 2006 steeg de emissie met 29 procent, van 52 kiloton in 1990 tot 67 kiloton in 2006. Daarna volgde een scherpe daling tot 40 kiloton in 2009, een afname van bijna 40 procent. De netto afname tussen 1990 en 2009 bedroeg 22 procent. Er zijn twee oorzaken aan te wijzen voor de daling van de emissies van na 2006. Ten eerste zijn schepen de laatste jaren minder hard gaan varen, waardoor het brandstofverbruik is gedaald. Daarnaast is in deze periode het maximaal toegestane zwavelgehalte van de brandstof verlaagd naar 1,5 procent¹ voor schepen die varen op de Noordzee² (CBS et al., 2011b). Overigens vindt het grootste deel (ruim

¹ Massaprocent, oftewel 15 gram zwavel per kilogram brandstof.

² Per 1 juli 2010 is het maximum zwavelgehalte op de Noordzee nog verder verlaagd, tot 1 procent.

77 procent in 2009, CBS et al., 2011b) van de uitstoot door de zeescheepvaart plaats op het Nederlandse deel van het continentale plat, de rest in de havens en op de binnenwateren.

Omdat de uitstoot van zwaveldioxide door de zeescheepvaart veel minder hard daalde dan de uitstoot door de overige bronnen is de bijdrage aan de totale uitstoot door de zeescheepvaart sterk gestegen. Was in 1990 21 procent van de uitstoot afkomstig van de zeescheepvaart, in 2010 was dat 55 procent.

1.2 Normen voor de zwavel fractie van brandstof

Voor scheepsbrandstof gelden verschillende normen, afhankelijk van de soort brandstof en de plek waar deze gebruikt wordt. Deze normen zijn een uitvloeisel van de MARPOL-conventie (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships) overeengekomen binnen de IMO (International Maritime Organization). Binnen deze conventie worden de normen geregeld aangescherpt.

Sinds 2005 geldt op volle zee een norm van maximaal 4,5 procent zwavel. Vanaf 1 januari 2012 wordt deze norm verlaagd naar 3,5 procent, en op 1 januari 2020 naar 0,5 procent³ (IMO). Op de Noordzee gelden strengere eisen. Op 21 november 2006 werd een amendement op Annex VI van de MARPOL-conventie van kracht dat de Noordzee bestempelde tot *SO_x Emission Control Area* (SECA). Op dat moment was het maximaal toegestane zwavelgehalte in een SECA 1,5 procent. Per 1 juli 2010 is dit maximum verlaagd naar 1 procent, per 1 januari 2015 wordt het verder verlaagd naar 0,1 procent (IMO). Tijdens het verblijf in havens in Nederland geldt voor zeeschepen nu al een maximum van 0,1 procent (op grond van Richtlijn 1999/32/EG). Ter vergelijking: diesel, zowel voor binnenschepen als voor het wegverkeer, mag maximaal 0,001 procent zwavel bevatten (Richtlijn 98/70/EG).

1.3 Probleemstelling

Zwavelrijke brandstoffen zijn aanzienlijk goedkoper dan zwavelarme. Zij mogen aan boord zijn, maar het gebruik is in havens en op de Noordzee dus niet toegestaan. Handhaving van deze regel is echter lastig wanneer alleen aan boord kan worden vastgesteld welke brandstof wordt gebruikt. In Nederland werden de afgelopen jaren door de VROM-Inspectie controles uitgevoerd naar het zwavelgehalte van de brandstoffen aan boord van zeeschepen. Daarbij werden geregeld overtredingen aangetroffen. Zo kreeg in 2003 40 procent van de geïnspecteerde zeeschepen een proces-verbaal wegens het gebruik van brandstof met een te hoog zwavelgehalte (VROM-Inspectie, 2004)⁴. Deze controles betreffen echter maar een heel klein deel van de totale

³ Het op deze datum doorgaan van de verlaging tot 0,5 procent is afhankelijk van de uitkomst van een haalbaarheidstoets. Hierbij zal onder meer gekeken worden naar de beschikbaarheid van brandstof met een laag zwavelgehalte. Eventueel kan dan besloten worden de verlaging pas in te laten gaan op 1 januari 2025 (IMO).

⁴ Uit aanvullend verstrekte gegevens van de VROM-Inspectie blijkt dat in recentere jaren het aantal overtredingen gedaald is, tussen 2004 en 2009 werd bij 25% van de genomen brandstofmonsters een overtreding vastgesteld.

scheepvaart in Nederland⁵. Een geschikt handhavingsinstrument, dat van grotere aantallen schepen de gebruikte brandstof vast kan stellen, ontbreekt. Daardoor is het niet uit te sluiten dat schepen op de Noordzee en op waterwegen als de Westerschelde varen op brandstof waarin meer zwavel zit dan ter plaatste is toegestaan. In dat geval zijn de werkelijke emissies veel groter dan is aangegeven in Figuur 1-1.

1.4 Doelstelling van het project

Doel van het project is te onderzoeken of, en in welke mate, met behulp van de Lidar-techniek in bovengenoemde leemte kan worden voorzien en een feitelijk beeld kan worden verkregen van de zwaveldioxide-emissies van zeeschepen op de grote vaarwegen in Nederland.

Deze techniek heeft als belangrijk voordeel dat de meting op afstand, en dus onopgemerkt, kan plaatsvinden. Het instrument werkt met een laserbundel en is een soort radar voor zwaveldioxide met een bereik van circa 2,5 kilometer. Met deze Lidar kan vanaf de wal de uitstoot van langsvarende zeeschepen worden bepaald.

Het RIVM heeft de gebruikte Lidar de afgelopen jaren ontwikkeld en gebouwd in samenwerking met een aantal externe partijen (VROM-Inspectie en Opsporingsdienst, Korps Landelijke Politiediensten). Het is een mobiel instrument dat specifiek is gericht op het meten van emissies op afstand ten behoeve van handhaving en opsporing. Het is ondergebracht in een meetwagen die voorzien is van alle benodigde infrastructuur en geheel zelfstandig kan opereren. Op dit moment is deze mobiele Lidar in staat om concentraties en emissies te bepalen van drie sporengassen: zwaveldioxide, stikstofdioxide en ammoniak. Het instrument is zo gebouwd dat de lijst van detecteerbare gassen relatief eenvoudig uitgebreid kan worden, bijvoorbeeld met stikstofmonoxide en/of benzeen.

In 2005 is het instrument voor het eerst operationeel ingezet voor de toetsing van satellietmetingen van stikstofdioxide. In 2006 en 2009 gebeurde dit opnieuw. In 2006 en 2007 werden voor de VROM-directie Klimaatverandering en Industrie succesvol operationele emissiemetingen van ammoniak uitgevoerd, eerst aan een kunstmatige bron, daarna aan bemeste akkers en weilanden. Van deze activiteiten is uitgebreid verslag gedaan (Berkhout et al., 2008, Brinksma et al., 2008, Volten et al., 2009).

In 2006, 2007 en 2008 werden voor de VROM-Inspectie metingen gedaan aan de zwaveldioxide-uitstoot van passerende zeeschepen. Over de metingen gedaan in 2006 werd eerder gerapporteerd (Swart et al., 2007). Dit nu voorliggende rapport is daar een herziening en uitbreiding van. De metingen aan passerende zeeschepen werden in 2009 voortgezet, ditmaal onder de vlag van het Joint Research Centre (JRC) van de Europese Commissie in Ispra, Italië. Op dit moment wordt gewerkt aan de afronding van en rapportage over deze activiteiten.

⁵ In 2004 werden door VROM-Inspectie 71 brandstofmonsters genomen op zeeschepen (VROM-Inspectie, 2005). In dat jaar werd door de douane in de Nederlandse havens 88.724 keer een aankomend of vertrekkend schip geregistreerd (CBS, 2011b).

Figuur 1-2 laat exterieur en interieur van de meetwagen zien.



Figuur 1-2. De meetwagen, exterieur en interieur.

1.5 Vraagstelling en realisatie

Het in dit rapport beschreven onderzoek kan worden onderscheiden in drie delen, die alle geheel of gedeeltelijk werden gerealiseerd.

- (1) Het geschikt maken van de Lidar voor het meten van de SO₂-uitstoot van langsvarende zeeschepen.

Belangrijke technische aspecten hierbij waren het snel kunnen scannen van de rookpluim met de laserbundel en het kunnen analyseren van metingen met een zeer korte integratietijd. Beide modificaties waren noodzakelijk, omdat een schip beweegt en er dus niet veel tijd is om de metingen uit te voeren. De gebruikte techniek wordt beschreven in hoofdstuk 2.

- (2) Het uitvoeren van een proefstudie waarbij op een aantal meetdagen de uitstoot van passerende schepen wordt gemeten.

In de proefstudie, uitgevoerd in 2006, werd op vijf meetdagen aan de Westerschelde gemeten. Bij 42 langsvarende schepen werd getracht de uitstoot te bepalen. In 24 gevallen was dit succesvol. De resultaten worden gepresenteerd in hoofdstuk 3.

- (3) Het vergelijken van meetresultaten van de Lidar met resultaten van aan boord van de schepen uitgevoerde metingen.

Hiertoe werden in 2007 en 2008 opnieuw metingen gedaan, aan de Westerschelde en aan het Noordzeekanaal. Deze inzet werd afgestemd met het Centrum Inspectie Milieu en Gezondheidsadviesing (IMG) van het RIVM, dat de metingen aan boord van de schepen op zich nam. De Lidar werd alleen ingezet op dagen dat ook IMG ging meten. Gepoogd werd zo veel mogelijk de uitstoot te meten van schepen waar ook IMG een meting aan gedaan had of ging doen. Uiteindelijk bleek slechts een gering aantal schepen door beide teams bemeten te zijn. De resultaten van de Lidar-metingen worden gepresenteerd in hoofdstuk 3.

In hoofdstuk 4 worden de resultaten besproken en wordt ingegaan op een aantal kenmerken van de meettechniek die van belang zijn in het kader van de handhaving, zoals nauwkeurigheid en selectiviteit. Een aantal conclusies en aanbevelingen wordt gepresenteerd.

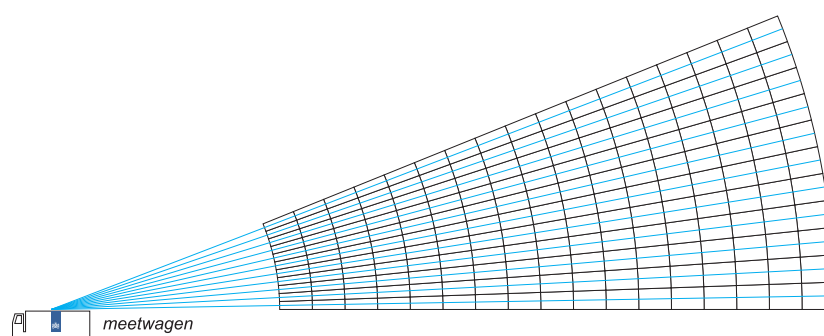
2 Materiaal en methoden

2.1 De Lidar-techniek

Het acroniem Lidar staat voor *light detection and ranging* (detectie en afstandmeting met behulp van licht). De techniek vertoont veel overeenkomsten met radar. Een korte lichtpuls wordt uitgezonden. Een deel van het licht wordt door moleculen en aerosolen in de lucht teruggekaatst. Dit teruggekaatste licht wordt met een telescoop opgevangen, gedetecteerd en geanalyseerd. Uit de tijd die verlopen is tussen het uitzenden en het ontvangen van het licht kan de afstand tot de terugkaatsende deeltjes afgeleid worden.

De in dit onderzoek gebruikte Lidar zendt kort na elkaar twee verschillende gekleurde lichtpulsen uit. Deze kleuren worden zo gekozen dat de eerste sterker geabsorbeerd wordt door het doelgas (in dit geval SO_2) dan de tweede. Als er SO_2 aanwezig is, zal het weerkaatste licht van de eerste lichtpuls sterker verzwakt terugkomen dan licht van de tweede lichtpuls. Uit de mate van verzwakking is de SO_2 -concentratie te herleiden op de plaats van waaraf het licht teruggekaatst wordt. Omdat overal op de lichtweg moleculen zijn die licht terugkaatsen, is het in principe mogelijk om over de hele lichtweg tegelijkertijd overal de concentratie te bepalen. In de praktijk kan er met de in dit onderzoek gebruikte Lidar elke 100 tot 200 meter een waarde bepaald worden, vanaf ongeveer 350 meter tot ongeveer 2500 meter afstand van het instrument. Het instrument wordt elders in meer detail beschreven (Berkhout et al., 2008, Volten et al., 2009).

Door in dezelfde horizontale richting maar steeds in een iets andere verticale richting zo'n concentratiemeting te doen, kan van een verticaal vlak de concentratieverdeling van SO_2 bepaald worden. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2-1.

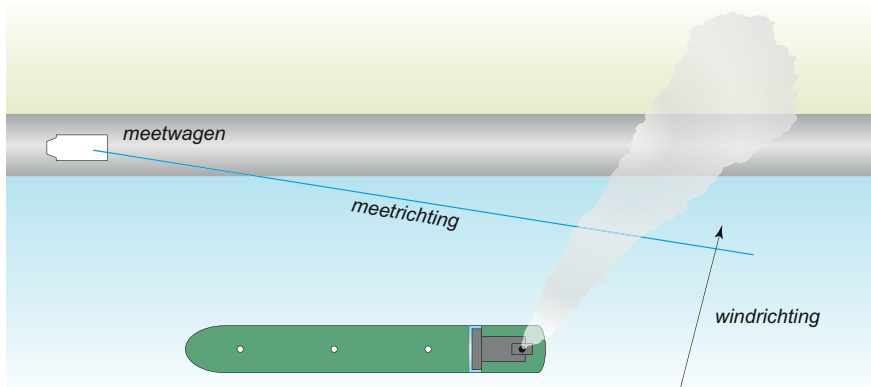


Figuur 2-1. Schematisch overzicht van de bepaling van de SO_2 -concentratie in een verticaal vlak. In blauw de meetrichtingen, de zwarte vakjes geven segmenten aan waarvoor een concentratie bepaald wordt.

