

RIVM rapport 609021039/2007

**Zwavedioxide-uitstoot van zeeschepen op afstand
gemeten met lidar**

D.P.J. Swart, A.J.C. Berkhout, G.R. van der Hoff,
J.B. Bergwerff en M.H. Broekman

Contact:

M.H. Broekman

Centrum Inspectieonderzoek, Milieuongevallendienst en Drinkwater

RIVM

e-mail: Marcel.Broekman@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht en ten laste van de VROM-Inspectie, in het kader van project M/609021 'Ondersteuning VROM-Inspectie'.

RIVM, Postbus 1, 3720 BA Bilthoven, telefoon: 030 - 274 91 11; fax: 030 - 274 29 71

Rapport in het kort

Zwaveldioxide-uitstoot van zeeschepen op afstand gemeten met lidar

Het RIVM heeft een instrument ontwikkeld om de zwaveldioxide-uitstoot van zeeschepen te meten. In een proefstudie van vijf meetdagen werd voor 24 schepen op de Westerschelde de uitstoot bepaald. Een groot aantal daarvan bleek forse hoeveelheden zwaveldioxide uit te stoten.

Zwaveldioxide is een bron van verzuring en is schadelijk voor het milieu. Diverse beleidsmaatregelen hebben de uitstoot van andere bronnen van zwaveldioxide, zoals verkeer, industrie en elektriciteitsopwekking, flink teruggedrongen. Het aandeel van de scheepvaart in de totale uitstoot wordt daardoor steeds groter.

Zeeschepen mogen binnen de territoriale wateren niet op zwavelrijke brandstof varen. Deze relatief goedkope brandstof mag echter wel aan boord zijn voor gebruik op zee. Het is onbekend in hoeverre reders zich aan dit verbod houden. Met traditionele meetmethoden is een overtreding moeilijk vast te stellen aangezien deze metingen aan boord plaatsvinden. De bemanning is daardoor op de hoogte van de meting en kan het stookgedrag aanpassen.

De nieuwe techniek heet LIDAR (*light detection and ranging*) en meet vanaf de wal. Het lidarinstrument scant met een laserbundel de rookpluim van een passerend schip en stelt zo onopgemerkt de uitstoot vast. Een voordeel van deze methode is dat nagenoeg elk voorbijvarend schip kan worden gemeten, in plaats van slechts enkele schepen per dag.

Op het vasteland worden zwaveldioxide-emissies van industriële installaties beperkt door vergunningen. Deze worden verleend aan de hand van de Nederlandse emissierichtlijn lucht (NeR, april 2003), die nadere eisen stelt aan bronnen boven de twee kg zwaveldioxide per uur (0,56 gram per seconde). De uitstoot van de gemeten zeeschepen bleek daar in alle gevallen boven te liggen. De hoogst gemeten uitstoot bedroeg 36 gram per seconde. Aandacht voor de zeescheepvaart als bron van luchtverontreiniging is dus van belang, zowel bij regelgeving als bij handhaving.

Trefwoorden: zwaveldioxide, SO₂, emissie, zeescheepvaart, lidar, remote sensing

Abstract

Remote sensing of sulphur dioxide emissions of sea-going vessels on the Westerscheldt

RIVM developed an instrument to measure sulphur dioxide emissions of sea-going vessels. In a five-day pilot study, the emissions of 24 ships on the Westerscheldt estuary were determined. As it turned out, a large number of those ships emitted huge quantities of sulphur dioxide.

Sulphur dioxide is a source of acidification and is harmful to the environment. Various measures have driven back emissions from other sources, such as traffic, industry and electricity generation. This causes the share of shipping in the total of the emissions to increase.

Sea-going ships are not allowed to use sulphur-rich fuel in territorial waters. This relatively cheap fuel may be on board, though, for use at sea. To what extent ship owners comply with this ban is not known. A breach is difficult to determine using traditional measurement methods because these require boarding the ship. The crew therefore knows a measurement is taking place and can adjust the type of fuel used.

The new technique is known as lidar (light detection and ranging) and measures from the shore. The lidar instrument uses a laser beam to scan the exhaust plume of a passing ship and to determine the emission, unnoticed. An advantage of this method is that nearly every passing ship may be measured, instead of only a few.

On land, sulphur dioxide emissions of industrial installations are limited by licences. These are granted on the lines of the Dutch emission guideline air (NeR, April 2003), which puts demands on sources that emit more than 2 kgs per hour (0.56 gram per second). The emissions of all measured ships turned out to be higher than that. The highest emission measured was 36 gram per second. This indicates the importance of recognising ocean shipping as a source of air pollution, both when issuing rules and when enforcing them.

Key words: sulphur dioxide, SO₂, emission, ocean shipping, lidar, remote sensing

Inhoud

Samenvatting	5
1 Inleiding	6
1.1 Normen voor zwaveldioxide-uitstoot	6
1.2 Normen voor de zwavelfractie van brandstof	6
1.3 Probleemstelling	7
1.4 Doelstelling van het project	7
1.5 Vraagstelling en realisatie	8
2 Materiaal en Methoden	9
2.1 De lidartechniek	9
2.2 Bepaling van de emissie	10
2.3 Meetprocedure	12
2.4 Bepaling van een emissiegetal uit een meting	14
3 Resultaten	18
3.1 Meetresultaten 16 mei 2006	18
3.2 Meetresultaten 21 juni 2006	20
3.3 Meetresultaten 23 juni 2006	21
3.4 Meetresultaten 9 oktober 2006	23
3.5 Meetresultaten 10 oktober 2006	25
3.6 Bepaling onderste bepalingsgrens	26
3.7 Overzicht van alle meetresultaten	26
4 Discussie, conclusies en aanbevelingen	28
4.1 Factoren die de slaagkans van de lidarmeting bepalen	28
4.2 Prestatiekenmerken lidar emissiemeting	30
4.3 Aanbeveling voor toekomstig onderzoek	32
5 Conclusies	33
Literatuur	35
Dankwoord	36
Bijlage 1 Bepaling van de precisie van de emissiemeting	37

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.

De methode is inzetbaar door de VROM-Inspectie bij controles op zwavelgehalte van brandstoffen, 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 traditionelere methoden is de efficiency: nagenoeg elk langsvarend schip kan worden gemeten. Wanneer de lidartechniek wordt ingezet in combinatie met andere methoden, kan op basis van de lidarmetingen worden besloten welke schepen in aanmerking komen voor een bezoek en nadere inzet van andere methoden. De lidar wordt dan dus als opsporingsinstrument gebruikt.