Voor de emissiemetingen aan zeeschepen wordt een verticaal vlak gebruikt dat bestaat uit negen of meer richtingen. De maximale afstand ligt op ongeveer 2,5 kilometer, de maximale hoogte op ongeveer 300 meter. Het meten van alle richtingen in een scanvlak duurt

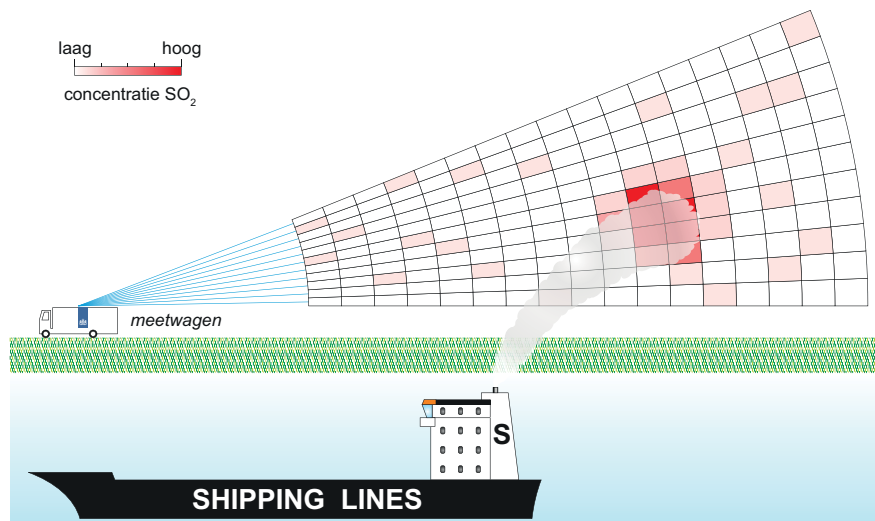
ongeveer 45 seconden, waarna de lichtbundel weer teruggebracht wordt naar de uitgangspositie en het scanvlak opnieuw gemeten wordt. In principe kan zo'n cyclus een onbeperkt aantal malen herhaald worden.

2.2 Bepaling van de emissie



Figuur 2-2. Bovenaanzicht van de situatie tijdens een emissiemeting.

In Figuur 2-2 is schematisch weergegeven hoe de emissie gemeten wordt. De Lidar wordt aan de waterkant opgesteld. Het verticale scanvlak wordt zo goed mogelijk haaks op de windrichting en evenwijdig aan de vaarrichting van de schepen gelegd. Het instrument wordt aangezet en gaat continu SO_2 -concentraties meten. Als een schip passeert, wordt de rookpluim door de wind door het scanvlak gedreven (Figuur 2-3).



Figuur 2-3. Zijaanzicht van de situatie tijdens een emissiemeting.

In het Lidar-signaal zijn de roet- en stofdeeltjes uit de rookpluim te zien. Zo is te bepalen waar de pluim door het scanvlak gaat. Op dezelfde plek wordt de SO_2 -concentratie bepaald. Ook wordt hieruit het oppervlak van de pluimdoorsnede afgeleid. Om ten slotte het emissiegetal te bepalen worden deze twee gegevens, concentratie en oppervlak, vermenigvuldigd met de windsnelheid, rekening houdend met de windrichting.

2.3 Meetlocaties

De metingen beschreven in dit rapport werden alle verricht aan zeeschepen op de Westerschelde. Als meetlocatie was aanvankelijk de monding van het Kanaal door Zuid-Beveland bij Hansweert gekozen, omdat de vaargeul daar dicht onder de kust loopt, en omdat daar bij veel voorkomende windrichtingen het scanvlak goed zowel evenwijdig aan de vaargeul als haaks op de windrichting gelegd kan worden. Zie Figuur 2-4 voor een overzicht van de meetlocaties. Uiteindelijk is de meetwagen op drie verschillende plaatsen rondom de kanaalmond gepositioneerd geweest, afhankelijk van de beschikbaarheid van de locaties. Ze zijn gemarkeerd met 1, 2 en 3 in Figuur 2-4. Zie Figuur 2-5 voor een foto van de meetwagen op meetlocatie 1.



Figuur 2-4. Meetlocaties Hansweert, gemarkeerd met 1, 2 en 3, en Walsoorden, gemarkeerd met 4. Voor locatie 1 en 4 zijn de meetrictingen weergegeven. Windmeter: meetpaal van Rijkswaterstaat waar windsnelheid, windrichting en waterhoogte gemeten worden.

Deze locaties voldeden goed bij wind uit zuidelijke en westelijke richtingen. Bij oostenwind kon daar echter niet gemeten worden, omdat er dan geen mogelijkheid was het meetvlak benedenwinds van de vaargeul te positioneren. Daarom is in 2007 en 2008 een vierde locatie

gebruikt: de dijk bij de haven van Walsoorden, gemarkeerd met 4 in Figuur 2-4.



Figuur 2-5. De meetwagen op meetlocatie 1 (zie ook Figuur 2-4).

Behalve aan de Westerschelde is ook nog twee dagen gemeten aan het Noordzeekanaal (Figuur 2-6). De eerste meetlocatie daar was op de Velserterminal aan de noordoever van het kanaal; deze locatie is gemarkeerd met 5 in de figuur. De tweede locatie, gemarkeerd met 6, was op de zuidoever, bij het Houtrakgemaal.



Figuur 2-6. Meetlocaties Velserterminal, gemarkeerd met 5, en Houtrakgemaal, gemarkeerd met 6.

2.4

Windmeting

Bij Hansweert, dicht bij de meetlocaties aldaar (zie Figuur 2-4), staat een volautomatische windmeter, onderdeel van het meetnet ZEGE (Zeeuwse getijdenwateren). Dit meetnet wordt onderhouden door het Hydro Meteo Centrum Zeeland (HMCZ), een onderafdeling van de Meetinformatiedienst van Rijkswaterstaat Directie Zeeland. De wind- en getijdengegevens worden gepubliceerd op internet (via www.hmcz.nl). Voor metingen gedaan in Hansweert en Walsoorden worden deze

gegevens gebruikt om de in dit rapport vermelde emissiegetallen uit te rekenen. Daarvoor wordt, uitgaande van een logaritmisch windprofiel (Stull, 1988), de gemeten windsnelheid en de gemeten waterhoogte, de windsnelheid berekend op de hoogte waar de Lidar-meting aangeeft dat de rookpluim is.

Voor de locaties aan het Noordzeekanaal (Velserterminal en Houtrakgemaal, Figuur 2-6) was zo'n meetmast niet beschikbaar. Daarom is daar gebruik gemaakt van een 5,5 m hoge uitschuifbare windmast met drie windmeters om de windsnelheid en -richting te meten (Figuur 2-7). Deze windmeting wordt elders uitgebreider beschreven (Berkhout et al., 2008, p. 24). Het meten van de waterhoogte is op deze locaties niet noodzakelijk, omdat het Noordzeekanaal, in tegenstelling tot de Westerschelde, geen getij kent.



Figuur 2-7. De meetwagen op de dijk bij het Houtrakgemaal (locatie 6). De windmast staat links van de windmolen.

2.5 Meetprocedure

Op een meetdag wordt de volgende procedure gehanteerd. Bij aankomst op de locatie wordt eerst de meetwagen stabiel en horizontaal neergezet en wordt bepaald hoe de wagen staat ten opzichte van het noorden. Daarna wordt, uitgaande van de heersende windrichting, een meetrichting gekozen. Vervolgens worden voor elke hellingshoek de laser en de telescoop op elkaar uitgelijnd. Daarna wordt gewacht op een passerend schip.

Voor elk passerend schip wordt de volgende procedure gevolgd. Het instrument wordt gestart als het schip in de buurt, maar nog niet binnen meetbereik is. Er worden dan voortdurend complete scans van het verticale vlak gemaakt. Op een gegeven moment drijft de wind de rookpluim van het schip door het meetvlak; dit is te zien in de meetsignalen. De rookpluimen zijn in meerdere scanvlakmetingen na elkaar zichtbaar. Er wordt gemeten tot de rookpluim van het schip niet meer in de meetsignalen te zien is.

De uitwerking van de metingen bestaat uit het bepalen van de concentratie op verschillende plaatsen in de pluim, en deze concentratie te vermenigvuldigen met het corresponderende pluimoppervlak en met de windsnelheid op die hoogte. Vervolgens worden alle deelbijdragen over het gehele pluimoppervlak opgeteld. Zo wordt voor elke

scanvlakmeting een emissiegetal bepaald. Omdat bij alle schepen de rookpluim in meerdere scanvlakmetingen achter elkaar zichtbaar is, kan voor alle schepen meer dan één emissiegetal bepaald worden. Zo kan bekeken worden hoe de emissie zich ontwikkelt gedurende de ongeveer vijf minuten die de meeste schepen in beeld zijn.

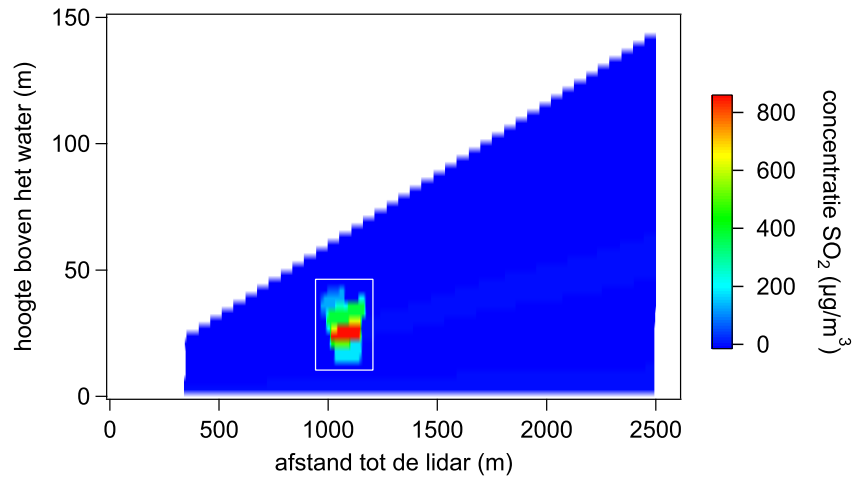
2.6 Bepaling van een emissiegetal uit een meting



Figuur 2-8. De HMS Rotterdam, kort voor deze de meetwagen voorbijvoer.

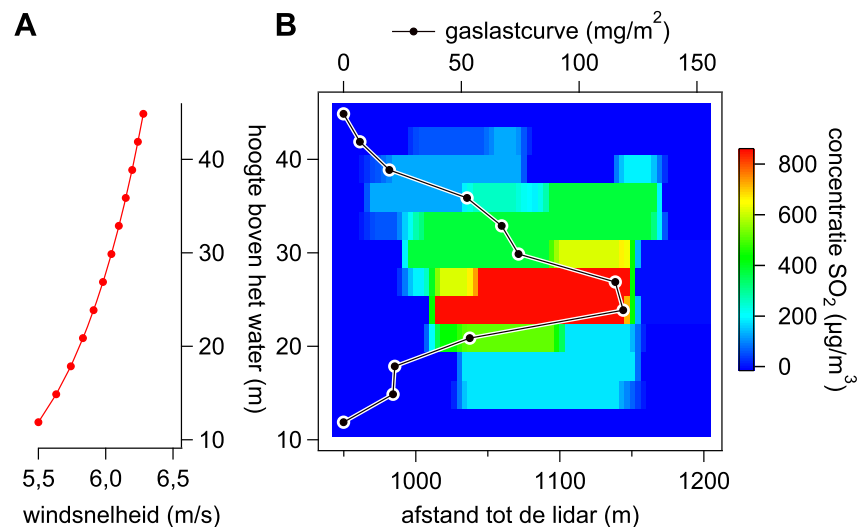
Als voorbeeld van de verwerking wordt ingegaan op de HMS Rotterdam (Figuur 2-8). Dit schip voer op 9 oktober 2006 de Westerschelde af. De Lidar stond die dag op meetlocatie 1 (Figuur 2-4). De wind stond zo dat de Lidar naar het zuidoosten gericht was om de pluimen het beste te kunnen meten. Omstreeks 10:30 uur UTC⁶ kruiste de rookpluim van dit schip het scanvlak van de Lidar. De SO₂-concentraties die op dat moment gemeten werden, zijn weergegeven in Figuur 2-9. In deze figuur staat op de horizontale as de afstand tot de Lidar en op de verticale as de hoogte boven het wateroppervlak. Merk op dat de verticale as uitgerekt is ten opzichte van de horizontale as, in werkelijkheid is het scanvlak veel langgerechter dan weergegeven. De kleur van het vlak geeft de concentratie SO₂ aan.

⁶ Alle tijden in dit rapport worden gegeven in UTC (*Universal Time Coordinated*). UTC loopt een uur achter op de in Nederland gebruikte Midden-Europese Tijd (MET), en twee uur op de Midden-Europese Zomertijd (MEZT); 10:30 uur UTC is dus 11:30 uur lokale tijd, en 12:30 uur lokale tijd als de zomertijd van kracht is.



Figuur 2-9. Doorsnede door de rookpluim van de HMS Rotterdam. De kleur is een maat voor de concentratie SO_2 in de lucht. De witte rechthoek geeft de pluim aan zoals die in de verdere analyse gebruikt is.