In 2006 werd een proefstudie uitgevoerd op de Westerschelde. Op vijf meetdagen werd voor 24 schepen de emissie bepaald. Bij alle 24 schepen is de waargenomen emissie hoger dan 0,56 gram zwaveldioxide per seconde, de grenswaarde waarbij de Nederlandse Emissie Richtlijn Lucht (NeR, april 2003) nadere eisen stelt aan de uitstoot van industriële installaties op het vasteland. De hoogst gemeten uitstoot bedroeg 36 gram per seconde.

Als onderdeel van de studie werd het lidarinstrument geschikt gemaakt voor de detectie van zwaveldioxide en voor het meten van de bewegende rookpluimen van schepen. Deze ontwikkelingen zijn succesvol afgerond en hebben een operationeel instrument opgeleverd. Op basis van de proefstudie is een onderste bepalingsgrens van 0,1 gram per seconde vastgesteld. Alle gemeten schepen zit hier ruim boven. Een typische emissiemeting heeft een onnauwkeurigheid van ongeveer 20%.

Tijdens de studie is gebleken dat de windrichting een belangrijke rol speelt bij de inzetbaarheid van de lidarmethode. Vanaf één gekozen meetlocatie kan slechts bij een beperkt aantal windrichtingen worden gemeten. Het is daarom van belang om in de toekomst vanaf meerdere locaties, passend bij verschillende windrichtingen, te kunnen werken.

1 Inleiding

Zeeschepen vormen een steeds belangrijkere bron van zwaveldioxide in de atmosfeer. Hiervoor zijn twee oorzaken aan te geven. Ten eerste daalt de bijdrage van andere bronnen als elektriciteitsopwekking, industrie en verkeer door strengere regelgeving. Ten tweede stijgt de zwavelfractie van zware scheepsbrandstoffen. Beide oorzaken zijn onderling verbonden. Door de hogere eisen “op het land” vindt een steeds groter deel van de zwavel in ruwe aardolie zijn weg naar de scheepsbrandstoffen.

1.1 Normen voor zwaveldioxide-uitstoot

Op het vasteland worden zwaveldioxide-emissies van industriële installaties beperkt door vergunningen. Deze worden verleend aan de hand van de Nederlandse emissierichtlijn lucht (NeR, april 2003). Deze richtlijn stelt nadere eisen aan bronnen met een uitstoot van meer dan 2 kg zwaveldioxide per uur (0,56 gram per seconde). Deze bronnen worden verplicht om via reinigingsmaatregelen de uitstoot te beperken tot maximaal 50 milligram per kubieke meter rookgas. Niettemin zijn binnen deze norm op het land aanzienlijke emissies mogelijk. De sterkste tien zwaveldioxidebronnen op het land hebben een uitstoot die groter is dan circa 100 gram per seconde¹.

Voor de luchtemissie van schadelijke stoffen in de rookgassen van zeeschepen ontbreekt in Nederland en daarbuiten op dit moment een normstelling (Broekman, 2006). Wel worden eisen gesteld aan de gebruikte brandstoffen.

1.2 Normen voor de zwavelfractie van brandstof

Binnen Nederland geldt voor gasolie een maximaal zwavelgehalte van 0,2%, in overeenstemming met Europese richtlijn 1999/32. Voor dieselbrandstof geldt een strengere eis van 0,005%. De eis van 0,2% geldt ook voor zeeschepen varend op de grote vaarwegen en binnen de territoriale wateren.

In november 2002 heeft de Europese Commissie in een wijziging van de Europese richtlijn 1999/32 een maximum van 1,5% voorgesteld voor de scheepvaart varend op de Noordzee en Oostzee, in lijn met het MARPOL-verdrag.

Op open zee gelden buiten de aangegeven gebieden geen beperkingen aan het zwavelgehalte van de brandstof. Daar wordt ook brandstof gebruikt die vele procenten zwavel bevat (tot 10%).

¹ ontleend aan gegevens Emissieregistratie over het jaar 2004.

1.3 Probleemstelling

Zwavelrijke brandstoffen zijn aanzienlijk goedkoper dan zwavelarme. Zij mogen aan boord zijn, maar mogen niet binnen de territoriale wateren worden ingezet. Handhaving van deze regel is echter lastig wanneer alleen aan boord kan worden vastgesteld welke brandstof wordt gebruikt. Het valt daarom niet uit te sluiten dat bijvoorbeeld ook op de Westerschelde en andere grote vaarwegen op zwavelrijke brandstof wordt gevaren. In dat geval worden de emissies aanzienlijk onderschat. Een geschikt handhavingsinstrument hiervoor ontbreekt.

1.4 Doelstelling van het project

Doel van het project is te onderzoeken of, en in welke mate, met behulp van de lidartechniek 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: SO₂, NO₂ en NH₃.

In 2005 is het instrument voor het eerst operationeel ingezet voor de toetsing van satellietmetingen van NO₂. In 2006 gebeurde dit opnieuw. In 2006 werden voor de VROM-directie Klimaatverandering en Industrie voor het eerst operationele emissiemetingen van NH₃ uitgevoerd, eerst bij een kunstmatige bron, en vervolgens bij een bemest weiland. Deze metingen waren alle succesvol en zullen in 2007 worden voortgezet. De lijst van detecteerbare gassen zal mogelijk verder worden uitgebreid met NO en/of benzeen.

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



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

1.5 Vraagstelling en realisatie

Het in dit rapport beschreven onderzoek kan worden onderscheiden in twee delen, die beide 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 werd uiteindelijk 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.

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.

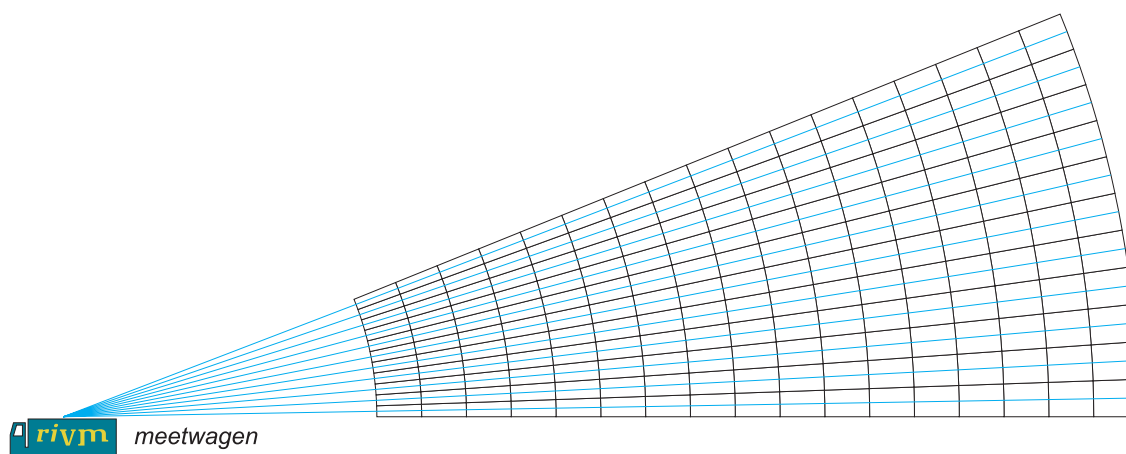
2 Materiaal en Methoden

2.1 De lidartechniek

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 verschillend 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 weerkaatst 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 waar 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 elke 100 tot 200 meter een waarde bepaald worden, van ongeveer 350 meter tot ongeveer 2500 meter afstand van het instrument.

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.

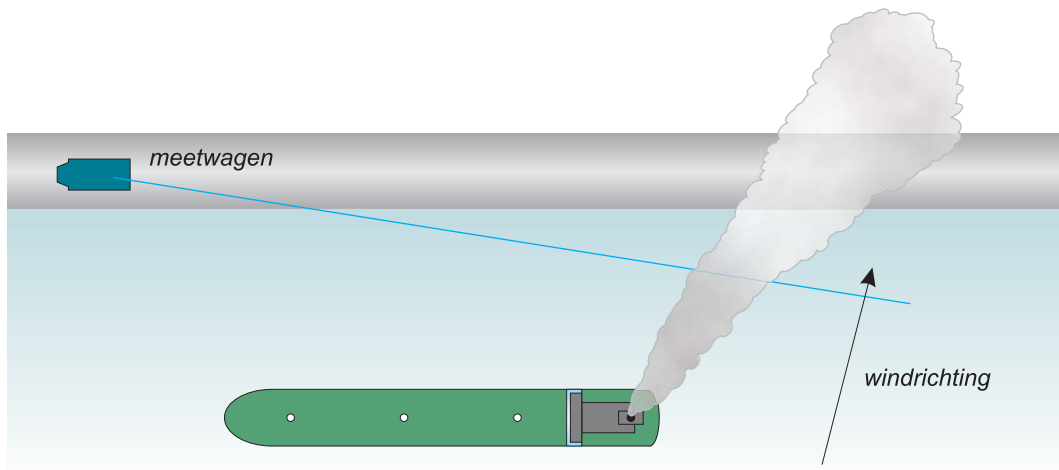


Figuur 2-1. Schematisch overzicht van de bepaling van de SO_2 concentratie in een verticaal vlak. In blauw de meetrichtingen, de zwarte vakjes geven segmenten aan waarvoor een concentratie bepaald wordt.

Voor de emissiemetingen aan zeeschepen wordt een verticaal vlak gebruikt dat bestaat uit 9 richtingen. De maximale afstand ligt op ongeveer 2,5 kilometer, de maximale hoogte op

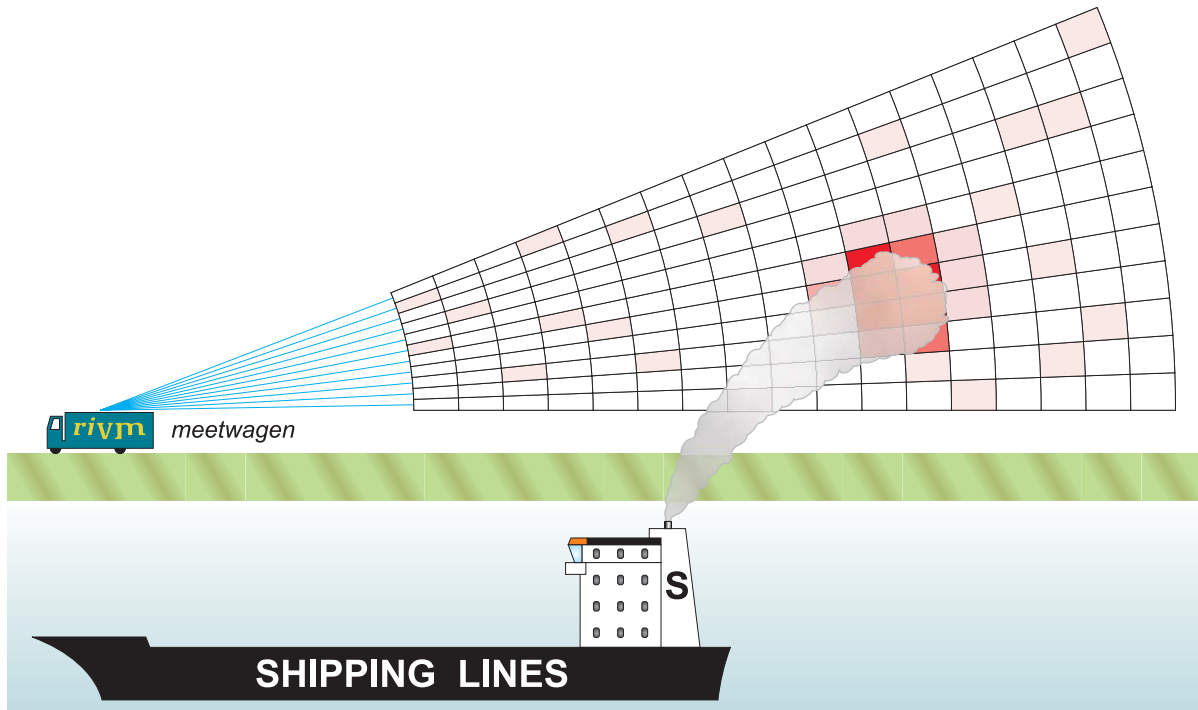
ongeveer 300 meter. Het meten van alle richtingen in een scanvlak duurt ongeveer 45 seconden, waarna de lichtbundel weer teruggebracht wordt naar de uitgangspositie en het scanvlak opnieuw gemeten wordt. In principe kan zo'n cyclus een onbeperkt aantal malen herhaald worden.