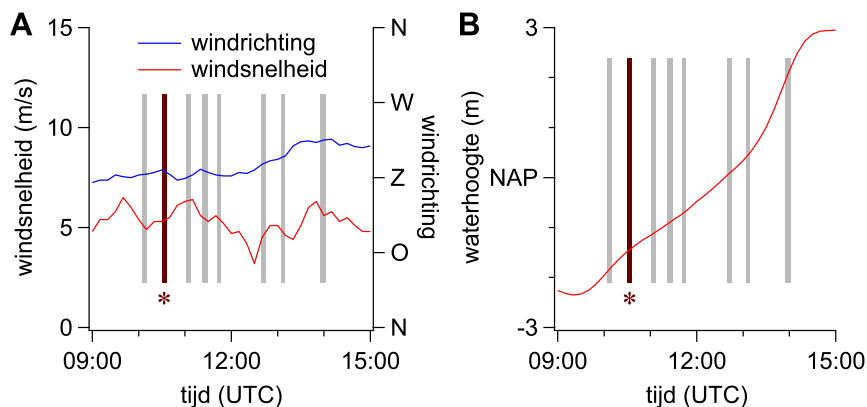
Voor de verdere verwerking tot een emissiegetal wordt in Figuur 2-9 de pluim geselecteerd (de witte rechthoek in Figuur 2-9, de uitsnede is weergegeven in Figuur 2-10 B). Voor elke hoogte wordt de totale hoeveelheid SO_2 op die hoogte bepaald. Dit levert een gaslastcurve op (ook weergegeven in Figuur 2-10 B). Door deze te vermenigvuldigen met het windprofiel (Figuur 2-10 A), gecorrigeerd voor de hoek tussen windrichting en scanvlak, en alle waarden op te tellen, wordt uiteindelijk het emissiegetal verkregen. Voor dit schip op dit tijdstip is dat 7,1 gram per seconde.



Figuur 2-10. **A:** logaritmisches windprofiel. **B:** uitsnede uit Figuur 2-9 van de rookpluim van de HMS Rotterdam, en de bijbehorende gaslastcurve.

Zoals vermeld in paragraaf 2.3 wordt bij het uitwerken van de metingen aan de Westerschelde de windsnelheid gebruikt die gemeten wordt door de nabijgelegen windmast van Rijkswaterstaat. Deze meetmast genereert elke 10 minuten onder meer een getal voor de windsnelheid

en windrichting. Ook wordt de waterhoogte gemeten. Het getal dat gebruikt wordt voor de windsnelheid is de snelheid gereduceerd tot de snelheid op 10 meter boven het zeeniveau. Uit de windsnelheid en de waterhoogte wordt het logaritmisch windprofiel berekend (Figuur 2-10 A). In Figuur 2-11 worden de wind- en watergegevens zoals gemeten door Rijkswaterstaat op 9 oktober 2006 weergegeven, met alle die dag gemeten schepen aangegeven. Hieruit wordt voor elk schip een windsnelheid, windrichting en waterhoogte afgelezen zoals die tijdens de passage gelden. Omdat een passage korter duurt dan 10 minuten (een schip blijft maximaal 5 minuten binnen het meetbereik van de Lidar) is één getal per passage voldoende, ook al worden van een schip per passage meerdere emissiegetallen bepaald.



Figuur 2-11. Wind- en watergegevens in Hansweert, gemeten door Rijkswaterstaat, op 9 oktober 2006. De op deze dag gemeten schepen zijn met grijze balkjes aangegeven. Het hier besproken schip, de HMS Rotterdam, is gemarkeerd met een *. **A**: windsnelheid, gereduceerd tot 10 meter hoogte, en windrichting. **B**: waterhoogte.

In Figuur 2-9 is de pluim duidelijk te onderscheiden van de achtergrond. Ook is duidelijk dat de hele pluim in beeld is. Er zijn tijdens de meetdagen echter ook situaties geweest waarin dat niet het geval was. Zo is het geregeld voorgekomen dat de pluim zo dicht bij het begin van het scanvlak lag dat een deel nog niet in beeld was. In die gevallen was over het algemeen op de scanvlakmeting ervoor of erna wel de hele pluim in beeld, zodat voor dat schip toch een emissiegetal gegeven kon worden. Ook is het voorgekomen dat twee schepen elkaar passeerden, net terwijl hun rookpluimen in beeld waren. In dat geval konden de rookpluimen niet van elkaar onderscheiden worden, en kon geen emissiegetal bepaald worden.

2.7 Van een emissiegetal naar het zwavelgehalte in de brandstof

De Lidar meet een emissiegetal in gram zwaveldioxide per seconde. De regelgeving rond scheepvaart stelt echter geen directe eisen aan de emissie, wel aan het zwavelgehalte van de verstoekte brandstof. Om uit een emissiegetal de zwavelfractie in de op dat moment verstoekte brandstof te bepalen is het nodig het brandstofverbruik op dat moment te kennen. Tijdens deze meetcampagne is daar voor een aantal schepen aandacht aan besteed. Van deze schepen is het gemiddelde brandstofverbruik bekend. Hieruit wordt het zwavelgehalte in de brandstof berekend met de volgende formule:

$$\text{zwavelgehalte} = \frac{\text{emissie} \cdot \frac{M_S}{M_{\text{SO}_2}}}{\text{verbruik}} \cdot 100\%$$

Hierin is:

zwavelgehalte: het zwavelgehalte in de brandstof, in massaprocenten;
 emissie: de door de Lidar gemeten emissie, in gram SO₂ per seconde;
 M_S: de atoommassa van zwavel, in gram per mol;
 M_{SO₂}: de molecuulmassa van SO₂, in gram per mol;
 verbruik: het brandstofverbruik, in gram brandstof per seconde.

Deze formule veronderstelt dat alle zwavel in de brandstof omgezet wordt in zwaveldioxide. Indien dit niet het geval is en de zwavel ook in de vorm van andere verbindingen uitgestoten wordt, leidt dit tot een onderschatting van het zwavelgehalte, aangezien de Lidar deze verbindingen niet meet. Verder is het verbruik van de schepen niet precies bekend; er zijn slechts schattingen. De in dit rapport gegeven zwavel fracties zijn daarom ook slechts schattingen.

2.8 Vergelijking met andere meetmethodes

Na de bepaling van het zwavelgehalte in de brandstof kunnen de gegevens van de Lidar vergeleken worden met de resultaten van meetmethodes die direct zo'n zwavelgehalte als uitkomst geven. In de meetcampagne die in dit rapport beschreven wordt, is gepoogd zo'n vergelijking te maken met de directe bepaling van het zwavelgehalte in aan boord genomen brandstofmonsters. Hiertoe zijn mensen aan boord gegaan van passerende schepen om deze monsters te nemen. Dit onderzoek werd uitgevoerd door het Centrum IMG (Inspectie Milieu en Gezondheidsadviesing) van het RIVM en VROM-Inspectie. Om een zo hoog mogelijke overlap te krijgen tussen Lidar-metingen enerzijds en monsternames anderzijds zijn in het tweede deel van de hier beschreven meetcampagne alle Lidar-metingen uitgevoerd op dagen dat er ook monsters genomen werden. Over de metingen verricht door IMG is elders gerapporteerd (Mooij et al., 2010).

2.9 Opzet meetcampagne

In deze studie worden de resultaten beschreven die gedurende de jaren 2006, 2007 en 2008 vergaard zijn. Tijdens het eerste jaar, 2006, lag de nadruk vooral op het aantonen dat met dit Lidar-instrument zwaveldioxide-emissies van zeeschepen gemeten konden worden. Er is toen gemeten op dagen waarop de omstandigheden optimaal waren voor een goede Lidar-meting. Hierover is elders gerapporteerd (Swart et al., 2008).

In de jaren 2007 en 2008 is de aandacht verschoven naar de vergelijking met de directe bepaling van het zwavelgehalte in aan boord genomen brandstofmonsters. Tijdens de metingen verricht in die jaren werd ernaar gestreefd om de uitstoot te meten van alle schepen waarvan ook brandstofmonsters genomen waren. Hiertoe werd de inzet van de Lidar afgestemd met IMG en VROM-Inspectie, die de monsters gingen nemen. Om aan boord van de schepen te komen werd door IMG

en VROM-Inspectie gebruik gemaakt van een politieboot. De inzet van deze boot diende lang van tevoren vastgelegd te worden. Daarom was het lastig de inzet van de Lidar optimaal te plannen, omdat er onvermijdelijk dagen bij waren waarop de weersomstandigheden voor Lidar-metingen suboptimaal waren.

3 Resultaten

In paragraaf 3.1 worden per meetdag de emissiegetallen gerapporteerd voor alle die dag gemeten schepen. Daarna worden in paragraaf 3.2 de resultaten van een bepaling van de onderste bepalingsgrens besproken. Ten slotte worden de resultaten samengevat in paragraaf 3.3.

3.1 Meetresultaten per meetdag

3.1.1 Meetresultaten 16 mei 2006

Deze dag stond de meetwagen in Hansweert op locatie 3 (Figuur 2-4). Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van zeven schepen. Aan vijf van deze schepen konden twee of meer emissiegetallen toegekend worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-1.

Tabel 3-1. Resultaten emissiemetingen op 16 mei 2006.

naam schip	op/af ^a	tijd (UTC) ^b	emissie (g/s)
MSC Jade	op	11:48-11:50	10
			9,8
			21
Probo Emu	op	12:00-12:02	23
			48
			33
Blexen	af	12:36-12:41	1,8
			1,5
			3,5
			2,8
			2,6
Arklow Rainbow	af	13:13-13:16	2,6
			4,9
			2,3
			1,1
			2,9
Chopin	af	13:23-13:26	0,91
			1,7
JA Sunrise	af	13:26-13:35	2,8
			pluim te dicht op pluim Stolt Inspiration, niet te analyseren
Stolt Inspiration	op	13:26-13:35	pluim te dicht op pluim JA Sunrise, niet te analyseren

^a Op: varend richting Antwerpen. Af: varend richting Vlissingen.

^b Het tijdsinterval dat de pluim van het schip op de Lidar in beeld is. Tijden in UTC (zie noot 6, pagina 20).

3.1.2 Meetresultaten 21 juni 2006

Deze dag stond de meetwagen in Hansweert op locatie 1. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van vijf schepen. Aan al deze schepen konden twee of meer emissiegetallen toegekend worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-2.

Tabel 3-2. Resultaten emissiemetingen op 21 juni 2006.

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Margareta B	af	11:49-11:51	0,64 6,1
Maersk Malacca	af	12:04-12:08	30 33 45
Tai Shan	op	12:10-12:14	17 20 16 19 19
Izmir Express	af	12:46-12:49	7,9 27
Ek-River	af	12:54-12:57	5,3 5,4 4,6

3.1.3 Meetresultaten 23 juni 2006

Deze dag stond de meetwagen in Hansweert op locatie 1. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van elf schepen. Aan drie van deze schepen konden twee of meer emissiegetallen toegekend worden. Dat dit bij de overige acht schepen niet kon, was te wijten aan de zwakke wind. Van die schepen werd de rookpluim niet door het scanvlak gedreven, of als het al gebeurde, pas na zoveel tijd dat de pluim niet meer als zodanig te herkennen was in het Lidar-signaal. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-3.

Tabel 3-3. Resultaten emissiemetingen op 23 juni 2006.

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Bastiaan Broere	af	10:06-10:08	0,22 9,5
Kristin Knudsen	op	10:08-10:10	pluim gaat niet door het scanvlak
Sichem Marbella	af	12:21-10:45	pluim gaat niet door het scanvlak
Trout	af	10:21-10:45	pluim gaat niet door het scanvlak
Vijitra Naree	op	11:45-11:50	2,9 5,4 7,4 8,3 5,5 2,1 1,7
Swalinge	op	11:55-12:03	pluim gaat niet door het scanvlak
MSC Eyra	op	12:08-12:10	pluim gaat niet door het scanvlak
MSC Mee May	af	12:17-12:20	3,1 2,7 3,1 2,9 3,6
Betsy S	op	12:20-12:22	pluim gaat niet door het scanvlak
Rhonestern	op	12:29-12:42	pluim gaat niet door het scanvlak
Atlantic Cartier	af	12:46-12:50	pluim gaat niet door het scanvlak

*3.1.4**Meetresultaten 9 oktober 2006*

Deze dag stond de meetwagen in Hansweert op locatie 1. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van twaalf schepen. Aan tien van deze schepen konden drie of meer emissiegetallen toegekend worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-4.

Tabel 3-4. Resultaten emissiemetingen op 9 oktober 2006.

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
MSC London	op	10:04-10:10	25
			31
			21
			26
			15
HMS Rotterdam	af	10:30-10:36	12
			14
			7,2
			7,1
			7,9
Altair	op	10:39-10:46	2,4
			pluim gaat niet door het scanvlak
			64
			26
			23
MSC Maureen	af	11:01-11:07	16
			6,6
			3,5
			3,7
			1,4
Betsy S	af	11:22-11:29	1,3
			15
			13
			8,6
			13
NCC Hijaz	op	11:41-11:46	20
			4,5
			6,7
			5,9
			5,0
Happy Girl	af	12:39-12:45	pluim gaat niet door het scanvlak
			27
			30
			13
			18
Neera Naree	op	12:45-12:49	26
			13
			18
			10
			16
CS AV Rio Rapel	op	13:01-13:04	1,6
			1,4
			1,1
			1,6
			7,8
Neveska Lady	af	13:05-13:12	0,44
			1,6
			7,8
			0,44
			1,6
Manzanillo II ⁷	af	13:55-13:58	1,6
			1,4
			1,1
			1,6
			7,8
Jilihu	op	13:58-14:02	0,44
			1,6
			7,8
			0,44
			1,6

⁷ Werkschip, dat na het passeren bezig was met de betonning op de Westerschelde.

3.1.5 Meetresultaten 10 oktober 2006

Deze dag stond de meetwagen in Hansweert op locatie 1. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van zeven schepen. Aan één van deze schepen konden drie emissiegetallen toegekend worden. Dat dit bij de overige zes schepen niet kon, was, net als bij de metingen van 23 juni, te wijten aan de zwakke wind. Van die schepen werd de rookpluim niet door het scanvlak gedreven, of als het al gebeurde, pas na zoveel tijd dat de pluim niet meer als zodanig te herkennen was in het Lidar-sigitaal. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-5.