2.2 Bepaling van de emissie



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

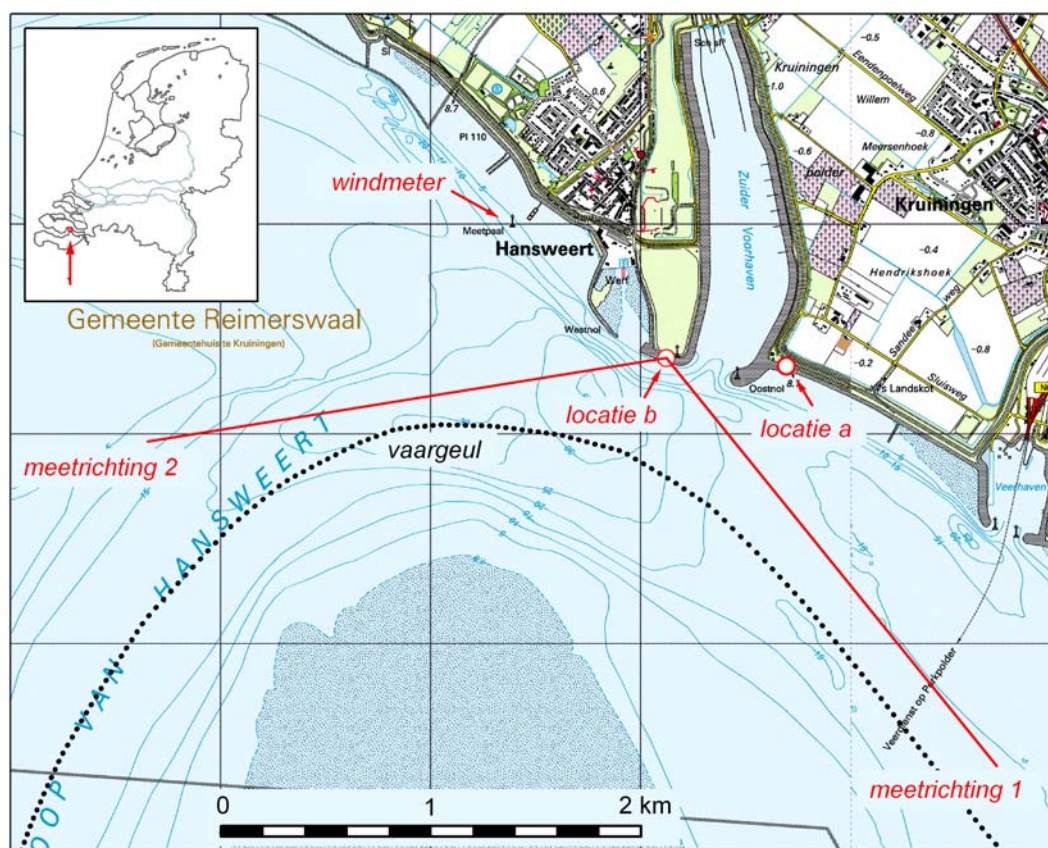
In Figuur 2-2 is schematisch weergegeven hoe de emissie gemeten wordt. De lidar wordt aan de waterkant opgesteld. Het verticale scanvlak wordt zo goed mogelijk haaks op de windrichting en evenwijdig aan de vaarrichting van de schepen gelegd. Het instrument wordt aangezet en gaat continu SO_2 -concentraties 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 lidarsignaal 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.

2.3 Meetprocedure



Figuur 2-4. Meetlocaties Hansweert. Locatie a, locatie b: plaatsen waar de meetwagen gestaan heeft. De meetrichtingen zijn alleen voor locatie b weergegeven. Windmeter: meetpaal van Rijkswaterstaat waar windsnelheid, windrichting en waterhoogte gemeten worden.

De metingen beschreven in dit rapport werden alle verricht aan zeeschepen op de Westerschelde. Als meetlocatie was 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 meetlocatie, en Figuur 2-5 voor een foto van de meetwagen op meetlocatie b.

Aanvankelijk was locatie a uitgekozen, naast de radarpost van Hansweert. In mei 2006 is deze locatie inderdaad gebruikt. In juni en oktober 2006 is uitgeweken naar locatie b, omdat op locatie a grootschalige werkzaamheden aan de dijk en het havenhoofd plaatsvonden. Tijdens de metingen is geregeld contact onderhouden met de radarpost.



Figuur 2-5. De meetwagen op de meetlocatie.

Dicht bij deze meetlocatie 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) en worden gebruikt om de in dit rapport vermelde emissiegetallen uit te rekenen. Daarvoor wordt, uitgaande van een logaritmisch windprofiel, de gemeten windsnelheid en de gemeten waterhoogte, de windsnelheid berekend op de hoogte waar de lidarmeting aangeeft dat de rookpluim is.

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.

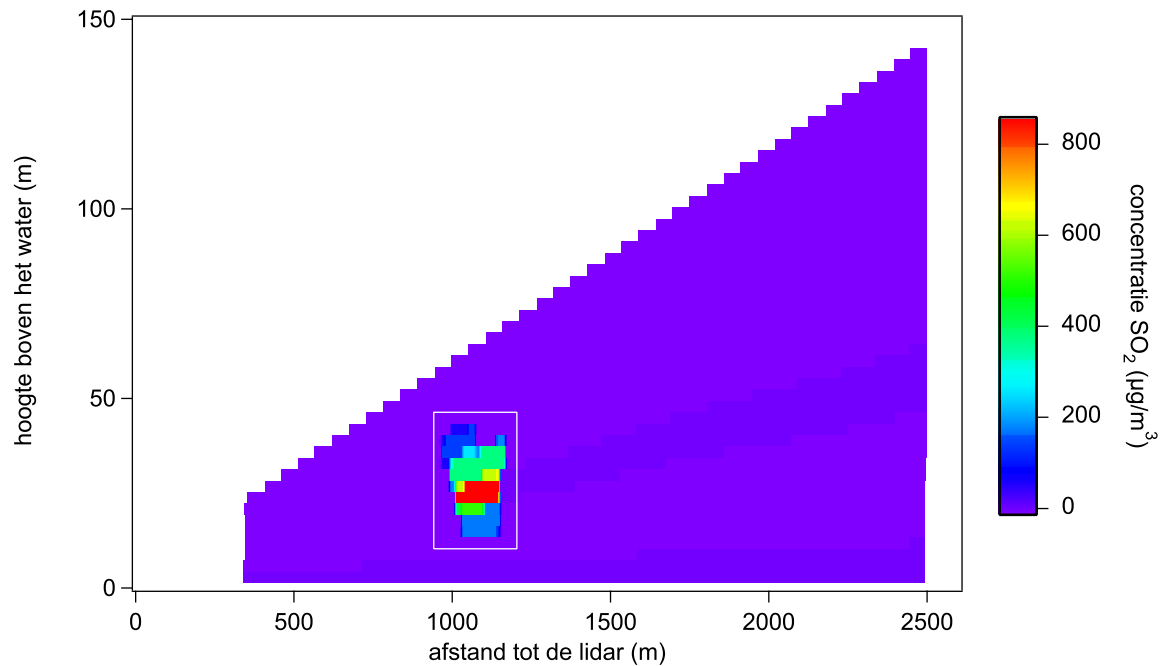
2.4 Bepaling van een emissiegetal uit een meting



Figuur 2-6. De HMS Rotterdam, kort voor het voorbijvaren van de meetwagen.

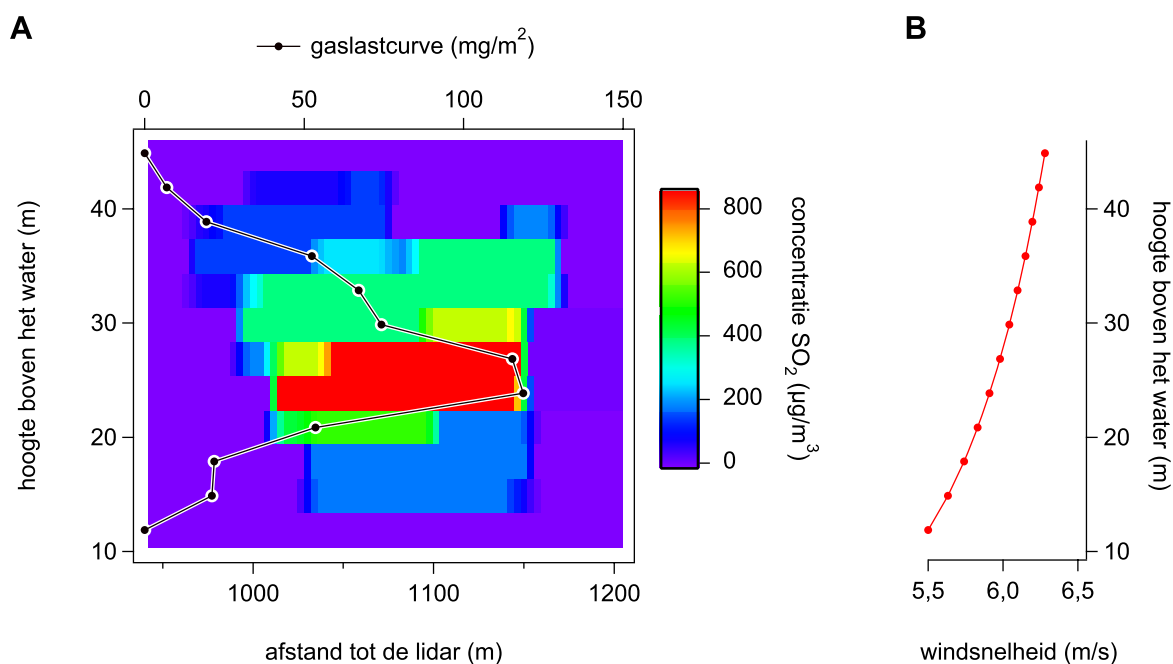
Als voorbeeld van de verwerking wordt ingegaan op de HMS Rotterdam (Figuur 2-6). Deze voer op 9 oktober 2006 de Westerschelde af. De wind stond die dag zo dat de lidar naar het zuidoosten gericht was (meetrichting 1 in Figuur 2-4). Omstreeks 10:30 uur UTC² kruiste de rookpluim van dit schip het scanvlak van de lidar. De SO₂-concentraties die op dat moment gemeten werden zijn weergegeven in Figuur 2-6. 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.

² Alle tijden in dit rapport worden gegeven in UTC (*Universal Time Coordinated*). UTC loopt twee uur achter op de in Nederland ten tijde van het onderzoek gebruikte Middel-Europese Zomertijd (MEZT); 10:30 uur UTC is dus 12:30 uur lokale tijd.



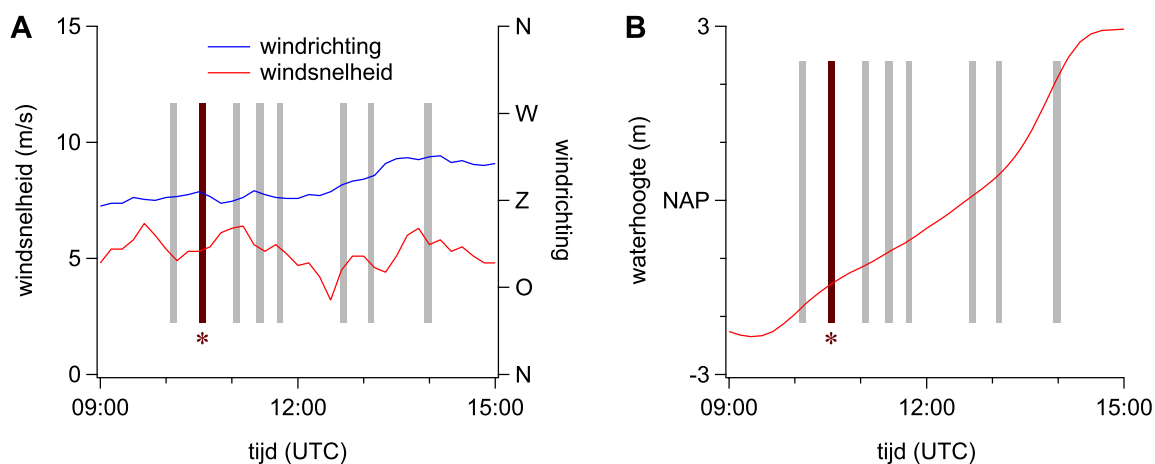
Figuur 2-6. Doorsnede door de rookpluim van de HMS Rotterdam. De kleur is een maat voor de concentratie SO_2 in de lucht. De witte rechthoek geeft de pluim aan zoals die in de verdere analyse gebruikt is.

Voor de verdere verwerking tot een emissiegetal wordt in Figuur 2-6 de pluim geselecteerd (de witte rechthoek in Figuur 2-6, de uitsnede is weergegeven in Figuur 2-7 A). Voor elke hoogte wordt de totale hoeveelheid SO_2 op die hoogte bepaald. Dit levert een gaslastcurve op (ook weergegeven in Figuur 2-7 A). Door deze te vermenigvuldigen met het windprofiel (Figuur 2-7 B), 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 2-7. A: uitsnede uit Figuur 2-6 van de rookpluim van de HMS Rotterdam, en de bijbehorende gaslastcurve. B: logaritmisch windprofiel.

Zoals vermeld in paragraaf 2.3 wordt 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 2-7 B). In Figuur 2-8 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 wordt van een schip per passage meerdere emissiegetallen bepaald.



*Figuur 2-8. 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 2-6 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.

3 Resultaten

In paragrafen 3.1 t/m 3.5 wordt per meetdag kort verteld hoe de omstandigheden die dag waren, en worden de emissiegetallen gerapporteerd voor alle die dag gemeten schepen. Daarna worden in paragraaf 3.6 de resultaten van een bepaling van de onderste bepalingsgrens besproken. Ten slotte worden de resultaten samengevat in paragraaf 3.7.

3.1 Meetresultaten 16 mei 2006



Figuur 3-1. Eén van de deze dag gemeten schepen, de Probo Emu, bij het voorbijvaren van de meetwagen.