Tabel 3-5. Resultaten emissiemetingen op 10 oktober 2006.

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Southern Juice	op	11:05-11:13	pluim gaat niet door het scanvlak
Manzanillo II	af	11:21-11:27	pluim gaat niet door het scanvlak
Sloman Challenger	op	11:27-11:33	pluim gaat niet door het scanvlak
MSC Marta	op	14:07-14:13	pluim gaat niet door het scanvlak
Al-Sabahia	op	14:23-14:31	pluim gaat niet door het scanvlak
Seaturbot	af	14:30-14:35	pluim gaat niet door het scanvlak
Stena Forecaster	af	14:41-14:44	2,8 1,9 2,0

3.1.6 Meetresultaten 16 oktober 2007

Deze dag stond de meetwagen op de Velserterminal op locatie 5. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van elf schepen. Een daarvan, de Geopotés 14, was een sleephopperzuiger die drie keer voorbij kwam gevaren. In totaal waren er dus veertien scheepspassages. Aan vijf van deze scheepspassages konden een of meer emissiegetallen toegekend worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-6.

Tabel 3-6. Resultaten emissiemetingen op 16 oktober 2007.

naam schip	vaarrichting ^a	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Narcea	O	8:13-8:19	2,5
Water Lelie met kraan	O	8:34-8:40	-
Rio	W	9:01-9:04	0,14 0,30
Westerschelde	W	9:04-9:06	-
<i>sleebootje</i>	W	9:14-9:15	-
Jedset	O	9:15-9:16	-
Explorer	W	9:16-9:17	-
Geopotes 14	W	9:23-9:26	4,5 4,0 3,3
P42	W	11:08-11:13	-
Geopotes 14	O	11:52-11:55	8,1 9,9
Scelveringhe	W	12:28-12:35	-
Stolt Hikawa	W	12:57-13:07	-
Geopotes 14	W	13:08-13:12	7,5 6,1 4,2

^a Vaarrichting. W: vaart naar het westen, O: vaart naar het oosten.

3.1.7 Meetresultaten 1 november 2007

Deze dag stond de meetwagen in Hansweert op locatie 2. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van 21 schepen. Aan negentien van deze schepen konden een of meer emissiegetallen toegekend worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-7.

Tabel 3-7. Resultaten emissiemetingen op 1 november 2007.

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Crigeer	af	9:08-9:09	-
Ginga Puma	op	9:25-9:28	1,2 0,74 0,69 0,49
Marble Highway	af	9:37-9:39	0,10 0,61 0,12
Oper Casablanca	af	9:50-9:51	0,13 0,44
MSC Mathilde	op	9:53-9:56	1,9 2,8 2,5
Okapy	af	10:27-10:33	-
Leda Maersk	af	10:36-10:39	29 21 22 13
Hilda Knutsen	op	10:41-10:44	3,9 4,1 11 4,9

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Buxsailor	af	11:20-11:23	9,7 8,6 9,1 11 5,9
Nibe Maersk	af	11:28-11:30	5,2 5,9 5,0
Birka Transporter	af	11:41-11:44	2,0 4,4 2,7 2,5
Philipp Essberger	op	12:00-12:02	6,1
Shipholbrock Sun	op	12:05-12:07	5,9 14
Oland	op	13:09-13:11	3,1
Ottawa Express	op	13:13-13:15	6,9 9,7 17
Baco-liner 2	op	13:26-13:29	14 6,0 6,8
Atlantis Alvarado	af	13:39-13:42	1,0 0,89 0,37 0,79 0,51
Grande America	op	14:18-14:21	16 28 26
Helene S	op	14:24-14:26	29 12
MSC Bremen	op	14:42-14:44	18 29
Cap Arnauti	op	14:48-14:49	23

3.1.8 Meetresultaten 2 november 2007

Deze dag stond de meetwagen in Hansweert op locatie 2. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van tien schepen. Aan geen van deze schepen kon een emissiegetal toegekend worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-8.

Tabel 3-8. Resultaten emissiemetingen op 2 november 2007.

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Ocean Light	op	8:51-8:57	-
Tarnvik	op	8:57-9:03	-
MCT Alioth	op	9:03-9:09	-
Alessandra Bottiglieri	op	9:17-9:26	-
Geest Trader	op	9:39-9:48	-
Stella Polaris	af	9:39-9:48	-
Njatasja Theresa	af	9:48-10:03	-
Gerd Sibum	op	10:03-10:14	-
Margaretha	af	10:14-10:21	-
Horn Cap	op	10:27-10:31	-

3.1.9 Meetresultaten 9 november 2007

Deze dag stond de meetwagen bij het Houtrakemaal op locatie 6. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van zeven passerende schepen, en aan de veerpont. Deze laatste werd twee keer gemeten. Er waren dus negen scheepspassages. Aan twee van deze schepen kon een emissiegetal toegekend worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-9.

Tabel 3-9. Resultaten emissiemetingen op 9 november 2007.

naam schip	vaarrichting ^a	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Rijkspont 8 Buitenhuizen	N	13:32-13:39	-
Sophia	W	13:32-13:39	-
draagvleugelboot Karla	O	13:37-13:38	0,35
Rijkspont 8 Buitenhuizen	Z	13:44-13:46	-
Condor	W	13:53-13:55	-
Nitrico II	W	14:27-14:37	-
draagvleugelboot Catharina Amalia	O	14:37-14:38	0,09
Argus	W	14:39-14:44	-
Orisant	W	15:10-15:15	-

^a Vaarrichting. N: kruist het kanaal van zuid naar noord, Z: van noord naar zuid. W: vaart naar het westen, O: naar het oosten.

3.1.10 Meetresultaten 14 november 2007

Deze dag stond de meetwagen in Walsoorden op locatie 4. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van twintig schepen. Aan vijftien van deze schepen konden een of meer emissiegetallen toegekend worden. Merk op dat de MSC Grace en Alpha Agas tegelijkertijd passeerden. Hun rookpluimen konden echter goed uit elkaar gehouden worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-10.

Tabel 3-10. Resultaten emissiemetingen op 14 november 2007.

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Bow Sirius	op	9:27-9:30	2,9
			4,6
Dion	op	9:33-9:36	1,1
			2,2
			3,5
			1,7
			0,83
MSC Grace	op	9:51-9:56	2,0
			5,1
			4,9
			3,3
Alpha Agas	op	9:52-9:58	0,72
			2,7
			1,4
			1,7
			3,1
			2,6
			0,52
Dutch Faith	op	10:13-10:17	1,3
			1,4
			1,4
Dole Europa	af	10:19-10:21	3,2
			6,3
Ostra	op	10:27-10:31	0,55
			0,47
			0,52
			0,35
			0,22
Stability	af	10:32-10:50	-
Tone	op	10:47-10:47	0,97
			0,52
			0,45
Ever Result	op	10:59-11:04	19
			9,0
			11
Stolt Guillemot	af	11:05-11:10	-
Grendon	op	11:49-11:51	0,23
Nora	op	12:15-12:18	4,0
			1,7
Delmas	op	12:25-12:30	2,0
Annemone			1,3
			0,22
			0,02
Coral Nettuno	af	12:30-12:39	-
General	op	12:39-12:42	1,2
Dabrowski			0,55
Lexa Maersk	op	13:32-13:35	7,2
			8,3
			2,3
Clipper Sira	op	13:47-13:48	0,11
Alpine Girl	op	14:44-14:53	-
MSC Monica	af	14:59-15:00	-

3.1.11 Meetresultaten 15 november 2007

Deze dag stond de meetwagen in Walsoorden op locatie 4. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van achttien schepen. Aan negen van deze schepen konden een of meer emissiegetallen toegekend worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-11.

Tabel 3-11. Resultaten emissiemetingen op 15 november 2007.

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Alcedo	op	10:12-10:13	1,1
Pinta	op	10:38-10:47	-
Itajai Express	op	11:07-11:10	5,9
			3,7
Deltagas	af	11:39-11:46	-
Granato	op	11:59-12:02	4,1
			3,4
			2,3
Valparaiso Express	op	12:06-12:08	7,6
			1,9
Cerambycida	op	12:45-12:47	-
Clipper Inge	af	12:47-12:52	-
Pakri Victory	op	12:52-12:54	5,1
			6,7
Irbe Venta	op	12:56-13:00	0,51
			1,1
Orisant	op	13:06-13:14	-
Georg Essberger	op	13:14-13:16	-
Pinta	op	13:30-13:33	0,70
			0,71
Southern Juice + MSC Japan	af	14:02-14:07	rookpluimen mengden, daarom geen emissiegetal
Pine Arrow	af	14:22-14:25	1,3
			0,79
MSC Baleares	op	14:41-14:44	2,1
			1,5
Bluarrow	af	14:49-15:04	-

3.1.12 Meetresultaten 16 november 2007

Deze dag stond de meetwagen in Hansweert op locatie 2. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van twee schepen. Aan een van deze schepen konden drie emissiegetallen toegekend worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-12.

Tabel 3-12. Resultaten emissiemetingen op 16 november 2007.

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Sigas Centurion	op	11:28-11:43	-
Atlantic Cartier	af	12:44-12:47	14
			18
			20

3.1.13 Meetresultaten 15 mei 2008

Deze dag stond de meetwagen in Walsoorden op locatie 4. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van twaalf schepen. Aan een van

deze schepen kon een emissiegetal toegekend worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-13.

Tabel 3-13. Resultaten emissiemetingen op 15 mei 2008.

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Gerd Sibum	op	8:41-8:55	-
Nord Bell	op	9:03-9:16	-
Stolt Avocet	op	9:19-9:28	-
Alana	op	9:19-9:28	-
Knud Lauritzen	op	9:57-9:59	2,9
MSC Sindy	af	10:03-10:09	-
Doerte	af	12:42-13:03	-
Gent	op	12:42-13:03	-
Jaeger Arrow	af	12:42-13:03	-
Poplar Arrow	op	13:30-13:42	-
Shipolbrock Luban	op	13:49-13:58	-
Gwenn	op	14:05-14:14	-

3.1.14 Meetresultaten 16 mei 2008

Deze dag stond de meetwagen in Hansweert op locatie 2. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van elf schepen. Aan twee van deze schepen konden een of meer emissiegetallen toegekend worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-14.

Tabel 3-14. Resultaten emissiemetingen op 16 mei 2008.

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
OOCL Tokyo	op	8:00-8:11	-
MSC Malin	op	8:13-8:26	-
Arco Dijk	af	8:39-8:45	-
Grande America	op	8:48-8:55	-
Al Bahia	op	9:24-9:25	33
<i>Russisch schip</i>	op	9:33-9:40	-
Fry Stream	op	9:57-10:06	-
MSC Lauren	op	11:00-11:08	-
Sigas Earl	af	11:25-11:34	-
Nord Bell	af	11:38-12:41	2,0 5,5 3,2
Tinsdal	af	11:59-12:03	-

3.1.15 Meetresultaten 9 oktober 2008

Deze dag stond de meetwagen in Hansweert op locatie 2. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van zeventien schepen. Aan vier van deze schepen konden een of meer emissiegetallen toegekend worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-15.

Tabel 3-15. Resultaten emissiemetingen op 9 oktober 2008.

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Saint Roch + Clipper Nadja	af	8:06-8:10	rookpluimen mengden, daarom geen emissiegetal
Atlantic Companion	op	9:42-9:43	10
Birka Express	op	10:37-10:51	-
Atlantic Concert	af	12:04-12:06	27
			13
Emotion	op	12:08-12:15	-
Zim Rio Grande	af	12:58-13:05	-
Grande Francia	af	13:05-13:09	26
			32
			12
Nakskov Maersk	op	13:12-13:24	-
San Fernando	op	13:44-13:46	-
Ym Utopia	af	13:47-13:49	29
			15
Frisia Lissabon	op	13:55-14:04	-
Free Impala	af	13:55-14:04	-
Mejana	af	13:55-14:04	-
Xim Pu Dong	op	14:20-14:38	-
Toronto Express	op	14:20-14:38	-
Cmacgm Cortess	op	14:40-14:46	-

3.1.16 Meetresultaten 10 oktober 2008

Deze dag stond de meetwagen in Hansweert op locatie 2. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van 22 schepen. Aan dertien van deze schepen konden een of meer emissiegetallen toegekend worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-16.

Tabel 3-16. Resultaten emissiemetingen op 10 oktober 2008.

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Kraftca	op	7:42-7:36	8,3 18 11
Emotion + Stolt Jade	af	7:48-7:55	rookpluimen mengden, daarom geen emissiegetal
Sigas Earl	af	7:56-7:58	5,5 7,1
Mary Bonsild	af	8:03-8:09	-
John Mitchell	af	8:27-8:30	7,1 6,6 4,9
APL London	af	8:51-8:54	37 22
Reinbek WG Huggin	af	9:02-9:05	20 26 17
Manzanillo II	af	9:10-9:12	8,4 4,2
Stolt Tern	af	9:16-9:24	-
MSC Togo	af	9:31-9:34	18 35 12
Cmacgm Quetzal	op	9:34-9:39	-
MSC France	op	9:46-9:48	16 33
Cool Water	op	9:52-9:56	-
MSC Sweden	af	10:19-10:21	25 17
Ruth Borghard	op	10:21-10:25	-
KLPD P41	af	11:34-11:35	0,27
Frisia Lissabon	af	11:34-11:37	24 18 17
Mar Patricia	op	12:20-12:21	0,10
Manzanillo II	af	12:46-12:53	-
Tempest	af	13:01-13:08	-
Xin Pu Dong	af	13:19-13:23	40 36 27 16

3.1.17 Meetresultaten 17 november 2008

Deze dag stond de meetwagen in Hansweert op locatie 2. Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van dertien schepen. Aan zes van deze schepen konden twee of meer emissiegetallen toegekend worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-17.

Tabel 3-17. Resultaten emissiemetingen op 17 november 2008.

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Happy Falcon	op	9:26-9:36	-
JRS Capella	op	9:48-9:50	8,0
Petrohue + Lisa	op	10:08-10:13	20 rookpluimen mengden, daarom geen emissiegetal
Hibiyapark	af	10:34-10:39	20 11 5,7 4,9
Beautrophy	af	11:02-11:10	-
MSC Bremen	op	11:38-11:42	17 42 25 36
Bro Distributor	op	12:45-12:53	-
Amsteldijk	af	14:14-14:18	9,0 10 7,7
Ionian Princess	op	14:26-14:35	-
Mary Wonsild	af	14:50-14:52	0,55 0,22
Selandia Swan	af	15:11-15:13	7,3 12
Skier Star	af	15:28-15:30	-

3.1.18 Meetresultaten 18 november 2008

Deze dag stond de meetwagen in Hansweert op locatie 2. Er werden metingen gedaan aan de rookpluim van een schip. Daaraan konden drie emissiegetallen toegekend worden. De resultaten worden gegeven in Tabel 3-18.

Tabel 3-18. Resultaten emissiemetingen op 18 november 2008.

naam schip	op/af	tijd (UTC)	emissie (g/s)
Bertina	af	10:43-10:47	9,7 8,1 6,5

3.2 Bepaling onderste bepalingsgrens

De bepalingsgrens van de metingen werd bepaald aan de hand van meetresultaten in situaties zonder dat er rookpluimen aanwezig waren van langsvarende schepen. Uit deze meetresultaten werd een emissiegetal bepaald, op dezelfde manier (zie paragraaf 2.6) als voor de metingen waar wel schepen aanwezig waren. Deze bepaling is gedaan voor een zestal scanvlakmetingen, alle uitgevoerd op 9 oktober 2006. De emissiegetallen worden gegeven in Tabel 3-19. Het gemiddelde van deze zes getallen is een inschatting van de onderste bepalingsgrens, en is 0,1 gram SO₂ per seconde.

Tabel 3-19. Resultaten emissiemetingen zonder rookpluimen, 9 oktober 2006.

tijd (UTC)	emissie (g/s)
11:24-11:26	0,11
12:44-12:45	0,06
10:30-10:31	0,14
11:01-11:02	0,22
11:45-11:45	0,07
13:05-13:05	0,09
gemiddelde	0,1 ± 0,1

3.3 Overzicht van alle meetresultaten

In de eerste campagne in 2006 werden op vijf meetdagen aan 42 schepen metingen verricht. Voor 24 schepen kon een emissiegetal bepaald worden. Een overzicht over de meetdagen wordt gegeven in Tabel 3-20.

Tabel 3-20. Overzicht van de meetdagen in 2006.

datum	schepen gemeten ^a	schepen met emissiegetal ^b	wind-snelheid (m/s) ^c	wind-richting (°) ^d
16-05-2006	7	5	3,3	220-279
21-06-2006	5	5	9,8	209-213
23-06-2006	11	3	1,4	151-219
09-10-2006	12	10	5,2	177-226
10-10-2006	7	1	3,0	73-136
alle dagen	42	24		

^a Aan de rookpluimen van dit aantal schepen werden metingen gedaan.

^b Voor dit aantal schepen kon een emissiegetal bepaald worden.

^c De gemiddelde windsnelheid op deze dag.

^d De twee uiterste windrichtingen op deze dag, in graden ten oosten van het noorden. Een windrichting van 270° is dus westenwind.

Er waren drie zeer succesvolle dagen (16 mei, 21 juni en 9 oktober) waarop voor 20 van de 24 gemeten schepen ook een emissiegetal bepaald kon worden. Voor de andere twee dagen, 23 juni en 10 oktober, lukte dat slechts voor vier van de zestien schepen. In hoofdstuk 4 worden de factoren besproken die bepalen of van een passerend schip de emissie gemeten kan worden.

In Tabel 3-21 wordt een overzicht gegeven van het totaal aantal gemeten schepen in alle jaren.

Tabel 3-21. Overzicht gemeten schepen.

jaar	schepen gemeten ^a	schepen met emissiegetal ^b	succes ^c
2006	42	24	57%
2007	93	51	55%
2008	76	27	36%
alle jaren	211	102	48%

^a Aan de rookpluimen van dit aantal schepen werden metingen gedaan.

^b Voor dit aantal schepen kon een emissiegetal bepaald worden.

^c Percentage schepen waarvoor een emissiegetal bepaald kon worden.

In Tabel 3-22 wordt voor elk gemeten schip een gemiddeld emissiegetal gegeven. Dit getal is het gemiddelde van de een tot zeven emissiegetallen zoals gegeven in Tabel 3-1 tot en met Tabel 3-18. Indien er meer dan één emissiegetal bepaald is, wordt ook de standaardafwijking gegeven. Dit is een maat voor de variatie in de individuele emissiegetallen. Ook het aantal emissiegetallen is gegeven.

Tabel 3-22. Resultaten emissiemetingen.

naam schip	meet-locatie	datum	aantal emissie getallen	gemiddelde emissie (g/s)
MSC Jade	Hansweert	16-05-2006	3	14 ± 6
Probo Emu			3	35 ± 12
Blexen			6	2,5 ± 0,7
Arklow Rainbow			5	2,4 ± 1,6
Chopin			2	2,2 ± 0,8
Margareta B	Hansweert	21-06-2006	2	3,4 ± 3,9
Maersk Malacca			3	36 ± 8
Tai Shan			5	18 ± 1
Izmir Express			2	17 ± 13
Ek-River			3	5,1 ± 0,4
Bastiaan Broere	Hansweert	23-06-2006	2	4,9 ± 6,6
Vijitra Naree			7	4,8 ± 2,6
MSC Mee May			5	3,1 ± 0,3
MSC London	Hansweert	09-10-2006	5	24 ± 6
HMS Rotterdam			6	8,4 ± 4,2
MSC Maureen			3	37 ± 23
Betsy S			6	5,5 ± 5,7
NCC Hijaz			5	14 ± 4
Happy Girl			4	5,5 ± 1,0
CS AV Rio Rapel			4	21 ± 7
Neveska Lady			5	17 ± 6
Manzanillo II			3	1,4 ± 0,3
Jilihu			4	2,9 ± 3,3
Stena Forecaster	Hansweert	10-10-2006	3	2,2 ± 0,5
Narcea	Velser-terminal	16-10-2007	1	2,5

naam schip	meet-locatie	datum	aantal emissie getallen	gemiddelde emissie (g/s)
Rio			2	0,2 ± 0,1
Geopotes 14 ⁸			3	3,9 ± 0,6
Geopotes 14			2	9,0 ± 1,3
Geopotes 14			3	5,9 ± 1,6
Ginga Puma	Hansweert	01-11-2007	4	0,8 ± 0,3
Marble Highway			3	0,3 ± 0,3
Oper			2	0,3 ± 0,2
Casablanca				
MSC Mathilde			3	2,4 ± 0,5
Leda Maersk			3	24 ± 4,5
Hilda Knutsen			4	6,0 ± 3,4
Buxsailor			4	9,5 ± 0,9
Nibe Maersk			3	5,3 ± 0,5
Birka			4	2,9 ± 1,0
Transporter				
Philipp			1	6,1
Essberger				
Shipholbrock			2	9,7 ± 5,5
Sun				
Oland			1	3,1
Ottawa Express			3	11 ± 5,1
Baco-liner 2			3	8,9 ± 4,3
Atlantis			5	0,7 ± 0,3
Alvarado				
Grande America			3	23 ± 6,4
Helene S			3	20 ± 12
MSC Bremen			2	24 ± 7,9
Cap Arnauti			1	23
Karla	Houtrak-gemaal	09-11-2007	1	0,4
Catharina			1	0,1
Amalia				
Bow Sirius	Wals-oorden	14-11-2007	2	3,7 ± 1,2
Dion			5	1,9 ± 1,0
MSC Grace			4	3,8 ± 1,5
Alpha Agas			7	1,8 ± 1,0
Dutch Faith			2	1,4 ± 0,1
Dole Europa			2	4,8 ± 2,2
Ostra			5	0,4 ± 0,1
Tone			3	0,6 ± 0,3
Ever Result			3	13 ± 5,4
Grendon			2	0,2 ± 0,04
Nora			2	2,9 ± 1,6
Delmas			4	0,9 ± 0,9
Annemone				
General			2	0,9 ± 0,5
Dabrowski				

⁸ Sleephopperzuiger, kwam deze dag drie keer voorbij gevaren.

naam schip	meet-locatie	datum	aantal emissie getallen	gemiddelde emissie (g/s)
Lexa Maersk			3	5,9 ± 3,2
Clipper Sira			1	0,1
Alcedo	Wals-oorden	15-11-2007	1	1,1
Itajai Express			2	4,8 ± 1,5
Granato			3	3,3 ± 0,9
Valparaiso Express			2	4,7 ± 4,0
Pakri Victory			2	5,9 ± 1,1
Irbe Venta			2	0,8 ± 0,4
Pinta			2	0,7 ± 0,00
Pine Arrow			2	1,0 ± 0,4
MSC Baleares			2	1,8 ± 0,4
Atlantic Cartier	Hansweert	16-11-2007	3	17 ± 2,8
Knud Lauritzen	Wals-oorden	15-05-2008	1	2,9
Al Bahia	Hansweert	16-05-2008	1	33
Nord Bell			3	3,6 ± 1,8
Atlantic Companion	Hansweert	09-10-2008	1	10
Atlantic Concert			2	20 ± 9,5
Grande Francia			3	23 ± 10
Ym Utopia			2	22 ± 10
Kraftca	Hansweert	10-10-2008	3	12 ± 4,7
Sigas Earl			2	6,3 ± 1,1
John Mitchell			3	6,2 ± 1,1
APL London			2	29 ± 11
Reinbek WG Huggin			3	21 ± 4,8
Manzanillo II			2	6,3 ± 3,0
MSC Togo			3	21 ± 12
MSC France			2	24 ± 12
MSC Sweden			2	21 ± 5,2
KLPD P41			1	0,3
Frisia Lissabon			3	20 ± 4,1
Mar Patricia			1	0,1
Xin Pu Dong			4	30 ± 10
JRS Capella	Hansweert	17-11-2008	2	14 ± 8,7
Hibiyapark			4	10 ± 7,0
MSC Bremen			4	30 ± 11
Amsteldijk			3	9,1 ± 1,3
Mary Wonsild			2	0,4 ± 0,2
Selandia Swan			2	9,6 ± 3,3
Bertina	Hansweert	18-11-2008	3	8,1 ± 1,6

3.4 Bepaling zwavelfractie in de brandstof

Zoals beschreven in paragraaf 2.7 is het voor het bepalen van de zwavelfractie in de brandstof nodig om te weten wat het actuele brandstofverbruik van een schip was op het moment dat de Lidar de meting deed. Deze gegevens zijn aangeleverd door VROM-Inspectie,

maar zijn slechts voor een beperkt aantal schepen beschikbaar. Uitgaande van deze gegevens en gebruikmakend van de formule gegeven in paragraaf 2.7 konden voor zeven schepen zwavelfracties bepaald worden. Deze worden gegeven in Tabel 3-23.

Tabel 3-23. Bepaling zwavelfracties.

naam schip	datum	verbruik (ton/dag) ^a	emissie (g/s) ^b	zwavelfractie (massa %)
Narcea	16-10-2007	9	2,5	1,2
Geopotes 14	16-10-2007	30	3,9	0,56
Geopotes 14	16-10-2007	30	9	1,3
Knud	15-05-2008	47	2,9	0,27
Lauritzen				
Mar Patricia	10-10-2008	17	0,1	0,025
JRS Capella	17-11-2008	26	14,1	2,3
Selandia	17-11-2008	23	9,6	1,8
Swan				

^a Het brandstofverbruik van dit schip, uitgaande van het gebruik van 75 procent van de hoofdmotorcapaciteit.

^b De gemiddelde emissie gemeten voor dit schip; zie ook Tabel 3-22.

Drie van deze schepen waren ook door IMG en VROM-Inspectie bemonsterd. De aan boord bepaalde zwavelfracties konden vergeleken worden met de uit de Lidar-meting bepaalde zwavelfracties; de resultaten worden gegeven in Tabel 3-24.

Tabel 3-24. Vergelijking zwavelfracties.

naam schip	datum	zwavelfractie Lidar (massa %) ^a	zwavelfractie aan boord (massa %) ^b
Mar Patricia	10-10-2008	0,025	1,330
JRS Capella	17-11-2008	2,3	1,380
Selandia	17-11-2008	1,8	1,340
Swan			

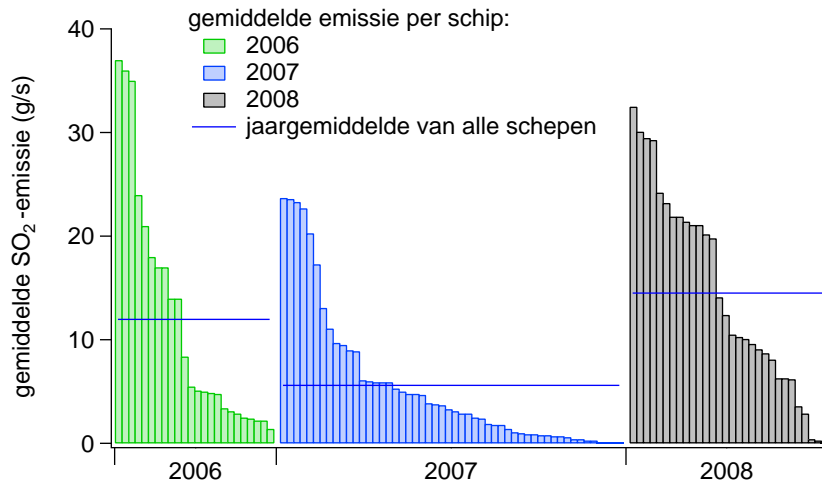
^a De zwavelfractie van de brandstof zoals op afstand bepaald door de Lidar.