Deze dag stond de meetwagen op locatie a (Figuur 2-4). De wind was gemiddeld 3,3 meter per seconde en kwam uit zuidwestelijke tot westnoordwestelijk richting (220 tot 279°³). Gemeten werd in zuidoostelijke richting (meetrichting 1 in Figuur 2-4). De waterstand varieerde van -1,18 meter tot 0,13 meter ten opzichte van NAP. De temperatuur was 16 °C, het was zwaar bewolkt, maar droog.

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.

³ Graden ten oosten van het noorden. Een windrichting van 270° is dus westenwind.

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

- 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 2, pagina 14).

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
			2,6
Arklow Rainbow	af	13:13-13:16	4,9
			2,3
			1,1
			2,9
			0,91
Chopin	af	13:23-13:26	1,7
			2,8
<i>JA Sunrise</i>	<i>af</i>	<i>13:26-13:35</i>	<i>pluim te dicht op pluim Stolt Inspiration, niet te analyseren</i>
<i>Stolt Inspiration</i>	<i>op</i>	<i>13:26-13:35</i>	<i>pluim te dicht op pluim JA Sunrise, niet te analyseren</i>

3.2 Meetresultaten 21 juni 2006



Figuur 3-2. De Tai Shan bij het voorbijvaren van de meetwagen.

Deze dag stond de meetwagen op locatie b. De wind was hard, gemiddeld 9,8 meter per seconde en kwam uit zuidwestelijke richting (209 tot 213°). Gemeten werd in zuidoostelijke richting (meetrichting 1). De waterstand varieerde van 1,63 meter tot 0,44 meter ten opzichte van NAP. De temperatuur was 19 °C, het was zwaar bewolkt met af en toe een kleine bui.

Er werden metingen gedaan aan de rookpluimen van vijf schepen. Aan al deze schepen konden drie 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

3.3 Meetresultaten 23 juni 2006

*Figuur 3-3. De Vijitra Naree bij het voorbijvaren van de meetwagen.*

Deze dag stond de meetwagen op locatie b. Er was nauwelijks wind, 0,8 tot 1,9 meter per seconde (gemiddeld 1,4 meter per seconde) uit zuidoostelijke tot zuidwestelijke richting (151 tot 219°). Er werd zowel in zuidoostelijke als in westelijke richting gemeten (meetrichtingen 1 en 2). De waterstand varieerde van 0,63 meter tot 2,50 meter ten opzichte van NAP. De temperatuur was 20 °C, het was helder weer, licht bewolkt en droog.

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 lidarsignaal. 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
<i>Kristin Knudsen</i>	<i>op</i>	<i>10:08-10:10</i>	<i>pluim gaat niet door scanvlak</i>
<i>Sichem Marbella</i>	<i>af</i>	<i>12:21-10:45</i>	<i>pluim gaat niet door scanvlak</i>
<i>Trout</i>	<i>af</i>	<i>10:21-10:45</i>	<i>pluim gaat niet door scanvlak</i>
Vijitra Naree	op	11:45-11:50	2,9 5,4 7,4 8,3 5,5 2,1 1,7
<i>Swalinge</i>	<i>op</i>	<i>11:55-12:03</i>	<i>pluim gaat niet door scanvlak</i>
<i>MSC Eyra</i>	<i>op</i>	<i>12:08-12:10</i>	<i>pluim gaat niet door scanvlak</i>
MSC Mee May	af	12:17-12:20	3,1 2,7 3,1 2,9 3,6
<i>Betsy S</i>	<i>op</i>	<i>12:20-12:22</i>	<i>pluim gaat niet door scanvlak</i>
<i>Rhonestern</i>	<i>op</i>	<i>12:29-12:42</i>	<i>pluim gaat niet door scanvlak</i>
<i>Atlantic Cartier</i>	<i>af</i>	<i>12:46-12:50</i>	<i>pluim gaat niet door scanvlak</i>

3.4 Meetresultaten 9 oktober 2006



Figuur 3-4. De Jilihu, kort voor het voorbijvaren van de meetwagen.

Deze dag stond de meetwagen op locatie b. De wind was gemiddeld 5,2 meter per seconde en kwam aanvankelijk pal uit het zuiden, maar draaide later naar het zuidwesten (177 tot 226°). Gemeten werd in zuidoostelijke richting (meetrichting 1). De waterstand varieerde van -1,96 meter tot 2,14 meter ten opzichte van NAP. De temperatuur was 18 °C, het was half tot zwaar bewolkt. Het was op de meetlocatie droog, al trokken er rond 13:00 uur UTC in de omgeving wel buien voorbij. 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
			2,4
<i>Altair</i>	<i>op</i>	<i>10:39-10:46</i>	<i>pluim gaat niet door scanvlak</i>
MSC Maureen	af	11:01-11:07	64
			26
			23

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

⁴ Werkschip, was na het passeren bezig met de betonning op de Westerschelde.

3.5 Meetresultaten 10 oktober 2006



Figuur 3-5. De Stena Forecaster bij het voorbijvaren van de meetwagen.

Deze dag stond de meetwagen op locatie b. De wind was gemiddeld 3,0 meter per seconde, kwam het grootste deel van de dag uit het zuidoosten, maar draaide kort voor de laatste meting naar het oosten (73 tot 136°). Gemeten werd in westelijke richting (meetrichting 2). De waterstand varieerde van -1,36 meter tot 2,33 meter ten opzichte van NAP. De temperatuur was 18 °C, het was half tot zwaar bewolkt. In de ochtend regende het enige tijd (van 10:00 tot 10:40 uur UTC), in de middag was het droog.

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 (pagina 21), 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 lidarsignaal. 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)
<i>Southern Juice</i>	<i>op</i>	<i>11.05-11.13</i>	<i>pluim gaat niet door scanvlak</i>
<i>Manzanillo II</i>	<i>af</i>	<i>11.21-11.27</i>	<i>pluim gaat niet door scanvlak</i>
<i>Sloman Challenger</i>	<i>op</i>	<i>11.27-11.33</i>	<i>pluim gaat niet door scanvlak</i>
<i>MSC Marta</i>	<i>op</i>	<i>14.07-14.13</i>	<i>pluim gaat niet door scanvlak</i>
<i>Al-Sabahia</i>	<i>op</i>	<i>14.23-14.31</i>	<i>pluim gaat niet door scanvlak</i>
<i>Seaturbot</i>	<i>af</i>	<i>14.30-14.35</i>	<i>pluim gaat niet door scanvlak</i>
Stena Forecaster	af	14:41-14:44	2,8
			1,9
			2,0

3.6 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 2.4) 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 3-6. Het gemiddelde van deze zes getallen is een inschatting van de onderste bepalingsgrens, en is 0,1 gram SO₂ per seconde.