^b De zwavelfractie van de brandstof zoals aan boord bepaald.

De emissie van de Mar Patricia zoals gemeten door de Lidar is erg laag; daaruit volgt ook een lage zwavelfractie, veel lager dan de fractie die aan boord bepaald is. De zwavelfracties die de Lidar bepaalt voor de JRS Capella en de Selandia Swan komen een stuk beter overeen met de aan boord bepaalde. Drie schepen is echter onvoldoende om betrouwbaar te kunnen stellen of de meetmethodes dezelfde uitkomst geven; daar zijn meer gelijktijdige metingen voor nodig.

Als het nominale brandstofverbruik van een schip bekend is, evenals de snelheid, kan het actuele brandstofverbruik gemodelleerd worden. Het is dan mogelijk om voor bijna elk schip een schatting te maken van het zwavelgehalte in de brandstof. Hier wordt in paragraaf 4.3 verder op ingegaan.

3.5 Ontwikkeling van de emissie door de jaren heen



Figuur 3-1. De ontwikkeling van de emissie over de jaren heen. Elke verticale balk is een schip waarvoor een gemiddeld emissiegetal gemeten is. Per jaar zijn de emissies aflopend gesorteerd. Ook is per jaar de gemiddelde emissie over alle dat jaar gemeten schepen aangegeven.

Op 21 november 2006, dus na de eerste meetcampagne, werden strengere regels van kracht voor de uitstoot van zeeschepen op de Noordzee (zie ook paragraaf 1.2). Zijn de gevolgen daarvan terug te zien in deze metingen? Daartoe zijn alle gemeten emissiegetallen (zie Tabel 3-22) in Figuur 3-1 uitgezet tegen de tijd. In 2007 is een lichte afname te zien ten opzichte van 2006; deze wordt in 2008 weer meer dan teniet gedaan. Het is lastig hier een definitieve conclusie aan te verbinden. De emissie hangt sterk af van de grootte van een schip en het is onbekend of er in 2007 wellicht kleinere schepen gemeten zijn dan in 2006 en 2008. Alleen door de zwavelfracties van de brandstof te bepalen wordt een zinvolle vergelijking mogelijk.

4 Discussie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste kenmerken van de Lidar-methode besproken. In paragraaf 4.1 wordt geanalyseerd welke factoren bepalen of de Lidar-meting met succes een waarde voor de zwaveldioxide-uitstoot oplevert. Vervolgens wordt in paragraaf 4.2 een aantal prestatiekenmerken van de methode besproken, zoals precisie, onderste bepalingsgrens en selectiviteit. In paragraaf 4.3 wordt besproken hoe op basis van de Lidar-metingen een schatting van het zwavelgehalte van de gebruikte brandstof gemaakt kan worden. Het hoofdstuk eindigt met de belangrijkste conclusies van de hele studie.

4.1 Factoren die de slaagkans van de Lidar-meting bepalen

In de studie blijkt dat de meettechniek voor ongeveer de helft (Tabel 3-21 op pagina 40) van de passerende schepen een emissiegetal heeft opgeleverd. In het onderstaande worden de factoren besproken die samen bepalen of met de Lidar-techniek een emissiegetal kan worden verkregen. Aan het eind van het hoofdstuk worden de resultaten samengevat in een kader.

4.1.1 *Rol windrichting*

Tijdens de eerste meetcampagne, in 2006, heeft de meetwagen steeds vanuit nagenoeg dezelfde meetlocatie bij Hansweert gefunctioneerd. Gebleken is dat door de ligging van de vaarroute ten opzichte van deze locatie alleen geschikte metingen konden worden gedaan van zuidwestenwind tot zuidoostenwind (ongeveer negentig graden op de windroos). Alleen bij deze windrichtingen waren scanvlakken te vinden die enerzijds min of meer haaks op de rookpluim stonden en anderzijds dicht genoeg bij de schepen lagen voor een meting. Gelukkig komt wind uit deze windrichtingen veel voor in Nederland. Niettemin speelde de windrichting tijdens deze meetcampagne een belangrijke beperkende rol bij de inzet. Dit is deels toe te schrijven aan een ongelukkig toeval: tijdens de voor de campagne gereserveerde meetweken zat de wind vaker dan gemiddeld in de verkeerde hoek. Niettemin kon na deze meetcampagne geconcludeerd worden dat het voor operationele inzet wenselijk is om te kunnen beschikken over meerdere meetlocaties, geschikt voor verschillende windrichtingen. Het is dan gemakkelijker om een gepland aantal meetdagen te kunnen realiseren in een aangegeven periode.

Voor de campagnes in 2007 en 2008 is dan ook, naast Hansweert, een tweede locatie aan de Westerschelde gebruikt, vlakbij de haven van Walsoorden. Op deze tweede locatie kon gemeten worden bij zuidoosten tot noordoostenwind (wederom ongeveer negentig graden op de windroos). Hierdoor werd het aantal dagen waarop het instrument succesvol ingezet kon worden inderdaad vergroot.

4.1.2 *Rol windsnelheid*

De eerste meetcampagne, in 2006, kende vijf meetdagen. Op drie daarvan leidden vrijwel alle metingen tot een SO₂-emissiegetal, op de andere twee slechts een minderheid of één enkele. Het essentiële

verschil blijkt te liggen in de windsnelheid (zie Tabel 3-20). Op dagen met een geringe windsnelheid werkt een aantal factoren tegen een geslaagde SO₂-meting:

- De pluimen van de schepen verspreiden zich meer en zijn hierdoor groter en minder scherp bepaald.
- De windsnelheid zelf is minder goed bepaald. Dit werkt rechtstreeks door naar de nauwkeurigheid van de meting.
- De windrichting is veelal variabelere. Ook dit werkt door in het meetresultaat. Bovendien valt een aantal schepen af, omdat de pluim niet of niet goed door het scanvlak gaat.

Uit de studie blijkt dat bij een minimale windsnelheid van vijf meter per seconde, windkracht 3 Beaufort, deze problemen geen rol meer spelen. Lagere windsnelheden treden zeker aan de kust en boven water slechts zelden op. Dat ze in deze eerste campagne toch voorkomen, komt in de eerste plaats omdat er aanvankelijk van uitgegaan werd dat lage windsnelheden juist een voordeel zouden zijn, omdat de optredende concentraties dan hoger zijn. Daarnaast moest aan het einde van de campagne in verband met de naderende deadline gekozen worden voor minder geschikte meetdagen.

4.1.3 *Samenwerking met andere meetmethodes*

In de jaren 2007 en 2008 is de aandacht verschoven naar de vergelijking met de directe bepaling van het zwavelgehalte in aan boord genomen brandstofmonsters. Tijdens de metingen verricht in die jaren werd ernaar gestreefd om de uitstoot te meten van alle schepen waar ook brandstofmonsters van genomen waren. Hiertoe werd de inzet van de Lidar afgestemd met IMG, dat de monsters ging nemen. Om aan boord van de schepen te komen werd door IMG samengewerkt met het Korps Landelijke Politiediensten (KLPD), dat de monsternemers per politieboot afzette op de te bemeten schepen. De inzet van deze boot diende maanden van tevoren vastgelegd te worden, waarbij steeds een reeks van twee of drie opeenvolgende dagen ingepland werd. Voor de inzet van de Lidar bleef er dan ook weinig ruimte over voor het uitkiezen van de optimale weersomstandigheden. Om de kans op overlap tussen Lidar-metingen en monsternemingen te maximaliseren is de Lidar ingezet op dagen waarop het weer niet optimaal was. Vooral weinig of variabele wind kwam geregeld voor. Dit verklaart waarom de slaagkans van de metingen uit 2007 en 2008 lager was dan de slaagkans van de metingen uit 2006, ondanks het beschikbaar zijn van een andere locatie en van de kennis dat lage windsnelheden ongunstig zijn.

4.1.4 *Andere beperkingen*

Het optreden van neerslag is de enige andere serieuze beperking. Regen heeft een nadelige invloed op de optische echo's waarmee de Lidar werkt. Bovendien is de meetopstelling zelf slechts beperkt regenbestendig. Het regent in Nederland ongeveer 6 procent van de tijd, aan de kust wat minder.

Ten slotte moet nog worden vermeld dat dezelfde meetwagen ook wordt ingezet voor andere milieumetingen (zie paragraaf 1.4). Hierdoor

is het instrument niet altijd op afroep beschikbaar. Wel kan het instrument voor een bepaalde periode worden gereserveerd.

Slaagkans samengevat

De meteorologische situatie is uiteindelijk bepalend voor de slaagkans. Er moet voldoende wind zijn en de wind moet een voor de meetlocatie geschikte windrichting hebben. Ook moet het niet regenen. Als aan deze voorwaarden is voldaan, kan per meetdag met zeer grote slaagkans een groot aantal schepen worden gemeten.

Essentieel is dat voorzien wordt in een voldoende aantal meetlocaties passend bij verschillende windrichtingen. Wanneer hieraan voldaan wordt, vervallen de meeste beperkingen.

Het blijft echter zo dat niet op voorhand gegarandeerd kan worden dat op een vooraf bepaalde datum kan worden gemeten.

4.2 Prestatiekenmerken Lidar-emissiemeting

In deze paragraaf wordt een aantal prestatiekenmerken van de Lidar-emissiemeting beschreven, zoals precisie, onderste bepalingsgrens en selectiviteit. Aan het eind van de paragraaf worden de resultaten samengevat in een kader.

4.2.1 Precisie

In hoofdstuk 3 worden voor een groot aantal schepen de resultaten van de verschillende scans van ongeveer 45 seconden getoond. Elke scan kan worden opgevat als een onafhankelijke meting van de uitstoot. Voor de meeste schepen kon meer dan één scan worden gedaan, zodat voor alle schepen dus ook meer dan één emissiegetal kon worden vastgesteld. Deze getallen vertonen soms een aanzienlijke spreiding. Wat is de oorzaak van deze spreiding en wat betekent dit voor de nauwkeurigheid van de meting?

4.2.2 Rol variabiliteit emissie

In de eerste plaats moet worden opgemerkt dat de gemeten verschillen in een aantal gevallen heel goed op werkelijke verschillen in de emissie terug te voeren kunnen zijn. Bij de metingen aan de Westerschelde (meetlocaties Hansweert en Walsoorden) varen de schepen een bochtig circuit door de vaargeul. Tijdens de meetdagen kon meermaals aan de hand van de waargenomen roetuitstoot worden vastgesteld dat 'gas gegeven werd'. De werkelijke uitstoot is dus niet altijd een constante.

4.2.3 De nauwkeurigheid van de Lidar-meting zelf

De Lidar-meting zelf heeft – net als elke andere meting – grenzen aan de nauwkeurigheid. Factoren die hierbij een rol spelen, zijn de variabiliteit van de wind (de richting en de snelheid), het slingeren ('meanderen') van de rookpluim, en de nauwkeurigheid van de concentratiemeting door de Lidar. In Bijlage 1 wordt hier nader op ingegaan.

Het is op basis van de studie niet mogelijk om te onderscheiden welke van de bovenstaande factoren, de echte emissievariaties of de meeton nauwkeurigheid, de belangrijkste bijdrage vormt aan de spreiding van de resultaten van de verschillende scans. Wel kan een bovenlimiet worden afgeleid voor de nauwkeurigheid van de Lidar-meting, door aan te nemen dat de emissies van de schepen helemaal niet variëren. In Bijlage 1 wordt deze analyse uitgewerkt. Afgeleid wordt dat voor de onnauwkeurigheid van de Lidar-meting een bovenlimiet geldt van ongeveer 20 procent. Deze bovenlimiet bevat echter ook de variabiliteit van de emissie gedurende de tijd dat de uitstoot van een schip gemeten wordt. Er zijn aanwijzingen dat de Lidar-methode zelf nauwkeuriger is, omdat voor een aantal schepen veel preciezere resultaten worden verkregen.

4.2.4 *Onderste bepalingsgrens*

Zoals besproken in paragraaf 3.2 is de onderste bepalingsgrens vastgesteld door middel van de bepaling van een emissiegetal in een deel van de atmosfeer waar geen pluim in het scanvlak aanwezig was. Als onderste bepalingsgrens wordt 0,1 gram zwaveldioxide per seconde vastgesteld. De gemeten scheepsemissies zitten hier in de regel aanzienlijk boven.

4.2.5 *Selectiviteit*

De selectiviteit van de Lidar-methode wordt bepaald door het al dan niet bestaan van gassen naast het doelgas (hier SO_2) waarvoor de Lidar gevoelig is. Zoals uitgelegd in paragraaf 2.1 is de Lidar gevoelig voor een gas als dat gas de twee kleuren licht die de Lidar uitzendt verschillend verzwakt. Het verschil in verzwakking per hoeveelheid gas bepaalt de gevoeligheid. De kleuren worden per doelgas zodanig gekozen dat de gevoeligheid voor het doelgas maximaal is, en voor andere gassen minimaal. Toch valt niet op voorhand uit te sluiten dat ook een ander gas de gebruikte kleuren licht verschillend verzwakt, en dus een vals positief of negatief meetresultaat zou kunnen geven. Een dergelijk gas beïnvloedt de selectiviteit van de in dit rapport besproken rookpluimmetingen alleen als het in voldoende mate in de rookpluim voorkomt.

Het meest voor de hand liggende gas met mogelijke invloed op de selectiviteit is stikstofdioxide (NO_2). De interferentie door dit gas is onderzocht. Van andere gassen als waterdamp, kooldioxide, stikstofmonoxide, koolmonoxide en koolwaterstoffen die ongetwijfeld ook in de pluim voorkomen, ligt interferentie spectroscopisch minder voor de hand. Deze zijn echter niet onderzocht.

De gevoeligheid voor NO_2 blijkt veel geringer dan voor SO_2 . De Lidar is bij de in de studie gebruikte kleuren licht ruim 400 keer gevoeliger voor SO_2 . De gevoeligheid is tegengesteld van teken: een NO_2 -concentratie van $+ 428 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wordt gezien als een SO_2 -concentratie van $-1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De aanwezigheid van NO_2 in de rookpluim leidt dan ook tot een onderschatting van de SO_2 -emissie. De stikstofdioxide-emissie van de schepen is beslist kleiner dan 10 gram per seconde, omdat anders van duidelijk zichtbare gele pluimen sprake zou zijn geweest, en die zijn geen enkele keer waargenomen. De emissie van stikstofdioxide is dus van dezelfde orde als, of kleiner dan, de emissie van zwaveldioxide. Bij

een 400 keer grotere gevoeligheid voor SO₂ is de onderschatting door de aanwezigheid van NO₂ derhalve verwaarloosbaar.

In een uitgebreidere validatiestudie zou de selectiviteit verder onderzocht kunnen worden door een typische rookgaspluim te analyseren met conventionele analytisch-chemische methoden, en voor elke gevonden component de invloed op de Lidar-meting uit te zoeken. Een dergelijke studie viel echter buiten het bestek van dit onderzoek.

Samenvatting prestatiekenmerken Lidar-meting

Een voorbijvarend schip kon in het eerste deel van de studie gemiddeld vier maal worden gescand. Op basis van vier scans kan de zwaveldioxide-uitstoot worden vastgesteld met een onnauwkeurigheid van ongeveer 20 procent. Deze waarde is een bovengrens.

De kleinste zwaveldioxide-uitstoot die de methode kan detecteren werd vastgesteld op 0,1 gram per seconde. De gemeten scheepsemissies zitten hier in de regel aanzienlijk boven.

Beperkt onderzoek geeft aan dat de methode weinig of geen last lijkt te hebben van andere sporengassen in de uitstoot van de schepen. In het bijzonder werd verstoring door stikstofdioxide uitgesloten.

4.3 Bepaling van de zwavelfractie van de brandstof

Zoals besproken in paragraaf 2.7 kan de met de Lidar gemeten uitstoot van zwaveldioxide van een schip gebruikt worden om de zwavelfractie in de verstoekte brandstof te bepalen. Hiervoor is het nodig het brandstofverbruik van het betreffende schip op het moment dat de uitstoot plaatsvond te kennen. Dit kan gemodelleerd worden: de benodigde parameters zijn het nominale brandstofverbruik en de snelheid van het schip (Jalkanen et al., 2009). Het nominale brandstofverbruik wordt bijgehouden door instanties als Lloyd's en is daar beschikbaar. De actuele snelheid van de meeste schepen wordt door deze schepen zelf uitgezonden, en wel via het *Automatic Identification System* (AIS). Dit is een systeem dat automatisch via de radio scheepsgegevens uitzendt, onder meer de positie, koers en snelheid van het schip. Deze gegevens kunnen met eenvoudige apparatuur ontvangen worden. In het SOLAS-verdrag (*International Convention for the Safety of Life at Sea*) wordt bepaald dat alle zeeschepen van 300 of meer brutoregisterton en alle passagiersschepen een AIS-zender aan boord moeten hebben. Dit betekent dat met een AIS-ontvanger van vrijwel elk passerend zeeschip de actuele snelheid achterhaald kan worden.

Ten tijde van het in dit rapport beschreven onderzoek was er nog geen AIS-ontvanger beschikbaar. Inmiddels is de meetwagen wel met zo'n ontvanger uitgerust. Derhalve kan in een vervolgonderzoek voor veel meer schepen dan in dit onderzoek gedaan is een schatting gegeven worden van het zwavelgehalte in de brandstof. Omdat het brandstofverbruik dan veel beter geschat kan worden, zal die schatting

van het zwavelgehalte veel nauwkeuriger zijn dan de in paragraaf 3.4 gegeven schattingen.

4.4 Kosteneffectiviteit van de inzet van de Lidar

4.4.1 Onderzoek naar de kosteneffectiviteit

In 2008 heeft adviesbureau Andersson Elffers Felix een kosten-batenanalyse uitgevoerd van de inzet van de mobiele Lidar bij de handhaving van de zwaveldioxide-uitstoot door zeeschepen (LIDAR, 2008). In deze studie is geïnventariseerd wat de kosten en opbrengsten zijn van de huidige praktijk van handhaving, te weten het vanaf een patrouilleboot van het KLPD aan boord gaan van zeeschepen om daar brandstofmonsters te nemen, en van de inzet van de Lidar in combinatie met inzet van een patrouilleboot.

De conclusie van deze studie was onder meer dat inzet van de Lidar in combinatie met een patrouilleboot leidt tot een grotere controlegraad en een enkele malen hogere pakkans. De regelgeving rond emissies kan zo beter gehandhaafd worden, wat leidt tot lagere emissies en daarmee positieve milieueffecten. Daarnaast geeft de intensievere controle beter inzicht in de totale emissies door zeeschepen. Deze informatie kan vervolgens gebruikt worden om in internationaal verband te komen tot strengere regelgeving omtrent de uitstoot door zeeschepen.

Naast de bovengenoemde maatschappelijke opbrengsten van de inzet van de Lidar is er ook gekeken naar de financiële opbrengsten en bijbehorende kosten. Geconcludeerd werd dat bij de huidige manier van controleren met een patrouilleboot maximaal vijf schepen per dag gecontroleerd kunnen worden. De kosten daarvan werden becijferd op € 2806 per dag, geld dat opgaat aan personeelskosten en aan het analyseren van de genomen brandstofmonsters.

De opbrengsten komen uit de opgelegde boetes. In de studie van Andersson Elffers Felix wordt uitgegaan van een aanbod van 35 passerende zeeschepen per dag. Daarvan is gemiddeld 15 procent in overtreding. Men verwacht echter dat door de 'onderbuikgevoelens' van de bemanning van het patrouilleschip schepen in overtreding een iets grotere kans hebben om gecontroleerd te worden, zodat van de gecontroleerde schepen 19 procent in overtreding blijkt te zijn. Bij een gemiddeld boetebedrag van € 2250 levert dat € 2109 aan boetes op, een controlepercentage van 14 procent en een pakkans van 3 procent. Het financiële resultaat is netto negatief: de controle kost per dag € 697 meer dan de boetes opleveren.

Met de Lidar als screeninginstrument om de doelen voor de patrouilleboot aan te wijzen vallen de getallen anders uit. De studie van Andersson Elffers Felix gaat ervan uit dat de Lidar van 80 procent van de passerende schepen de zwaveluitstoot vast kan stellen. De patrouilleboot kan dan gericht ingezet worden om de schepen met de hoogste uitstoot nader te onderzoeken. De meeste geënterde schepen (de studie gaat uit van 75 procent) zullen dan in overtreding zijn. De opbrengsten nemen dan toe tot € 8398, het controlepercentage stijgt naar 80 procent, de controle vindt objectiever plaats en de pakkans verviervoudigt bijna, tot 11 procent.

In de studie van Andersson Efficers Felix wordt ervan uitgegaan dat een meetdag met de Lidar € 10.000 kost. Daarin is echter ook de gedetailleerde analyse achteraf en het schrijven van een rapport meegenomen. Indien de Lidar uitsluitend gebruikt wordt om de handhavers aan boord van een patrouilleboot op het spoor van potentiële overtreders te brengen, kan deze analyse achteraf vervallen. De kosten van een dag meten met de Lidar komen dan op € 5000 voor de eerste meetdag in een campagne, en op € 3000 voor elke volgende dag. De kosten voor patrouilleboot en monsternamen blijven hetzelfde. De eerste dag levert dan een positief resultaat op van € 592, elke volgende dag zelfs van € 2592.

In Tabel 4-1 worden deze cijfers nogmaals op een rij gezet. De tabel geeft voor drie scenario's de kosten en opbrengsten per dag weer.

Tabel 4-1. Kosten-batenanalyse⁹.

scenario 1: patrouilleboot, geen Lidar

scenario 2: patrouilleboot en Lidar, eerste dag

scenario 3: patrouilleboot en Lidar, elke volgende dag

scenario	1	2	3
schepen			
passerend	35	35	35
geënterd	5	5	5
overtredingspercentage geënterde schepen	19%	75%	75%
kosten			
patrouilleboot (€)	2806	2806	2806
Lidar (€)		5000	3000
totaal (€)	2806	7806	5806
opbrengsten			
boetes (€)	2109	8398	8398
resultaten			
dagresultaat (€)	-697	592	2592
controlepercentage	14%	80%	80%

4.4.2

Conclusie

De conclusie van Andersson Efficers Felix luidt dat de inzet van de Lidar netto geld kost. Dit is, zoals hierboven wordt toegelicht, gebaseerd op een te hoge inschatting van de kosten van de inzet van de Lidar. Indien uitgegaan wordt van de juiste kosten is de conclusie dat inzet van de Lidar in combinatie met patrouilleboot van het KLPD direct geld oplevert. De eerste dag van een meetcampagne van Lidar en patrouilleboot samen levert € 1289 meer op¹⁰ dan de inzet van alleen een patrouilleboot zou doen. Op elke volgende dag is het verschil zelfs € 3289.

Daarnaast blijft de conclusie overeind dat de inzet van de Lidar zorgt voor maatschappelijke opbrengsten, zoals een verhoging van het controlepercentage van 14 procent naar 80 procent en een verveelvoudiging van de pakkans, van 3 procent naar 11 procent.

⁹ De gegevens in deze tabel zijn voor het grootste deel ontleend aan LIDAR (2008).

¹⁰ Een opbrengst van € 592 in plaats van een kostenpost van € 697.

4.5 Aanbeveling voor toekomstig onderzoek

Binnen de aangegeven kaders is de meetmethode operationeel, en kan als zodanig worden ingezet in vervolgstudies waarin de zwaveldioxide-uitstoot van zeeschepen met een onnauwkeurigheid van circa 20 procent wordt bepaald. De techniek is daarmee zeker als opsporingsinstrument geschikt.

Indien het instrument als handhavingsinstrument zou worden ingezet, is het wenselijk om een uitgebreidere validatie van de meetmethode als geheel uit te voeren. Belangrijke aspecten zijn hierbij het vaststellen van de *precisie* en *juistheid* van de methode zelf. Deze studie kan het best plaatsvinden bij een niet bewegende bron met een bekende, constante zwaveldioxide-emissie. De Lidar-techniek wordt hierbij vergeleken met andere, conventionele technieken voor het vaststellen van de uitstoot.

Daarnaast dient voor een handhavingsinstrument ook de selectiviteit nog verder te worden onderbouwd, al wordt hierbij niet op voorhand verwacht dat er sterk interfererende gassen zijn. De beste methode hiervoor is de bovenbeschreven volledige pluïmanalyse met doorrekening naar de effecten op de Lidar-meting. Voor de meeste componenten kan echter op eenvoudige wijze via een beperkte literatuurstudie of een kort spectroscopisch onderzoek een afweging worden gemaakt.

Verwacht wordt dat, nu van elk schip de actuele snelheid bekend is, de schattingen van het zwavelgehalte van de brandstof veel beter zullen zijn dan tot dusver mogelijk was. Uiteraard is het wenselijk om in een vervolgonderzoek deze aanname te toetsen. In het eerder genoemde onderzoek onder de vlag van het Joint Research Centre (paragraaf 1.4) is hiermee reeds een aanvang gemaakt.

5 Conclusie

Dit onderzoek toont in de praktijk aan dat het mogelijk is om met de mobiele Lidar van het RIVM vanaf de wal de zwaveldioxide-uitstoot van langsvarende zeeschepen te bepalen. Het gebruikte meetsysteem is ondergebracht in een meetwagen die geheel zelfvoorzienend is. De methode is volledig operationeel en beschikbaar voor inspectiedoeleinden als opsporings- of screeningstechniek om schepen die zwavelrijke brandstof gebruiken te onderscheiden van schepen die zwavelarme brandstof gebruiken.

Het grote voordeel van de methode is dat de meting op afstand wordt gedaan. Daardoor kan – in tegenstelling tot de praktijk bij conventionele methoden als patrouilleschepen – nagenoeg elk langsvarend schip worden gemeten. Dit levert een belangrijke efficiencywinst op.

Bij gebruik als screeningsmethode is inzet van het meetinstrument kosteneffectief. De Lidar kan potentiële overtreders identificeren, waardoor patrouilleschepen veel efficiënter ingezet kunnen worden dan nu het geval is. Omdat de pakkans sterk vergroot wordt, mag verwacht worden dat het aantal overtredingen zal afnemen.

Uit de met de Lidar gemeten uitstoot van zwaveldioxide van een schip kan ook het zwavelgehalte in de verstookte brandstof bepaald worden. De daarvoor benodigde gegevens – de snelheid van het schip op het moment van meten en het nominale brandstofverbruik – zijn voorhanden. Op dit moment vindt nader onderzoek plaats naar de nauwkeurigheid van het op deze wijze bepaalde zwavelgehalte.

Het instrument heeft een afstands bereik van 2,5 kilometer en een onderste bepalingsgrens van 0,1 gram per seconde. Een bovengrens van circa 20 procent kon worden vastgesteld voor de onnauwkeurigheid van de typische emissiebepaling van één schip met de Lidar-techniek. Deze bovengrens van 20 procent bevat ook de variabiliteit van de emissie gedurende de tijd dat de uitstoot van een schip gemeten wordt. De resultaten van enkele individuele schepen suggereren dat de precisie van de Lidar-methode zelf mogelijk veel beter is.

Binnen de huidige regelgeving die primair insteekt op het zwavelgehalte van de brandstof heeft de Lidar in de eerste plaats een rol als opsporings- en screeningsinstrument. Hierbij wordt het instrument ingezet in combinatie met conventionele methoden. Door in de regelgeving niet uitsluitend eisen aan de brandstof te stellen, maar ook aan de feitelijke uitstoot kan de Lidar beter bijdragen aan de handhaving. Als onafhankelijk opererend handhavingsinstrument is de Lidar op dit moment inzetbaar voor het constateren van die overschrijdingen, waarbij een geschat brandstofverbruik volstaat om aan te tonen dat op brandstof met een te hoog zwavelgehalte wordt gevaren. Gezien het grote verschil in zwavelgehalte tussen toegestane en niet toegestane brandstof lijkt ook deze inzet realistisch.