Tabel 3-6. 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
<i>gemiddelde</i>	<i>0,1 ± 0,1</i>

3.7 Overzicht van alle meetresultaten

In totaal 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 3-7.

Tabel 3-7. Overzicht meetdagen.

- 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.

datum	schepen gemeten ^a	schepen emissiegetal ^b	windsnelheid (m/s) ^c	windrichting (°) ^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
<i>alle dagen</i>	<i>42</i>	<i>24</i>		

Er zijn 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. Op 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.

Tabel 3-8. Resultaten emissiemetingen.

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

In Tabel 3-8 wordt voor elk gemeten schip een gemiddeld emissiegetal gegeven, met een standaardafwijking. Dit getal is het gemiddelde van de twee tot zeven emissiegetallen zoals gegeven in Tabel 3-1 tot en met Tabel 3-5. De standaardafwijking is een maat voor de variatie in de individuele emissiegetallen. Ook het aantal emissiegetallen is gegeven.

4 Discussie, conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste kenmerken van de lidarmethode besproken. In paragraaf 4.1 wordt geanalyseerd welke factoren bepalen of de lidarmeting met succes een waarde voor de zwaveldioxide-uitstoot oplevert. Vervolgens worden in paragraaf 4.2 een aantal prestatiekenmerken van de methode besproken, zoals precisie, onderste bepalingsgrens en selectiviteit. Het hoofdstuk eindigt met de belangrijkste conclusies van de hele studie.

4.1 Factoren die de slaagkans van de lidarmeting bepalen

In de studie blijkt dat de meettechniek voor ruim de helft van de passerende schepen een emissiegetal heeft opgeleverd. In het onderstaande worden de factoren besproken die samen bepalen of met de lidartechniek een emissiegetal kan worden verkregen. Aan het eind van het hoofdstuk worden de resultaten samengevat in een kader.

Rol windrichting

De meetwagen heeft tijdens de studie 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 90 graden van de windroos). Alleen bij deze windrichtingen waren scanvlakken te vinden die enerzijds min of meer haaks op de rookpluim staan en anderzijds dicht genoeg bij de schepen liggen voor de meting. Gelukkig komt wind uit deze windrichtingen veel voor in Nederland. Niettemin speelde de windrichting tijdens deze studie een belangrijke beperkende rol bij de inzet. Dit is deels toe te schrijven aan ongelukkig toeval: tijdens de voor de studie gereserveerde meetweken zat de wind meer dan gemiddeld in de verkeerde hoek. Niettemin kan geconcludeerd worden dat het voor operationele inzet wenselijk is om te kunnen beschikken over meerdere meetlocaties, geschikt voor verschillende windrichtingen. Het zal dan makkelijker zijn om een gepland aantal meetdagen te kunnen realiseren in een aangegeven periode.

Rol windsnelheid

De studie 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. Op dagen met een geringe windsnelheid werken een aantal factoren tegen een geslaagde SO₂-meting:

- de pluimen van de schepen verspreiden zich meer, 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 variabeler. 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 de studie wel 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 studie in verband met de naderende deadline gekozen worden voor minder geschikte meetdagen.

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% van de tijd, aan de kust wat minder.

Ten slotte moet nog worden vermeld dat dezelfde meetauto ook wordt ingezet voor andere milieumetingen (zie pagina 7). 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. Is aan deze voorwaarden voldaan dan 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 het paragraaf worden de resultaten samengevat in een kader.

Precisie

In hoofdstuk 3 wordt 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 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?

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. De schepen varen een bochtig circuit op de Westerschelde. Tijdens de meetdagen kon meermaals aan de hand van de roetuitstoot worden vastgesteld dat “gas gegeven werd”. De werkelijke uitstoot is dus niet altijd een constante.

De nauwkeurigheid van de lidarmeting zelf

De lidarmeting 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 lidar-concentratiemeting. In Bijlage 1 wordt hier nader op in gegaan.

Het is op basis van de studie niet mogelijk om een onderscheid te maken welke van de bovenstaande factoren, echte emissievariëaties of meetonnauwkeurigheid, 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 lidarmeting, door aan te nemen dat de emissies van de schepen helemaal niet varieert. In Bijlage 1 wordt deze analyse uitgewerkt. Afgeleid wordt dat voor de onnauwkeurigheid van de lidarmeting een bovenlimiet geldt van ongeveer 20%. Deze bovenlimiet bevat echter ook de uitstootvariëaties van de schepen. Er zijn aanwijzingen dat de lidarmethode zelf nauwkeuriger is, omdat voor een aantal schepen veel preciezere resultaten worden verkregen.

Onderste bepalingsgrens

Zoals weergegeven in paragraaf 3.6 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.

Selectiviteit

De selectiviteit van de lidarmethode wordt bepaald door het al dan niet bestaan van gassen naast het doelgas (hier SO₂) 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 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 (NO₂). 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 NO₂ blijkt veel geringer dan voor SO₂. De lidar is bij de in de studie gebruikte kleuren ruim 400 keer gevoeliger voor SO₂. De gevoeligheid is bovendien tegengesteld van teken: een concentratie NO₂ van +428 µg/m³ wordt gezien als een concentratie van SO₂ van -1 µg/m³. 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. Ze zijn dus van dezelfde orde als, of kleiner dan de zwaveldioxide-emissie. 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 lidarmeting uit te zoeken. Een dergelijke studie viel echter buiten het bestek van dit onderzoek.

Samenvatting prestatiekenmerken lidarmeting

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

De kleinste zwaveldioxide-uitstoot die de methode kan detecteren werd vastgesteld op 0,1 gram per seconde. De gemeten scheepsemisies 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 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% 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 lidartechniek 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 pluimanalyse met doorrekening naar de effecten op de lidarmeting. Voor de meeste componenten kan echter op eenvoudige wijze via een beperkte literatuurstudie of een kort spectroscopisch onderzoek een afweging worden gemaakt.

5 Conclusies

Dit onderzoek toont in praktijk aan dat het mogelijk is om op afstand vanaf de wal de zwaveldioxide-uitstoot van langsvarende zeeschepen te bepalen. Het gebruikte meetsysteem is ondergebracht in een meetwagen die geheel zelfvoorzienend is. De gebruikte methode is volledig operationeel en beschikbaar voor de VROM-Inspectie als opsporings- of screeningstechniek op schepen die zwavelrijke en zwavelarme brandstoffen gebruiken.

Het instrument heeft op dit moment een afstands bereik van 2,5 kilometer en een onderste bepalingsgrens van 0,1 gram per seconde. Een bovengrens van circa 20% kon worden vastgesteld voor de onnauwkeurigheid van de typische emissiebepaling van één schip, met de lidartechniek. Deze bovengrens van 20% bevat ook de variabiliteit van de scheepsemisies. De resultaten van enkele individuele schepen suggereren dat de precisie van de lidarmethode zelf mogelijk (veel) beter is.

In tegenstelling tot de verwachting vooraf is in de studie gebleken dat de beste resultaten worden verkregen bij wat hogere windsnelheden (vanaf vijf meter per seconde, windkracht 3 Beaufort). Bij deze windsnelheden zijn de nauwkeurigheid en de slaagkans van de meting het hoogst.

Het belangrijkste voordeel van de methode is dat de meting op afstand wordt gedaan en men op het schip hierdoor niet weet dat de meting plaatsvindt. Een tweede belangrijk voordeel is dat – in tegenstelling tot de praktijk bij conventionele methoden – nagenoeg elk langsvarend schip kan worden gemeten. Dit levert een belangrijke efficiencywinst op.

Belangrijk nadeel is dat vanaf één gegeven meetlocatie slechts bij een beperkt aantal windrichtingen kan worden gemeten. Om de inzetbaarheid en planbaarheid te verhogen is het dus gewenst om te beschikken over meerdere meetlocaties, geschikt voor verschillende windrichtingen.

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. Voor de handhaving bieden de metingen van de lidar dan ondersteuning bij het selecteren van de schepen waarbij aan boord gegaan wordt voor de inzet van andere methoden.

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 deze inzet realistisch. Door het ontbreken van gegevens over brandstofverbruik in deze studie kan dit op dit moment niet nader worden onderbouwd.

De lidar meet de feitelijke uitstoot van het schip. Door in de regelgeving niet uitsluitend eisen aan de brandstof te stellen, maar ook aan de feitelijke uitstoot kan de lidarmethode beter bijdragen aan de handhaving.

Op het vasteland worden zwaveldioxide-emissies van industriële installaties beperkt door vergunningen. Deze worden verleend aan de hand van de Nederlandse emissierichtlijn lucht (NeR, april 2003), die nadere eisen stelt aan bronnen boven de 2 kg zwaveldioxide per uur (0,56 gram per seconde). De uitstoot van de gemeten zeeschepen bleek daar in alle 24 gevallen boven te liggen. De hoogst gemeten uitstoot bedroeg 36 gram per seconde. Aandacht voor de zeescheepvaart als bron van luchtverontreiniging is dus van belang, zowel bij regelgeving als bij handhaving.

Literatuur

Broekman, M.H. Luchtemissie van schadelijke stoffen bij zeeschepen. RIVM briefrapport 20061064 IMD, 7 april 2006.

Dankwoord

De auteurs spreken hun dank uit voor de medewerking en gastvrijheid van het personeel van de verkeerscentrale Hansweert van Rijkswaterstaat.

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 Bepaling van de precisie van de emissiemeting

In hoofdstuk 3 wordt 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 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. De schepen varen een bochtig circuit op de Westerschelde. 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. In dit onderzoek worden echter de gegevens van de meetmast van Rijkswaterstaat gebruikt (zie pagina 13) op een afstand van enkele kilometers van de rookpluim (zie ook Figuur 2-4). Een studie van de variabiliteit van deze windgegevens laat zien dat hierdoor een onzekerheid van circa 10% 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 lidarscan van 45 seconden beweegt de laserbundel in negen 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 overal gelijktijdig gemeten, maar gescand van onder naar boven. In de 45 seconden beweegt de pluim echter ook: veelal beweegt de pluim-as in een slingerbeweging, zowel van hoog naar laag en terug als van links naar rechts en terug. Dit heet “meanderen” en is in Figuur 3-4 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.

Rol nauwkeurigheid concentratiemeting

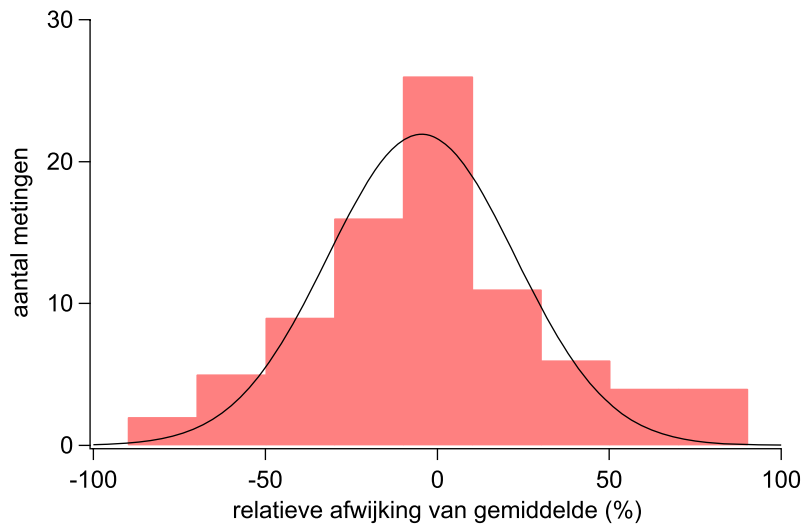
De concentratiebepaling op afstand met lidar kent zijn eigen onnauwkeurigheden. Omdat slechts een korte meettijd per meetrichting beschikbaar is wordt de concentratiebepaling gedaan aan de hand van een relatief ruisrijk echosignaal. De onnauwkeurigheid van de vastgestelde hoeveelheid SO₂ in de pluim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

- (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 (“gasgeven”).
- (2) Voor elk schip wordt de gemiddelde uitstoot bepaald op basis van alle geslaagde scans (Tabel 3-8). 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, terwijl alle gemiddelden op 100% liggen.
- (3) Vervolgens worden de duidelijkste gevallen van “gasgeven” 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. Dit betrof 2 van de 24 schepen in de studie.
- (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 zijn weergegeven in Figuur B-1.



Figuur B-1. 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% (1 sigma).

Geconcludeerd wordt dat de individuele scans een 1-sigma spreiding hebben van 38%. Een typisch emissiegetal voor een schip, zoals gegeven in Tabel 3-8, wordt bepaald als het gemiddelde van vier scans, en heeft dan een precisie van 19% (1 sigma).

Opgemerkt moet worden dat 19% een schatting is voor de bovengrens van de precisie van de lidarmetmethode op basis van nagenoeg alle geslaagde scans in de studie. 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 lidarmeting 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 contrast met MSC London: 24 ± 6 gram per seconde, in beide gevallen vijf scans en een vergelijkbare emissie). Om de precisie van de lidaremissiemeting zelf vast te stellen zijn herhaalde metingen nodig aan een bron van constante sterkte. Deze waren geen onderdeel van de proefstudie maar worden als vervolgonderzoek voorgesteld.