Literatuur

CBS (2011a). StatLine: Luchtverontreiniging, feitelijke emissies door alle bronnen (versie 22 augustus 2011), <http://statline.cbs.nl>, CBS, Den Haag, opgevraagd 6 september 2011.

CBS (2011b) StatLine: Zeevaart; reis- en ladinggegevens per kwartaal (versie 26 april 2011), <http://statline.cbs.nl>, CBS, Den Haag, opgevraagd 13 september 2011.

CBS, PBL, Wageningen UR (2011a) Verzuring en grootschalige luchtverontreiniging: emissies 1990-2010 (indicator 0183, versie 16, 2 september 2011), <http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl>, CBS, Den Haag; Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag/Bilthoven en Wageningen UR, Wageningen, opgevraagd 5 september 2011.

CBS, PBL, Wageningen UR (2011b). Emissies door de zeescheepvaart, 1990-2009 (indicator 0521, versie 11, 26 mei 2011), <http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl>, CBS, Den Haag; Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag/Bilthoven en Wageningen UR, Wageningen, opgevraagd 5 september 2011.

Berkhout, A.J.C., G.R. van der Hoff, J.B. Bergwerff, D.P.J. Swart, A. Hensen, A. Kraai, J.F.M. Huijsmans, J. Mosquera and W.A.J. van Pul (2008). Measuring Ammonia Emissions from Manured Fields, RIVM, Bilthoven, RIVM Rapport 680150003/2008.

Brinksma, E., G. Pinardi, R. Braak, H. Volten, A. Richter, A. Schonhardt, M. van Roozendaal, C. Fayt, C. Hermans, R. Dirksen, T. Vlemmix, A.J.C. Berkhout, D.P.J. Swart, H. Oetjen, F. Wittrock, T. Wagner, O.W. Ibrahim, G. de Leeuw, M. Moerman, L. Curier, E.A. Celarier, W.H. Knap, J.P. Veefkind, H.J. Eskes, M. Allaart, R. Rothe, A.J.M. Piters and P. Levelt (2008). The 2005 and 2006 DANDELIONS NO₂ and Aerosol Intercomparison Campaigns, *J. Geophys. Res.*, 113, D16S46.

IMO, International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (MARPOL 73/78), <http://wetten.overheid.nl/BWBV0003241>, opgevraagd 16 september 2010

Jalkanen, J.-P., A. Brink, J. Kalli, H. Pettersson, J. Kukkonen and T. Stipa (2009). A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 9209-9223.

LIDAR (2008). Business case naar de huidige toepassing en mogelijkheden, Rapport van bureau Andersson Elffers Felix GV92/rapport/002d, 2 december 2008.

Mooij, M., M.E. Gerlofs-Nijland, D.P.J. Swart (2010). Zeeschepen: metingen van chemische stoffen in rookgassen en brandstoffen, RIVM, Bilthoven, RIVM Rapport 609021090/2010.

Stull, R.B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

Swart, D.P.J., A.J.C. Berkhout, G.R. van der Hoff, J.B. Bergwerff en M.H. Broekman (2007). *Zwavel dioxide-uitstoot van zeeschepen op afstand gemeten met lidar*, RIVM, Bilthoven, RIVM Rapport 609021039/2007.

Volten, H., E.J. Brinksma, A.J.C. Berkhout, J. Hains, J.B. Bergwerff, G.R. van der Hoff, A. Apituley, R.J. Dirksen, S. Calabretta-Jongen and D.P.J. Swart (2009). *NO₂ lidar profile measurements for satellite interpretation and validation*, *J. Geophys. Res.*, 114, D24301, doi: 10.1029/2009JD012441

VROM-Inspectie (2003). *Jaarrapportage 2002*, VROM-Inspectie, Den Haag, VROM 030307/05-03 3501.

VROM-Inspectie (2004). *Jaarrapportage 2003*, VROM-Inspectie, Den Haag, VROM 4032.

VROM-Inspectie (2005). *Jaarrapportage 2004*, VROM-Inspectie, Den Haag, VROM 4208.

Dankwoord

De auteurs spreken hun dank uit voor de medewerking en gastvrijheid van het personeel van de verkeerscentrale Hansweert van Rijkswaterstaat. Ook gaat hun grote dank uit naar Bram Baas van Rijkswaterstaat, voor het ter beschikking stellen van hun terrein voor het veilig parkeren van de meetwagen.

In deze studie werd voorts gebruik gemaakt van de windmetingen van de volautomatische windmeter bij Hansweert, die door het Hydro Meteo Centrum Zeeland publiek beschikbaar worden gesteld op internet (www.hmcz.nl).

Bijlage 1

In hoofdstuk 3 worden voor een groot aantal schepen de resultaten van de verschillende scans van ongeveer 45 seconden getoond. Elke scan kan worden opgevat als een onafhankelijke meting van de uitstoot. Voor alle schepen die in de meetcampagne van 2006 gemeten werden, kon meer dan één scan worden gedaan, zodat voor alle schepen dus ook meer dan één emissiegetal kon worden vastgesteld. Deze getallen vertonen soms een aanzienlijke spreiding. Hieronder wordt deze spreiding besproken.

Rol variabiliteit emissie

In de eerste plaats moet worden opgemerkt dat de gemeten verschillen in een aantal gevallen heel goed op werkelijke verschillen in de emissie terug te voeren kunnen zijn. Bij de metingen aan de Westerschelde (meetlocaties Hansweert en Walsoorden) varen de schepen een bochtig circuit door de vaargeul. Tijdens de meetdagen kon meermaals aan de hand van de roetuitstoot worden vastgesteld dat 'gas gegeven werd'. De uitstoot is dus geen constante.

Rol variabiliteit wind en nauwkeurigheid windmeting

Bij het bepalen van de uitstoot speelt de bepaling van de windsnelheid een belangrijke rol. Wanneer de windsnelheid een bepaald percentage te hoog of te laag wordt geschat, is het bepaalde uitstootgetal hetzelfde percentage te hoog of te laag. Per scan is feitelijk de actuele windsnelheid gedurende die 45 seconden ter plekke van de gescande pluim bepalend. Voor de metingen aan de Westerschelde worden echter de gegevens van een meetmast van Rijkswaterstaat gebruikt (zie paragraaf 2.4) die enkele kilometers van de rookpluim in het water staat (zie ook Figuur 2-4). Een studie van de variabiliteit van deze windgegevens laat zien dat hierdoor een onzekerheid van circa 10 procent in het emissiegetal ontstaat. Variabiliteit in de windrichting speelt een veel kleinere rol, zolang de pluim min of meer loodrecht op het scanvlak staat.

Rol meanderen scheepspluim

Tijdens de Lidar-scan van 45 seconden beweegt de laserbundel in negen of meer stappen van laag naar hoog door het scanvlak. In elke meetrichting staat de bundel vijf seconden stil en meet de concentratieverdeling in die richting. Het scanvlak wordt dus niet overall gelijktijdig gemeten, maar gescand van onder naar boven. In de 45 seconden beweegt de pluim echter ook: veelal beweegt de as van de pluim in een slingerbeweging, zowel van hoog naar laag en terug als van links naar rechts en terug. Dit heet 'meanderen' en is in Figuur B-1 goed te zien. Door dit meanderen kan het zijn dat de pluim in het scanvlak toevallig meebeweegt met de scan (van beneden naar boven), of juist er tegenin (van boven naar beneden). In het eerste geval is de pluim te lang in beeld en wordt een te hoge emissie gemeten, in het tweede geval een te lage. De grootte van dit effect is lastig te kwantificeren maar kan per scan aanzienlijk zijn als de meanders groot zijn. Wel is duidelijk dat het in opeenvolgende scans snel uitmiddelt. Bij een stevige wind zijn de meanders kleiner.



Figuur B-1. De Jilihu, met meanderende rookpluim

Rol nauwkeurigheid concentratiemeting

De concentratiebepaling op afstand met Lidar kent zijn eigen onnauwkeurigheden. Omdat slechts een korte meettijd per meetrichting beschikbaar is, wordt de concentratiebepaling gedaan aan de hand van een relatief ruisrijk echosignaal. De onnauwkeurigheid van de vastgestelde hoeveelheid SO₂ in de pluim bedraagt bij zwaar belaste pluimen ongeveer 10 procent. Bij licht belaste pluimen is de onzekerheid groter.

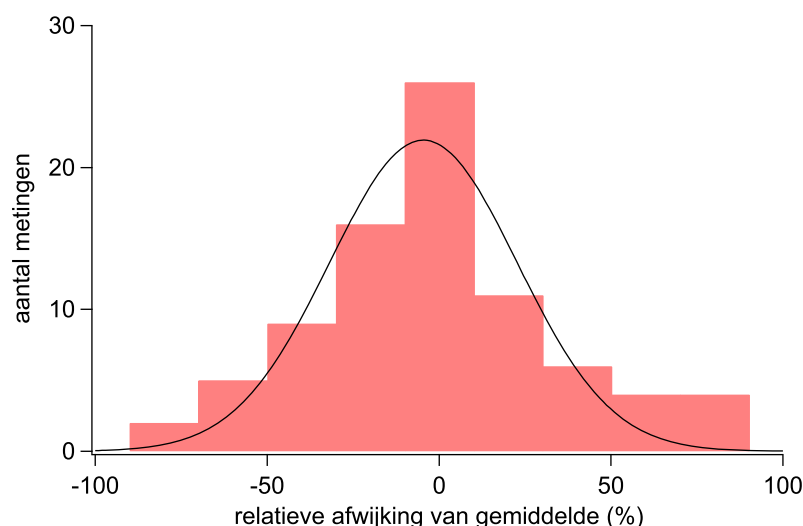
Precisie van de methode als geheel

Het is lastig om voor de methode als geheel de precisie te kwantificeren. Traditioneel wordt hiervoor de meting aan hetzelfde monster een voldoende aantal malen herhaald om met voldoende nauwkeurigheid de statistische variatie vast te stellen. In deze studie lukt dit niet, omdat het monster voortdurend anders is. Toch blijkt het mogelijk om op basis van de studie een bovengrens van de precisie vast te stellen. Hiervoor wordt als volgt te werk gegaan, waarbij de gegevens gebruikt worden die vergaard zijn in de campagne van 2006 (24 gemeten schepen).

- (1) Geconstateerd wordt dat de bovengenoemde factoren die een rol spelen bij de variabiliteit vrijwel alle leiden tot een relatieve variatie in de uitkomst, onafhankelijk van de bronsterkte zelf. Wanneer elk schip genormeerd zou worden met zijn ware bronsterkte, kunnen we alle schepen statistisch als gelijk beschouwen. De enige echte uitzondering hierop is variabiliteit door menselijk ingrijpen ('gas geven').
- (2) Voor elk schip wordt de gemiddelde uitstoot bepaald op basis van alle geslaagde scans uit 2006 (Tabel 3-22). Vervolgens wordt per schip elke individuele scan met dit gemiddelde genormeerd. Hierna is elke scan uitgedrukt als een percentage van het gemiddelde van het betreffende schip, zodat alle gemiddelden op 100 procent liggen.
- (3) Vervolgens worden de duidelijkste gevallen van 'gas geven' geëlimineerd. Dit zijn de schepen waarbij een of enkele scans heel sterk afwijken van de overige. Deze schepen blijven verder in hun geheel buiten de verdere analyse. Dat is gedaan bij schepen waarvan de hoogste scan 5 of meer keer zo groot is als het gemiddelde van de overige scans van het schip. Dit betreft 2 van de 24 schepen in de campagne: de Betsy S en de Jilihu.

(4) Ten slotte wordt naar de statistische variatie van de totale set van resterende scans gekeken. Dit betreft 86 scans van 22 schepen.

De resultaten worden weergegeven in een histogram (Figuur B-2).



Figuur B-2. Het histogram geeft de verdeling weer van de resultaten van individuele scans, uitgedrukt als percentage van het gemiddelde resultaat voor het betreffende schip. In zwart een gaussische kromme gefit door het histogram. De spreiding bedraagt 38 procent.

Geconcludeerd wordt dat de individuele scans een spreiding hebben van 38 procent. Een typisch emissiegetal voor een schip, zoals gegeven in Tabel 3-22, wordt bepaald als het gemiddelde van vier scans en heeft dan een precisie van 19 procent.

Opgemerkt moet worden dat 19 procent een schatting is voor de bovengrens van de precisie van de Lidar-meetmethode op basis van nagenoeg alle geslaagde scans in de meetcampagne van 2006. Het is een bovengrens, omdat de waargenomen spreiding berekend is inclusief de variatie van de bronsterkte (de verandering van de feitelijke uitstoot van scan tot scan), en het is onbekend hoe groot deze is. Het is heel goed mogelijk dat de Lidar-meting zelf aanzienlijk preciezer is en dat de waargenomen spreiding vooral door werkelijke variaties in de emissie bepaald wordt. Het aanzienlijk betere resultaat van sommige individuele schepen lijkt hier op te wijzen (Tai Shan: 18 ± 1 gram per seconde, in tegenstelling tot MSC London: 24 ± 6 gram per seconde, in beide gevallen vijf scans en een vergelijkbare emissie). Om de precisie van de Lidar-emissiemeting zelf vast te stellen zijn herhaalde metingen nodig aan een bron van constante sterkte. Deze waren geen onderdeel van deze studie, maar worden als vervolgonderzoek voorgesteld.

.....
**A.J.C. Berkhout | D.P.J. Swart | G.R. van der Hoff |
J.B. Bergwerff**
.....

Rapport 609021115/2011

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

november 2011

